Enríquez Harper

Máquinas eléctricas

LIMUSA
NORIEGA EDITORES

MÁQUINAS ELÉCTRICAS

CAPÍTULO 1

CIRCUITOS MAGNÉTICOS

1.1 INTRODUCCIÓN 13
1.2 LOS CAMPOS MAGNÉTICOS 14
1.3 EL CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UN CONDUCTOR QUE CONDUCE UNA CORRIENTE ... 17
1.4 CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UNA BOBINA 18
1.5 RELACIONES MAGNÉTICAS 20
1.6 LA CURVA DE VACÍO B-H 26
1.7 ANALOGÍAS ENTRE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO 30
1.8 HISTÉRESIS MAGNÉTICA Y PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS 40
1.9 INTERACCIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS 45

CAPÍTULO 2

GENERADORES DE CORRIENTE DIRECTA

2.1 INTRODUCCIÓN 53
2.2 CONSTRUCCIÓN 64
2.3 EL VOLTAJE GENERADO 76
2.4 LOS POLOS MAGNÉTICOS 87
2.5 CONEXIONES DE LOS GENERADORES 91
2.6 OPERACIÓN DE GENERADORES EN ESTADO ESTABLE 102
2.7 EFICIENCIA 113

CAPÍTULO 3

MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

3.1 INTRODUCCIÓN 119
3.2 LA FUERZA CONTRA ELECTROMOTRIZ EN LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA 120
3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE C.D. 123
3.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA 127
3.5 LAS CONEXIONES DE LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA 136
3.6 EL ARRANQUE DE LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA 145
3.7 EL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA DE IMÁN PERMANENTE 158
3.8 MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA SIN ESCOBILLAS 163

CAPÍTULO 4

GENERADORES SÍNCRONOS

4.1 INTRODUCCIÓN 165
4.2 LA CONSTRUCCIÓN DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS 166
4.3 LOS GENERADORES TRIFÁSICOS 180
4.4 DEVANADOS DE ARMADURA 183
4.5 LA MAGNITUD DEL VOLTAJE GENERADO 191
4.6 LA REACTANCIA E IMPEDANCIA SÍNCRONA DE UN GENERADOR 207
4.7 LA POTENCIA DESARROLLADA 226
4.8 PÉRDIDAS Y EFICIENCIA 231
4.9 LA REACTANCIA TRANSITORIA 235
4.10 SINCRONIZACIÓN DE UN GENERADOR 236

CAPÍTULO 5

TRANSFORMADORES

5.1 INTRODUCCIÓN 251
5.2 EL TRANSFORMADOR ELEMENTAL 253
5.3 LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR 258
5.4 LOS DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR 264
5.5 LOS AISLAMIENTOS EN TRANSFORMADORES 272
5.6 MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO DE TRANSFORMADORES 273
5.7 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS 279
5.8 POTENCIA EN LOS TRANSFORMADORES 283
5.9 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO 288
5.10 REGULACIÓN DE VOLTAJE 294
5.11 PRUEBAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y EL RENDIMIENTO DE UN TRANSFORMADOR 294
5.12 LA PRUEBA DE VACÍO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN EL HIERRO O NÚCLEO 301
5.13 LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO 308

CAPÍTULO 6

LA OPERACIÓN EN PARALELO Y LAS CONEXIONES DE TRANSFORMADORES

6.1 INTRODUCCIÓN 323
6.2 POLARIDAD DE UNA BATERÍA 324
6.3 EFECTO DE LAS DISTINTAS RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN EN LA OPERACIÓN EN PARALELO 335
6.4 LOS VALORES DE IMPEDANCIAS EN PORCIENTO Y EN POR UNIDAD 346
6.5 DISTRIBUCIÓN DE CARGA ENTRE TRANSFORMADORES EN PARALELO 347
6.6 LA CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES 354
6.7 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS 361
6.8 CONEXIONES COMUNES DE LOS TRANSFORMADORES 366

CAPÍTULO 7

MOTORES DE INDUCCIÓN

7.1 INTRODUCCIÓN 383
7.2 LA CONSTRUCCIÓN DEL ESTATOR 384
7.3 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN 399
7.4 EL DESLIZAMIENTO 402
7.5 LA CORRIENTE EN EL ROTOR 406
7.6 EL PAR DE ARRANQUE 411
7.7 POTENCIA DE SALIDA DEL ROTOR 413
7.8 MOTORES MONOFÁSICOS DE CORRIENTE ALTERNA 424
7.9 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS A MOTORES MONOFÁSICOS 432
7.10 LOS DEVANADOS DEL ESTATOR 436
7.11 EL ARRANQUE DEL MOTOR 438
7.12 MOTORES DE ARRANQUE CON CAPACITOR 439
7.13 MOTORES DE FASE PARTIDA CON CAPACITOR PERMANENTE 444
7.14 MOTORES DE INDUCCIÓN REPULSIÓN 445
7.15 MOTOR DE POLOS SOMBREADOS 448
7.16 MOTORES UNIVERSALES 451

CAPÍTULO 8

MOTORES SÍNCRONOS

8.1 INTRODUCCIÓN 455
8.2 CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO 455
8.3 ARRANQUE DE UN MOTOR SÍNCRONO 459
8.4 CÁLCULOS PARA EL MOTOR OPERANDO BAJO CARGA 465
8.5 AJUSTE DE LA EXCITACIÓN EN EL CAMPO 471
8.6 LOS DIAGRAMAS FASORIALES 475
8.7 EL FLUJO DE POTENCIA 482
8.8 ÁNGULOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS 486
8.9 EFICIENCIA 489
8.10 LAS CURVAS V DE LOS MOTORES SÍNCRONOS 499
8.11 EL CONDENSADOR SÍNCRONO 506
8.12 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN PLANTAS INDUSTRIALES 508

BIBLIOGRAFÍA 512

1 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Las máquinas eléctricas rotatorias y los transformadores tienen circuitos eléctricos y circuitos magnéticos interconectados a través de un medio que es el flujo magnético, las corrientes eléctricas fluyen a través de los circuitos eléctricos que son conductores eléctricos y bobinas, en tanto que los flujos magnéticos "fluyen" a través de circuitos magnéticos que están hechos de núcleos de fierro. La interacción entre las corrientes y los flujos es la base del principio de conversión de la energía electromecánica, que tiene lugar en los generadores y en los motores eléctricos. En el caso de los transformadores, se piensa más en términos de transferencia de energía.

En los dispositivos de conversión de la energía se convierte la energía mecánica en energía eléctrica (acción del generador), o bien el proceso inverso (acción del motor). En el caso de los transformadores, la transferencia de energía está normalmente asociada con el cambio en los niveles de voltaje y corriente; por lo que se observa que los circuitos magnéticos juegan un papel importante en las máquinas eléctricas rotatorias y en los transformadores.

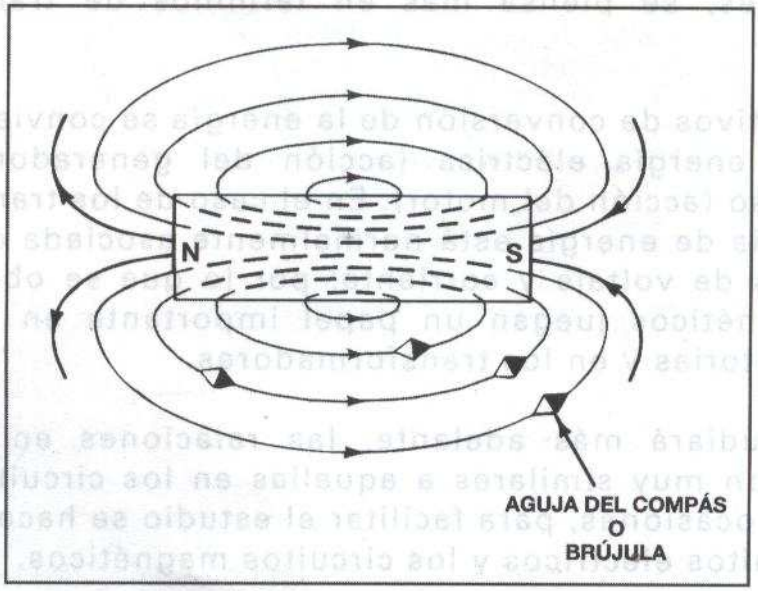
Como se estudiará más adelante, las relaciones en los circuitos magnéticos son muy similares a aquellas en los circuitos eléctricos, por lo que en ocasiones, para facilitar el estudio se hace una analogía entre los circuitos eléctricos y los circuitos magnéticos.

1.2 Los campos magnéticos

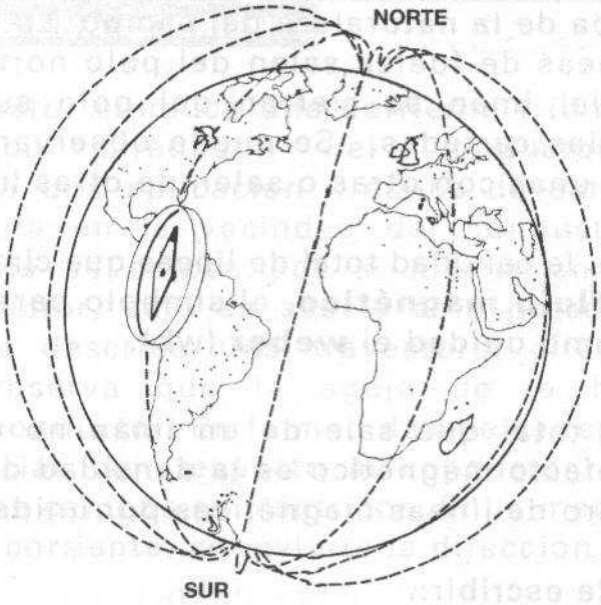
Si se revisan los conceptos elementales de física, se encuentra que el campo magnético se localiza alrededor de un imán de tipo barra o de tipo herradura. Con los primeros instrumentos de campo magnético, se estableció la dirección de este campo, este instrumento era esencialmente un compás. La aguja de un compás está suspendida libremente y magnetizada, ya que es de acero. En la región circundante al imán, se puede determinar la fuerza magnética en varios puntos.

El extremo marcado de la aguja del compás apunta siempre hacia el polo norte magnético, así que aún cuando los polos magnéticos se atraen y en otras ocasiones se repelen, el extremo marcado de la aguja del compás está realmente hacia el polo sur.

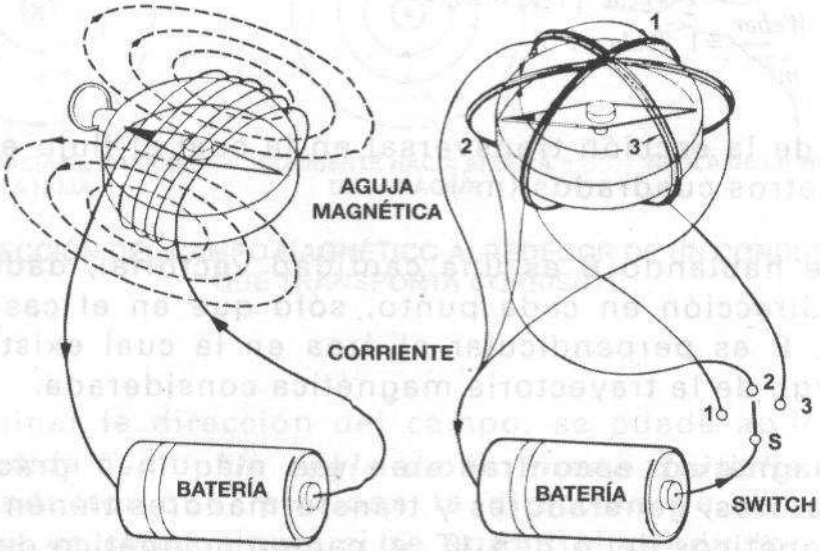
Si se va graficando la dirección de la aguja del compás y moviendo lentamente del polo norte hacia el polo sur alrededor del imán de barra, se puede trazar un mapa del campo magnético, como se muestra en la siguiente figura, en donde se muestra también que la fuerza del campo magnético tiene una dirección definida en todos los puntos.



CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UN IMÁN



LA TIERRA TIENE UN POLO NORTE Y UN POLO SUR



PRINCIPIO DE UN MOTOR USANDO UNA AGUJA MAGNÉTICA

Las líneas de fuerza son imaginarias, pero ayudan en la formación de un panorama o mapa de la naturaleza del campo. La aguja del compás muestra que las líneas de fuerza salen del polo norte y entran por el polo sur, dentro del imán se cierran del polo sur al polo norte, formando trayectorias cerradas. Se puede observar también que las líneas no se cruzan unas con otras o salen de otras líneas magnéticas.

Al campo magnético, la cantidad total de líneas que circundan al imán, se le conoce como el **flujo magnético**, el símbolo para representar este flujo es ϕ y tiene como unidad el **weber** (wb).

El flujo magnético total que sale de un imán no es uniforme, una mejor medida del efecto magnético es la densidad de flujo magnético (B), que es el número de líneas magnéticas por unidad de superficie.

En fórmula se puede escribir:

$$B = \frac{\phi}{A} \quad Weber/m^2$$

A la unidad de B que es el Weber/m^2, se le ha dado un nombre especial: Tesla (T), por lo tanto:

1 tesla (CON MINÚSCULA)

$$\frac{1\ Weber}{m^2} = 1\ Tesla = 1\ T$$

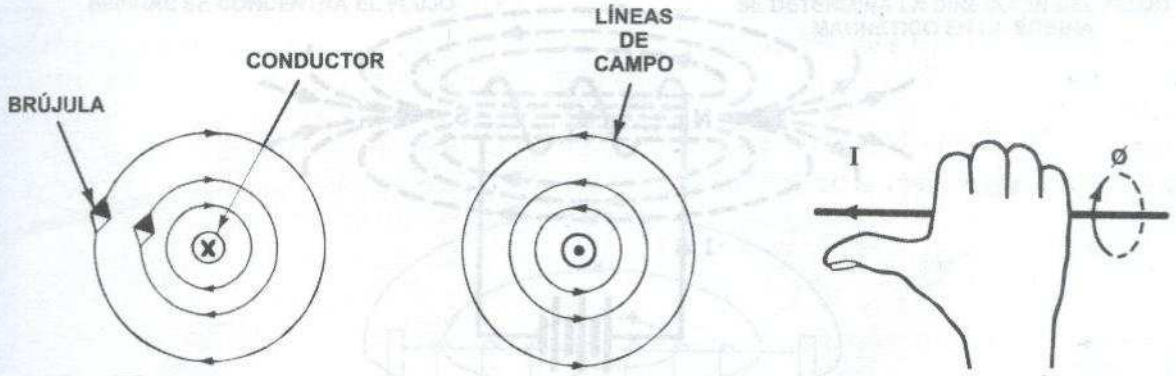
A es el área de la sección transversal en la cual el flujo existe y está medida en metros cuadrados (m^2).

Estrictamente hablando B es una cantidad vectorial, dado que tiene magnitud y dirección en cada punto, sólo que en el caso particular que se trata, B es perpendicular al área en la cual existe el flujo y actúa a lo largo de la trayectoria magnética considerada.

El campo magnético encontrado en las máquinas prácticas, tales como: los motores, generadores y transformadores tienen densidades de flujos magnéticos del orden 1T, el campo magnético de la tierra es del orden 10^{-5}T.

1.3 EL CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UN CONDUCTOR QUE CONDUCE UNA CORRIENTE

Cuando un conductor conduce una corriente I (amperes), se crea un campo magnético alrededor del conductor, los llamados electroimanes son una aplicación práctica de este fenómeno. Si se coloca una brújula en la vecindad del conductor que transporta corriente, la aguja se coloca por si misma en ángulo recto con respecto al conductor, esto se asocia a la presencia de un campo magnético. Si se describe una trayectoria circular alrededor del conductor, se observa que la aguja de la brújula permanece perpendicular al conductor. En la medida que se repite el experimento a grandes distancias con respecto al conductor, se demuestra que existe un campo en campos concéntricos. En la medida que se invierte la dirección de la corriente, se invierte la dirección del campo.



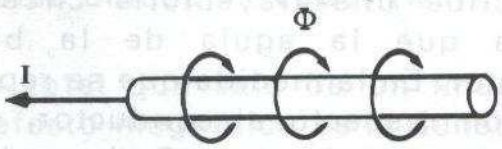
CORRIENTE HACIA EL INTERIOR DE LA HOJA | CORRIENTE HACIA AFUERA DE LA PÁGINA | REGLA DE LA MANO DERECHA

DIRECCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UN CONDUCTOR QUE TRANSPORTA CORRIENTE

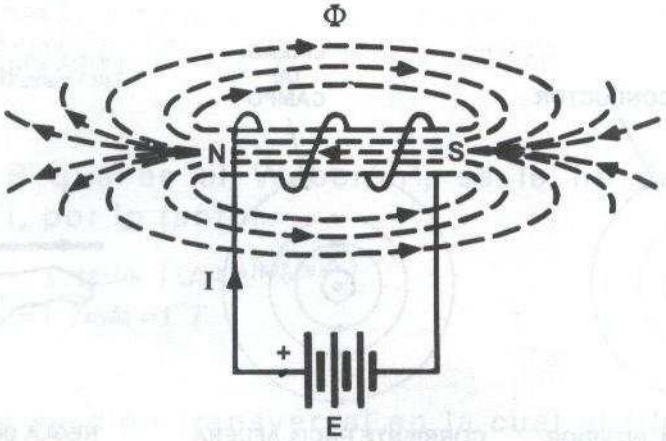
Para determinar la dirección del campo, se puede aplicar una regla simple conocida como ***"la regla de la mano derecha de ampere"*** para un conductor que relaciona la dirección de la corriente y el campo y que es como sigue: si se agarra el conductor con la mano derecha, con el dedo pulgar paralelo al conductor y apuntando en la dirección del flujo de corriente, los dedos apuntarán en la dirección del campo alrededor del conductor.

1.4 CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UNA BOBINA

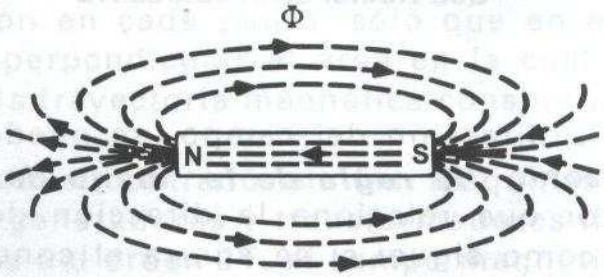
Para aumentar la intensidad del campo magnético, se puede construir una bobina de muchas espiras, en la siguiente figura se ilustra una bobina formada envolviendo un conductor alrededor de un tubo o núcleo de bobina. Se puede demostrar que la intensidad del campo magnético es directamente proporcional al número de espiras de la bobina y a la corriente que conduce. La dirección del campo se puede determinar por la ley de ampere.



A) ALREDEDOR DE UN CONDUCTOR QUE LLEVA CORRIENTE

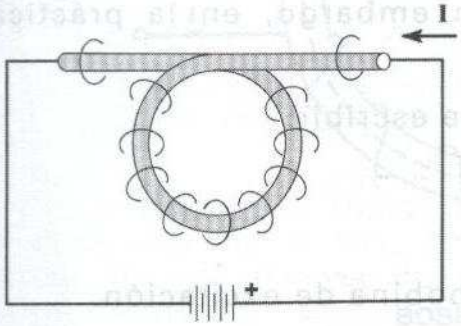


B) EN UNA BOBINA

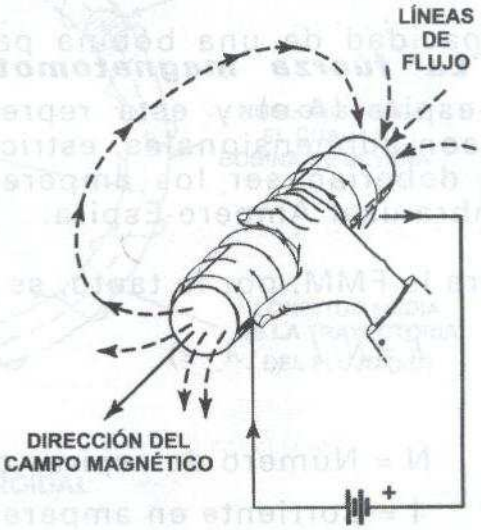


C) EN UN IMÁN

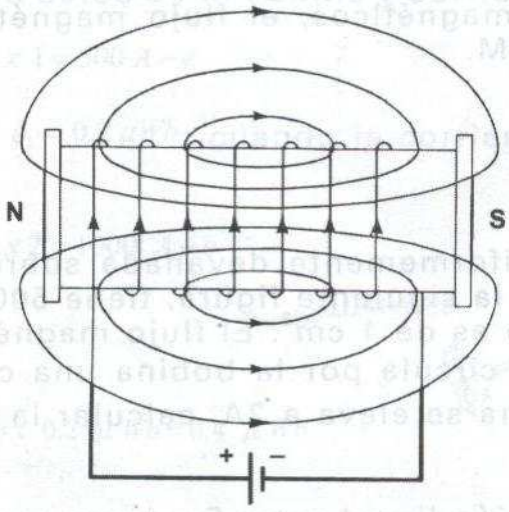
DIRECCIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO



A) EMBOBINANDO UN CONDUCTOR EN UNA O MÁS ESPIRAS SE CONCENTRA EL FLUJO



B) USANDO LA REGLA DE LA MANO DERECHA SE DETERMINA LA DIRECCIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO EN LA BOBINA



CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UNA BOBINA QUE LLEVA CORRIENTE

1.5 RELACIONES MAGNÉTICAS

1.5.1 LA FUERZA MAGNETOMOTRIZ

A la capacidad de una bobina para producir un flujo se le conoce como ***"La fuerza magnetomotriz"*** o FMM, sus unidades son ampere-espira (A-e) y está representada por F. Debido a que las espiras son adimensionales, estrictamente hablando, las unidades de la FMM deberían ser los amperes; sin embargo, en la práctica se acostumbra usar Ampere-Espira.

(A-e) para la FMM, por lo tanto, se puede escribir:

$$F = N \cdot I \qquad (A-e)$$

Donde:

N = Número de espiras de la bobina de excitación.

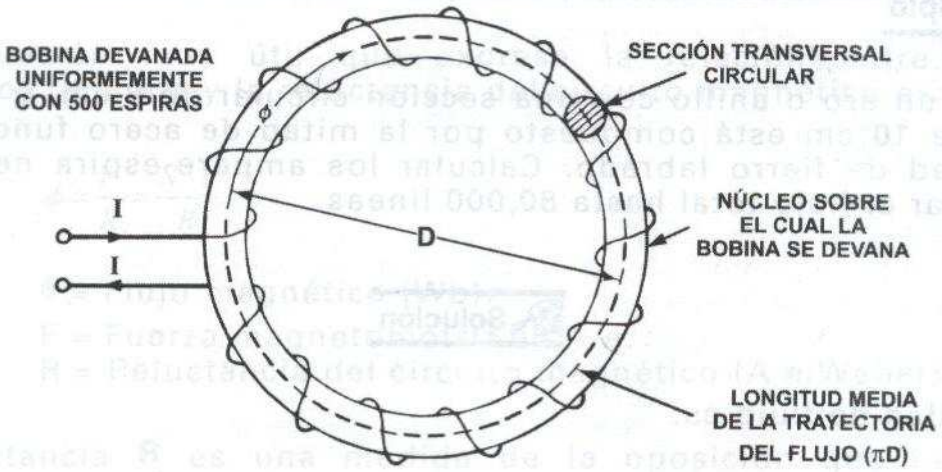
I = Corriente en amperes.

La fuerza magnetomotriz de una bobina que conduce corriente corresponde a una fuerza electromotriz (FEM) en un circuito eléctrico y se puede considerar como una "presión magnética", de la misma forma que la FEM se considera como una presión eléctrica, por lo tanto, en los circuitos eléctricos la FEM produce corriente y en los circuitos magnéticos la FMM produce flujo magnético. A excepción de los materiales ferromagnéticos, el flujo magnético es estrictamente proporcional a la FMM.

Ejemplo

Una bobina está uniformemente devanada sobre un aro de madera, como se muestra en la siguiente figura, tiene 500 espiras y la sección transversal del arillo es de 1 cm^2. El flujo magnético total (o toroide) es 0.2 μWb, cuando circula por la bobina una corriente de 1A, si la corriente de la bobina se eleva a 2A, calcular la densidad de flujo en el toroide.

Supóngase una relación lineal entre F y ϕ que es: $\phi \propto F$.



BOBINA TOROIDAL

Solución

Originalmente, con los datos de la bobina y corriente:

$$F = NI = 500 \ x \ 1 = 500 \ A-e$$

Y producen un flujo $\phi_1 = 0.2 \ \mu Wb$, cuando la corriente se aumenta a 2A se tiene:

$$F_2 = NI = 500 \ x \ 2 = 1000 \ \ A-e$$

Y se incrementa ϕ_2 a:

PROPORCIONALIDAD

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{F_2}{F_1} \qquad \phi_2 \propto F_2 \qquad \phi_1 \propto F_1$$

$$\frac{F_2}{F_1} x \ \phi_1 = \frac{1000}{500} \ x \ 0.2 \ \ \mu \ Wb = 0.4 \ \ \mu \ Wb$$

La densidad de flujo en el toroide es:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{0.4 \ x \ 10^{-6}}{1 \ x \ 10^{-4}} = 0.004T$$

Ejemplo

Se tiene un aro o anillo con una sección circular de 8 cm^2 y un radio medio de 10 cm está compuesto por la mitad de acero fundido y la otra mitad de fierro labrado. Calcular los ampere-espira necesarios para llevar el flujo total hasta 80,000 líneas.

Solución

La densidad de flujo es:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{80,000}{8} = 10,000 \frac{líneas}{cm^2}$$

Si se toman de datos de curvas de magnetización los ampere-espira por centímetro para el acero fundido:

$$A - e = 6.3$$

Los ampere-espira para el fierro labrado:

$$A - e = 12.2$$

Los ampere-espira totales para el acero fundido:

$$A - e_T = \pi \, x \, D \, x \, A - e = \pi \, x 10 \, x \, 6.3 = 198$$

Los ampere-espira totales para el fierro labrado:

$$= \pi \, x \, D \, x \, A - e = \pi \, x 10 \, x 12.2 = 383$$

Los ampere espira totales:

$$198 + 383 = 581$$

1.5.2 La reluctancia y la ecuación del circuito magnético

Una ecuación muy útil que expresa la relación entre el flujo magnético, la FMM y la reluctancia del circuito magnético es:

$$\phi = \frac{F}{R} = \frac{N \cdot I}{R}$$

Donde:

ϕ = Flujo magnético (Wb).

F = Fuerza magnetomotriz en A-e.

R = Reluctancia del circuito magnético (A-e/Weber).

La reluctancia **R** es una medida de la oposición que el circuito magnético presenta al flujo y es análoga a la resistencia en un circuito eléctrico. La reluctancia de un circuito magnético o sección de un circuito magnético está relacionada con su longitud, área de la sección transversal y la permeabilidad del material de que está hecho el circuito magnético, de la ecuación anterior:

$$R = \frac{N.I}{\phi}$$

1.5.3 La intensidad del campo magnético

La intensidad del campo magnético se conoce también como el gradiente de la fuerza magnetomotriz (FMM) por unidad de longitud de un circuito magnético o sección de un circuito magnético y es numéricamente igual a los ampere-espira aplicados al circuito magnético (o sección) dividido por la longitud efectiva del circuito magnético, que es:

$$H = \frac{F}{\ell} = \frac{N \cdot I}{\ell}$$

Donde:

H = Intensidad del campo magnético en A-e/m

ℓ = Longitud media del circuito magnético.

F = Fuerza magnetomotriz (A-e).

De acuerdo con esto, la reluctancia también se puede expresar como:

$$R = \frac{NI}{\phi} = \frac{N \cdot I/\ell}{\phi/\ell} = \frac{H}{B \cdot A/\ell} = \frac{\ell}{(B/H) \cdot A}$$

Si se define la permeabilidad del material como:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Entonces:

$R = \frac{\ell}{\mu A}$, para secciones homogéneas de un circuito magnético, de sección transversal uniforme.

Donde:

B= Densidad del flujo (Wb/m^2) o Tesla (T).

H= Intensidad del campo magnético (A-e/m).

ℓ = Longitud media del circuito magnético (m).

A= Área de la sección transversal (m^2).

μ = Permeabilidad del material (Wb/A-e-m).

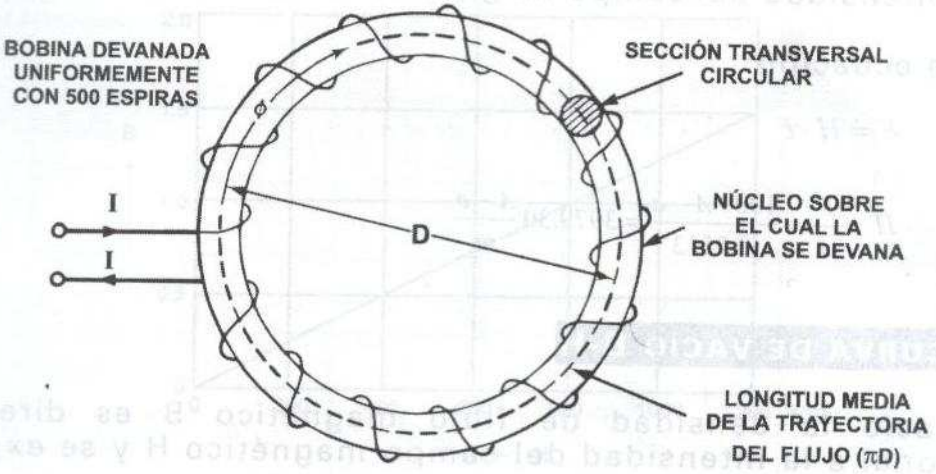
Ejemplo

Para el núcleo torodoidal mostrado en la siguiente figura, que tiene 500 espiras, si la corriente I=2A, la sección transversal es de 1 cm^2, el flujo de 0.5 μWb.

a. La reluctancia de la trayectoria del flujo magnético.

b. La circunferencia media de la trayectoria del flujo.

c. La intensidad del campo magnético en el núcleo.



BOBINA TOROIDAL

Solución

a) Para la trayectoria no magnética

$$R = \frac{1}{\mu o A} \quad o\ bien \quad R = \frac{F}{\phi}$$

Por lo tanto: Si $F = N\,x\,I = 500\,x\,2 = 1000\ A-e$

$$R = \frac{1000}{0.5\,x\,10^{-6}} = 2000\,x\ 10^{6}\,Ae/Wb$$

b) La circunferencia media de la trayectoria del flujo.

$\ell = \mu AR,$

μ=Permeabilidad del espacio o de los materiales no magnéticos.

$\mu o = 4\pi\,x\,10^{-7}\,H/m$

$\ell = 4\pi\,x\,10^{-7}\ x\,1\,x\,10^{-4}\,x\,2000\,x\,10^{6} = 0.25132\,m$

$\ell = 25.13\,cm$

c) La intensidad del campo magnético en el núcleo.

De la ecuación:

$$F = H \cdot \ell$$

$$H = \frac{F}{\ell} = \frac{1000\,A-e}{0.2513} = 3979.30\,\frac{A-e}{m}$$

1.6 La curva de vacío B-H

En el vacío la densidad de flujo magnético B es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético H y se expresa por medio de la ecuación:

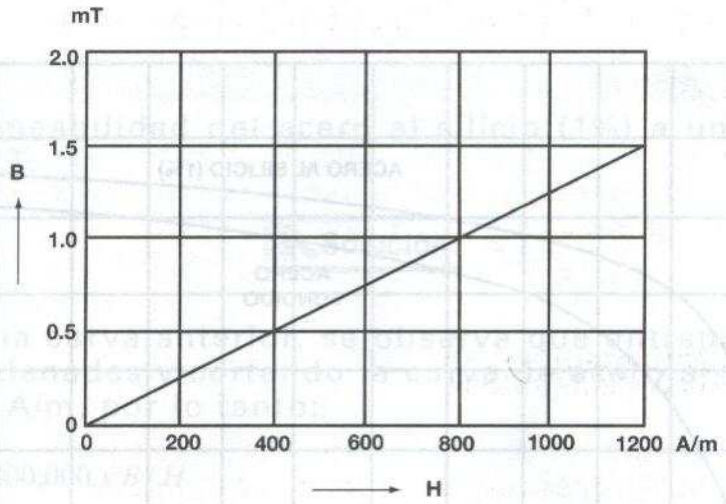
$$B = \mu o H$$

Donde:

B = Densidad del flujo en Tesla.
H = Intensidad del campo magnético $[A/m]$
μo= Constante magnética $= 4\pi\, x 10^{-7}$

La curva B-H de vacío es una línea recta, como se sabe, el vacío nunca se satura sin importar que tan grande puede ser la densidad del flujo.

Esto se muestra en la siguiente figura, donde se observa que una intensidad de campo de 800 A/m produce una densidad de flujo de 1militesla. Los llamados materiales no magnéticos, tales como el cobre, papel, hule y el aire, tienen curvas B-H casi idénticas a la del vacío.



CURVA B-H DE VACÍO Y DE MATERIALES NO MAGNÉTICOS

1.6.1 CURVA B-H DE UN MATERIAL MAGNÉTICO

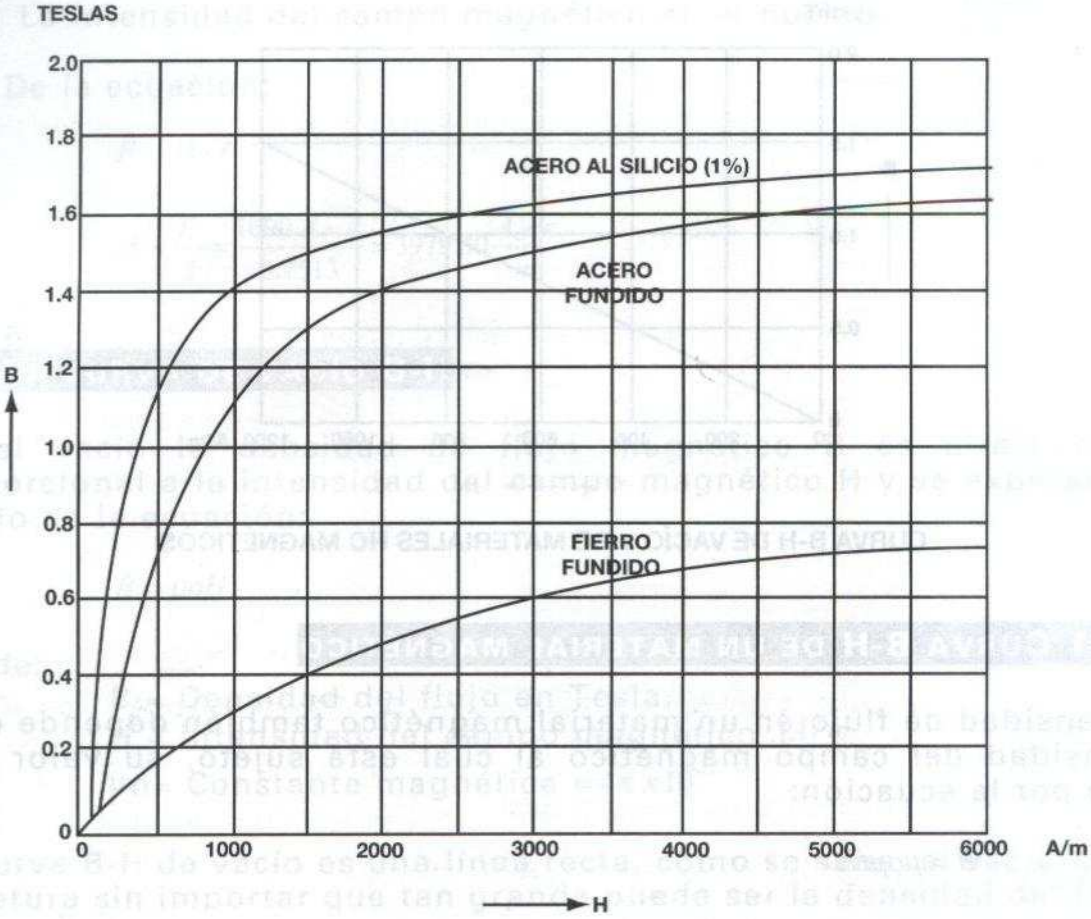
La densidad de flujo en un material magnético también depende de la intensidad del campo magnético al cual está sujeto, su valor está dado por la ecuación:

$$B = \mu o \mu r H$$

Donde B, μo y H ya se han descrito antes y μr = permeabilidad relativa del material

El valor de μr no es constante, ya que varía con la densidad del flujo del material, en consecuencia, la relación entre B y H no es lineal y esto hace que la ecuación anterior sea impráctica en la aplicación, por lo que se prefiere mostrar la relación B-H por medio de curvas como la siguiente, que es una curva típica de saturación para tres materiales usados comúnmente en las máquinas eléctricas, que son: acero al silicio, acero fundido y fierro fundido.

En estas curvas se muestra que una intensidad de campo de 2000 A/m produce una densidad de flujo de 1.4 T en el acero fundido, pero de sólo 0.5 T en el fierro fundido.



CURVA DE SATURACIÓN B-H PARA TRES MATERIALES MAGNÉTICOS

La permeabilidad relativa μr de un material es la relación de la densidad de flujo en el material a la densidad de flujo que se producirá en vacío, bajo la misma intensidad del campo magnético H. Dada la curva de saturación de un material magnético, se puede calcular la permeabilidad magnética usando la ecuación aproximada:

$$\mu r = 800{,}000\, B / H$$

Donde:

B = Densidad del flujo magnético en Tesla.
H = Intensidad del campo magnético [A/m].

Ejemplo

Calcular la permeabilidad del acero al silicio (1%) a una densidad de flujo (B) de 1.6 T.

Solución

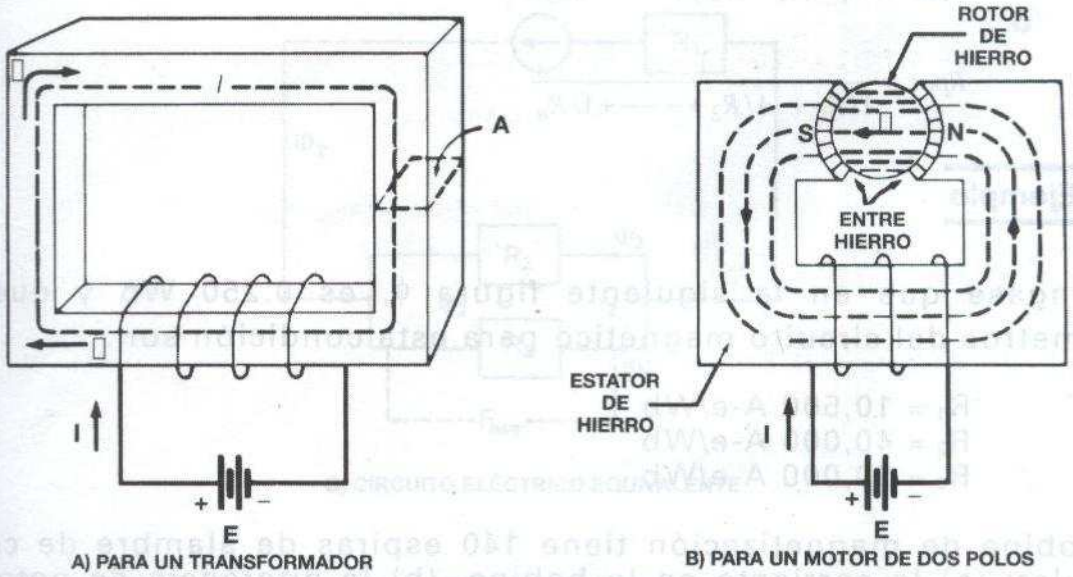
Refiriéndose a la curva anterior, se observa que entrando con 1.6T en el eje de las ordenadas y cortando la curva de acero al silicio (1%), se requieren 2500 A/m, por lo tanto:

$$\mu r = 800{,}000\, x\, B / H$$

$$= 800{,}000\, x\, 1.6 / 2500$$

$$\mu r = 512$$

Que significa que a este valor de densidad de flujo, el acero al silicio es 512 veces más permeable que el vacío (aire).



CIRCUITO MAGNÉTICO

1.7 ANALOGÍAS ENTRE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

Las relaciones entre la FMM, el flujo y la reluctancia en un circuito magnético es una analogía con la relación entre FEM y resistencia respectivamente en el circuito eléctrico.

$$\phi = \frac{F}{R} \quad ; \quad I = \frac{E}{R}$$

Donde:

ϕ corresponde a I
F corresponde a E
R corresponde a R

Continuando la analogía, la reluctancia equivalente en un arreglo de **n** reluctancias en serie es:

$$Rserie = R_1 + R_2 + R_3 + - - - + R_n$$

La reluctancia equivalente de **n** reluctancias en paralelo es:

$$\frac{1}{Rpar} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + - - - + \frac{1}{R_n}$$

ó

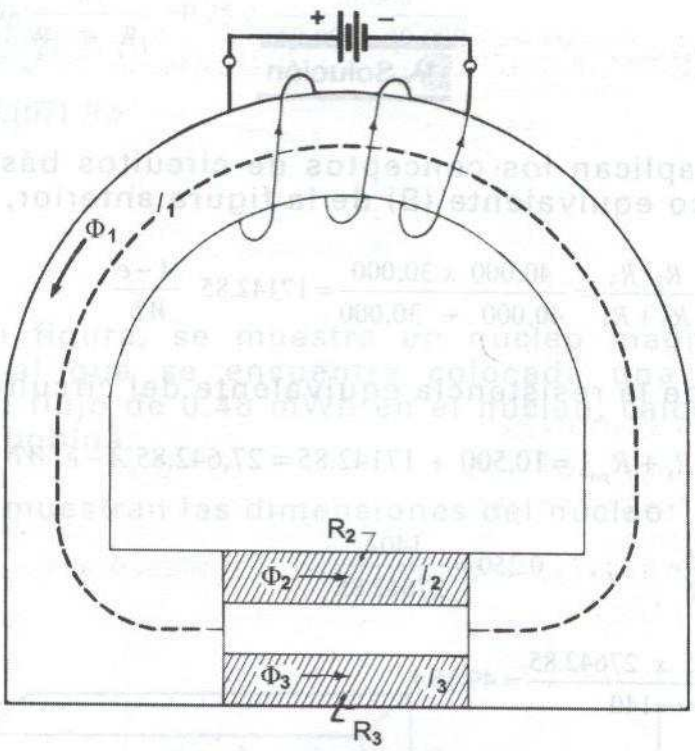
$$Rpar = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + - - - + 1/R_n}$$

Ejemplo

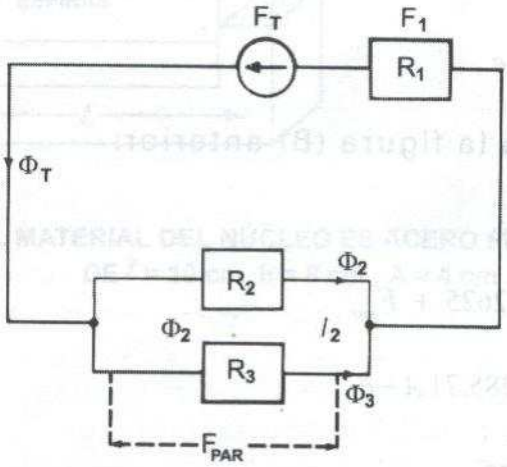
Supóngase que en la siguiente figura ϕ, es 0.250 Wb y que los parámetros del circuito magnético para esta condición son:

R_1 = 10,500 A-e/Wb
R_2 = 40,000 A-e/Wb
R_3 = 30,000 A-e/Wb

La bobina de magnetización tiene 140 espiras de alambre de cobre. Calcular: (a) la corriente en la bobina, (b) la diferencia de potencial magnético a través de R_3 y (c) El flujo en R_2.



A) DISPOSICIÓN FÍSICA



B) CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE

CIRCUITO MAGNÉTICO

Solución

(a) Si se aplican los conceptos de circuitos básicos al circuito magnético equivalente (B) de la figura anterior, se tiene:

$$Rpar = \frac{R_2\ R_3}{R_2 + R_3} = \frac{40{,}000\ x\ 30{,}000}{40{,}000\ +\ 30{,}000} = 17142.85\ \frac{A-e}{Wb}$$

El valor de la resistencia equivalente del circuito.

$$Rcir = R_1 + R_{par} = 10{,}500\ +\ 17142.85 = 27{,}642.85\ A-e/Wb$$

$$\phi_T = \frac{NI}{R}\ ;\quad 0.250 = \frac{140I}{27642.85}$$

$$I = \frac{0.25\ x\ 27642.85}{140} = 49.36A$$

(b) La caída magnética a través de R_1 es:

$$F_1 = \phi_T \cdot R_1 = 0.25\,x\,10{,}500$$

$$F_1 = 2625\ A-e$$

Refiriéndose a la figura (B) anterior:

$$F_T = F_H F_{par}$$

$$49.36\,x\,140 = 2625\ +\ F_{par}$$

$$F_3 = F_{par} = 4285.71\ A-e$$

(c) $\phi_2 = \frac{F_{par}}{R_2} = \frac{4285.75}{40000} = 0.1071Wb$

Usando la analogía magnética de la regla del divisor:

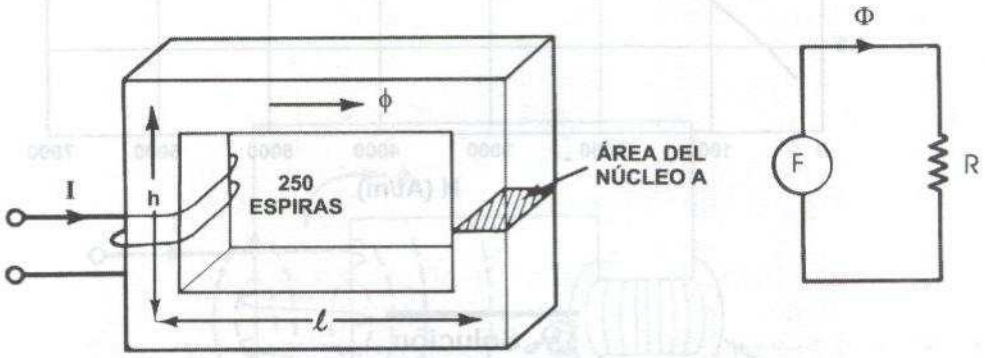
$$\phi_2 = \phi_T \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0.25\ x\ \frac{30{,}000}{40{,}000 + 30{,}000}$$

$$\phi_2 = 0.1071\ Wb$$

Ejemplo

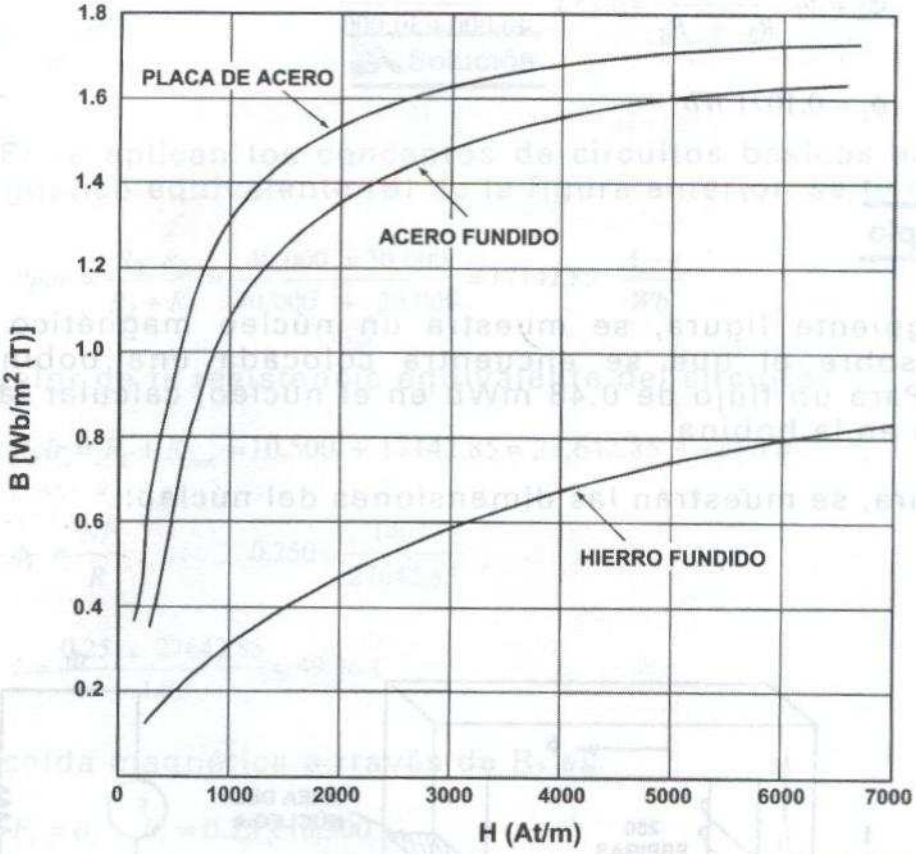
En la siguiente figura, se muestra un núcleo magnético de acero fundido sobre el que se encuentra colocada una bobina de 250 espiras. Para un flujo de 0.48 mWb en el núcleo, calcular la corriente necesaria en la bobina.

En la figura, se muestran las dimensiones del núcleo:



EL MATERIAL DEL NÚCLEO ES ACERO FUNDIDO
DE ℓ = 10 cm, h = 8 cm , A = 4 cm

U. T. F. S. M.
BIBLIOTECA CENTRAL



Solución

La densidad del flujo magnético es:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{0.48\ x\ 10^{-3}}{4\ x\ 10^{-4}} = 1.20T$$

Entrando a la curva de magnetización con B=1.20T, para acero fundido:

$$H = 1240\ Ae/m$$

De la figura para el núcleo magnético, la longitud media o promedio de la trayectoria del flujo es:

$$\ell + h + \ell + h = 2\ x\ 0.1\ +\ 2\,x\,0.08 = 0.36\,m$$

Por lo tanto:

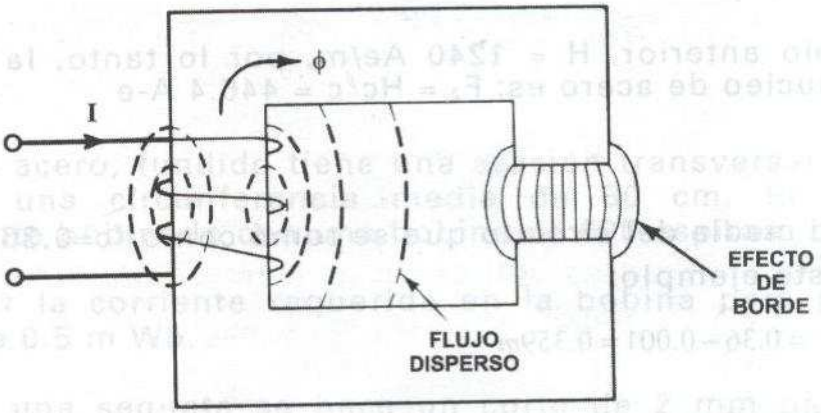
$$F = H \cdot \ell = 1240 \, x \, 0.36 = 446.4 \;\; A-e$$

De aquí:

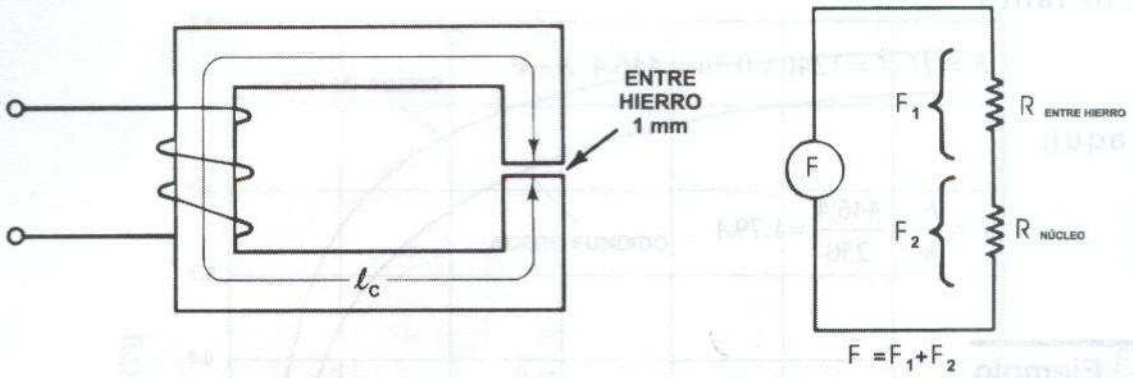
$$I = \frac{F}{h} = \frac{446.4}{250} = 1.79A$$

Ejemplo

Con el objeto de mostrar el efecto de un entrehierro en un circuito magnético, supónganse que en el núcleo del ejemplo anterior se corta un entrehierro de 1 mm de longitud, como se muestra en la siguiente figura. Calcular la corriente requerida para mantener el mismo flujo de 0.48×10^{-3} Wb.



FLUJOS DISPERSOS Y EFECTO DE FLUJO EN EL ENTRE HIERRO



CIRCUITO MAGNÉTICO Y SU CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE

Solución

La densidad de flujo

$$B = \phi / A = 1.2T$$

Y del ejemplo anterior, H = 1240 Ae/m, por lo tanto, la caída de la FMM en el núcleo de acero es: $F_2 = Hc\ell c = 446.4$ A-e

Donde:

ℓc= longitud media del circuito que se tomó como ℓc=0.36 m, ahora se tiene para este ejemplo:

$$\ell c = 0.36 - 0.001 = 0.359m$$

Para determinar F_1 se procede como sigue:

El flujo en el núcleo, penetra el entrehierro y sus efectos de dispersión se desprecian.

Si:

Bg = Densidad de flujo en el entrehierro.
Hg = Intensidad del campo (espacio de aire) en el entrehierro.

$$Bg = \frac{\phi}{A} = 1.2T$$

$$Bg = \mu o Hg$$

Entonces:

$$Hg = \frac{1.2}{4\pi x\ 10^{-7}} = 954.9\ x\ 10^{3}\ \frac{Ae}{m}$$

Y:

$$F_1 = Hg\ \ell g = 954.9\ x 10^{3}\ x 1\ x 10^{-3} = 954.9\ Ae$$

La FMM total requerida es entonces:

$$F = F_1 + F_2 = 954.9 + 446.4 = 1401 Ae$$

Y la corriente:

$$I = \frac{1401}{250} = 5.60 A$$

Ejemplo

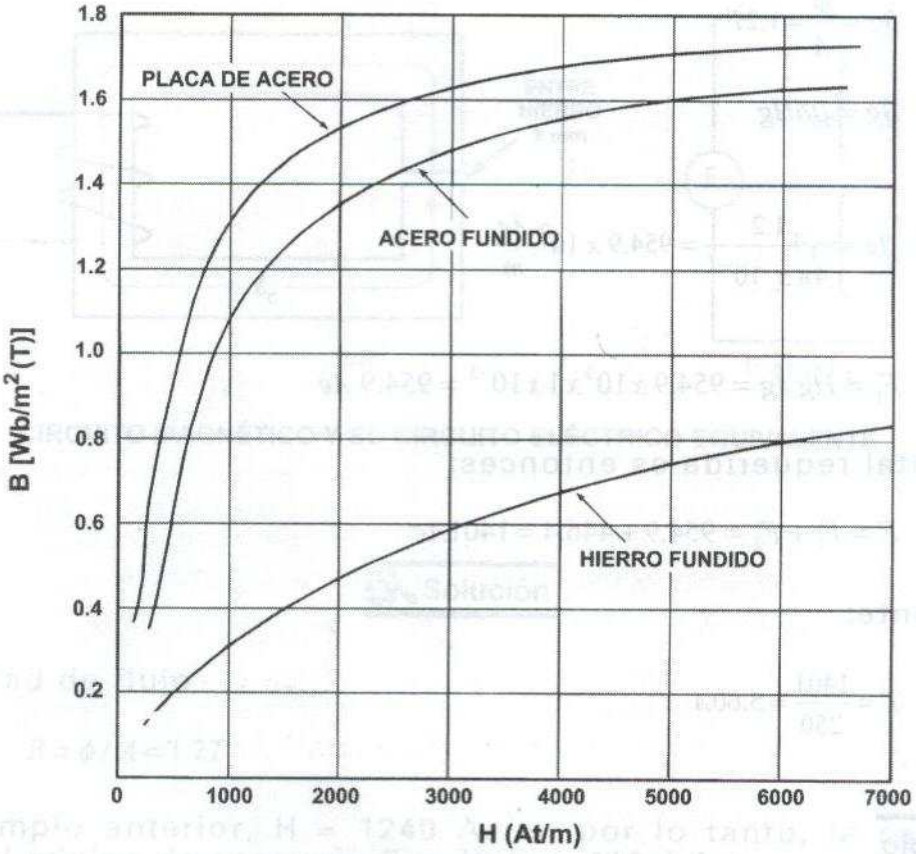
Un anillo de acero, fundido tiene una sección transversal de 3 cm de diámetro y una circunferencia media de 80 cm. El anillo está uniformemente bobinado con una bobina de 600 espiras.

a) Calcular la corriente requerida en la bobina para producir un flujo de 0.5 m Wb.

b) Si con una segueta se hace un corte de 2 mm para crear un entrehierro en el anillo, calcular el flujo producido en el entrehierro, con el valor de la corriente del inciso anterior.

c) Calcular la corriente que produciría el mismo flujo que en (a).

En la siguiente figura, se muestra la curva de magnetización de varios materiales magnéticos.



Solución

a) La sección transversal del anillo de 3 cm de diámetro:

$$A = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\ x\ 3^2\ x\ 10^{-4} = 7.07\ x\ 10^{-4}\ m^2$$

La densidad de flujo en el núcleo:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{0.5\ x\ 10^{-3}}{7.07\ x\ 10^{-4}} = 0.707\ Tesla$$

Entrando a la curva para acero fundido en la figura anterior, con B=0.707T se tiene:

$$H = 675\ Ae/m$$

La fuerza magnetomotriz:

$$FMM = F = H \cdot \ell = 675 \, x \, 0.8 = 540 \, Ae$$

$$F = NI$$

$$540 = 600I$$

$$I = \frac{540}{600} = 0.90A$$

b) La reluctancia:

$$R_{TOTAL} = R_{Núcleo} + R_{aire}$$

$$R_{núcleo} = \frac{F}{\phi} = \frac{540}{0.5 \, x \, 10^{-3}} = 1.08 \, x \, 10^{6} \, H^{-1}$$

$$R_{aire} = \frac{q}{\mu o A} >$$

q = espesor del entre hierro

μo = permeabilidad del aire

$$R_{aire} = \frac{2 \, x \, 10^{-3}}{4\pi \, x \, 10^{-7} \, x \, 7.07 \, x \, 10^{-4}} = 2.25 \, x \, 10^{6} \, H^{-1}$$

$$R_{Total} = (1.08 + 2.25) \, x \, 10^{6} = 3.33 \, x \, 10^{6} \, H^{-1}$$

El flujo en el entrehierro:

$$\phi_{aire} = \frac{F}{R_{Total}} = \frac{540}{3.33 \, x \, 10^{6}} = 0.162 \, mWb$$

c) Para mantener ϕ= 0.5 mWb

$$F = R\phi = 3.33 \, x \, 10^{6} \, x \, 0.5 \, x \, 10^{-3} \, A - e$$

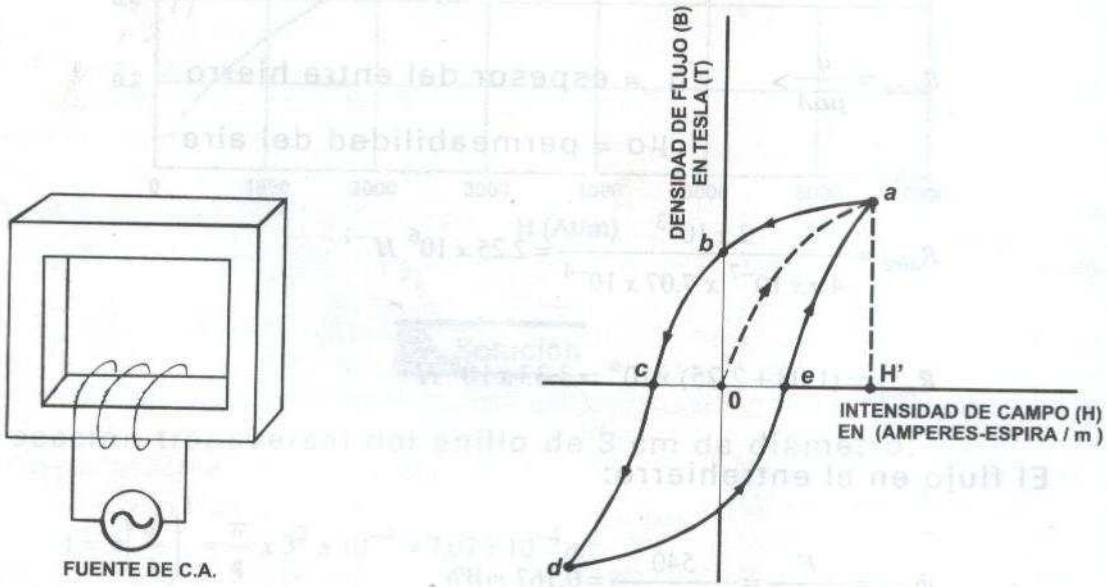
ó $F = NI = 1665 \, Ae$ De aquí: $I = \frac{1665}{600} = 2.775A$

1.8 HISTÉRESIS MAGNÉTICA Y PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS

Si se aplica una fuerza magnetomotriz de corriente alterna a un material magnético, como se muestra en la siguiente figura (A) y se gráfica la densidad de flujo (B) contra la intensidad del campo magnético (H), la curva resultante muestra una falta de retracibilidad, este fenómeno se muestra en la figura (B) y se le conoce como **"Histéresis"** y la curva resultante se denomina el **"Lazo de histéresis"**.

Partiendo de un núcleo ferromagnético no magnetizado, el punto O en la curva, H = 0 y B = 0. Si se incrementa la corriente en la bobina en la dirección positiva, se aumentan los ampere-espira y de aquí la intensidad del campo magnético.

$$H = \frac{NI}{\ell}$$



A) CIRCUITO MAGNÉTICO CON UNA fmm ALTERNA **B) REPRESENTACIÓN DE UN CICLO DE HISTERESIS**

Cuando la corriente alcanza su máximo valor, la densidad de flujo y la intensidad del campo magnético tienen sus máximos valores respectivos y la curva está en el punto **a**, este es el trazo inicial de la curva, bajando con una línea discontinua, se llama la **sección virgen** de la curva. En la medida que la corriente decrece, la curva sigue una trayectoria distinta y cuando la corriente se reduce a cero, H se reduce

a cero también, pero la densidad de flujo en las piernas del núcleo pasan por detrás hacia el punto **b** sobre la curva. La densidad de flujo en **b** es lo que se conoce como el **Magnetismo residual** y el flujo que se atrasa detrás de la fuerza magnetizante es el **efecto de histéresis.**

En la medida que la corriente alterna e intensidad de campo magnético se incrementan en la dirección negativa, el magnetismo residual se reduce, pero permanece positivo hasta que se alcanza el **punto c** en cuyo momento la densidad de flujo en el núcleo es cero. La intensidad de campo requerida para forzar al magnetismo residencial a cero se le conoce como "Fuerza coercitiva" y está representada por la línea OC en el eje H, en la medida que la corriente continua sus alternancias, la gráfica B-H sigue los puntos c, d, e, a, b, c sobre el lazo de histéresis.

1.8 .1 PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS MAGNÉTICAS

Si se conecta un voltaje alterno a la bobina de magnetización como se muestra en el inciso (A) de la figura anterior, la fuerza magnetomotriz alterna, produce que el dominio magnético sea constantemente reorientado a lo largo de los ejes de magnetización, este movimiento molecular produce calor y entre más duro es el acero, mayor es la cantidad de calor producida, las pérdidas de potencia debido a la histéresis para un tipo dado de material y volumen del núcleo varían directamente con la frecuencia y con la nésima potencia del máximo valor de la onda de densidad de flujo, esto se expresa con la ecuación.

$$Ph = Kh \cdot f \cdot B^{n}_{máx}$$

Donde:

Ph = Pérdidas por histéresis (w/unidad de masa del núcleo)

f = Frecuencia de la onda de flujo (Hz)
$B_{máx}$ = Valor máximo de la onda de densidad de flujo (T)
K_h = Constante

La constante K_h depende de las características magnéticas del material, su densidad y de las unidades usadas. El área encerrada por el lazo de histéresis es igual a la energía de histéresis en Joules/ciclo/metro cúbico de material.

1.8.2 PÉRDIDAS POR CORRIENTES CIRCULANTES (EDDY)

Además de las pérdidas por histéresis hay otras pérdidas importantes debidas a la variación cíclica del campo magnético y que se conocen como "las pérdidas por corrientes circulantes", esto se debe a que el fierro es un conductor y un flujo cambiante induce FEM y corrientes dentro de la masa de fierro, estas corrientes circulantes indeseables, también conocidas como **corrientes de eddy** son relativamente grandes cuando encuentran una relativa baja resistencia en el fierro sólido, en consecuencia producen pérdidas de potencia con el correspondiente efecto de calentamiento.

En la práctica, es entonces costumbre usar **laminaciones delgadas** para construir los núcleos de manera que la resistencia al flujo de las corrientes circulantes se incremente en forma significativa.

El plano de las laminaciones en paralelo al flujo, restringe las trayectorias de las corrientes circulantes en laminaciones delgadas de alta resistencia. Las laminaciones se aíslan una de otra por capas delgadas de barniz o de papel. En general, entre más delgadas las laminaciones, menores son las pérdidas, es decir las pérdidas por corrientes circulantes son proporcionales at^2, donde t es el grueso de las laminaciones.

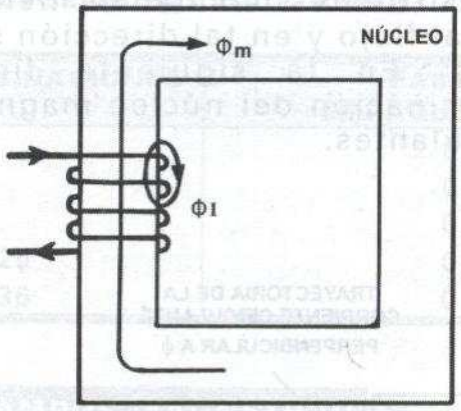
Una fórmula empírica para evaluar las pérdidas por corrientes circulantes Pe, es:

$$Pe = Ke(B_{máx}\, tf)^2\ W/m^3$$

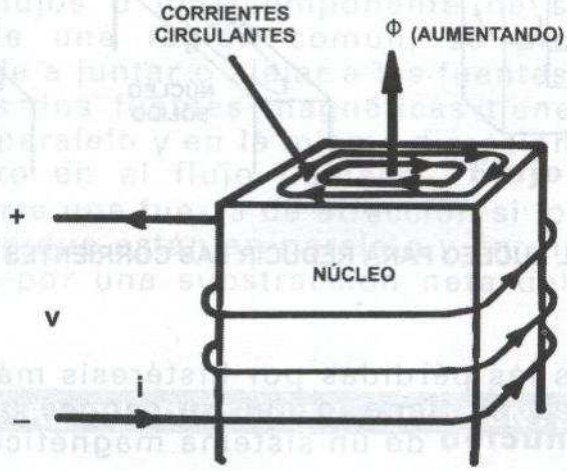
Donde:

Ke = Constante que depende del material

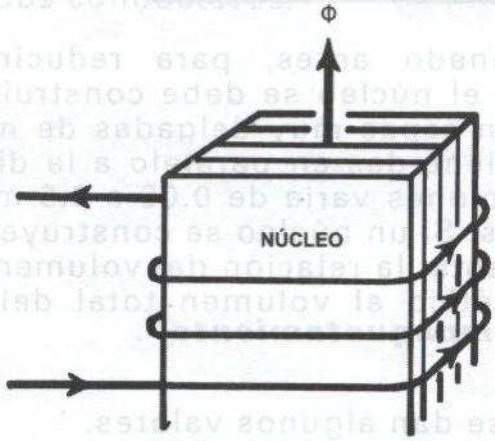
La ecuación anterior, indica también que las pérdidas varían con el cuadrado de la frecuencia, mientras que las pérdidas por histéresis varían directamente con la frecuencia.



TRAYECTORIA DEL ESLABONAMIENTO DEL FLUJO

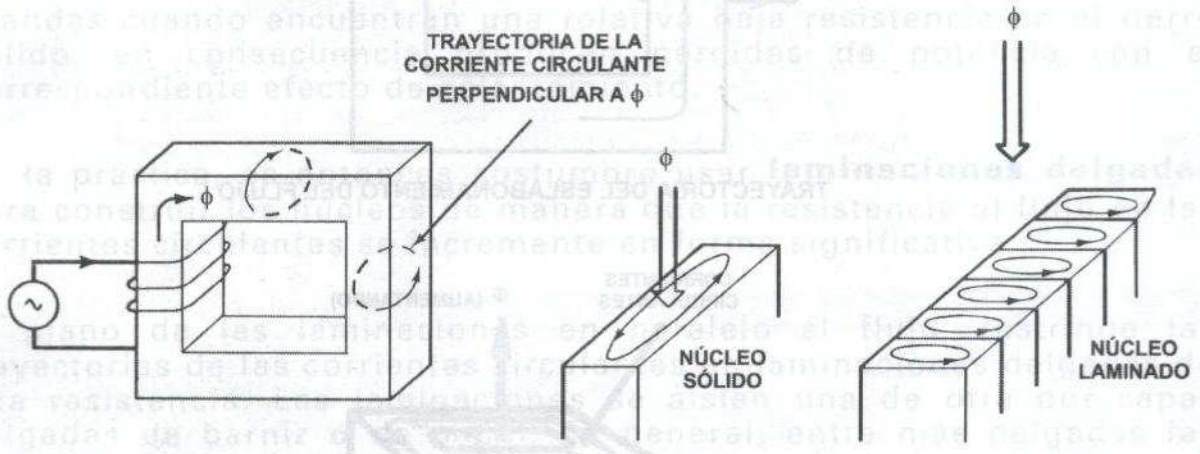


NÚCLEO NO LAMINADO



NÚCLEO LAMINADO

Se observa que las corrientes circulantes tienden siempre a fluir en forma perpendicular al flujo y en tal dirección se oponen al cambio en el flujo magnético. En la siguiente figura, se muestra la efectividad en la laminación del núcleo magnético para la reducción de las corrientes circulantes.



LAMINACIÓN DEL NÚCLEO PARA REDUCIR LAS CORRIENTES CIRCULANTES

Considerando juntas las pérdidas por histéresis más las pérdidas por corrientes circulantes, se tiene lo que se conoce generalmente como las **pérdidas en el núcleo** de un sistema magnético.

1.8.3 EL FACTOR DE EMPAQUETAMIENTO

Como se ha mencionado antes, para reducir las pérdidas por corrientes circulantes, el núcleo se debe construir de laminaciones o de hojas delgadas, con capas muy delgadas de material aislante, las laminaciones están orientadas en paralelo a la dirección del flujo, el espesor de las laminaciones varía de 0.05 a 0.5 mm en la mayoría de las máquinas eléctricas. Si un núcleo se construye laminado, entonces su volumen se incrementa, la relación del volumen realmente ocupado por el material magnético al volumen total del núcleo, se conoce como ***"El factor de empaquetamiento"***.

En la tabla siguiente, se dan algunos valores.

FACTOR DE EMPAQUETAMIENTO

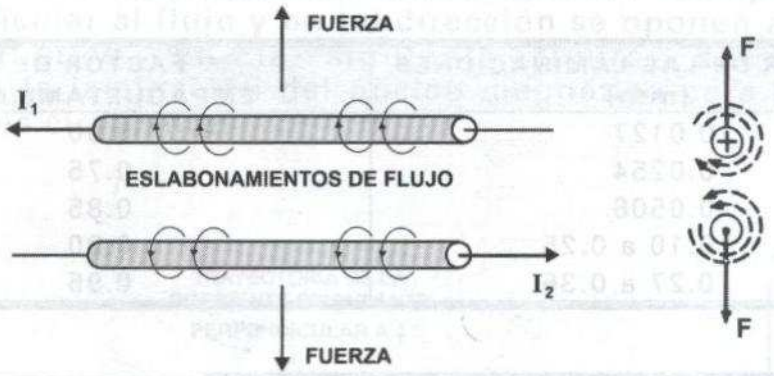
ESPESOR DE LAS LAMINACIONES (mm)	FACTOR DE EMPAQUETAMIENTO
0.0127	0.50
0.0254	0.75
0.0508	0.85
0.10 a 0.25	0.90
0.27 a 0.36	0.95

1.9 INTERACCIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS

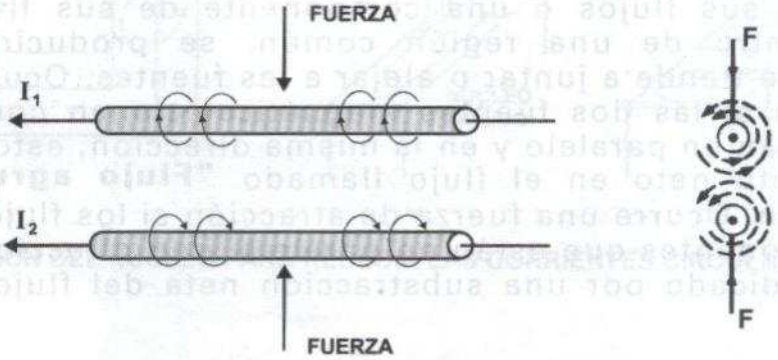
Cuando dos o más fuentes de campos magnéticos se arreglan de manera que sus flujos o una componente de sus flujos están en paralelo dentro de una región común, se producirá una fuerza mecánica que tiende a juntar o alejar a las fuentes. Ocurre una fuente de repulsión si las dos fuentes magnéticas tienen componentes de flujo que están en paralelo y en la misma dirección, esto se indica por un incremento neto en el flujo llamado **"Flujo agrupado"** en la región común. Ocurre una fuerza de atracción si los flujos respectivos tienen componentes que están en paralelo y en direcciones opuestas, esto está indicado por una substracción neta del flujo en la región común.

1.9.1 FUERZAS SOBRE CONDUCTORES ADYACENTES

La interacción de los campos magnéticos de conductores adyacentes que transportan corriente, produce fuerzas mecánicas que tienden a juntar o separar los dos conductores.



A) CORRIENTES EN DIRECCIÓN OPUESTA

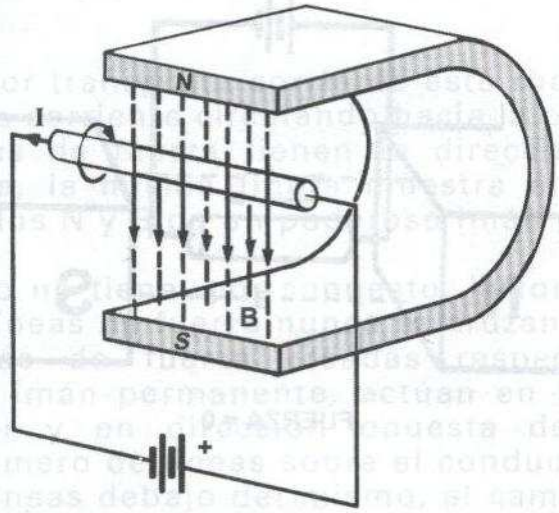


B) CORRIENTES EN LA MISMA DIRECCIÓN

INTERACCIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE CONDUCTORES ADYACENTES QUE CONDUCEN CORRIENTE

1.9.2 MAGNITUD DE LA FUERZA MECÁNICA DESARROLLADA SOBRE UN CONDUCTOR POR EL QUE CIRCULA UNA CORRIENTE Y SITUADO EN UN CAMPO MAGNÉTICO

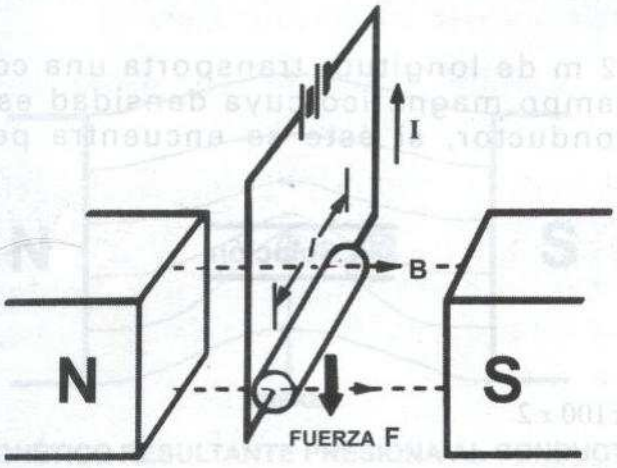
A esto también se conoce como **"La fuerza de Lorentz sobre un conductor"** y que establece que cuando un conductor que transporta corriente se coloca dentro de un campo magnético, se ve sujeto a una fuerza que se conoce como **FUERZA ELECTROMAGNÉTICA O FUERZA DE LORENTZ.**



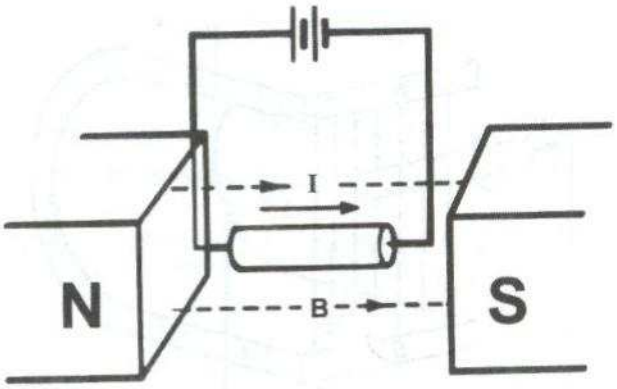
CONDUCTOR QUE TRANSPORTA UNA CORRIENTE, SITUADO DENTRO DE UN CAMPO B DE UN IMÁN PERMANENTE

Esta fuerza es de fundamental importancia debido a que constituye la base de operación de los motores, de generadores y de los instrumentos eléctricos.

La magnitud de la fuerza depende de la orientación del conductor con respecto a la dirección del campo, **la fuerza es mayor cuando el conductor es perpendicular al campo y cero cuando es paralelo**, dentro de estos dos extremos, la fuerza tiene valores intermedios.



FUERZA SOBRE UN CONDUCTOR



FUERZA = 0

La fuerza máxima que actúa sobre un conductor recto es:

$$F = B\ell I$$

Donde:

F = Fuerza actuando sobre el conductor en Newton (N).
B = Densidad de flujo del campo (T).
ℓ = Longitud activa del conductor (m).
I = Corriente en el conductor (m).

Ejemplo

Un conductor de 2 m de longitud, transporta una corriente de 100A y se coloca en un campo magnético cuya densidad es 0.5 T. Calcular la fuerza sobre el conductor, si éste se encuentra perpendicular a las líneas de fuerza.

Solución

$$F = BI\ell$$

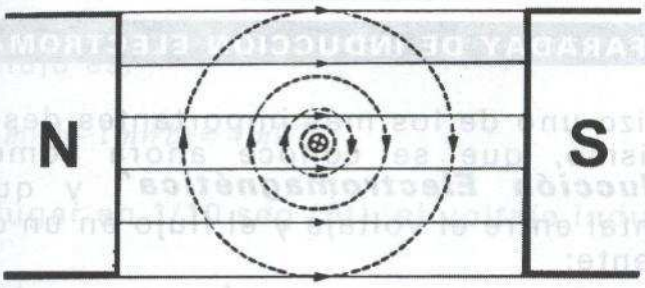
$$= 0.5 \, x \, 100 \, x \, 2$$

$$= 100N$$

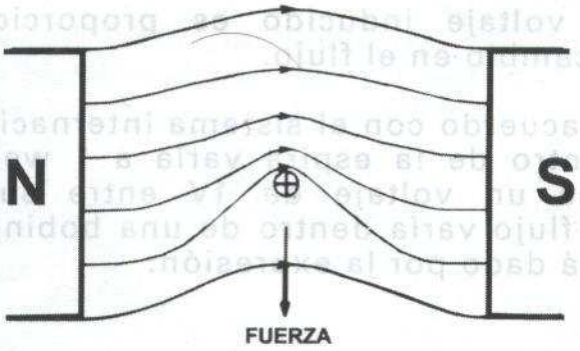
1.9.3 DIRECCIÓN DE LA FUERZA ACTUANDO SOBRE UN CONDUCTOR RECTO

Cuando un conductor transporta corriente está rodeado de un campo magnético, para una corriente circulando hacia la página de este libro, las líneas circulares de fuerza tienen la dirección mostrada en la figura (A) siguiente, la misma figura muestra el campo magnético creado entre los polos N y S de un poderoso imán permanente.

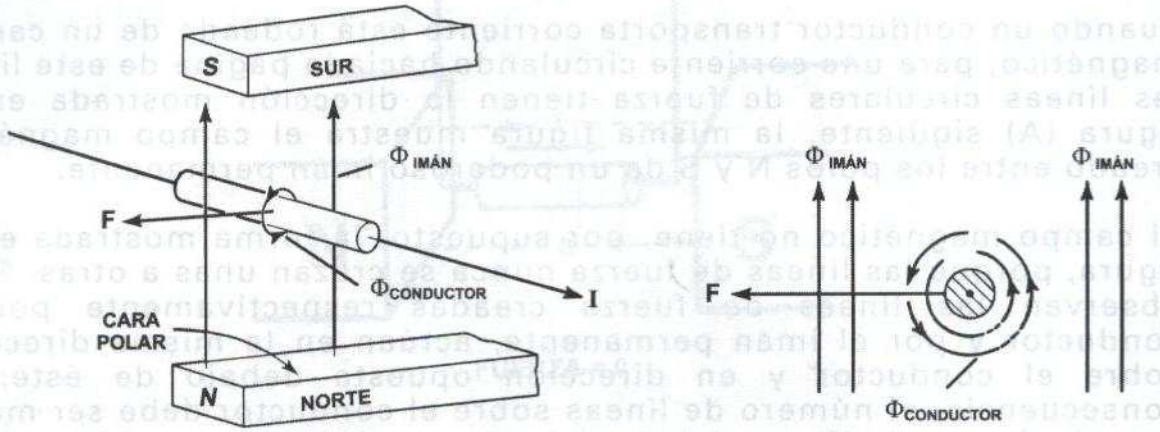
El campo magnético no tiene, por supuesto, la forma mostrada en la figura, porque las líneas de fuerza nunca se cruzan unas a otras. Si se observan las líneas de fuerza creadas respectivamente por el conductor y por el imán permanente, actúan en la misma dirección sobre el conductor y en dirección opuesta debajo de éste; en consecuencia, el número de líneas sobre el conductor debe ser mayor que el número de líneas debajo del mismo, el campo magnético tiene entonces la forma de la figura (B).



A) CAMPO MAGNÉTICOS DEBIDO A UN IMÁN Y UN CONDUCTOR



B) EL CAMPO MAGNÉTICO RESULTANTE PRESIONA AL CONDUCTOR HACIA ABAJO



A)FUERZA MECÁNICA PRODUCIDA POR LA INTERACCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO DE UNA CORRIENTE Y EL CAMPO MAGNÉTICO DEL IMÁN

B) VISTA DE LOS CONDUCTORES

1.9.4 La ley de Faraday de inducción electromagnética

Joseph Faraday hizo uno de los más importantes descubrimientos en el electromagnetismo, que se conoce ahora como ***"La Ley de Faraday de Inducción Electromagnética"*** y que establece la relación fundamental entre el voltaje y el flujo en un circuito, está ley establece lo siguiente:

1. Si el flujo eslabonando un lazo (o espira) varía con el tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales.

2. El valor del voltaje inducido es proporcional al índice o capacidad de cambio en el flujo.

Por definición y de acuerdo con el sistema internacional de unidades, cuando el flujo dentro de la espira varía a 1 weber por segundo, entonces se induce un voltaje de 1V entre sus terminales; en consecuencia, si el flujo varía dentro de una bobina de N espiras, el voltaje inducido está dado por la expresión:

$$E = N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Donde:

E = Voltaje inducido en volts.

N = Número de espiras de la bobina.
$\Delta\phi$ = Cambio del flujo dentro de la bobina (Wb).
Δt = Intervalo de tiempo durante el cual el flujo cambia.

Esta Ley de Faraday establece las bases para la operación de transformadores, generadores y motores de corriente alterna.

Ejemplo

Se tiene una bobina de 1000 espiras rodeada por un flujo de 5 mWb producido por un imán permanente, si el imán se mueve súbitamente, produciendo que el flujo dentro de la bobina descienda uniformemente a 1 mWb en 1/10 de segundo, calcular el voltaje inducido.

Solución

El cambio en el flujo es:

$$\Delta\phi = (5\,mWb - 1\,mWb) = 4\,mWb$$

El cambio tiene lugar en 1/10 seg (Δt), el voltaje inducido es entonces:

$$E = N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 1000\ x\ \frac{4}{1000\ x\ 1/10} = 40\ V$$

2 GENERADORES DE CORRIENTE DIRECTA

2.1 INTRODUCCIÓN

Los generadores de corriente directa (C.D.) no son en la actualidad usados tan ampliamente, como alguna vez lo fueron, como una máquina diseñada para el propósito de producir corriente directa, su uso está limitado a un número determinado de aplicaciones. Estas aplicaciones son muy variadas, por ejemplo, para equipo de prueba, para algunas locomotoras diesel-eléctricas, aviación civil, aviación militar y otros vehículos. Uno de sus usos más frecuentes es sin duda, actuar como freno eléctrico, es un asunto relativamente sencillo convertir un accionamiento de C.D. como motor, a un generador, y de esta manera producir una acción de frenado muy flexible.

Tiene también un uso adicional muy útil, que es proporcionar una forma directa y confortable de introducción al estudio de las máquinas eléctricas.

La generación de una Fuerza Electromotriz (FEM) en cualquier sistema de conductores se puede relacionar con uno o dos de las relaciones axiomáticas establecidas por Michael Faraday:

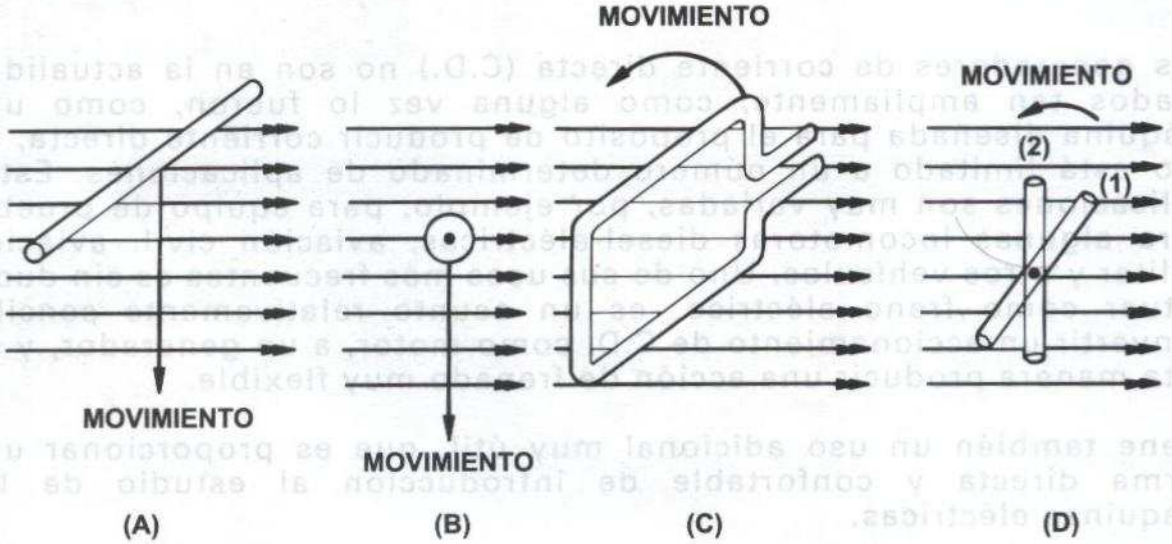
$$E = N\frac{d\phi}{dt} \quad ó \quad E = N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

y también

$$e = B\ell v$$

Esto es: siempre que el flujo eslabonado con un circuito cambia, se produce una FEM en el circuito, que es proporcional al índice de cambio de los eslabonamientos de flujo. Si la expresión es para la ecuación: e = Bℓv, la FEM inducida es proporcional al índice o tasa a la cual un conductor corta (o es cortado) en flujo magnético.

Estas dos ecuaciones se pueden resumir en los diagramas de las siguientes figuras, en donde en la figura (A) se tiene un conductor que se mueve en forma perpendicular a través de un campo, mostrado en perspectiva en (B). La ecuación: $E = N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ se muestra en las figuras (c) y (d), en la medida que la bobina gira en (c), se observa en (d) que el flujo cortante se incrementa al moverse de la posición (1) a la posición (2).



(A) Y (B) FLUJO CORTANTE
(C) Y (D) ESLABONAMIENTO DE FLUJO

Los fundamentos para la generación continua de una FEM están por lo tanto establecidos como un grupo de conductores o espiras que giran en un campo magnético. Para la FEM generada es útil tener contactos deslizantes para llegar la FEM a un circuito estático externo. Para un conductor de velocidad periférica **v** a cualquier ángulo **Θ** la velocidad perpendicular al flujo es **V sen** θ esto produce una FEM en la espira (dos conductores) de: $e = 2B\ell v\ sen\theta$

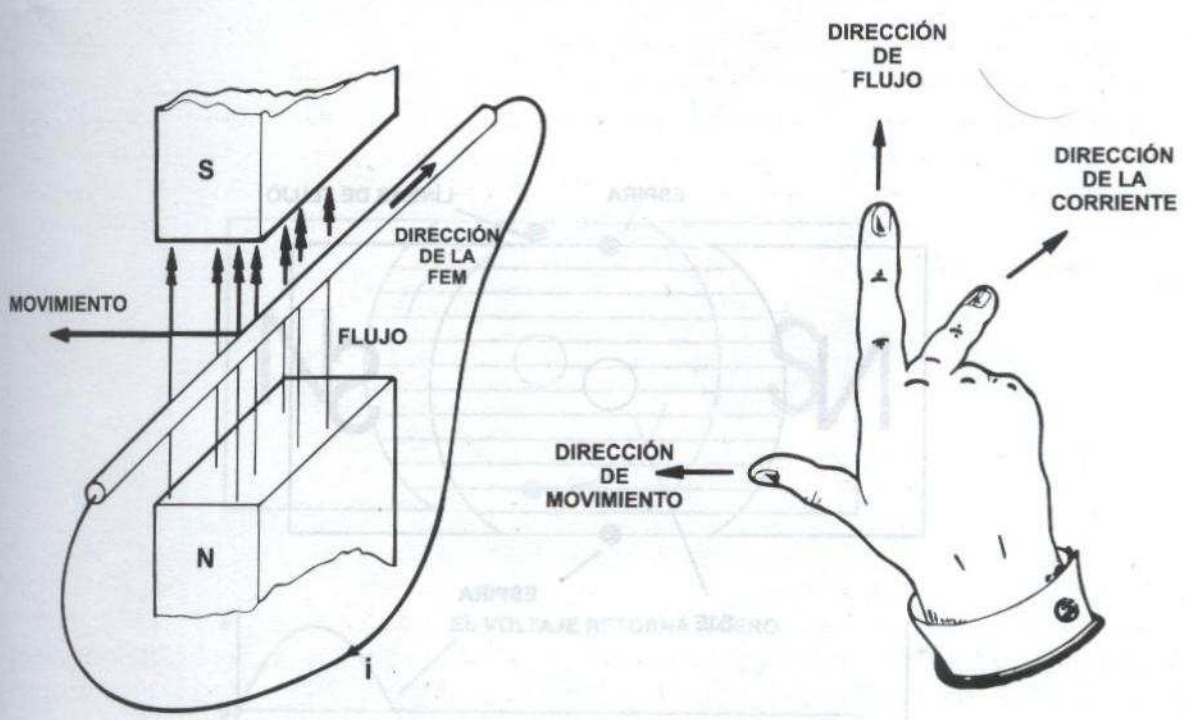
Como: B, ℓ y v son constantes, E = Bℓv, entonces: $e = E\ sen\theta$

Donde: E=2Bℓv y ocurre cuando θ=90° y θ=270° el voltaje generado es alterno y no de corriente directa. Dos conductores podrían no ser suficientes para proporcionar una adecuada salida de FEM, pero la ecuación:

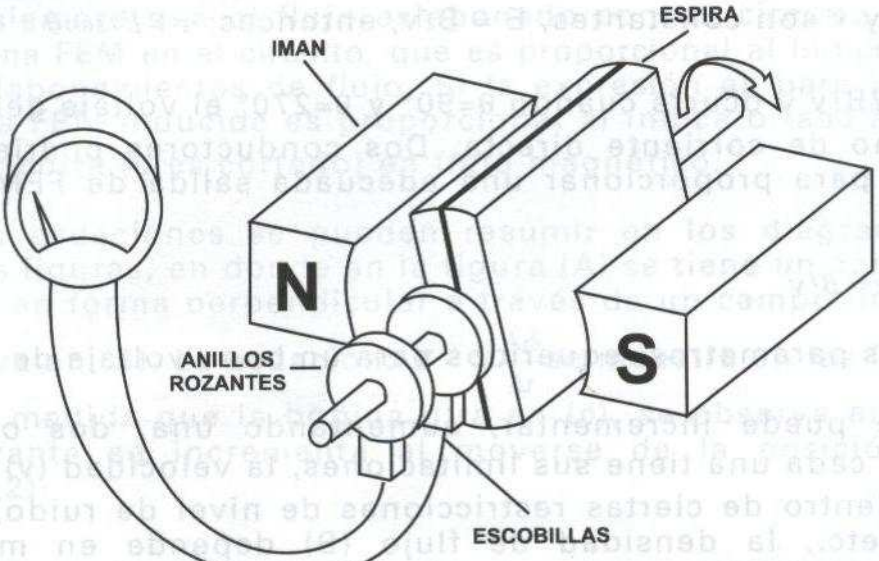
$$e = B\ell v$$

Da todos los parámetros requeridos para un buen voltaje de salida.

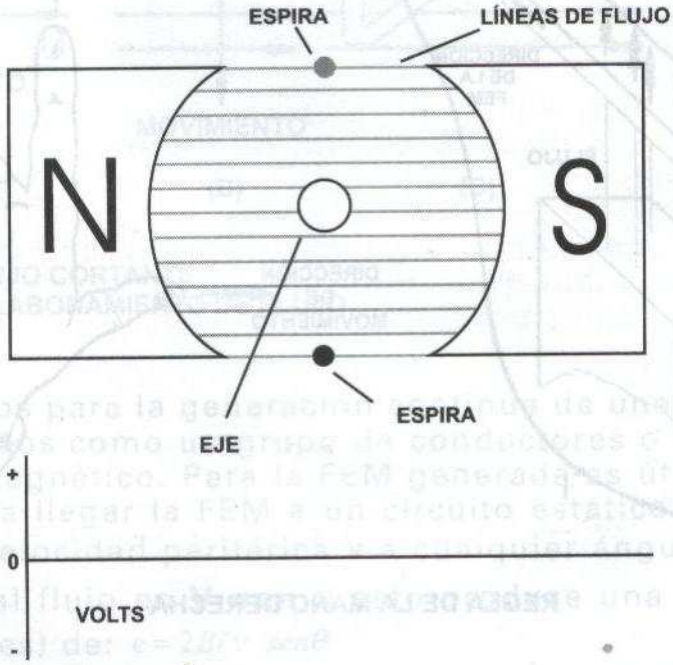
La FEM se puede incrementar, aumentando una, dos o las tres cantidades, cada una tiene sus limitaciones, la velocidad (v) se puede aumentar dentro de ciertas restricciones de nivel de ruido, fricción, vibración, etc., la densidad de flujo (B) depende en mucho del entrehierro necesario para la rotación de la bobina, entre mayor es el entrehierro menor la densidad de flujo, finalmente la longitud física de la máquina, determina la longitud del conductor (ℓ).



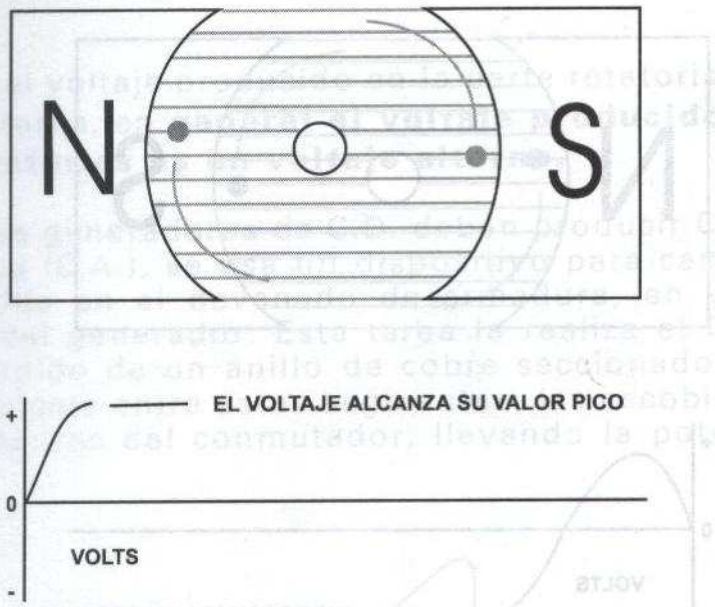
REGLA DE LA MANO DERECHA



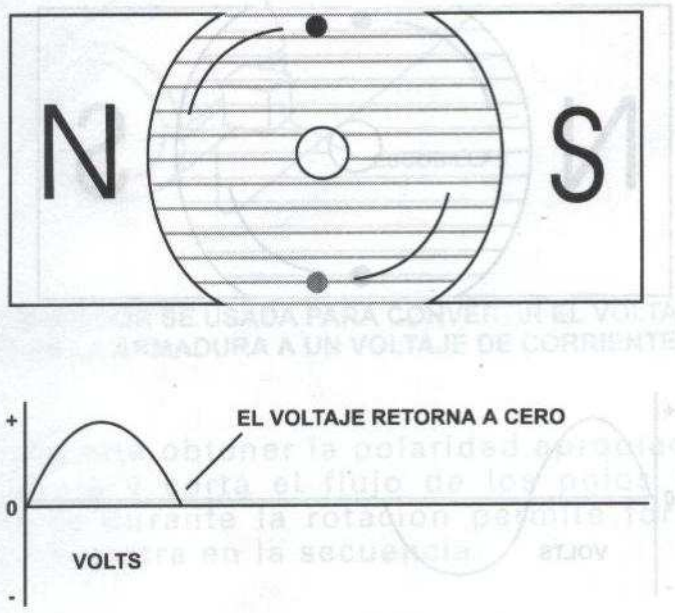
SE INDUCE UN VOLTAJE EN LOS CONDUCTORES EN LA MEDIDA QUE CORTA LAS LÍNEAS DE FLUJO MAGNÉTICO



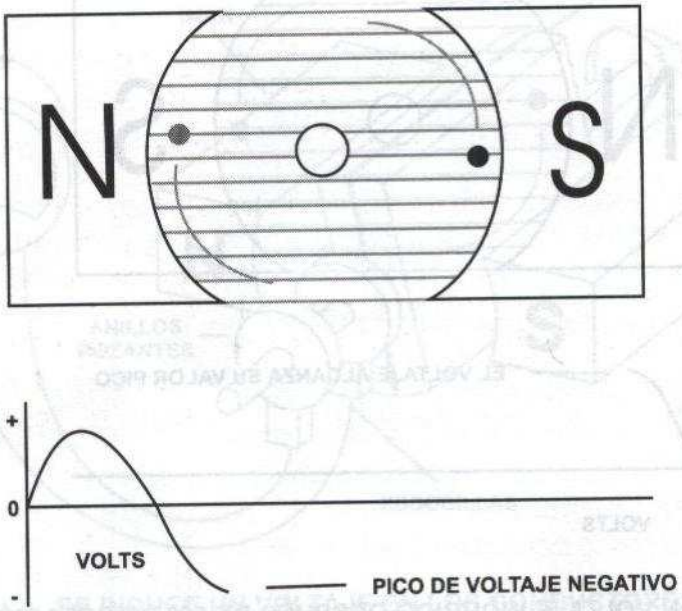
CUANDO L A ESPIRA ESTÁ EN PARALELO A LAS LÍNEAS DE FLUJO, NO HAY CORTE



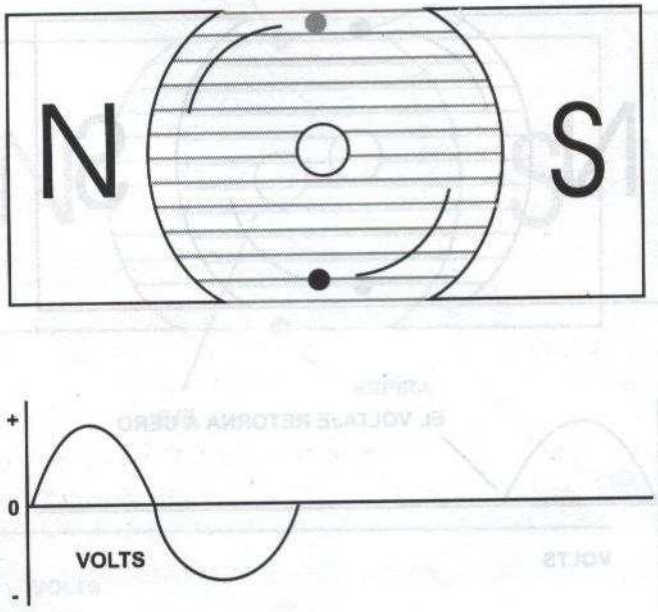
HAY UN VOLTAJE INDUCIDO DESPUÉS DE 90° DE ROTACIÓN



EL VOLTAJE INDUCIDO DESPUÉS DE 180° DE ROTACIÓN



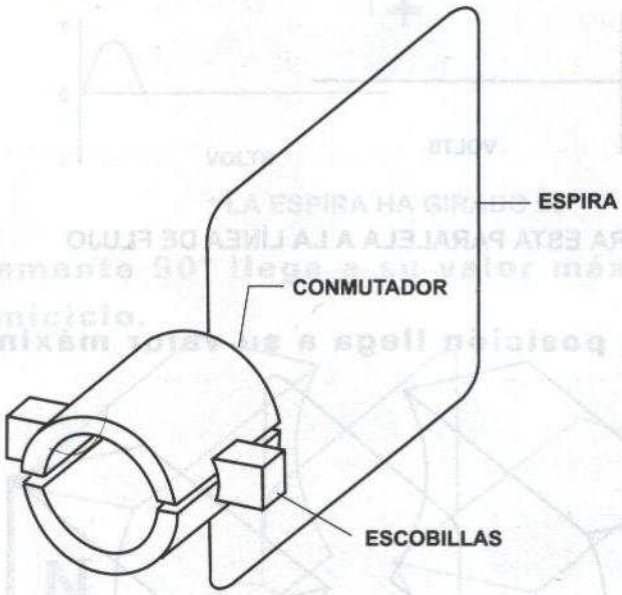
EL PICO DE VOLTAJE NEGATIVO SE ALCANZA DESPUÉS DE 270° DE ROTACIÓN



VOLTAJE PRODUCIDO DESPUÉS DE 360° DE ROTACIÓN

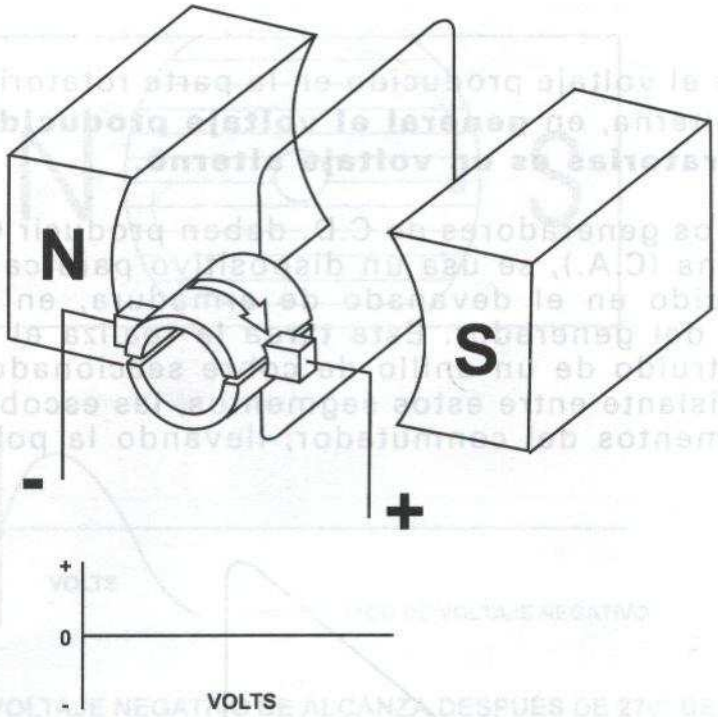
Obsérvese que el voltaje producido en la parte rotatoria (armadura) es de polaridad alterna, en **general el voltaje producido en todas las armaduras giratorias es un voltaje alterno.**

Debido a que los generadores de C.D. deben producir C.D. en lugar de corriente alterna (C.A.), se usa un dispositivo para cambiar el voltaje alterno producido en el devanado de armadura, en voltaje de C.D. antes de salir del generador. Esta tarea la realiza el CONMUTADOR, que está construido de un anillo de cobre seccionado en segmentos con material aislante entre estos segmentos, las escobillas se deslizan sobre los segmentos del conmutador, llevando la potencia fuera del circuito.



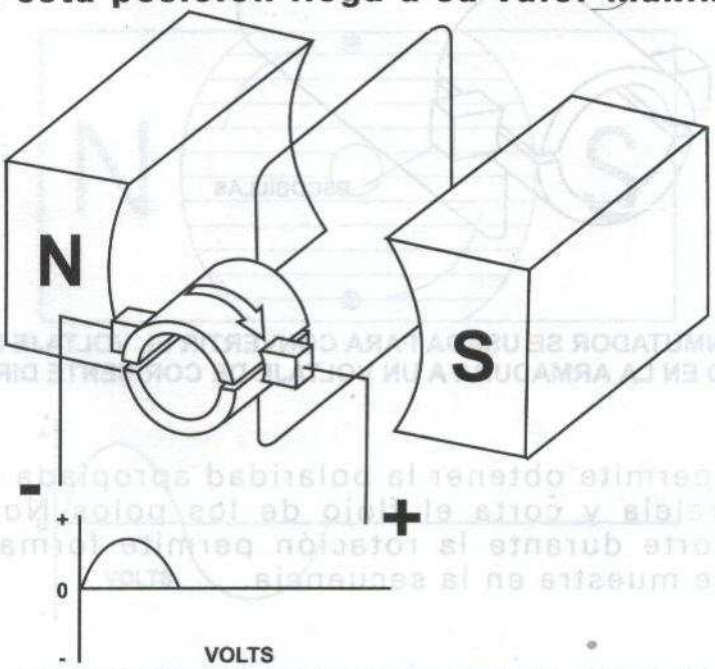
EL CONMUTADOR SE USADA PARA CONVERTIR EL VOLTAJE DE C.A. PRODUCIDO EN LA ARMADURA A UN VOLTAJE DE CORRIENTE DIRECTA (C.D.)

El conmutador permite obtener la polaridad apropiada cada vez que la espira está paralela y corta el flujo de los polos Norte y Sur, esta secuencia de corte durante la rotación permite formar las ondas de voltaje, como se muestra en la secuencia.



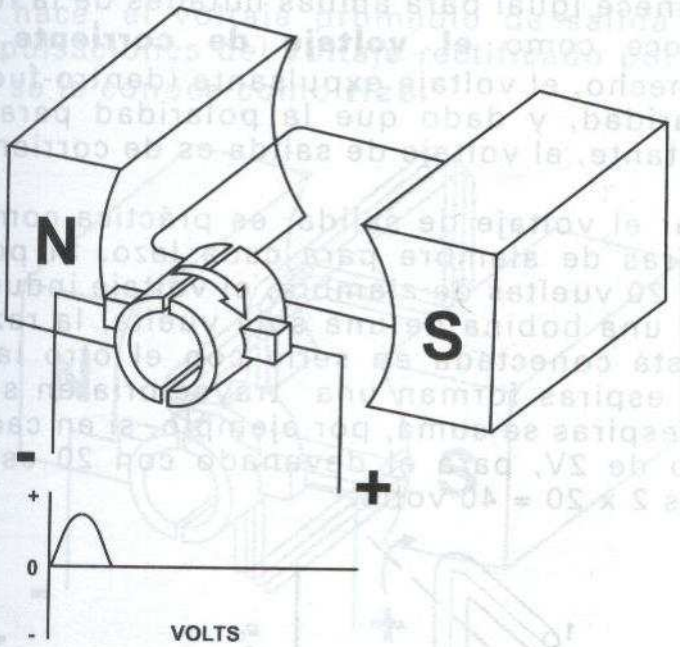
LA ESPIRA ESTA PARALELA A LA LÍNEA DE FLUJO

En esta posición llega a su valor máximo



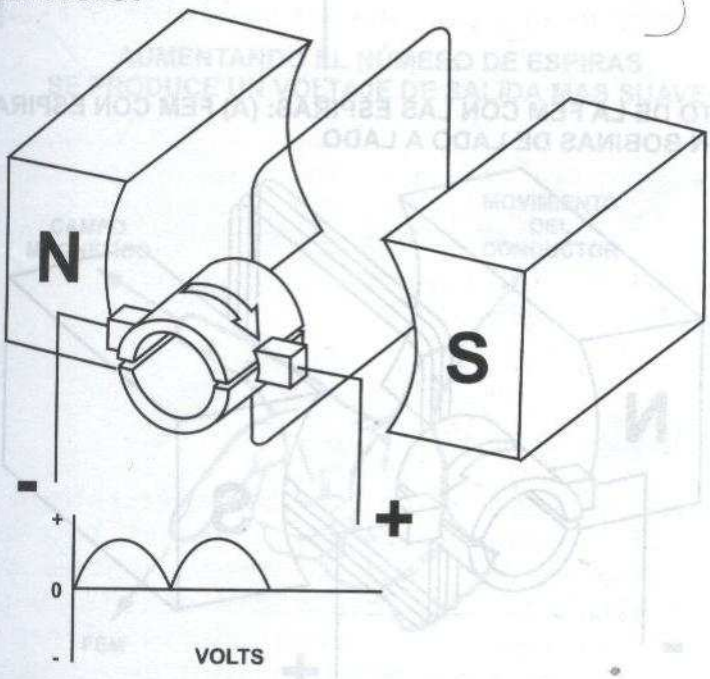
LA ESPIRA HA GIRADO 90°

La espira en esta posición decrece a su valor mínimo



LA ESPIRA HA GIRADO 90°

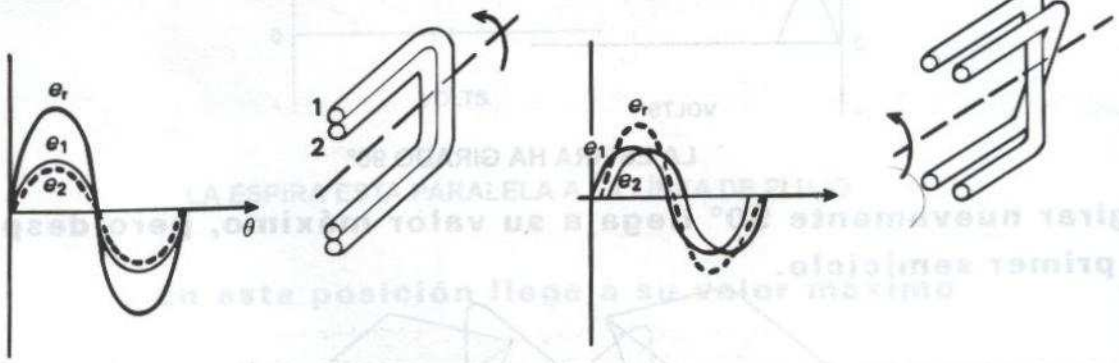
Al girar nuevamente 90° llega a su valor máximo, pero después del primer semiciclo.



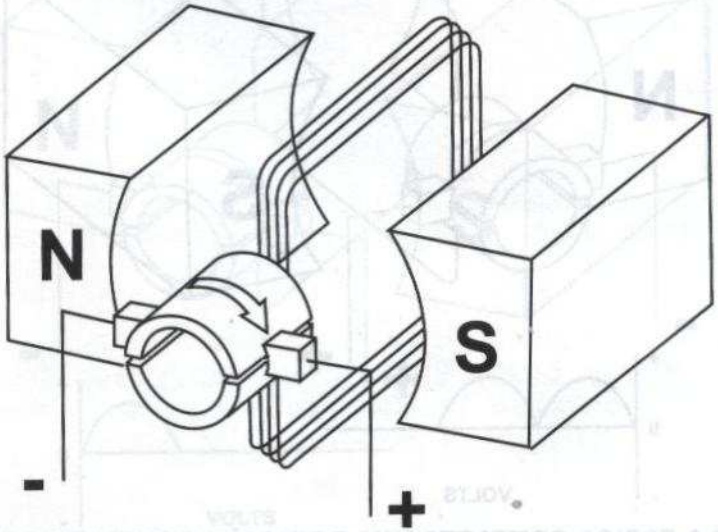
LA ESPIRA COMPLETA UNA ROTACIÓN COMPLETA A 360°

Se debe observar que durante estos 360° de rotación de la espira, la polaridad permanece igual para ambas mitades de la forma de onda, a esto se le conoce como **el voltaje de corriente directa (C.D.) rectificado,** de hecho, el voltaje expulsante (dentro-fuera), pero nunca invierte su polaridad, y dado que la polaridad para cada escobilla permanece constante, el voltaje de salida es de corriente directa.

Para incrementar el voltaje de salida, es práctica común aumentar el número de espiras de alambre para cada lazo. Si por ejemplo, una bobina contiene 20 vueltas de alambre, el voltaje inducido es 20 veces mayor que para una bobina de una sola vuelta, la razón es que cada lazo o espira está conectada en serie con el otro lazo o espira, de manera que las espiras forman una trayectoria en serie y el voltaje inducido en las espiras se suma, por ejemplo, si en cada espira hay un voltaje inducido de 2V, para el devanado con 20 espiras, el voltaje inducido total es 2 x 20 = 40 volts.

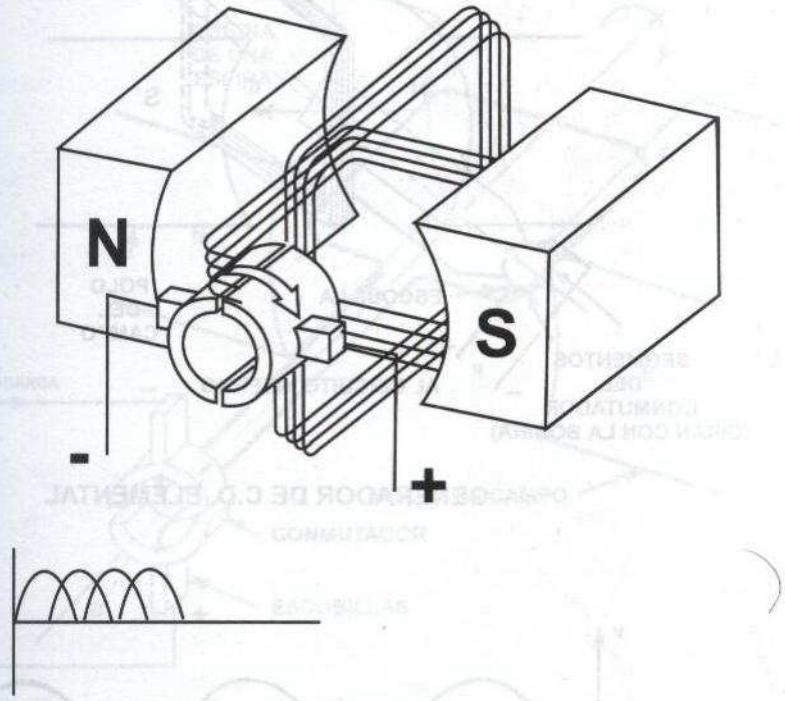


INCREMENTO DE LA FEM CON LAS ESPIRAS: (A) FEM CON ESPIRAS RADIALES (B) FEM CON BOBINAS DE LADO A LADO

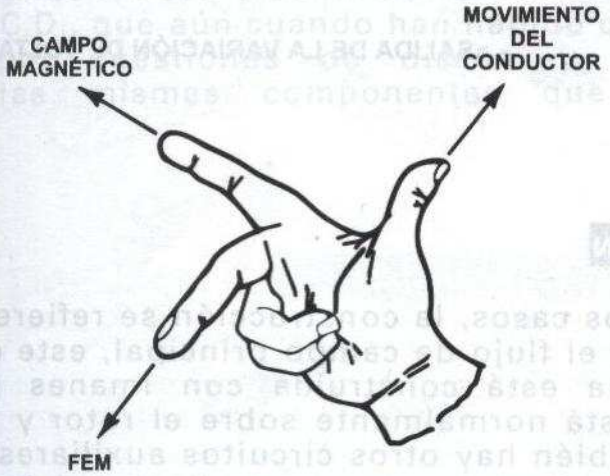


SI SE INCREMENTA EL NÚMERO DE ESPIRAS, SE AUMENTA EL VOLTAJE DE SALIDA

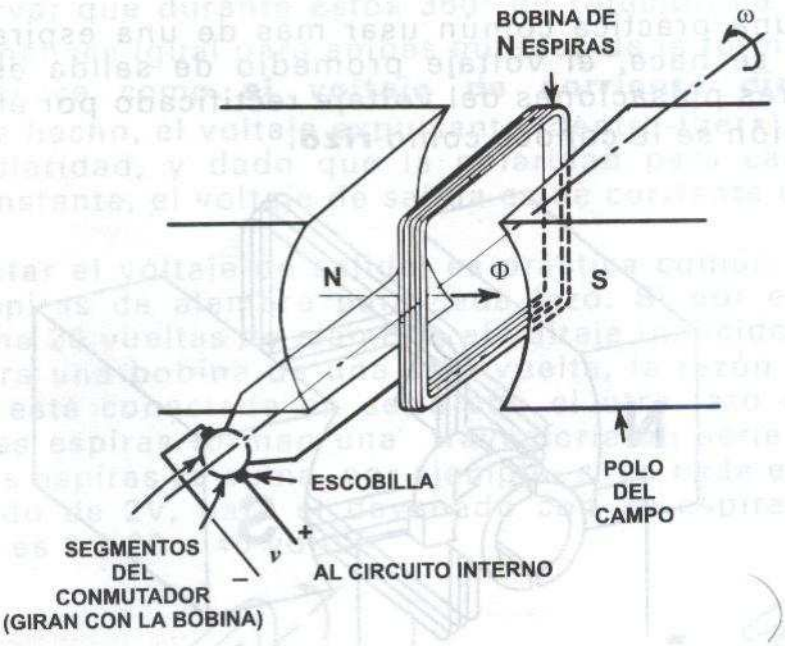
Es también una práctica común usar más de una espira de alambre, cuando esto se hace, el voltaje promedio de salida es mayor y se tienen menores pulsaciones del voltaje rectificado por el conmutador, a esta pulsación se le conoce como **rizo**.



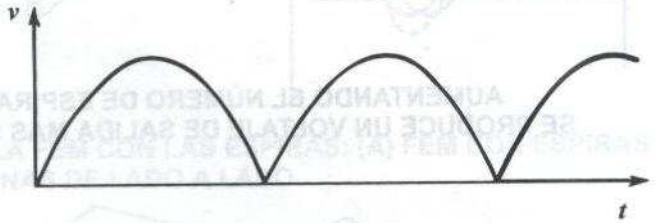
AUMENTANDO EL NÚMERO DE ESPIRAS SE PRODUCE UN VOLTAJE DE SALIDA MAS SUAVE



REGLA DE LA MANO DERECHA



GENERADOR DE C.D. ELEMENTAL

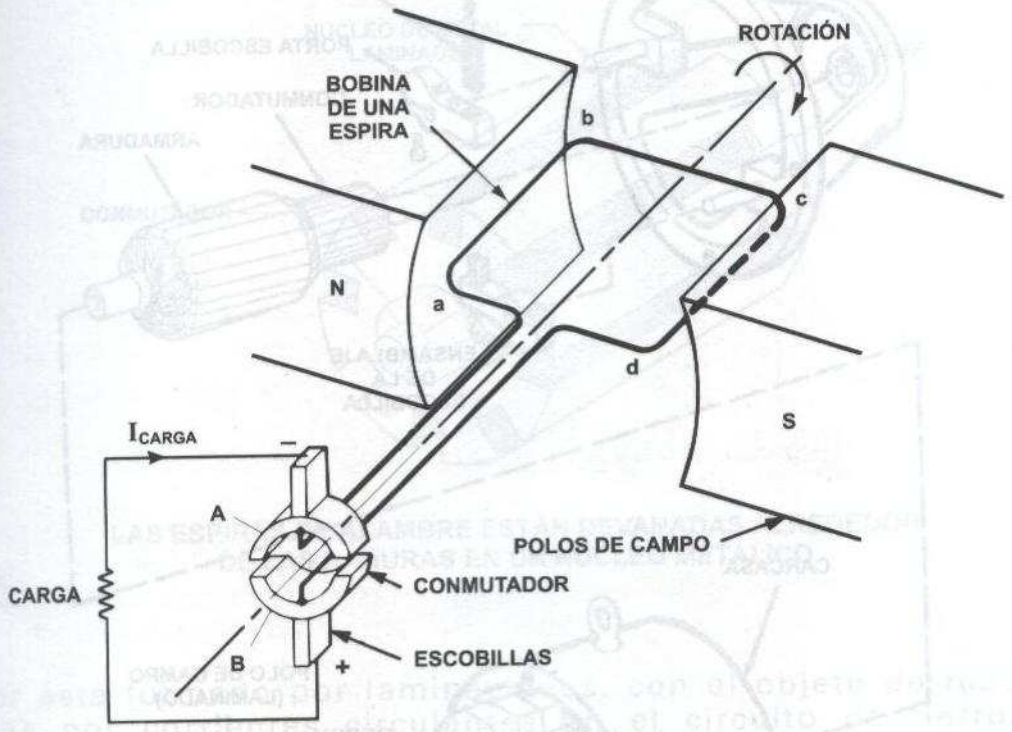


SALIDA DE LA VARIACIÓN DE VOLTAJE

2.2 Construcción

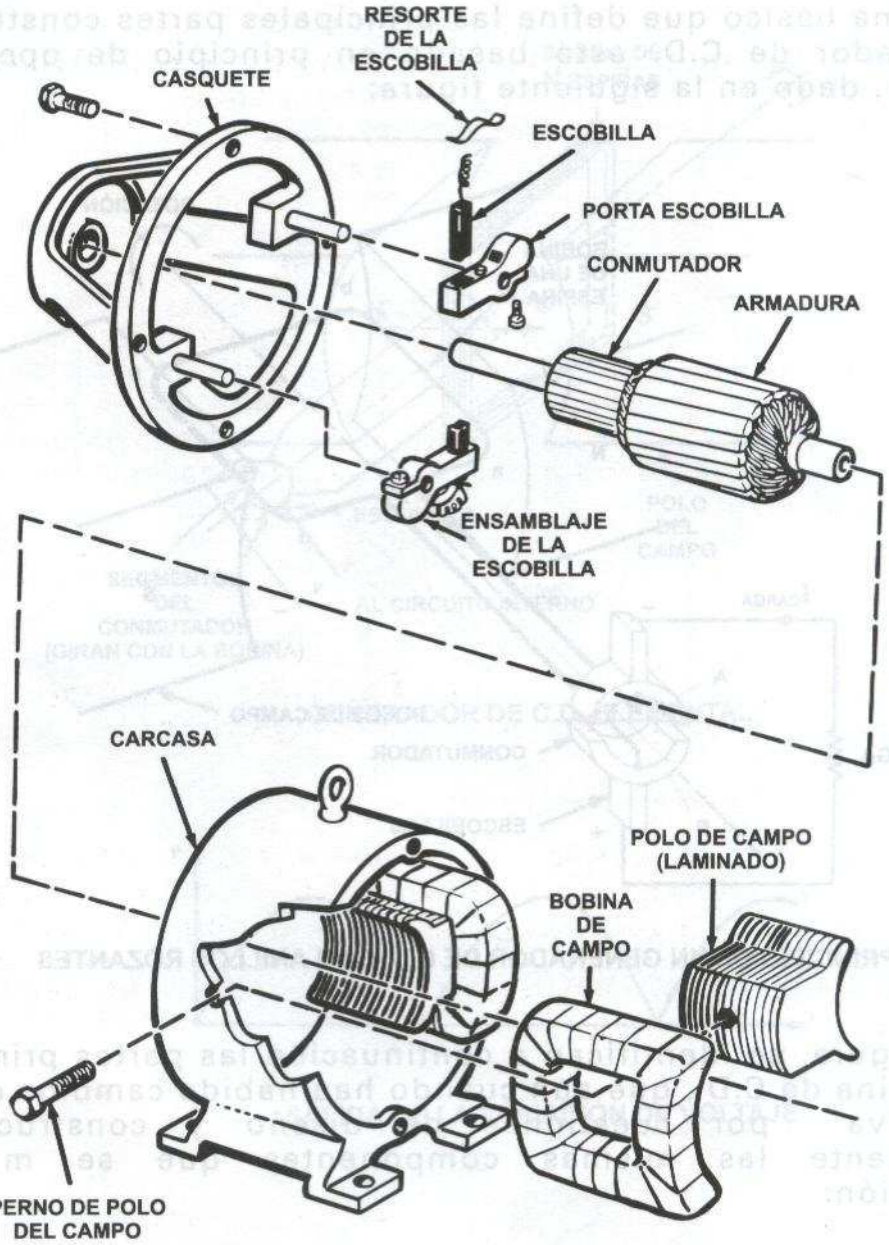
En la mayoría de los casos, la construcción se refiere a dos circuitos, el primero produce el flujo de campo principal, este circuito se omite cuando la máquina está construida con imanes permanentes; el segundo circuito está normalmente sobre el rotor y produce el valor útil de la FEM, también hay otros circuitos auxiliares que sirven para mejorar el comportamiento y que se estudiarán adelante.

El diagrama básico que define las principales partes constructivas de un generador de C.D. está basado en principio de operación del generador, dado en la siguiente figura:



PRINCIPIO DE UN GENERADOR DE C.D. CON ANILLOS ROZANTES

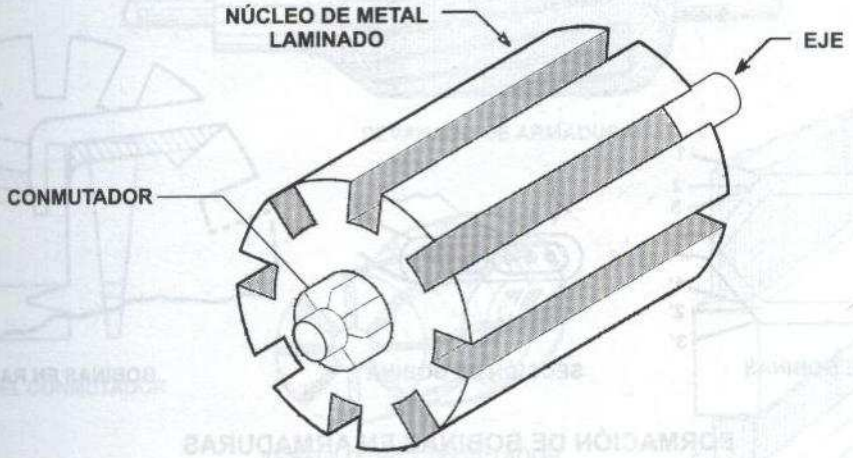
De esta figura, se identifican a continuación las partes principales de una máquina de C.D., que aún cuando han habido cambios en su parte constructiva por cuestiones de diseño y construcción, son esencialmente las mismas componentes que se muestran a continuación:



2.2.1 El circuito de la armadura

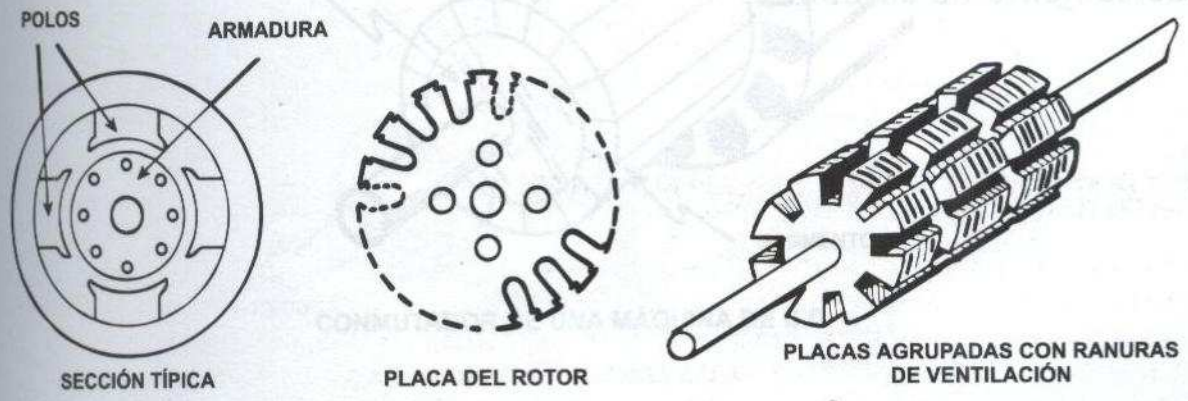
Las espiras se colocan generalmente en las ranuras de un núcleo de fierro que actúa como un conductor magnético, proporcionando una trayectoria de baja reluctancia para las líneas magnéticas de flujo, de manera que aumenta la inductancia de las espiras y proporciona un alto voltaje inducido. El conmutador está conectado al núcleo de

fierro ranurado, al conjunto completo del núcleo de fierro, el conmutador y las bobinas se le conoce como **LA ARMADURA.**



LAS ESPIRAS DE ALAMBRE ESTÁN DEVANADAS ALREDEDOR DE LAS RANURAS EN UN NÚCLEO METÁLICO

El rotor está formado por laminaciones, con el objeto de reducir las pérdidas por corrientes circulantes en el circuito de fierro, estas laminaciones se empacan formando un cilindro con secciones separadas para permitir el flujo o circulación del aire de enfriamiento, las ranuras pueden ser de varias formas y profundidades de acuerdo al diseño particular de cada máquina.



FORMACIÓN DE ARMADURA

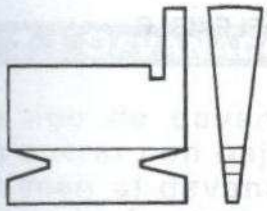
Las bobinas que generan la FEM se construyen y aíslan antes de ser colocadas en la armadura, cada bobina está hecha usualmente de varias espiras, con todas las conexiones eléctricas realizadas después de su ensamble sobre el rotor, estas bobinas pueden ser como las mostradas en la figura.

FORMACIÓN DE BOBINAS EN ARMADURAS

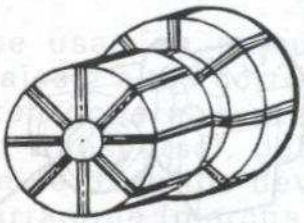
El término núcleo de fierro se ha usado en forma genérica para describir el material del núcleo magnético de la armadura, en realidad el material es acero al silicio con aproximadamente 2% de silicio presente, esto permite densidades de flujo de alrededor 1.3T, las aleaciones de 50% Fierro y 50% Cobalto permiten densidades de flujo de alrededor 2.3T, lo que permite construir máquinas más pequeñas.

Las conexiones eléctricas del rotor se hacen sobre los "segmentos" del conmutador, es decir, lo que representa un switch rotatorio que rectifica la corriente alterna (C.A.) generada y proporciona C.D. hacia el exterior, estos segmentos están formados por cobre y aislamiento intercalado, formando al conmutador completo y el contacto con el circuito externo se hace a través de las escobillas, que son básicamente de carbón.

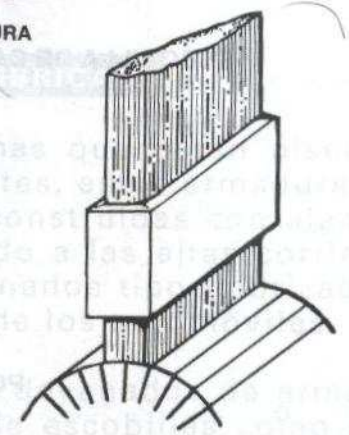
DEVANADO DE ARMADURA



SEGMENTOS DEL CONMUTADOR

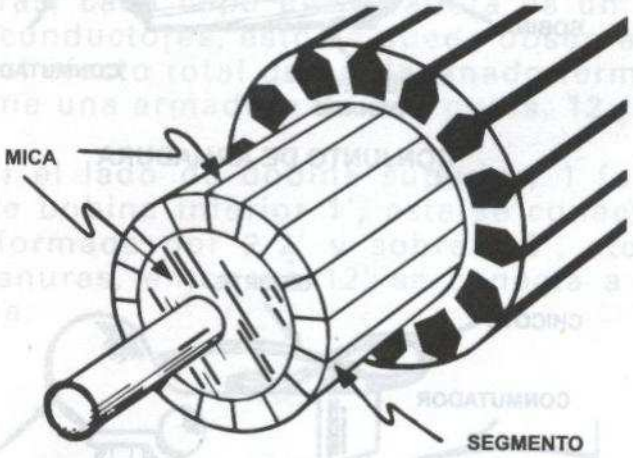


ARREGLO DEL CONMUTADOR

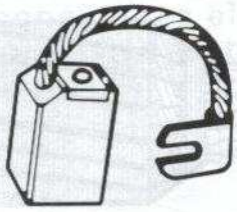


LOCALIZACI N DE LAS ESCOBILLAS

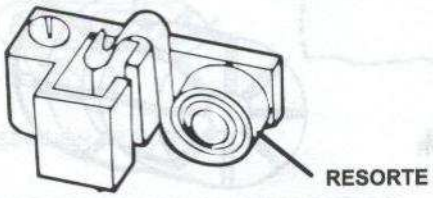
CONSTRUCCI N DE PEQUE AS ARMADURAS



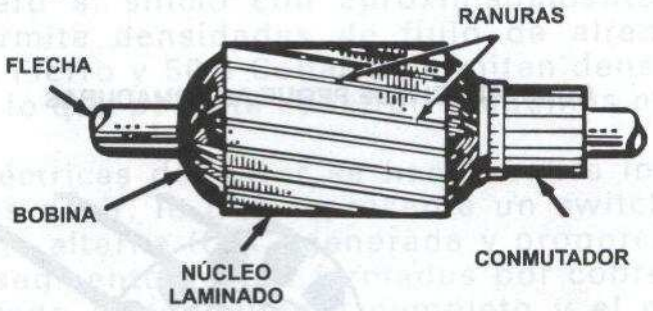
CONMUTADOR DE UNA MÁQUINA DE C.D.



ESCOBILLA DE CARBÓN Y CABLE DE COBRE ULTRA FLEXIBLE



PORTA ESCOBILLA Y RESORTE



CONJUNTO DE ARMADURA

CONJUNTO DE ESCOBILLAS

2.2.2 Los devanados de armadura

Los devanados de armadura están conectados de distintas formas, dependiendo de los requerimientos de la máquina, los dos tipos básicos de devanados de armadura son el **tipo imbricado** y el **tipo ondulado.**

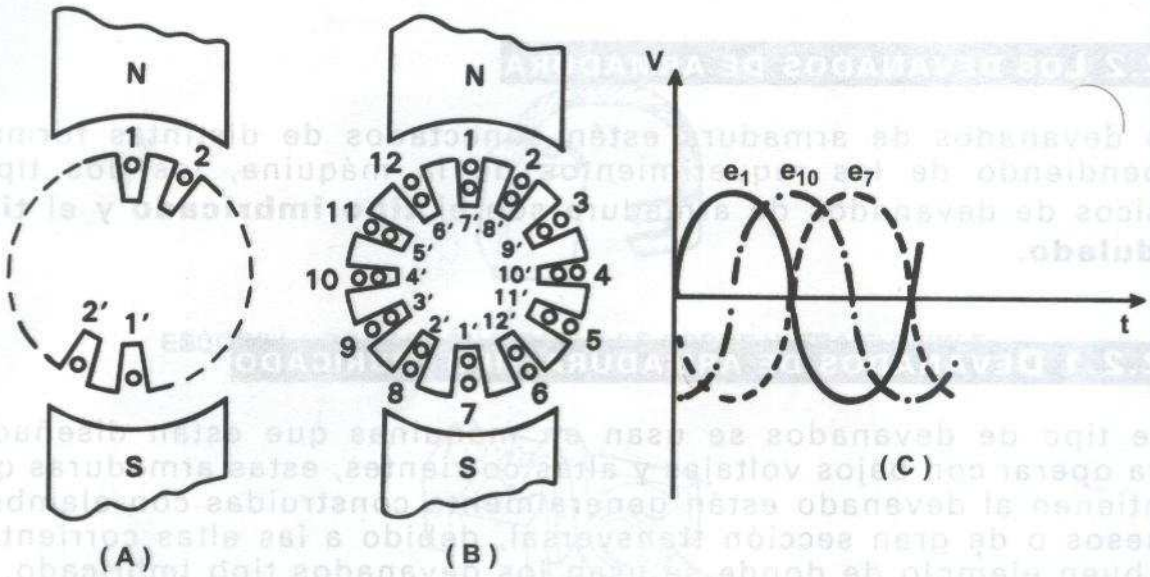
2.2.2.1 Devanados de armadura tipo imbricado

Este tipo de devanados se usan en máquinas que están diseñadas para operar con bajos voltajes y altas corrientes, estas armaduras que contienen al devanado están generalmente construidas con alambres gruesos o de gran sección transversal, debido a las altas corrientes, un buen ejemplo de donde se usan los devanados tipo imbricado, se encuentra en el motor de arranque (marcha) de los automóviles.

Una característica de las máquinas que usan devanados de armadura tipo imbricado, es que tienen tantos pares de escobillas como pares de polos hay, las bobinas en éste tipo de devanados se conectan en paralelo, esto permite que la capacidad de corriente de cada devanado se pueda incrementar y proporcionar una mayor corriente de operación.

Hay dos categorías principales de bobinas que pueden formar dos capas en las ranuras, cada capa en la ranura es un lado de bobina, quizás de muchos conductores, esto se puede observar en la siguiente figura, para notar el efecto total de un devanado terminado, se puede suponer que se tiene una armadura de dos polos, 12 ranuras.

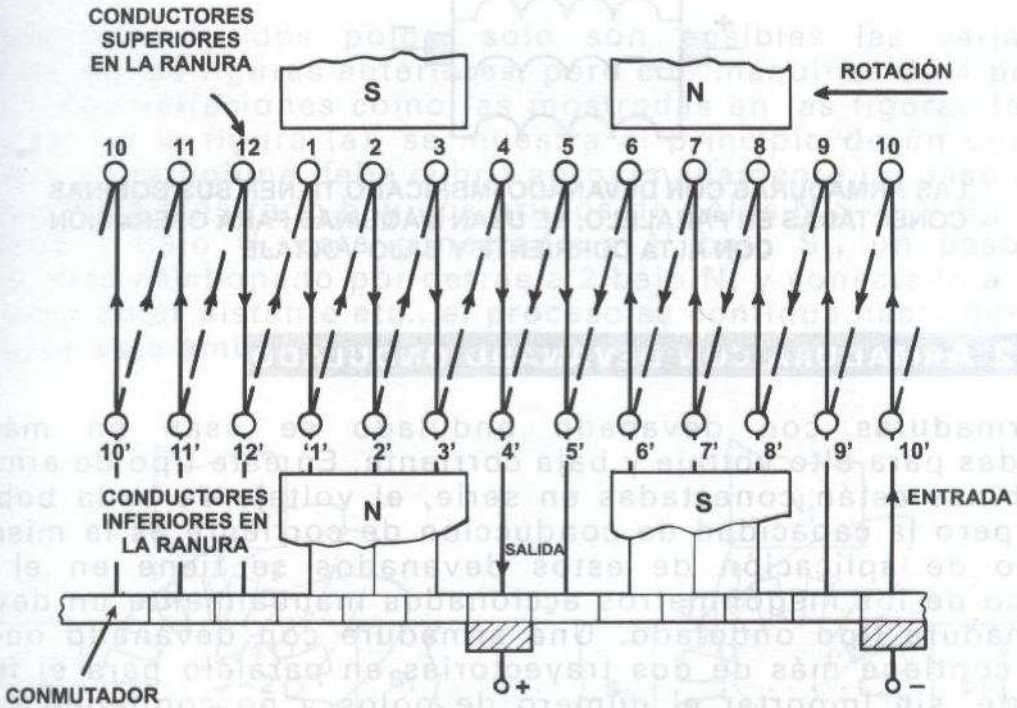
24 conductores (b) el lado de bobina superior, 1 forma parte de la bobina con lado de bobina inferior 1', este se conecta entonces a la siguiente bobina formada por 2-2' y sobre 3-3', etc., hasta que se llenan todas las ranuras, entonces 12' se conecta a 1 para hacer el remate de la bobina.



El inciso (b) de la figura anterior, representa la posición de un conductor en un instante de tiempo particular en la rotación de la armadura, este instante de tiempo se puede capturar en **"un circuito eléctrico equivalente"** como se muestra en la figura (A) siguiente.

Los lados de bobina de la capa superior se muestran bajo la parte superior de los polos N y S, en tanto que los lados de bobina de la capa inferior se muestran de bajo del fondo de los polos **N y S.** Las conexiones se muestran con líneas rectas, es decir, 1 conecta a 1', 1' a 2, 2 a 2', etc.

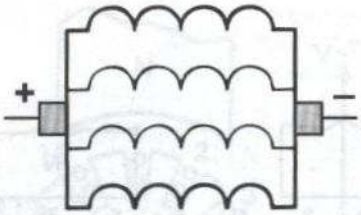
Si cada bobina está conectada a un segmento del conmutador, como se muestra en la figura (A), las escobillas de los segmentos 4 y 10 toman corriente del circuito externo, un momento después la rotación mueve al devanado, la bobina 1 reemplaza a la 12, la 5 reemplaza a la 4, etc. El patrón de la FEM permanece sin cambio, las bobinas 5 y 11 se convierten ahora en pasivas y dado que las escobillas son estacionarias, están en contacto con 5 y 11.



(A) CIRCUITO

(B) CIRCUITO EQUIVALENTE EN BATERÍA

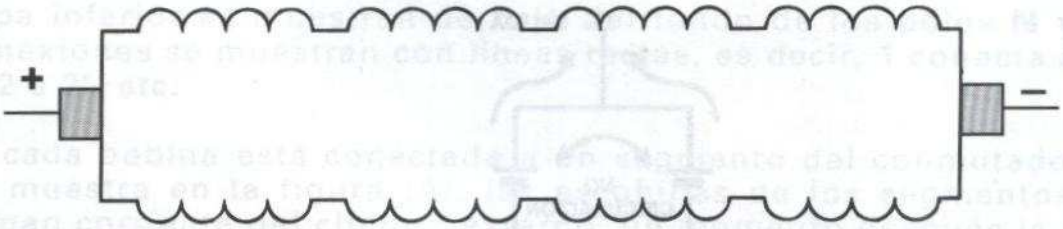
CIRCUITO EQUIVALENTE DEL DEVANADO DE LA ARMADURA



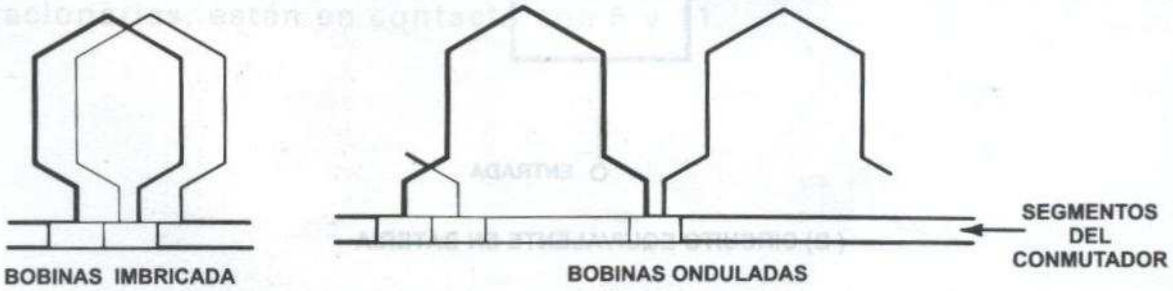
LAS ARMADURAS CON DEVANADO IMBRICADO TIENEN SUS BOBINAS CONECTADAS EN PARALELO, SE USAN MÁQUINAS PARA OPERACIÓN CON ALTA CORRIENTE Y BAJO VOLTAJE

2.2.2.2 ARMADURA CON DEVANADO ONDULADO

Las armaduras con devanado ondulado se usan en máquinas diseñadas para alto voltaje y baja corriente. En este tipo de armadura, las bobinas están conectadas en serie, el voltaje de cada bobina se suma, pero la capacidad de conducción de corriente es la misma, un ejemplo de aplicación de estos devanados se tiene en el motor eléctrico de los megóhmetros accionados manualmente un devanado de armadura tipo ondulado. Una armadura con devanado ondulado nunca contiene más de dos trayectorias en paralelo para el flujo de corriente, sin importar el número de polos y no contienen también más de un grupo de escobillas (en grupo de escobillas en una positiva y una negativa).



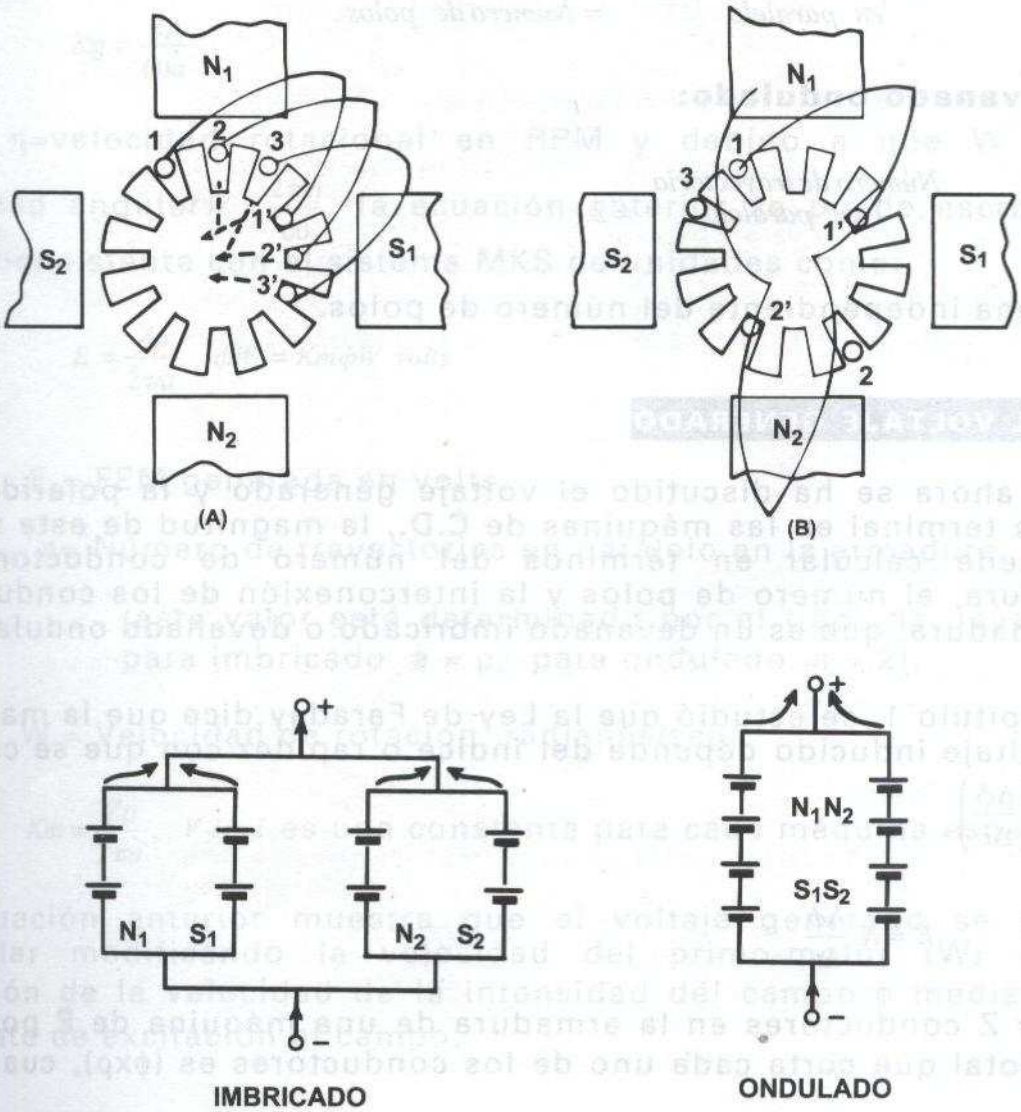
LAS ARMADURAS CON DEVANADO ONDULADO O SERIE SE USAN EN MÁQUINAS CON ALTO VOLTAJE Y BAJA CORRIENTE DE OPERACIÓN



POSIBLES CONEXIONES DE LAS BOBINAS DE ARMADURA

2.2.3 MÁQUINAS MULTIPOLARES

Con máquinas de dos polos, sólo son posibles las variaciones mostradas en las figuras anteriores, pero con máquinas de 4 polos se permiten dos variaciones como las mostradas en las figuras (a) y (b) siguientes. En la figura (a), se muestra el principio de un devanado imbricado, cada bobina debe cubrir aproximadamente un paso polar y en el diagrama mostrado hay dos grupos de polos N_1S_1 y N_2S_2, el lado de bobina 1 bajo N_1 está conectado a 1' bajo S_1, un paso polar retirado, está eslabonado por detrás a 2 bajo N_1 y conectado a 1' bajo S_1, un paso polar distante etc., el proceso se continua hasta que todas las ranuras bajo ambos grupos de polos estén llenas.



Los devanados imbricado y ondulado se pueden dibujar como circuitos equivalentes en la misma manera, y si esto se hace, se encuentra que el devanado de armadura se divide en cuatro trayectorias en paralelo para el devanado imbricado y dos trayectorias para el devanado ondulado, por lo que se puede usar la analogía con baterías, como se muestra en (B).

Lo anterior, se puede hacer extensivo a cualquier número de polos y se encontrará que para:

Un devanado imbricado:

$$\text{Número de trayectorias en paralelo} = \text{Número de polos}$$

Un devanado ondulado:

$$\text{Número de trayectoria en paralelo} = 2$$

En forma independiente del número de polos.

2.3 El voltaje generado

Hasta ahora se ha discutido el voltaje generado y la polaridad del voltaje terminal en las máquinas de C.D., la magnitud de este voltaje se puede calcular en términos del número de conductores de armadura, el número de polos y la interconexión de los conductores de armadura, que es un devanado imbricado o devanado ondulado.

Del capítulo 1, se estudió que la Ley de Faraday dice que la magnitud del voltaje inducido depende del índice o rapidez con que se corta el flujo $\left(\frac{\Delta\phi}{\Delta t}\right)$

$$E = N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Si hay Z conductores en la armadura de una máquina de P polos, el flujo total que corta cada uno de los conductores es ($\phi x \rho$), cuando la

velocidad rotacional es η (RPM) ó η/60 (RPS) y los Z conductores están conectados en **a** trayectorias en paralelo, el voltaje generado en cada conductor es (ϕρη/60), con Z/a conductores en serie por trayectoria paralelo, entonces la FEM generada es:

$$E = \frac{Z\rho}{60a}\phi\eta \ volts$$

Se puede escribir también como:

$$E = Kg\phi\eta \ volts$$

Donde:

$$Kg = \frac{Z\rho}{60a}$$

Como η=velocidad rotacional en RPM y debido a que W es la velocidad angular $W = \frac{2\pi\eta}{60}$, la ecuación anterior se puede escribir en forma consistente con el sistema MKS de unidades como:

$$E = \frac{Z\rho}{2\pi a} \ \phi W = Km\phi W \ volts$$

Siendo:

E = FEM generada en volts.

a= Número de trayectorias en paralelo en la armadura

(este valor está determinado por el tipo de devanado, para imbricado a = ρ, para ondulado, a = 2).

W = Velocidad de rotación, radianes/seg.

$Km = \frac{Z\rho}{2\pi a}$, V/rad, es una constante para cada máquina específica.

La ecuación anterior muestra que el voltaje generado se puede controlar modificando la velocidad del primo-motor (W) y por variación de la velocidad de la intensidad del campo ϕ mediante la corriente de excitación al campo.

Ejemplo

Un generador de 60 KW, con 4 polos, tiene un devanado imbricado colocado en una armadura con 48 ranuras, cada ranura contiene 6 conductores, el flujo por polo es ϕ=0.08 Wb y la velocidad de rotación es 1040 RPM.

a) Calcular el voltaje generado.

b) Qué valor de corriente circula en los conductores de la armadura cuando el generador opera a plena carga.

Solución

a) El número de conductores en la armadura es:

$$Z = \text{No. de ranuras x}(\text{No. conductores/ranura})$$

$$Z = 48 \times 6 = 288$$

Para un devanado imbricado, el número de trayectorias en paralelo en el circuito de la armadura es igual al número de polos, en este caso: a = ρ; a = 4

Por lo tanto:

$$E = \frac{Z\rho}{60a} x\, \phi\, x\eta$$

$$E = \frac{288\, x\, 4}{60\, x\, 4} x\, 0.08\, x\, 1040$$

$$E = 400V$$

b) La corriente total entregada por el generador es:

$$I = \frac{p}{V} = \frac{60000}{400} = 150A$$

Como se tienen 4 trayectorias en paralelo, la corriente por cada una es: 150/4 = 37.5ª, que es también el valor de corriente que circula por los conductores.

Ejemplo

Calcular el voltaje inducido en el devanado de armadura de un generador de 4 polos que tiene 500 conductores activos que operan a 1800 RPM, el flujo por polo es mWb.

30

a) Si el devanado es imbricado.
b) Si el devanado es ondulado.
c) Si la corriente que circula por la armadura es 100A, calcular la potencia.

Solución

a) Si se trata de un devanado imbricado ρ = a, en este caso, a = 4 al voltaje inducido es:

$$E = \frac{\phi \eta Z}{60}\left(\frac{\rho}{a}\right)$$

$$E = \frac{(30\,x\,10^{-3})(1800)(500)}{60}\left(\frac{4}{4}\right)$$

$$E = 450\,volts$$

b) Si la armadura tiene un devanado ondulado.

$$a = 2$$

Entonces:

$$E = \frac{\left(30\,x\,10^{-3}\right)\left(1800\right)\left(500\right)}{60}\left(\frac{4}{2}\right) \qquad E = 900\ volts$$

c) Para una corriente de armadura de 100 A, si se considera el caso del devanado imbricado (a=ρ=4), cada trayectoria transporta una corriente de:

$$\frac{Ia}{a} = \frac{100}{4} = 25A$$

La potencia desarrollada por la armadura es:

$$Pa = EI_a = 500\,x\,100 = 50\,KW$$

Ejemplo

Un generador de C.D. de 4 polos, tiene una armadura con devanado ondulado con 46 ranuras y 10 conductores por ranura, el voltaje indicado en la armadura es 240V y opera a 1200 RPM. Calcular el flujo por polo.

Solución

De la ecuación para el voltaje inducido:

$$E = \frac{\phi \eta Z}{60}\left(\frac{p}{a}\right)$$

Despejando ϕ:

$$\phi = \frac{60E}{\eta Z}\left(\frac{a}{p}\right)$$

En este caso:

$$Z = 10\ x\ 46 = 460$$
$$a = 2$$
$$p = 4$$

$$\phi = \frac{60\,x\,240}{1200\,x\,460}\,x\left(\frac{2}{4}\right) = 13.04\ mWb$$

Ejemplo

Se tiene la armadura de un generador de 4 polos, la armadura tiene un devanado imbricado, 144 ranuras y dos lados de bobina para ranura, cada bobina tiene 4 espiras, suponiendo un flujo por polo de 15 mWb y que la armadura gira a 720 RPM, calcular el voltaje inducido.

Solución

Para este ejemplo, por tratarse de un devanado imbricado:

$$p = a = 4$$

También de datos: $\eta = 720$

$$\phi = 0.015\, Wb$$

$$Z = 144\ ranuras\ x\ 2\ lados\ de\ bobina\ x\ 4\ espiras$$

$$Z = 1152$$

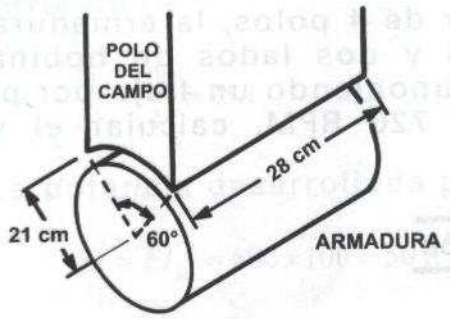
Por lo tanto:

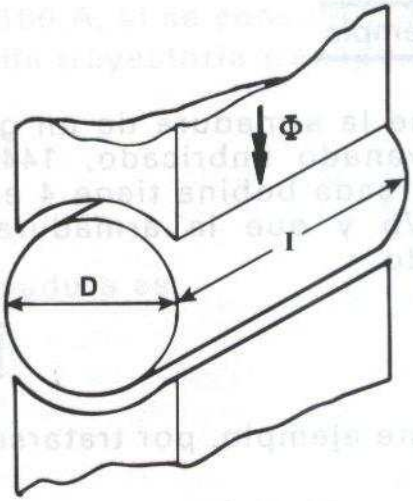
$$E = \frac{\phi \eta Z}{60}\left(\frac{p}{a}\right) = \frac{0.015\ x\ 720\ x\ 1152}{60}\left(\frac{4}{4}\right)$$

$$E = 207.36\ volts$$

Ejemplo

Un generador de C.D. de 100 KW, 230 V, tiene 4 polos con una armadura con devanado imbricado y 326 conductores, opera a 650 RPM, si el espacio para armadura de la máquina tiene 42 cm de diámetro, su longitud axial es 28 cm y cada polo cubre un ángulo de 60°, calcular la densidad de flujo en el entrehierro, cuando el voltaje de armadura Ea = 252V.





Solución

De la ecuación para el voltaje inducido:

$$E = \frac{\phi \eta Z}{60}\left(\frac{p}{a}\right)$$

Despejando el flujo:

$$\phi = \frac{60E}{\eta Z}\left(\frac{a}{p}\right) \quad ; \quad \begin{array}{l} a = p = 4 \\ Z = 326 \text{ conductores} \\ \eta = 650 \text{ RPM} \end{array}$$

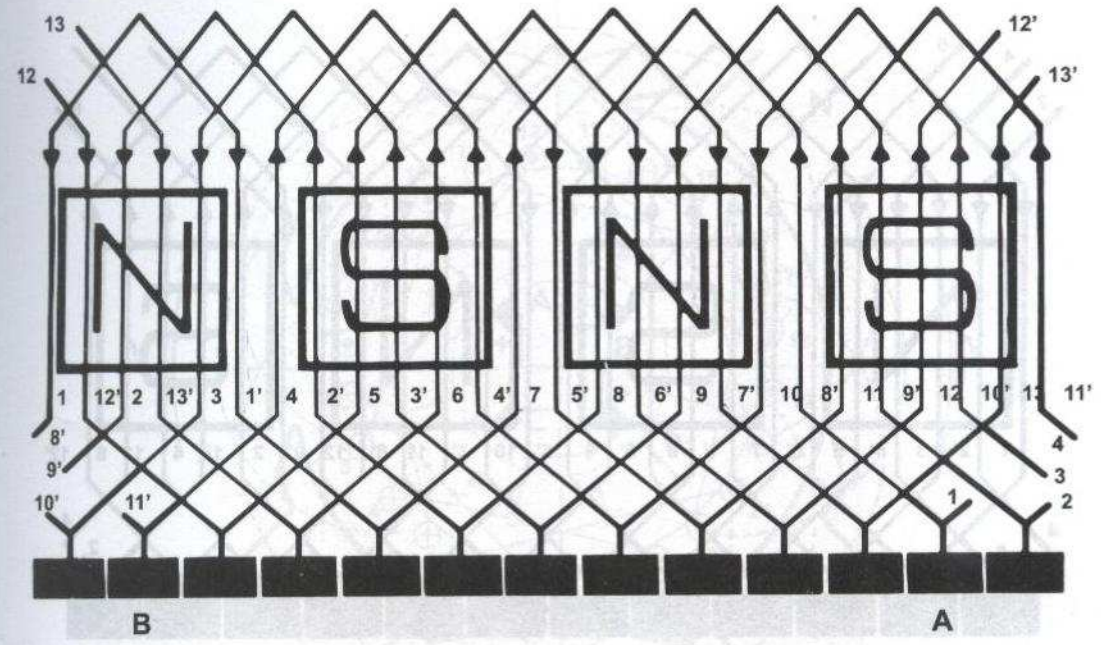
$$\phi = \frac{60 \; x \; 252}{650 \; x \; 326}\left(\frac{4}{4}\right) = 71.35 \; mWb$$

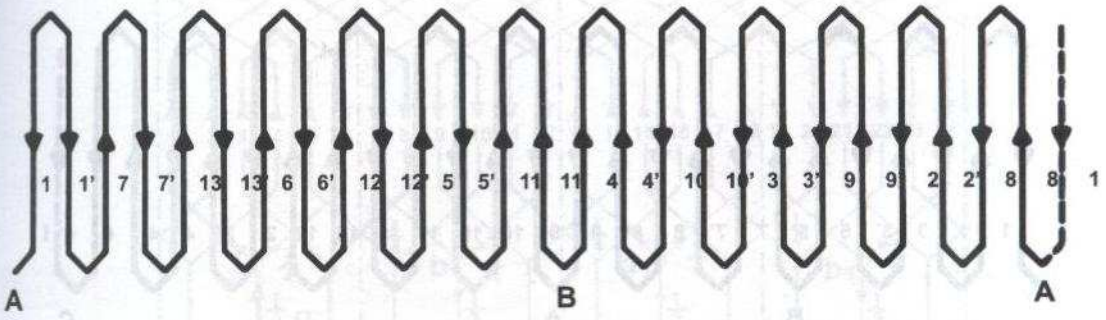
La superficie del área del polo es $A = r\theta\ell$

$$\theta = 60° = \frac{\pi}{3}; A = (0.21)(\pi/3)(0.28) = 0.0616 \; m^2$$

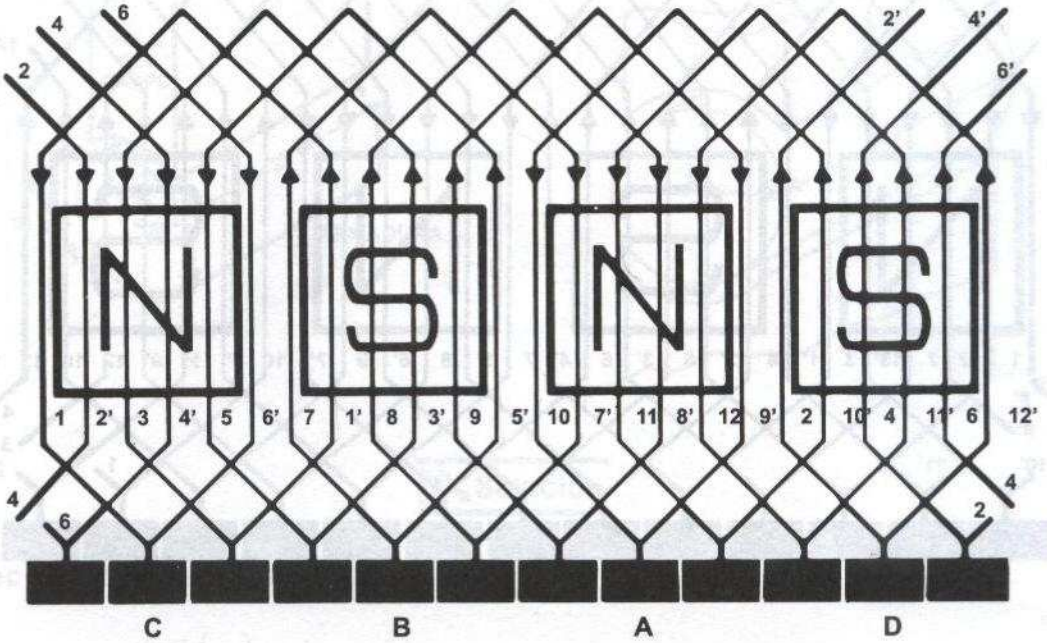
De aquí:

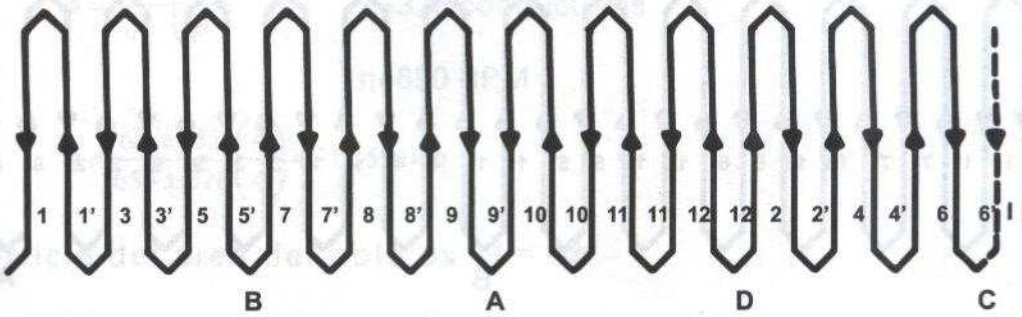
$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{71.35 \; x \; 10^{-3}}{0.0616} = 1.16 \; T$$



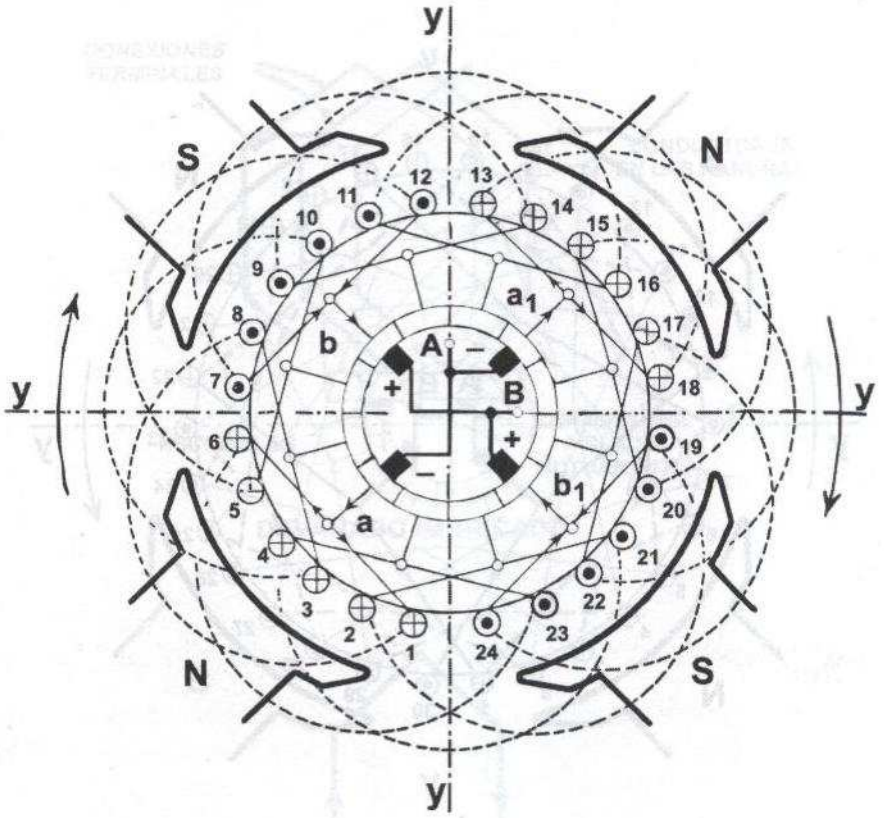


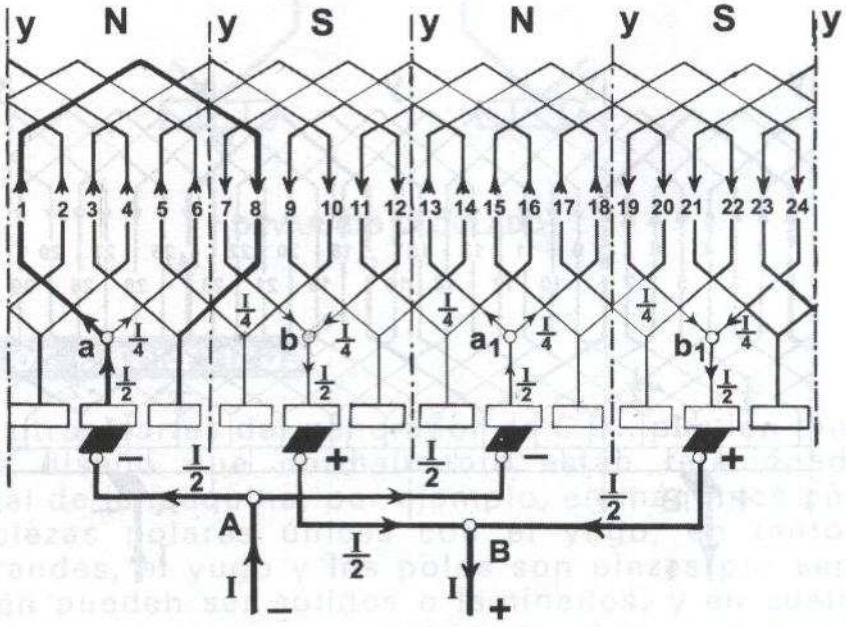
CONEXIÓN DE BOBINAS EN LA ARMADURA PARA UNA MÁQUINA CON CUATRO POLOS Y DOS GRUPOS DE ESCOBILLAS



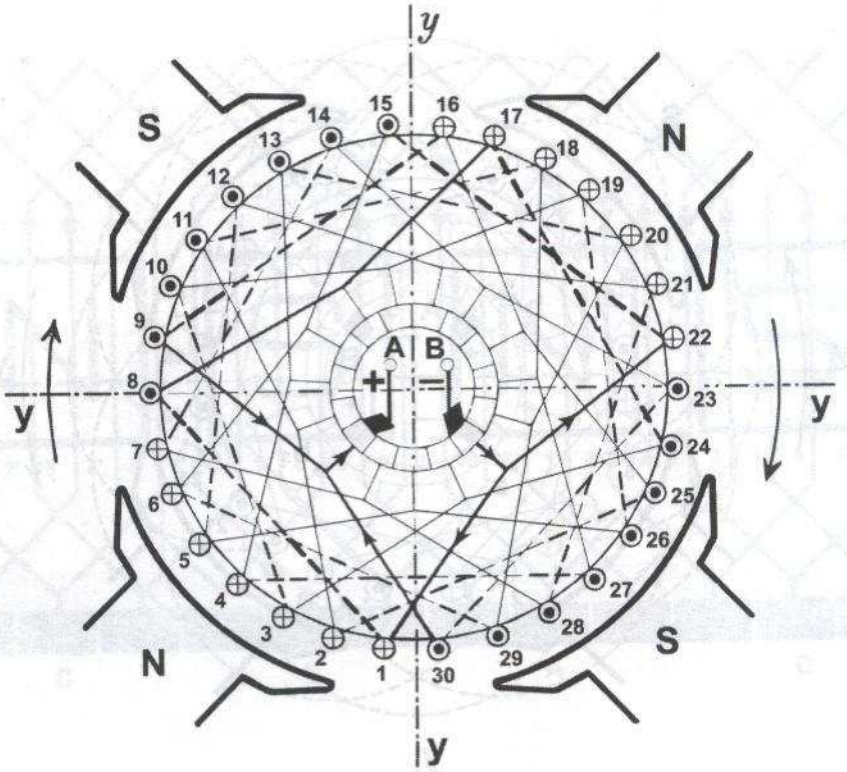


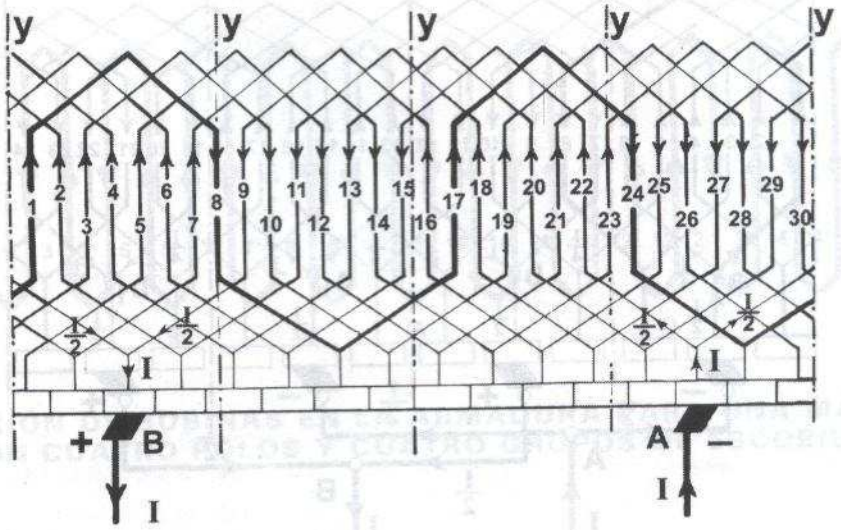
CONEXIÓN DE BOBINAS EN LA ARMADURA PARA UNA MÁQUINA CON CUATRO POLOS Y CUATRO GRUPOS DE ESCOBILLAS



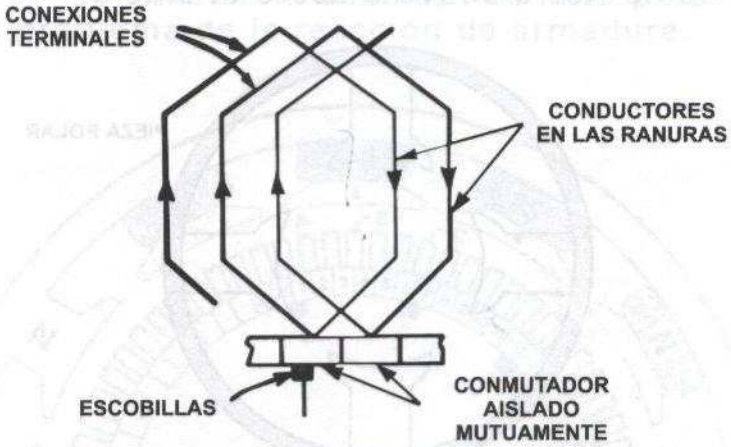


DEVANADO IMBRICADO PARA UNA MÁQUINA DE 4 POLOS

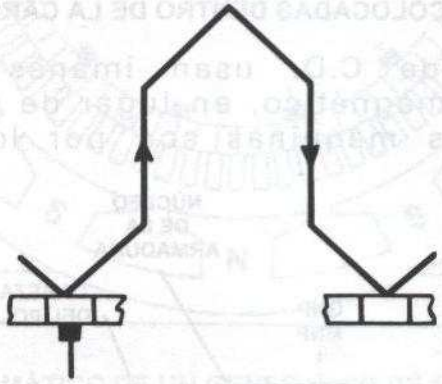




DEVANADO ONDULADO PARA UNA MÁQUINA DE 4 POLOS



DEVANADO IMBRICADO

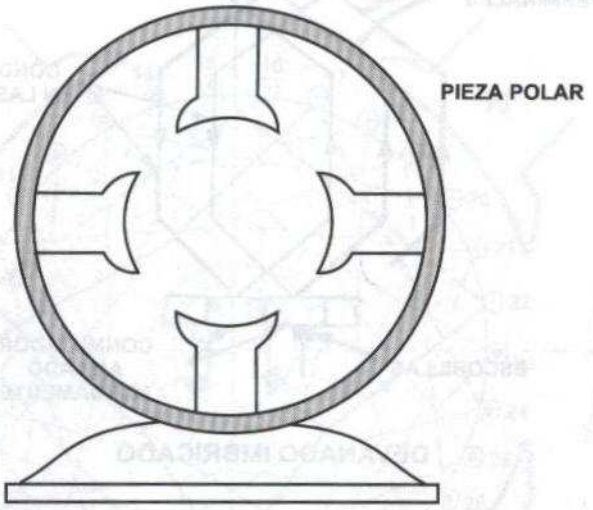


DEVANADO ONDULADO

2.4 Los polos magnéticos

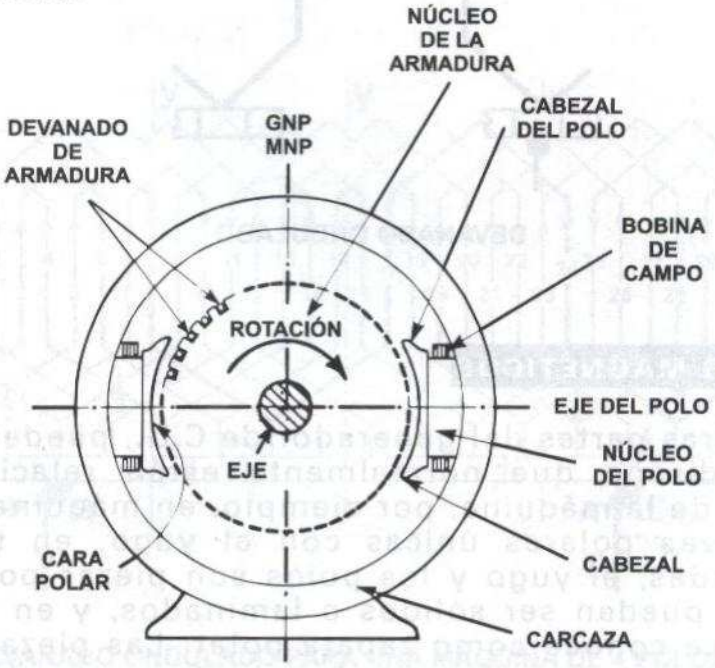
Estos, como otras partes del generador de C.D., pueden tener algunas variantes de diseño que normalmente están relacionadas con el tamaño global de la máquina, por ejemplo, en máquinas pequeñas los polos son piezas polares únicas con el yugo, en tanto que para máquinas grandes, el yugo y los polos son piezas por separado, los polos también pueden ser sólidos o laminados, y en cualquier caso, tienen lo que se conoce como zapata polar. Las piezas polares están localizadas dentro de la carcaza de la máquina, esta pieza polar o polo proporciona el campo magnético necesario para la operación de la

máquina, están construidas de algún tipo de buen material magnético conductivo, tal como fierro suave o acero al silicio.



LAS PIEZAS POLARES ESTÁN CONSTRUIDAS DE FIERRO SUAVE Y COLOCADAS DENTRO DE LA CARCAZA

Algunos generadores de C.D. usan imanes permanentes para proporcionar el campo magnético, en lugar de electroimanes (pieza polar y bobinas), estas máquinas son por lo general pequeñas (menores de 1 KW).



PRINCIPALES PARTES DE UNA MÁQUINA DE C.D.

El aspecto global de una máquina se puede mostrar en la siguiente figura, en donde se muestran además los interpolos que permiten actuar sobre el problema de la reacción de armadura.

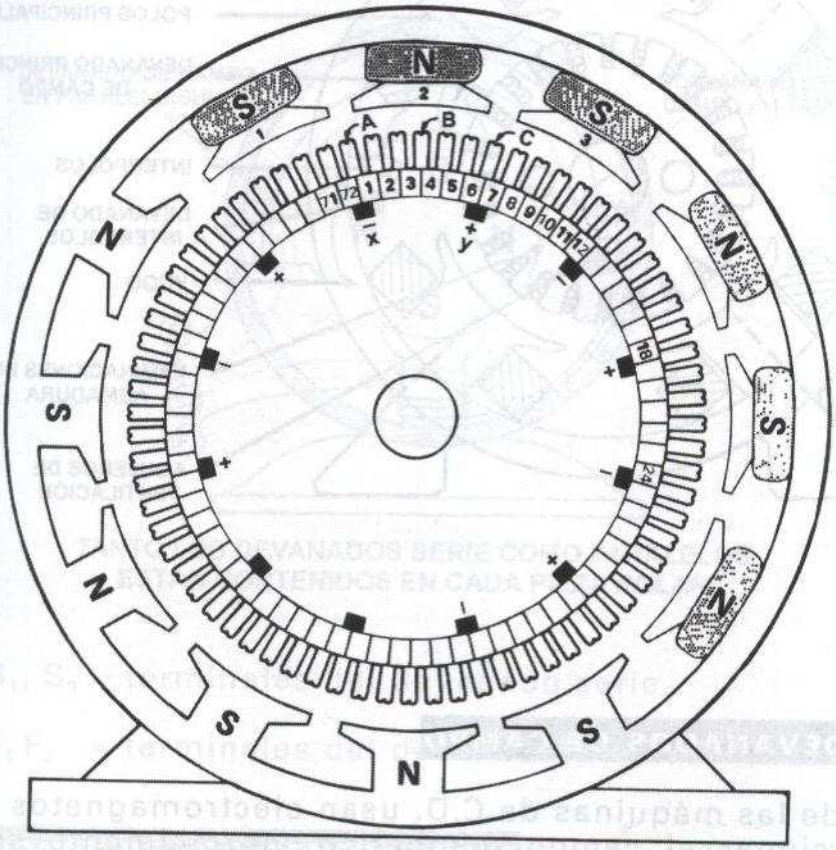
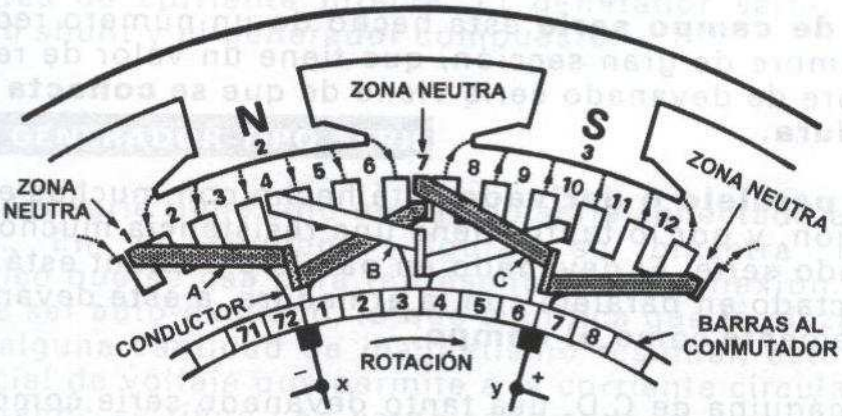
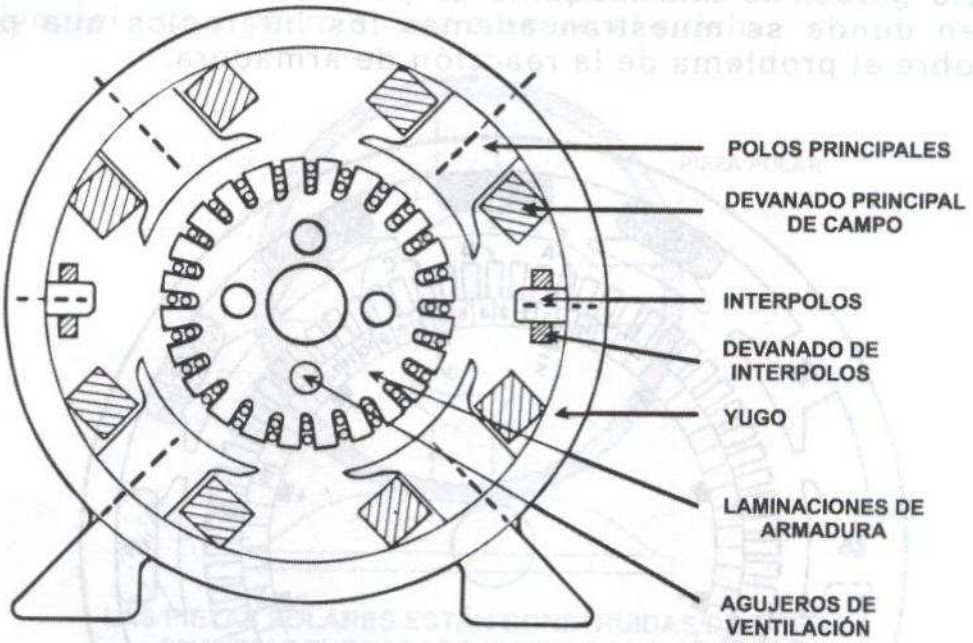


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN GENERADOR DE 12 POLOS Y 72 BOBINAS



VISTA DE DETALLE DE LAS BOBINAS ENTRE ESCOBILLAS ADYACENTES



2.4.1 Los devanados de campo

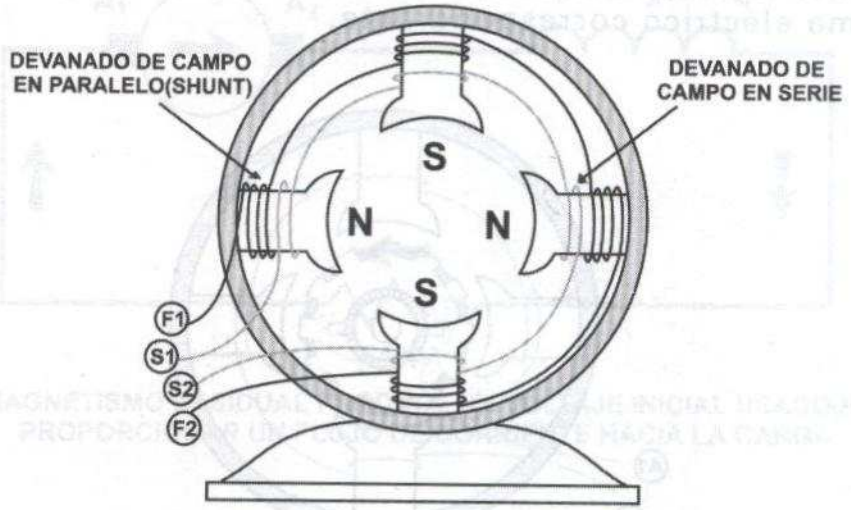
La mayoría de las máquinas de C.D. usan electromagnetos devanados, para proporcionar el campo magnético, normalmente se usan dos tipos de devanados: **Uno se conoce como el campo serie y el otro es el campo paralelo, derivado o shunt.**

El devanado de campo serie está hecho de un número reducido de espiras de alambre de gran sección, que tiene un valor de resistencia bajo, su nombre de devanado serie viene de que se **conecta en serie con la armadura.**

El devanado paralelo o derivado está hecho con muchas espiras de pequeña sección, y por lo tanto, tiene una resistencia mucho más alta que el devanado serie. El devanado en paralelo o shunt está diseñado para ser conectado en paralelo con la armadura, a este devanado se le conoce simplemente como **el campo.**

Cuando una máquina de C.D. usa tanto devanado serie como paralelo (shunt), cada polo o pieza polar contiene a ambos devanados, como se muestra en la siguiente figura, los devanados se arrollan sobre la

pieza polar, de tal manera que cuando circula la corriente a través de las bobinas, produce polaridades magnéticas alternas.



TANTO LOS DEVANADOS SERIE COMO PARALELOS ESTÁN CONTENIDOS EN CADA PIEZA POLAR

S_1, S_2 = terminales del devanado serie.

F_1 F_2 = terminales del devanado paralelo (shunt).

2.5 CONEXIONES DE LOS GENERADORES

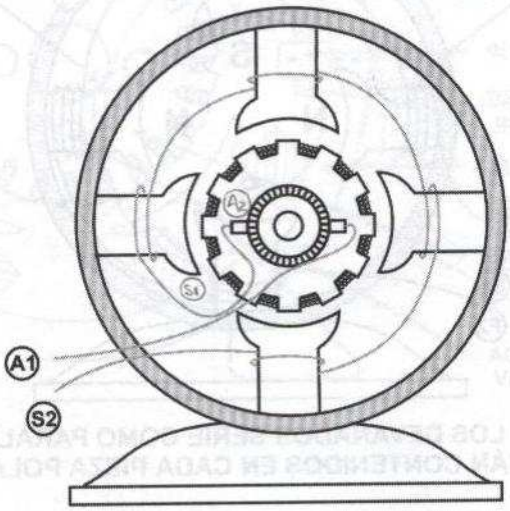
Por el tipo de conexión de los devanados, hay tres tipos básicos de generadores de corriente directa. El generador serie, el generador derivado o shunt y el generador compuesto.

2.5.1 EL GENERADOR TIPO SERIE

El generador serie tiene sólo un campo serie conectado en serie con la armadura. En la siguiente figura, se muestra un diagrama esquemático que se usa para representar esta conexión. El generador serie debe ser auto-excitado, lo que significa que la pieza polar o polo contiene alguna cantidad de magnetismo residual, esto produce una salida inicial de voltaje que permite a la corriente circular a través del campo, cuando se tiene una carga conectada al generador. El voltaje de salida producido por el generador es proporcional a tres factores.

1. El numero de espiras de alambre en la armadura.
2. La intensidad del campo magnético.
3. La velocidad de la acción del cortado.

En la siguiente figura, se muestra la conexión para un generador serie y su diagrama eléctrico correspondiente.



EL CAMPO SERIE ESTÁ CONECTADO EN SERIE CON LA ARMADURA

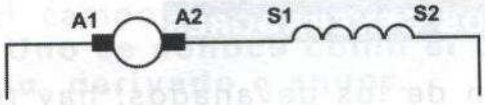
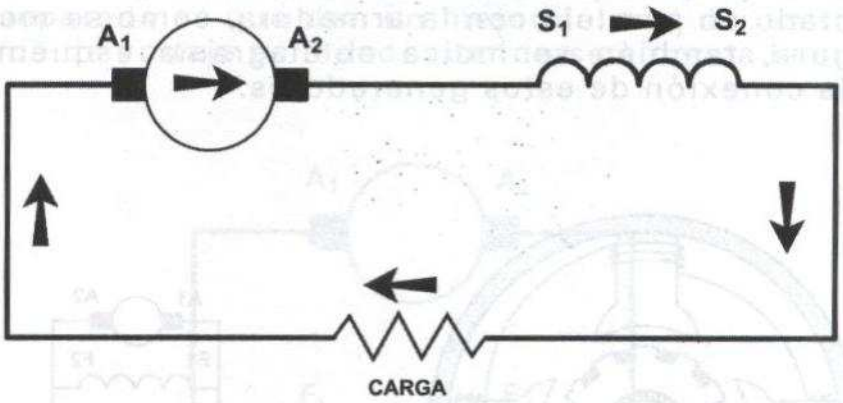


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO UN GENERADOR EN SERIE

2.5.2 La conexión de carga al generador serie

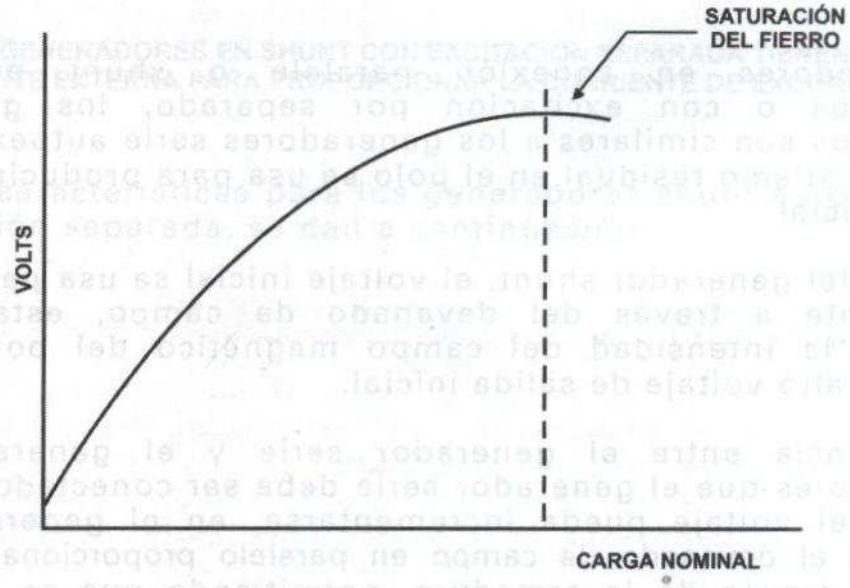
Cuando se conecta una carga a las terminales de salida de un generador serie, el voltaje inicial producido por el magnetismo residual de los polos o piezas polares, produce un flujo de corriente a través de la carga y dado que el devanado serie está conectado en serie con la armadura, la corriente que circula a través de la armadura y carga, debe también circular a través al devanado de campo en serie, esto produce que el magnetismo de los polos sea más intenso y

produzca más líneas magnéticas de flujo y cuando la intensidad del campo en los polos se incrementa, el voltaje de salida lo hace también.



EL MAGNETISMO RESIDUAL PRODUCE UN VOLTAJE INICIAL USADO PARA PROPORCIONAR UN FLUJO DE CORRIENTE HACIA LA CARGA

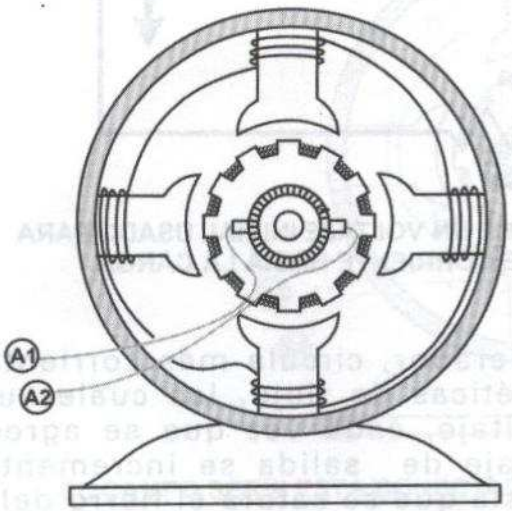
Si se incrementa la carga del generador, circula más corriente y los polos producen más líneas magnéticas de flujo, las cuales una vez más incrementan la salida de voltaje, cada vez que se agrega una carga al generador serie, su voltaje de salida se incrementa, este incremento de voltaje continua hasta que se satura el fierro del polo o pieza polar, en este punto, un incremento en la carga dará un decremento en el voltaje de salida.



CURVA CARACTERÍSTICA DE UN GENERADOR SERIE

2.5.3 GENERADORES EN CONEXIÓN PARALELO O SHUNT

Los generadores en paralelo o shunt contienen sólo un devanado de campo conectado en paralelo con la armadura, como se muestra en la siguiente figura, también se indica el diagrama esquemático para representar la conexión de estos generadores.



EL DEVANADO SHUNT O DERIVADO
SE CONECTA EN PARALELO CON LA ARMADURA

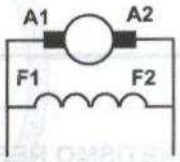
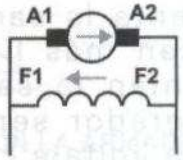


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN
GENERADOR SHUNT O DERIVADO

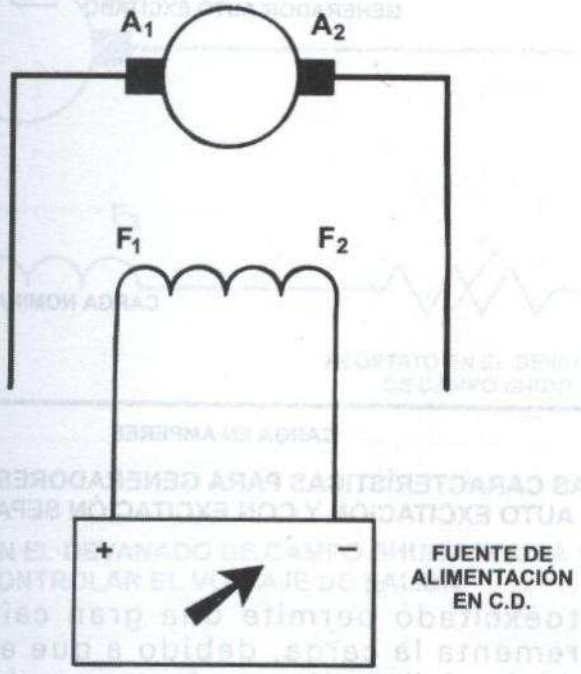


Los generadores en conexión paralelo o shunt pueden ser autoexcitados o con excitación por separado, los generadores autoexcitados son similares a los generadores serie autoexcitados en que el magnetismo residual en el polo se usa para producir un voltaje de salida inicial.

En el caso del generador shunt, el voltaje inicial se usa para producir una corriente a través del devanado de campo, esta corriente incrementa la intensidad del campo magnético del polo, la cual produce un alto voltaje de salida inicial.

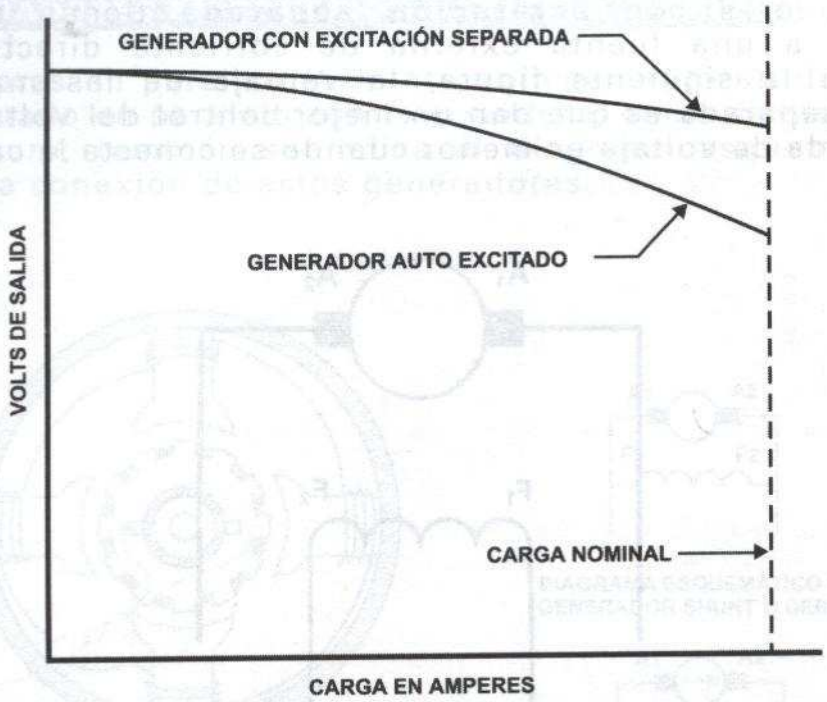
Otra diferencia entre el generador serie y el generador shunt autoexcitado es que el generador serie debe ser conectado a la carga antes que el voltaje pueda incrementarse, en el generador shunt autoexcitado el devanado de campo en paralelo proporciona un circuito completo a través de la armadura, permitiendo que se obtenga el voltaje pleno de salida antes que la carga se conecte al generador.

Los generadores con **excitación separada** tienen sus campos conectados a una fuente externa de corriente directa, como se muestra en la siguiente figura, la ventaja de las máquinas con excitación separada es que dan un mejor control del voltaje de salida y que la caída de voltaje es menor cuando se conecta la carga.



LOS GENERADORES EN SHUNT CON EXCITACIÓN SEPARADA TIENEN UNA FUENTE EXTERNA PARA PROPORCIONAR LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN

Las curvas características para los generadores shunt autoexcitados y con excitación separada, se dan a continuación.



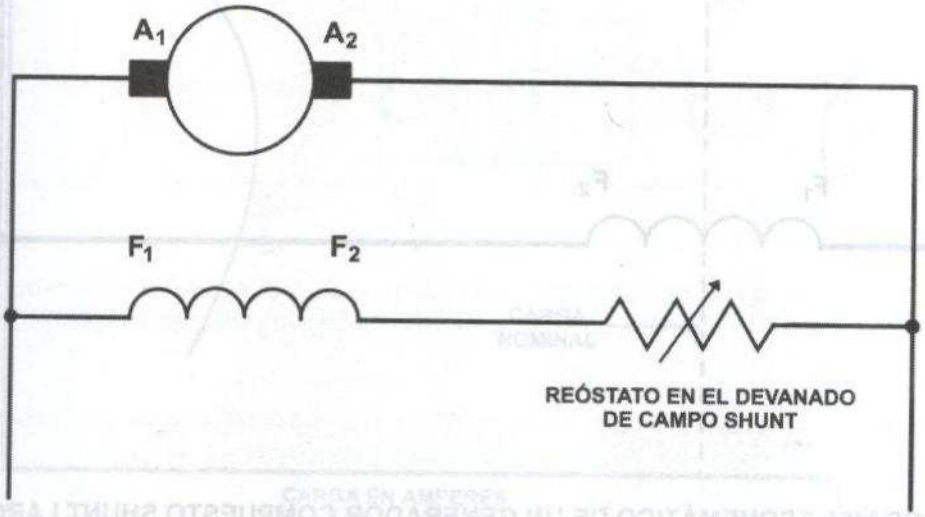
CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA GENERADORES SHUNT CON AUTO EXCITACIÓN Y CON EXCITACIÓN SEPARADA

El generador autoexcitado permite una gran caída de voltaje cuando se conecta o incrementa la carga, debido a que el voltaje de armadura se usa para producir el flujo de corriente en el devanado de campo, cada vez que el voltaje se disminuye o reduce, el flujo de corriente a través del campo se reduce, produciendo una reducción en la cantidad de líneas de flujo magnético en el polo, esto a su vez produce una reducción en el voltaje de salida. La máquina con excitación separada no tiene este problema debido a que el flujo del campo se mantiene constante por la fuente externa de potencia.

2.5.4 La corriente de excitación del campo

En forma independiente de que tipo de generador shunt se use, el voltaje de salida está generalmente controlado por la cantidad de **corriente de excitación del campo**. Esta es la corriente directa que circula a través del devanado de campo en derivación o shunt, esta corriente se usa para convertir el polo o pieza polar en electroimanes.

Debido a que uno de los factores que determina el voltaje de salida del generador de C.D. es la intensidad del campo magnético, el voltaje de salida se puede controlar por la cantidad de corriente que circula a través de las bobinas de campo. Un método simple para controlar esta corriente, es el uso de un **reóstato de campo shunt**, que se conecta en serie con el devanado de campo, como se muestra en la figura:



EL REÓSTATO EN EL DEVANADO DE CAMPO SHUNT SE USA PARA CONTROLAR EL VOLTAJE DE SALIDA

2.5.5 GENERADORES COMPUESTOS (COMPOUND)

Estos generadores tienen tanto campo serie como campo derivado o shunt, las máquinas más grandes de C.D. tienen normalmente devanado compuesto, el devanado serie y el campo derivado se pueden conectar en dos formas, una conexión se conoce como **shunt-largo**, en la cual el devanado shunt tiene el campo shunt conectado en paralelo con la armadura y el devanado de campo, esta es la más usada de las conexiones.

La segunda conexión se le conoce como **shunt-corto**, en esta el campo derivado o shunt está conectado en paralelo con la armadura.

Composición la relación entre la intensidad de los dos campos en un generador determina el grado o cantidad de **composición** para la máquina y se dice entonces que la máquina puede ser **sobrecompuesta** o **sobre compensada compuesta o bajo compensada**, esto se caracteriza

por las diferencias en el voltaje de salida, como se muestra en la gráfica:

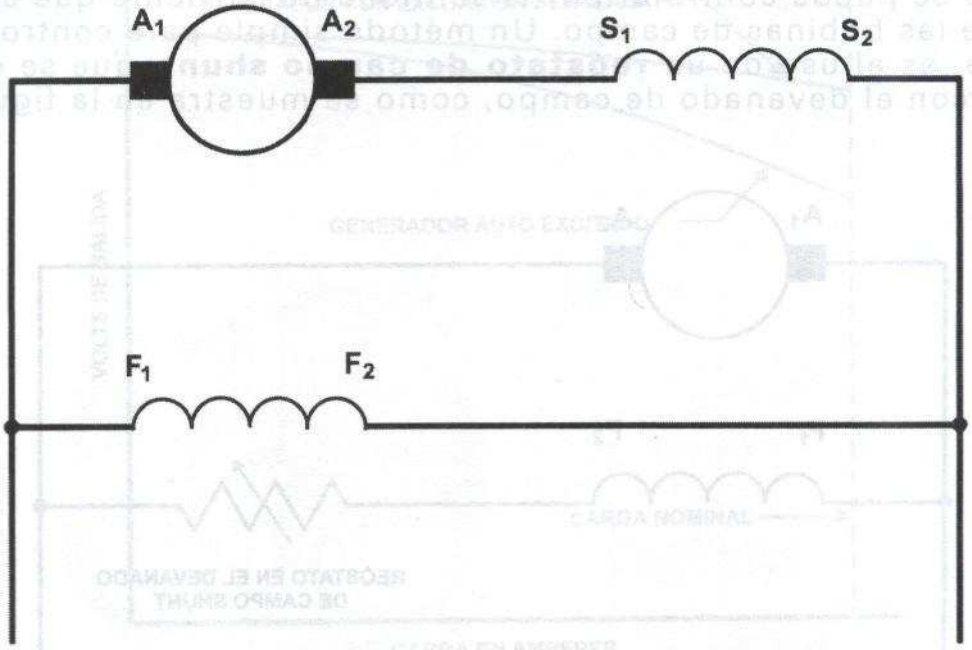


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN GENERADOR COMPUESTO SHUNT LARGO

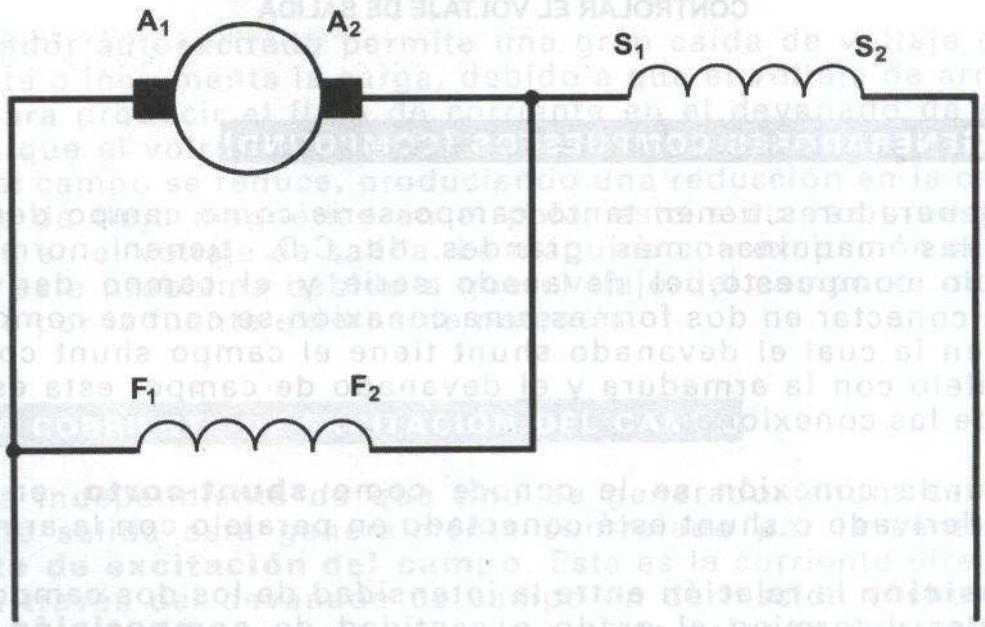
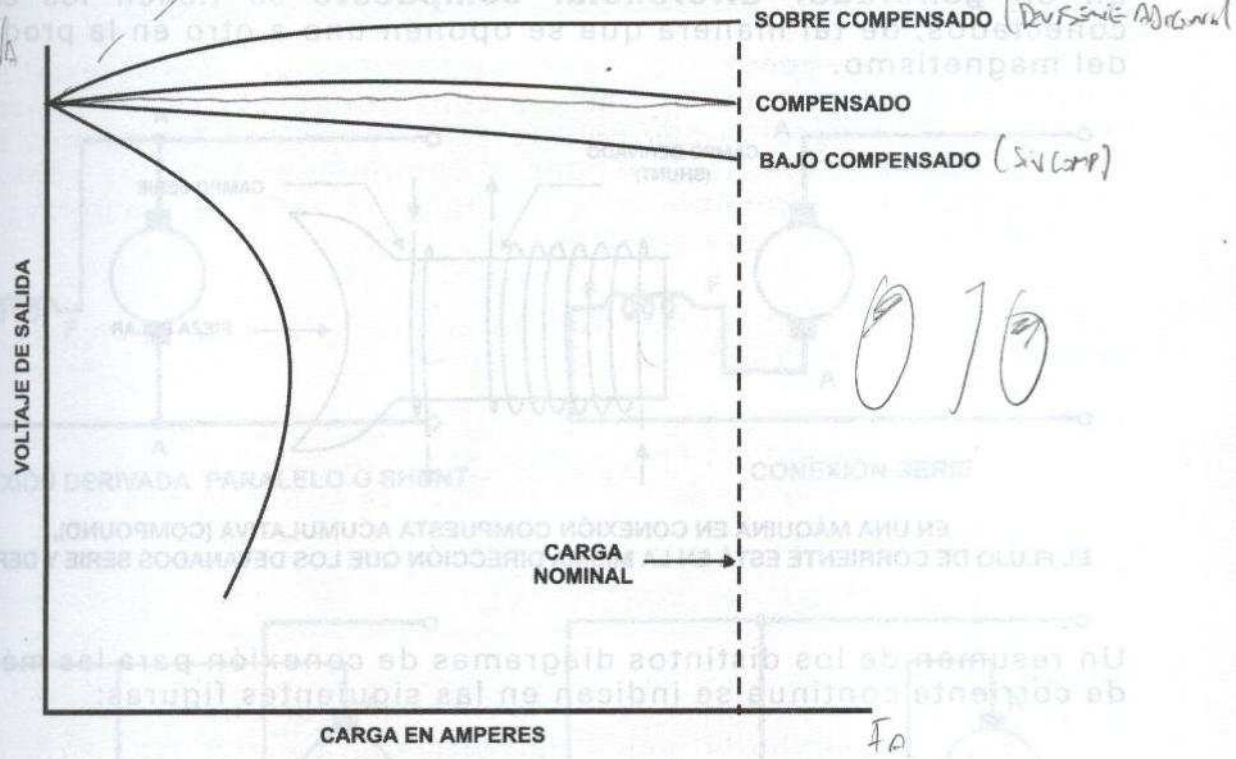


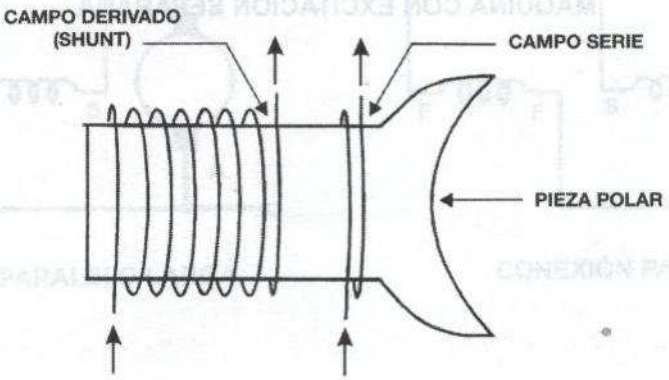
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN GENERADOR COMPUESTO SHUNT - CORTO



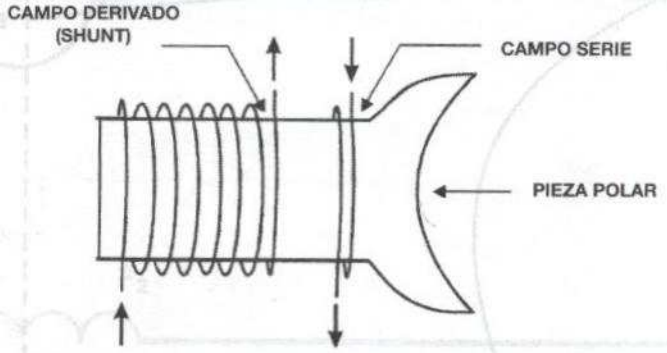
CURVAS CARACTERÍSTICAS DE GENERADORES COMPUESTOS

2.5.6 Generadores compuestos acumulativo y diferencial

Los generadores de corriente directa están por lo general conectados de tal manera que son **compuestos acumulativos**, esto significa que los campos serie y shunt están conectados de forma que cuando la corriente circula por ellos se ayudan una a otra en la producción del magnetismo, es decir, cada uno de los devanados de campo produce la misma polaridad en el polo.

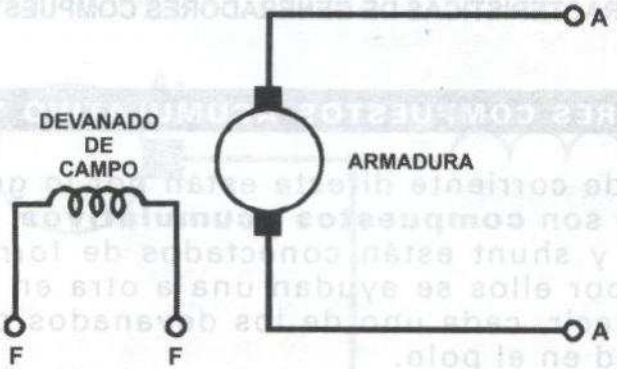


En un **generador diferencial compuesto** se tienen los campos conectados, de tal manera que se oponen uno a otro en la producción del magnetismo.

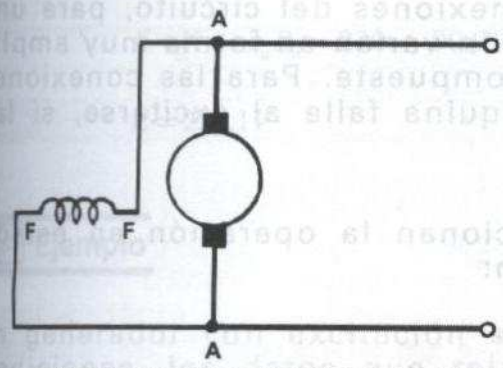


EN UNA MÁQUINA EN CONEXIÓN COMPUESTA ACUMULATIVA (COMPOUND), EL FLUJO DE CORRIENTE ESTÁ EN LA MISMA DIRECCIÓN QUE LOS DEVANADOS SERIE Y DERIVADO

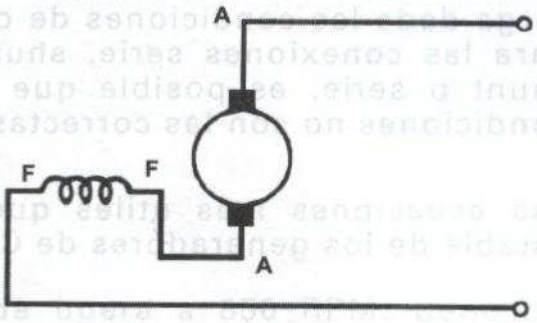
Un resumen de los distintos diagramas de conexión para las máquinas de corriente continua se indican en las siguientes figuras:



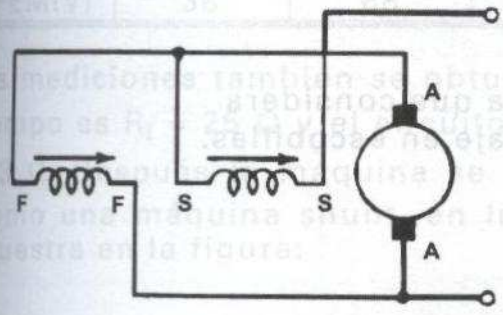
MÁQUINA CON EXCITACIÓN SEPARADA



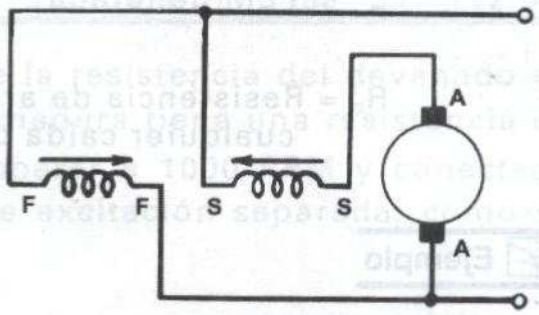
CONEXIÓN DERIVADA PARALELO O SHUNT



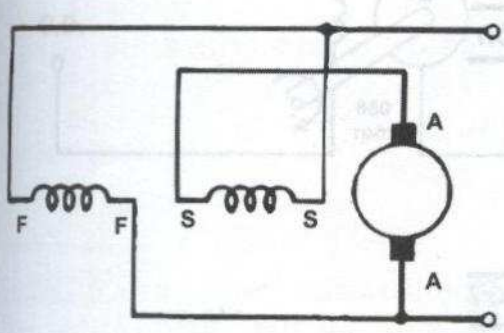
CONEXIÓN SERIE



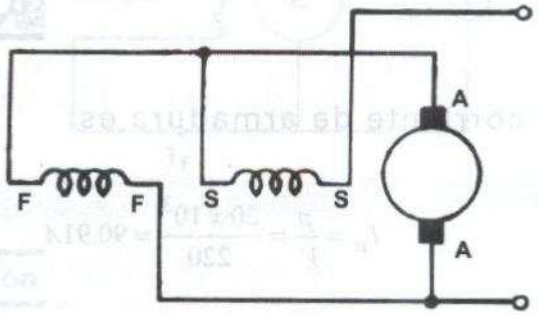
CONEXIÓN COMPUESTA ACUMULATIVA



CONEXIÓN COMPUESTA DIFERENCIAL



CONEXIÓN PARALELO LARGA



CONEXIÓN PARALELO CORTA

2.6 OPERACIÓN DE GENERADORES EN ESTADO ESTABLE

La salida de un generador bajo condiciones de estado estable está parcialmente determinada por las conexiones del circuito, para una carga dada las condiciones de operación varían en forma muy amplia para las conexiones serie, shunt o compuesta. Para las conexiones shunt o serie, es posible que la máquina falle al excitarse, si las condiciones no son las correctas.

Las ecuaciones más útiles que relacionan la operación en estado estable de los generadores de C.D. son:

$$E = \phi N Z \frac{p}{a} \qquad y \qquad V = E - I_a R_a$$

Aquí:

E = FEM generada

R_a = Resistencia de armadura que considera cualquier caída de voltaje en escobillas.

Ejemplo

Se tiene un generador de 2 polos con excitación separada que opera a 1000 RPM dando una potencia de salida de 20 KW a 220V. Calcular la FEM generada, suponiendo un valor de resistencia de armadura de 0.1 ohms.

Solución

La corriente de armadura es:

$$I_a = \frac{p}{V} = \frac{20 \, x \, 10^3}{220} = 90.91A$$

De la ecuación:

$$V = E - I_a R_a$$

Como el voltaje en terminales es:

V = 220 V.

$$E = V + I_a R_a = 220 + 90.91 x 0.1$$

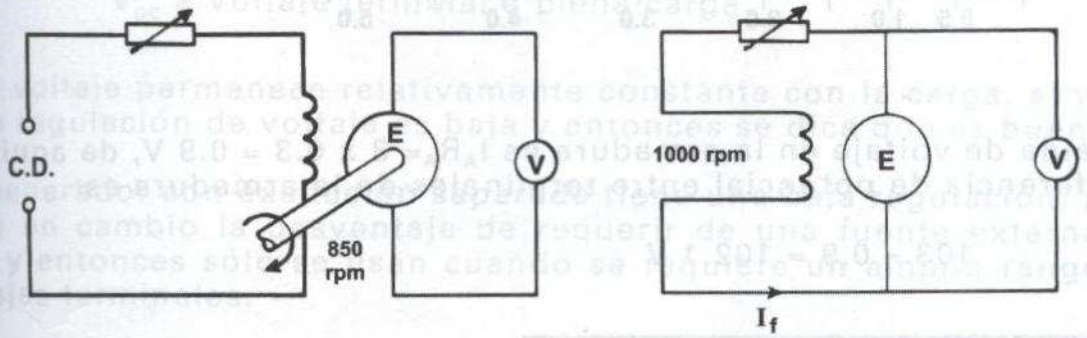
$$E = 229.1 V$$

Ejemplo

Un generador con excitación separada opera a 850 RPM, tiene de mediciones, los datos que relacionan la FEM con la corriente de excitación de campo y que se indican en la tabla siguiente:

IF(A)	1	2	3	4	5	6
FEM(V)	38	68	87	100.5	109	112.5

De mediciones también se obtuvo que la resistencia del devanado de campo es R_f = 25 Ω y el circuito de armadura tiene una resistencia de 0.3 Ω. Después la máquina se hace operar a 1000 RPM y conectada como una máquina shunt, en lugar de excitación separada, como se muestra en la figura:



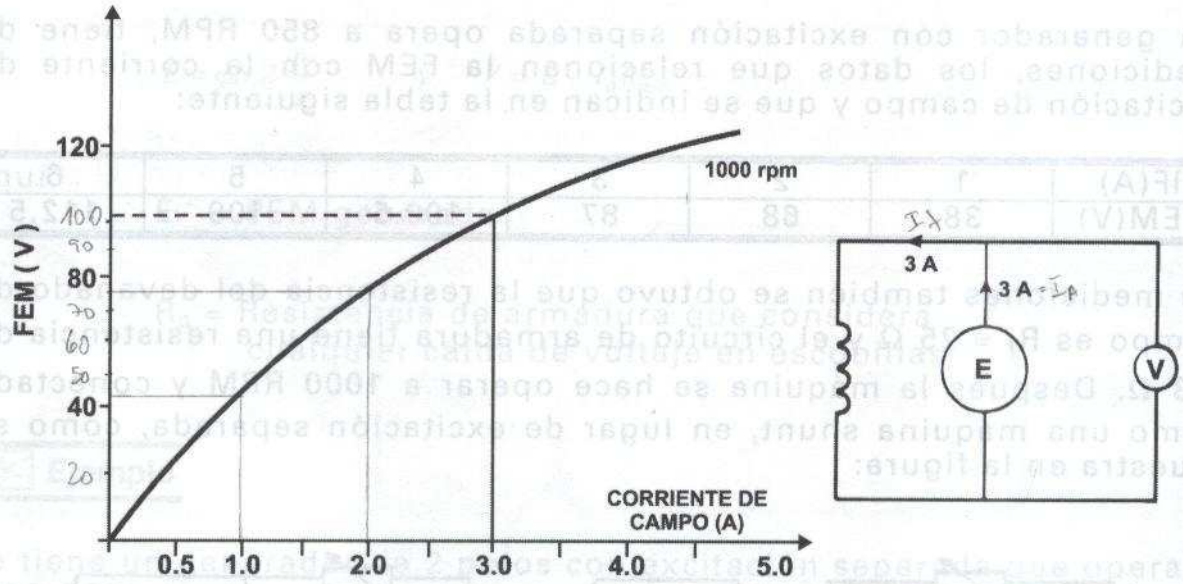
Solución

Para construir la característica de la máquina cuando opera a 1000 RPM, se parte de que el voltaje inducido es proporcional al flujo y a la velocidad de la máquina: $E \alpha \phi N$

Esto quiere decir que los valores de la tabla anterior se deben multiplicar por el valor resultante de la relación: 1000/850 y de esta manera se obtienen los valores a 1000 RPM.

IF(A)	1	2	3	4	5	6
FEM(850RPM)	38	68	87	100.5	109	112.5
FEM(1000RPM)	44.7	80	102.4	118.2	128.2	132.4

Con estos datos se traza la gráfica siguiente y se observa que para I_A = 3A el voltaje es 103 V.



La caída de voltaje en la armadura es $I_A R_A$= 3 x 0.3 = 0.9 V, de aquí que la diferencia de potencial entre terminales de la armadura es:

$$103 - 0.9 = 102.1 \text{ V}$$

2.6.1 LA REGULACIÓN DE VOLTAJE

Si se considera que se conecta carga al generador, entonces el voltaje terminal decrece (debido a que el devanado de armadura tiene resistencia), a menos que se haga alguna provisión para mantenerlo constante, la caída del voltaje terminal se debe principalmente a la resistencia del circuito de armadura 12A. En general, el voltaje terminal es:

$$V_t = E - I_A R_A$$

Donde:

V_t = Voltaje terminal.
I_A = Corriente de armadura (o corriente de carga I_L)

Otro factor que contribuye a disminuir el voltaje terminal, es el decremento en el flujo debido a la reacción de armadura. La corriente en la armadura establece una FMM que distorsiona el flujo de campo principal, dando como resultado un debilitamiento del flujo, especialmente en las máquinas sin interpolos, a este efecto se le conoce como ***"Reacción de armadura"***.

Para tener una medida de qué tanto cambia el voltaje terminal con respecto a su condición de vacío, es costumbre hablar del concepto de **"regulación de voltaje"** que se expresa normalmente como un porcentaje del voltaje a plena carga del generador, por lo tanto:

$$Regulación\ de\ voltaje = \frac{V_o - V_{pc}}{V_{pc}} x\ 100$$

Donde:

V_o = Voltaje terminal en vacío.
V_{pc} = Voltaje terminal a plena carga.

Si el voltaje permanece relativamente constante con la carga, el valor de la regulación de voltaje es baja y entonces se dice que es buena.

Un generador con excitación separada tiene una baja regulación, pero tiene en cambio la desventaja de requerir de una fuente externa de C.D. y entonces sólo se usan cuando se requiere un amplio rango de voltajes terminales.

Ejemplo

Se tiene un generador de C.D. con excitación separada que opera a 1400 RPM, la corriente de campo se ajusta a 0.6 A, si la resistencia del circuito de armadura es 0.28 Ω, dibujar la curva del voltaje de salida con la variación de la corriente de carga, cuando va de 0 a 60 A.

Despreciar los efectos de la reacción de armadura, cuando la corriente a plena carga es 60A, calcular la regulación de voltaje, si el valor de E = 153 volts.

Solución

Cuando la corriente de campo IF=0.6 A, el voltaje E=153 volts, que corresponde al voltaje terminal de circuito abierto. Cuando se da carga al generador, el voltaje terminal decrece debido, a la caída de voltaje interna, es decir: $V_t = E - I_A R_A$

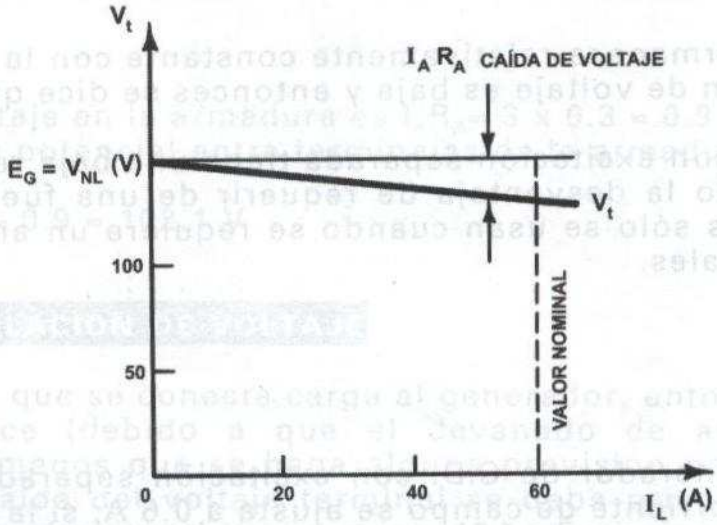
Para una corriente de carga de 40A.

$$V_t = 153 - 40\,x\,0.28 = 141.8\,V$$

Repitiendo estos cálculos para un cierto número de corrientes de carga, se puede trazar la característica externa como se muestra en la figura, de modo que a plena carga el voltaje terminal es:

$$V_t = 153 - 60\,x\,0.28 = 136.2\,Volts$$

La regulación de voltaje es: $Reg = \frac{V_o - V_{PC}}{V_{PC}}\,x\,100 = \frac{153 - 136.2}{136.2}\,x\,100 = 12.3\%$



CARACTERÍSTICA DE LA CARGA

Ejemplo

Un generador en conexión derivada o shunt tiene una resistencia de campo R_f = 60Ω, cuando alimenta una carga de 6 KW, el voltaje terminal es 120V y la FEM es 133V, calcular:

a) El valor de la resistencia del circuito de la armadura.

b) La FEM cuando se alimenta una carga de 2 KW y el voltaje terminal es 135 V.

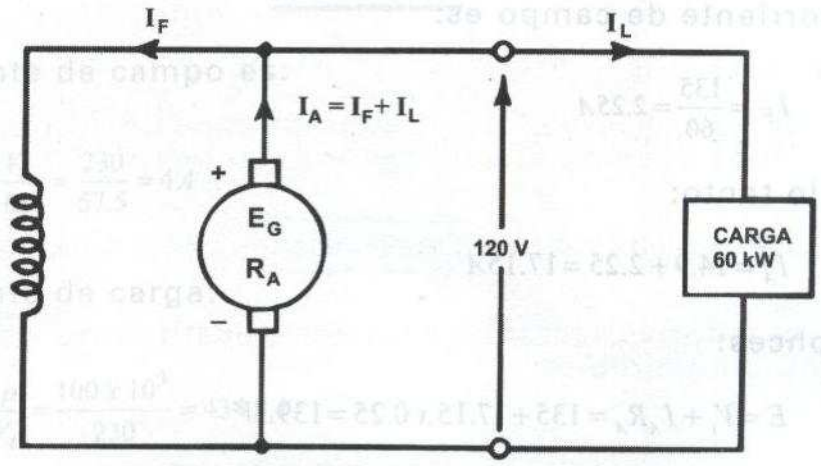


DIAGRAMA DE CIRCUITO

Solución

a) La figura anterior muestra el circuito cuando entrega 6 KW, la corriente de carga es:

$$I_L = \frac{6000}{120} = 50A$$

La corriente de campo alimentada por la armadura es: 120/60 = 2A, por lo tanto

$$I_A = I_F + I_L = 50 + 2 = 52A$$

Como: $V_t = E - I_A R_A$

Despejando el valor de R_A

$$R_A = \frac{E - V_t}{I_A} = \frac{133 - 120}{52} = 0.25\Omega$$

b) Para la carga de 2 KW el voltaje terminal es 135V, por lo tanto, la corriente de carga es:

$$I_L = \frac{2000}{135} = 14.9A$$

La corriente de campo es:

$$I_F = \frac{135}{60} = 2.25A$$

Por lo tanto:

$$I_A = 14.9 + 2.25 = 17.15A$$

Entonces:

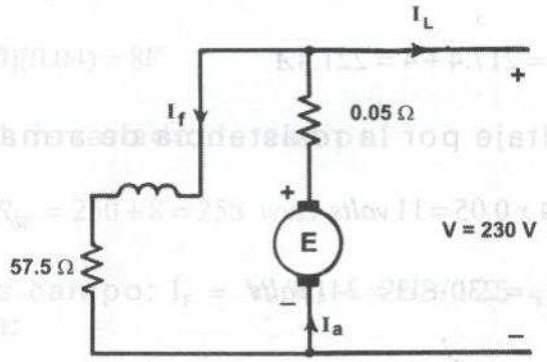
$$E = V_t + I_A R_A = 135 + 17.15\,x\,0.25 = 139.3V$$

Ejemplo

Un generador de 100 KW, 230V en terminales, en conexión shunt tiene: R_A = 0.05 Ω y R_F = 57.5 Ω, si el generador opera a voltaje nominal, calcular el voltaje inducido.

a) A plena carga.
b) Al 50% de carga.

En ambos casos se desprecia la caída de voltaje por contacto en escobillas.



Solución

a) La corriente de campo es:

$$I_F = \frac{V_t}{R_F} = \frac{230}{57.5} = 4A$$

La corriente de carga:

$$I_L = \frac{\rho}{V_t} = \frac{100\,x\,10^3}{230} = 434.8A$$

La corriente en la armadura:

$$I_A = I_L + I_F = 434.8 + 4 = 438.8A$$

La caída de voltaje en la armadura:

$$I_A R_A = 438.8\,x\,0.05 = 22V$$

El voltaje inducido:

$$E = V_t + I_A R_A = 230 + 22 = 252V$$

b) Para la corriente de carga del 50%.

$$I_L = 0.5\,x\,434.8 = 217.4A$$

La corriente de armadura es ahora:

$$I_A = I_C + I_F = 217.4 + 4 = 221.4A$$

La caída de voltaje por la resistencia de armadura es ahora:

$$I_A R_A = 221.4\, x\, 0.05 = 11\, volts$$

$$E = V_t + I_A R_A = 230 + 11 = 241\, volts$$

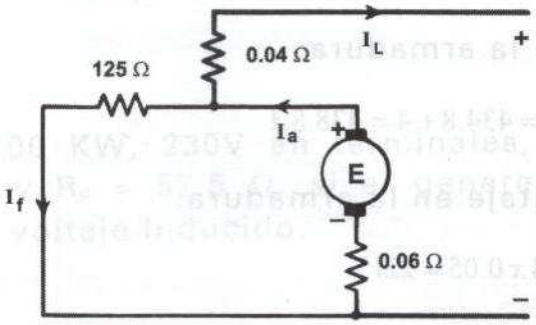
Ejemplo

Un generador de 50 KW, 250V, tiene los datos siguientes: R_A= 0.06 Ω, R_{SE}= 0.04 Ω, R_F=125Ω. Calcular el voltaje inducido en la armadura a plena carga.

a) Cuando se conecta el generador en conexión compuesto corto.
b) Cuando se conecta el generador en conexión compuesto largo.

Solución

a) El generador conectado como compuesto corto está mostrado en el siguiente circuito:



La corriente de carga:

$$I_L = \frac{50\ x\ 10^3}{250} = 200A$$

La caída de voltaje en el devanado serie.

$$I_L R_{SE} = (200)(0.04) = 8V$$

El voltaje en el devanado de campo.

$$V_f = V_t + I_L R_{SE} = 250 + 8 = 258 \ volts$$

La corriente de campo: $I_F = V_F/R_F = 258/125 = 2.06$ A, la corriente en la armadura:

$$I_A = I_L + I_F = 200 + 2.06 = 202.06 \ A$$

La caída de voltaje en la armadura.

$$I_A R_A = 202.6 \, x \, (0.06) = 12.12 \ volts$$

El voltaje inducido:

Va Ia·Ra

$$E = 250 + 12.12 = 262.12 \ volts$$

b) Para la conexión del generador como compuesto largo.

$$I_L = 200A$$

$$I_F = \frac{V}{R_F} = \frac{250}{125} = 2A$$

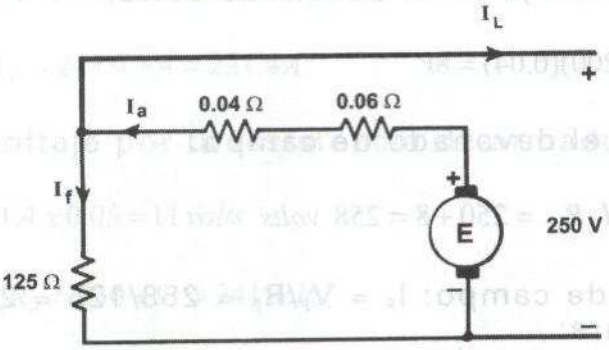
$$I_A = I_L + I_F = 200 + 2 = 202A$$

La caída de voltaje en los devanados serie y de armadura:

$$I_A(R_A + R_{SE}) = 202(0.06 + 0.04) = 20.2 \ volts$$

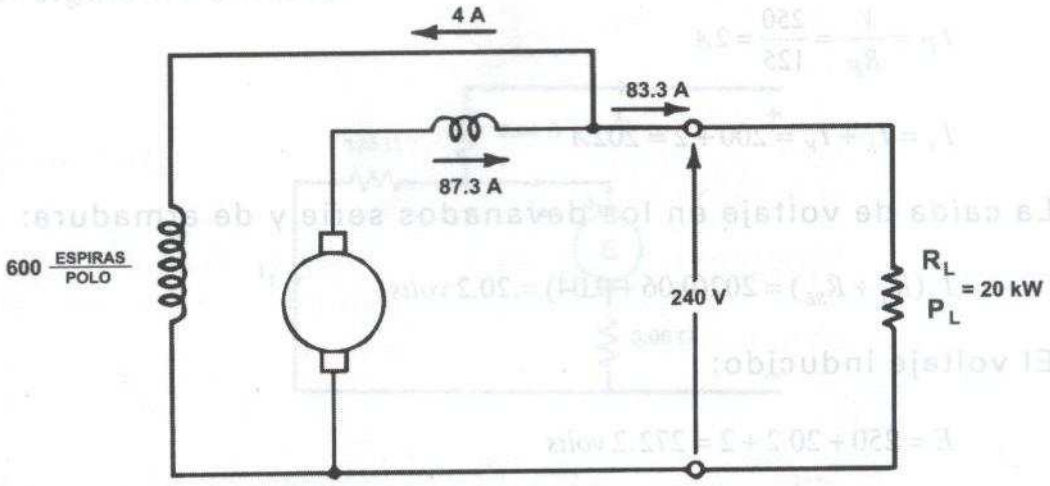
El voltaje inducido:

$$E = 250 + 20.2 + 2 = 272.2 \ volts$$



Ejemplo

Calcular el número de espiras requeridas en el devanado serie en cada polo de un generador en conexión compuesta, para que le permita mantener el voltaje en 240 V entre la condición de vacío y una carga de 20 KW. Sin el devanado serie, se encontró que la corriente en el devanado shunt tiene 4 A en vacío y 5 A a plena carga, para mantener el voltaje en terminales a 240 V. El número de espiras por polo en el devanado de campo shunt es 600.



GENERADOR COMPUESTO A PLENA CARGA

Solución

En la figura anterior, se muestra la conexión del generador compuesto con shunt largo, en vacío la corriente de excitación del campo es alimentada por la armadura, la FMM resultante en el polo del devanado shunt es:

$$F = NI = 600\,x\,4 = 2400\ A-e$$

La caída de voltaje en el devanado serie, se puede considerar como despreciable, a plena carga la corriente en el devanado de campo es 5A para mantener el voltaje en terminales a 240V, en otras palabras, la FMM requerida es entonces:

$$F = NI = 600\,x\,5 = 3000\ \ A-e/polo$$

Es la diferencia que se debe tener para alimentar el devanado de campo serie, manteniendo el valor inicial en el devanado shunt en 4A, por lo tanto la FMM en el campo serie, manteniendo el valor inicial en el devanado shunt en 4A, por lo tanto la FMM en el campo serie es: 3000-2400=600 A-e la corriente a plena carga que circula a través del devanado serie es:

$$I_L = \frac{p}{V_t} = \frac{20{,}000}{240} = 83.3A$$

Por lo que el número de espiras requeridas en el devanado serie para proporcionar una FMM de 600 A-e es:

$$Espiras\ del\ devanado\ serie = \frac{600\ A-e}{83.3+4} = 6.9/polo$$

2.7 EFICIENCIA

La eficiencia de una máquina es la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada. La potencia de entrada es proporcionada por el primo motor para accionar al generador, debido a que parte de la energía entregada al generador es convertida en calor, representa energía desperdiciada, estas pérdidas por lo general se minimizan en la etapa de diseño; sin embargo, algunas de estas pérdidas son

inevitables, por lo tanto, la eficiencia, que se expresa usualmente como porcentaje, es por definición:

$$eficiencia = \frac{potencia\ de\ salida}{potencia\ de\ entrada} x\ 100$$

También:

$$\eta = \frac{potencia\ de\ salida}{potencia\ de\ salida + pérdidas} x\ 100$$

Las pérdidas de los generadores (y aplican las mismas para motores) se pueden clasificar como sigue:

1. **Pérdidas en el cobre.** Las pérdidas en el cobre están presentes debido a la resistencia de los devanados, las corrientes que circulan a través de estos devanados producen pérdidas óhmicas (es decir, pérdidas RI^2), los devanados que pueden estar presentes además del de armadura, son los devanados de campo, los interpolos y los devanados de compensación.

2. **Pérdidas en el fierro.** En la medida que la armadura gira en el campo magnético, las partes de fierro de la armadura, así como los conductores cortan el flujo magnético, debido a que el fierro es un buen conductor de electricidad, la FEM inducida en las partes de fierro, producen que circulen las corrientes a través de estas partes. Estas son las corrientes circulantes que se estudiarán en el capítulo 1. Los núcleos laminados reducen sensiblemente las corrientes circulantes, sin aumentar la reluctancia del circuito magnético, debido a que las laminaciones están en paralelo con el campo magnético, las pérdidas por histéresis están presentes en la armadura, dado que es rotatoria y se mueve continuamente a través de un campo magnético estacionario de los polos.

3. **Pérdidas rotacionales.** Estas son pérdidas por fricción en las chumaceras, fricción de las chumaceras en contacto con el conmutador y las pérdidas por ventilación que están asociadas con la fricción del aire de las partes rotatorias de la máquina. Estas pérdidas por lo general son pequeñas.

Ejemplo

Un generador de C.D. en conexión shunt, de 100 KW, 230V tiene los siguientes valores, R_A=0.05 Ω, R_F=57.5 Ω, tiene pérdidas mecánicas por 1.8 KW. Calcular:

a) La eficiencia del generador a plena carga.
b) La potencia que debe tener el primo motor para accionar la carga.

Solución

a) La corriente de campo es:

$$I_f = \frac{V_t}{R_F} = \frac{230}{57.5} = 4A$$

La corriente de carga:

$$I_L = \frac{100\ x\ 10^3}{230} = 434.8A$$

La corriente en la armadura:

$$I_A = I_F + I_L = 4 + 434.8 = 438.8A$$

Las pérdidas en el devanado de campo (shunt):

$$I^2{}_f R_f = (4)^2(57.5) = 0.92\,KW$$

Las pérdidas en el devanado de armadura:

$$I_A{}^2 R_A = (438.8)^2(0.05) = 9.63\,KW$$

Las pérdidas RI^2 más las pérdidas mecánicas son:

$$pérdidas\ \ totales = 0.92 + 9.63 + 1.8 = 12.35\,KW$$

La potencia de salida:

$$p_{salida} = 100\,KW$$

$$Potencia\ entrada = Potencia\ de\ salida + pérdidas$$

$$= 100 + 12.35 = 112.35\,KW$$

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ salida}{potencia\ entrada} x\,100$$

$$\eta = \frac{100}{112.35} x\,100 \qquad \eta = 89\%$$

La potencia que debe desarrollar el primo motor.

$$Potencia\ del\ primomotor = \frac{Potencia\ de\ salida}{746\ W/HP} = \frac{112.35\ x\ 10^3}{746} = 150.6\,HP$$

Ejemplo

Un generador de 10 KW, 125 volts, tipo compuesto, tiene pérdidas rotacionales de 580W. La resistencia del campo shunt es de R_F=62.5Ω, la resistencia de armadura R_A= 0.12 Ω y la resistencia del campo serie R_{SE} = 0.022Ω. Calcular la eficiencia a plena carga.

Solución

La corriente a plena carga es:

$$I_L = \frac{10{,}000}{125} = 80A$$

Suponiendo que la conexión es shunt larga la corriente de campo es:

$$I_F = \frac{V}{R_F} = \frac{125}{62.5} = 2A$$

La corriente en la armadura es entonces:

$$I_A = I_L + I_F = 80 + 2 = 82A$$

que es la corriente que circula también por el campo serie, las pérdidas RI^2 se pueden calcular ahora como:

Armadura:	$R_A I_A^{\ 2} = (82)^2 x 0.12 =$	$807W$
Campo serie	$R_{SE} x I_A^{\ 2} = (82)^2 x 0.022 =$	$148W$
Campo shunt	$R_F x I_F^{\ 2} = (2)^2 x 62.5 =$	$250W$
Pérdidas rotacionales	$=$	$580W$
	Pérdidas totales $=$	$1785W$

De aquí.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + pérdidas} x\ 100$$

$$\eta = \frac{10{,}000}{10{,}000 + 1785} x\ 100 = 84.9\%$$

Una forma alternativa para resolver la eficiencia es como sigue:

$$E = V_t + I_A(R_{SE} + R_A) = 125 + 82(0.022 + 0.12)$$

$$E = 136.6V$$

La potencia desarrollada en la armadura es:

$$Pd = E\ I_A = 136.6\ x\ 82 = 11205\ watts$$

La potencia de entrada al eje es:

$$Pd + \Pr ot = 11205 + 580 = 11785\ watts$$

Entonces:

$$\eta = \frac{10{,}000}{11785} x\ 100$$

$$\eta = 84.9\%$$

3 MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el denominado estudio clásico de las máquinas de corriente directa (C.D.), el motor de C.D. es similar a un generador de C.D., de hecho, desde el punto de vista constructivo es la misma máquina que puede actuar como motor o como generador, la única diferencia es que como un generador la FEM es mayor que el voltaje terminal, en tanto que como motor, el valor generado de FEM (fuerza contra electromotriz) es menor que el voltaje terminal, por lo tanto, el flujo de potencia se invierte, es decir, **el motor eléctrico** convierte la energía eléctrica en energía mecánica, o sea, el proceso inverso al del generador.

La potencia eléctrica comercial se genera y distribuye como corriente alterna y sólo una parte relativamente pequeña de esta potencia es usada como corriente directa (C.D.), aún cuando los motores de C.D. se puede decir que son máquinas muy versátiles, por ejemplo, los motores de C.D. son más adaptables a procesos industriales que demandan un alto grado de flexibilidad en el control del par y la velocidad y sólo tienen competencia en ciertos casos, con aquellos motores de corriente alterna (C.A.) que usan accionamientos electrónicos (Drives) para el control de velocidad. Un motor de C.D. puede proporcionar un alto par de arranque, así como también un alto par de desaceleración para aplicaciones que requieren de frenados rápidos o inversiones de sentido de rotación.

El control de velocidad en rangos relativamente amplios, es uno de los aspectos que son relativamente fáciles de lograr en comparación

con otros dispositivos electromecánicos de conversión de la energía y es, de hecho, uno de los **fuertes** de los motores de C.D. Aún cuando los Drives de C.A. están reemplazando muchas de las aplicaciones de los motores de C.D., hay áreas de aplicación donde los motores de C.D. continúan siendo muy importantes, como el caso de la industria automotriz, por ejemplo, un automóvil de lujo puede tener hasta 50 motores de C.D.

3.2 LA FUERZA CONTRA ELECTROMOTRIZ EN LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

Cuando se aplica un voltaje a un motor de C.D. circula la corriente hacia la escobilla positiva y a través del conmutador hacia el interior del devanado de armadura; de hecho, el devanado de armadura de un motor es idéntico al devanado de armadura de un generador, por lo tanto, los conductores bajo el polo norte de campo lleva corriente en una dirección, en tanto que todos los conductores bajo los polos sur del campo llevan la corriente en la dirección opuesta, cuando la armadura transporta una corriente, produce su propio campo magnético, el cual interactúa con el campo principal, el resultado es que hay una fuerza desarrollada sobre todos los conductores, tendiente a hacer girar la armadura.

Con la armadura girando como un resultado de la acción del motor, los conductores de armadura cortan continuamente a este campo resultante, por lo tanto, los voltajes generados en los propios conductores, experimentan una acción de fuerza. De hecho, durante la operación, el motor actúa simultáneamente.

Como generador, pero naturalmente la acción del motor es mucho más fuerte que la del generador debido a que la corriente la fija la polaridad del suministro.

En la figura siguiente, se ilustra este principio para un motor de dos polos, aún cuando la fuerza electromotriz (FEM) se opone al voltaje suministrado, no puede exceder al voltaje aplicado, en este sentido la FCEM sirve para limitar la corriente en el devanado de armadura. La corriente de armadura se limitará a un valor suficientemente justo para tomar en cuenta la potencia desarrollada necesaria para accionar a la carga.

Si la carga no está conectada al eje del motor, la fuerza contraelectromotriz (FCEM) es casi igual al voltaje aplicado, la potencia desarrollada por la armadura en este caso es justamente la potencia necesaria para superar las pérdidas rotacionales, todo esto significa que la corriente de armadura I_A está controlada y limitada por la fuerza contraelectromotriz E_C, por lo tanto:

$$I_A = \frac{V_L - E_C}{R_A}(Amp)$$

Donde:

V_L = Voltaje de línea aplicado a través del devanado de armadura y R_A es la resistencia del devanado de armadura.

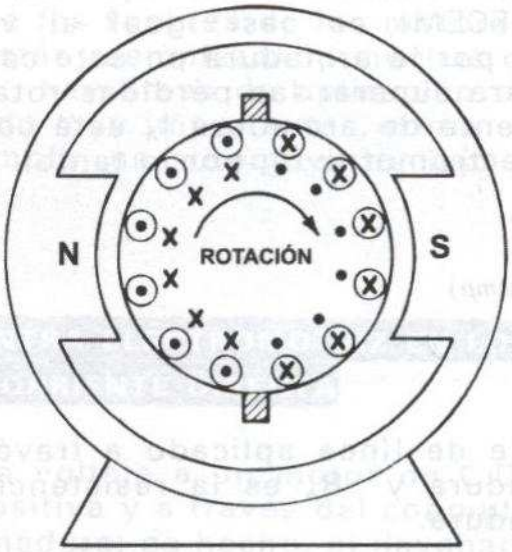
Debido a que la FCEM (E_C) es un voltaje inducido o generado, depende del flujo por polo y de la velocidad de rotación (η) en RPM, en otras palabras:

$$E_C = Kg\phi\eta$$

Donde el valor de la Kg, que es una constante depende del devanado de armadura y del número de polos de la máquina, de manera que la ecuación anterior para I_A se puede expresar como:

$$I_A = \frac{V_L - Kg\phi\eta}{R_A}$$

Esta ecuación se analizará posteriormente, cuando se estudien los métodos de control de velocidad.



DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE DE ARMADURA PARA ROTACIÓN EN EL SENTIDO DE LAS MANECILLAS DEL RELOJ

Ejemplo

Un motor de C.D. opera a una velocidad de 1680 RPM cuando demanda una corriente de 28A y está alimentado a 230V. Si la resistencia de armadura es 0.25Ω, calcular la velocidad de vacío cuando $I_A = 0$ (en vacío), suponiendo que todas las pérdidas son despreciables.

Solución

Cuando el motor opera con carga, $I_A = 28A$, por lo tanto:

$$E_C = V_A - I_A R_A = 230 - 28\,x\,0.25 = 223V$$

También se sabe que:

$$E_C = Kg\phi\eta$$

$$223 = Kg\phi\,x\,1680$$

Es decir:

$$Kg\phi = \frac{223}{1680} = 0.1327$$

Cuando opera en vacío, I_A=0, entonces E_C=V_L=230V y también:

$$E'_C = Kg\phi\eta', \quad E'_C \ y \ \eta' \ corresponden\ a\ la\ condición\ de\ vacío$$

Es decir ahora se tiene:

$$230 = Kg\phi\eta'$$

Como:

$$Kg\phi = 0.1327$$

$$\eta' = \frac{230}{Kg\phi} = \frac{230}{0.1327} = 1733\ RPM$$

Obsérvese que el flujo ϕ se mantiene constante, lo cual es válido para máquinas con excitación separada en motores en conexión shunt, cuando el efecto de reacción de armadura es despreciable.

3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE C.D

En la misma forma que los generadores de C.D., hay en general tres tipos de motores de C.D.: **tipo serie, tipo derivado o shunt y tipo compuesto**. A diferencia del generador serie, el motor tipo serie se usa ampliamente debido a sus excelentes características de par de arranque, cada tipo de motor tiene sus características de operación bien definidas, por lo que para su aplicación es esencial conocer los requerimientos de la carga.

En la máquina con excitación separada, el devanado de campo está conectado a una alimentación por separado, cuando el devanado de campo se conecta en paralelo con la armadura, se obtiene una conexión shunt. La máquina serie tiene el devanado de campo en

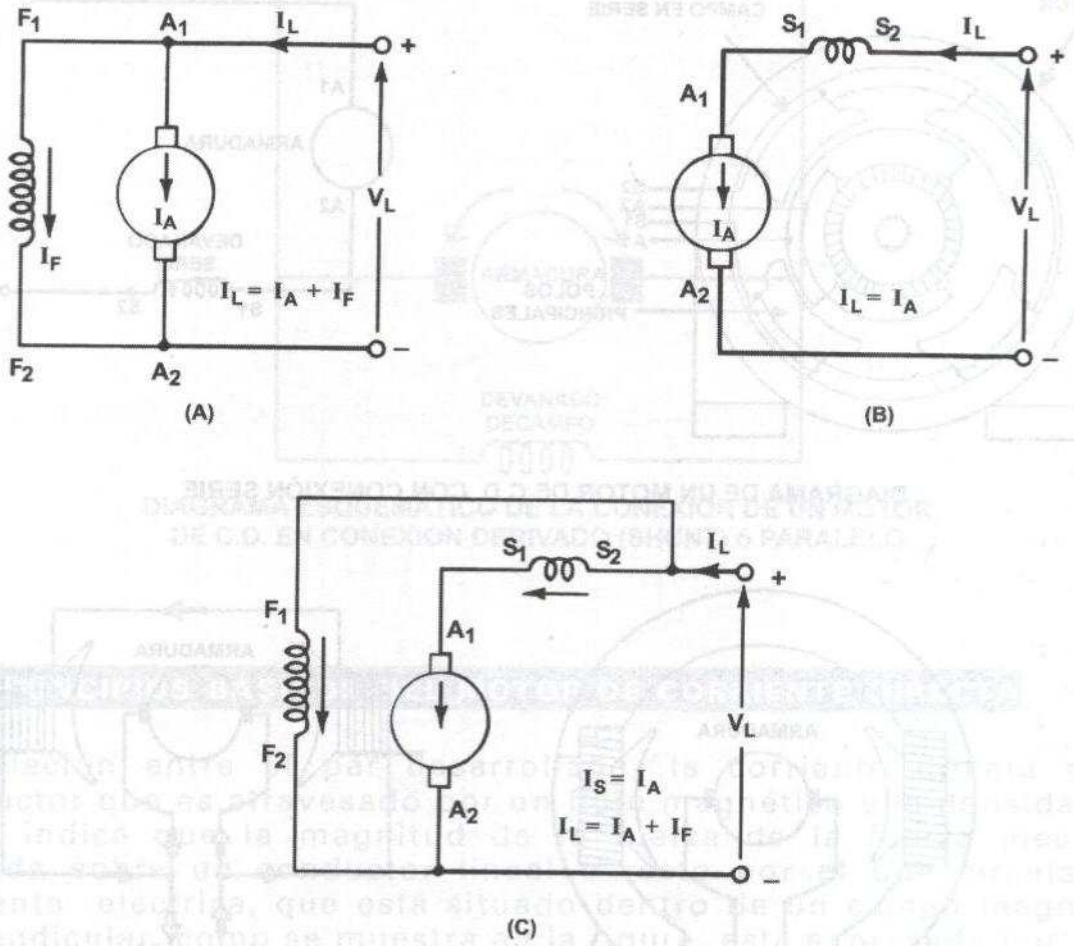
serie con el devanado de armadura y, como conduce la corriente a la carga, está hecho de alambre de suficiente sección como para permitir la circulación de corriente como para permitir la circulación de corriente de carga sin producir calentamiento excesivo debido a las pérdidas.

El motor en conexión compuesta (compound) tiene ambos devanados de campo, estos devanados se pueden conectar de manera que los campos se ayuden uno a otro, en cuyo caso se habla de un motor con devanado compuesto acumulativo, en forma alternativa se pueden conectar de manera que los flujos resultantes se opongan y entonces se dice que es motor con devanado compuesto diferencial.

Un motor con conexión compuesta, puede tener la conexión con conexión shunt larga, o bien conexión shunt corta, dependiendo de si el devanado de campo está conectado antes o después del devanado de campo en serie.

En la siguiente figura, se muestran los tres tipos de conexiones. Como se ha mencionado antes, cuando un motor de C.D. se conecta a la carga, la caída de velocidad y voltaje cuando está a plena carga comparada con la condición de vacío, depende en mucho del tipo de conexión empleada para el devanado de campo.

Por ejemplo, para un motor en conexión shunt, la velocidad puede caer aproximadamente un 8% cuando la carga mecánica se incrementa hasta plena carga; sin embargo, para propósitos prácticos a este tipo de motor se le puede considerar de velocidad constante.



A) Conexión shunt.

B) Conexión serie.

C) Conexión compuesta shunt largo.

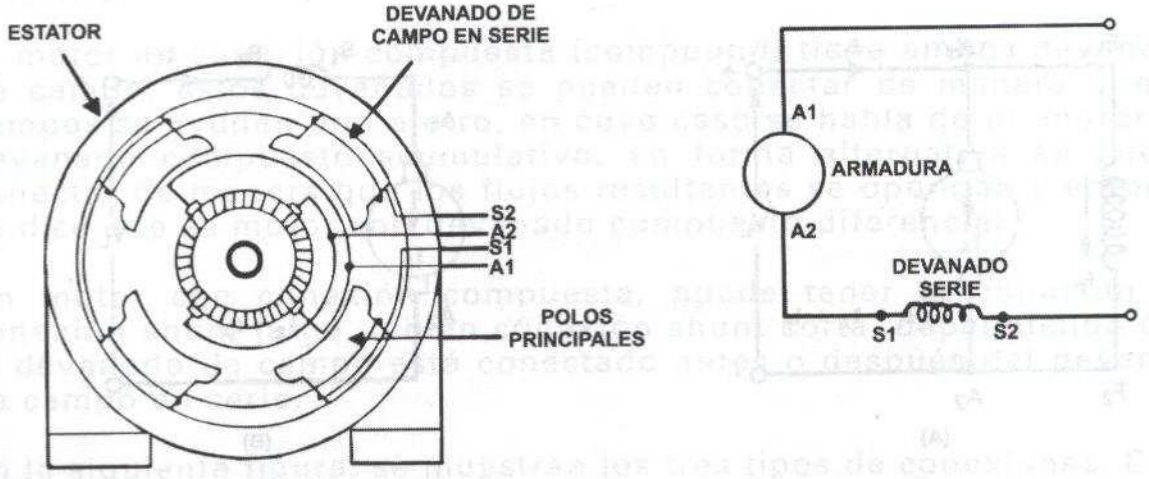
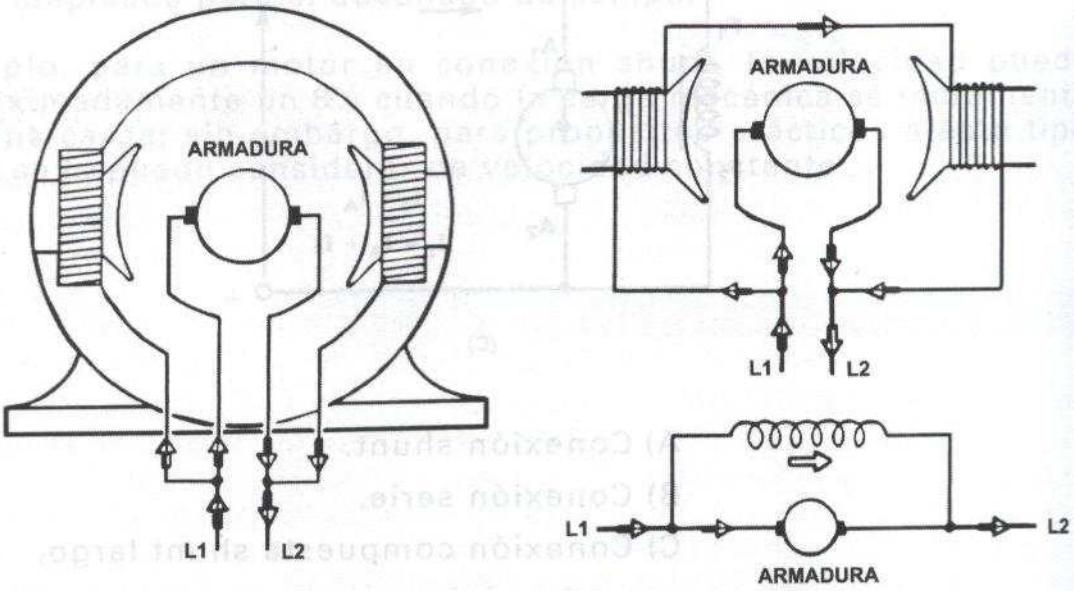


DIAGRAMA DE UN MOTOR DE C.D. CON CONEXIÓN SERIE



TRES FORMAS PARA MOSTRAR LAS CONEXIONES DE UN MOTOR DE C.D. DE DOS POLOS EN CONEXIÓN PARALELO (DERIVADA) ó SHUNT

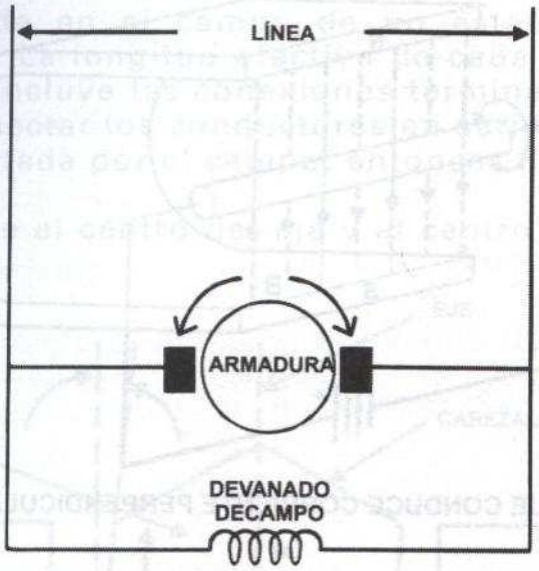


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONEXIÓN DE UN MOTOR DE C.D. EN CONEXIÓN DERIVADO (SHUNT) ó PARALELO

3.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA

La relación entre el par desarrollado, la corriente directa en el conductor que es atravesado por un flujo magnético y la densidad del flujo, indica que la magnitud de la fuerza de la fuerza mecánica ejercida sobre un conductor lineal o recto por el que circula una corriente eléctrica, que está situado dentro de un campo magnético perpendicular, como se muestra en la figura, está expresada por:

$$F = B.\ell_{ef}.I$$

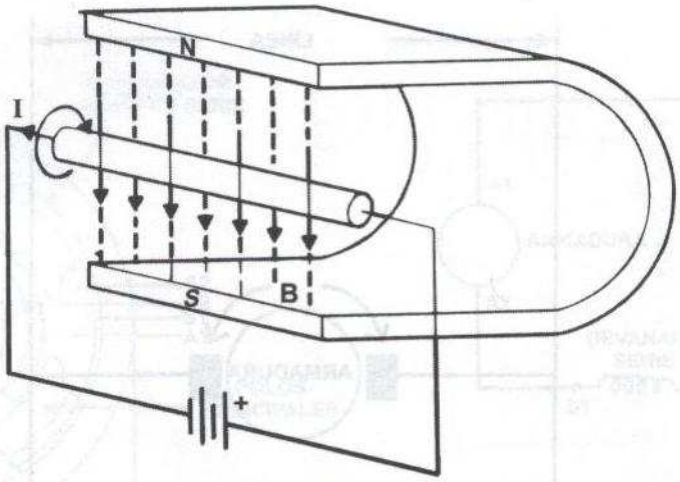
Donde:

F = Fuerza mecánica en Newton (N).

B = Densidad de flujo de campo en Telsla(T).

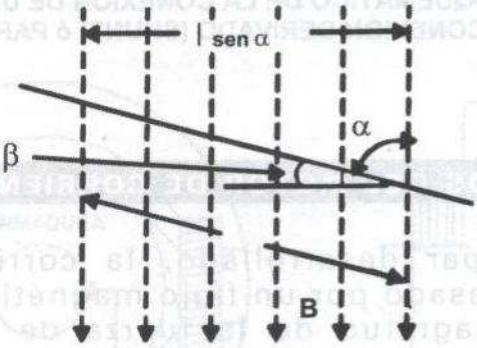
I = Corriente en el conductor (A).

ℓ_{ef} = Longitud efectiva del conductor (m).



CONDUCTOR QUE CONDUCE CORRIENTE PERPENDICULAR AL CAMPO B

(a)



CONDUCTOR DESPLAZADO β

(b)

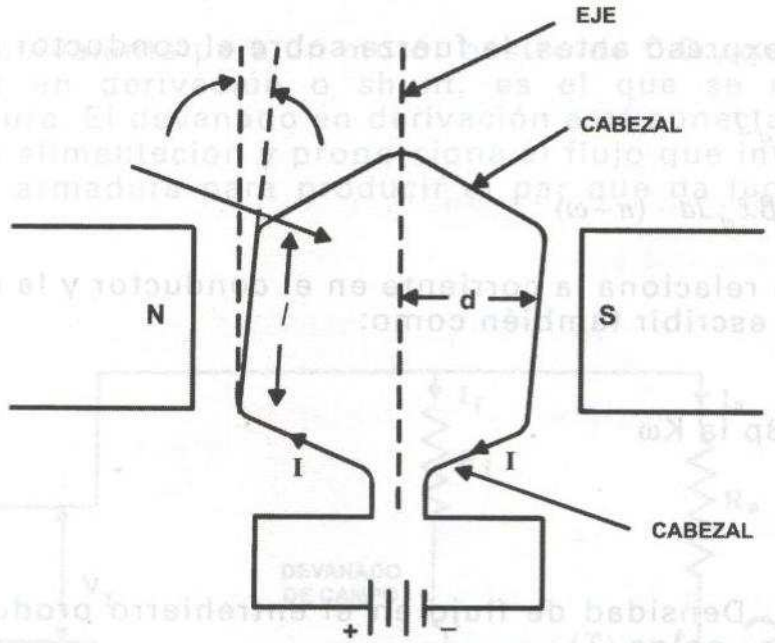
La longitud efectiva de un conductor es aquélla componente de su longitud que se encuentra inversa y es normal al campo magnético, por lo tanto, si el conductor no es perpendicular al campo magnético (como se muestra en la figura anterior (b), la longitud efectiva del conductor es: $\ell_{ef} = 1 sen\alpha$.

El ángulo β se conoce como ángulo sesgado y puede variar entre 0° y 30° para las máquinas eléctricas.

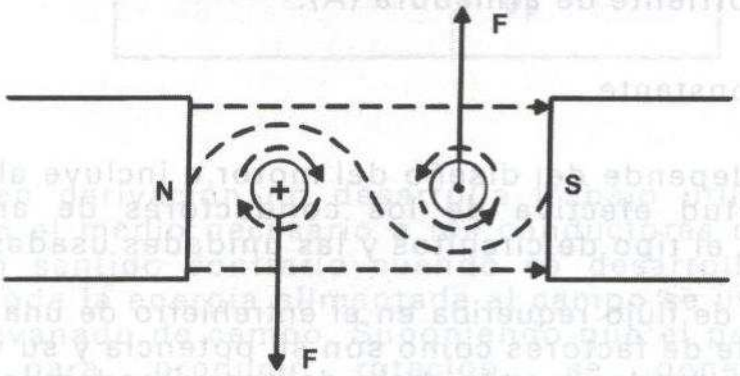
3.4.1 EL PAR DESARROLLADO

En la siguiente figura, se muestra la bobina de un rotor, fabricada en una espira y situada en el campo de un estator de dos polos y densidad uniforme. La longitud efectiva de cada conductor (llamada lado de bobina) no incluye las conexiones terminales o cabezales que son usadas para conectar los conductores en serie, pero debido a que esta parte no es cortada por el campo, entonces no desarrolla un par.

La distancia (d) entre el centro del eje y el centro del conductor es el brazo del momento.



BOBINA DEL ROTOR DE UNA SOLA ESPIRA QUE LLEVA UNA CORRIENTE (I) SITUADA EN EL CAMPO DE DOS POLOS



VISTA LATERAL DE LA BOBINA MOSTRANDO LA DIRECCIÓN DE LA FUERZA DESARROLLADA

La dirección del par desarrollado se puede determinar de una vista externa de los conductores y de los polos magnéticos desde la posición de la batería, como se observa en la figura anterior (b). La dirección del flujo, debido a que la dirección conocida de la corriente fue determinada por "la regla de la mano derecha" y la dirección de la fuerza mecánica sobre cada conductor, debida a la interacción de los campos magnéticos fue determinada por el efecto agrupado del flujo. El par resultante producido por los dos conductores tiene una magnitud igual a:

$$TD = 2\ F.d\ (N - \omega)$$

Pero como se expresó antes, la fuerza sobre el conductor es:

$$F = \beta.\ell_{ef}.I$$

$$TD = 2.\beta.\ell_{ef}.Id\quad (n - \omega)$$

Esta expresión relaciona la corriente en el conductor y la densidad del flujo se puede escribir también como:

$$TD = Bp\ Ia\ K\omega$$

Donde:

B*p = Densidad de flujo en el entrehierro producida por los polos (T).

Ia = Corriente de armadura (A).

K_M = Constante

La constante K_M depende del diseño del motor e incluye al número de espiras, la longitud efectiva de los conductores de armadura, el número de polos, el tipo de circuitos y las unidades usadas.

* La densidad de flujo requerida en el entrehierro de una máquina de C.D. depende de factores como son su potencia y su velocidad, y puede variar desde un valor bajo de aproximadamente 0.5 Tesla hasta un poco más de 1.0 Tesla para grandes máquinas.

El par desarrollado se puede expresar también como:

$$TD = Ka\ \phi p\ Ia \quad (W-\omega)$$

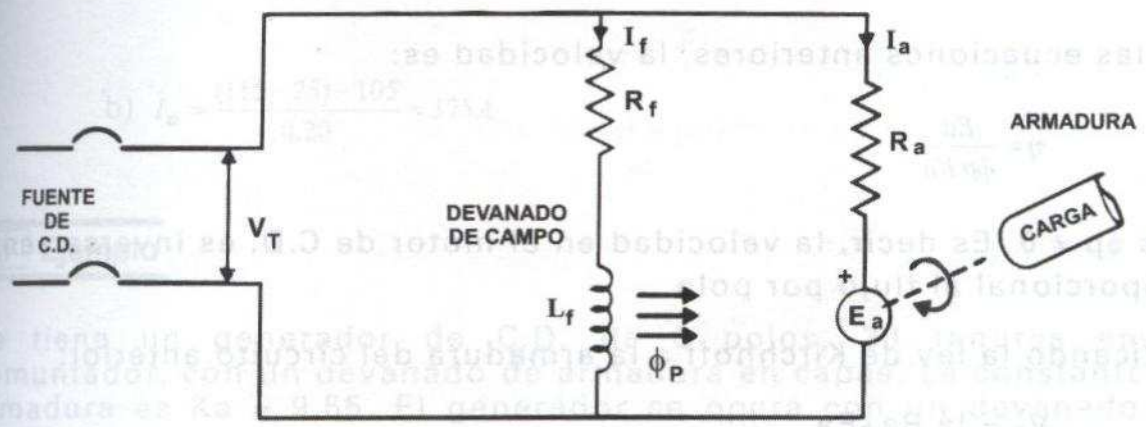
Donde:

Ka = Constante de armadura (su valor está entre 9 y 10).

ϕp = Flujo por polo.

Ia = Corriente de armadura.

El circuito equivalente para un motor básico de C.D., que se le conoce como motor en derivación o shunt, es el que se muestra en la siguiente figura. El devanado en derivación está conectado a través de las líneas de alimentación y proporciona el flujo que interactúa con la corriente de armadura para producir el par que da lugar a la acción del motor.



El campo en derivación no desarrolla trabajo útil, de hecho, sólo proporciona el medio necesario a los conductores de armadura para empujar en sentido contrario cuando se desarrolla el movimiento rotatorio. Toda la energía alimentada al campo se usa como pérdidas I^2R en el devanado de campo. Suponiendo que el par desarrollado es suficiente para producir rotación, se genera una fuerza contraelectromotriz (fcem) en la armadura, que es proporcional a la velocidad de la propia armadura, y al flujo en el entrehierro, es decir:

$$Ea = n\phi p\ Kg$$

Donde:

ϕp = Flujo por polo en weber.

n = Velocidad de la armadura.

Esta fuerza contraelectromotriz se puede expresar también como:

$$Ea = Ka\phi p\ V$$

Donde:

Ka = Constante de armadura.

ϕp = Flujo por polo.

V = Voltaje de armadura en vacío.

De las ecuaciones anteriores, la velocidad es:

$$\eta = \frac{Ea}{\phi p\ Ka}$$

Cos $\phi p \neq 0$ Es decir, la velocidad en el motor de C.D. es inversamente proporcional al flujo por polo.

Aplicando la ley de Kirchhoff a la armadura del circuito anterior:

V_T = la Ra+Ea

V_T = Voltaje aplicado.

Ea = Fuerza contralectromotriz

Despejando la corriente:

$$Ia = \frac{V_T - Ea}{Ra}$$

Ejemplo

Un motor de 115 volts en conexión en derivación tiene una armadura cuya resistencia es: ra = 0.20Ω Suponiendo un voltaje a través de los contactos de las escobillas de 2.5 volts, calcular el valor de la corriente de armadura que circula cuando:

a) La fcem es de 110 volts.

b) Si se aumenta la carga al motor y la fcem decae a 105 volts.

La corriente de armadura se calcula como:

$$I_a = \frac{V_T - E_a}{R_a}$$

a) $I_a = \frac{(115-25)-110}{0.20} = 125A$

b) $I_a = \frac{(115-25)-105}{0.20} = 375A$

Ejemplo

Se tiene un generador de C.D. de 6 polos, 30 ranuras en el comuntador, con un devanado de armadura en capas. La constante de armadura es Ka = 9.55. El generador se opera con un devanado de excitación separado, siendo el flujo por polo de 0.04 weber/polo, si se acciona a una velocidad de 3000 RPM el voltaje de armadura en vacío es de 415 V.

Si ahora el generador se opera como motor, el flujo es 0.04 weber/polo y se debe alimentar a una carga que requiere de un par de 50 n-ω a 4000 RPM. La resistencia del circuito de la armadura es: Ra = 0.070 ohms, calcular: (a) La fuerza contraelectromotriz, (b) la corriente requerida de armadura y el voltaje para alimentar al motor cuando alimenta esta carga.

Solución

(a) La fuerza contraelectromotriz se puede calcular como:

$$Ea = Ka\ \phi p\ V$$

Usando los datos:

$$Ea = 9.55 \times 0.04 \times 415 = 158.53\ V$$

(b) La corriente de armadura se puede calcular directamente de la siguiente ecuación:

$$T_D = Ka\phi p\ Ia\ n\text{-}\omega$$

De donde:

$$I_a = \frac{T_D}{Kafp} = \frac{50}{(9.55x0.04)} = 130.9A$$

El voltaje de armadura necesario es:

$$V = Ea \pm IaRa$$

$$= 158.53 + 130.9 \times 0.070$$

$$= 167.69 \text{ volts.}$$

Ejemplo

Un motor tipo shunt que se alimenta a 230 V tiene una resistencia de armadura de 0.15 ohms. Si la corriente de armadura no se debe exceder de 75A, calcular: (a) la resistencia que se debe insertar en serie con la armadura en el instante del arranque, (b) el valor al cual esta resistencia se debe de reducir cuando la armadura se acelera hasta que la fcem sea de 165 volts, (c) la corriente de armadura en el instante del arranque, si no se inserta la resistencia en el circuito de

la armadura. (Se supone que la caída de voltaje en las escobillas es de 2 volts).

Solución

a) La corriente de armadura es :

$$I_a = \frac{V_T - E_a}{R_a + R}$$

Siendo R la resistencia que se inserta en el circuito de la armadura, despejando de la ecuación anterior:

$$R = \frac{V_T - E_a}{R_a + R} - R_a$$

$$R = \frac{(230-2)-0}{75} - 0.15$$

$$R = 2.89\Omega$$

b) Si la fcem es de 165 volts:

$$R = \frac{(230-2)-165}{75} - 0.15$$

$$R = 0.69\Omega$$

c) Cuando el motor arranca y no se inserta resistencia en el circuito de armadura:

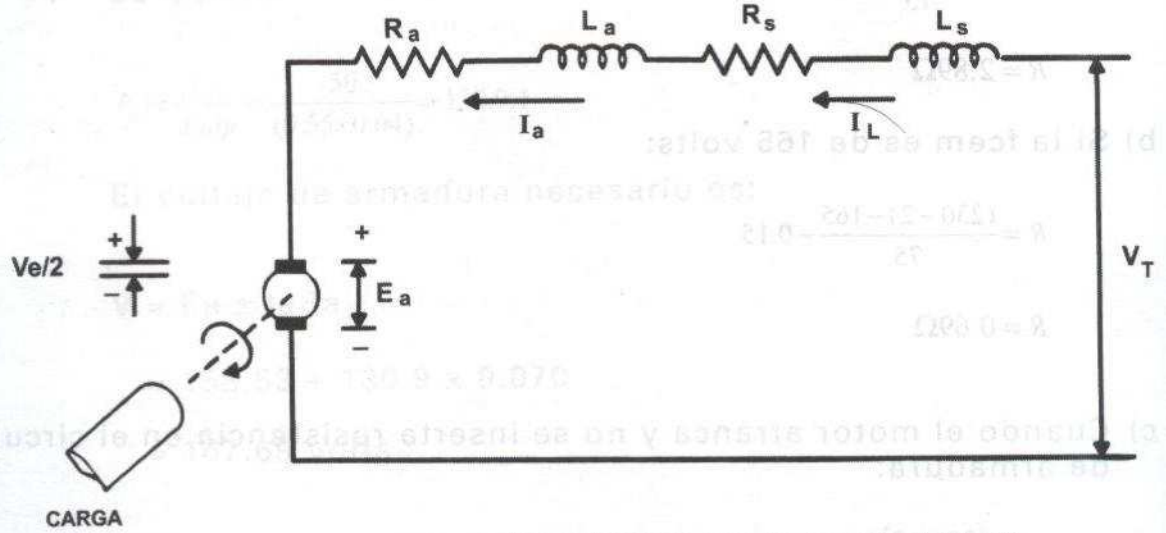
$$I_a = \frac{(230-2)}{0.15} = 1520A \text{ (valor excesivo)}$$

3.5 LAS CONEXIONES DE LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

Para producir la potencia mecánica, un motor requiere de un armadura y de al menos un campo. Este campo se puede conectar en paralelo con la armadura, o bien en serie con ella, o también puede haber dos campos: uno en serie y el otro en paralelo. Cada una de estas conexiones da como resultado diferentes características de los motores y son las que se estudiarán a continuación:

3.5.1 MOTORES DE C.D. EN CONEXIÓN SERIE

En la figura siguiente, se muestra el diagrama elemental de la conexión serie, en esta conexión las corrientes de armadura (I_a) y del campo (I_s) son idénticas, el devanado del campo en serie consiste de pocas espiras de alambre de sección gruesa que tiene baja a resistencia (R_s).



Ve = CAÍDA DE VOLTAJE EN LAS ESCOBILLAS

Para el motor serie se tiene:

$$I_a = I_L$$

La potencia de entrada o alimentación es:

$$P = V_T I_L = V_T I_a$$

La corriente en el devanado serie es:

$$I_S = I_a = \frac{V_T - E_a - V_e}{R_a + R_s}$$

Como la caída del voltaje en las escobillas es muy pequeña, con frecuencia se desprecia: $V_e = 0$

$$I_S = I_a = \frac{V_T - E_a}{R_a + R_s}$$

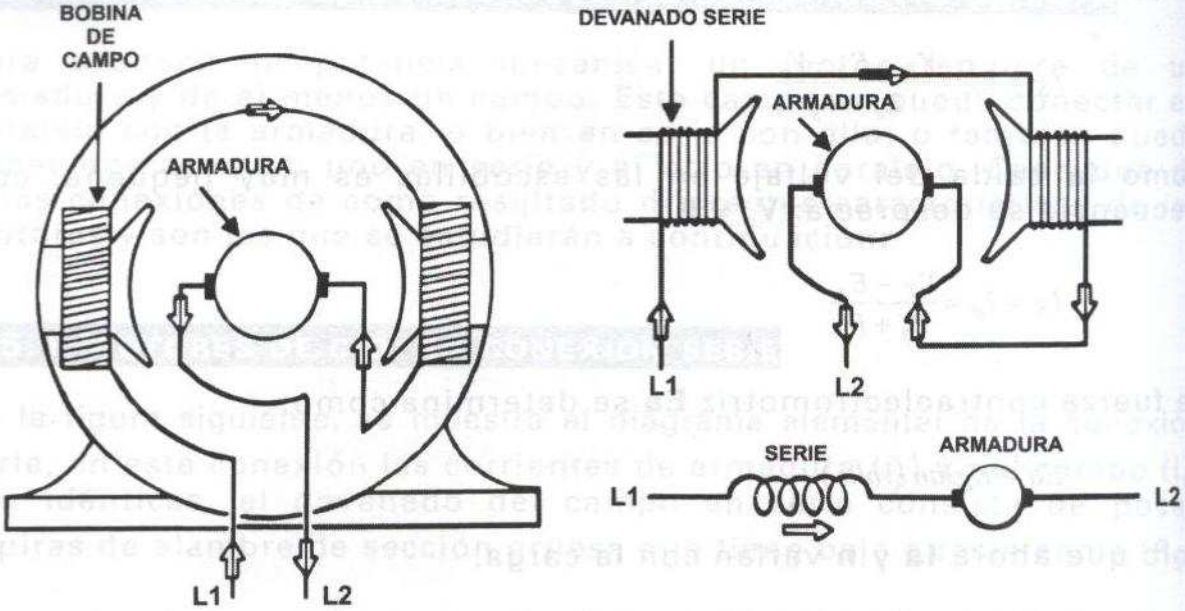
La fuerza contraelectromotriz **Ea** se determina como:

$$Ea = KgIan\ (volts)$$

Solo que ahora **Ia** y **n** varían con la carga.

En los motores de este tipo, cualquier incremento en la carga se manifiesta como una mayor corriente circulando a través de la armadura y el devanado de campo. Como la intensidad del campo opuesto se incrementa con este incremento en la corriente, la velocidad del motor se reduce. Por el contrario en la medida que la carga se reduce, el campo se debilita y entonces la velocidad aumenta. Con valores de cargas muy ligeras, la velocidad puede llegar a ser excesiva.

Por la razón anterior, los motores en conexión serie se conectan directamente o están acoplados a la carga para prevenir la sobrevelocidad.



DISTINTAS FORMAS DE MOSTRAR LAS CONEXIONES DE UN MOTOR DE C.D. EN SERIE

El incremento en la corriente de armadura con un incremento en la carga produce un aumento en el par, de modo que los motores en conexión serie son particularmente útiles para ciclos de trabajo en donde se requiere un par de arranque pesado y en donde se pueden esperar sobrecargas severas.

Su velocidad se puede ajustar por medio de una resistencia variable colocada en serie con el motor, pero debido a la variación de la carga, la velocidad no se puede conservar a ningún valor constante. El uso de este motor está limitado a servicios de tracción y elevadores.

Ejemplo

Un motor de C.D. tipo serie toma de una alimentación a 250 V, una corriente de 30 A y opera a 90 r.p.m. Después la carga cambia y la corriente baja a 20 A. Calcular la nueva velocidad, la resistencia de

armadura Ra=0.15 ohms y la resistencia del campo serie es Rs=0.12 ohms.

Solución

Cuando Ia = 30 A, la fuerza contraelectromotriz es :

Ea = 250 – 30 x (0.15 + 0.12)= 241.9 V

La velocidad angular:

$$\omega = \frac{2\Pi f}{60} = \frac{2\Pi x 900}{60} = 94.2 rad/s$$

De la expresión:

$$Ea = Kg\ Ian$$

La constante:

$$Kg = \frac{Ea}{Ia\omega} = \frac{241.9}{30x94.2} = 0.0856 V/A/rad/s$$

$$Kg = 0.0856 V.J/A.rad$$

Si: Ia = 20 A.

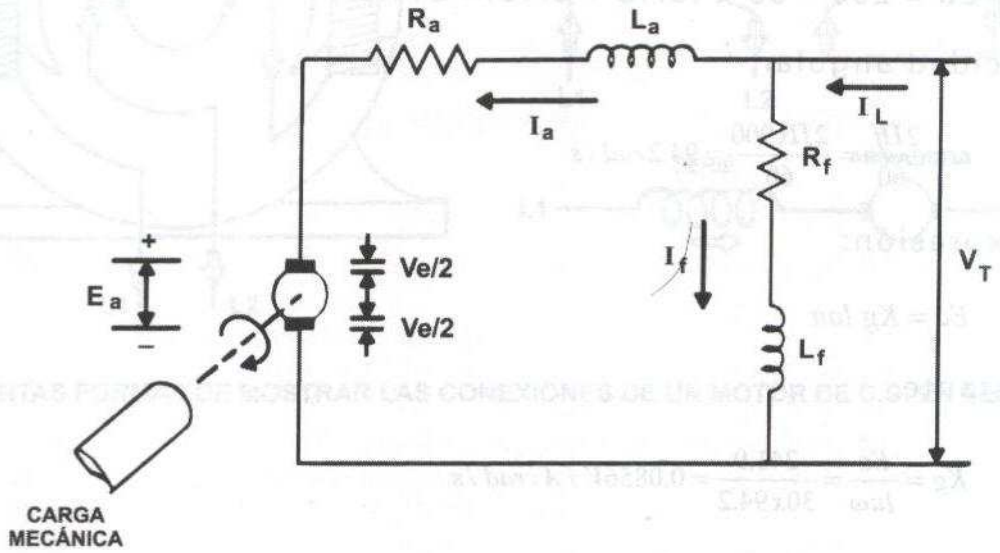
$$Ea = 250 - 20(0.25 + 0.12) = 244.6 V$$

La velocidad angular es ahora:

$$\omega = \frac{Ea}{K_g I_a} = \frac{244.6}{(0.0856x20)} = 142.8 rad/s \quad ó \quad \frac{142.8x60}{2\Pi} = 1364 RPM$$

3.5.2 MOTORES DE C.D. EN CONEXIÓN PARALELO O SHUNT

En la figura siguiente, se muestra el circuito equivalente para un motor de C.D. en conexión paralelo o shunt. El voltaje de alimentación es V_T y la corriente de alimentación I_L. El valor de I_L debe alimentar tanto la corriente de armadura como la corriente de campo I_F.



Aplicando la Ley de Kirchhoff de corrientes:

$$I_L = I_a + I_f$$

La potencia de entrada al motor:

$$P = V_T \times I_L$$

La corriente de campo se puede calcular como:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

La fuerza contraelectromotriz (FCEM) se puede calcular a partir de:

$$V_T = I_L R_a + V_e + E_a$$

De donde la FCEM es:

$$E_a = V_T - I_L R_a - V_e$$

Donde:

V_e = Caída de voltaje en las escobillas.

E_a = Fuerza contraelectromotriz.

I_L = Corriente en el armadura o línea.

I_F = Corriente en el devanado de campo.

I_a = Corriente de armadura.

R_a = Resistencia del devanado de armadura (Ω).

R_F = Resistencia del devanado de campo (Ω).

ω = Velocidad rotacional en rad/seg.

Para un valor constante de corriente de campo la fuerza contraelectromotriz es:

$$E_a = K_g I_F \omega$$

K_g = Constante de armadura de la FCEM en v-s/A.rad.

Ejemplo

Un motor de C.D. en conexión shunt o paralelo se alimenta a 250 V y opera a 1000 RPM en vacío, tomando 8A. Las resistencias de armadura y de campo son 0.2 ohms y 250 ohms respectivamente. Calcular la velocidad cuando opera con carga y toma 50A. Supóngase que el flujo es constante.

Solución

La corriente de campo se calcula como:

$$I_f = \frac{V}{R_f} = \frac{250}{250} = 1A$$

La corriente de armadura cuando está en vacío:

$$I_{ao} = I_{Lo} - I_f = 8 - 1 = 7A$$

El valor de la fuerza contraelectromotriz en vacío es:

$$E_{ao} = V_T - R_a I_{ao} = 250 - 7x0.2 = 248.6V$$

La velocidad en vacío es:

$$N_o = 1000RPM$$

Cuando el motor toma carga, la corriente de línea es:

$$I_L = 50A$$

La corriente de armadura es ahora:

$$I_a = I_L - I_f = 50 - 1 = 49A$$

El valor de la fuerza contraelectromotriz es:

$$E_a = V_a - R_a I_a = 250 - 49x0.2 = 240.2V$$

Dado que el flujo se supone constante, la velocidad es directamente proporcional a la FCEM desarrollada, es decir:

$$\frac{N}{N_o} = \frac{E_a}{E_{ao}}$$

N = Velocidad de carga (RPM).

N_o = Velocidad en vacío (RPM).

E_a = Fuerza contraelectromotriz con carga.

E_{ao} = Fuerza contraelectromotriz en vacío.

De aquí:

$$N = N_o \frac{E_a}{E_{ao}} = 1000x \frac{240.2}{248.6} = 966\,RPM$$

3.5.3 MOTOR DE C.D. CON DEVANADO DE COMPUESTO

En este tipo de motores la variación de velocidad debida a los cambios en la carga es mucho menor que en los motores con conexión serie, pero mayor que en los motores con conexión paralelo o derivado (shunt). Tiene también un par de arranque mayor que los motores que los motores en conexión paralelo (shunt) y tiene capacidad para soportar sobrecargas pesadas. Sin embargo, tiene un rango más estrecho de ajuste de velocidad. Estos motores usan, tanto los devanados de campo paralelo (shunt) como serie, y conjuntan las características de ambos. Asimismo, dependiendo de la manera en cómo se conectan se pueden tener cuatro clases de motores en conexión compuesta (compound):

- Shunt largo acumulativo.
- Shunt largo diferencial.
- Shunt corto acumulativo.
- Shunt corto diferencial.

Los motores con devanado compuesto se usan cuando el arranque de la carga es muy pesado o cuando los cambios en la carga se dan en forma intempestiva, como es el caso de las bombas recíprocas, las máquinas de presión o de perforado.

DIAGRAMA DE CONEXIONES DE UN MOTOR CON CONEXIÓN COMPUESTA

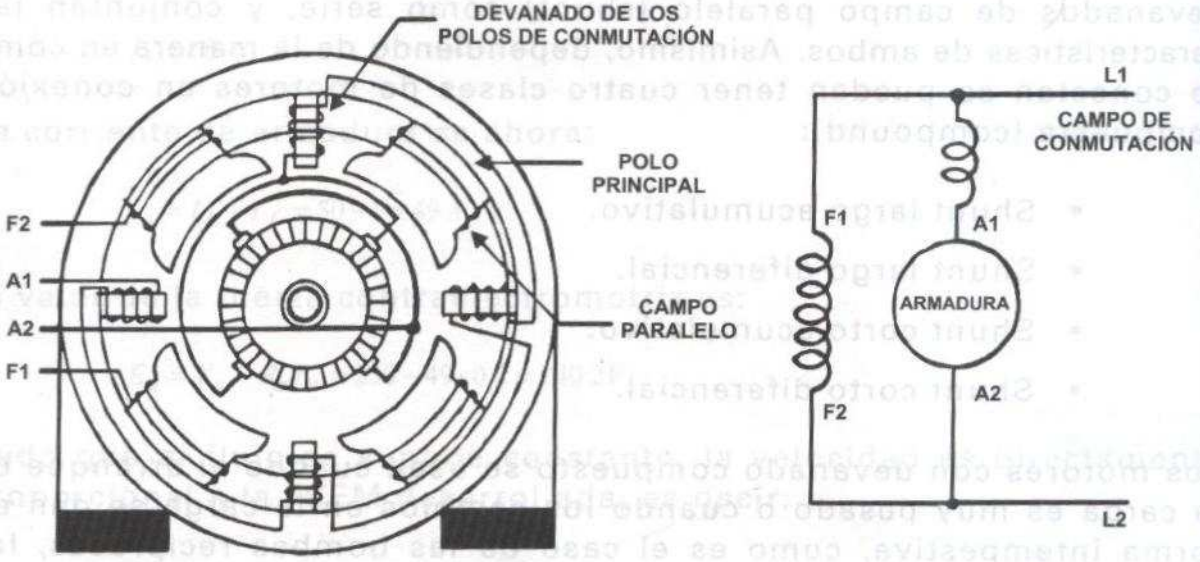


DIAGRAMA DE ALAMBRADO DE UN MOTOR DE C.D. EN CONEXIÓN COMPUESTA CON DEVANADOS DE POLOS DE CONMUTACIÓN

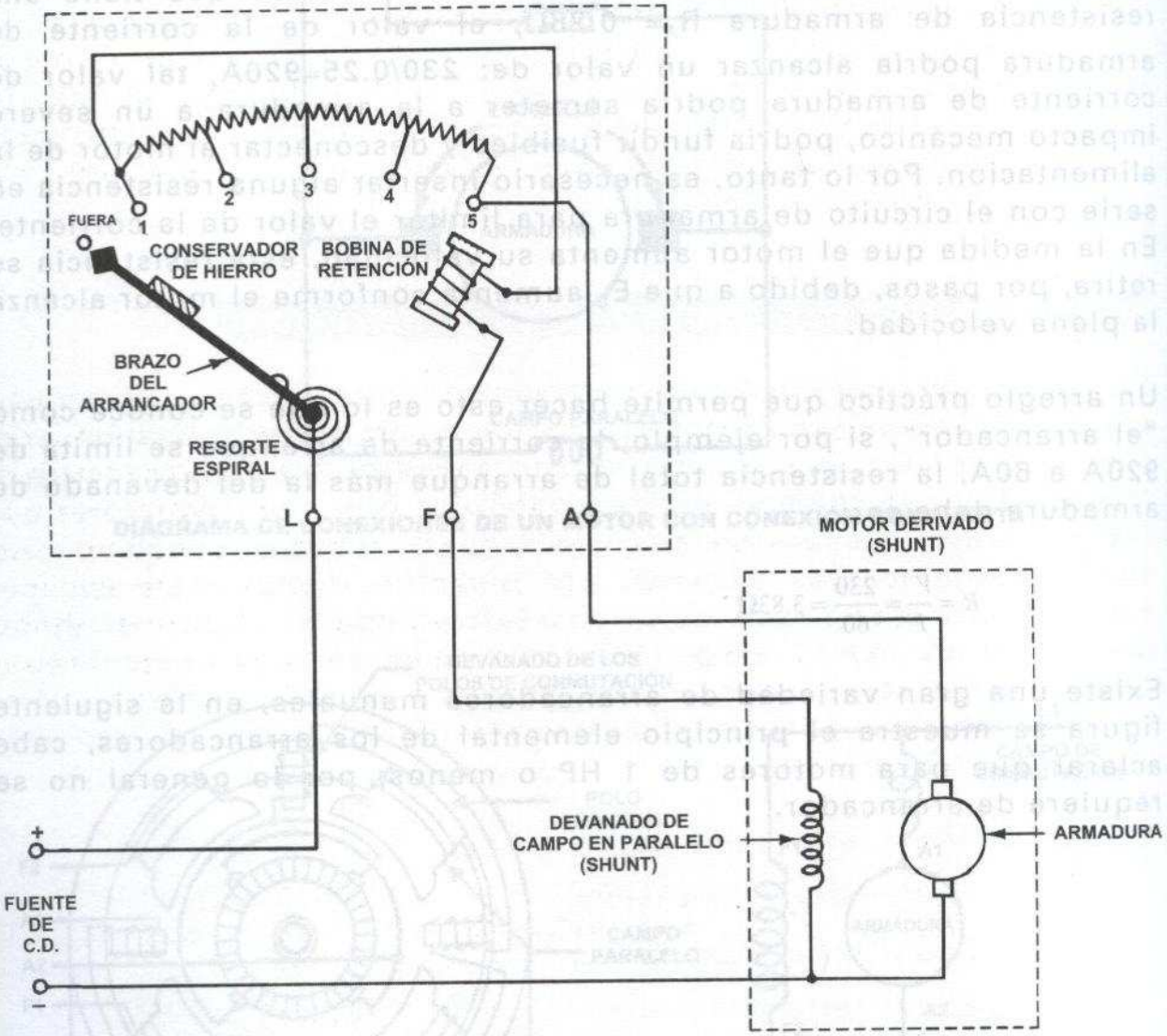
3.6 EL ARRANQUE DE LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

En el instante del arranque la fuerza contraelectromotriz (E_C) es cero debido a que justo en ese instante la armadura no está girando, por ejemplo si se arranca un motor alimentado a 230V que tiene una resistencia de armadura R_A= 0.25Ω, el valor de la corriente de armadura podría alcanzar un valor de: 230/0.25=920A, tal valor de corriente de armadura podría someter a la armadura a un severo impacto mecánico, podría fundir fusibles y desconectar al motor de la alimentación. Por lo tanto, es necesario insertar alguna resistencia en serie con el circuito de armadura para limitar el valor de la corriente. En la medida que el motor aumenta su velocidad, esta resistencia se retira, por pasos, debido a que E_C aumenta conforme el motor alcanza la plena velocidad.

Un arreglo práctico que permite hacer esto es lo que se conoce como "el arrancador", si por ejemplo, la corriente de arranque se limita de 920A a 60A, la resistencia total de arranque más la del devanado de armadura debe ser:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{230}{60} = 3.83\Omega$$

Existe una gran variedad de arrancadores manuales, en la siguiente figura se muestra el principio elemental de los arrancadores, cabe aclarar que para motores de 1 HP o menos, por lo general no se requiere de arrancador.



ARRANCADOR MANUAL PARA UN MOTOR EN CONEXIÓN EN PARALELO (SHUNT)

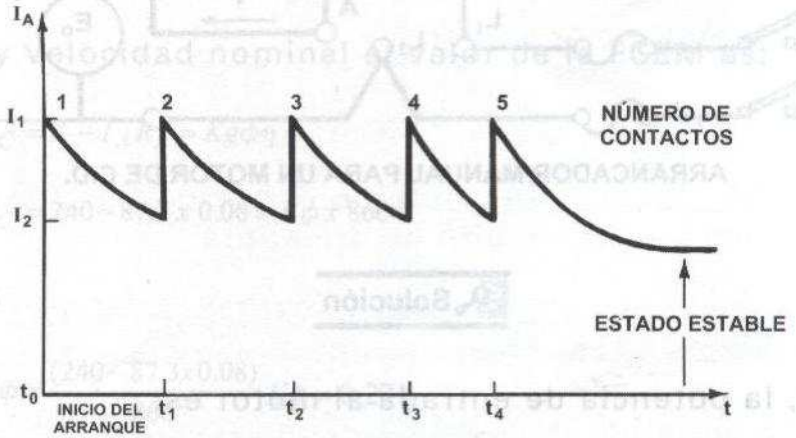
Para arrancar el motor de la figura anterior, el interruptor principal se cierra y el brazo del arrancador se mueve al contacto 1, después de que la armadura se ha acelerado suficientemente sobre el primer contacto, el brazo del arrancador se mueve lentamente a los siguientes contactos

hasta que el conservador o retenedor de fierro es retenido por la bobina de retención (electroimán). El proceso total puede tomar algunos segundos dependiendo del tamaño del motor.

En la posición final no se agrega resistencia en el circuito de la armadura, el brazo del arrancador se mantiene en el contacto de la última posición. Cuando se presenta una falla en la alimentación, o bien si el circuito del campo se abre accidentalmente, el resorte regresa al brazo del arrancador a la posición de "Fuera", desconectando al motor, con el brazo del arrancador sobre el contacto 1 la corriente de la armadura es:

$$I_1 = \frac{V_{ALIMENTACION}}{R_A + R_{ARRANCADOR}}$$

Debido a que el par es proporcional a la corriente y al flujo, se deduce que el máximo par se tiene en el arranque para acelerar la armadura, durante el período de aceleración E_C aumenta y la corriente de armadura se reduce, cuando el valor de la corriente cae a un cierto valor I_2 preseleccionado, el brazo del arrancador se mueve al contacto 2, se debe cortar suficiente resistencia para permitir que la corriente aumente a I_1 otra vez; esta operación se continua hasta que se alcanza el último contacto y el motor queda en su condición de operación en estado estable de velocidad y corriente.



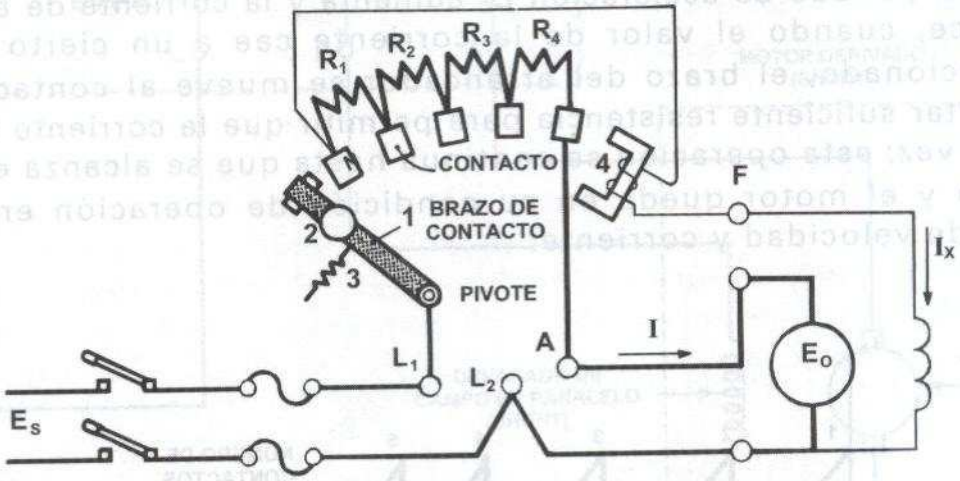
VARIACIÓN EN LA CORRIENTE DE ARMADURA DURANTE EL PERIODO DE ARRANQUE

Ejemplo

Calcular las resistencias necesarias para un arrancado de 4 pasos para limitar la corriente de arranque de un motor de C.D. en conexión derivada o shunt. Supóngase que los cuatro pasos tienen igual valor de resistencia. El motor es de 25 HP, 240V, 860 RPM y tiene una resistencia de armadura R_A=0.08 Ω con eficiencia del 89%. Determinar a qué velocidades los resistores del arrancador se deben sacar de manera que la corriente permanezca en o sobre el valor nominal durante el arranque, supóngase que la corriente de campo es despreciable con la corriente de armadura y además constante.

Solución

En la siguiente figura, se muestra el circuito de arranque del motor.



ARRANCADOR MANUAL PARA UN MOTOR DE C.D.

Solución

A plena carga, la potencia de entrada al motor es:

$$P_e = \frac{Hp\ x\ 746}{\eta} = \frac{25\ x\ 746}{0.89} = 20955\ W$$

La corriente de línea:

$$I_L = \frac{20955}{240} = 87.3A$$

El valor de esta corriente se limita al 150% ó :

$$I_{MÁX} = 1.5\ x\ 87.3 = 131A$$

Este es el valor de corriente que se debe de limitar al arranque, es decir:

$$I_{MÁX} = \frac{V_{ALIMENTACIÓN}}{R_A + 4R}$$

$$I_{MÁX} = \frac{240}{0.08\ x\ 4R} = 131$$

$$240 = 131\ (0.08 + 4R)$$

$$240 = 10.48 + 524R$$

$$\frac{240 - 10.48}{524} = R$$

$$R = 0.438\Omega$$

A corriente y velocidad nominal el valor de la FCEM es:

$$E_C = V - I_A R_A = Kg\phi\eta$$

$$E_C = 240 - 87.3\ x\ 0.08 = K\phi\ x\ 860$$

Por lo tanto:

$$K\phi = \frac{(240 - 87.3x0.08)}{860} K\phi = 0.271$$

Este valor representa una constante para las suposiciones que se hacen en el siguiente ejemplo.

Ejemplo

En el arranque, con el brazo del arrancador en el contacto 1, $I_{MAX}=I_R$ y se tienen cuatro resistores en serie con la armadura.

Por lo tanto:

$$240 = I_{MÁX}(0.08+4R)$$

Con: $\eta=0$ en el primer paso.

El motor se acelera y la corriente decae hasta $I_A = I_{ANOMINAL}$ y en este punto el brazo del arrancador se mueve al contacto 2 donde se tienen tres resistores en serie con la armadura y $I_A=I_{AMÁX}$, por lo tanto:

$$240 = 131(0.08+3\,x\,0.438)+0.271\eta$$

De donde:

$$\eta = 212\ RPM\ y\ E_C = 57.4V\ en\ el\ tiempo\ t_1$$

En forma similar sobre el contacto 3 con 2R en el circuito.

$$\eta = 423\ RPM\ y\ E_C = 114.8V\ en\ el\ tiempo\ t_2$$

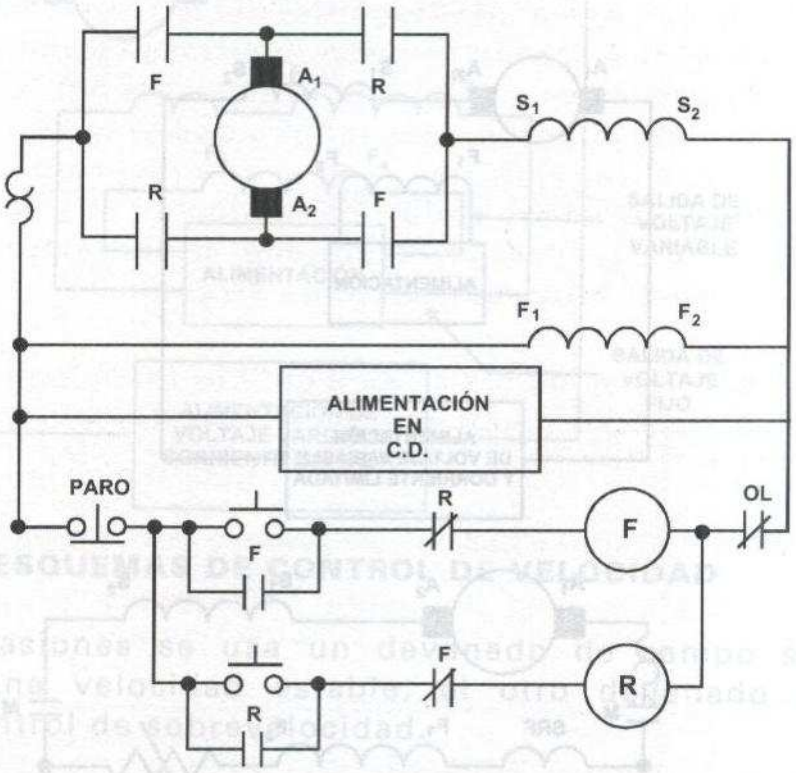
En el contacto 4 con R en el circuito

$$\eta = 365\ RPM\ y\ E_C = 172.1V\ en\ el\ tiempo\ t_3$$

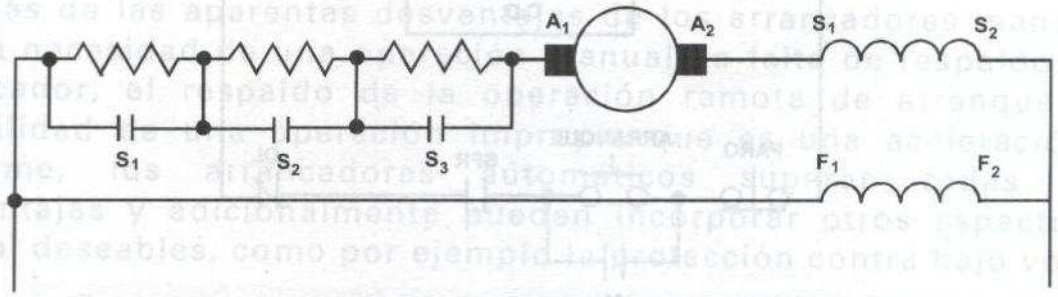
En el contacto 5, la posición final del brazo del arrancador, sin resistencia adicional en el circuito de armadura.

$$\eta = 847\ RPM\ y\ E_C = 229.5V\ en\ el\ tiempo\ t_4$$

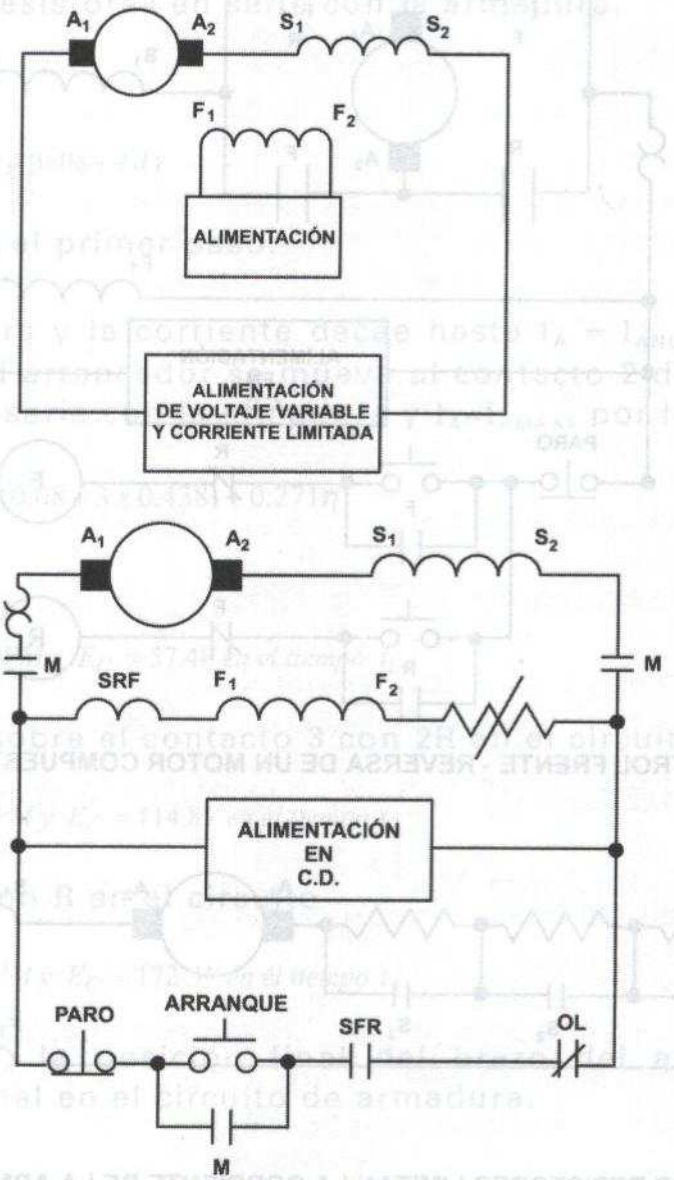
Después de esto el motor alcanza el estado estable.



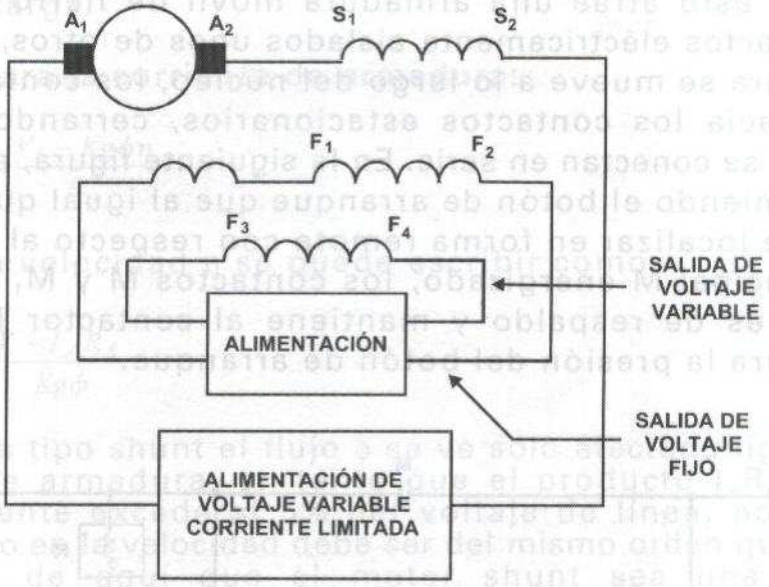
CONTROL FRENTE - REVERSA DE UN MOTOR COMPUESTO DE C.D



LOS RESISTORES LIMITAN LA CORRIENTE DE LA ARMADURA
S1, S2, S3 SON CONTACTOS PARA PUNTEAR LAS RESISTENCIAS



EL RELEVADOR DE CAMPO DERIVADO DESCONECTA LA ALIMENTACIÓN A LA ARMADURA SI SE INTERRUMPE LA CORRIENTE



ESQUEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD

En algunas ocasiones se usa un devanado de campo shunt para proporcionar una velocidad estable, el otro devanado de campo proporciona control de sobrevelocidad.

3.6.1 EL ARRANQUE AUTOMÁTICO DE LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

Algunas de las aparentes desventajas de los arrancadores manuales, son la necesidad de una operación manual, la falta de respaldo en el arrancador, el respaldo de la operación remota de arranque y la posibilidad de una operación impropia que es una aceleración no uniforme, los arrancadores automáticos superan todas estas desventajas y adicionalmente pueden incorporar otros aspectos de control deseables, como por ejemplo la protección contra bajo voltaje.

Para ilustrar estos puntos, se puede referir a un arrancador automático simple conectado a un motor en conexión shunt, como se muestra en la figura, este circuito del arrancador se conoce como: **Arrancador de fuerza contra electromotriz**, en el cual por simplicidad la resistencia de arranque se retira en un sólo paso. El contactor M es un contactor magnético, tiene una bobina colocada sobre un núcleo de fierro de

manera que cuando la corriente circula a través de la bobina, el fierro se magnetiza, esto atrae una armadura móvil de fierro que tiene un grupo de contactos eléctricamente aislados unos de otros, en la medida que la armadura se mueve a lo largo del núcleo, los contactos móviles se mueven hacia los contactos estacionarios, cerrando con esto el circuito al cual se conectan en serie. En la siguiente figura, el contactor se energiza oprimiendo el botón de arranque que al igual que el botón de paso se puede localizar en forma remota con respecto al motor, con el contactor principal M energizado, los contactos M y M_1 se cierran. El contactor M_1 es de respaldo y mantiene al contactor M energizado cuando se retira la presión del botón de arranque.

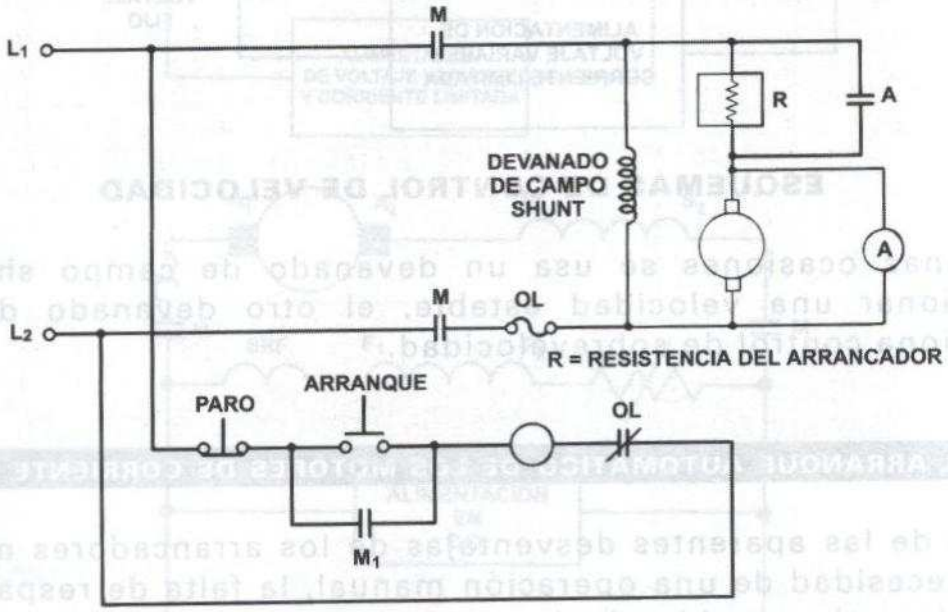


DIAGRAMA DE ALAMBRADO DE UN ARRANCADOR DE FUERZA CONTRA ELECTROMOTRIZ CONECTADO A UN MOTOR SHUNT

3.6.2 Características de velocidad de los motores de C.D.

Cuando se retira la carga metálica del motor, la velocidad del motor se incrementa, la cantidad en que se incrementa depende del tipo del motor. La velocidad de un motor shunt se incrementa alrededor de un 8%, para un motor compuesto (compound) tipo acumulativo el incremento es del 15 al 20%, para el motor serie podría incrementarse

muy rápidamente y es por eso que el motor tipo serie debe accionar siempre una carga.

La ecuación para la corriente de armadura:

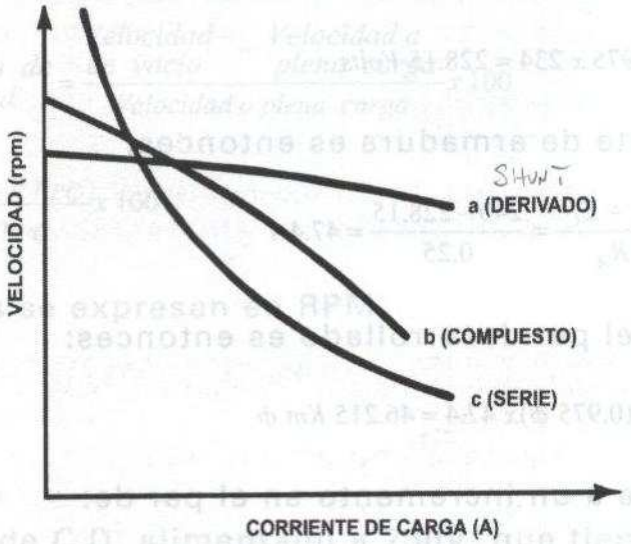
$$I_A = \frac{V_L - Kg\phi\eta}{R_A}$$

Despejando la velocidad η se puede escribir como:

$$\eta = \frac{V - I_A R_A}{Kg\phi}$$

En los motores tipo shunt el flujo ϕ se ve sólo afectado ligeramente por la corriente de armadura, en tanto que el producto $I_A R_A$ de caída de voltaje raramente excede al 5% del voltaje de línea, por lo tanto, el máximo cambio en la velocidad debe ser del mismo orden que para I_A en el motor shunt, de aquí que el motor shunt sea una máquina de velocidad casi constante, como se muestra en la siguiente figura (curva a) para un motor en conexión **compound**, cuando la carga se retira, dos factores afectan la velocidad, I_A y ϕ y entonces hay un mayor incremento en la velocidad, como se muestra en la curva (b).

Se puede observar que un motor serie puede operar a una velocidad peligrosa (elevada) cuando se retira la carga, debido a que no se separa flujo del magnetismo remanente, porque el flujo depende de la corriente de carga, en la figura (c) se muestra esta característica.



CURVA COMPARATIVA VELOCIDAD-CARGA DE MOTORES, SERIE, SHUNT Y COMPUESTO

Ejemplo

Un motor de 240V en conexión shunt tiene una resistencia de armadura R_A = 0.25 Ω, bajo condiciones de carga, la corriente de armadura I_A=24A, si se supone que el flujo se reduce súbitamente en un 2.5%, indicar cuál sería el efecto inmediato en el par desarrollado.

Solución

Cuando la corriente es 24A, de la expresión para el par:

$$T = Km\,\phi\, I_A$$

$$T = Km\phi\, x\, 24$$

La fuerza contra electromotriz:

$$E_C = V_L - I_A R_A = 240 - 24\ x\ 0.25 = 234V$$

Si ϕ se reduce súbitamente en un 2.5%, entonces también E_C se reduce, ya que E_C=Kg ϕ η y la velocidad no cambia en forma instantánea, por lo tanto:

$$E_C = 0.975\ x\ 234 = 228.15\ Volts$$

La nueva corriente de armadura es entonces:

$$I'_A = \frac{V_L - E_C}{R_A} = \frac{240 - 228.15}{0.25} = 47.4A$$

El nuevo valor del par desarrollado es entonces:

$$T' = Km(0.975\ \phi)x\ 47.4 = 46.215\ Km\ \phi$$

Esto corresponde a un incremento en el par de:

$$\frac{T'}{T} = \frac{46.2515\ Km\phi}{24\ Km\phi} = 1.93\ veces$$

Es decir, un ligero decremento de flujo casi duplica el par, lo que produce a su vez que la armadura se acelere a una alta velocidad. En este punto, la fuerza contra electromotriz limita la corriente de armadura para conducir la carga a esta nueva velocidad.

3.6.3 Regulación de velocidad

La clasificación de los motores sobre la base de cómo la velocidad cambia con carga, es particularmente importante en la selección de un motor para desarrollar una tarea especifica, por ejemplo, se ha encontrado que la característica de velocidad constante de los motores shunt es la mejor en cierto tipo de aplicaciones.

Los motores compuestos de velocidad variable, resultan por otro lado los más satisfactorios cuando el accionamiento de cargas requiere de un par considerable al arranque o cuando esté sujeto a cargas de impulso, como son por ejemplo las bombas y los compresores. Los motores serie, por otro lado, se usan generalmente cuando el par de arranque y requerimientos de aceleración son severos, tal es el caso de motores usados en minas o en los vehículos eléctricos.

La regulación de velocidad se expresa por lo general como un porcentaje y se calcula como:

$$\text{Regulación de velocidad} = \frac{\text{Velocidad en vacío} - \text{Velocidad a plena carga}}{\text{Velocidad a plena carga}} x\,100$$

$$\%\,reg = \frac{\eta_O - \eta_{PC}}{\eta_{PC}} x\,100$$

Ambas velocidades se expresan en RPM.

Ejemplo

Se tiene un motor de C.D. alimentado a 230V, que tiene una velocidad a plena carga de 1680 RPM y su velocidad de vacío 1733 RPM, calcular la regulación de velocidad.

Solución

$$\% \ Reg = \frac{\eta_O - \eta_{PC}}{\eta_{PC}} x\,100$$

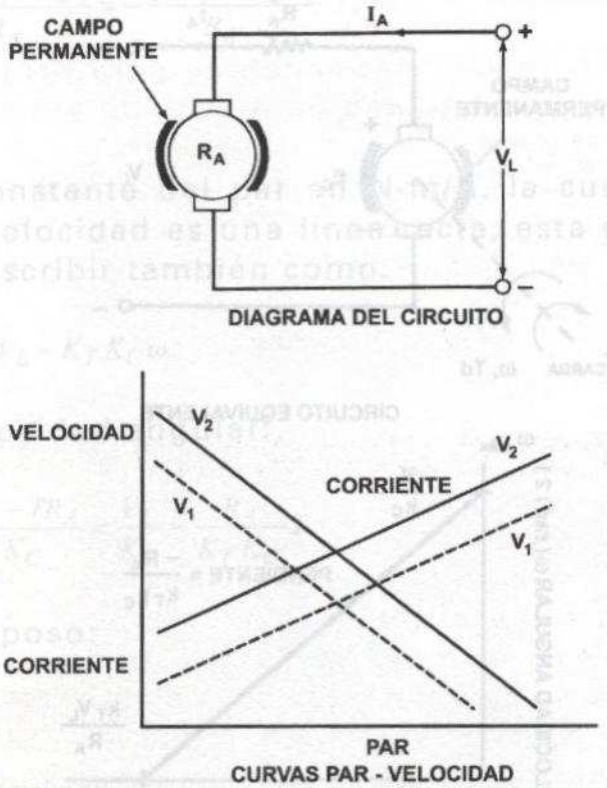
$$= \frac{1733 - 1680}{1680} x\,100$$

$$= 3.2\%$$

3.7 EL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA DE IMÁN PERMANENTE

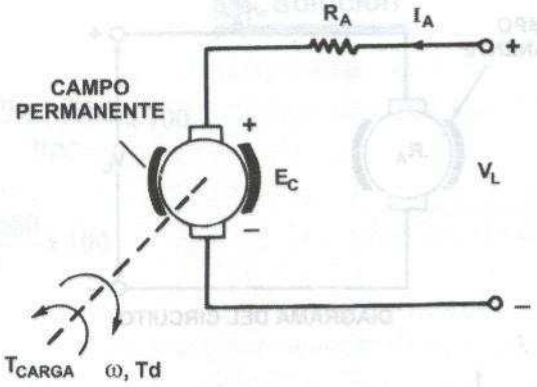
Los motores de C.D. de imanes permanentes tienen sus polos de campo alimentados por imanes permanentes que son de tipo semicircular y están ensamblados sobre la carcaza del estator para proporcionar uno o más pares de polos, la mayoría de los imanes permanentes están compuestos, ya sea de cerámica, alnico o elementos raros de la tierra, sin estructura para devanado de campo los motores de C.D. tienden a ser de tamaño más compacto y tener una mayor eficiencia, la eliminación de las pérdidas RI^2 en el devanado de campo se traduce en una operación más fría con una construcción totalmente cerrada los motores de imanes tipo alnico son los menos afectados por las altas temperaturas. Las desventajas principales son la ausencia de control de campo y características especiales par-velocidad.

Si los motores de imanes permanentes no se sobrecargan, no ocurre la desmagnetización del flujo en el entrehierro y la característica par-velocidad queda como una curva esencialmente lineal, todo el control par-velocidad se logra por medio del ajuste del voltaje de armadura.

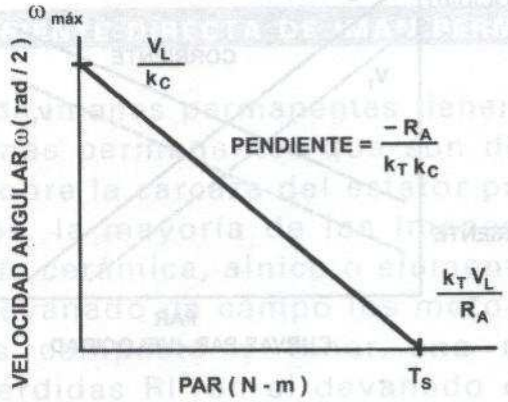


MOTOR DE C.D. DE IMÁN PERMANENTE Ξ

Debajo de la carga nominal, las características de operación son lineales y directamente proporcionales al voltaje de armadura, estas características de operación están mostradas en la siguiente figura, donde se muestra el circuito equivalente.



CIRCUITO EQUIVALENTE



CARACTERÍSTICAS PAR - VELOCIDAD

ANÁLISIS DEL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE

La fuerza contra electromotriz (FCEM) y la corriente de armadura se expresan como:

$$E_C = K_C \omega$$

$$I_A = \frac{V_L - E_C}{R_A}$$

Donde:

KC= Constante de la FCEM V/rad/seg.

El par del motor está dado por:

$$T = K_T I_A$$

$$= \frac{K_T(V_L - E_C)}{R_A} = \frac{K_T(V_L - K_C\omega)}{R_A}$$

Donde:

K_T = Constante del par en N-m/A, la curva del par contra velocidad es una línea recta, esta ecuación se puede escribir también como:

$$TR_A = K_T V_L - K_T K_C \omega$$

Despejando la velocidad angular:

$$\omega = \frac{K_T V_L - TR_A}{K_T K_C} = \frac{V_L}{K_C} - \frac{R_A}{K_T K_C} T$$

Cuando está en reposo:

$$\omega = 0$$

De la ecuación anterior:

$$T = T_{arranque} = \frac{K_T V_L}{R_A}$$

La máxima velocidad ocurre cuando T = 0

$$\omega_{máx} = \frac{V_L}{K_C}$$

La potencia desarrollada que se puede convertir en potencia mecánica es:

$$P_e = E_C I_A = K_C \omega I_A$$

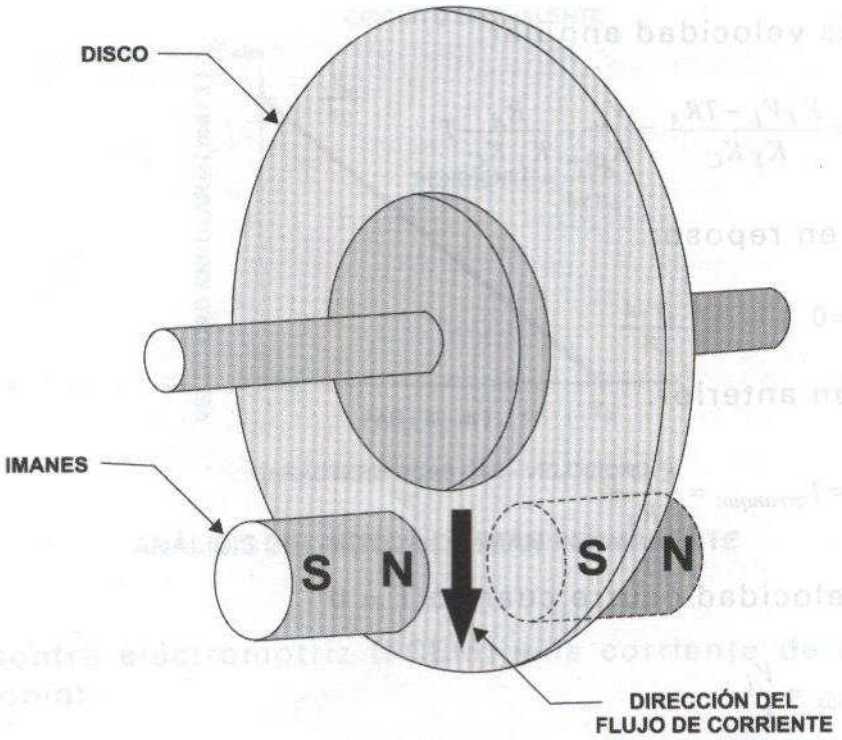
La potencia mecánica a la carga cuando Prot=0, es:

$$Pd = \omega T = \omega K_T I_A$$

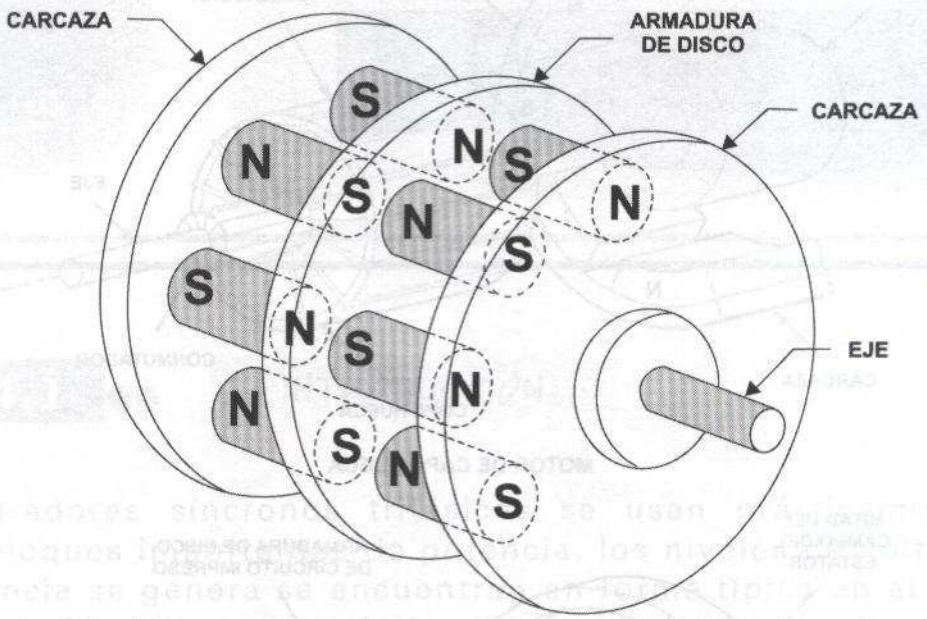
MOTORES DE SERVODISCO

Estos motores usan imanes permanentes para proporcionar un flujo magnético constante, pero tienen un diseño de armadura distinto.

La armadura no contiene fierro y está hecha de 2 a 4 capas de cobre formando un disco delgado estando "impresos" en un material como la fibra de vidrio, por lo que se le conoce también como motor de circuito impreso.



CONSTRUCCIÓN BÁSICA DE UN MOTOR DE SERVODISCO

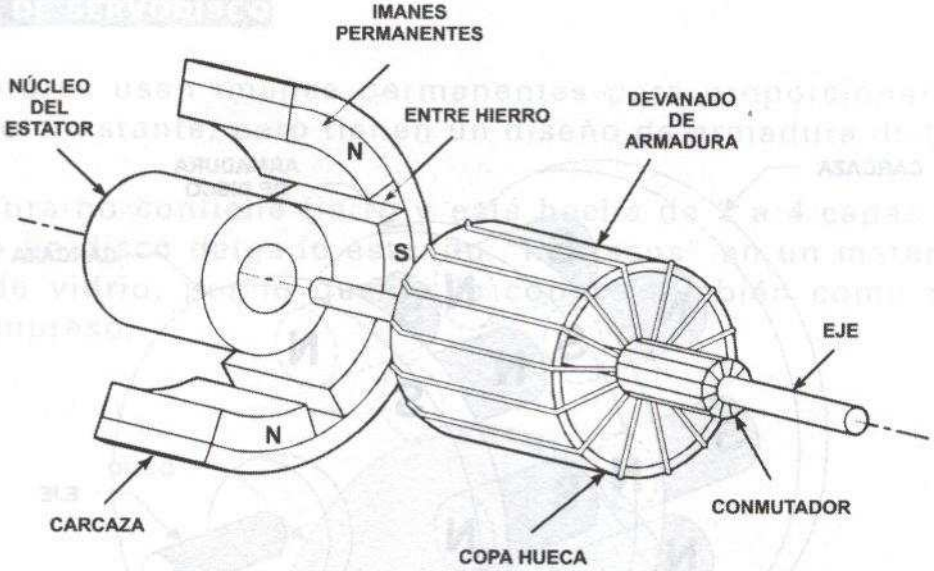


LOS IMANES PERMANENTES ESTÁN ARREGLADOS PARA PRODUCIR POLARIDADES MAGNÉTICAS ALTERNAS

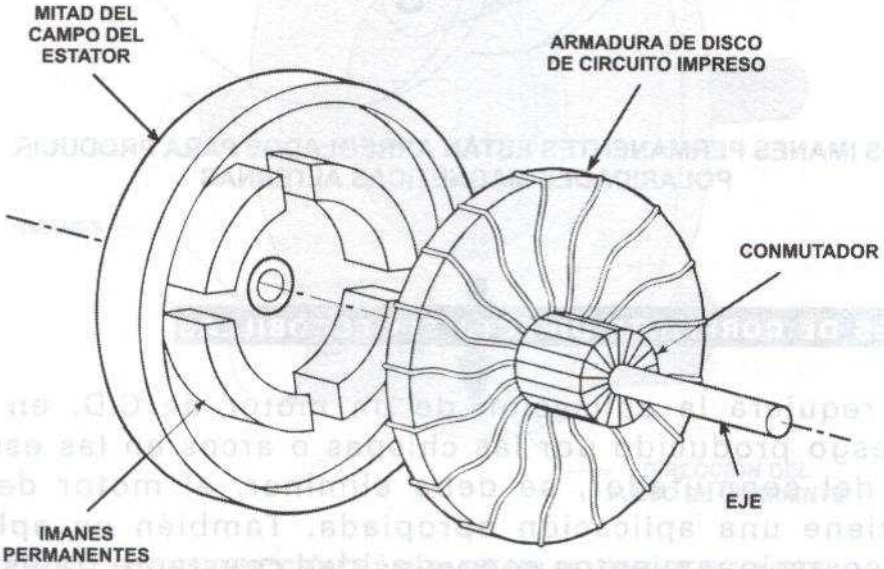
3.8 MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA SIN ESCOBILLAS

Cuando se requiera la aplicación de un motor de C.D. en un lugar donde el riesgo producido por las chispas o arcos en las escobillas y segmentos del conmutador, se deba eliminar, el motor de C.D. sin escobillas tiene una aplicación apropiada. También en aplicaciones que requieren accionamientos con velocidad constante (tales como los accionamientos de disco duro en las computadoras) requieren de motores de C.D. sin escobillas.

Esencialmente el motor de C.D. sin escobillas consiste de un campo de rotor de imán permanente y devanados de armadura en el estator que son conmutados por medio de switches electrónicos. La rotación efectiva del campo de armadura se logra cambiando la dirección de la corriente en el devanado de armadura por medio de transistores switcheables.



MOTOR DE CAPA HUECA



MOTOR DE ARMADURA DE DISCO DE CIRCUITO IMPRESO

MOTORES DE ARMADURA DE BOBINA MÓVIL

Para proporcionar el sincronismo en el campo del imán permanente del rotor con el campo rotatorio de la armadura del estator, se usan sensores de posición en el eje para iniciar los tiempos de switcheo.

4 GENERADORES SÍNCRONOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Los generadores síncronos trifásicos se usan prácticamente para generar bloques importantes de potencia, los niveles de voltaje a que esta potencia se genera se encuentran en forma típica en el rango de 13.8 kV a 28 kV, este voltaje está prácticamente limitado por consideraciones de aislamiento y adicionalmente el número de conductores que se pueden colocar dentro de las ranuras del estator, ya que estos conductores deben tener una adecuada sección transversal para conducir corriente y mantener las pérdidas óhmicas a un mínimo práctico.

A los niveles de voltaje mencionados sería posible transmitir la potencia generada en forma directa, pero esto podría tener también un nivel de pérdidas inaceptable, así como una excesiva caída de voltaje, aún a distancias razonablemente cortas, por lo tanto, es absolutamente esencial transmitir potencia a niveles de voltaje altos que pueden ser en forma rutinaria 115, 161, 230, 400, 765 y 800 kV, esta elevación de voltaje se logra por medio de los transformadores en las subestaciones eléctricas elevadoras para ser transmitidos a varios cientos de kilómetros, en donde en los llamados extremos receptores los voltajes son reducidos a distintos valores para subdistribución y utilización.

El objetivo de este capítulo es analizar una máquina síncrona cuyo comportamiento sea predictible sin tener que hacer demasiados cálculos de detalle.

Los generadores síncronos comerciales se pueden construir con campo magnético de C.D. estacionario o rotatorio, los generadores síncronos con campo estacionario tienen la misma apariencia exterior que un generador de C.D., los polos salientes crean el campo de C.D., el cual es cortado por una armadura giratoria, la armadura tiene un devanado trifásico cuyas terminales están conectadas a tres anillos rozantes montados sobre el eje por medio de un grupo de escobillas deslizantes sobre los anillos rozantes, se permite a la armadura su conexión a una carga trifásica externa.

La armadura se acciona por un primomotor, que en los casos de máquinas pequeñas puede ser un motor a gasolina o diesel; **los generadores síncronos de campo rotatorio** tienen una armadura estacionaria denominada ESTATOR, el devanado trifásico del estator está directamente conectado a la carga sin necesidad de usar anillos rozantes y escobillas, el estator estacionario facilita el aislamiento de los devanados ya que éstos no están, como en el **caso del campo estacionario**, sujetos a fuerzas centrífugas. A este tipo de generador se le conoce también como ALTERNADOR.

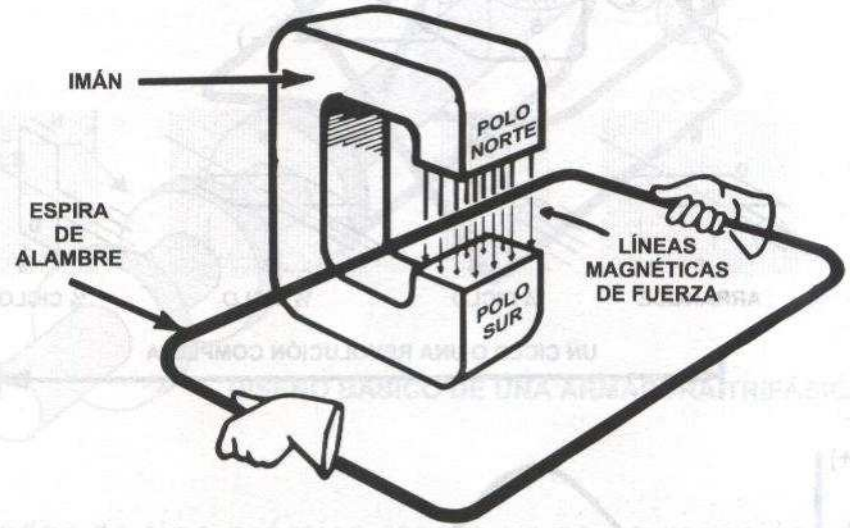
4.2 La construcción de los generadores síncronos

Un generador síncrono se podría construir reemplazando el conmutador en una máquina de C.D. por anillos rozantes, el voltaje de C.A. generado internamente aparecería a través de las escobillas estacionarias que se deslizan sobre los anillos rozantes. Para los voltajes trifásicos generados, se requieren tres anillos rozantes que se deben conectar a los puntos apropiados del devanado de armadura. Esta construcción prácticamente no se usa y se prefiere al **alternador de campo estacionario.**

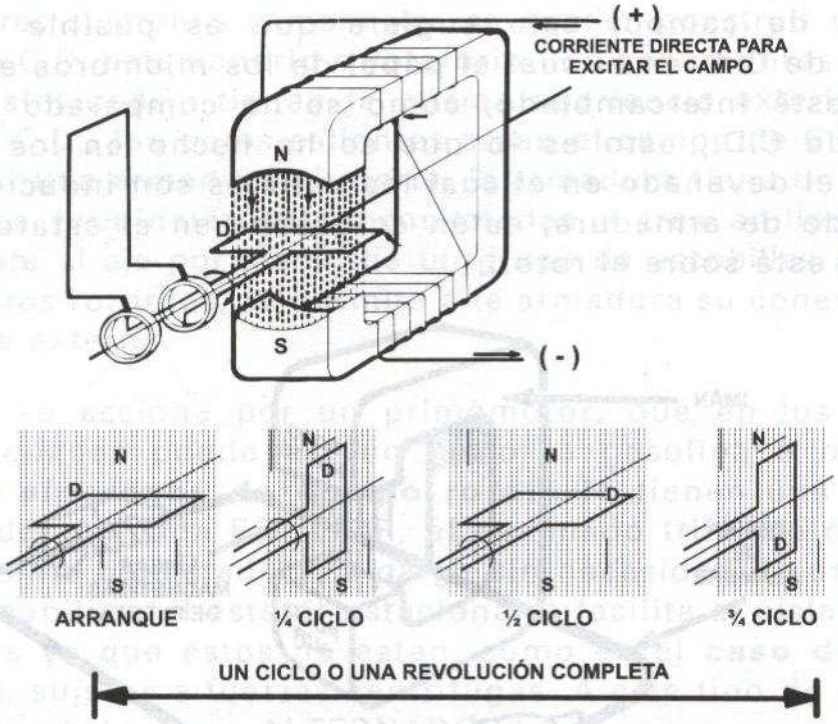
A diferencia de los generadores de C.D., los generadores síncronos se deben accionar a una velocidad constante, la razón es que la frecuencia del voltaje generado, que es la de la red eléctrica que alimenta, está directamente relacionada con la velocidad, por lo tanto, la velocidad mecánica del generador se debe sincronizar con la frecuencia eléctrica, de aquí el nombre de **máquina síncrona.**

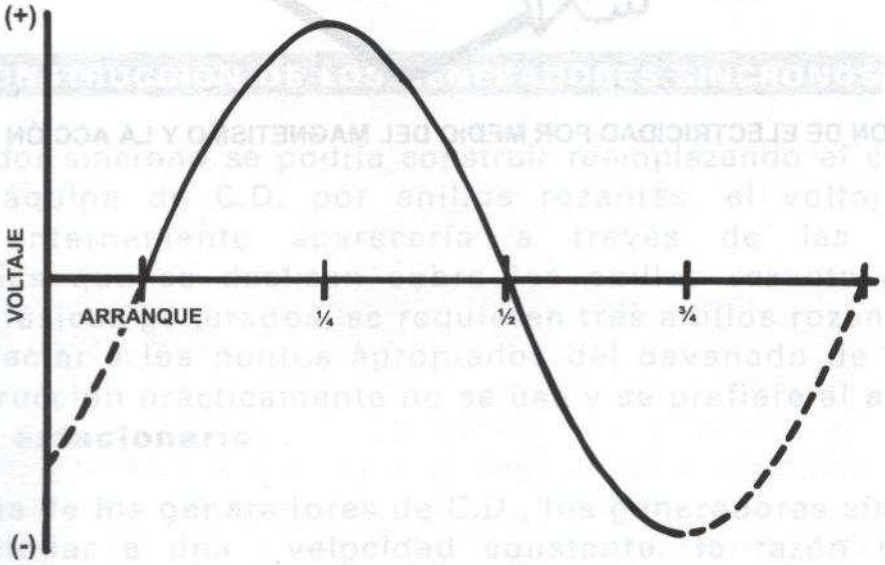
El principio involucrado es simplemente este: La acción del generador depende totalmente del movimiento relativo del conductor con respecto a

las líneas de campo, esto sugiere que es posible construir un generador de C.A. en el cual el papel de los miembros estacionario y rotatorio esté intercambiado, como se ha comparado antes con la máquina de C.D., esto es lo que se ha hecho en los generadores prácticos, el devanado en el cual los voltajes son inducidos, es decir, el devanado de armadura, están colocados en el estator, el circuito del campo está sobre el rotor.

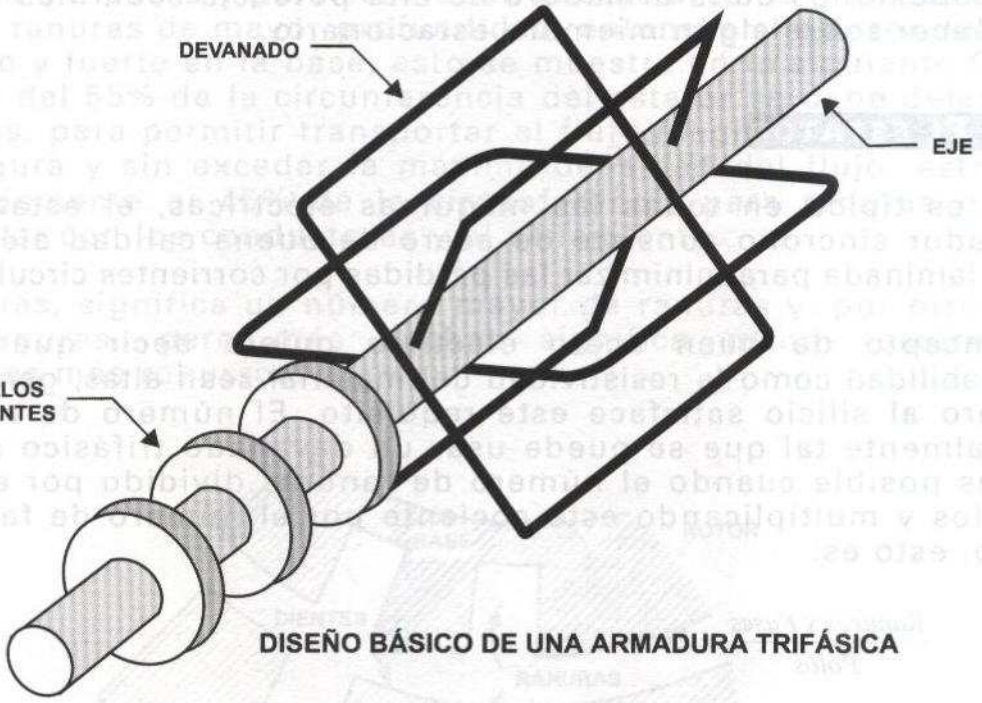


GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR MEDIO DEL MAGNETISMO Y LA ACCIÓN MECÁNICA





GENERACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA



DISEÑO BÁSICO DE UNA ARMADURA TRIFÁSICA

En el generador de tipo práctico, como ya se ha mencionado antes, es preferible el arreglo de campo giratorio (bobina en el rotor) y armadura estacionaria (estator) por varias razones, como son:

1. El devanado de armadura generalmente está dimensionado para altos voltajes y corrientes, es mucho más grande y complejo que el devanado de campo, por lo tanto, es mejor y más seguro que esté en la parte estacionaria, tanto en la parte eléctrica como la mecánica.

2. El devanado de armadura es más fácil de enfriar cuando es estacionario que cuando es rotatorio o giratorio. Debido a que el núcleo del estator es más grande, otorga una mejor circulación del aire forzado, ya que permite disponer de un número mayor de ductos de aire.

3. Las bobinas del campo llevan relativamente poca corriente comparativamente con las bobinas de armadura y, por lo tanto, las conexiones eléctricas rotativas son menores, no se requiere inversión de polaridad y se emplean anillos rozantes.

4. No se requiere acción del conmutador, haciendo que las conexiones de la armadura de alta potencia sean más fáciles de hacer sobre algún miembro estacionario.

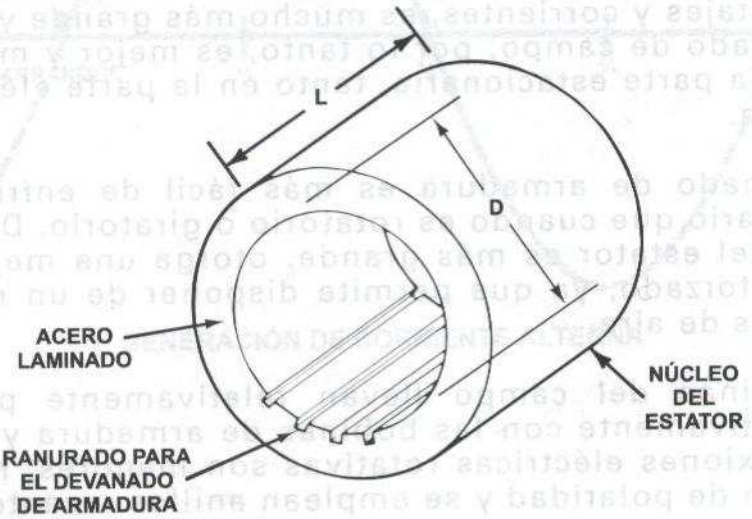
4.2.1 EL ESTATOR

Como es típico en todas las máquinas eléctricas, el estator de un generador síncrono consiste de acero de buena calidad eléctrica, en forma laminada para minimizar las pérdidas por corrientes circulantes.

El concepto de buen acero eléctrico quiere decir que tanto la permeabilidad como la resistividad del material sean altas, generalmente el acero al silicio satisface este requisito. El número de ranuras es generalmente tal que se puede usar un devanado trifásico simétrico, esto es posible cuando el número de ranuras dividido por el número de polos y multiplicando este cociente por el número de fases es un entero, esto es:

$$\frac{Ranuras\ x\ Fases}{Polos} = Entero$$

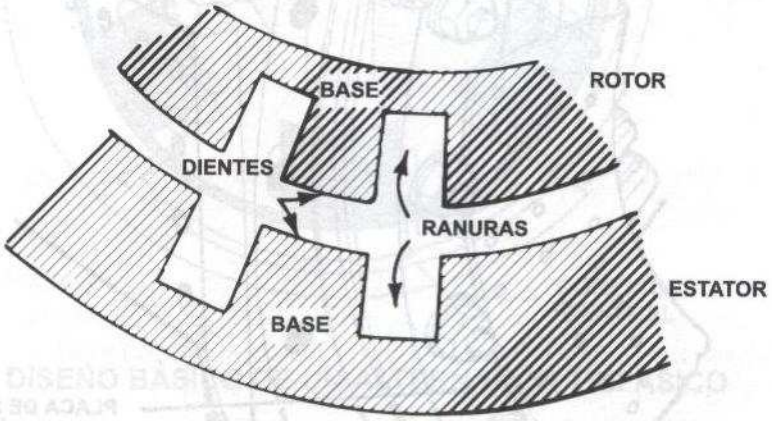
En las máquinas de baja velocidad y gran diámetro, tales como los generadores usados en las centrales hidroeléctricas, que tienen un elevado número de polos, la longitud del estator es relativamente corta, en cambio en las máquinas de alta velocidad, como aquellas accionadas por turbinas de vapor, se usan sólo 2 ó 4 polos y la longitud axial es varias veces el diámetro.



RANURADO Y LAMINADO DEL NÚCLEO DEL ESTATOR

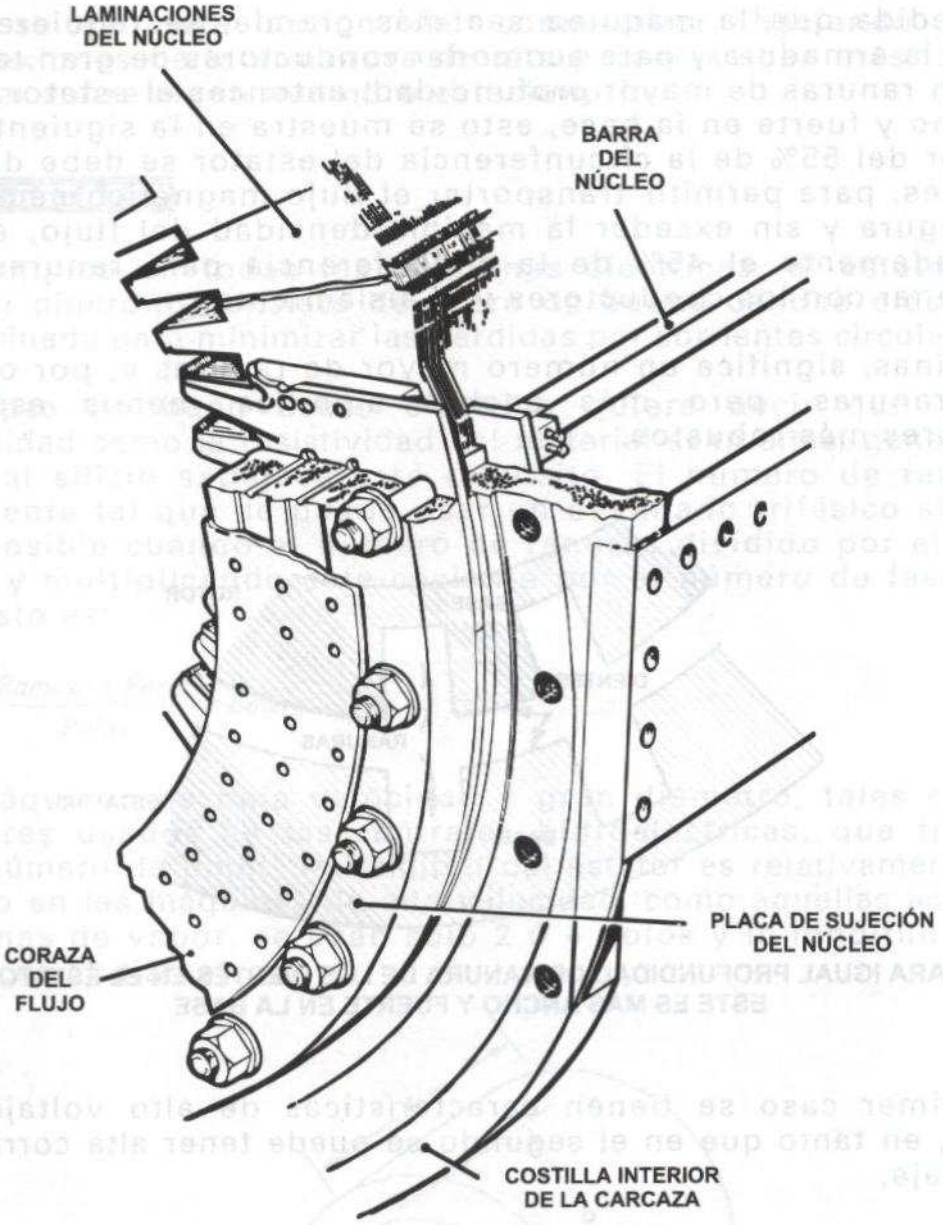
En la medida que la máquina sea más grande, se requiere de más cobre en la armadura y para acomodar conductores de gran tamaño se requieren ranuras de mayor profundidad, entonces el estator debe ser más ancho y fuerte en la base, esto se muestra en la siguiente figura. Alrededor del 55% de la circunferencia del estator se debe dejar para los dientes, para permitir transportar el flujo magnético necesario en forma segura y sin exceder la máxima densidad del flujo, esto deja aproximadamente el 45% de la circunferencia para ranuras que se deben llenar con los conductores y el aislamiento.

Más bobinas, significa un número mayor de ranuras y, por otro lado, menos ranuras, pero más anchas significa menos espiras de conductores más robustos.



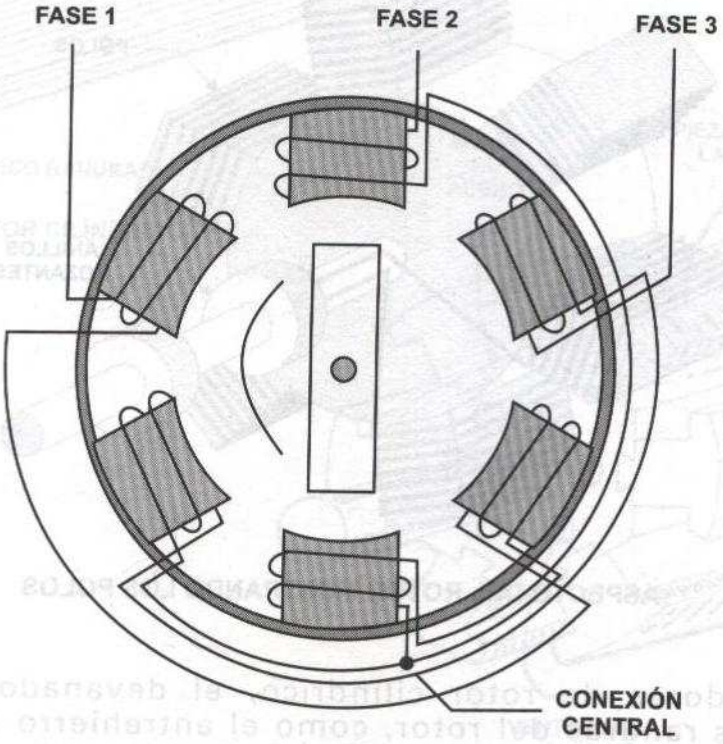
PARA IGUAL PROFUNDIDAD DE RANURA DE LOS DIENTES EN EL ESTATOR ESTE ES MÁS ANCHO Y FUERTE EN LA BASE

En el primer caso se tienen características de alto voltaje y baja corriente, en tanto que en el segundo se puede tener alta corriente con bajo voltaje.



SECCIÓN DE UN ESTATOR

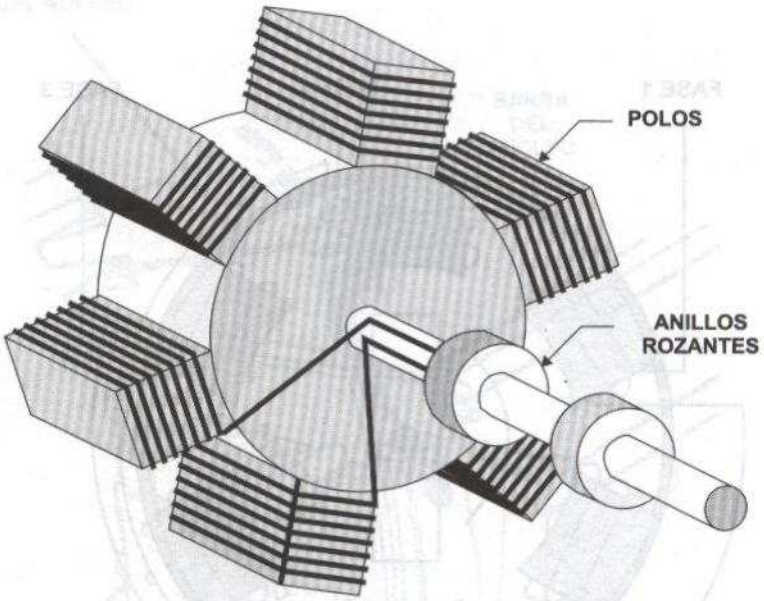
La capacidad de una máquina se puede dar normalmente en KVA (kilovolt-ampere), cuando se excede esta capacidad, la máquina opera a alta temperatura y el aislamiento tiende a deteriorarse más rápido. La capacidad determina el tamaño global, el cual se relaciona con las dimensiones de la máquina, el tipo de diseño, el sistema de enfriamiento, etc.



DISEÑO BÁSICO DE UN ALTERNADOR TRIFÁSICO

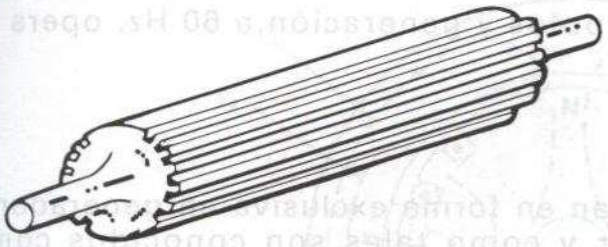
4.2.2 EL ROTOR

La parte rotatoria de un generador síncrono está normalmente construida en una o dos formas: (1) con polos salientes (2) con rotor cilíndrico. La máquina con rotor de polos salientes tiene alimentación de C.D. en el devanado de campo del rotor, para producir el campo magnético; a la zapata polar se le da una forma que permita que la densidad de flujo en el entrehierro tenga una forma senoidal.

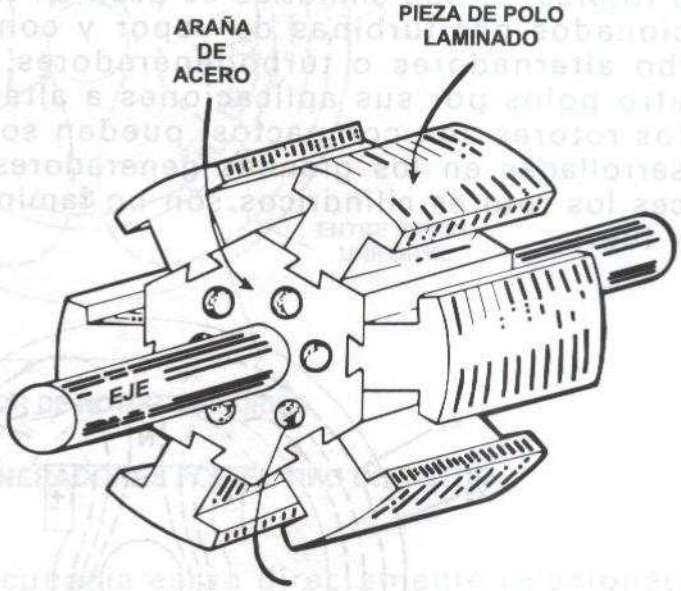


ASPECTO DEL ROTOR MOSTRANDO LOS POLOS

En los generadores de rotor cilíndrico, el devanado de C.D. está colocado en las ranuras del rotor, como el entrehierro es uniforme se obtiene una mejor distribución del flujo, comparativamente con las máquinas de rotor con polos salientes.



ROTOR CILÍNDRICO



ROTOR DE POLOS SALIENTES

TIPOS DE ROTOR

Las máquinas de rotor con polos salientes se usan en las centrales hidroeléctricas en donde operan a muy baja velocidad y entonces requieren de un elevado número de polos. Esta relación se puede observar de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f = \frac{P}{2} x \frac{N}{60}$$

P = Número de polos.

N = Velocidad en RPM.

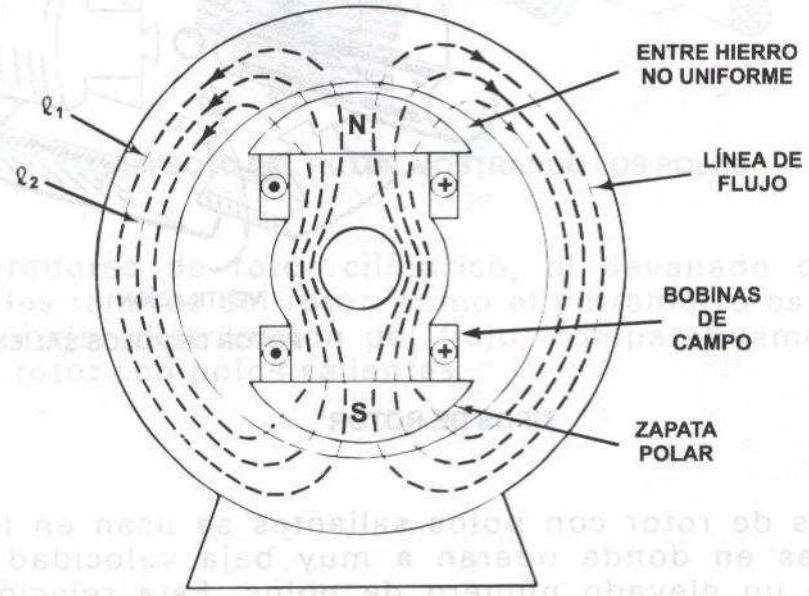
También:

$$f = \frac{P_N}{120}$$

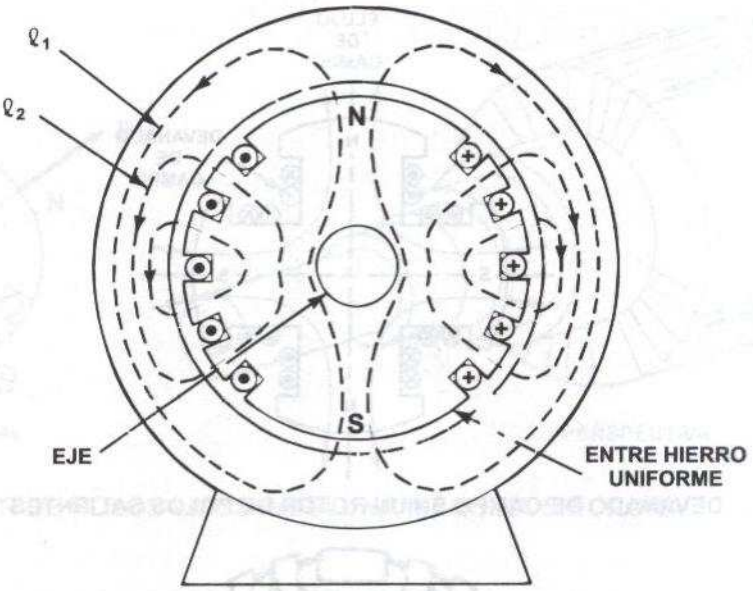
Por ejemplo, una máquina con 48 polos y generación a 60 Hz, opera a:

$$N = \frac{120 f}{P} = \frac{120 \, x \, 60}{48} = 150 \, RPM$$

Los rotores de tipo cilíndrico se usan en forma exclusiva en generadores accionados por turbinas de vapor y como tales son conocidos como turbo alternadores o turbogeneradores, tienen por lo general dos o cuatro polos por sus aplicaciones a altas velocidades y debido a que estos rotores son compactos, pueden soportar las fuerzas centrífugas desarrolladas en los grandes generadores a altas velocidades. Algunas veces los rotores cilíndricos son no laminados y su ranurado se trabaja por fuera.



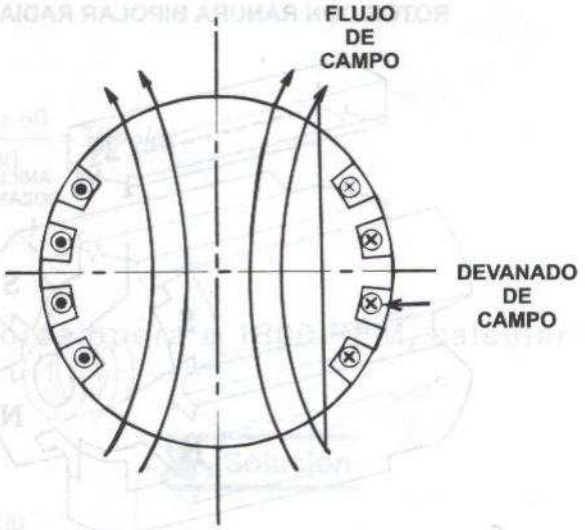
GENERADOR DE POLOS SALIENTES



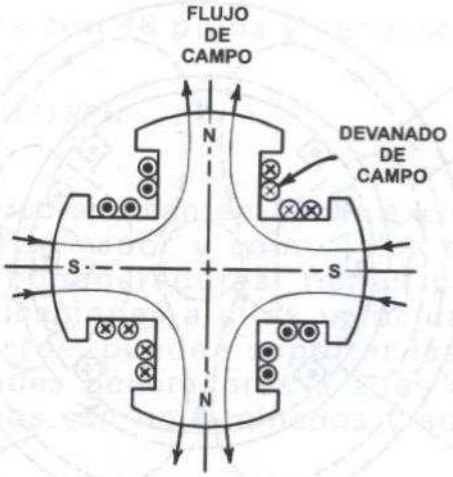
GENERADOR DE ROTOR CILÍNDRICO

CLASIFICACIÓN DE GENERADORES POR EL TIPO DE ROTOR

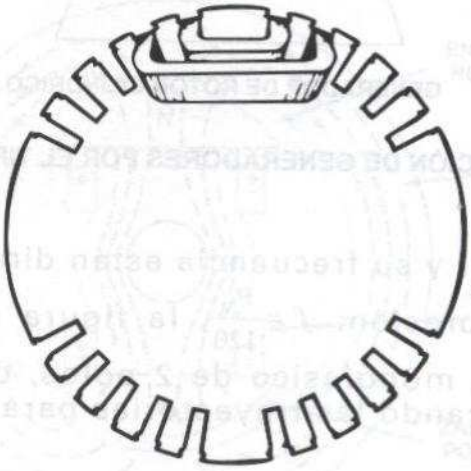
La velocidad del rotor y su frecuencia están directamente relacionadas por medio de la expresión: $f = \frac{P_N}{120}$, la figura anterior representa un generador elemental monofásico de 2 polos, de polos salientes y de rotor cilíndrico, indicando las trayectorias para las líneas de flujo.



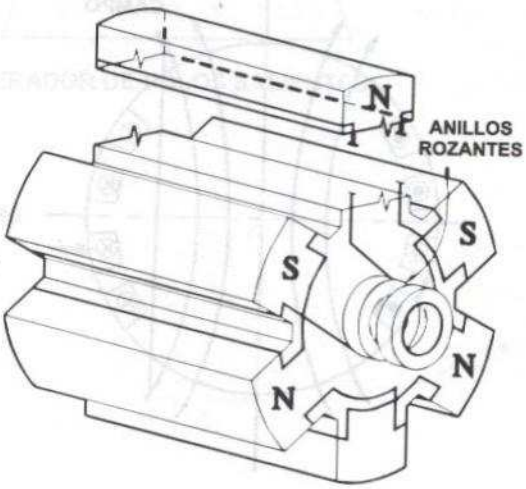
DEVANADO DE CAMPO EN UN ROTOR CILÍNDRICO



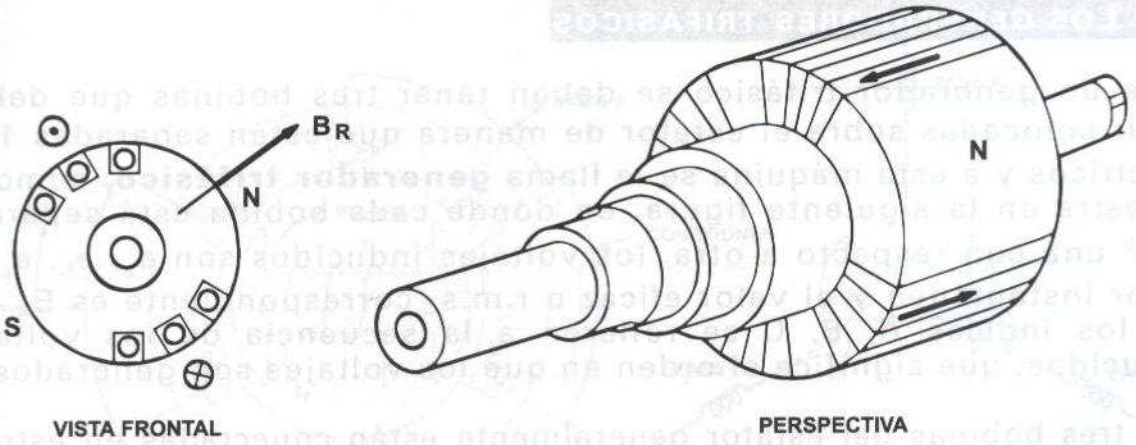
DEVANADO DE CAMPO EN UN ROTOR DE POLOS SALIENTES



ROTOR CON RANURA BIPOLAR RADIAL



ROTOR DE POLOS SALIENTES



MOTOR DE POLOS LISOS PARA UNA MÁQUINA SINCRONA

Ejemplo

Una turbina hidráulica gira a 200 RPM, está conectada a un generador síncrono. Si el voltaje inducido tiene una frecuencia de 60 Hz, calcular el número de polos que tiene el rotor.

Solución

De la expresión:

$$f = \frac{P_N}{120}$$

$$P = \frac{120 f}{N} = \frac{120 \; x \; 60}{200} = 36 \, polos$$

Ejemplo

Un generador de 4 polos opera a 1800 RPM, calcular la frecuencia a la que opera.

Solución

$$f = \frac{P_N}{120} = \frac{4 \; x \; 1800}{120} = 60 \; Hz$$

4.3 Los generadores trifásicos

Para un generador trifásico se deben tener tres bobinas que deben estar colocadas sobre el estator de manera que estén separadas 120° eléctricos y a esta máquina se le llama **generador trifásico,** como se muestra en la siguiente figura, en donde cada bobina está separada 120° una con respecto a otra, los voltajes inducidos son e_a, e_b, e_c en valor instantáneo y el valor eficaz o r.m.s. correspondiente es E_A, E_B, E_C, los índices A, B, C se refieren a la secuencia de los voltajes inducidos, que significa el orden en que los voltajes son generados.

Las tres bobinas del estator generalmente están conectadas en estrella (Y) o también pueden estar conectados en delta (Δ) para producir una fuente de voltaje trifásica, el voltaje inducido en cada bobina del estator se conoce como un voltaje de fase E y el voltaje que aparece entre cualquiera de los dos conductores de fase a fase o de línea, se conoce como el voltaje de línea V_L, o bien el voltaje terminal (V_t), cuando se mide en las terminales de la máquina.

La magnitud del voltaje de cada fase es:

$$E_{máx} = Bm\ell\omega r\ (volts)$$

Donde:

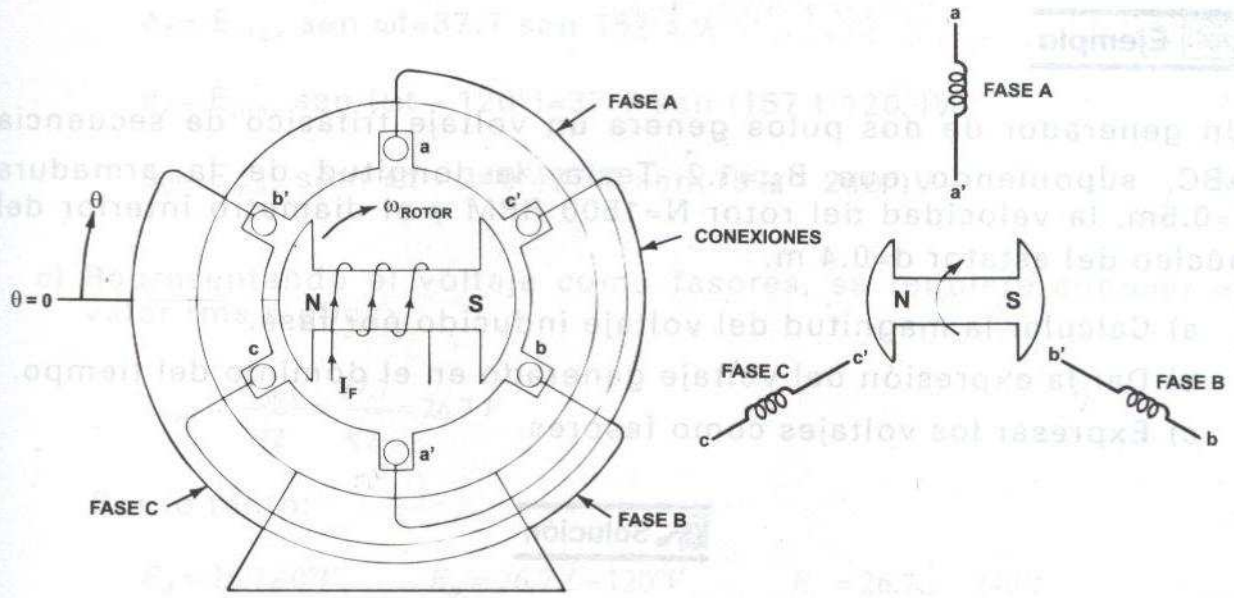
B_m= Densidad de flujo máxima producida por el rotor (T).

ℓ= Longitud de ambos lados de bobina (m).

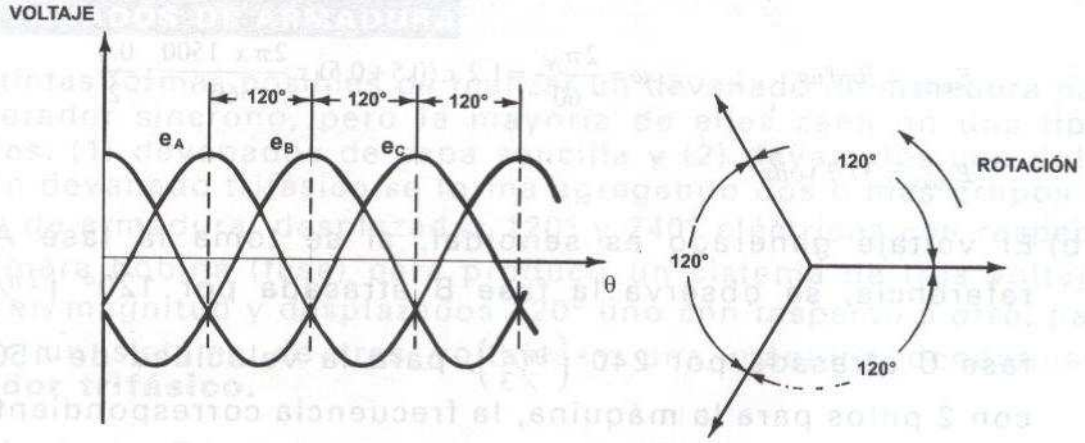
ω= Velocidad angular del rotor (rad/seg).

w= 2πf

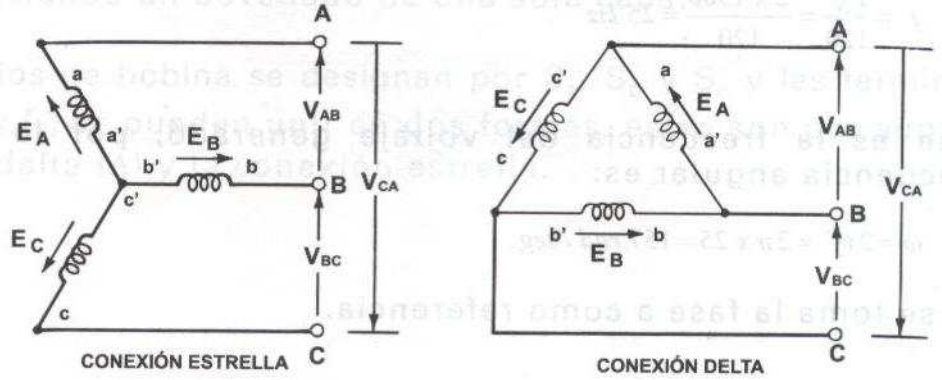
r= Radio de la armadura (m).



GENERADOR TRIFÁSICO DE C.A. DE DOS POLOS



FORMAS DE ONDA DEL VOLTAJE GENERADO EN UN GENERADOR TRIFÁSICO



CONEXIONES DE LAS BOBINAS PARA FORMAR LAS FUENTES DE VOLTAJE TRIFÁSICOS

Ejemplo

Un generador de dos polos genera un voltaje trifásico de secuencia ABC, suponiendo que B_m=1.2 Tesla, la longitud de la armadura ℓ=0.5m, la velocidad del rotor N=1500 RPM y el diámetro interior del núcleo del estator d=0.4 m.

a) Calcular la magnitud del voltaje inducido por fase.

b) Dar la expresión del voltaje generado en el dominio del tiempo.

c) Expresar los voltajes como fasores.

Solución

a) La magnitud del voltaje generado se determina a partir de la ecuación:

$$E_{\text{máx}} = Bm\ell\omega r \quad ; \quad \omega = \frac{2\pi_N}{60} = 1.2\ x\ (0.5+0.5)\ x\ \frac{2\pi x\ 1500}{60}\ x\ \frac{0.4}{2}$$

$$E_{\text{máx}} = 37.7\ volts$$

b) El voltaje generado es senoidal, si se toma la fase A como referencia, se observa la fase B atrasada por 120° $\left(2\pi/3\right)$ y la fase C atrasada por 240° $\left(4\pi/3\right)$, para la velocidad de 1500 RPM con 2 polos para la máquina, la frecuencia correspondiente es:

$$f = \frac{P_N}{120} = \frac{2\ x\ 1500}{120} = 25\ Hz$$

Que es la frecuencia del voltaje generado, por lo tanto, la frecuencia angular es:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi\ x\ 25 = 157\ rad/seg.$$

Si se toma la fase a como referencia.

$e_A = E_{máx}$ sen $\omega t = 37.7$ sen 157 t V

$e_B = E_{máx}$ sen $(\omega t - 120°) = 37.7$ sen $(157\ t - 120°)$V

$e_C = E_{máx}$ sen$(\omega t - 240°)37.7$ sen$(157t - 240°)$V

c) Representando el voltaje como fasores, se requiere conocer el valor rms o eficaz.

$$E_{rms} = \frac{E_{máx}}{\sqrt{2}} = \frac{37.7}{\sqrt{2}} = 26.7\ V$$

Por lo tanto:

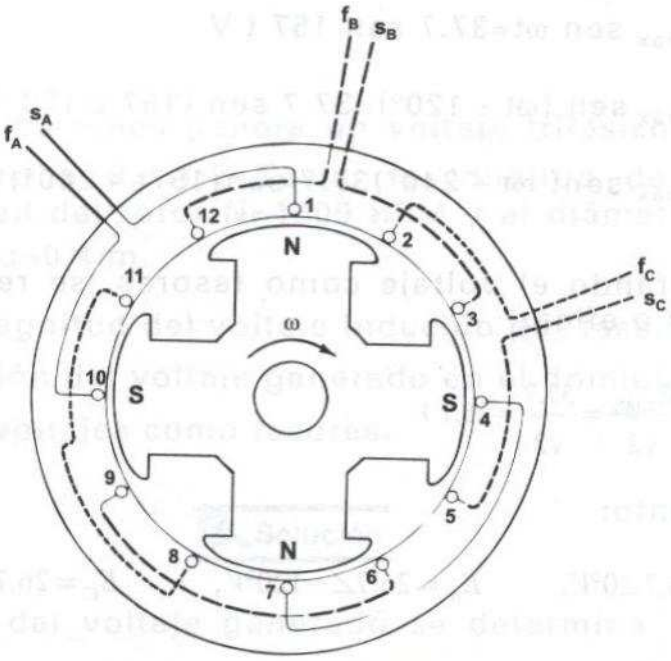
$$E_A = 26.7\angle 0°V, \qquad E_B = 26.7\angle -120°V, \qquad E_C = 26.7\angle -240°V$$

4.4 DEVANADOS DE ARMADURA

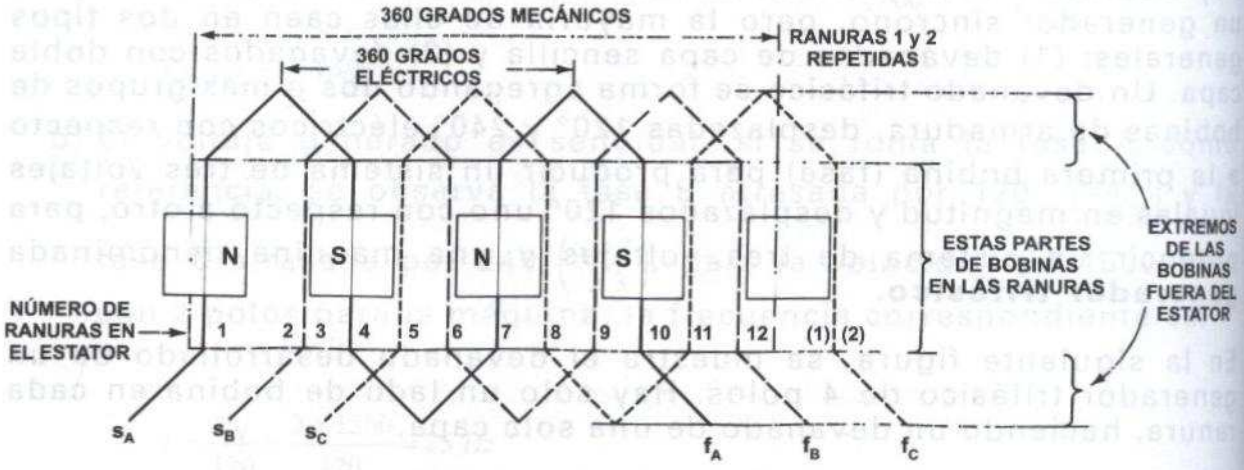
Hay distintas formas posibles de realizar un devanado de armadura para un generador síncrono, pero la mayoría de ellas caen en dos tipos generales: (1) devanados de capa sencilla y (2) devanados con doble capa. Un devanado trifásico se forma agregando dos o más grupos de bobinas de armadura, desplazadas 120° y 240° eléctricos con respecto a la primera bobina (fase) para producir un sistema de tres voltajes iguales en magnitud y desplazados 120° uno con respecto a otro, para producir un sistema de tres voltajes y una máquina denominada **generador trifásico.**

En la siguiente figura, se muestra el devanado desarrollado de un generador trifásico de 4 polos. Hay sólo un lado de bobina en cada ranura, haciendo un devanado de una sola capa.

Si los inicios de bobina se designan por S_a, S_b y S_c y las terminaciones son f_a, f_b y f_c, se pueden unir en dos formas, estas son por supuesto la conexión delta (Δ) y la conexión estrella.

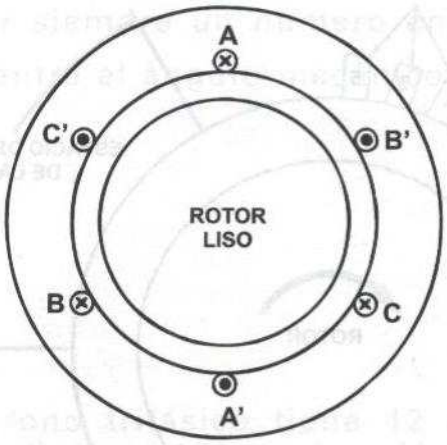


DEVANADO TRIFÁSICO DE CAPAS SIMPLES DISTRIBUIDAS EN UNA RANURA POR POLO POR FASE

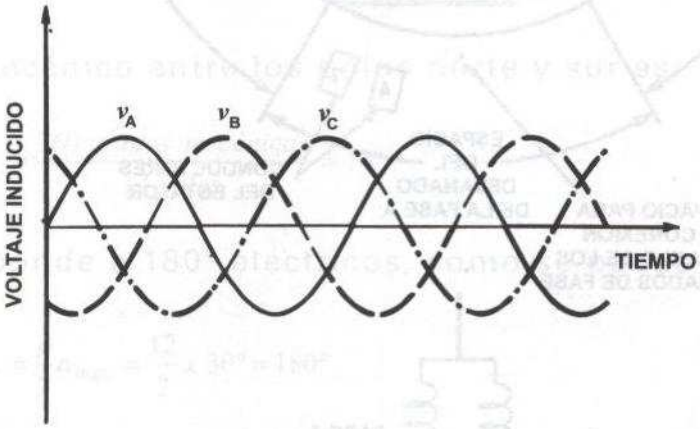


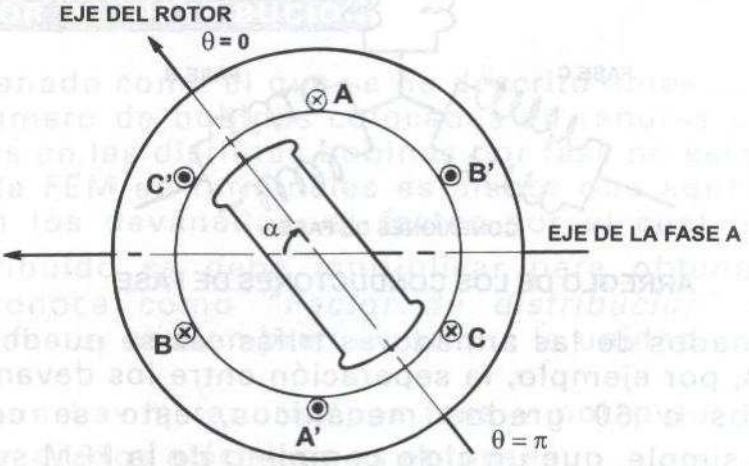
VISTA DESARROLLADA DEL DEVANADO DE ARMADURA

GENERADOR TRIFÁSICO

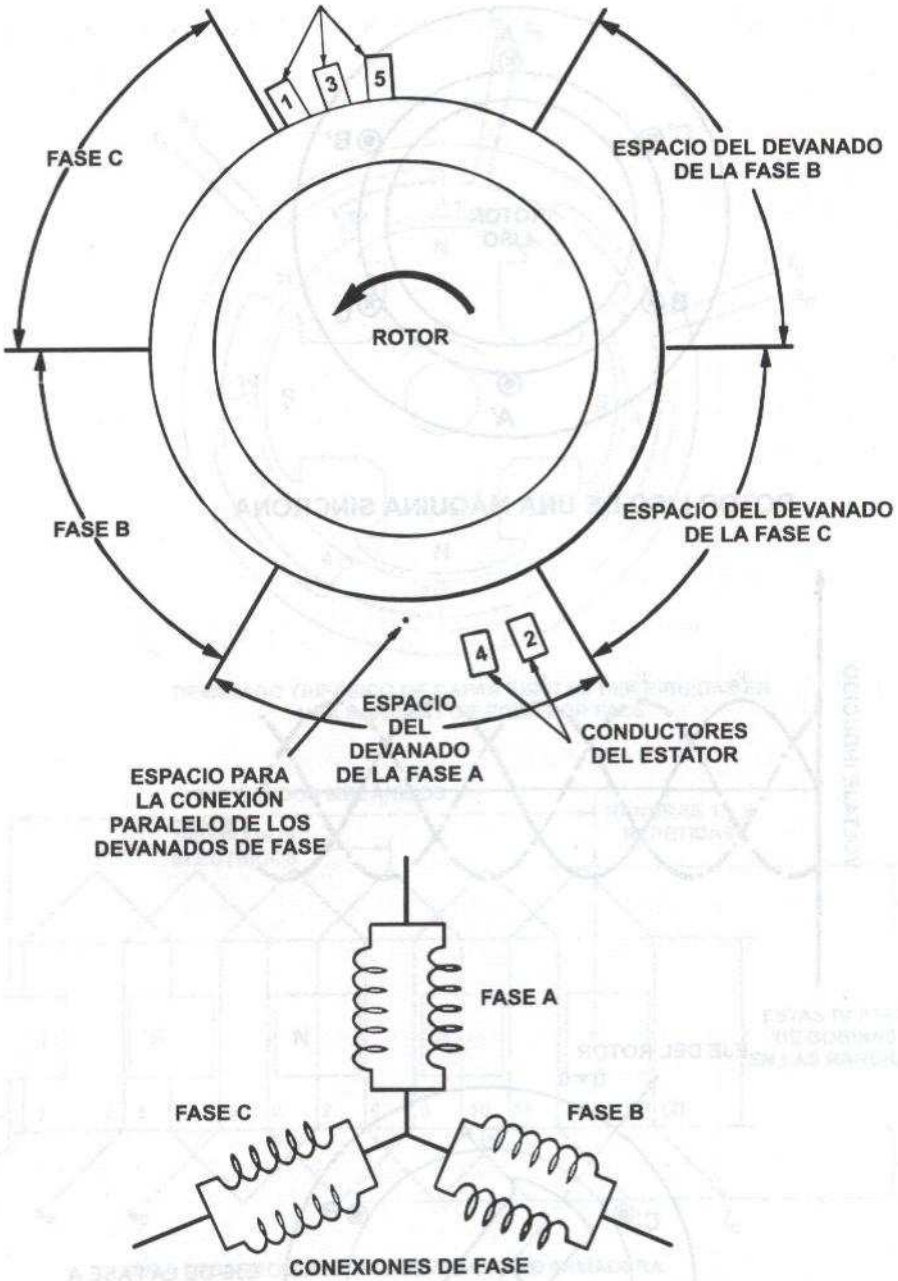


ROTOR LISO DE UNA MÁQUINA SINCRONA





MÁQUINA SINCRONA TRIFÁSICA CON ROTOR DE POLOS SALIENTES



ARREGLO DE LOS CONDUCTORES DE FASE

Para los devanados de las armaduras trifásicas se pueden hacer algunas observaciones, por ejemplo, la separación entre los devanados de fase es 120° eléctricos o 60 grados mecánicos, esto se concluye de un razonamiento simple, que un ciclo completo de la FEM se genera cuando los cuatro polos del rotor giran 180° mecánicos. Un ciclo completo de la FEM representa 360° eléctricos, extendiendo esto a un generador de

ρ polos (ρ debe ser siempre un número entero positivo), se tiene la siguiente relación entre el ángulo mecánico del rotor α_{mec} y el ángulo eléctrico X_{elec}.

$$\alpha_{elec} = \frac{\rho}{2}\alpha_{mec}$$

Ejemplo

Un generador síncrono trifásico tiene 12 polos, calcular el ángulo mecánico correspondiente a 180 grados eléctricos.

Solución

El ángulo mecánico entre los polos norte y sur es:

$$\alpha_{mec} = \frac{360\ grados\ mecánicos}{12\ polos} = 30°$$

Esto corresponde a 180° eléctricos, como se puede verificar:

$$\alpha_{elec} = \frac{\rho}{2}\alpha_{mec} = \frac{12}{2}x\ 30° = 180°$$

4.4.1 EL FACTOR DE DISTRIBUCIÓN

Cuando un devanado como el que se ha descrito antes está construido de un cierto número de bobinas colocadas en ranuras separadas, las FEMS generadas en las distintas bobinas por fase no están en fase, en consecuencia, la FEM en terminales es menor que aquella que se ha concentrado en los devanados, el factor por el cual la FEM de un devanado distribuido se debe multiplicar para obtener la FEM_{total} generada se conoce como *"Factor de distribución"* (kd) para el devanado, este factor es siempre menor que la unidad.

Si se supone que hay η ranuras por fase y por polo, la separación entre ranuras en grados eléctricos es entonces:

$$\psi = \frac{180\ grados\ eléctricos}{\eta\ x\ m}$$

Donde:

m= Número de fases

Con relación a la siguiente figura, aparentemente la $FEM_{inducida}$ en la ranura 2 se atrasa detrás de la FEM en la ranura 1 por un ángulo ϕ=15 grados eléctricos, la $FEM_{inducida}$ en la ranura 3 será 2 ϕ grados detrás y en fase, etc. Si se representan estas FEM por fasores E_1, E_2, E_3 y E_4 respectivamente, se obtiene el diagrama fasorial mostrado en la siguiente figura, la FEM_{total} del estator por fase E, es la suma vectorial de todos los fasores, es decir:

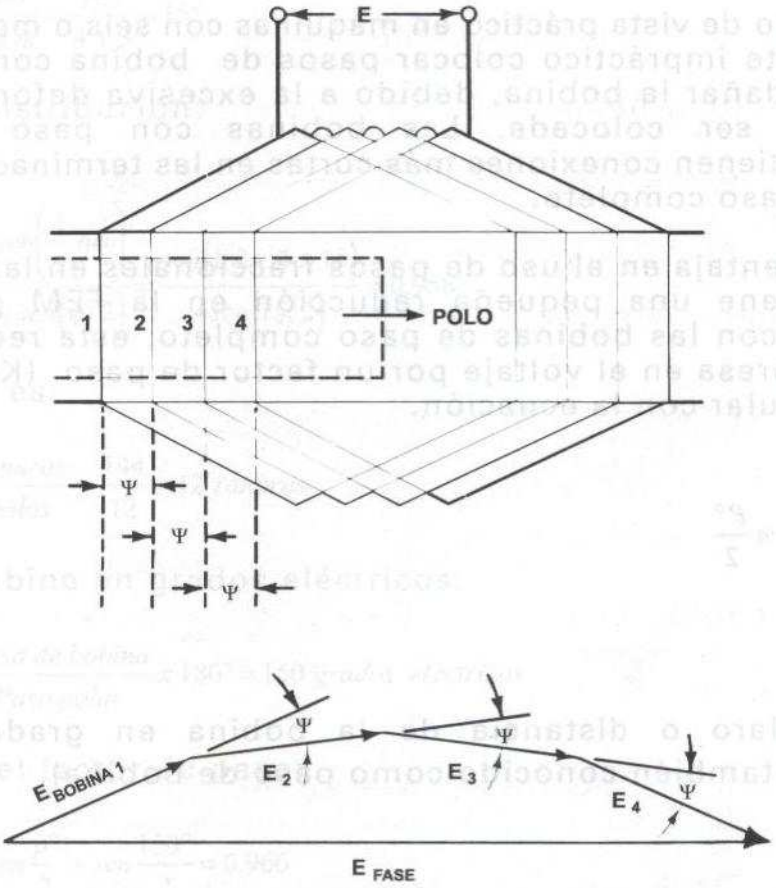
$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

Es claro que debido al desplazamiento del ángulo ϕ la FEM_{total} del estator E es menor que la suma aritmética de la suma de las FEMS de las bobinas por el factor:

$$Kd = \frac{suma\ \ vectorial}{suma\ \ aritmética} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{4\ x\ 1\ E_{bobina}\ \ 1}$$

Kd se conoce como el factor de distribución y se puede demostrar que:

$$Kd = \frac{sen\left(\frac{1}{2}\eta m\right)}{\eta\, sen\ (\psi/2)}$$



La ventaja real de los devanados distribuidos es la mejoría en la forma de onda del voltaje generado.

4.4.2 Bobinas de paso fraccionario

En una bobina de paso completo, el voltaje generado en ambos lados de bobina está en fase, en la práctica, la distancia entre dos lados de bobina está hecha usualmente menor del paso completo. La idea completa es asegurar que la FEM generada sea senoidal, esto se puede lograr usando devanados de paso fraccional, en estas bobinas los lados

de bobina están defasados, el número de FEMS que se deben sumar se duplican y la forma de onda se mejora.

Desde un punto de vista práctico en máquinas con seis o menos polos, es frecuentemente impráctico colocar pasos de bobina completos en la máquina sin dañar la bobina, debido a la excesiva deformación de la bobina para ser colocada. Las bobinas con paso fraccionario normalmente tienen conexiones más cortas en las terminaciones que las bobinas de paso completo.

Hay una desventaja en el uso de pasos fraccionales en las bobinas, en el cual se tiene una pequeña reducción en la FEM generada, en comparación con las bobinas de paso completo, esta reducción en el voltaje se expresa en el voltaje por un factor de paso (Kp), este valor se puede calcular con la ecuación.

$$Kp = sen\frac{P^{\circ}}{2}$$

Donde:

P°=Claro o distancia de la bobina en grados eléctricos (también conocido como paso de bobina).

Ejemplo

Un generador síncrono de 12 polos, tres fases, tiene 144 ranuras en el estator, el claro de bobina o paso es de 10 ranuras. Calcular el factor de distribución (Kd), el factor de paso (Kp) y el factor devanado (Kw = Kd.Kp).

Solución

El número de ranuras por polo y por fase:

$$\eta = \frac{Ranuras}{No.\,fases\,x\,No.\,polos} = \frac{144}{3\,x\,12} = 4$$

El ángulo eléctrico entre ranuras:

$$\psi = \frac{180}{\eta x\, m} = \frac{180}{4\, x\, 3} = 15°$$

El factor de distribución:

$$Kd = \frac{sen\left(\frac{1}{2}\eta\psi\right)}{\eta\, sen\left(\psi/2\right)} = \frac{sen\left(1/2\, x\, 4\, x\, 15\right)}{4 sen\left(15/2\right)} = 0.958$$

El paso polar es:

$$\frac{No.\ ranuras}{No.\ polos} = \frac{144}{12} = 12\ ranuras$$

El paso de bobina en grados eléctricos:

$$\rho = \frac{Paso\ de\ bobina}{Paso\ polar}\, x\, 180° = 150\ grados\ \ eléctricos$$

Por lo tanto, el factor de paso:

$$Kp = sen\frac{\rho°}{2} = sen\frac{150°}{2} = 0.966$$

El factor de devanado:

$$K\omega = Kd\ x\ Kp = 0.958\ x\, 0.966 = 0.925$$

Que representa el factor por el cual el voltaje generado se reduce.

4.5 LA MAGNITUD DEL VOLTAJE GENERADO

La ecuación para determinar el voltaje generado $E_{máx} = Bm\ell\omega r$, no se usa en la práctica porque el valor de r no se conoce realmente, por lo tanto, se requiere una expresión alternativa. El valor promedio del voltaje inducido se puede determinar a partir de la expresión para la Ley de Faraday:

$$E_{prom} = N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} volts$$

Donde:

E_{prom}= Voltaje promedio generado en el devanado, (volts).

$\Delta\phi$= Cambio del flujo en un tiempo dado (ωb).

Δt= El tiempo en el cual este cambio en el flujo tiene lugar (seg).

N= Número de espiras en la fase del devanado.

En la siguiente figura, se muestra la bobina de un devanado de armadura que se mueve a través del campo de un polo, que representa un movimiento relativo entre el campo y el devanado.

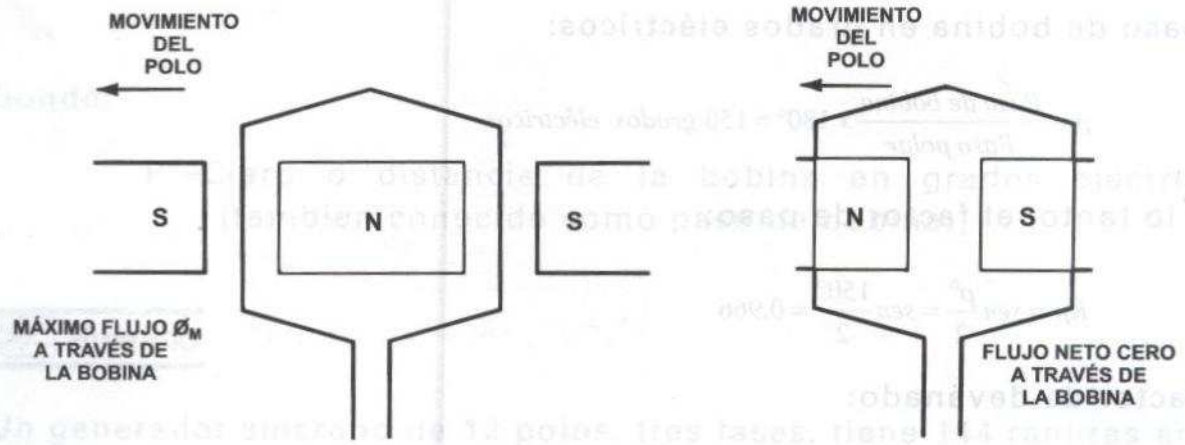


ILUSTRACIÓN DE LOS CAMBIOS DE FLUJO A TRAVÉS DE LA BOBINA, DE ACUERDO AL MOVIMIENTO DE LOS POLOS AL PASAR POR LA BOBINA DE DERECHA A IZQUIERDA

En la figura anterior, el flujo que cambia entre las dos posiciones mostradas es ϕ_m, en webers, esto implica que un movimiento de un polo es igual a la mitad de un paso polar en el cual un cuarto de un ciclo del voltaje es generado, debido a que un ciclo ocurre en Y_f segundos, el tiempo considerado para esta parte de la forma de onda es: 1/4 f segundos, por lo tanto, sustituyendo este valor en la ecuación para E_{prom}:

$$E_{prom} = N\,\frac{\phi_m}{1/(4f)} = 4 f_N \phi_m (volts)$$

La ecuación anterior es la expresión aplicable a todos los generadores en forma independiente de la distribución del flujo en el polo, si la distribución del flujo es senoidal el voltaje generado será senoidal también y se sabe de los circuitos eléctricos que el valor eficaz o rms del voltaje es 1.11 veces el valor promedio, es decir:

$$E = 4.44\, f_N \phi_m\ (volts)$$

Donde:

E = Voltaje generado (valor rms) por fase, en volts.

F = Frecuencia del voltaje generado en Hz.

ϕ_m= Flujo máximo por polo (ωb).

Ejemplo

Calcular el voltaje efectivo generado en una de las fases de un generador síncrono que tiene los datos siguientes:

F=60 Hz, N = 200 espiras/Fase, el flujo máximo por polo es:

$$\phi_m = 0.045\,\omega b$$

Solución

El voltaje se calcula con la expresión:

$$E = 4.44\,\phi_m f_N \quad = 4{,}44 \cdot 0{,}045\ \frac{wb}{polo} \cdot 60\ Hz \cdot 200\ \frac{espiras}{fase} =$$

$$= 4.44\, x\, 0.045\, x\, 60\, x\, 200$$

$$= 2397.6\ volts$$

Si el generador está conectado en estrella, el voltaje entre terminales es:

$$V_L = \sqrt{3}\,E = 1.732\ x\ 2397.6 = 4152.76\ volts$$

Ejemplo

En un generador de polos salientes de 4 polos, 60 Hz, tiene una distribución de flujo senoidal en el entrehierro con una amplitud de 0.5 Tesla, si la bobina de armadura tiene 200 espiras y la longitud axial de la armadura y su diámetro interior, son ambos de 100 mm. Calcular el valor del voltaje instantáneo y el valor rms del voltaje inducido.

Solución

El valor instantáneo del voltaje inducido se determina con la ecuación.

$$E_m = \frac{4}{\rho} Bm\omega\ell r_N \text{ sen } \omega t\ (volts)$$

Sustituyendo valores:

$$E_m = \frac{4}{4}(200)(0.5)(0.100)(0.50)(2\pi\ x\ 60)\text{sen}(2\pi\ x\ 60)t$$

$$E_m = 1885\ sen\ 377t\ volts$$

También:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{1885}{\sqrt{2}} = 1332.89$$

Ejemplo

Un generador síncrono trifásico de 4 polos, tiene 60 ranuras, calcular el factor de distribución.

Solución

El factor de distribución Kd es:

$$Kd = \frac{sen\left(\frac{1}{2}\eta\psi\right)}{\eta\, sen\left(\psi/2\right)}$$

$$\eta = \frac{No.\ Ranuras}{No.\ Fase\ x\ No.\ polos} = \frac{60}{3\ x\ 4} = 5$$

El ángulo eléctrico entre ranuras.

$$\psi = \frac{180}{\eta\ x\ m} = \frac{180}{5\ x\ 3} = 12°$$

$$Kd = \frac{sen\left(\frac{1}{2}x\ 5\ x\ 12°\right)}{5\ sen\left(\frac{12}{2}\right)} = 0.9566$$

Ejemplo

Se tiene un generador trifásico de 8 polos, 60 Hz conectado en estrella, de polos salientes que tiene 96 ranuras con 4 conductores por ranura conectados en serie en cada fase. El paso de bobina es 10 ranuras, si el valor del flujo máximo en el entrehierro es ϕ_m= 60 mWb y la distribución de este flujo es senoidal, calcular:

a) El valor rms del voltaje por fase.

b) El voltaje rms de fase a fase (voltaje de línea).

c) Si la corriente por fase es de 500A, calcular la potencia de la máquina.

Solución

a) El valor eficaz del voltaje por fase está dado como:

$$E_{rms} = E = K\omega(4.44\, f_N \phi m)\ volts$$

Donde:

$$K\omega = Kd.Kp$$

$$Kd = \frac{sen\left(\frac{1}{2}\eta\psi\right)}{\eta\, sen\left(\psi/2\right)}$$

$$\eta = \frac{No.\ ranuras}{No.\ Fases\ x\ No.\ polos} = \frac{96}{3\ x\ 8} = 4$$

$$\psi = \frac{180}{\eta\ x\ m} = \frac{180}{4\ x\ 3} = 15°$$

$$Kd = \frac{sen\left(\frac{1}{2}\ x\ 4\ x\ 15\right)}{4sen\left(15/2\right)} = 0.9576$$

El factor de paso Kp se calcula como:

$$Kp = sen\frac{\rho°}{2}$$

$$\rho = \frac{Paso\ de\ bobina}{Paso\ polar}\ x\ 180°$$

$$Paso\ polar = \frac{No.\ ranuras}{No.\ polos} = \frac{96}{8} = 12$$

$$\rho = \frac{10}{12}\ x\ 180° = 150°$$

$$Kp = sen\frac{150°}{2} = 0.9659$$

$$K\omega = Kd.Kp = 0.9576\ x\ 0.9659 = 0.9249$$

El número de espiras por fase $_N$ es la mitad del número de conductores por fase:

$$N = \frac{1}{2}\left(\frac{96}{3}\right)(4) = 64$$

Por lo tanto:

$$E = \frac{2}{8}\ x\ 0.9249\ x\ (4.44\ x\ 60)\ x\ (64)\ x\ \left(60\ x\ 10^{-3}\right)$$

$$E = 236.537\ volts$$

b) El voltaje de línea.

$$V_L = \sqrt{3}\,E = \sqrt{3}\ x\ 236.537 = 409.68\ \ volts$$

c) La potencia de la máquina.

$$\rho = 3\,E\,I = 3\ x\ 236.537\ x\ 500 = 354.805\ KW$$

4.5.1 CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL GENERADOR

Cuando se conecta una carga en las terminales de un generador, por ejemplo, si se conecta en motor trifásico a estas, circula una corriente en el devanado de armadura del generador, este devanado tiene una resistencia de armadura (R_A) en ohms/fase, esto da como resultado una caída de voltaje en la armadura.

$$V_A = I_A R_A\ Volts / Fase$$

Donde:

I_A = Corriente de fase en amperes

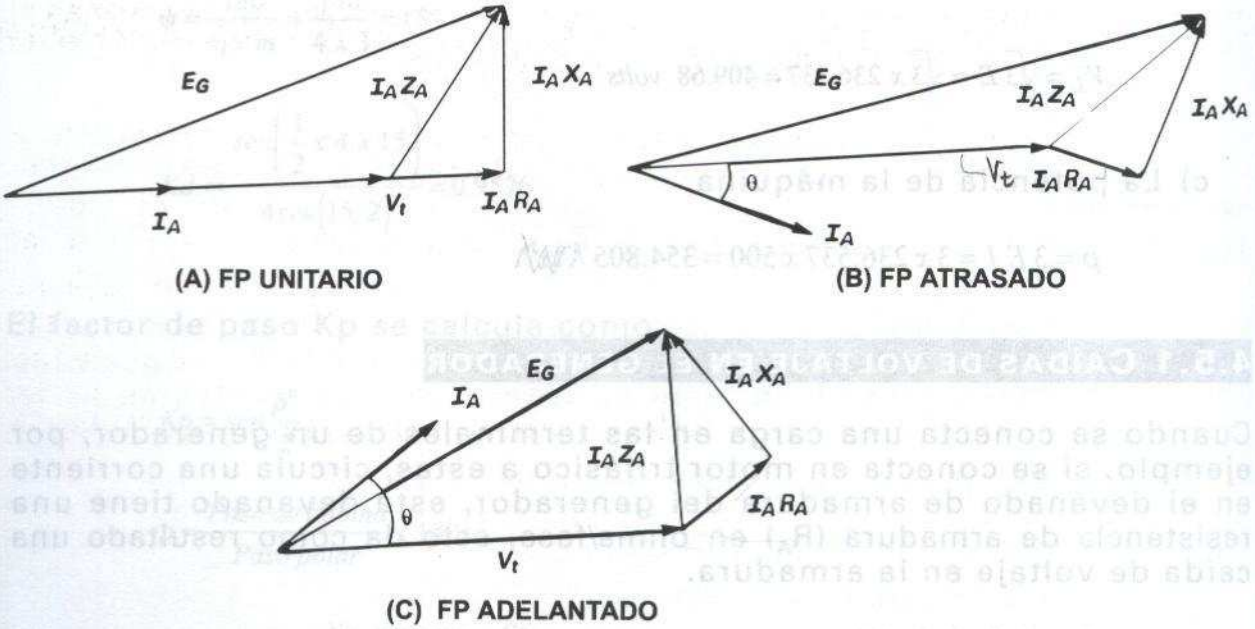
R_A= Resistencia de armadura Ω/fase

Como las tres fases son completamente simétricas, las caídas de voltaje son las mismas en las tres fases, **por lo que los cálculos se pueden hacer por fase.**

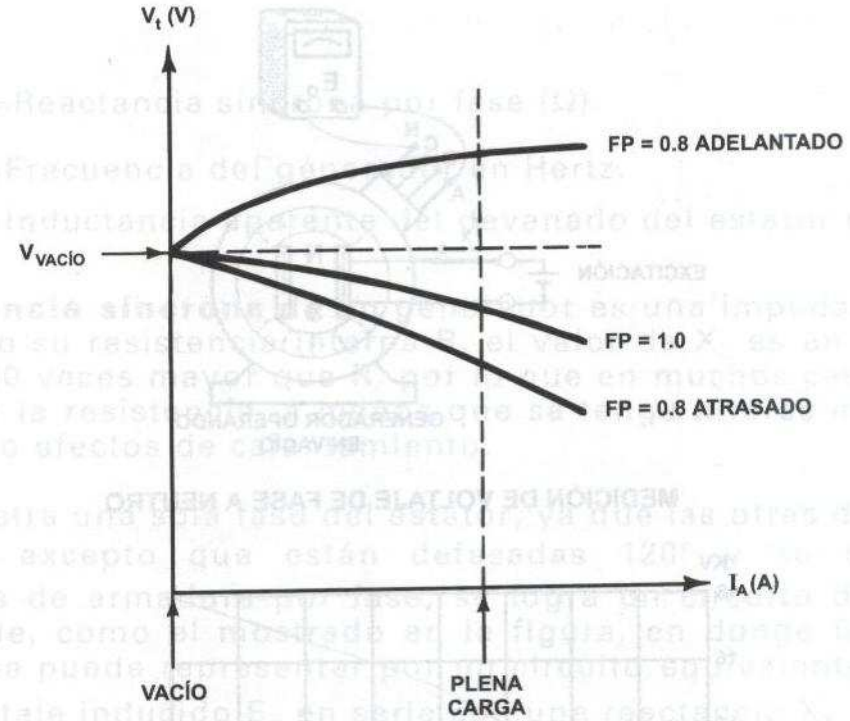
Adicionalmente a la caída de voltaje resistiva hay una **caída de voltaje reactiva** debida a la inductancia del devanado de armadura, este valor es:

$$V_X = I_A X_A \ V / Fase$$

Conociendo el valor de estas caídas de voltaje, no se puede considerar como suficiente para calcular el voltaje generado, los voltajes se deben sumar vectorialmente al voltaje terminal, por lo tanto es esencial que para una corriente de carga dada, se deba conocer también el factor de potencia. En la siguiente figura se muestra la dependencia que hay del valor de E_G con el valor del factor de potencia.

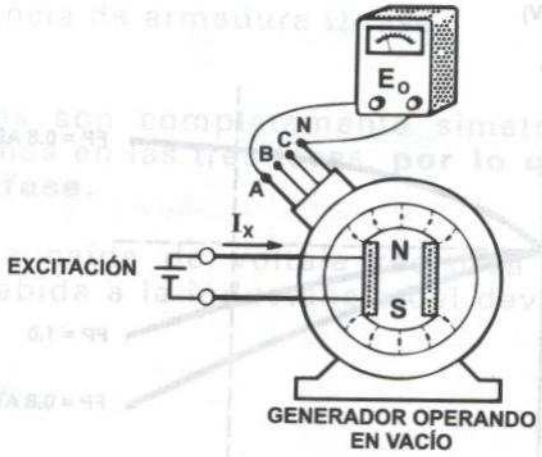


EFECTO DEL FACTOR DE POTENCIA SOBRE EL VOLTAJE GENERADO CONSIDERANDO LA RESISTENCIA DE ARMADURA Y LA REACTANCIA

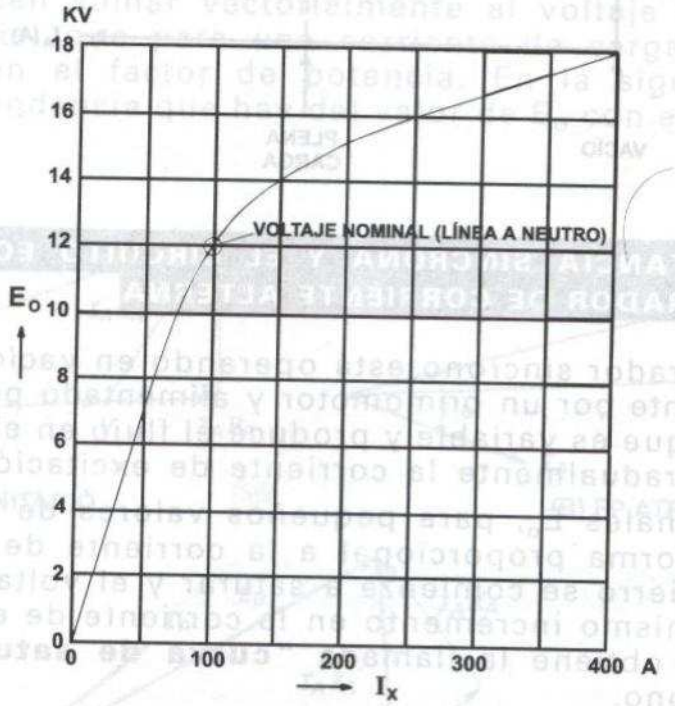


4.5.2 LA REACTANCIA SÍNCRONA Y EL CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

Cuando un generador síncrono está operando en vacío y accionado a velocidad constante por un primomotor y alimentado por una corriente de excitación I_X que es variable y produce el flujo en el entrehierro. Si se incrementa gradualmente la corriente de excitación y se mide el voltaje en terminales E_o, para pequeños valores de I_X el voltaje se incrementa en forma proporcional a la corriente de excitación, sin embargo, si el fierro se comienza a saturar y el voltaje crece mucho menos para el mismo incremento en la corriente de excitación I_X, de esta manera se obtiene la llamada **"curva de saturación"** de un generador síncrono.



MEDICIÓN DE VOLTAJE DE FASE A NEUTRO



CURVA DE SATURACIÓN EN VACÍO

Si se conecta una carga trifásica al generador trifásico y debido a que el devanado del estator tiene una resistencia R y una cierta inductancia L y también porque es una máquina de corriente alterna, la inductancia se manifiesta como una reactancia X_S dada por la expresión:

$$X_S = 2\pi f L$$

Donde:

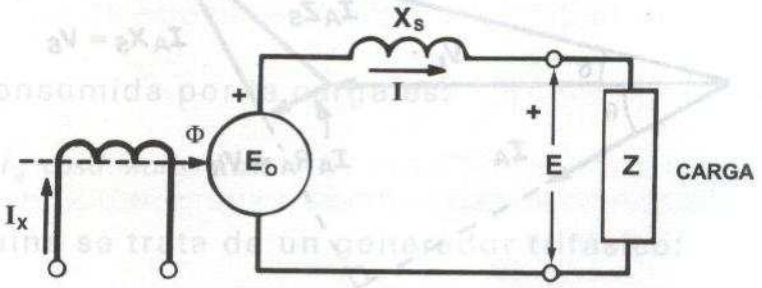
X_S=Reactancia síncrona por fase (Ω).

F=Frecuencia del generador en Hertz.

L=Inductancia aparente del devanado del estator por fase (H).

La reactancia síncrona de un generador es una impedancia interna, justo como su resistencia interna R, el valor de X_S es en forma típica de 10 a 100 veces mayor que R, por lo que en muchos casos se puede despreciar la resistencia, a menos que se tenga interés en pérdidas y eficiencia o efectos de calentamiento.

Si se muestra una sola fase del estator, ya que las otras dos fases son idénticas, excepto que están defasadas 120° y se desprecia la resistencia de armadura por fase, se logra un circuito del devanado muy simple, como el mostrado en la figura, en donde un generador síncrono se puede representar por un circuito equivalente compuesto por un voltaje inducido E_o en serie con una reactancia X_S.



CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR TRIFÁSICO MOSTRANDO UNA FASE

4.5.3 LA REGULACIÓN DE VOLTAJE

Es claro que cuando se hace referencia a la reactancia síncrona (X_S) que se puede expresar como la suma de la reactancia de la armadura (X_A) y la reactancia debida a la reacción de armadura (X_{AR})

$$X_S = X_A + X_{AR}$$

Si se designa como V_t el voltaje de referencia entonces se puede determinar el voltaje de armadura E_G, también denominado como de vacío E_o, en forma fasorial.

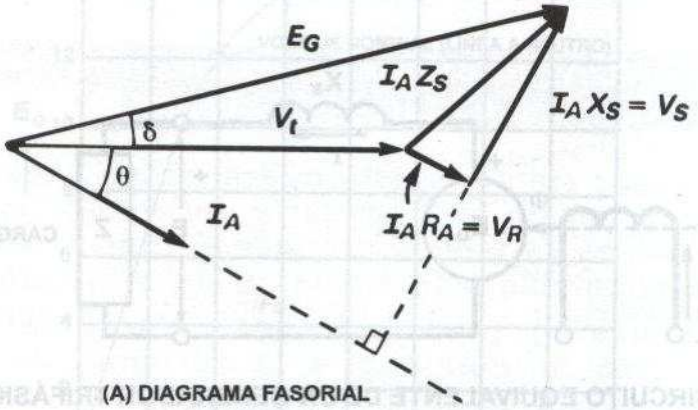
$$E_G = V_t + I_A Z_S$$

Donde:

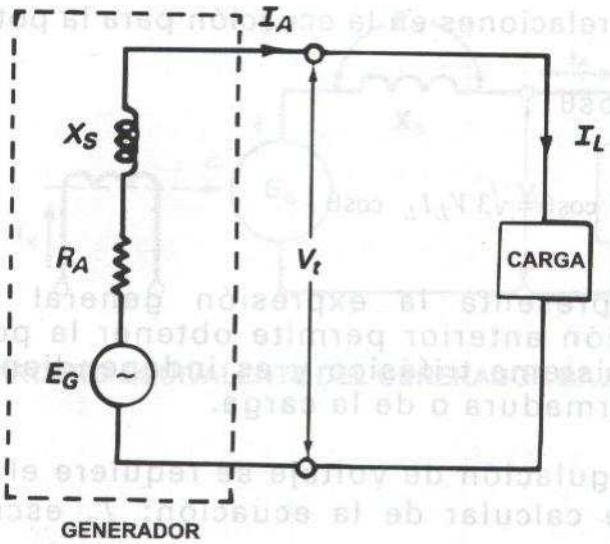
Z_S= Impedancia de armadura.

$$Z_S = R_A + jX_S$$

En la siguiente figura, se muestra el circuito y diagrama fasorial, donde se muestra que la representación más elemental de un generador síncrono es por medio de un circuito R-L, la resistencia representa la resistencia del devanado de armadura (R_A) y la reactância representa la reactancia síncrona (X_S), ambas cantidades son por fase. El ángulo del factor de potencia (θ) en el circuito está determinado por la carga conectada a las terminales del generador.



(A) DIAGRAMA FASORIAL



(B) MODELO ELÉCTRICO

CIRCUITO EQUIVALENTE DE C.A. SIMPLIFICADO (MONOFÁSICO) PARA UN GENERADOR SINCRONO

La potencia consumida por la carga es:

$$P_L = V_t I_A \cos\theta \ watts / Fase$$

Como la máquina se trata de un generador trifásico:

$$P_L = 3\ V_t I_A \cos\theta \ watts$$

En general se especifica la potencia en términos de las cantidades de línea, que son la corriente de línea I_L y el voltaje de línea V_L (entre terminales), para convertir la ecuación anterior a estos valores, es necesario conocer la forma en cómo se encuentran conectados los devanados del generador.

Cuando los devanados de armadura están conectados en estrella (Y), que representa la conexión más común para los generadores, se tiene que:

$$I_A = I_L,\ V_t = V_L / \sqrt{3}$$

Sustituyendo estas relaciones en la ecuación para la potencia trifásica:

$$P=3\ V_t I_A \cos\theta$$

$$P_L = \frac{3\ V_L}{\sqrt{3}} J_L\ \cos\theta = \sqrt{3}\ V_L I_L\ \cos\theta$$

Esta ecuación representa la expresión general para la potencia trifásica, la ecuación anterior permite obtener la potencia recibida o entregada en un sistema trifásico y es independiente de la conexión del devanado de armadura o de la carga.

Para calcular la regulación de voltaje se requiere el voltaje generador E_G, esto se puede calcular de la ecuación: I_A escribiendo Z_S en la forma fasorial.

$$I_A = I_A\angle -\theta \quad \text{y} \quad Z_S = R_A + jX_S = Z_S\angle B$$

V_t se toma como fasor de referencia, lo cual significa $V_t = V_t\angle 0°$ y $\beta = \tan^{-1}(X_S / R_A)$, por lo tanto, para cargas inductivas que están caracterizadas por un factor de potencia atrasado se tiene:

$$E_G = V_t\angle 0° + I_A\angle -0° \ x\ Z_S\angle\beta$$

Cuando la carga es capacitiva, entonces la corriente de armadura se adelanta al voltaje terminal, si se toma nuevamente el voltaje terminal como referencia se tiene:

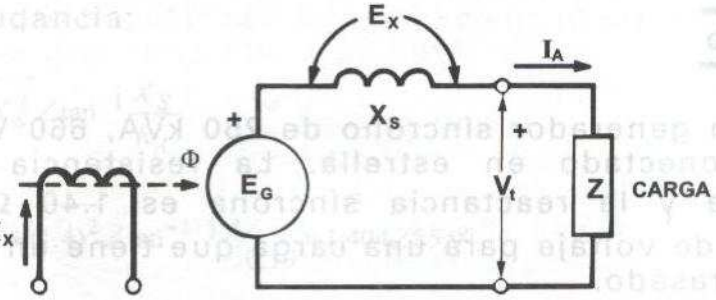
$$E_G = V_t\angle 0° + I_A\angle\theta\ x\ Z_S\angle\beta$$

Cuando la carga es puramente resistiva, el factor de potencia es unitario y $\theta=0°$ con lo cual la expresión de E_G se simplifica.

$$E_G = V_t + I_A Z_S\angle\beta$$

La regulación de voltaje se calcula entonces como:

$$Regulación\ de\ voltaje = \frac{E_G - V_t}{V_t}\ x\ 100$$



CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR BAJO CARGA

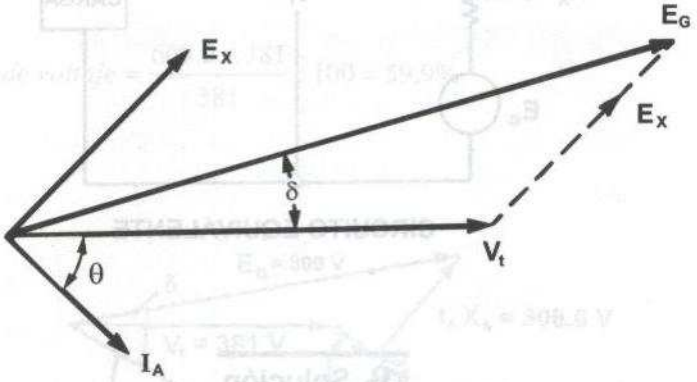


DIAGRAMA FASORIAL PARA UNA CARGA CON FACTOR DE POTENCIA ATRASADO

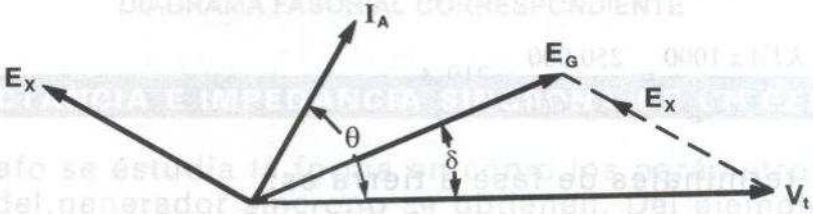
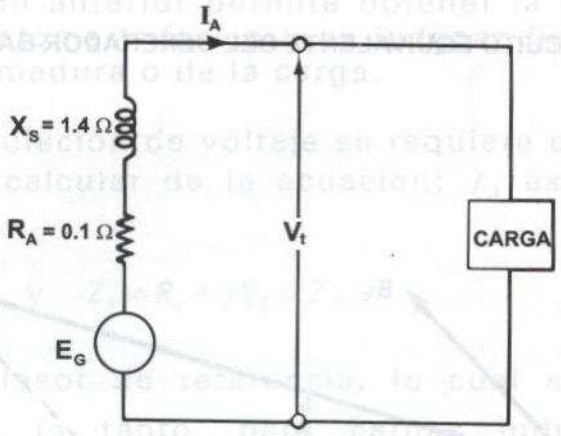


DIAGRAMA FASORIAL PARA UNA CARGA CON FACTOR DE POTENCIA ADELANTADO

Ejemplo

Se tiene un generador síncrono de 250 kVA, 660 V entre terminales, trifásico conectado en estrella. La resistencia de armadura es 0.10 Ω/fase y la reactancia síncrona es 1.40 Ω/fase, calcular la regulación de voltaje para una carga que tiene un factor de potencia de 0.866 atrasado.



CIRCUITO EQUIVALENTE

Solución

Como se ha indicado antes, todos los cálculos se hacen sobre la base de referencia por fase, debido a que el cambio de voltaje es el mismo que aquel obtenido entre las terminales de línea, la corriente de armadura a plena carga es:

$$I_A = \frac{KVA\ x\ 1000}{\sqrt{3}\ x\ V_L} = \frac{250{,}000}{\sqrt{3}\ x\ 660} = 219\ A$$

El voltaje en terminales de fase a tierra es:

$$V_t = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} = 381\ \ V\ /\ Fase$$

A factor de potencia 0.866 atrasado: $\theta = \cos^{-1} 0.866 = 30°$

El valor de la impedancia:

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_S}{R_A}$$

$$Z_S = \sqrt{(0.01)^2 + (1.4)^2} \angle \tan^{-1} 1.4/0.10 = 1.404 \angle 85.9°$$

Por lo tanto:

$$E_G = 381\angle 0 + 219\angle -30° \, x 1.404\angle 85.9°$$

$$= 381 + 307.5 \angle 55.9° = 609.2\angle 24.70$$

La regulación de voltaje:

$$Regulación \ de \ voltaje = \frac{609.2 - 381}{381} x \, 100 = 59.9\%$$

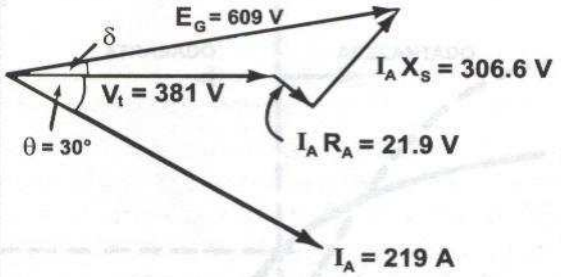


DIAGRAMA FASORIAL CORRESPONDIENTE

4.6 LA REACTANCIA E IMPEDANCIA SÍNCRONA DE UN GENERADOR

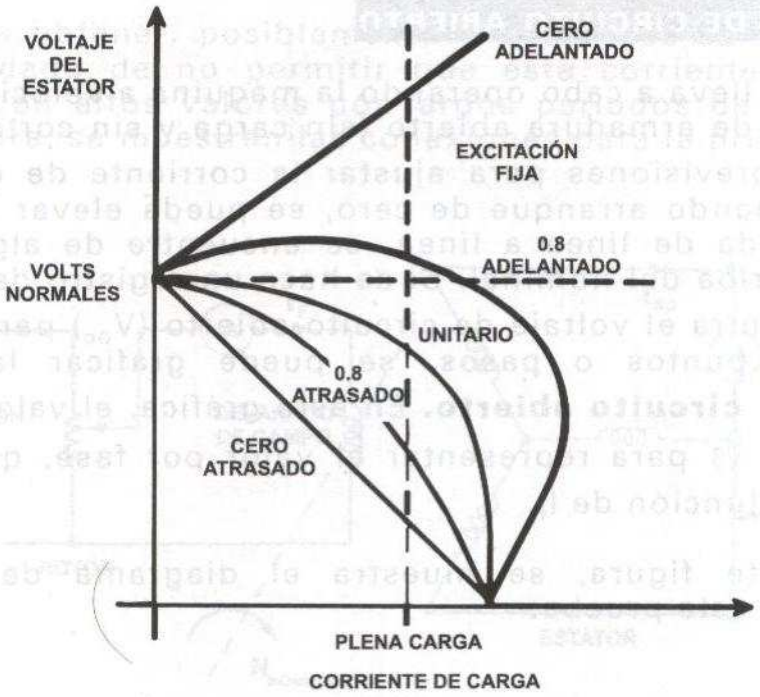
En este párrafo se estudia la forma en cómo los parámetros del circuito equivalente del generador síncrono se obtienen. Del ejemplo anterior, se puede observar que prácticamente para cualquier carga dada la regulación de voltaje se puede determinar, siempre que se disponga del modelo o circuito eléctrico de la máquina. Para determinar la regulación de voltaje en las grandes máquinas, en forma experimental es prácticamente imposible de llevar a cabo, ya que se requerirían las

condiciones de plena carga, mientras se mantienen el voltaje terminal, frecuencia y el factor de potencia predeterminado en la carga.

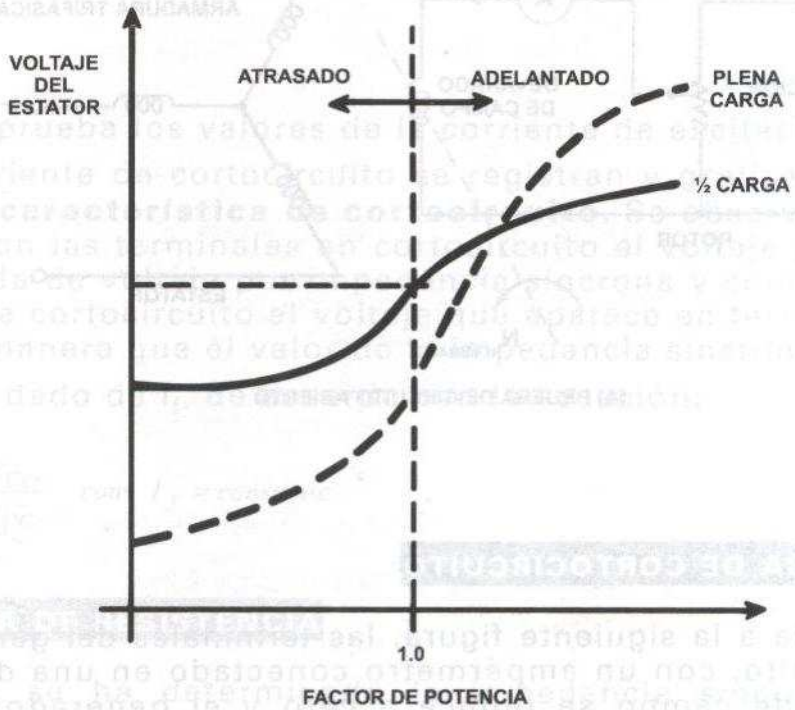
En la práctica real, la regulación se calcula de los datos obtenidos de una serie de pruebas relativamente simples para obtener los parámetros del circuito equivalente. Las cantidades que se deben determinar son: (1) la reactancia síncrona, X_S y (2) la resistencia de armadura R_A, ambas cantidades por fase.

Existen distintos métodos para determinar la reactancia síncrona, pero sólo se discutirá uno, conocido como "el método de la impedancia síncrona". Para obtener los datos necesarios se requieren tres pruebas simples:

1. La prueba de circuito abierto.
2. La prueba de cortocircuito.
3. La prueba de resistencia de armadura.



A) CAMBIO DE VOLTAJE



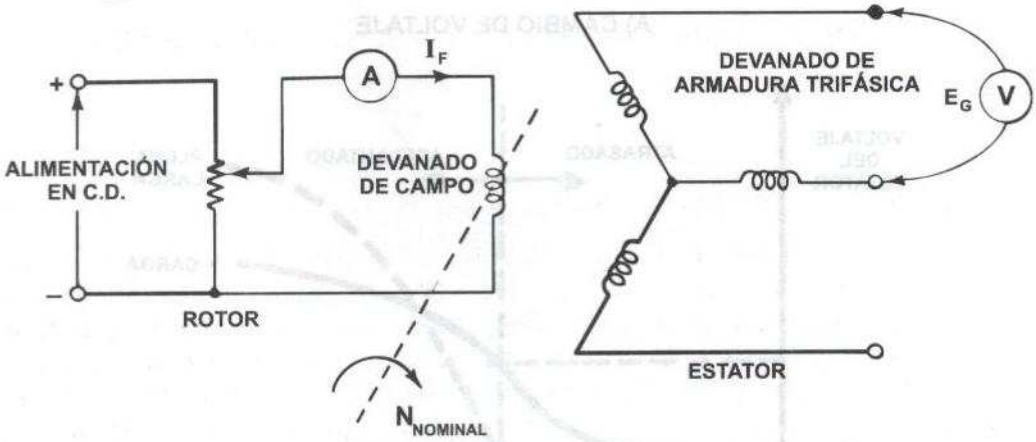
B) CAMBIO DE VOLTAJE

EL EFECTO DEL FACTOR DE POTENCIA DE LA CARGA

4.6.1 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

Esta prueba se lleva a cabo operando la máquina a velocidad síncrona con el circuito de armadura abierto (sin carga y sin cortocircuito), se deben tomar previsiones para ajustar la corriente de campo I_f, de manera que cuando arranque de cero, se pueda elevar hasta que el voltaje de salida de línea a línea, se encuentre de alguna manera ligeramente arriba del nominal. Si se hace un registro de la corriente de campo I_f contra el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) para un número suficiente de puntos o pasos, se puede graficar la **curva de saturación de circuito abierto.** En esta gráfica, el valor de V_{oc} está *dividido entre* $\sqrt{3}$ *para representar el valor por fase, que se dibuja después como función de* I_f.

En la siguiente figura, se muestra el diagrama de conexiones elemental para esta prueba.

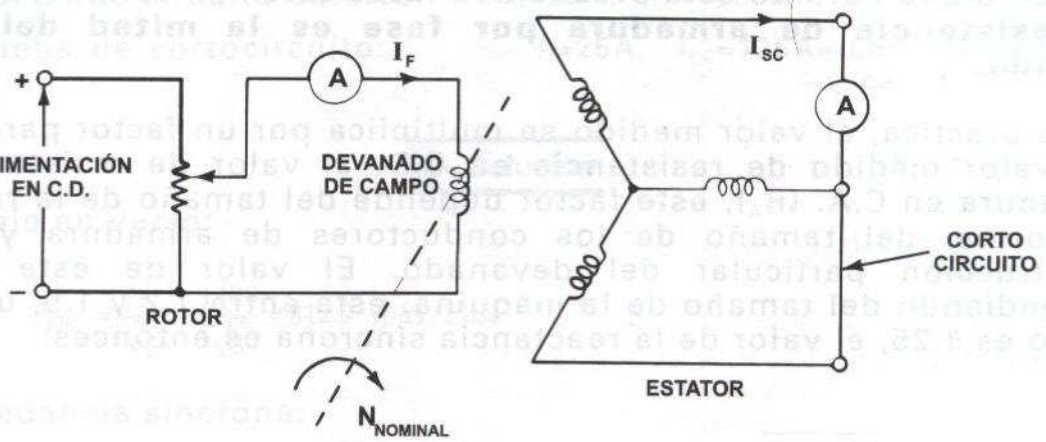


(A) PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

4.6.2 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

Con referencia a la siguiente figura, las terminales del generador están en cortocircuito, con un ampérmetro conectado en una de sus líneas, la corriente de campo se reduce a cero y el generador opera a su velocidad nominal, entonces la corriente de campo se incrementa gradualmente hasta un valor máximo de corriente de armadura seguro

que se pueda obtener, posiblemente a dos veces su valor nominal, teniendo cuidado de no permitir que esta corriente de armadura permanezca con altos valores por largos periodos de tiempo. En la siguiente figura, se muestran las conexiones para la prueba.



(B) PRUEBA DE CORTO CIRCUITO

CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UN GENERADOR SINCRONO BAJO PRUEBA

Durante esta prueba los valores de la corriente de excitación o campo I_f y de la corriente de cortocircuito se registran y graficando I_f V_S I_{CC} se obtiene la **característica de cortocircuito**. Se observa durante la prueba que con las terminales en cortocircuito el voltaje generado es igual a la caída de voltaje por impedancia síncrona y cuando se retira la conexión de cortocircuito el voltaje que aparece en terminales es el de vacío, de manera que el valor de la impedancia síncrona se obtiene para un valor dado de I_f, de acuerdo con la ecuación:

$$Z_S = \frac{E_{GO}}{I_{CC}} \quad con \quad I_f = constante$$

4.6.3 PRUEBA DE RESISTENCIA

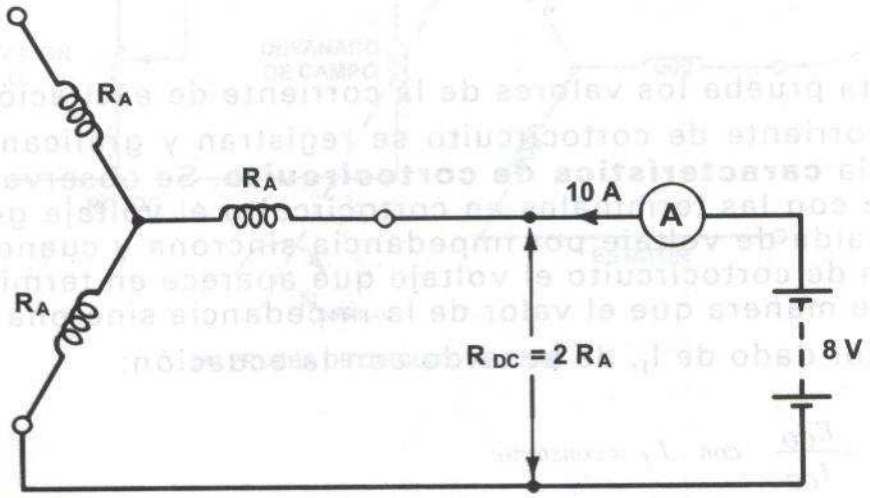
Una vez que se ha determinado la impedancia síncrona (Z_S), la reactancia síncrona (X_S) se puede calcular, si se conoce el valor de la resistencia de armadura (R_A), este valor se puede determinar con una prueba sencilla de medición de resistencia, para esto, supóngase que el

generador está conectado en estrella, esta suposición no afecta de ninguna manera el resultado final, ya que se obtiene una regulación de voltaje idéntica si la conexión es en delta.

Con el devanado de campo abierto se mide el valor de la resistencia en corriente directa, entre cualquiera de las dos terminales de salida, debido a que durante esta prueba dos fases están en serie, el valor de la **resistencia de armadura por fase es la mitad del valor medido.**

En la práctica, el valor medido se multiplica por un factor para pasar del valor medido de resistencia en C.D. al valor de resistencia de armadura en C.A. (R_A), este factor depende del tamaño de la ranura y su forma, del tamaño de los conductores de armadura y de la construcción particular del devanado. El valor de este factor, dependiendo del tamaño de la máquina, está entre 1.2 y 1.5, un valor típico es 1.25, el valor de la reactancia síncrona es entonces:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2}$$



MEDICIÓN DE RESISTENCIA EN C.D.

Ejemplo

Un generador trifásico síncrono de 500 KVA, 2300V, se probó de acuerdo con los procedimientos de prueba descritos antes para calcular

la regulación de voltaje a plena carga y factor de potencia 0.866 atrasado la conexión es estrella. Los datos obtenidos de la prueba son:

Prueba de resistencia en C.D.: V_{LL}=8V, I_L=10A
Prueba de circuito abierto: I_f=25A, V_{LL}=1408V
Prueba de cortocircuito: I_f=25A, I_{CC}=126A= corriente a plena carga.

Solución

El voltaje en vacío:

$$V_{OC} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{1408}{\sqrt{3}} = 812.9 \ volts / Fase$$

La impedancia síncrona:

$$Z_S = \frac{V_{OC}}{J_{CC}} = \frac{812.9}{126} = 6.45\Omega$$

La resistencia de armadura, ya expresada en C.A.:

$$R_A = 1.25 \ x \frac{8V}{2 \ x \ 10A} = 0.50 \ \Omega$$

1.25= Factor de corrección para la resistencia en C.D. a C.A.

y está dividida entre 2 porque se mide entre dos fases la resistencia. El valor de la reactancia síncrona es entonces:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2} = \sqrt{(6.45)^2 - (0.5)^2}$$

$$X_S = 6.43 \Omega$$

El ángulo es entonces:

$$\beta = \tan^{-1}\left(6.43 / 0.50 \right) = 85.6°$$

El voltaje en terminales:

$$V_t = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = 1328 \ \ V \ / \ Fase\ a\ plena\ \ carga$$

El voltaje generador por fase, usando V_t como referencia y $\theta = \cos^{-1} 0.866 = 30°$ es entonces:

$$E_G = 1328\angle 0° + 126\angle -30° \ x\ 6.45\angle 85.6$$

$$= 1787.1 + j670.6 = 1909\angle 20.6° V$$

La regulación de voltaje es entonces:

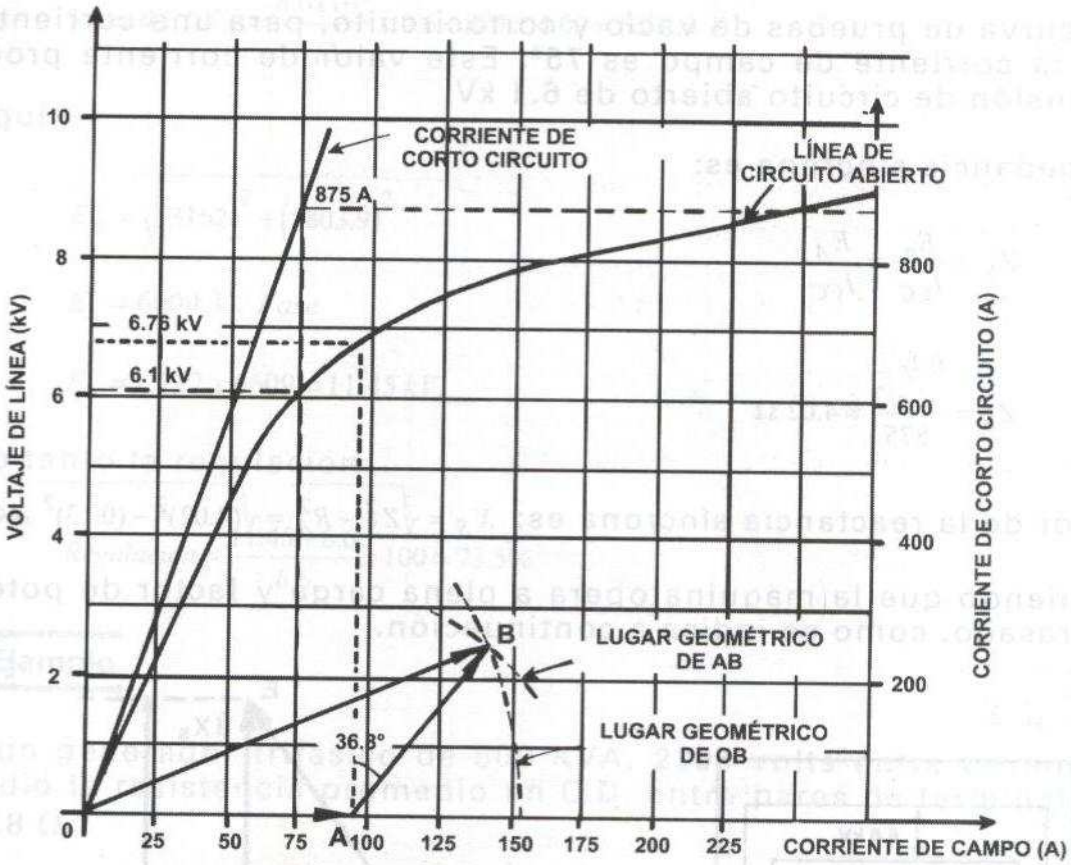
$$Regulación\ \ de\ voltaje = \frac{1909 - 1328}{1328} x\ 100 \ \ = 43.8\%$$

Ejemplo

Considérese un generador síncrono trifásico conectado en estrella, de 10 MVA, 6.6 kV entre fases con una resistencia de armadura R_A=0.13 Ω/Fase que tiene los siguientes datos para las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito:

Corriente de campo (A)	25	50	75	100	125	150	175	200	225
Voltaje de línea (V)	2.4	4.8	6.1	7.1	7.6	7.9	8.3	8.5	8.7
Corriente de cortocircuito CA	288	582	875						

Estos datos se muestran en la siguiente figura:



CÁLCULO DE REFERENCIA

Calcular la regulación de voltaje.

Solución

La corriente a plena carga:

$$I = \frac{10 \, x \, 10^6}{\sqrt{3} \, x \, 6.6 \, x \, 10^3} = 875A$$

El voltaje de fase a neutro:

$$\frac{6.6 \;\; x \;\; 10^3}{\sqrt{3}} = 3.81 \;\; kV \; / \, Fase$$

De la curva de pruebas de vacío y cortocircuito, para una corriente de 875A, la corriente de campo es 75ª. Este valor de corriente produce una tensión de circuito abierto de 6.1 kV.

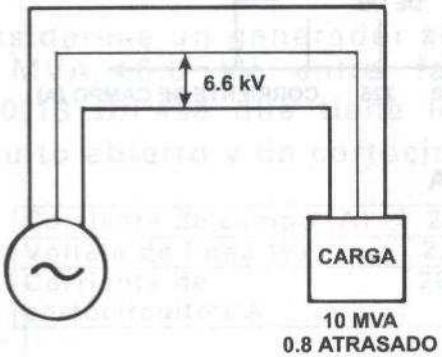
La impedancia síncrona es:

$$Z_S = \frac{E_o}{I_{CC}} = \frac{E_A}{I_{CC}}$$

$$Z_S = \frac{6.1/\sqrt{3}}{875} = 4.02\ \Omega$$

El valor de la reactancia síncrona es: $X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2} = \sqrt{(4.02)^2 - (0.13)^2} \cong 4.02\Omega$

Suponiendo que la máquina opera a plena carga y factor de potencia 0.8 atrasado, como se indica a continuación.



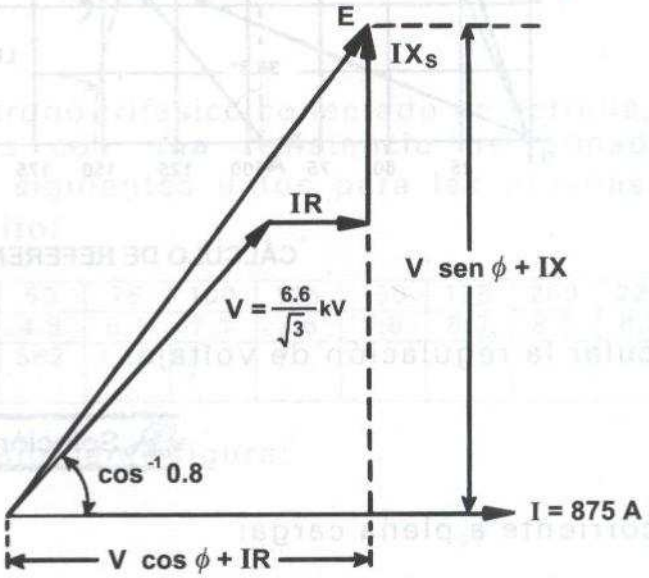


DIAGRAMA FASORIAL

Las componentes del diagrama fasorial:

$$V\cos\theta + I_R = \frac{6.6\ x\ 10^3}{\sqrt{3}}\ x\ 0.8 + 875\ x\ 0.13 = 3162V$$

$$V\ \text{sen}\theta + I X_S = \frac{6.6x10^3}{\sqrt{3}} x\ 0.6 + 875\ x\ 4.02 = 5803.9\ V$$

De aquí:

$$E_A = \sqrt{(3162)^2 + (5803.9)^2}$$

$$E_A = 6609\ V / Fase$$

$$E_A = 1.732\ x\ 6609 = 11.45\ kV_{línea}$$

por lo tanto la regulación:

$$Regulación = \frac{11.45 - 6.6}{6.6} x\ 100 = 73.5\%$$

Ejemplo

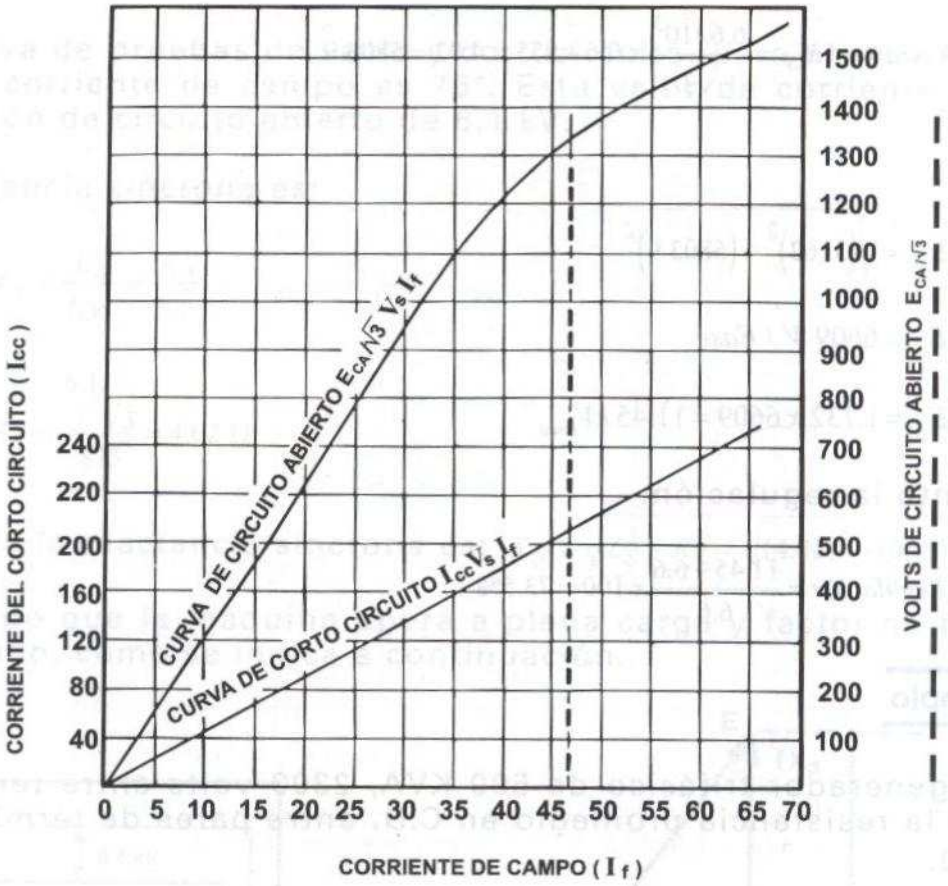
Para un generador trifásico de 500 KVA, 2300 volts entre terminales, se midió la resistencia promedio en C.D. entre pares de terminales es R_A= 0.8 Ω.

a) Calcular los valores de Z_S y X_S (suponiendo que la resistencia de armadura en C.A. es 1.5 veces el valor de resistencia en C.D.

b) Si el generador está conectado en estrella y tiene una caída de voltaje a corriente de plena carga de 50 volts en la resistencia de armadura (por fase) y una caída de voltaje combinada resistencia-reactancia (E_X) más la reacción de armadura (E_{AR}) de 500 volts.

Para los datos anteriores, usando los valores de R_A y X_S calculados en (a), calcular el porcentaje de regulación a plena carga y un factor de potencia de 0.8 atrasado.

La característica de cortocircuito y de vacío se dan a continuación:



CURVA DE CORTO CIRCUITO Y DE CIRCUITO PARA UN ALTERNADOR

Solución

a) De las curvas para la prueba de cortocircuito y de vacío (circuito abierto), para el valor de $V_t/\sqrt{3}$, $2300/\sqrt{3} = 1330\ volts$; $V_t = E_{CA}$

Entrando con 1330V en volts de circuito abierto, se corta la curva de circuito abierto, en el punto de corte se baja y se corta la recta o curva de cortocircuito y de aquí a la escala de la izquierda de corriente de cortocircuito donde se encuentra: I_{CC}=204A.

De estos valores se tiene que la impedancia síncrona es:

$$Z_S = \frac{E_{aC}}{I_{CC}} = \frac{1330}{204} = 6.52\ \Omega$$

La resistencia de armadura en corriente alterna.

$$R_A = 1.5\ x\ \frac{0.8}{2} = 0.6$$

(se divide entre 2 porque R_{CD} se mide entre un par de terminales)

Como: $Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_X^2}$ la reactancia síncrona es:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2} = \sqrt{(6.52)^2 - (0.6)^2} = 6.5\Omega$$

(b) La corriente de línea a plena carga es:

$$I_L = \frac{500{,}000}{\sqrt{3}\ x\ 2300} = 126A$$

La caída de voltaje por resistencia:

$$E_R = 126\ x\ 0.6 = 75\ volts$$

La caída de voltaje por reactancia síncrona:

$$I_L X_S = 126\ x\ 6.5 = 820\ volts$$

El voltaje en la armadura a factor de potencia 0.8 atrasado es:

$$E_A = \sqrt{\left[(1330\ x\ 0.8) + 75\right]^2 + \left[(1330\ x\ 0.6) + 820\right]^2}$$

$$= \sqrt{(1139)^2 + (1618)^2}$$

$$= 1980\ volts$$

La resistencia de armadura en corriente alterna.

$$R_A = 1.5\ x\ \frac{0.8}{2} = 0.6$$

(se divide entre 2 porque R_{CD} se mide entre un par de terminales)

Como: $Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_X^2}$ la reactancia síncrona es:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2} = \sqrt{(6.52)^2 - (0.6)^2} = 6.5\Omega$$

(b) La corriente de línea a plena carga es:

$$I_L = \frac{500{,}000}{\sqrt{3}\ x\ 2300} = 126A$$

La caída de voltaje por resistencia:

$$E_R = 126\ x\ 0.6 = 75\ volts$$

La caída de voltaje por reactancia síncrona:

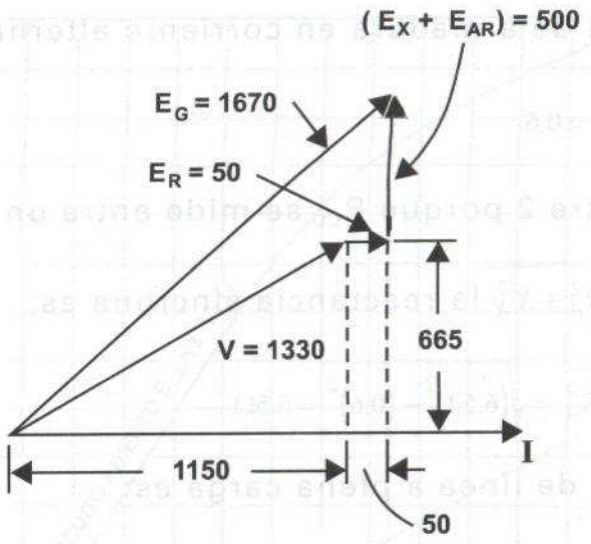
$$I_L X_S = 126\ x\ 6.5 = 820\ volts$$

El voltaje en la armadura a factor de potencia 0.8 atrasado es:

$$E_A = \sqrt{\left[(1330\ x\ 0.8) + 75\right]^2 + \left[(1330\ x\ 0.6) + 820\right]^2}$$

$$= \sqrt{(1139)^2 + (1618)^2}$$

$$= 1980\ volts$$



ÁNGULO DE FACTOR DE POTENCIA = 30°
cos 30° = 0.866
sen 30° = 0.5

DIAGRAMA FASORIAL

La regulación de voltaje se calcula como:

$$Regulación\ de\ voltaje = \frac{1980-1330}{1330} x\ 100$$

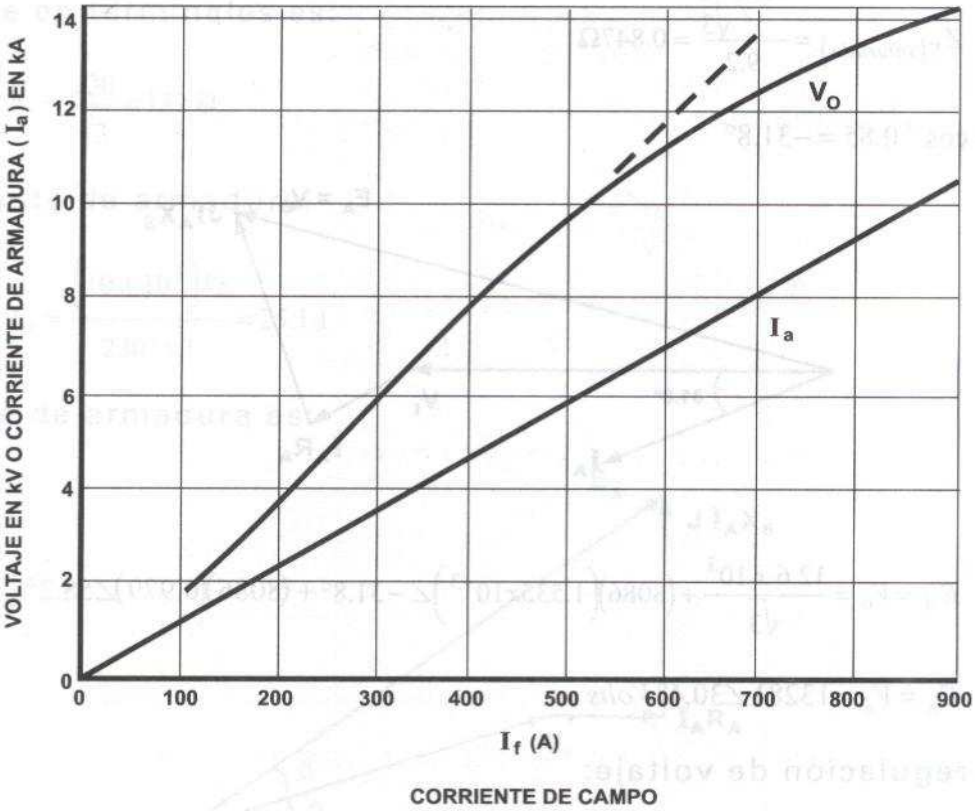
$$= 48.8\%$$

Ejemplo

Se tiene un generador síncrono trifásico con rotor cilíndrico de 150 MW, factor de potencia 0.85 atrasado, 12.6 kV, 60 Hz, 1800 RPM. Cada devanado tiene una resistencia de línea a neutro de R_A=1.535 mΩ, los datos para la curva de magnetización de vacío son los siguientes:

Corriente de campo (A)	200	300	400	500	600	700	800	900
Voltaje de armadura (línea a línea) kV	3.8	5.8	7.8	9.8	11.3	12.6	13.5	14.2

Los datos de la curva de saturación y datos de prueba de cortocircuito se dan en la siguiente figura:



Calcular la regulación de voltaje para carga con cos θ=0.85 atrasado.

Solución

La corriente de armadura por fase:

$$I_a = \frac{\left(150\ x\ 10^6\right)/3}{\left[\left(12.6\ x\ 10^3\right)/\sqrt{3}\right]\ x\ 0.85} = 8086A$$

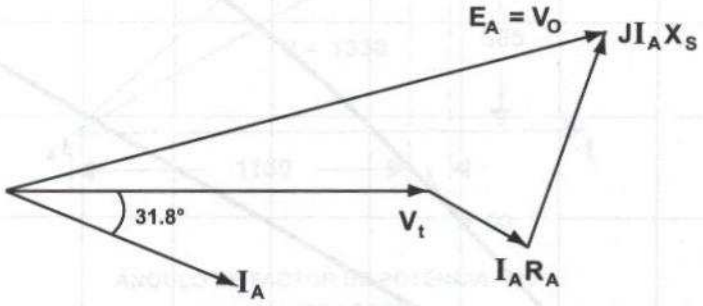
De la curva de vacío y cortocircuito (ver tabla anterior) la impedancia síncrona no saturada.

$$Z_{S\left(no\ saturada\right)} = \frac{7.8/\sqrt{3}}{4.6} = 0.979\ \ \Omega/Fase$$

b) La impedancia síncrona saturada:

$$Z_{S(saturada)} = \frac{13.5/\sqrt{3}}{9.2} = 0.847\Omega$$

c) $\theta = \cos^{-1} 0.85 = -31.8°$



$$E_A = V_o = \frac{12.6\ x\ 10^3}{\sqrt{3}} + (8086)(1.535x10^{-3})\angle -31.8° + (8086)(0.979)\angle 58.2°$$

$$E_A = V_o = 13281\angle 30.4°\ Volts$$

La regulación de voltaje:

$$Regulación\ de\ voltaje = \frac{13281 - 7275}{7275} x\ 100 = 82.6\%$$

Ejemplo

Un pequeño generador síncrono de rotor cilíndrico está conectado en estrella y es de 10 kVA, 230V, tiene una reactancia síncrona de 1.2 Ω/Fase y una resistencia de armadura de 0.5 Ω/Fase. Calcular el porcentaje de regulación a plena carga y factor de potencia 0.8 atrasado.

Solución

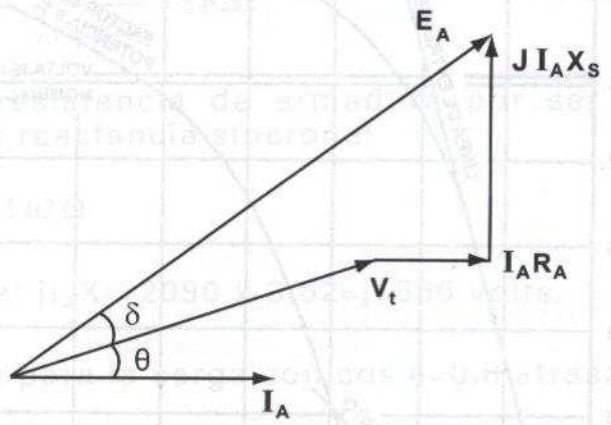
El voltaje en terminales es:

$$V_t = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.8V$$

La corriente de armadura.

$$I_a = \frac{\left(10\ x\ 10^3\right)/3}{230/\sqrt{3}} = 25.1A$$

El voltaje de armadura es:



$$E_A = \sqrt{\left(V_t\ \cos\ \theta + I_A R_A\right)^2 + \left(V_t\ \text{sen}\ \theta + I_A X_S\right)^2}$$

$$E_A = \sqrt{\left(106.24 + 12.55\right)^2 + \left(79.68 + 30.12\right)^2} = 161.76V$$

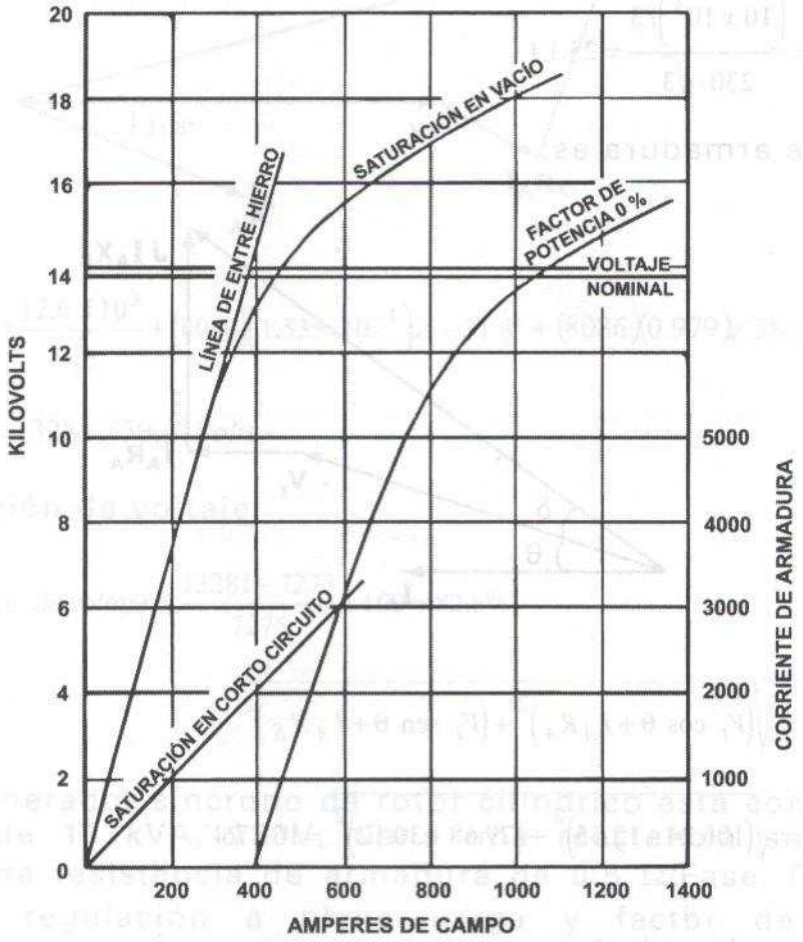
La regulación de voltaje:

$$Regulación\ de\ voltaje = \frac{E_A - V_t}{V_t}\ x\ 100 = \frac{161.76 - 132.8}{132.8}\ x\ 100$$

$$Regulación\ \ de\ voltaje = 21.8\%$$

Ejemplo

Calcular la regulación de voltaje usando el método de la impedancia síncrona no saturada, para un generador de 50 MVA, 13.8 kV, 60 ciclos/seg, conexión estrella, cuando opera a plena carga con factor de potencia 0.8 atrasado, la curva característica se indica a continuación:



CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA UN GENERADOR TRIFÁSICO DE 50,000 kVA, 60 Hz, 13,800 , CONEXIÓN Y

Solución

La corriente nominal o a plena carga del generador es:

$$I_A = \frac{50000}{\sqrt{3}\ x\ 13800} = 2090\ Amperes$$

De la curva de cortocircuito anterior, para producir una corriente de armadura de 2090A, se requiere una corriente de campo de It=405A. De la curva de vacío, con una corriente de campo de 405A, se produce un voltaje terminal de vacío de 13100 volts.

De lo anterior:

$$Z_{S\ no\ saturada} = \frac{13100}{\sqrt{3}\ x\ 2090} = 3.62\Omega$$

Despreciando la resistencia de armadura por ser muy pequeña en comparación de la reactancia síncrona:

$$X_{S\ no\ saturada} = 3.62\,\Omega$$

La caída de voltaje: jI_AX_S=2090 x 3.62=j7566 volts.

El voltaje en vacío para la carga con cos θ=0.8 atrasado:

$$E_A = \frac{13800}{\sqrt{3}}(0.80 + j0.6) + j7566$$

$$E_A = 6374 + j12346 \qquad E_A = 13894\ volts$$

La regulación en porciento:

$$Regulación = \frac{E_A - V_t}{V_t}\ x\ 100 = \frac{13894 - 7977}{7977}\ x\ 100$$

%

$$Regulación = 74.17\%$$

%

4.7 LA POTENCIA DESARROLLADA

En los dispositivos de conversión electromecánica (y los generadores síncronos no son la excepción) la expresión para la potencia desarrollada es importante, se debe hacer énfasis en que se está convirtiendo la potencia mecánica de entrada al generador, proporcionada por el primomotor o turbina, se convierte en potencia eléctrica de salida del generador. La potencia desarrollada a partir del par desarrollado T se puede calcular a partir de la expresión:

$$Pd = \omega T \quad Watts$$

Donde:

ω= Velocidad mecánica de rotación en rad/seg.

El par:

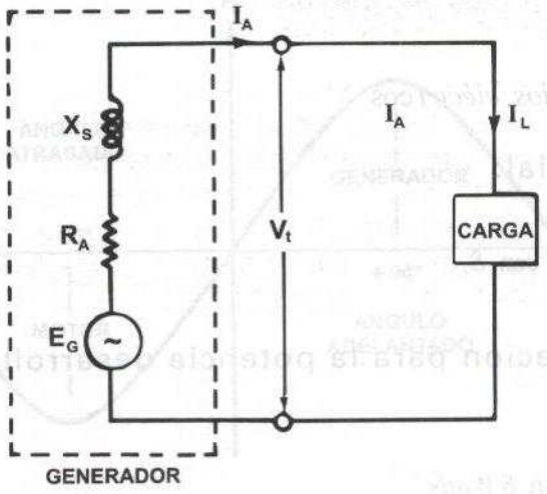
$$T = BI\ell r \quad {}_{N}-m$$

También:

$$T = \frac{EI}{\omega}$$

Con frecuencia es útil tener una ecuación que exprese esta potencia en términos de los parámetros de la máquina, por ejemplo, el voltaje y el ángulo de fase.

Para hacer esto, se puede hacer referencia a la siguiente figura, en donde se representa una máquina síncrona por su resistencia de armadura y reactancia, V_t es el voltaje terminal y E_G es el voltaje interno, ambos referidos por fase.



MODELO ELÉCTRICO

CIRCUITO EQUIVALENTE DE C.A. SIMPLIFICADO (MONOFÁSICO) PARA UN GENERADOR SINCRONO

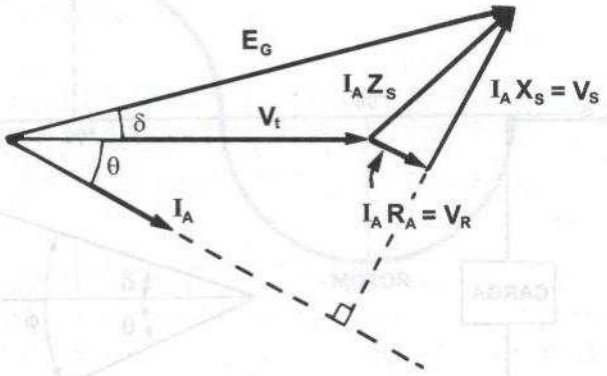


DIAGRAMA FASORIAL

Para fines del cálculo de la potencia desarrollada se puede despreciar la resistencia de armadura, ya que su efecto es muy pequeño en los generadores prácticos. Se puede escribir la expresión para la potencia desarrollada en cualquiera de las dos formas:

$$Pd = 3 V_t I_A \cos\theta \ Watts$$

ó

$$Pd = 3 E_G I_A \cos\theta \ Watts$$

Donde:

$$\phi = \delta + \theta \ \ grados\ eléctricos$$

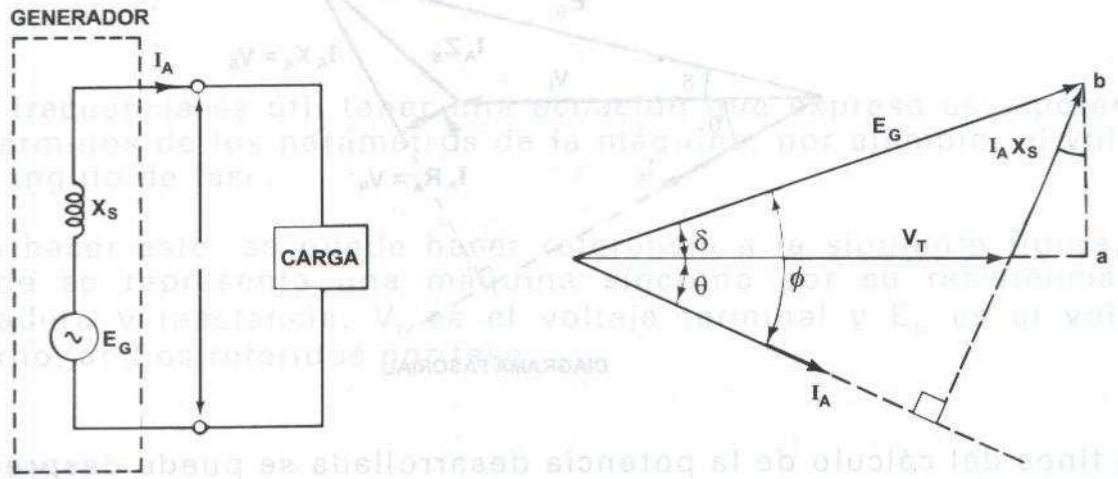
Del diagrama fasorial:

$$I_A \cos\theta = \frac{E_G}{X_S} \text{ sen } \delta$$

Por lo tanto, la ecuación para la potencia desarrollada se puede escribir como:

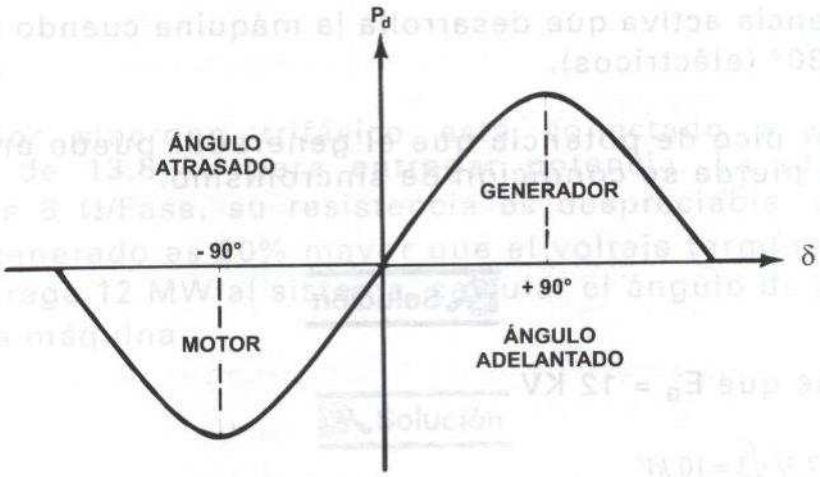
$$Pd = 3\frac{V_t\, E_G}{X_S} \text{sen } \delta \ Watts$$

Esta ecuación sólo es aplicable bajo la suposición que la resistencia R_A es despreciable, el factor 3 se refiere a las tres fases: Debido a que en la ecuación anterior la potencia depende del ángulo δ, se le llama **ecuación de par o potencia de ángulo.**

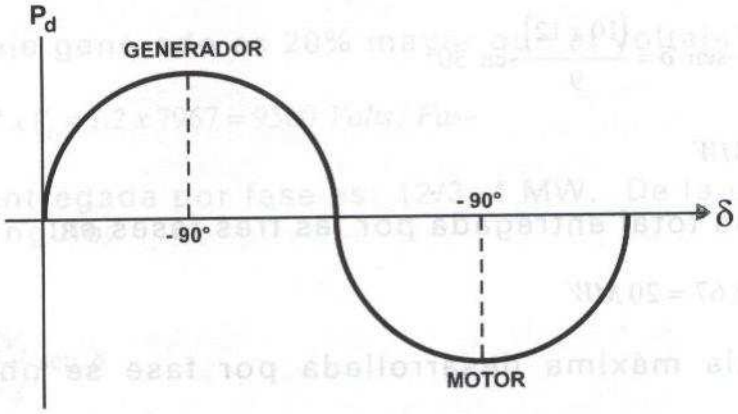


A) DIAGRAMA DEL CIRCUITO

B) DIAGRAMA FASORIAL CON RESISTENCIA DE ARMADURA DEPRECIADA



REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE Pd vs δ



Se puede observar que cuando δ=0°, como son 0°, entonces no hay potencia generada. La ecuación desarrollada es senoidal.

Ejemplo

Se tiene un generador trifásico conectado en estrella cuyos datos son: 36 MVA, 21 KV, 1800 RPM, X_S= 9 Ω/Fase, el voltaje de vacío o excitación de línea a neutro es E_G=12 kV, el voltaje del sistema al que se conecta es de V=17.3 kV (línea a línea), calcular:

a) La potencia activa que desarrolla la máquina cuando el ángulo del par δ=30° (eléctricos).

b) El valor pico de potencia que el generador puede entregar antes de que pierda su condición de sincronismo.

Solución

a) Se tiene que E_G = 12 KV

$$V = 17.3/\sqrt{3} = 10\ kV$$

$$\delta = 30°$$

La potencia activa entregada a la red es:

$$P = \frac{E_G\ V}{X_S} \text{sen}\ \delta = \frac{(10\ x\ 12)}{9} \text{sen}\ 30°$$

$$P = 6.67\ MW$$

La potencia total entregada por las tres fases es:

$$Pd = 3\ x\ 6.67 = 20\ MW$$

b) La potencia máxima desarrollada por fase se obtiene cuando δ=90°

$$P = \frac{V\ E_G}{X_S} \text{sen}\ 90°$$

$$P_d = \frac{(10\ x\ 12)}{9}\ x\ 1 = 13.3\ MW$$

La potencia pico de salida del alternador es:

$$P = 3\ P_d = 3\ x\ 13.3 = 39.9 \cong 40\ MW$$

Ejemplo

Un generador síncrono trifásico está conectado a una red de distribución de 13.8 kV para entregar potencia. La reactancia del generador es 8 Ω/Fase, su resistencia es despreciable. La magnitud del voltaje generado es 20% mayor que el voltaje terminal. Cuando la máquina entrega 12 MW al sistema, calcular el ángulo de potencia δ al cual opera la máquina.

Solución

El voltaje terminal es:

$$V_t = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967 \ Volts / Fase$$

Como el voltaje generado es 20% mayor que el voltaje terminal.

$$E = 1.2 \ x \ V_t = 1.2 \ x \ 7967 = 9560 \ Volts / Fase$$

La potencia entregada por fase es: 12/3=4 MW. De la ecuación para la potencia de ángulo:

$$P_d = \frac{EV_t}{X_S} \text{sen } \delta$$

$$4 = \frac{7.967 \ x \ 9.56}{7} \text{sen } \delta$$

Por lo tanto:

$$sen \ \delta = 0.42, \qquad \delta = sen^{-1} 0.42 = 24.8°$$

4.8 PÉRDIDAS Y EFICIENCIA

Para calcular la eficiencia de un generador síncrono, se sigue un procedimiento similar al seguido para la determinación de la eficiencia

de los generadores de C.D., es necesario recordar que se deben establecer las pérdidas totales cuando operan bajo carga. Para los generadores esto incluye:

1. Pérdidas rotacionales por fricción y ventilación.
2. Pérdidas circulantes y por histéresis en el circuito magnético.
3. Pérdidas en el cobre, en los devanados de armadura y en las bobinas de campo.
4. Pérdidas en la carga debidas al flujo disperso, produciendo corrientes circulantes y por histéresis en la armadura circundante al fierro ó núcleo.

Con respecto a estas pérdidas, se pueden hacer los siguientes comentarios:

1. Las pérdidas rotacionales, que incluyen las pérdidas por fricción y ventilación son constantes, debido a que la velocidad del generador síncrono es constante. Estas pérdidas se pueden determinar de la prueba de vacío.

2. Las pérdidas en el núcleo incluyen las pérdidas por histéresis y por corrientes circulantes como un resultado de los cambios en la densidad de flujo, se pueden determinar midiendo la potencia de entrada a un motor auxiliar, que se usa para accionar al generador en vacío, con y sin la excitación del campo. La diferencia en la potencia medida constituye estas pérdidas.

3. Las pérdidas en el cobre del campo y la armadura se obtienen como $R_A I_A^2$ y $V_f I_f$, debido a que se refieren como cantidades por fase. Las pérdidas en el cobre de la armadura para el generador se deben multiplicar por el número de fases. Las pérdidas en el devanado de campo son un resultado de la corriente de excitación que circulan a través de la resistencia del devanado de campo.

4. Las pérdidas de carga o pérdidas dispersas resultantes de las corrientes circulantes en los conductores de armadura incrementan las pérdidas en el núcleo debido al campo magnético distorsionado. Aún cuando es posible separar estas pérdidas por pruebas, en el cálculo de la eficiencia, se puede tomar en cuenta tomando el valor efectivo de la resistencia de armadura, en el lugar de la resistencia de C.D. Después de que todas las pérdidas se hayan determinado, la eficiencia se calcula como:

$$\eta = \frac{KVA\cos\theta}{KVA\cos\theta + \left(pérdidas\ totales\right)} x\,100$$

Donde:

η = Eficiencia en porciento.

KVA = Carga en el generador.

cos θ = Factor de potencia de la carga.

La cantidad KVA x cos θ=p otencia real entregada a la carga (KW) por el generador.

La ecuación anterior se puede escribir como:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} x\,100 = \frac{P_{salida}}{P_{salida\,+\,pérdidas}} x\,100$$

La potencia de entrada: $P_{entrada} = P_{salida\,+\,pérdidas}$ es la potencia requerida por el primomotor para accionar al generador con carga.

Ejemplo

Un generador síncrono trifásico tiene una resistencia en el devanado de armadura de 0.032 Ω entre terminales. El devanado de campo toma 32A de una fuente o excitatriz a 250V, las pérdidas por fricción o ventilación son de 12.8 KW, las pérdidas en el núcleo, incluyendo las pérdidas dispersas, son de 10.6 KW. Calcular la eficiencia del generador a plena carga y factor de potencia 0.8 atrasado. Supóngase

que el generador está conectado en estrella; el valor de la resistencia en C.A. se puede tomar como 1.25 veces su valor en C.D.

Solución

La corriente de armadura.

$$I_A = \frac{KVA\ x\ 1000}{\sqrt{3}\ x\ V_{LL}} = \frac{2000000}{\sqrt{3}\ x\ 2300} = 503\ A$$

$$R_{A\ por\ fase} = \frac{0.032}{2}\ x\ 1.25 = 0.020\ \Omega$$

PÉRDIDAS	KW
Fricción y ventilación	12.80
Pérdidas en el núcleo y dispersas	10.60
Devanado de armadura $3\ x\ R_A\ x\ I_A^2 = 3\ x\ 0.020\ x\ (503)^2$	15.18
Pérdidas en el devanado de campo $(V_f\ x\ I_f)/1000 = \frac{250\ x\ 32}{1000}$	8.0
Pérdidas totales	**46.58**

La eficiencia:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida\ +\ pérdidas}}\ x\ 100$$

$$\eta = \frac{2000\ x\ 0.80}{2000\ x\ 0.8 + 46.58}\ x\ 100$$

$$\eta = 97.2\%$$

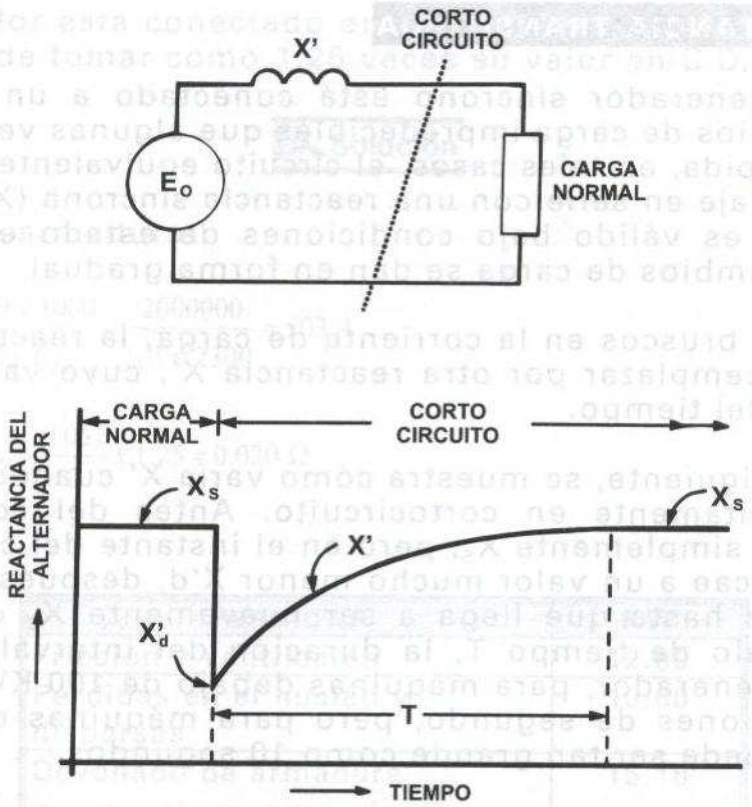
4.9 LA REACTANCIA TRANSITORIA

Cuando un generador síncrono está conectado a un sistema, está sujeto a cambios de carga impredecibles que algunas veces ocurren en forma muy rápida, en tales casos, el circuito equivalente simple de una fuente de voltaje en serie con una reactancia síncrona (X_S), ya que este circuito sólo es válido bajo condiciones de estado estable, o bien cuando los cambios de carga se dan en forma gradual.

Para cambios bruscos en la corriente de carga, la reactancia síncrona X_S se debe reemplazar por otra reactancia X', cuyo valor varía como una función del tiempo.

En la figura siguiente, se muestra cómo varía X' cuando un generador se pone súbitamente en cortocircuito. Antes del cortocircuito, la reactancia es simplemente X_S, pero en el instante del cortocircuito, la reactancia decae a un valor mucho menor X'd, después se incrementa gradualmente hasta que llega a ser nuevamente X_S después de un cierto intervalo de tiempo T, la duración del intervalo depende del tamaño del generador, para máquinas debajo de 100 KVA son sólo las últimas fracciones de segundo, pero para máquinas en el rango de 1000 MVA, puede ser tan grande como 10 segundos.

El valor mínimo de reactancia X'd se le conoce como reactancia transitoria del generador y puede ser tan baja como el 15% del valor de la reactancia síncrona, en consecuencia, el valor inicial de la corriente de cortocircuito es mucho mayor que la correspondiente a la reactancia síncrona X_S.



VARIACIÓN DE LA REACTANCIA DE UN GENERADOR SIGUIENDO A UN CORTO CIRCUITO

4.10 SINCRONIZACIÓN DE UN GENERADOR

En la práctica, es muy frecuente conectar dos o más generadores en paralelo para alimentar una carga. Por ejemplo, como los requerimientos de potencia de una empresa suministradora de energía eléctrica van creciendo durante el día, se van conectando generadores en forma sucesiva al sistema para proporcionar potencia extra.

Después, cuando la demanda de potencia cae o se reduce, algunos generadores que están previamente seleccionados, se desconectan en forma temporal del sistema, hasta que la potencia o demanda aumente y entonces tengan que ser conectados a la red.

Los generadores síncronos son entonces, en forma regular, conectados y desconectados del sistema como una respuesta a la demanda de los clientes o usuarios del servicio de energía eléctrica. Estos generadores se conectan en paralelo, pero respetando ciertos aspectos mínimos como

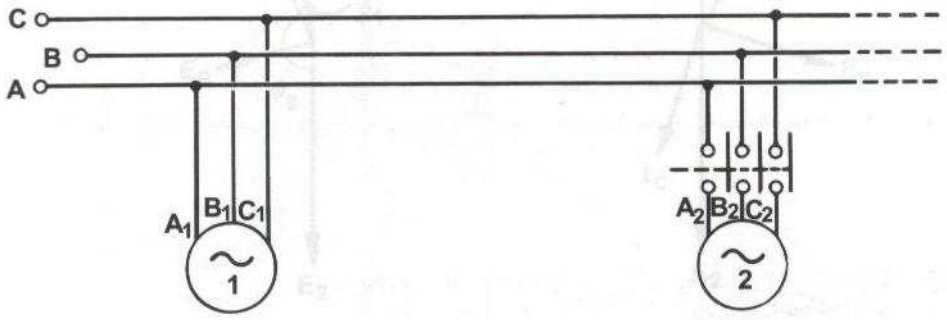
son: que ni el voltaje, ni la frecuencia del sistema pueden ser alterados. Antes de conectar un generador a la red eléctrica, o bien conectar con otro generador en paralelo, se deben satisfacer las siguientes condiciones:

1. La frecuencia del generador debe ser igual a la frecuencia del sistema o a la del otro generador que se conecta en paralelo.

2. El voltaje del generador debe ser igual al voltaje del sistema o del otro generador al que se va a conectar en paralelo.

3. El voltaje del generador debe estar en fase con el voltaje del sistema.

4. La secuencia de fase del generador debe ser la misma que la del sistema.



OPERACIÓN EN PARALELO DE GENERADORES

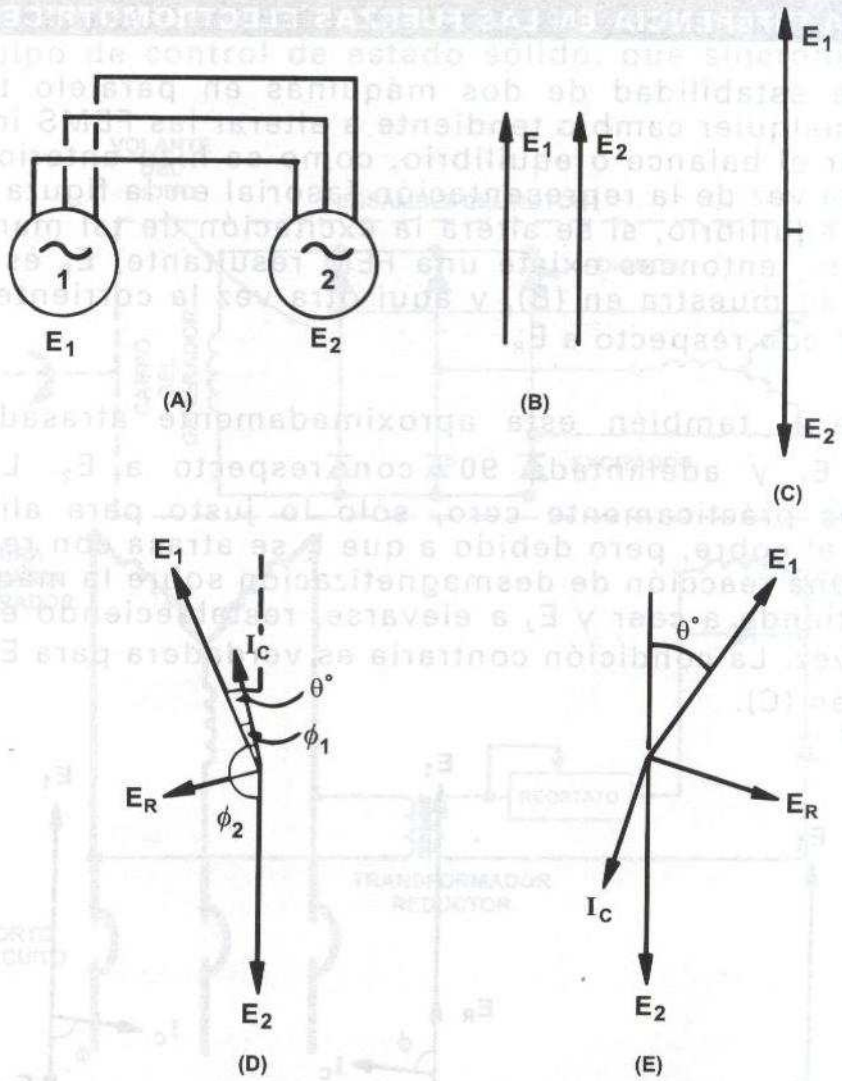
EL EFECTO DEL CAMBIO DE VELOCIDAD

Cuando dos o más máquinas se han conectado en paralelo, deben permanecer en operación estable bajo cualquier condición de operación normal, esto es, voltajes, frecuencia, velocidad e igualdad de fase. En el caso de dos máquinas, se muestra la figura (A) y el diagrama fasorial en el instante de la conexión es (B). En la figura (C,) se muestra un diagrama fasorial que es válido también, ya que E_1 y E_2 están en fase en el tiempo para conectar las máquinas en paralelo con respecto al

circuito local formado por las dos armaduras, E_1 que debe ser igual y opuesta a E_2.

Si por alguna razón la máquina 1 recibe algún par mecánico extra, tendrá el intento de acelerar, E_1 avanzará en fase como se muestra en (D) cuando E_1 se ha movido adelante por θ°. Hay una FEM resultante existente en el circuito local formado por las dos armaduras, E_R que produce una corriente I_C atrasada casi 90° con respecto a E_R, dado que la armadura es altamente inductiva, usando la convención para la FEMS.

$$\overline{E}_R = \overline{E_1} - \overline{E_2} \quad \text{y también} \quad I_C = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 + Z_2}$$



EFECTO DEL INCREMENTO DE LA VELOCIDAD EN LA MÁQUINA

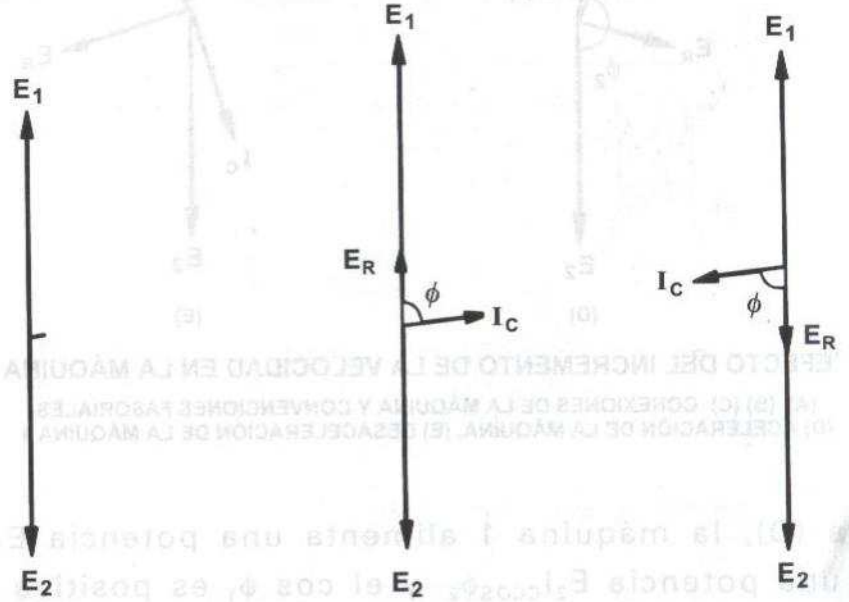
(A) (B) (C) CONEXIONES DE LA MÁQUINA Y CONVENCIONES FASORIALES
(D) ACELERACIÓN DE LA MÁQUINA, (E) DESACELERACIÓN DE LA MÁQUINA 1

De la figura (D), la máquina 1 alimenta una potencia $E_1 I_{C} \cos\phi_1$ y la máquina 2 una potencia $E_2 I_{C} \cos\phi_2$ y el cos ϕ_1 es positiva y cos ϕ_2 es negativo, esto es, la máquina 2 alimenta una potencia negativa, o en otras palabras, trata de convertirse en motor. En consecuencia, la máquina 1 tiende a reducir su velocidad y la máquina 2 para recibir potencia, tiende a acelerar. Por el contrario, si la máquina 1 se regresa o defasa como se muestra en (E), las direcciones de E_R e I_C se cambian de manera que la máquina 2 ahora genera y la máquina 1 se motoriza.

EFECTO DE LA DIFERENCIA EN LAS FUERZAS ELECTROMOTRICES (FEM)

La inherente estabilidad de dos máquinas en paralelo también se extiende a cualquier cambio tendiente a alterar las FEMS individuales para estudiar el balance o equilibrio, como se hizo anteriormente, se hace uso otra vez de la representación fasorial en la figura (A) para la máquina en equilibrio, si se altera la excitación de tal manera que E_1 se incremente, entonces existe una FEM resultante, E_R es el circuito local, como se muestra en (B), y aquí otra vez la corriente circulante se atrasa 90° con respecto a E_R.

La corriente I_C también está aproximadamente atrasada 90° con respecto a E_1 y adelantada 90° con respecto a E_2. La potencia producida es prácticamente cero, sólo lo justo para alimentar las pérdidas en el cobre, pero debido a que I_C se atrasa con relación a E_1, se produce una reacción de desmagnetización sobre la máquina 2, por lo tanto E_1 tiende a caer y E_2 a elevarse, restableciendo el equilibrio inicial otra vez. La condición contraria es verdadera para $E_2 > E_1$ como se muestra en (C).

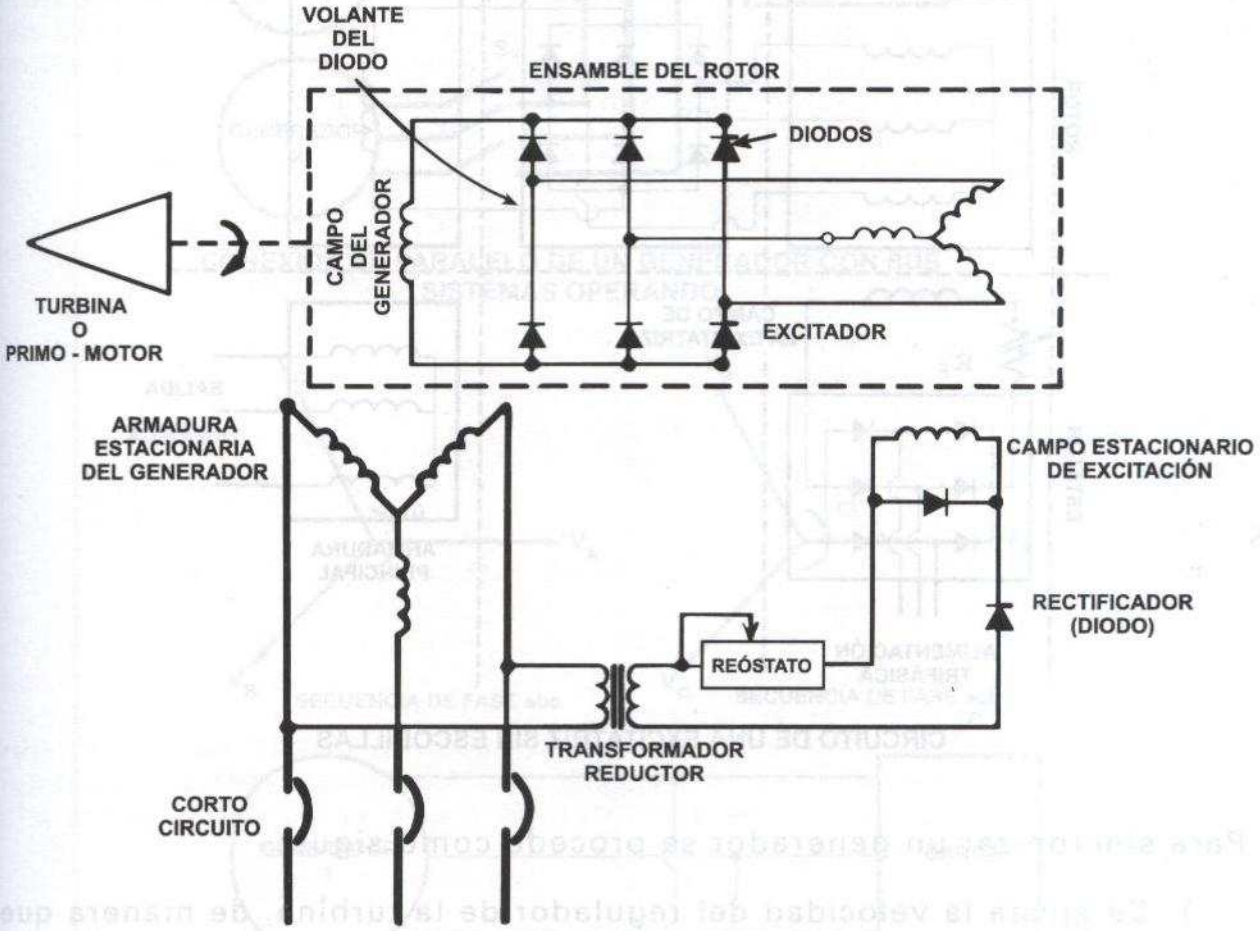


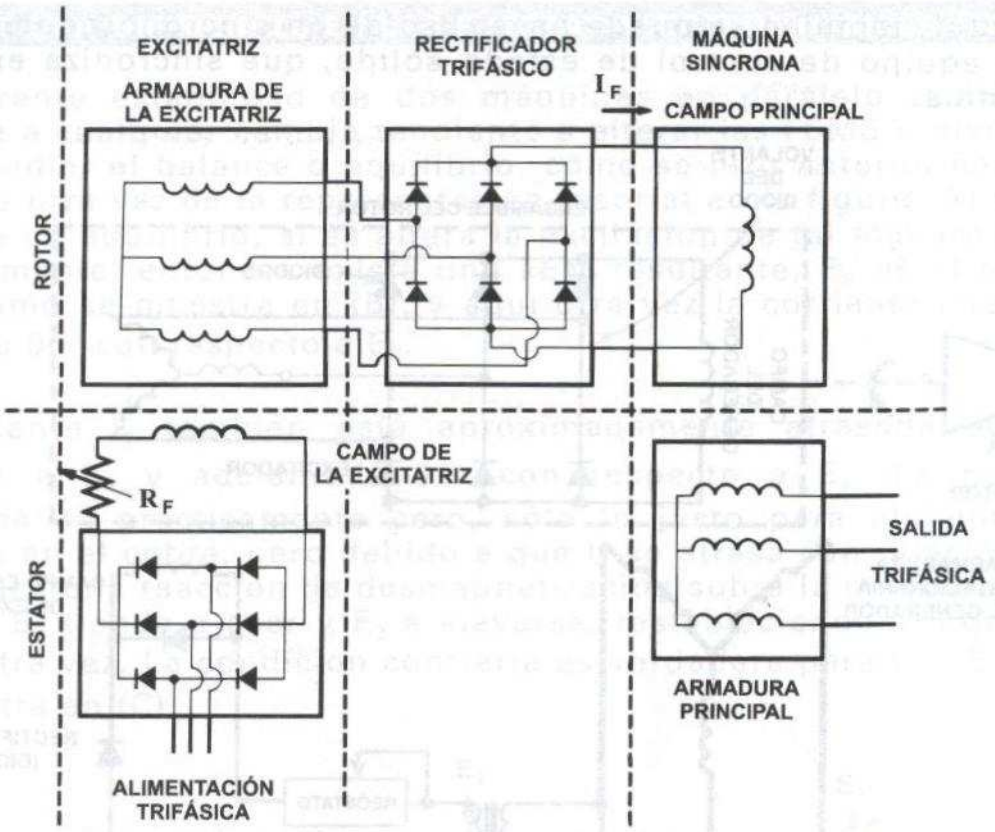
(A) MÁQUINA EN EQUILIBRIO (B) INCREMENTO EN E_1 (C) DECREMENTO EN E_1

CAMBIO DE EXCITACIÓN DE LA MÁQUINA 1

La sincronización se puede hacer cuando todas las condiciones en los cuatro puntos anteriores son satisfechas y se puede hacer por el método simple de las conexiones de las lámparas a través del

interruptor, también se puede hacer uso de un sincronoscopio, o bien con un equipo de control de estado sólido, que sincroniza en forma automática.





CIRCUITO DE UNA EXCITATRIZ SIN ESCOBILLAS

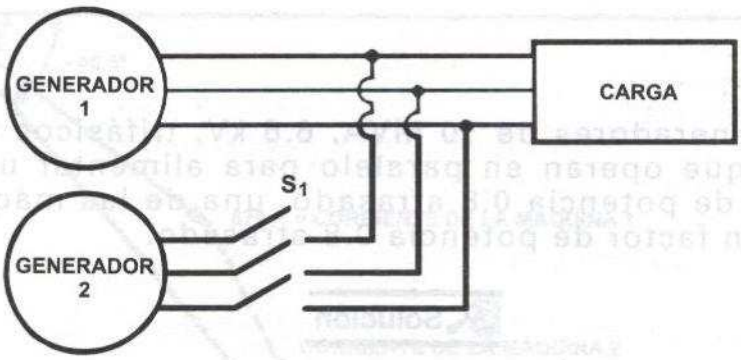
Para sincronizar un generador se procede como sigue:

1. Se ajusta la velocidad del regulador de la turbina, de manera que la frecuencia del generador esté cercana a la frecuencia del sistema.

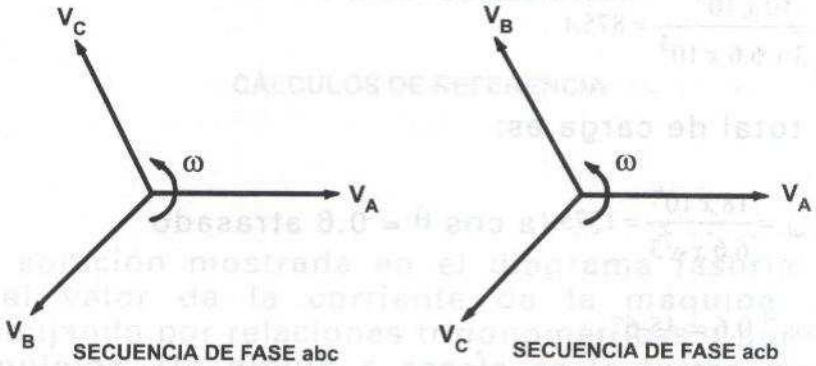
2. Ajustar la excitación de manera que el voltaje del generador (E_G) sea igual al voltaje del sistema (E).

3. El ángulo de fase entre E_G y E se puede observar por medio de un sincronoscopio, que es un instrumento que tiene una aguja que indica continuamente el ángulo de fase entre los dos voltajes, cubriendo el rango total desde cero hasta 360°.

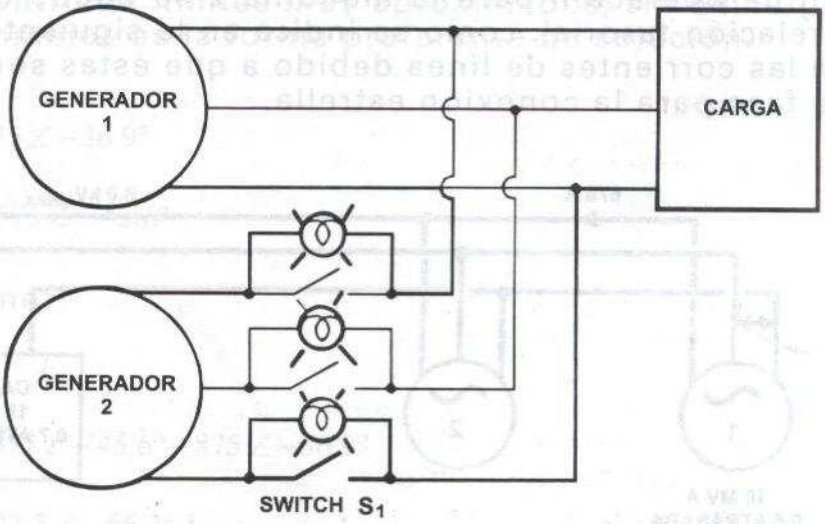
4. El interruptor de línea se cierra conectando de esta manera el generador al sistema. El esquema básico de sincronización por el método de las tres lámparas.



CONEXIÓN EN PARALELO DE UN GENERADOR CON SUS SISTEMAS OPERANDO



SECUENCIA DE FASE abc SECUENCIA DE FASE acb



MÉTODO DE LAS TRES LÁMPARAS PARA SINCRONIZACIÓN

Ejemplo

Se tienen dos generadores de 10 MVA, 6.6 kV, trifásicos en conexión estrella, 60 Hz. que operan en paralelo para alimentar una carga de 18 MVA a factor de potencia 0.8 atrasado, una de las máquinas opera a plena carga con factor de potencia 0.8 atrasado.

Solución

La corriente a plena carga para el generador de 10 MVA.

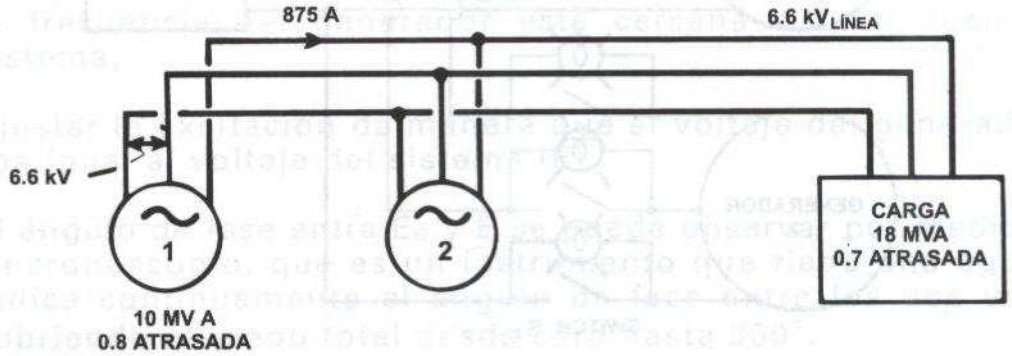
$$I = \frac{10 \, x \, 10^6}{\sqrt{3} \, x \, 6.6 \, x \, 10^3} = 875A$$

La corriente total de carga es:

$$I_{CARGA} = \frac{18 \, x \, 10^6}{6.6 \, x \, \sqrt{3}} = 1575A \text{ a } \cos\theta = 0.6 \text{ atrasado}$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.6 = 45.6°$$

La condición de operación para la máquina 2 se puede encontrar por una simple relación fasorial, como se indica en la siguiente figura, aquí se muestran las corrientes de línea debido a que éstas son iguales a la corriente de fase para la conexión estrella.



Ejemplo

Se tienen dos generadores de 10 MVA, 6.6 kV, trifásicos en conexión estrella, 60 Hz. que operan en paralelo para alimentar una carga de 18 MVA a factor de potencia 0.8 atrasado, una de las máquinas opera a plena carga con factor de potencia 0.8 atrasado.

Solución

La corriente a plena carga para el generador de 10 MVA.

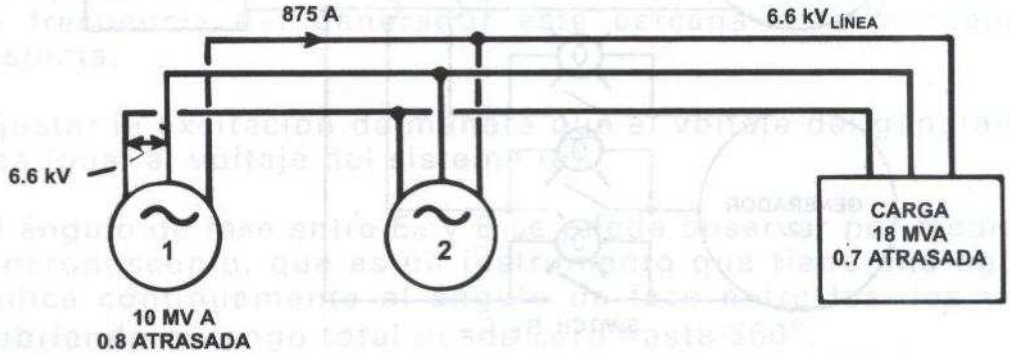
$$I = \frac{10 \, x \, 10^6}{\sqrt{3} \, x \, 6.6 \, x \, 10^3} = 875A$$

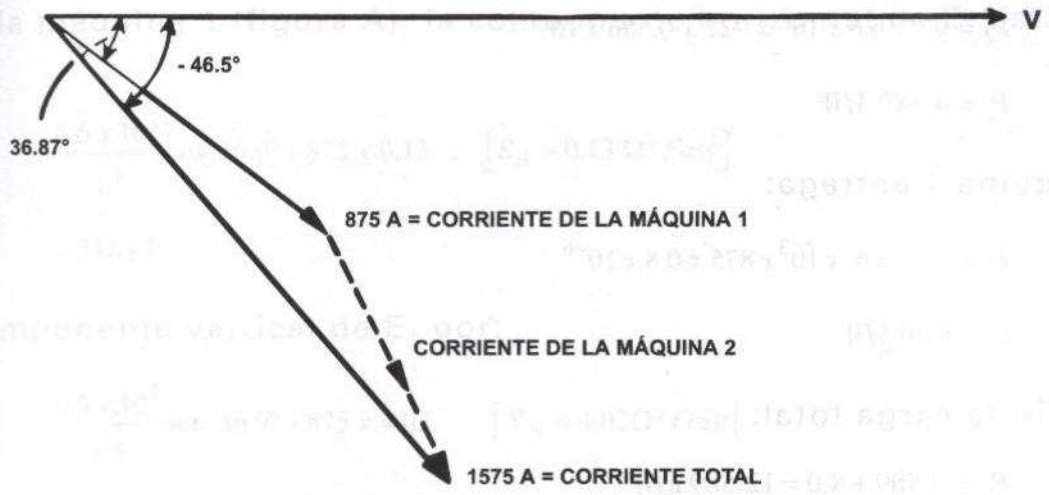
La corriente total de carga es:

$$I_{CARGA} = \frac{18 \, x \, 10^6}{6.6 \, x \, \sqrt{3}} = 1575A \text{ a } \cos\theta = 0.6 \text{ atrasado}$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.6 = 45.6°$$

La condición de operación para la máquina 2 se puede encontrar por una simple relación fasorial, como se indica en la siguiente figura, aquí se muestran las corrientes de línea debido a que éstas son iguales a la corriente de fase para la conexión estrella.





CÁLCULOS DE REFERENCIA

La forma de solución mostrada en el diagrama fasorial anterior es irrelevante, el valor de la corriente de la máquina 2 se puede determinar dibujando por relaciones trigonométricas o por el uso de los números complejos. Un dibujo a escala es la forma más fácil, con resultados dentro de límites muy aproximados; sin embargo, el uso de números complejos es la forma preferente de solución.

$$I_1 = 875 \angle -36.9°$$

$$I_T = 1575 \angle -45.6°$$

y como:

$$I_2 = I_T - I_1$$

$$I_2 = 1575 \angle -45.6° - 875 \angle -36.9°$$

$$I_2 = 722.3 \angle -56.2° A$$

Es decir, la máquina 2 entrega 772A a factor de potencia 0.556 atrasado, con lo cual la potencia entregada es:

$$P_2 = \sqrt{2}\ x\ 6.6\ x\ 10^3\ x\ 722\ x\ 0.556\ x\ 10^{-6}$$

$$P_2 = 4.589\ MW$$

La máquina 1 entrega:

$$P_1 = \sqrt{3}\ x\ 6.6\ \ x\ 10^3 x\ 875\ x\ 0.8\ x\ 10^{-6}$$

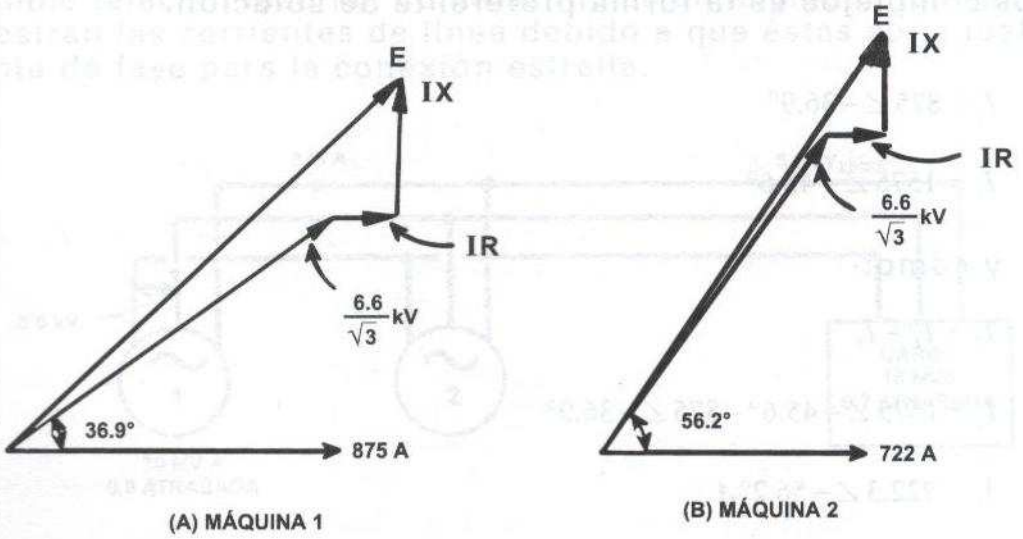
$$P_1 = 8.00\ MW$$

Es decir, la carga total:

$$P_T = 4.589 + 8.0 = 12.589\ MW$$

Cada generador síncrono individual tiene ahora su propio voltaje especificado y corriente necesaria para alimentar la carga total.

Dada la impedancia síncrona es posible encontrar un valor de FEM para cada máquina bajo estas condiciones de carga, como se muestra en las siguientes figuras:



DIAGRAMAS FASORIALES

Para la máquina 1 (figura A), la componente horizontal de E_1 está dada por:

$$\frac{6.6\ x\ 10^3}{\sqrt{3}}\cos\ 36.9° + 875\ x\ 0.13\ \ ;\ \ \left[R_A = 0.13\ \Omega / Fase\right]$$

$$= 3161\,V$$

La componente vertical de E_1 por:

$$\frac{6.6\ x\ 10^3}{\sqrt{3}}\text{sen}\ 36.9° + 875\ x\ 4.02 \qquad \left[X_S = 4.02\Omega / Fase\right]$$

$$= 5805\,V$$

Por lo tanto:

$$E_1 = \sqrt{(3161)^2 + (5805)^2} = 6610V\ /\ Fase$$

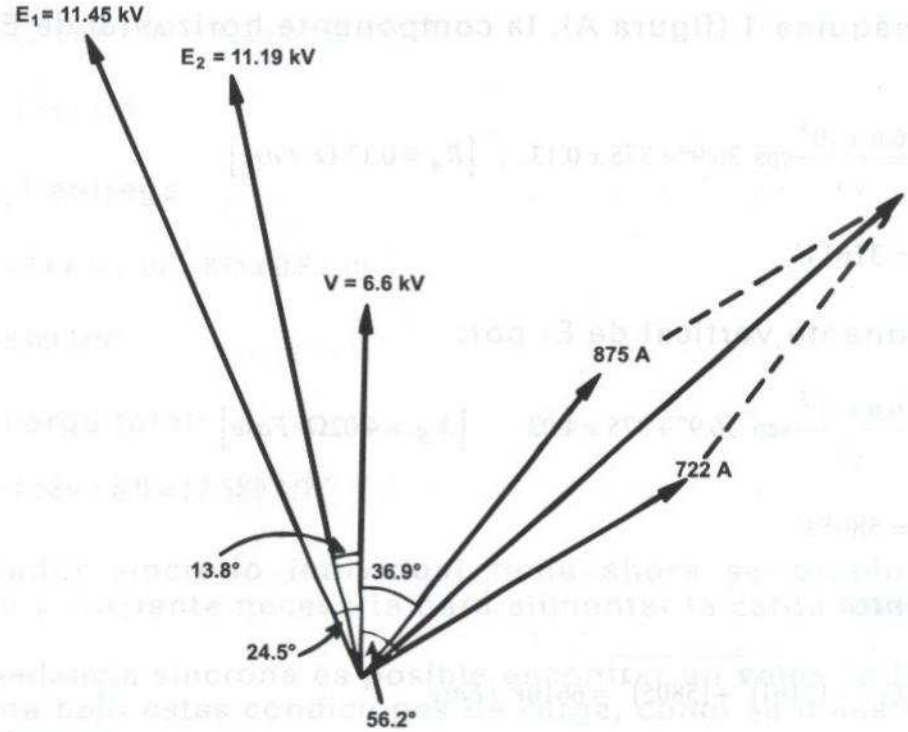
$$E_1 = \sqrt{3}\ x\ 6610 = 11.45\ kV_{Linea}$$

E_1 se adelanta a I_1 por 61.4° ó E_1 está adelantado por 61.4° - 36.9°=24.5° un cálculo similar para la máquina 2 muestra que:

$$E_2 = 6460\ volts\ /\ Fase$$

$$E_2 = \sqrt{3}\ x\ 6460 = 11.19\ kV_{Linea}$$

Con E_2 delante de V por 13.8°, el comportamiento completo se muestra en la siguiente figura:



PATRONES COMPARATIVOS DE OPERACIÓN PARA LAS DOS MÁQUINAS

Ejemplo

Se tienen dos generadores de 3000 kW, 6.6 kV, conectados en estrella, alimentando una carga a factor de potencia 0.8 atrasado. La impedancia síncrona de la máquina A es Z_A=0.5 +j10 Ω/Fase y para la máquina B Z_B=0.4 + j12 Ω/Fase. La excitación de la máquina A se ajusta de manera que entrega 150A a factor de potencia atrasado y el gobernador se ajusta de manera que la carga se comparte por igual entre máquinas. Calcular la corriente, factor de potencia, FEM inducida y ángulo de carga de cada máquina.

Solución

Para la máquina A:

$$\cos\theta_A = \frac{1500}{\sqrt{3}\,x\,6.6\,x\,150} = 0.874$$

$$\theta_A = \cos^{-1} 0.874 = 29°$$

$$sen\ \theta_A = sen\, 29° = 0.485$$

La corriente total para la carga de 3000 MW a factor de potencia 0.8 atrasado es:

$$I_T = \frac{3000}{\sqrt{3}\, x\, 6.6\, x\, 0.8} = 328(0.8 - j0.6)$$

$$I_T = 262.4 - j196.8$$

$$I_A = 150(0.874 - j0.485) = 131.1 - j72.75$$

La corriente en el generador B:

$$I_B = I_T - I_A = (262.4 - j196.8) - (131.1 - j72.75)$$

$$I_B = 131.3 - j124.05$$

$$I_B = \sqrt{(131.3)^2 + (124.05)^2} = 181A$$

$$\cos\ \theta_B = \frac{131.3}{181} = 0.723\ atrasado$$

Tomando el voltaje V como referencia y trabajando en valores de fase:

$$\overline{E}_A = \overline{V} + \overline{I}_A Z_A = \left(6.6/\sqrt{3}\right) + (131.1 - j72.75)(0.5 + j10)\, x\, 10^{-3}$$

$$= 4.6 + j1.27\, kV$$

El ángulo de carga δ_A:

$$\delta_A = \tan^{-1} 1.27/4.6 = 15.4°$$

El valor de línea de la FEM:

$$= \sqrt{3}\, x\, \sqrt{(4.6)^2 + (1.27)^2} = 8.26kV$$

$$\overline{E}_B = \overline{V} + \overline{I}_B \overline{Z}_B = \left(6.6/\sqrt{3}\right) + \left(131.3 - j124.05\right)\left(0.4 + j12\right) x\, 10^{-3}$$

$$E_B = 5.35 + j1.52kV$$

El ángulo de carga δ_B:

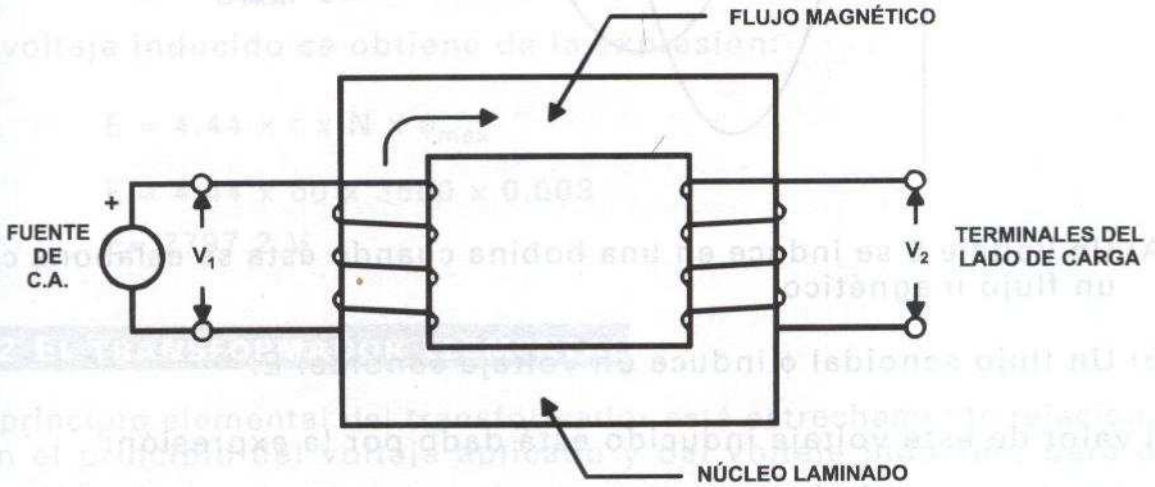
$$\delta_B = \tan^{-1} 1.52/5.35 = 15.9°$$

El valor del voltaje de línea =9.6 kV.

5 TRANSFORMADORES

5.1 INTRODUCCIÓN

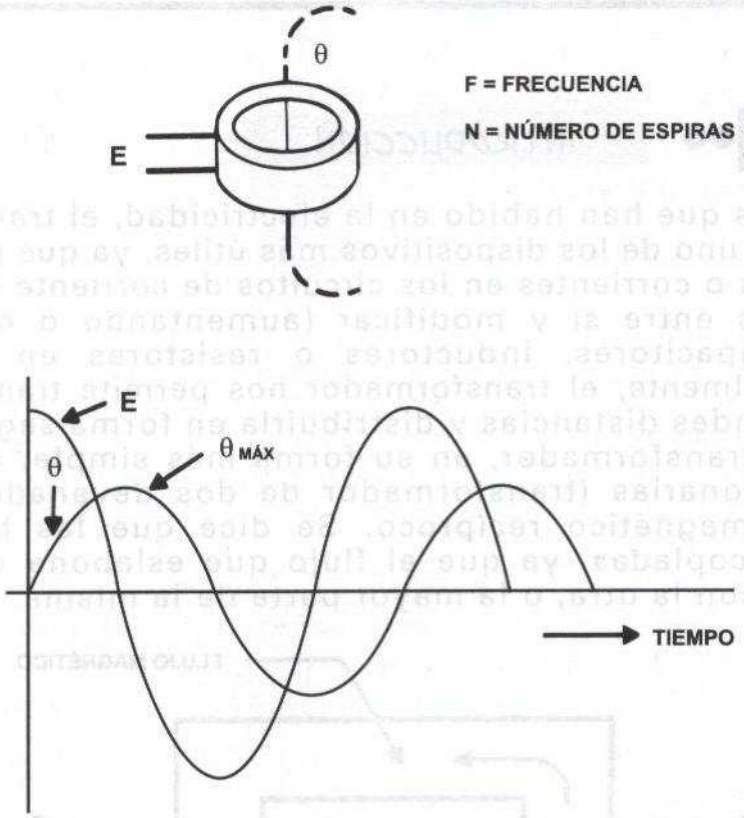
De los inventos que han habido en la electricidad, el transformador es probablemente uno de los dispositivos más útiles, ya que puede elevar o reducir voltajes o corrientes en los circuitos de corriente alterna, puede aislar circuitos entre sí y modificar (aumentando o disminuyendo) valores de capacitores, inductores o resistores en los circuitos eléctricos. Finalmente, el transformador nos permite transmitir energía eléctrica a grandes distancias y distribuirla en forma segura a hogares y fábricas. El transformador, en su forma más simple, consta de dos bobinas estacionarias (transformador de dos devanados) acopladas por un flujo magnético recíproco. Se dice que las bobinas están mutuamente acopladas, ya que el flujo que eslabona una bobina lo hace también con la otra, o la mayor parte de la misma.



ESQUEMA BÁSICO DE UN TRANSFORMADOR

El principio de operación se basa en los conceptos del voltaje inducido en una bobina, que son básicamente los derivados de la Ley de Faraday.

Considérese en forma elemental la bobina de la figura siguiente, que se encuentra eslabonada o rodeada por un flujo magnético variable (ϕ). El flujo es del tipo senoidal alterno a una frecuencia **f** que alcanza periódicamente picos positivos y negativos $\phi_{máx}$. El flujo alterno induce un voltaje senoidal de C.A. en la bobina de valor **E**.



A) Un voltaje E se induce en una bobina cuando ésta se eslabona con un flujo magnético.

B) Un flujo senoidal ϕ induce un voltaje senoidal E.

El valor de este voltaje inducido está dado por la expresión:

$$E = 4.4 \times f \times N \times \phi_{máx}$$

Donde:

E = Voltaje inducido en volts.

f = Frecuencia del flujo en Hertz.

N = Número de espiras de la bobina.

$\phi_{máx}$ = Valor pico del flujo en Weber (Wb).

4.44 = Constante que representa el valor exacto de $2\pi/\sqrt{2}$.

El voltaje inducido se da sin importar la forma en cómo el flujo de C.A. se presente, es decir, se puede crear de acuerdo a los principios básicos del electromagnetismo, por medio de un imán en movimiento en la vecindad de una bobina o a través de una corriente alterna que circula por la bobina misma.

Ejemplo

Se tiene una bobina con 3500 espiras que eslabona un flujo magnético de C.A. que tiene un valor pico de 3 miliweber. Si la frecuencia es de 60 Hz, calcular el valor del voltaje inducido E.

Solución

El voltaje inducido se obtiene de la expresión:

$$E = 4.44 \times f \times N \times \phi_{máx}$$

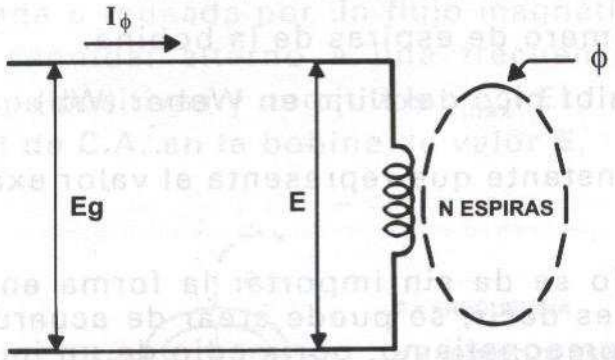
$$E = 4.44 \times 60 \times 3500 \times 0.003$$

$$E = 2797.2 \text{ V}$$

5.2 EL TRANSFORMADOR ELEMENTAL

El principio elemental del transformador está estrechamente relacionado con el principio del voltaje aplicado y del voltaje inducido, para ésto considérese una bobina que tiene una reactancia X_m y que toma una

corriente Iϕ. De la bobina, se considera despreciable su resistencia por simplificación del procedimiento.



La corriente efectiva está dada como: $I\phi = \frac{E_g}{X_m}$

La corriente senoidal Iϕ produce una fuerza magnetomotriz NIϕ, la cual a su vez crea un flujo senoidal ϕ cuyo valor pico es $\phi_{máx}$

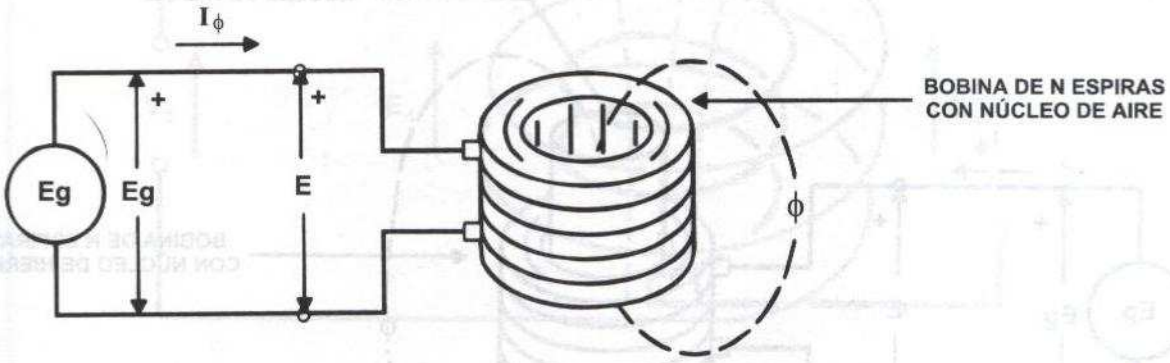
El flujo induce un voltaje E entre las terminales de la bobina, que es igual al voltaje aplicado E_g, es decir $E = E_g$, por lo que: $E_g = 4.44 \times f \times N \times \phi_{máx}$

De donde: $\phi_{máx} = \frac{E_g}{4.44\, x f x N}$

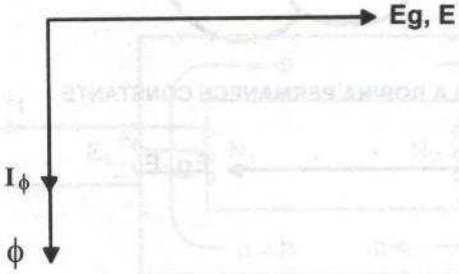
Esto significa que el flujo para una frecuencia (f) dada y un número de espiras (N) determinado, varía en proporción al voltaje aplicado E_g, lo que significa que el flujo ***debe permanecer constante.***

Por lo cual, si se introduce gradualmente dentro de la bobina un núcleo de hierro y se mantiene E_g constante, el flujo debe permanecerlo también. La corriente Iϕ se conoce como ***Corriente de Magnetización***, y su valor es mucho menor cuando el núcleo de hierro se encuentra dentro de la bobina. En efecto, para producir el mismo valor de flujo, se requiere una fuerza magnetomotriz menor cuando se tiene núcleo de hierro que cuando se tiene núcleo de aire.

Como en cualquier circuito inductivo, la corriente de magnetización $I\phi$ se atrasa 90° con respecto al voltaje E_g y el flujo ϕ se encuentra en fase con la corriente.

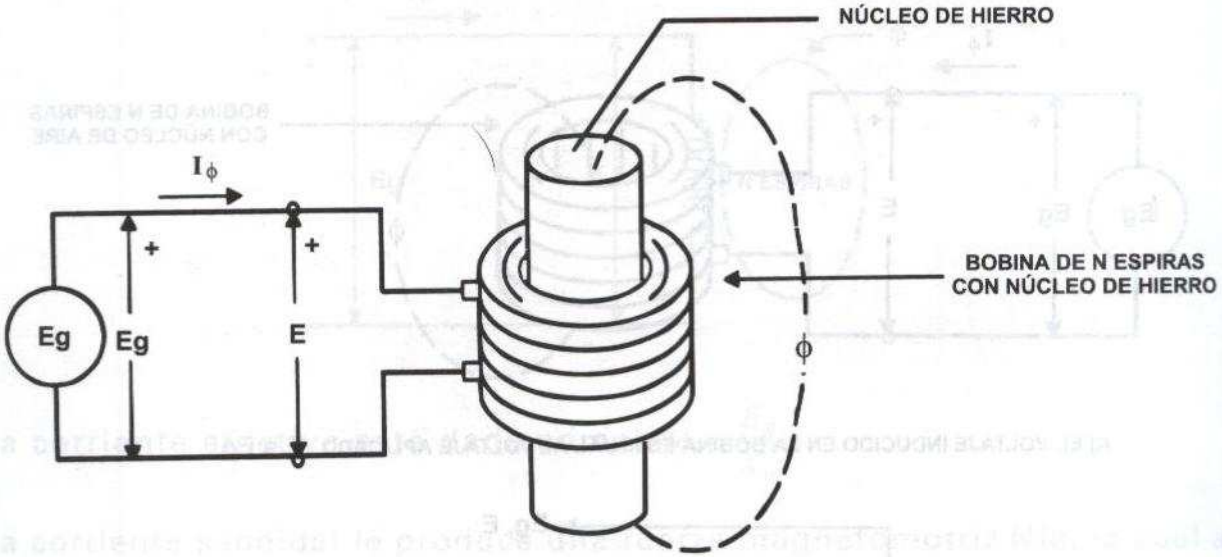


A) EL VOLTAJE INDUCIDO EN LA BOBINA ES IGUAL AL VOLTAJE APLICADO E = Eg



B) RELACIÓN ENTRE VOLTAJE

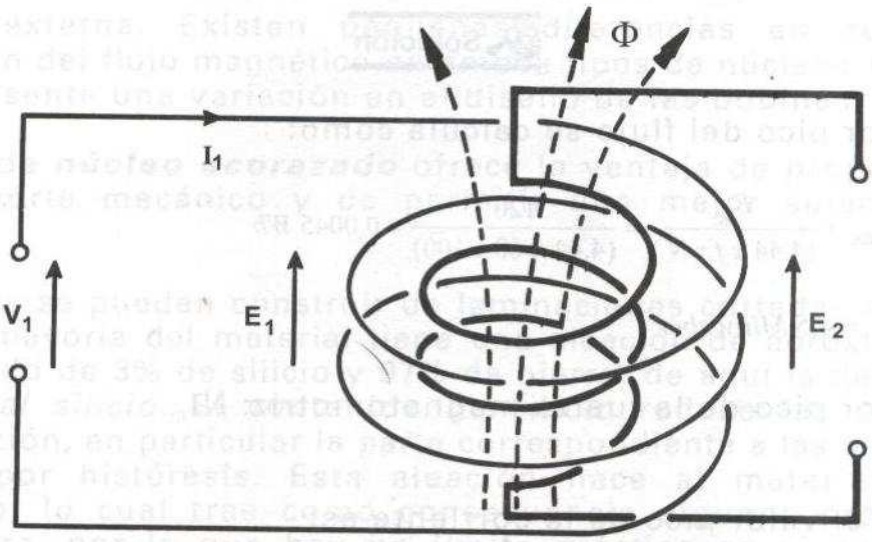
BOBINA CON NÚCLEO DE AIRE



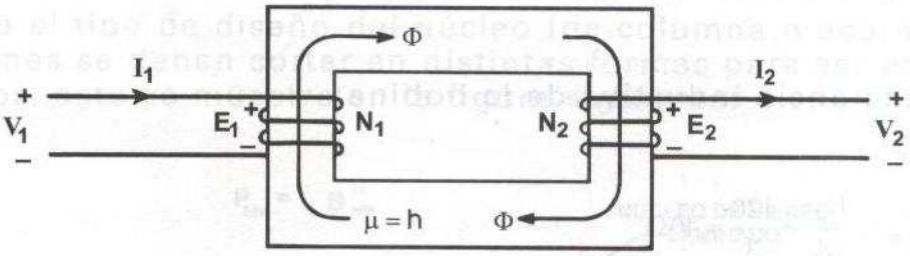
A) EL FLUJO DE LA BOBINA PERMANECE CONSTANTE

B) RELACIÓN FASORIAL

BONINA CON NÚCLEO DE FIERRO



ARREGLO DE BOBINAS ACOPLADAS



TRANSFORMADOR IDEAL

Ejemplo

Una bobina con 100 espiras se conecta a una fuente de 120 V, 60 Hz. Si el valor eficaz de la corriente de magnetización es de 3A, calcular:

a) El valor pico del flujo.

b) El valor pico de la fuerza magnetomotriz.

c) La reactancia inductiva de la bobina.

Solución

a) El valor pico del flujo se calcula como:

$$\phi_{\text{máx}} = \frac{E_g}{(4.44\ x\ f\ x\ N)} = \frac{120}{(4.44\ x\ 60\ x\ 100)} = 0.0045\ Wb$$

$$\phi_{máx} = 4.5\ Miliweber$$

b) El valor pico de la fuerza magnetomotriz: NI_m

Donde el valor pico de la corriente es:

$$I_m = \sqrt{2}\ x\ I = 1.41\ x\ 3 = 4.23A$$

$$NI_m = 100\ x\ 4.23 = 423\ A - e$$

c) La reactancia inductiva de la bobina:

$$X_m = \frac{E_g}{I\phi} = \frac{120}{3} = 40\Omega$$

5.3 LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR

En general, desde el punto de vista de su aplicación y diseño, los transformadores pueden ser *Monofásicos y Trifásicos.* Desde el punto de vista de su construcción, hay básicamente dos tipos de núcleos de hierro:

- El tipo núcleo.
- El tipo acorazado.

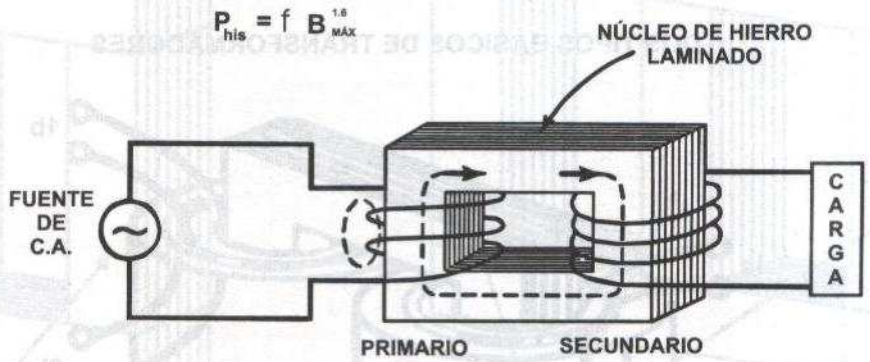
Estos diseños difieren unos de otros en la manera en que el núcleo se construye para alojar las bobinas. Eléctricamente, no hay mucha diferencia entre los dos tipos de construcción. De hecho, en ambos, las bobinas se colocan en forma concéntrica, estando la de bajo voltaje más cercana al núcleo por razones de aislamiento y la de alto voltaje en

la parte externa. Existen pequeñas diferencias en cuanto a la distribución del flujo magnético en ambos tipos de núcleos, lo que hace que se presente una variación en el diseño de las bobinas.

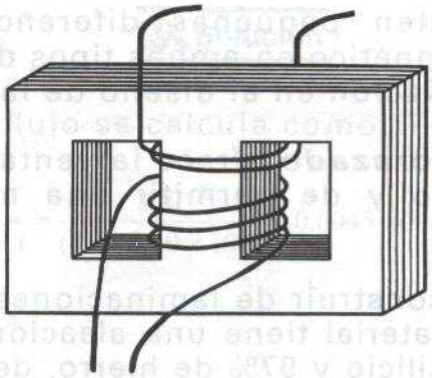
El diseño de ***núcleo acorazado*** ofrece la ventaja de proporcionar un mejor soporte mecánico y de permitir una mejor sujeción de las bobinas.

Los núcleos se pueden construir de laminaciones cortadas de rollos de acero. La mayoría del material tiene una aleación de aproximadamente un contenido de 3% de silicio y 97% de hierro, de aquí la denominación de *acero al silicio.* El contenido de silicio reduce las pérdidas de magnetización, en particular la parte correspondiente a las denominadas pérdidas por histéresis. Esta aleación hace al material un tanto quebradizo, lo cual trae como consecuencia algunos problemas de manufactura, por lo que hay un límite práctico en el contenido de silicio. La mayoría de los materiales laminados son ***"rolados en frío"*** y ofrecen la facilidad de que el grano sea orientado. Las laminaciones para transformadores están cubiertas por una o varias capas de barniz para aislar unas de otras.

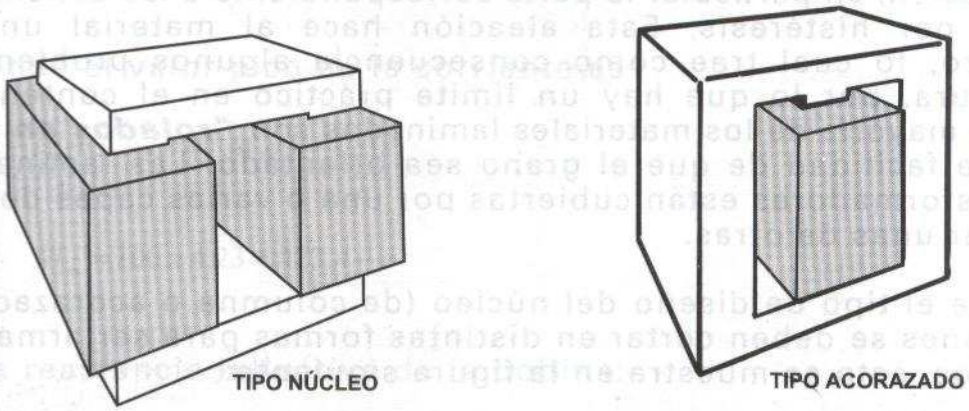
Según sea el tipo de diseño del núcleo (de columna o acorazado), las laminaciones se deben cortar en distintas formas para ser armadas en los núcleos, esto se muestra en la figura siguiente:



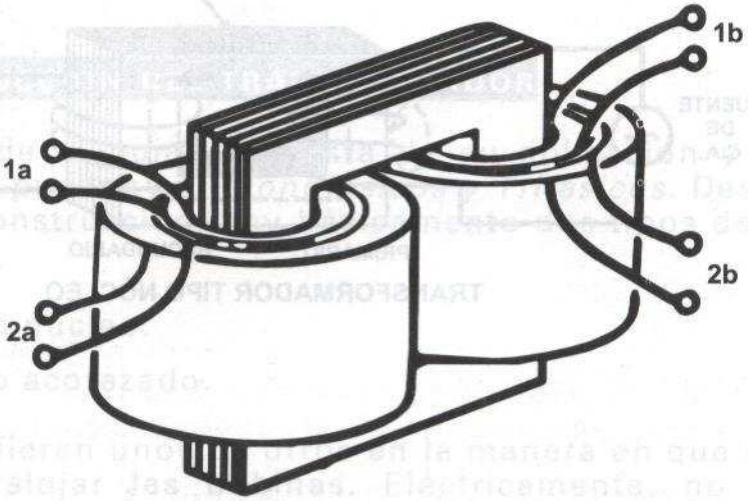
TRANSFORMADOR TIPO NÚCLEO



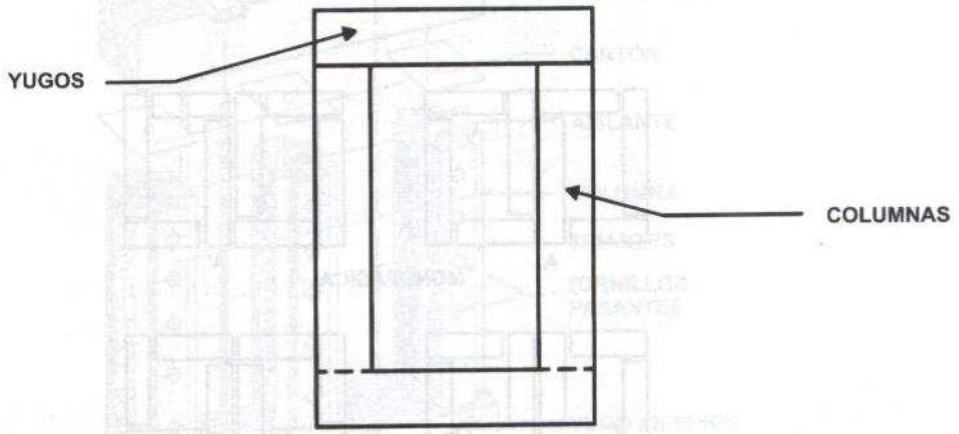
TRANSFORMADOR TIPO NÚCLEO ACORAZADO



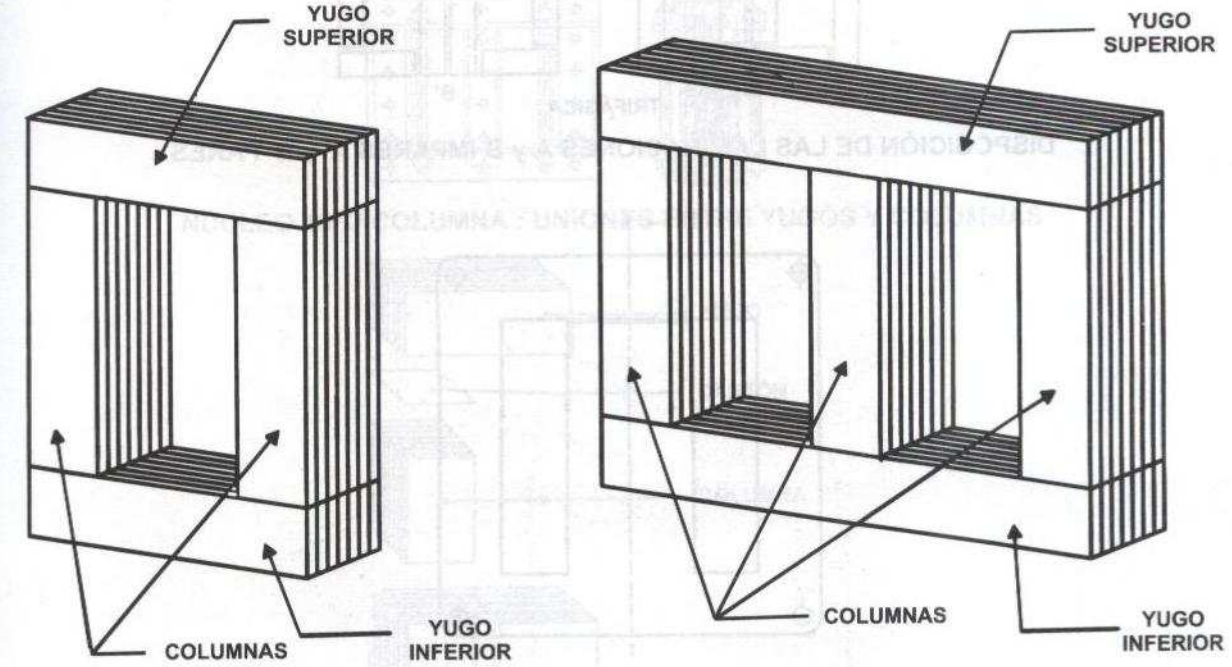
DOS TIPOS BÁSICOS DE TRANSFORMADORES



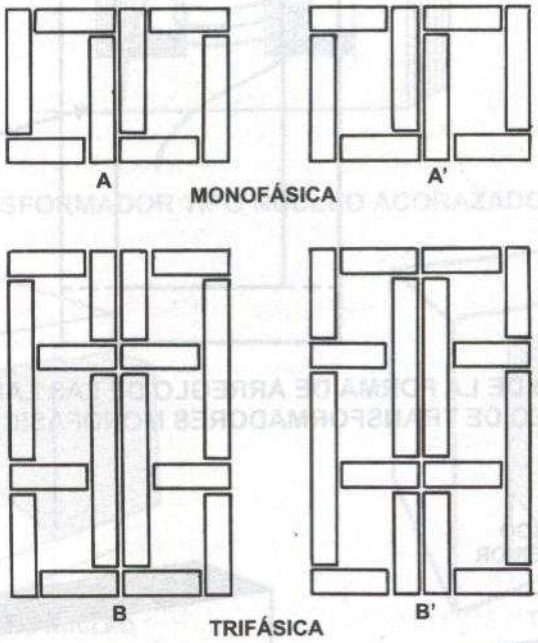
ARREGLO DE BOBINA Y NÚCLEO PARA UN TRANSFORMADOR TIPO NÚCLEO



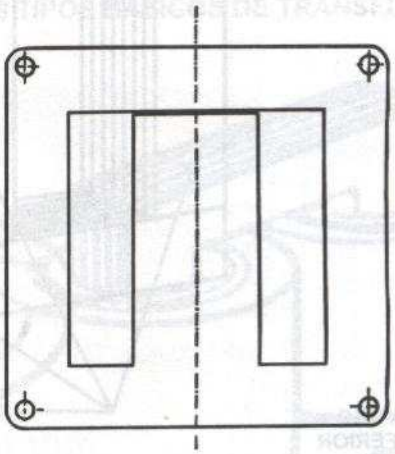
ASPECTO DE LA FORMA DE ARREGLO DE LAS LAMINACIONES PARA EL NÚCLEO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS TIPO COLUMNA



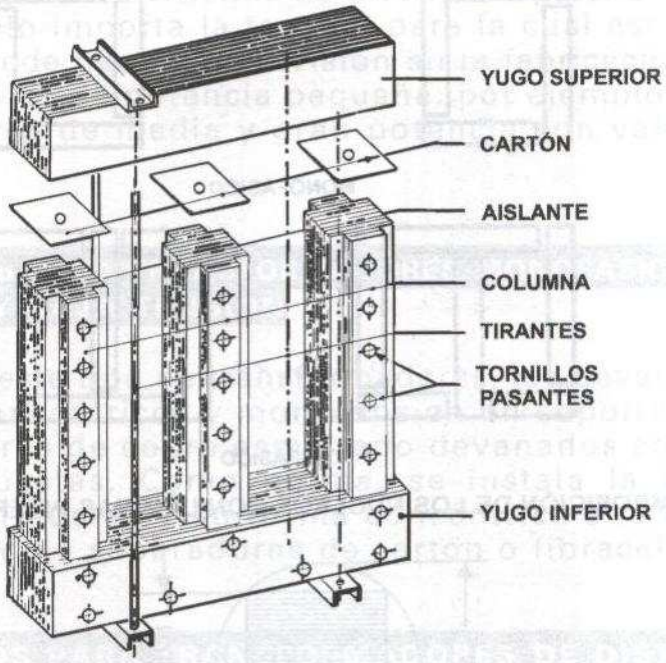
ASPECTO DE LOS NÚCLEOS TIPO COLUMNA

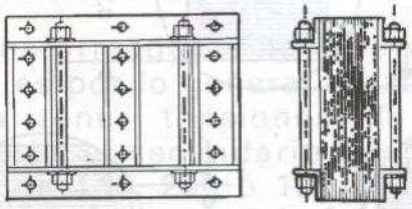


DISPOSICIÓN DE LAS LAMINACIONES A y B IMPARES A' y B' PARES

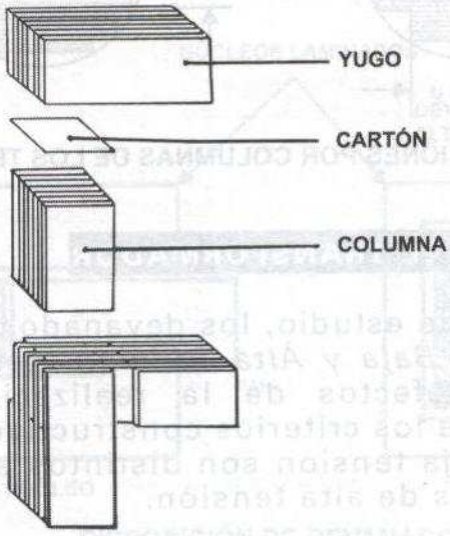


FORMA DEL NÚCLEO ACORAZADO

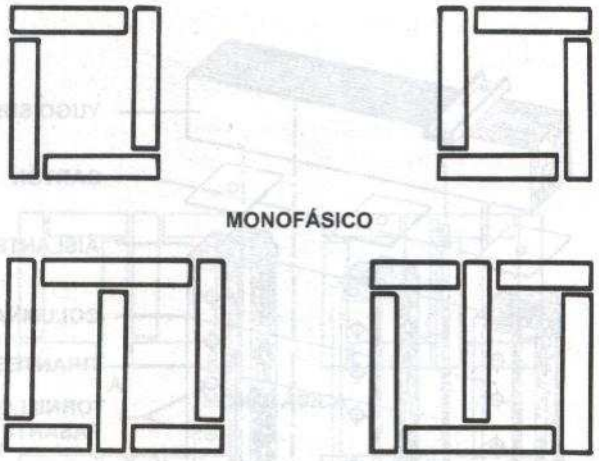




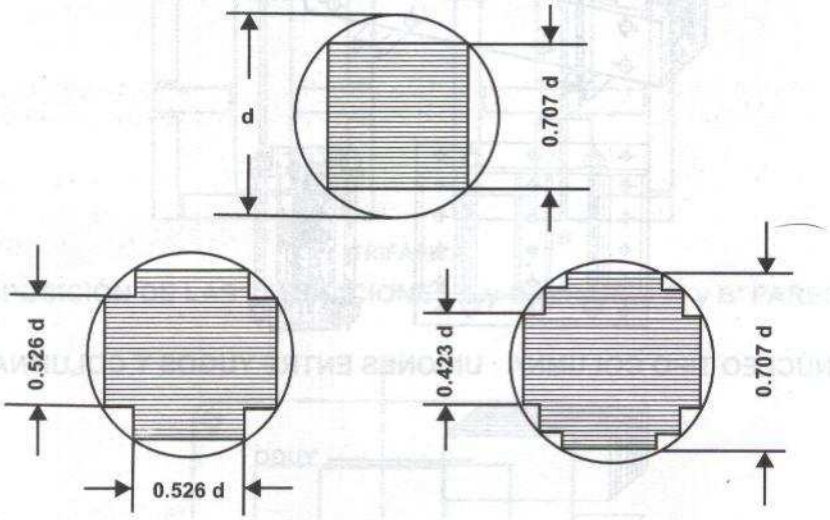
NÚCLEO TIPO COLUMNA : UNIONES ENTRE YUGOS Y COLUMNAS



UNIONES ENTRE COLUMNA Y YUGOS



COMPOSICIÓN DE LOS NÚCLEOS CON LÁMINAS INTERCALADOS



VARIOS TIPOS DE SECCIONES POR COLUMNAS DE LOS TRANSFORMADORES

5.4 Los devanados del transformador

Para los fines prácticos de estudio, los devanados de un transformador se pueden clasificar en *Baja y Alta Tensión.* Esta clasificación tiene importancia para los efectos de la realización práctica de los devanados, debido a que los criterios constructivos para la realización de los devanados de baja tensión son distintos a aquellos adoptados para la fabricación de los de alta tensión.

Por otro lado, cabe aclarar que las diferencias constructivas no tienen ninguna importancia en la función misma de los devanados, siempre

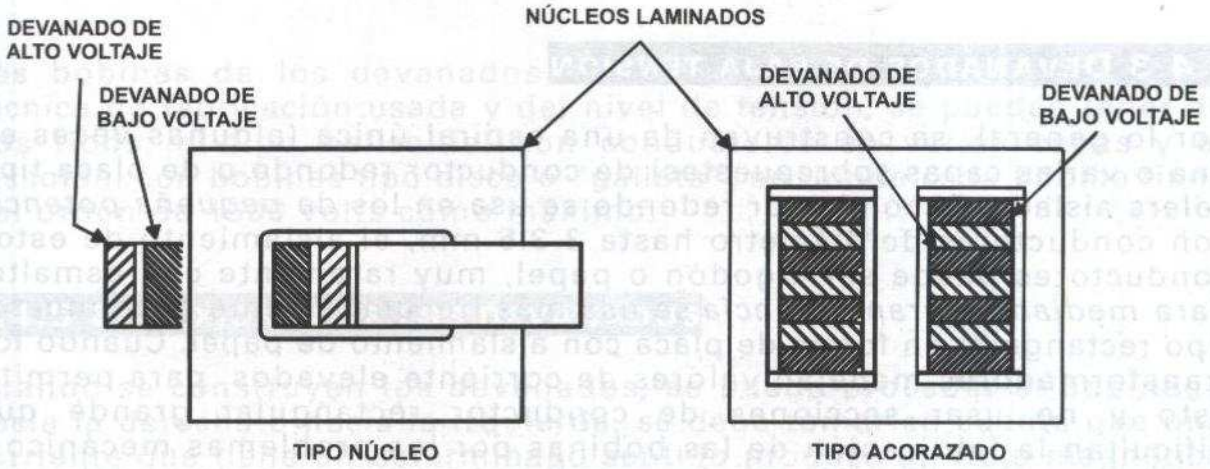
que éstos cumplan con los criterios de diseño adoptados y la construcción sea la correcta, sólo importa la tensión para la cual están previstos. De esta manera se puede hacer una división en la fabricación de devanados para transformadores de potencia pequeña, por ejemplo: de 1 a 5 KVA y los transformadores de media y gran potencia con valores superiores a los anteriores.

5.4.1 DEVANADOS PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE PEQUEÑA POTENCIA Y BAJA TENSIÓN

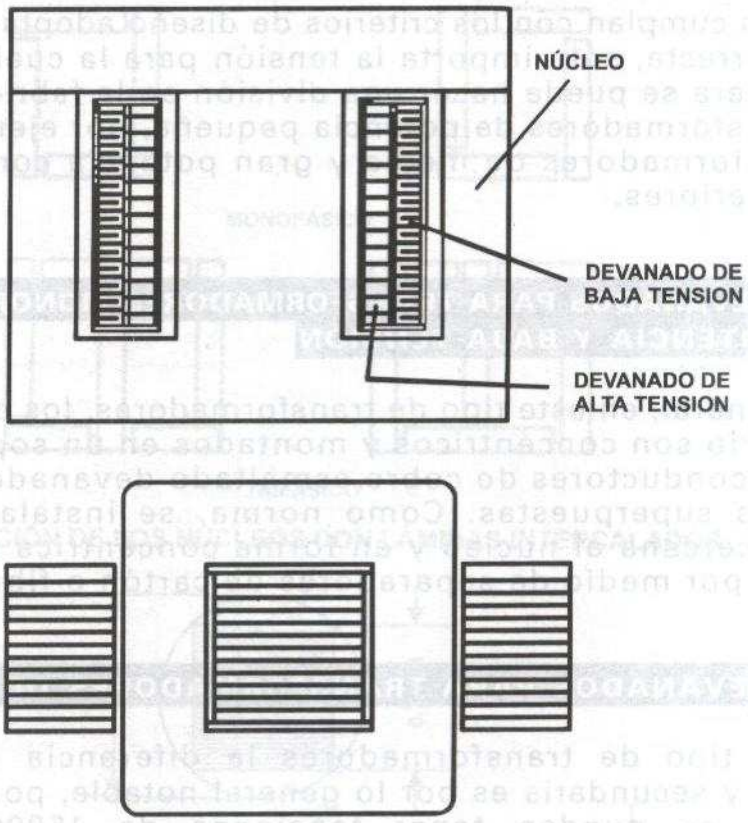
Por lo general, en este tipo de transformadores, los devanados primario y secundario son concéntricos y montados en un soporte aislante único. Se usan conductores de cobre esmaltado devanados sobre un molde y en capas superpuestas. Como norma, se instala la bobina de baja tensión cercana al núcleo y en forma concéntrica a la de alta tensión, dividida por medio de separadores de cartón o fibracel.

5.4.2 DEVANADOS PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

En este tipo de transformadores la diferencia entre las tensiones primaria y secundaria es por lo general notable, por ejemplo, en el lado primario se pueden tener tensiones de 15000, 13200, 23000 ó 34500 V, en tanto que en el secundario pueden haber tensiones según el tipo de utilización de 440, 220 ó 127 V, lo que hace que se tengan criterios constructivos distintos para la fabricación, por lo que se tratan por separado.



DISPOSICIÓN DE DEVANADOS



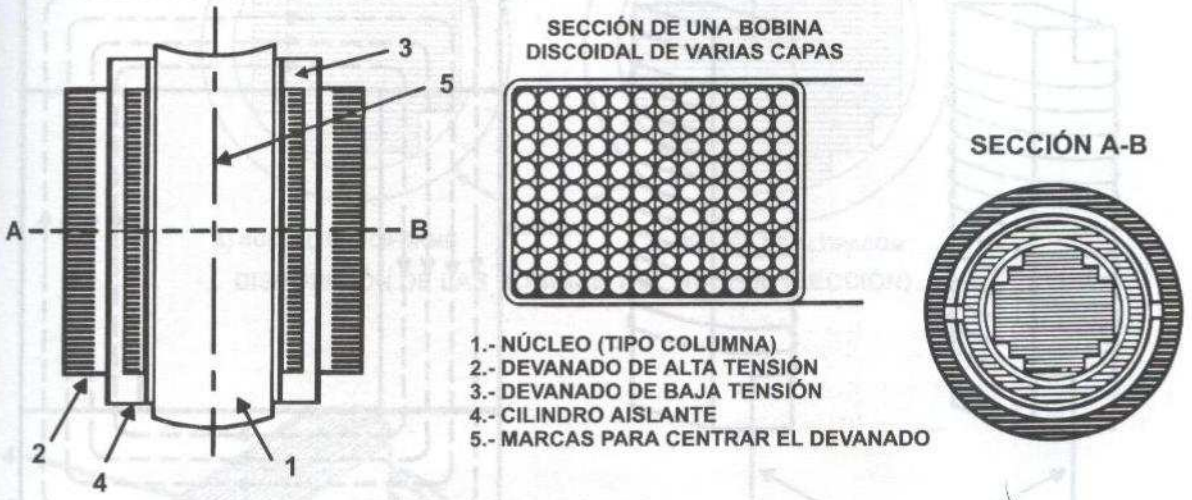
DISPOSICIÓN DE LOS DEVANADOS DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO TIPO SECO DE POTENCIA PEQUEÑA (10-500 VA) PARA BAJA TENSIÓN

5.4.3 DEVANADOS DE BAJA TENSIÓN

Por lo general, se construyen de una espiral única (algunas veces en una o varias capas sobrepuestas) de conductor redondo o de placa tipo solera aislada. El conductor redondo se usa en los de *pequeña potencia* con conductores de diámetro hasta 3-3.5 mm, el aislamiento de estos conductores puede ser algodón o papel, muy raramente con esmalte. Para *mediana y gran potencia* se usa más frecuentemente el conductor tipo rectangular en forma de placa con aislamiento de papel. Cuando los transformadores manejan valores de corriente elevados, para permitir esto y no usar secciones de conductor rectangular grande que dificultan la fabricación de las bobinas por los problemas mecánicos, se pueden usar las placas o pequeñas soleras rectangulares (algunas veces cuadradas) en paralelo.

5.4.4 DEVANADOS DE ALTA TENSIÓN

En los transformadores de potencia tipo distribución, los devanados de alta tensión con muchas espiras y corriente relativamente baja, son conductores circulares con diámetros máximos de 2.5 a 3.0 milímetros.



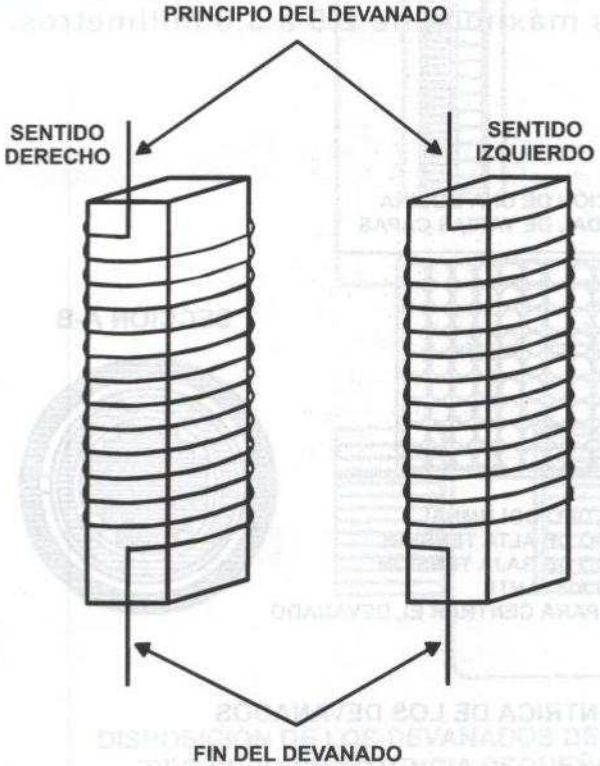
DISPOSICIÓN CONCÉNTRICA DE LOS DEVANADOS

Las bobinas de los devanados de alta tensión, dependiendo de la técnica de fabricación usada y del nivel de tensión, se pueden tener de dos tipos: el tipo helicoidal con conductores en varias capas y el discoidal con bobinas tipo disco o "galleta", en donde cada bobina tiene del orden de 1500 volts como máximo.

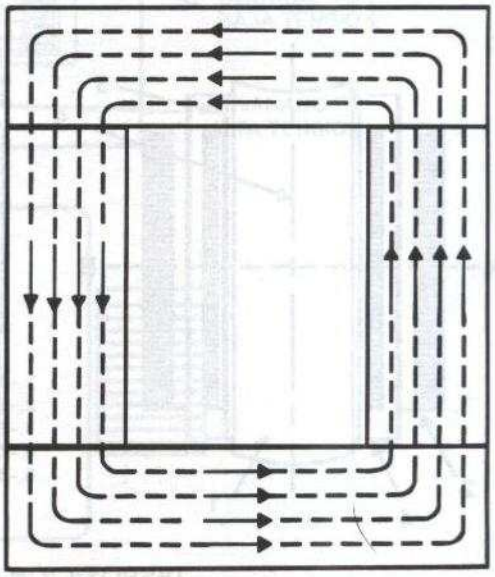
5.4.5 CONEXIONES DE LOS DEVANADOS

Cuando se construyen los devanados, se puede proceder el bobinado hacia la derecha o hacia la izquierda, se debe tomar en cuenta que una corriente que tiene un determinado sentido produce un flujo magnético en el sentido opuesto. Esto se debe considerar para que al efectuar las conexiones no se tengan flujo opuestos, esto quiere decir que cada

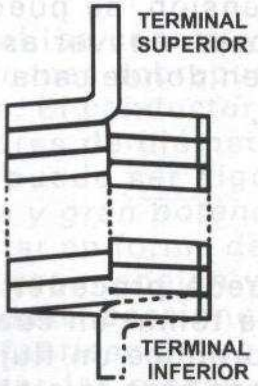
fábrica debe adoptar un sentido único de devanado para todas las bobinas, tanto secundarias como primarias.



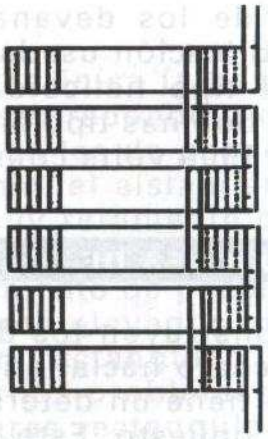
SENTIDO DEL DEVANADO DEL CONDUCTOR



SENTIDO DEL FLUJO EN EL NÚCLEO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

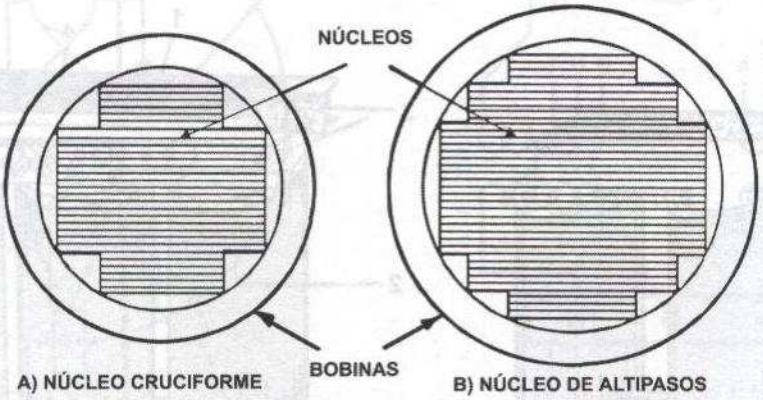


DE ESPIRAL ÚNICA

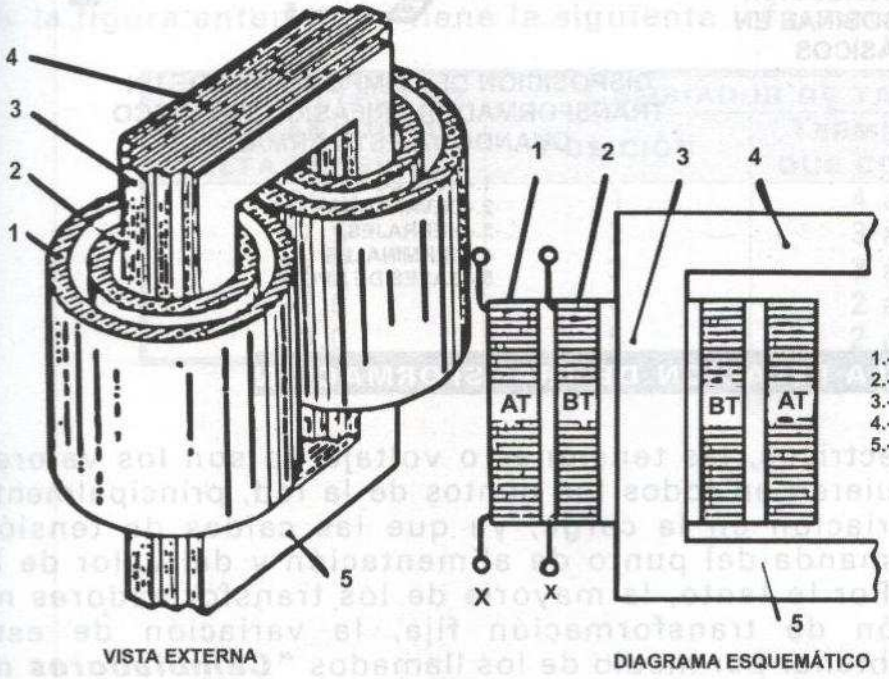


DE ESPIRAL SOBRE - PUESTA

DEVANADO EN ESPIRAL

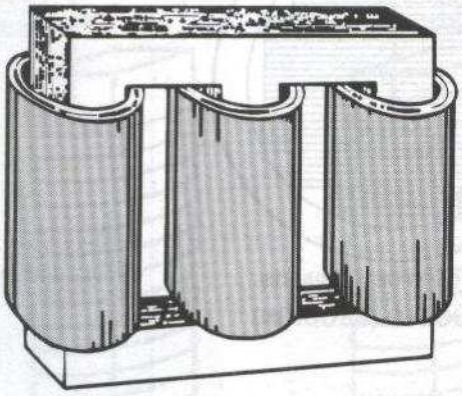


DISPOSICIÓN DE LAS BOBINAS Y EL NÚCLEO (SECCIÓN)

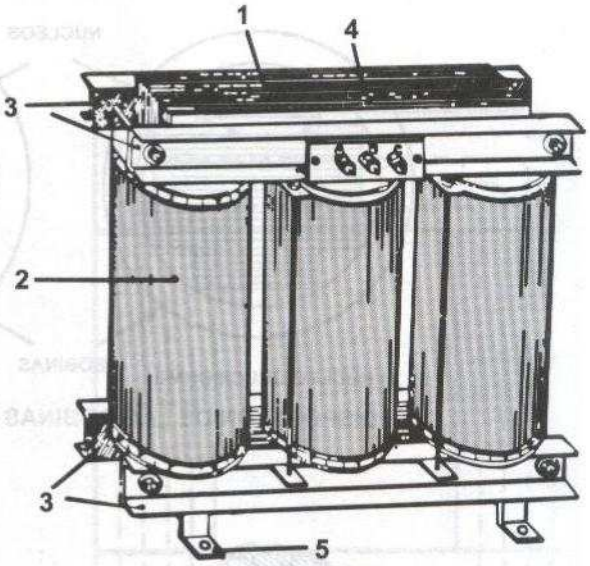


1.- DEVANADO DE ALTA TENSIÓN
2.- DEVANADO DE BAJA TENSIÓN
3.- PIERNA DEL NÚCLEO
4.- YUGO SUPERIOR
5.- YUGO INFERIOR

DISPOSICIÓN DE LAS BOBINAS DE ALTA TENSIÓN Y BAJA TENSIÓN



PRINCIPIO DE CONSTRUCCIÓN Y DISPOSICIÓN DE BOBINAS EN NÚCLEOS TRIFÁSICOS

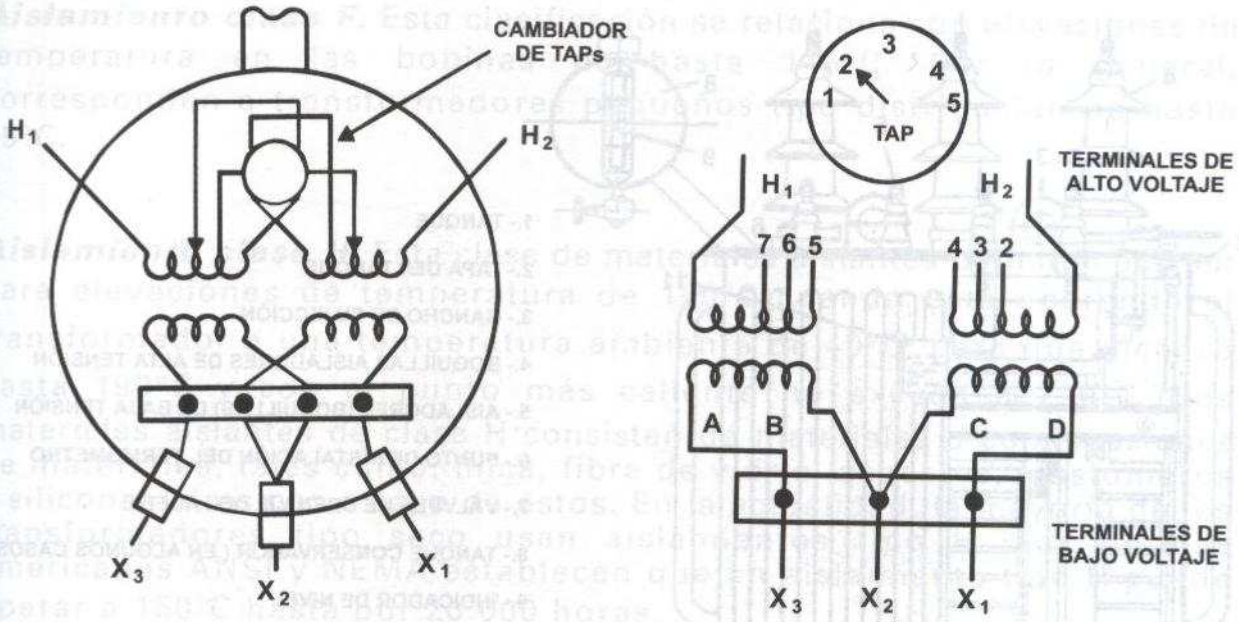


DISPOSICIÓN DE COMPONENTES DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TIPO SECO CUANDO YA ESTA ARMADO

1.- NÚCLEO
2.- DEVANADOS
3.- HERRAJES
4.- TERMINALES
5.- BASES DE APOYO

5.4.6 CAMBIO EN LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

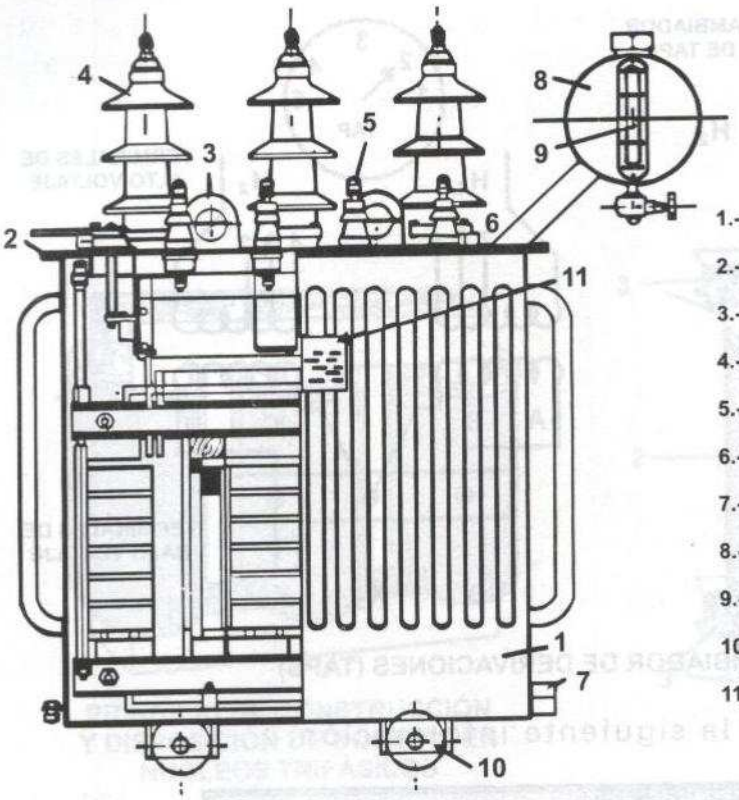
En los sistemas eléctricos, las tensiones o voltaje no son los valores exactos que se requieren en todos los puntos de la red, principalmente por razones de variación en la carga, ya que las caídas de tensión dependen de la demanda del punto de alimentación y del valor de la carga alimentada. Por lo tanto, la mayoría de los transformadores no tienen una relación de transformación fija, la variación de esta relación se puede obtener por medio de los llamados ***"Cambiadores de derivaciones o de Taps"***, éstos, lo que hacen es cambiar de posición para modificar el número de espiras y, se instalan normalmente en el devanado de alto voltaje, según se muestra en la siguiente figura:



LA FUNCIÓN DEL CAMBIADOR DE DERIVACIONES (TAPS)

De la figura anterior, se tiene la siguiente información:

% DE VOLTAJE EN EL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	CAMBIADOR DE TAPS	
	POSICIÓN	TERMINALES QUE CONECTA
100.0	1	4 a 5
97.5	2	3 a 5
95.0	3	3 a 6
92.5	4	2 a 6
90.0	5	2 a 5



1.- TANQUE
2.- TAPA DEL TANQUE
3.- GANCHO DE SUJECCIÓN
4.- BOQUILLAS AISLADORES DE ALTA TENSIÓN
5.- AISLADORES (BOQUILLAS) DE BAJA TENSIÓN
6.- PUNTO DE INSTALACIÓN DEL TERMÓMETRO
7.- VÁLVULA DE DRENAJE DEL ACEITE
8.- TANQUE CONSERVADOR (EN ALGUNOS CASOS)
9.- INDICADOR DE NIVEL
10.- RUEDAS DE ROLLAR
11.- PLACA DE DATOS DEL TRANSFORMADOR

VISTA DE UN TRANSFOR MADOR DE POTENCIA

5.5 LOS AISLAMIENTOS EN TRANSFORMADORES

Como la mayoría de las máquinas eléctricas, en su vida, prácticamente los transformadores dependen del comportamiento de sus aislamientos para las condiciones normales de operación. Por esta razón, las asociaciones de fabricantes de equipo eléctrico y las normas nacionales e internacionales han designado básicamente cuatro tipos de aislamientos con especificaciones y límites de temperatura. Esta clasificación es la siguiente:

Aislamiento clase A. Diseñado para operar a no más de 55°C de elevación de temperatura, que es el próximo al punto de ebullición del agua, pero en el caso de los transformadores tipo seco, previene accidentes con materiales combustibles en el área con el transformador.

Aislamiento clase B. La elevación de temperatura puede no exceder los 80°C en las bobinas, por lo general estos transformadores son más pequeños que los que usan aislamientos clase A.

Aislamiento clase F. Esta clasificación se relaciona con elevaciones de temperatura en las bobinas de hasta 115°C. Por lo general, corresponden a transformadores pequeños tipo distribución de hasta 25°C.

Aislamiento clase H. Esta clase de materiales aislantes permiten diseñar para elevaciones de temperatura de 150°C cuando está operando el transformador a una temperatura ambiente de 40°C, para que alcance hasta 190°C y con el punto más caliente no exceda a 220°C. Los materiales aislantes de clase H consisten de materiales o combinaciones de materiales, tales como: mica, fibra de vidrio, asbestos, elastómeros y silicones o resinas a base de éstos. En la actualidad, la mayoría de los transformadores tipo seco usan aislamientos tipo H. Las normas americanas ANSI y NEMA establecen que un aislamiento tipo H puede operar a 150°C hasta por 20 000 horas.

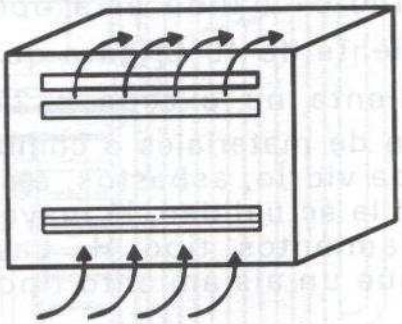
5.6 MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO DE TRANSFORMADORES

Para prevenir el rápido deterioro de los materiales aislantes dentro de un transformador, se deben proveer los medios de enfriamiento adecuados, tanto para el núcleo como para los devanados.

Los transformadores con potencias inferiores a 50 KVA, se pueden enfriar por medio del flujo de aire circundante a los mismos. La caja metálica que los contiene se puede habilitar con rejillas de ventilación, de manera que las corrientes de aire puedan circular por convección sobre los devanados y alrededor del núcleo. Los transformadores un poco mayores se pueden construir de la misma manera, pero se puede usar la circulación forzada de aire limpio. Estos transformadores, llamados *tipo seco,* se usan por lo general en el interior de edificios, retirados de las atmósferas hostiles.

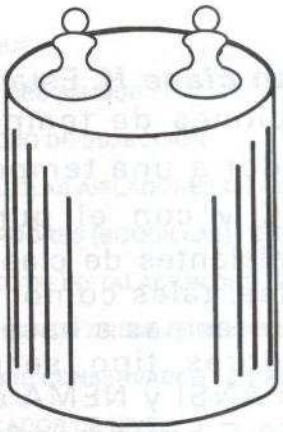
Los transformadores del tipo distribución, menores de 200 KVA, están usualmente inmersos en aceite mineral y encerrados en tanques de acero. El aceite transporta el calor del transformador hacia el tanque, donde es disipado por radiación y convección hacia el aire exterior del transformador. Debido a que el aceite es mejor aislante que el aire, se usa invariablemente en los transformadores de alta tensión.

En el caso de los transformadores enfriados por aceite, los tanques se construyen de lámina o placa de acero común. Estos tanques pueden ser: lisos, con paredes onduladas o con tubos radiadores, según sea la capacidad de disipación deseada.



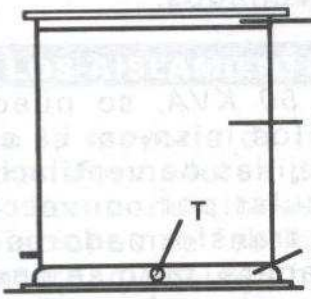
TIPO AA
ENFRIAMIENTO POR AIRE

POR CONVENCIÓN EL AIRE FRÍO ENTRA POR LA PARTE INFERIOR Y SALE POR LAS REJILLAS SUPERIORES.

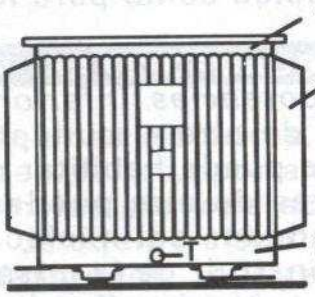


TIPO OA
ENFRIAMIENTO POR ACEITE

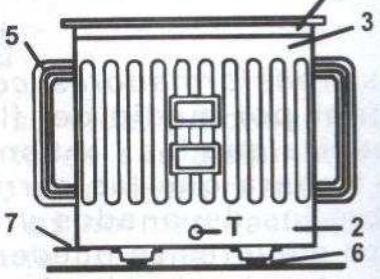
LAS BOBINAS SE ENCUENTRAN SUMERGIDAS EN UN TANQUE CON ACEITE. LA SUPERFICIE DEL TANQUE PUEDE SER LISA CORRUGADA O CON TUBOS.



TANQUE LISO



TANQUE ONDULADO

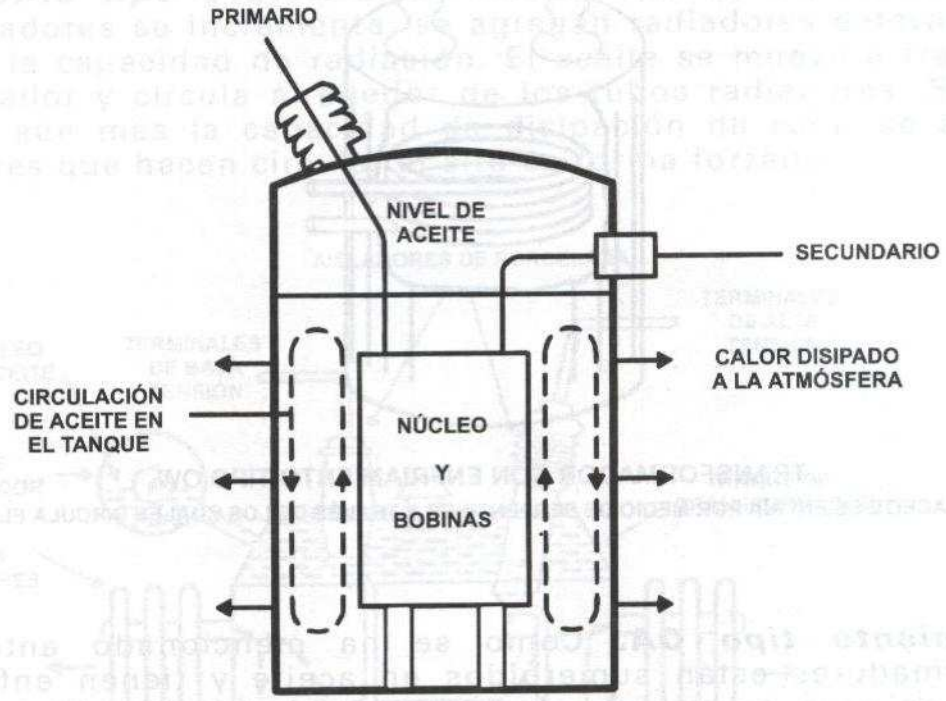


TANQUE CON TUBOS RADIADORES

TIPOS DE TANQUES PARA TRANSFORMADORES ENFRIADOS POR ACEITE

De la figura anterior:

1. Tapa del tanque.
2. Base del tanque.
3. Cuerpo del tanque.
4. Aletas (en su caso).
5. Tubos radiadores.
6. Ruedas de rolar.
7. Puntos de apoyo para maniobra.



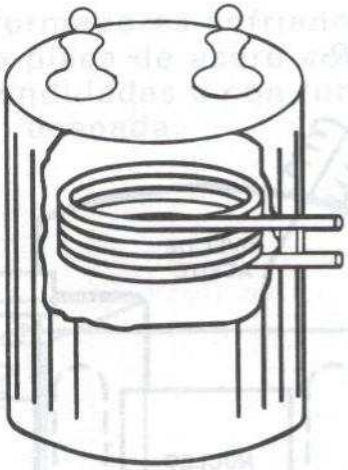
ENFRIAMIENTO DEL NÚCLEO Y BOBINAS POR CIRCULACIÓN DE ACEITE (TIPO OA)

De acuerdo con lo anterior, los tipos de enfriamiento para transformadores se clasifican como sigue:

Enfriamiento tipo AA. Para transformadores tipo seco de voltajes nominales no mayores de 15 kV y pequeñas capacidades, que tienen enfriamiento propio y no contienen aceite ni otros líquidos.

Enfriamiento tipo AFA. Es un transformador del tipo seco con enfriamiento por aire forzado. Su capacidad es simple, se basa en la circulación de aire forzado por ventiladores.

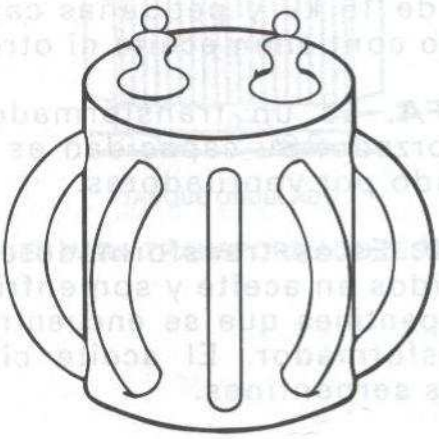
Enfriamiento tipo OW. Estos transformadores hoy en día no son comunes, están sumergidos en aceite y son enfriados por agua, que se conduce a través de serpentines que se encuentran en contacto directo con el aceite del transformador. El aceite circula por convección natural, alrededor de los serpentines.



TRANSFORMADOR CON ENFRIAMIENTO TIPO OW

EL ACEITE SE ENFRÍA POR MEDIO DE SERPENTINES A TRAVÉS DE LOS CUALES CIRCULA EL AGUA

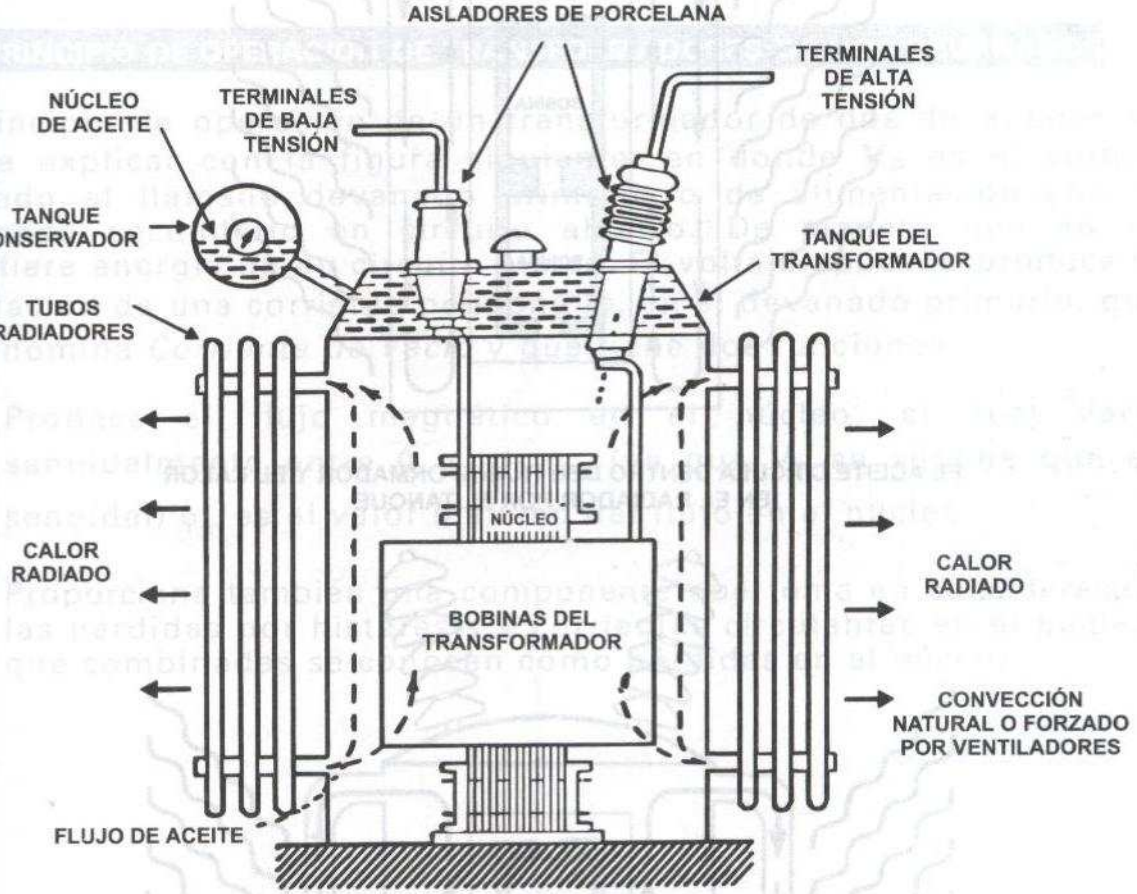
Enfriamiento tipo OA. Como se ha mencionado antes, estos transformadores están sumergidos en aceite y tienen enfriamiento propio, se usan en capacidades mayores de 50 KVA. El tanque que contiene al transformador y al aceite, con el objeto de que tenga una mayor capacidad de disipación de calor, puede estar corrugado o tener tubos radiadores. En los transformadores de potencia, el enfriamiento tipo OA se considera el tipo básico y se usa como norma para determinar o evaluar la capacidad y precio de otros.



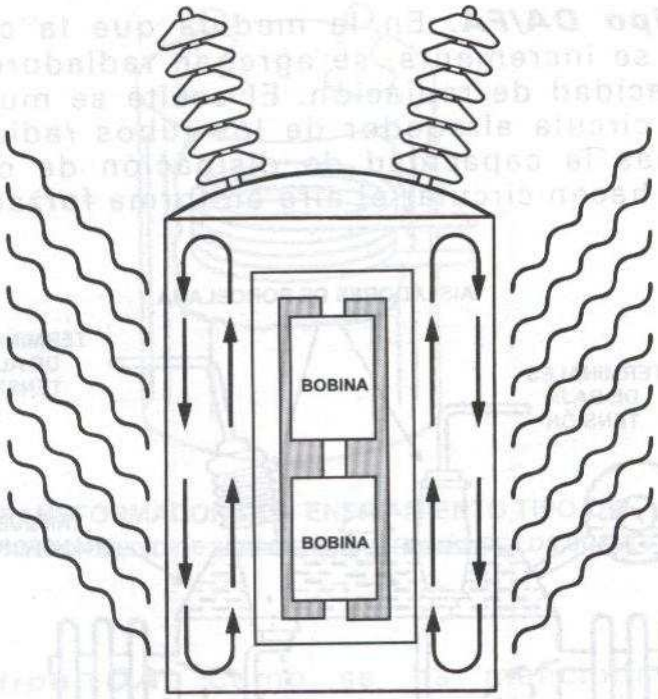
TRANSFORMADOR CON ENFRIAMIENTO TIPO OA

LOS TUBOS RADIADORES SIRVEN PARA DAR UNA MAYOR SUPERFICIE DE RADIACIÓN

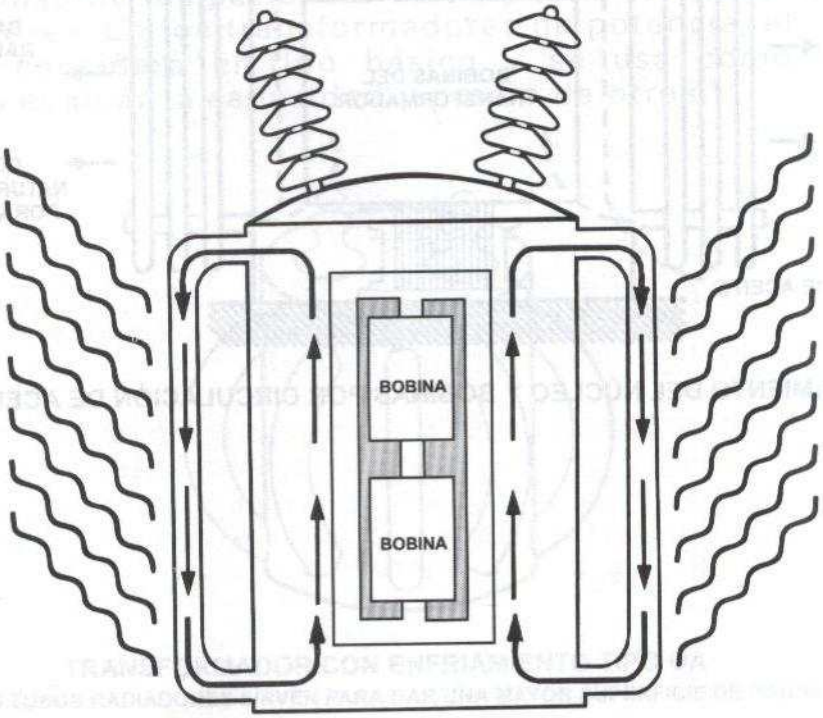
Enfriamiento tipo OA/FA. En la medida que la capacidad de los transformadores se incrementa, se agregan radiadores externos para aumentar la capacidad de radiación. El aceite se mueve a través del transformador y circula alrededor de los tubos radiadores. Si desea aumentar aún más la capacidad de disipación de calor se agregan ventiladores que hacen circular el aire en forma forzada.



ENFRIAMIENTO DEL NÚCLEO Y BOBINAS POR CIRCULACIÓN DE ACEITE



EL ACEITE CIRCULA DENTRO DEL TRANSFORMADOR Y EL CALOR EN EL RADIADOR POR EL TANQUE



EL ACEITE CIRCULA A TRAVÉS DE LOS TUBOS RADIADORES PARA INCREMENTAR EL ENFRIAMIENTO

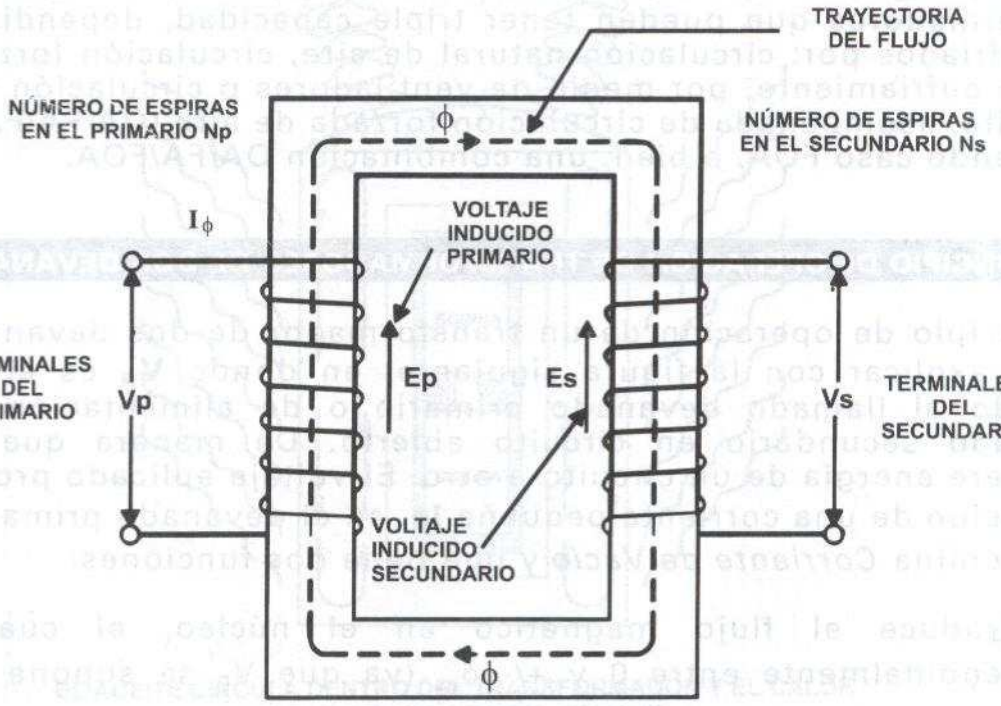
Algunos transformadores grandes se diseñan para tener una capacidad variable, según el tipo de enfriamiento usado, de tal forma que hay transformadores que pueden tener triple capacidad, dependiendo si son enfriados por: circulación natural de aire, circulación forzada del aire de enfriamiento, por medio de ventiladores o circulación forzada de aceite, acompañada de circulación forzada de aire (OA/FA/FA), o en el segundo caso FOA, o bien, una combinación OA/FA/FOA.

5.7 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS

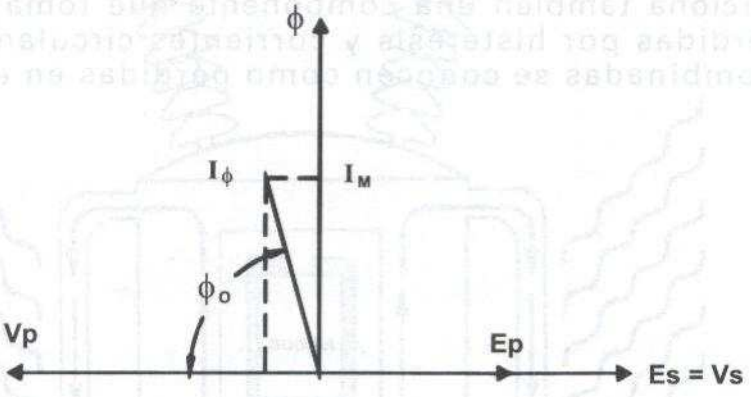
El principio de operación de un transformador de dos devanados se puede explicar con la figura siguiente, en donde $\mathbf{V_P}$ es el voltaje aplicado al llamado devanado primario o de alimentación con el devanado secundario en circuito abierto. De manera que no se transfiere energía de un circuito a otro. El voltaje aplicado produce la circulación de una corriente pequeña $\mathbf{I\phi}$, en el devanado primario, que se denomina *Corriente de Vacío* y que tiene dos funciones:

1. Produce el flujo magnético en el núcleo, el cual varía senoidalmente entre 0 y +/- ϕ_m (ya que V_P se supone que es senoidal) ϕ_m es el valor máximo del flujo en el núcleo.

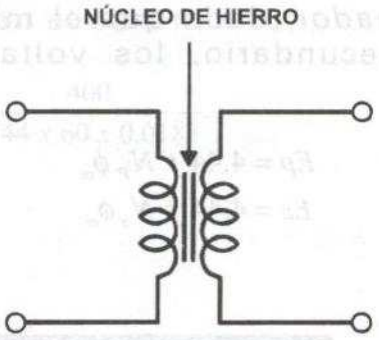
2. Proporciona también una componente que toma en consideración las pérdidas por histéresis y corrientes circulantes en el núcleo, que combinadas se conocen como pérdidas en el núcleo.



A) ESQUEMÁTICO



B) DIAGRAMA FASORIAL



C) SÍMBOLO DEL TRANSFORMADOR

TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS CON EL SECUNDARIO ABIERTO

La corriente de vacío ($I\phi$) tiene por lo general un valor de un porcentaje bajo de la corriente nominal (del 1 al 4% dependiendo de la capacidad).

Debido a que en vacío (sin carga) el transformador se comporta como inductancia, la corriente de vacío se atrasa con respecto al voltaje primario 90°. El ángulo θ_0 que aparece en la figura (b) representa el factor de potencia de vacío. La componente de la corriente de vacío I_m, llamada corriente de magnetización se obtiene como:

$$I_m = I\phi \; x \; Sen\,\phi_0$$

La segunda componente I_C representa la corriente que alimenta las pérdidas en el núcleo y está en fase con el voltaje V_P.

$$I_C = I\phi \; x \; Cos\,\phi_0$$

La corriente en vacío $I\phi$ es la suma fasorial de las componentes anteriores:

$$I\phi = I_m + I_C$$

De la expresión para el voltaje inducido en una bobina e indicada en los párrafos anteriores:

$$E = 4.44 \; x \; N \; x \; f \; x \; I\phi_m$$

En el caso del *Transformador*, dado que el mismo flujo eslabona los devanados primario y secundario, los voltajes inducidos en cada devanado son:

Para el primario: $Ep = 4.44\, f\, N_P\, \phi_m$ (1)

Para el secundario: $Es = 4.44\, f\, N_S\, \phi_m$ (2)

Donde:

N_P y N_S son las espiras del devanado primario y secundario respectivamente, si se dividen las ecuaciones (1) y (2) se obtiene la llamada *Relación de Transformación* (a).

$$a = \frac{E_P}{E_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

Ejemplo

El devanado primario de un transformador de 6600 V, 60 Hz, tiene 1320 espiras. Calcular:

a) El flujo máximo ϕ_m.
b) El número de espiras en el devanado secundario, si éste opera a 400 V.

Solución

a) De la ecuación para el voltaje inducido en el primario:

$$E_P = 4.44\, x\, f\, x\, N_P\, x\, \phi_m$$

$$\phi_m = \frac{E_P}{4.44\, x\, f\, x\, N_P}$$

$$\phi_m = \frac{6600}{4.44\, x\, 60\, x\, 1320} = 0.0188\, Wb$$

b) El número de espiras en el secundario:

$$N_S = \frac{E_S}{4.44\ x\ f\ x\ \phi_m} = \frac{400}{4.44\ x\ 60\ x\ 0.0188}$$

$$N_S = 80\ espiras$$

5.8 POTENCIA EN LOS TRANSFORMADORES

Suponiendo que en un transformador de dos devanados la potencia de entrada es igual a la potencia de salida, lo cual en la práctica no representa una mala suposición, considerando su alta eficiencia, es decir, se está considerando como un transformador ideal (se desprecian las pérdidas).

$$P_{entrada} = P_{salida}$$

$$V_P\ I_P\ x\ Cos\ \phi_P = V_S\ I_S\ x\ Cos\ \phi_S$$

Donde el factor de potencia en los devanados primario y secundario es el mismo, por lo tanto:

$$V_P\ I_P = V_S\ I_S$$

De donde se obtiene:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{E_P}{E_S} = a$$

Ejemplo

Un transformador tiene: 100 espiras en el devanado primario, 2500 en el *secundario y está conectado a una fuente de 120 V, 60 Hz. La* corriente de magnetización es de 3A. Calcular:

a) El voltaje eficaz en las terminales del secundario.

b) El valor pico del voltaje en terminales del secundario.

c) El voltaje instantáneo a través del secundario cuando el voltaje instantáneo en el primario es de 40V.

Solución

a) La relación entre las espiras es:

$$N_S / N_P = \frac{2500}{100} = 25$$

De acuerdo con la expresión para la relación de transformación:

$$a = \frac{E_S}{E_P}$$

El voltaje en el secundario es: $E_S = a\,x\,E_P = 25\,x\,120 = 3000\,V$

b) Como el voltaje varía en forma senoidal, el valor pico del voltaje secundario es: $E_m = \sqrt{2}$

$$E_S = 1.414\,x\,3000 = 4242\,V$$

c) Para calcular el valor instantáneo, basta considerar que el voltaje secundario es siempre 25 veces mayor que E_P, es decir:

$$E_S = 25\,x\,40 = 1000\,V$$

Ejemplo

Un transformador monofásico de 100 KVA tiene 60 espiras con el devanado secundario. Con voltaje primario V_P =2400 V y voltaje secundario V_S= 240 V. Calcular:

a) Los valores de las corrientes en el primario y en el secundario.

b) El número de espiras en el devanado primario.

Solución

a) La corriente en el devanado primario es:

$$I_P = \frac{kVA\ x\ 1000}{V_P} = \frac{100\ x\ 1000}{2400} = 41.7A$$

La corriente en el secundario se obtiene de la relación:

$$I_S = \frac{kVA\ x\ 1000}{V_S} = \frac{100\ x\ 1000}{240} = 417A$$

b) La relación de transformación:

$$a = \frac{V_P}{V_S} = \frac{2400}{240} = 10$$

Por lo tanto:

$$a = \frac{N_P}{N_S} \qquad N_P = a\,N_S = 10\ x\ 60 = 600\ espiras$$

Ejemplo

Se tiene un transformador de 7.5 KVA, 4600/230 Volts, 60 Hz., que se ha diseñado a 2.6 volts/espiras en las bobinas de sus devanados. Suponiendo que es un transformador ideal, calcular lo siguiente:

a) La relación de transformación como elevador.

b) La relación de transformación como reductor.

c) El número total de espiras en la bobina de alta tensión.

d) El número de espiras en el devanado de baja tensión.

e) La corriente primaria como reductor.

f) La corriente secundaria como reductor.

Solución

a) Como transformador elevador el voltaje primario es: $V_1 = 230V$;

La relación de transformación es entonces:

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{230}{4600} = 0.05$$

b) Como transformador reductor el voltaje primario es V_1 = 4600 V.

La relación de transformación es ahora:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{4600}{230} = 20$$

c) Con un valor de 2.6 volts/espira, se puede determinar el número de espiras como:

$$N_1 = \frac{volts}{volts\,/\,espira} = \frac{4600}{2.6} = 1769\ espiras$$

d) Para el lado de bajo voltaje:

$$N_2 = \frac{230}{2.6} = 88.5\ espiras$$

e) Como transformador reductor el lado de 4600 V es el primario y la corriente es:

$$I_1 = \frac{7.5\ x\ 1000}{4600} = 1.63A$$

f) La corriente en el lado de 230 V es:

$$I_2 = \frac{750}{230} = 32.6A$$

Ejemplo

Un transformador reductor de 2300/230 V tiene una potencia de 750 KVA A 60 Hz. Sus devanados tienen los siguientes valores de resistencia e inductancia en el primario y secundario respectivamente: R_1 = 0.093 Ω, X_{L1} = 0.280 Ω, R_2 =0.00093 Ω y X_{L2}=0.00280 Ω. Si el transformador es monofásico y opera a su valor nominal, calcular lo siguiente:

a) Las corrientes primaria y secundaria.

b) Las impedancias de los devanados primario y secundario.

c) Las caídas de voltaje en los devanados primario y secundario.

d) Los voltaje inducidos en el primario y secundario.

e) La relación de transformación.

f) La relación de los voltajes terminales.

Solución

a) Las corrientes primaria y secundaria:

$$I_1 = \frac{KVA\,x\,1000}{V_1} = \frac{750000}{2300} = 326.1\,A$$

$$I_2 = \frac{KVA\,x\,1000}{V_2} = \frac{750000}{230} = 3261\,A$$

b) La impedancia del primario:

$$Z_1 = \sqrt{(R_1)^2 + (X_{L1})^2}$$

$$Z_1 = \sqrt{(0.093)^2 + (0.280)^2} = 0.295\,\Omega$$

La impedancia del secundario.

$$Z_2 = \sqrt{(R_2)^2 + (X_{L2})^2}$$

$$Z_2 = \sqrt{(0.00093)^2 + (0.00280)^2} = 0.00295\,\Omega$$

c) Las caídas de voltaje en cada uno de los devanados son:

$$I_1 Z_1 = 326.1\,x\,0.295 = 96.2\,V$$

$$I_2 Z_2 = 3261\,x\,0.00295 = 9.62\,V$$

d) El voltaje inducido en cada devanado es:

$$E_1 = V_1 - I_1 Z_1 = 2300 - 96.2 = 2204\,V$$

$$E_2 = V_2 + I_2 Z_2 = 230 + 9.62 = 239.6\,V$$

e) La relación de transformación con los voltajes inducidos es:

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{2204}{239.6} = 9.198$$

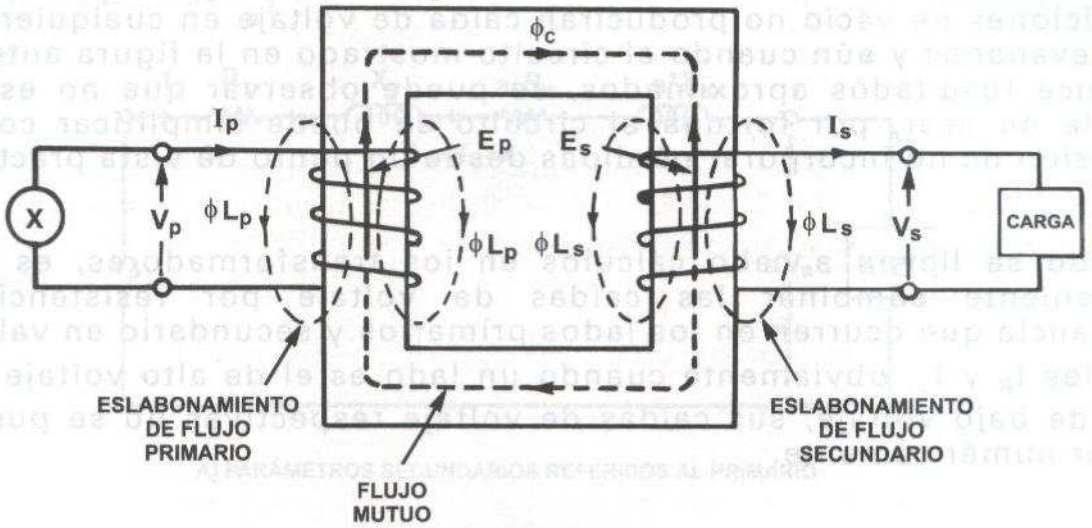
f) La relación de transformación con los voltaje terminales:

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2300}{230} = 10$$

5.9 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO

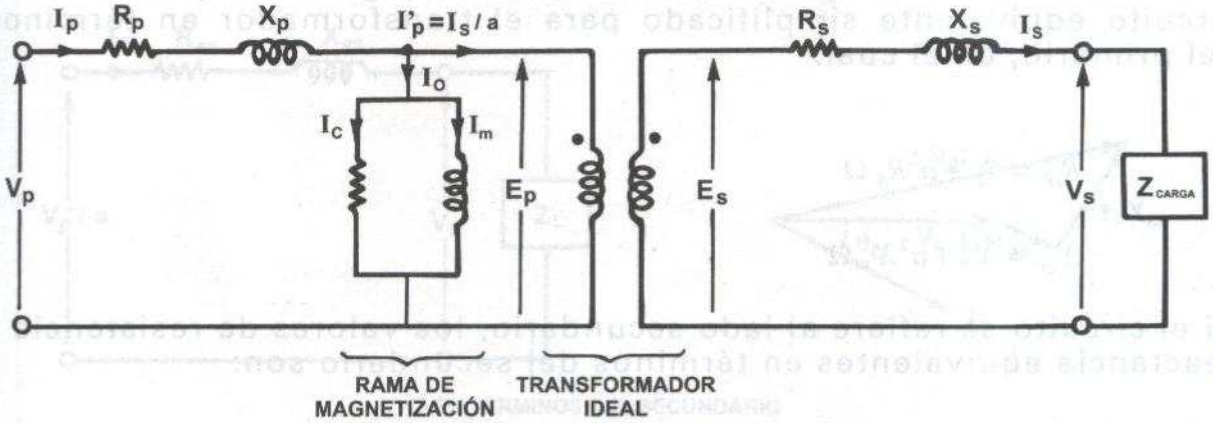
Uno de los aspectos que se deben considerar para el estudio de los circuitos equivalentes del transformador, son los eslabonamientos de flujo en los circuitos primario y secundario, que tienen variantes, según el transformador opere en vacío o con carga. La corriente de carga que circula por el devanado primario crea una componente de flujo que eslabona únicamente el devanado primario y se le conoce como el ***"eslabonamiento de flujo primario"***, el llamado ***"eslabonamiento de flujo secundario"***, da lugar a un voltaje inducido que no está balanceado por el voltaje inducido en el devanado primario, y en forma similar, el voltaje inducido en el primario no está contra balanceado por el flujo en el secundario, y en consecuencia, estos dos voltajes inducidos tienen un comportamiento como caídas de voltaje, que se le conoce por lo

general como **caída de voltaje por reactancia de dispersión**. Adicionalmente, cada devanado tiene una resistencia que produce una caída de voltaje que se conoce como caída de voltaje resistiva.



FLUJOS DISPERSOS

Cuando se toman en consideración estas caídas de voltaje adicionales, se puede formar el diagrama para el circuito equivalente de un transformador práctico, como se muestra en la siguiente figura, en donde se debe observar que se muestra la rama de magnetización, la cual para los fines del circuito equivalente del transformador, se puede eliminar.



CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

También se considera en ciertos casos, despreciable el valor de la corriente de vacío, esto se justifica con el hecho de que rara vez es necesario predecir el comportamiento del transformador con tales precisiones y dado que las caídas de voltaje son todas directamente proporcionales a la corriente de carga, esto significa que las condiciones de vacío no producirán caída de voltaje en cualquiera de los devanados y aún cuando el circuito mostrado en la figura anterior produce resultados aproximados, se puede observar que no es tan simple de usar, por fortuna el circuito se puede simplificar con la precisión de no incorporar pérdidas desde un punto de vista práctico.

Cuando se llevan a cabo cálculos en los transformadores, es más conveniente combinar las caídas de voltaje por resistencia y reactancia que ocurren en los lados primarios y secundario en valores simples I_R y I_x, obviamente cuando un lado es el de alto voltaje y el otro de bajo voltaje, sus caídas de voltaje respectivas no se pueden sumar numéricamente.

En la siguiente figura, se muestra el primer paso para simplificar el diagrama del circuito equivalente de la figura anterior. Se ha estudiado que las impedancias secundarias se pueden reflejar a través del lado primario del transformador, en esto se toma en cuenta la relación de transformación.

En este proceso se elimina la rama de magnetización (que de hecho se toma en cuenta para la corriente de magnetización), en este circuito el voltaje en la carga que se refleja al lado primario es aV_S aplicado a la impedancia de la carga a^2Z_L, si en forma adicional se combinan los elementos resistivos y reactivos, resulta la figura (B) y esto es el circuito equivalente simplificado para el transformador en términos del primario, en el cual:

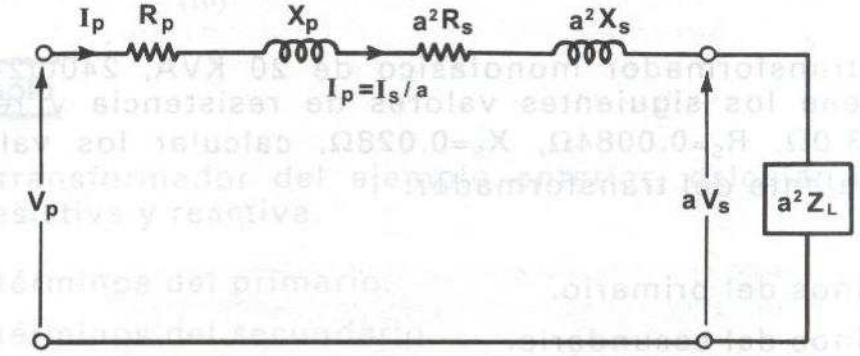
$$R_{eP} = R_P + a^2 R_S \ \Omega$$

$$X_{eP} = X_P + a^2 X_S \ \Omega$$

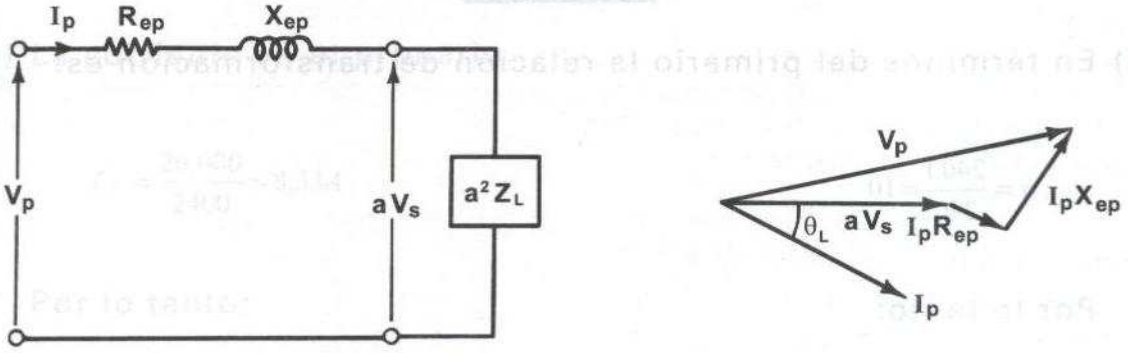
Si el circuito se refiere al lado secundario, los valores de resistencia y reactancia equivalentes en términos del secundario son:

$$R_{eS} = R_S + \frac{R_P}{a^2}(\Omega)$$

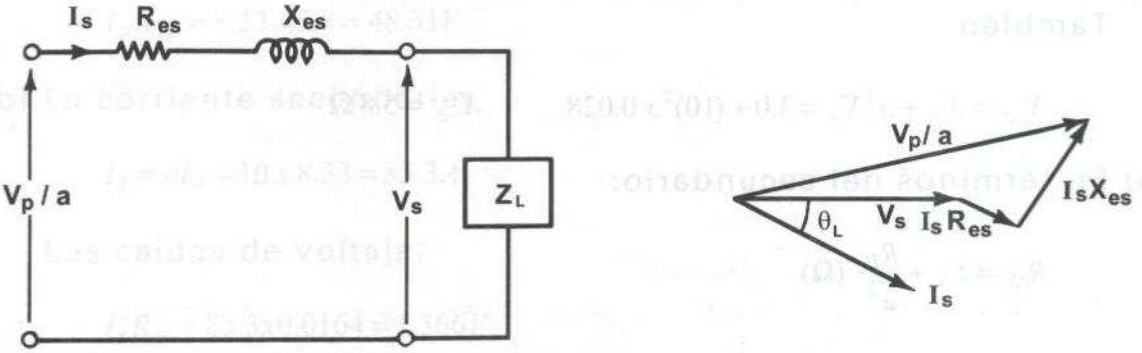
$$X_{eS} = X_S + \frac{X_P}{a^2}(\Omega)$$



A) PARÁMETROS SECUNDARIOS REFERIDOS AL PRIMARIO



B) EN TÉRMINOS DEL PRIMARIO



C) EN TÉRMINOS DEL SECUNDARIO

DESARROLLO DEL CIRCUITO SIMPLIFICADO DEL TRANSFORMADOR

El voltaje V_P/a es el voltaje terminal primario reflejado al lado secundario, estos circuitos equivalentes son por lo general más que adecuados para resolver las relaciones entre voltajes terminales.

Ejemplo

Se tiene un transformador monofásico de 20 KVA, 2400/240 volts, 60 Hz que tiene los siguientes valores de resistencia y reactancia R_P=0.8Ω, X_P=3.0Ω, R_S=0.0084Ω, X_S=0.028Ω, calcular los valores del circuito equivalente del transformador.

a) En términos del primario.

b) En términos del secundario.

Solución

a) En términos del primario la relación de transformación es:

$$a = \frac{2400}{240} = 10$$

Por lo tanto:

$$R_{eP} = R_P + a^2 R_S = 0.8 + (10)^2 \, x \, 0.0084 = 1.64\Omega$$

También:

$$X_{eP} = X_P + a^2 X_S = 3.0 + (10)^2 x \, 0.028 \qquad X_{eP} = 5.8\,\Omega$$

b) En términos del secundario:

$$R_{eS} = R_S + \frac{R_P}{a^2} \; (\Omega)$$

$$X_{eS} = X_S + \frac{X_P}{a^2} \; (\Omega)$$

$$R_{eS} = 0.0084 + \frac{0.8}{(10)^2} = 0.0164\ \Omega$$

$$X_{eS} = 0.028 + \frac{3.0}{(10)^2} = 0.058\ \Omega$$

Ejemplo

Para el transformador del ejemplo anterior, calcular las caídas de voltaje resistiva y reactiva.

a) En términos del primario.

b) En términos del secundario.

Solución

a) La corriente en el primario.

$$I_P = \frac{20{,}000}{2400} = 8.33A$$

Por lo tanto:

$$I_P R_{eP} = 8.33\,x\,1.64 = 13.66V$$

$$I_P X_{eP} = 8.33\,x\,5.8 = 48.31V$$

b) La corriente secundaria:

$$I_S = aI_P = 10\,x\,8.33 = 83.3A$$

Las caídas de voltaje:

$$I_S R_{eS} = 83.3x0.0164 = 1.366V$$

$$I_S X_{eS} = 83.3\,x\,0.058 = 4.831V$$

5.10 REGULACIÓN DE VOLTAJE

En los transformadores de potencia, como en el caso de los generadores síncronos, el concepto de regulación de voltaje está asociado con la caída de voltaje debida a la impedancia de la máquina y es una cantidad que se expresa por lo general en porciento, da una idea de qué caída de tensión se tiene y si excede o no los límites tolerables. Se calcula de acuerdo con la expresión.

$$\% R_{eg} = \frac{voltaje\ en\ vacío - voltaje\ a\ plena\ carga}{voltaje\ en\ vacío} x\ 100$$

5.11 PRUEBAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y EL RENDIMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

Para determinar el rendimiento en los transformadores de potencia, se debe considerar que éstos tienen cierto tipo de pérdidas eléctricas y magnéticas que es necesario evaluar. Éstas se clasifican como:

- Pérdidas en el fierro o núcleo.
- Pérdidas debido a la resistencia de los devanados (RI^2) o de efecto joule.
- Pérdidas adicionales.

Las pérdidas en el núcleo se miden con el circuito secundario abierto a los valores nominales de frecuencia y la tensión en el devanado primario (o secundario a circuito abierto).

Las pérdidas debidas a las resistencias en los devanados se calculan en base a los valores óhmicos de las resistencias medidas en corriente continua y referidas a 75°C de temperatura. Las corrientes de referencia para las condiciones de plena carga son las nominales de los devanados.

Las pérdidas adicionales se obtienen de la prueba de cortocircuito y se deben referir a la temperatura de 75°C, haciéndolas cambiar en proporción inversa a las variaciones de los valores de la resistencia óhmica en función de la corriente nominal.

5.11.1 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ÓHMICA

La medición de la resistencia óhmica de los devanados de los transformadores se realiza por el método del vóltmetro y el ampérmetro.

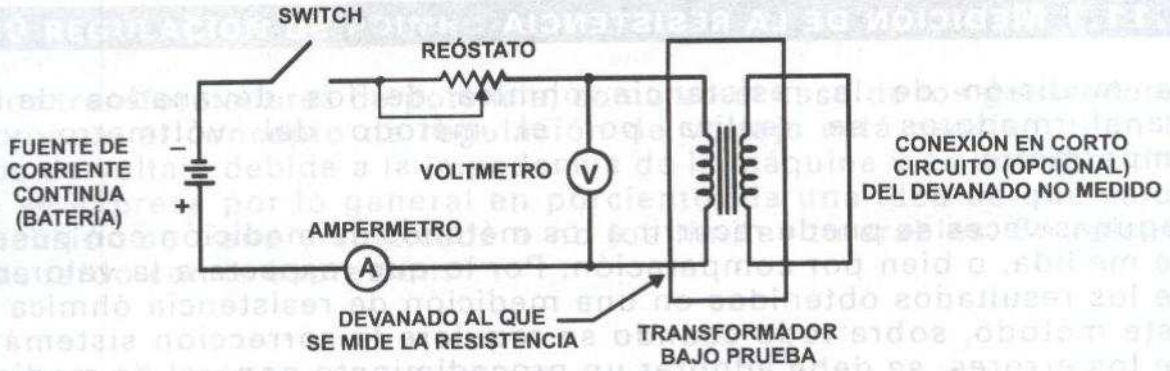
Algunas veces se puede recurrir a los métodos de medición con puentes de medida, o bien por comparación. Por lo que respecta a la valoración de los resultados obtenidos en una medición de resistencia óhmica por este método, sobre todo cuando se requiere la corrección sistemática de los errores, se debe adoptar un procedimiento general de medición de resistencia óhmica. A continuación, se indican los pasos principales para la medición de resistencia:

1. El diagrama indicado se debe usar para la medición de resistencia de valor bajo (devanado secundario) del orden de décimas de ohm, de otra manera, el vóltmetro se debe instalar antes del ampérmetro.

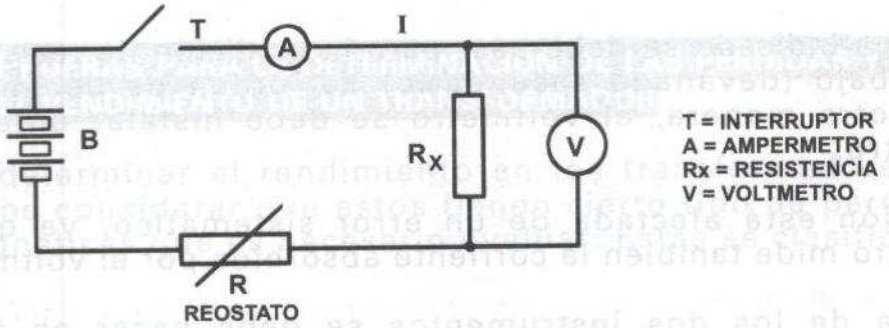
2. La medición está afectada de un error sistemático, ya que el ampérmetro mide también la corriente absorbida por el vóltmetro.

3. La lectura de los dos instrumentos se debe hacer en forma simultánea.

4. En la resistencia por medir, la corriente se debe mantener a un valor tal que no caliente sensiblemente la resistencia.



CONEXIONES PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA (ÓHMICA) DE DEVANADO



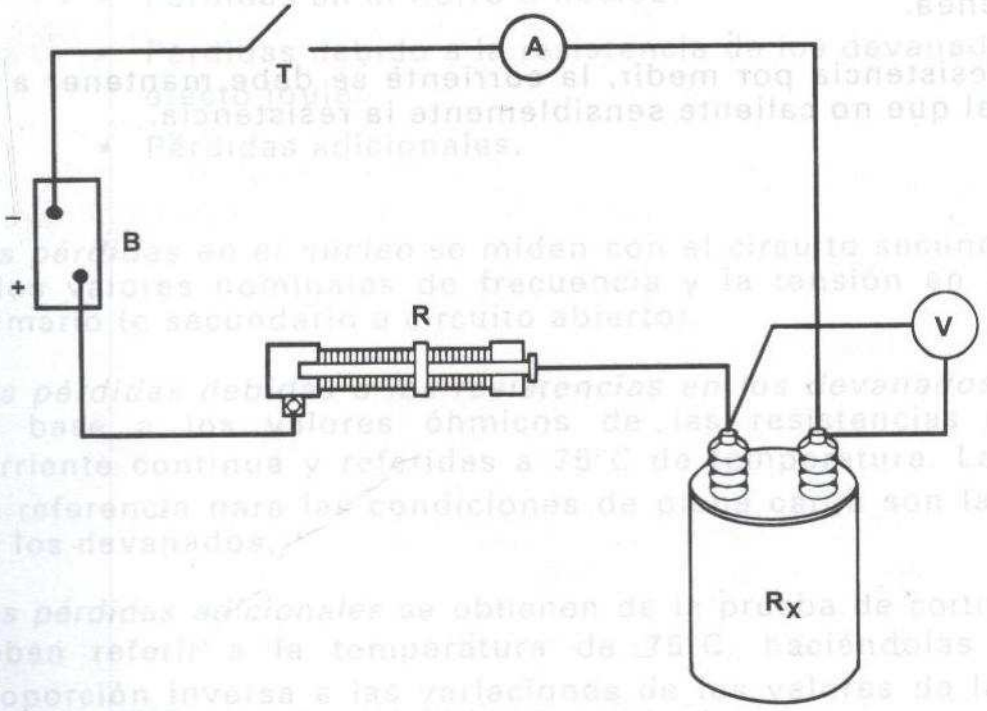


DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ÓHMICA DEL DEVANADO DEL TRANSFORMADOR

Un ejemplo de cómo manejar la información de la medición de resistencia por el método de vóltmetro y el ampérmetro, cuando se usan instrumentos analógicos, se muestra a continuación:

Temperatura de la resistencia en prueba °C	Tensión			Corriente			Resistencia
	Constante (V/div)	Lectura (div)	V o H	Constante (A/div)	Lectura (div)	Amp.	$R_x = \frac{V}{I}(\Omega)$
23.5	$\frac{7.5}{150} = 0.05$	22.3	1.115	$\frac{15}{150} = 0.01$	122.5	12.5	0.0911
	$\frac{7.5}{150} = 0.01$	112.2	1.122	$\frac{15}{150} = 0.01$	122.5	12.25	0.0915
	112.1	1.121			122.5	12.25	0.0915
	112.0	1.12	122.4		122.4	12.24	0.0915
Valor medio medido							0.0915

La medición de la resistencia óhmica se hace siempre a máquina fría, es decir, los devanados se consideran a la temperatura ambiente. La temperatura de referencia se establece de la media leída por un cierto número de termómetros localizados sobre la máquina.

El valor de la resistencia R_X medida a la temperatura ambiente, se debe corregir a la temperatura de 75°C para los transformadores con devanados de cobre, para ésto se puede aplicar la expresión general:

$$R_2 = \frac{234.5 + T_2}{234.5 + T_1} = KR_X$$

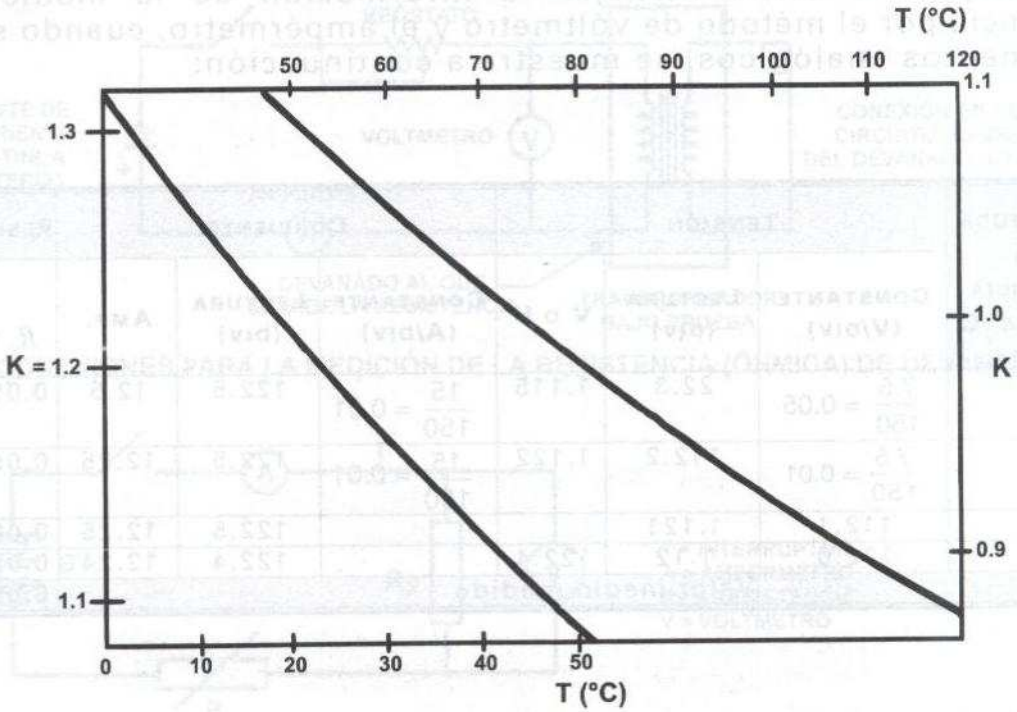
Donde:

R_2 = Resistencia corregida a la temperatura T_2.

T_2 = Temperatura a la cual se desea corregir el valor de la resistencia R_X.

T_1 = Temperatura a la cual se mide la resistencia R_X.

Para la expresión anterior, se puede establecer una gráfica como la siguiente, que relaciona directamente estas cantidades y el factor de corrección.



Por ejemplo, para el ejercicio medido en los párrafos anteriores en el que el valor de la resistencia promedio fue de R_X = 0.0915 a la temperatura de 23.5°C, si se desea conocer el valor de esta resistencia a la temperatura de 75°C se entra en la gráfica anterior con el valor de 23.5°C en el eje de las abcisas y se corta la curva inferior, encontrándose en el eje de las ordenadas (lado izquierdo) el factor de corrección K que en este caso resulta ser: K = 1.199.

De manera que:

$$R_{75} = KR_X = 1.199\, x\, 0.0915$$

$$R_{75} = 0.10971\Omega$$

Tratándose de la medición de la resistencia de los devanados de los transformadores monofásicos, no representa problema, ya que se puede realizar de acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente, efectuando la medición sobre cada devanado en forma independiente.

El cálculo de las pérdidas por efecto joule en un transformador de dos devanados, con una relación de transformación **a** se puede deducir de la expresión: $P = R_P I_P^2 + R_S I_S^2$

Donde:

$$I_S = aI_P$$

De manera que la expresión para las pérdidas se transforma en:

$$P(R_P + a^2 R_S)I_P^{\ 2}$$

Siendo:

R_P = Resistencia medida en el devanado primario en ohms.

R_S = Resistencia medida en el devanado secundario en ohms.

I_P = Corriente primaria en amperes.

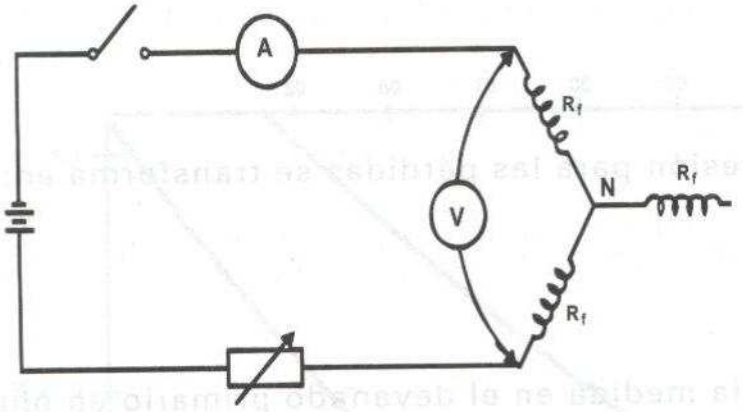
I_S = Corriente secundaria en amperes.

5.11.2 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA OHMICA EN LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Como ya se mencionó, la medición de la resistencia en los transformadores de dos devanados no representa mayor problema, sin embargo, en el caso de los transformadores trifásicos se deben tomar en cuenta algunos factores.

La medición se debe hacer entre terminales de línea de cada uno de los devanados, y en base a la media aritmética de los resultados obtenidos de las mediciones realizadas sobre los tres pares de terminales, es posible, conociendo la conexión del devanado, llegar al valor medio de la resistencia por fase. La media aritmética se puede obtener ya que prácticamente las tres fases son iguales y el resultado de la medición es sensiblemente idéntico.

En un devanado trifásico conectado en estrella, el valor medio de la resistencia óhmica de cada columna (fase) se obtiene dividiendo entre dos el valor obtenido de la media aritmética de los valores medidos entre el par de terminales.

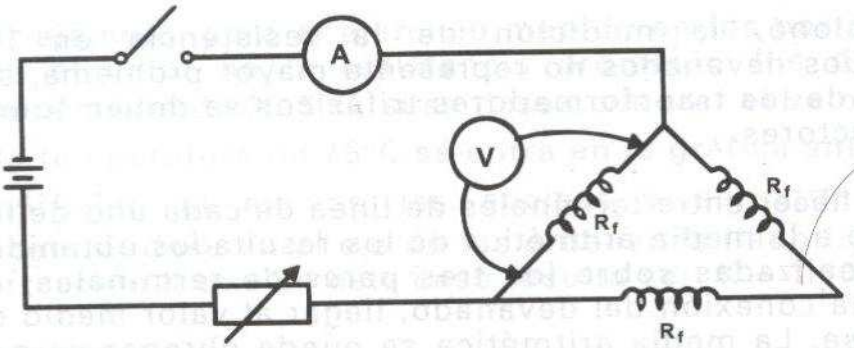


SI R_M ES EL VALOR DE LA RESISTENCIA MEDIDA EL VALOR DE LA RESISTENCIA DE CADA FASE ES:

$$R_f = \frac{R_M}{2}$$

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ÓHMICA EN LA CONEXIÓN ESTRELLA

Cuando el devanado trifásico está conectado en delta, el valor medio de la resistencia de cada una de las fases se obtiene multiplicando por 1.5 el valor obtenido de la media aritmética de los valores medidos entre cada par de terminales.



R_M = VALOR MEDIO DE LA RESISTENCIA MEDIA

R_f = VALOR PROMEDIO DE LA RESISTENCIA DE FASE

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ÓHMICA EN LA CONEXIÓN DELTA

Para la conexión estrella, estas pérdidas trifásicas se calculan como:

$$P = 3R_f I^2$$

$$R_f = \frac{R_M}{2}$$

$$P = 1.5 R_M I^2$$

Para la conexión delta estas pérdidas trifásicas se calculan como:

$$P = 3R_f \frac{I^2}{3} = 1.5R_M I^2$$

Se puede observar que en forma independiente de la conexión trifásica del devanado del transformador, las pérdidas se calculan de acuerdo con la expresión:

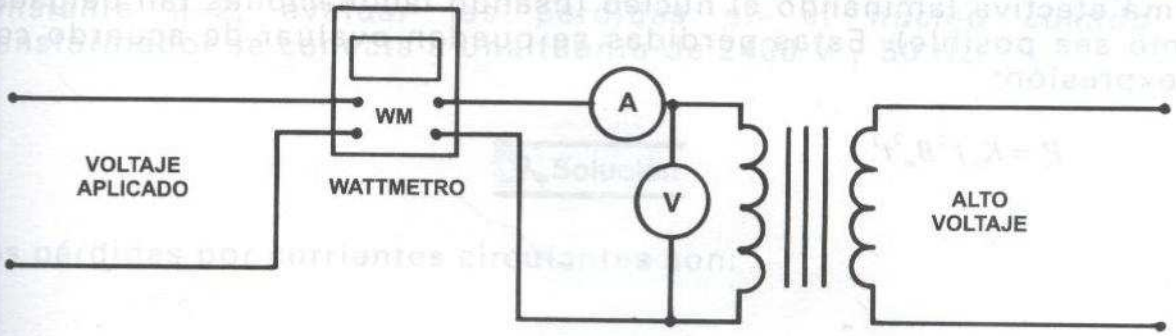
$$P = 1.5R_M I^2$$

5.12 LA PRUEBA DE VACÍO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN EL HIERRO O NÚCLEO

Esta prueba conocida también como **"LA PRUEBA DE VACIO"** en el transformador, tiene como objetivo determinar las pérdidas magnéticas básicamente. Esta prueba se desarrolla con uno de los devanados en circuito abierto, en tanto que el otro se alimenta a voltaje nominal.

Cuando el transformador está en vacío (sin carga), la corriente que circula por el devanado que se alimenta resulta ser muy pequeña, debido a esto, en estas condiciones las pérdidas en los devanados se consideran despreciables. La llamada corriente de vacío tiene dos componentes:

Una que produce el flujo en el núcleo y la otra que alimenta las llamadas pérdidas por histéresis y por corrientes circulantes (eddy). Para los propósitos prácticos, un wáttmetro en el circuito de alimentación al transformador permite medir las pérdidas en vacío.



CONEXIONES PARA LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

Aún cuando para los propósitos de la prueba, no resulta importante de qué lado se alimente al transformador, por razones de seguridad se recomienda que se alimente por el devanado de bajo voltaje.

Las pérdidas por histéresis son directamente proporcionales al flujo y al número de cambios del flujo por segundo (para la onda senoidal en C.A.). La laminación del núcleo no reduce estas pérdidas, sólo se logra usando acero de muy alta calidad. De la teoría y resultados experimentales, se ha llegado a una fórmula empírica para evaluar estas pérdidas, que es la siguiente:

$$P_h = K_h f B_m^{\,n} \ watts$$

Donde:

K_h= Constante que depende del volumen del núcleo y de la calidad del acero.

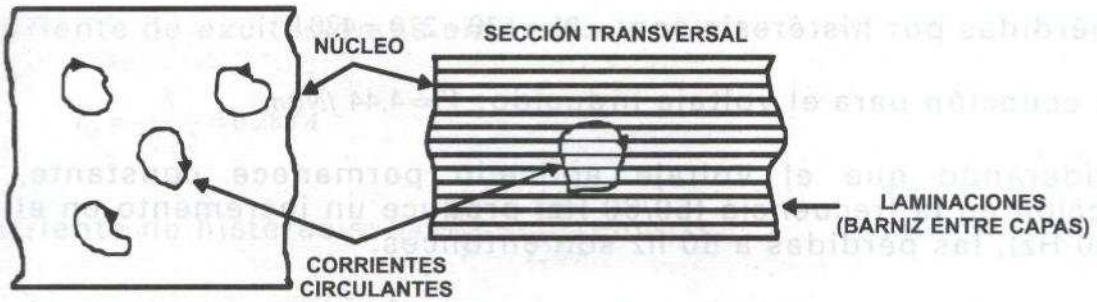
B_m= Densidad de flujo máximo en el núcleo.

f = Frecuencia de suministro de la línea de alimentación a la prueba 60 Hz ó 50 Hz.

n = Constante de Steinmetz, cuyo valor varía de 1.5 para aceros viejos a 2 para aceros nuevos.

Las pérdidas por corrientes circulantes (eddy) son de naturaleza electromagnética y se producen por el flujo local de las corrientes en las laminaciones de hierro. Son creadas exactamente de la misma forma que las pérdidas óhmicas en los devanados del transformador. Las pérdidas dependen únicamente del máximo valor del flujo y son por lo tanto constantes para un transformador dado e independiente de la carga. Las pérdidas por corrientes circulantes se pueden controlar en forma efectiva laminando el núcleo (usando laminaciones tan delgadas como sea posible). Estas pérdidas se pueden evaluar de acuerdo con la expresión:

$$P_e = K_e f^2 B_m^{\,2} t^2$$



CORRIENTES CIRCULANTES EN EL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR

Donde:

K_e = Constante que depende del volumen del núcleo y la resistividad del acero.

t = Grueso de las laminaciones del núcleo.

Las pérdidas totales del núcleo o de vacío se pueden calcular entonces como:

$$P_o = P_h + P_e = K_h f B_m^{\ n} + Ke^{f^2} B_m^{\ 2} t^2$$

Ejemplo

Se tiene un transformador monofásico de 2400 Volts, 60 Hz que tiene pérdidas en el núcleo de 630 Watts. Una tercera parte de éstas se estima que corresponden a las corrientes circulantes. Suponiendo que la constante n=2, evaluar las pérdidas en el núcleo cuando el transformador se conecta a una fuente de 2400 V y 50 Hz.

Solución

Las pérdidas por corrientes circulantes son:

$$Pe = \frac{630}{3} = 210\ W$$

Las pérdidas por histéresis son: $Ph = 630 - 210 = 420\,W$

De la ecuación para el voltaje inducido: $V = 4.44\,fN\phi m$

Considerando que el voltaje aplicado permanece constante, una reducción en la frecuencia (50/60 Hz) produce un incremento en el flujo (60/50 Hz), las pérdidas a 50 hz son entonces:

$$P_o\,(50\,Hz) = KhfB_m{}^2 + Kef^2B_m{}^2t^2$$

$$= 420\left(\frac{50}{60}\right)\left(\frac{60}{50}\right)^2 + 210\left(\frac{50}{60}\right)\left(\frac{60}{50}\right)^2 = 504 + 210$$

$$P_o\,(50\,Hz) = 714\,W$$

Esto significa que las pérdidas en el núcleo se incrementan cuando el transformador opera a una frecuencia inferior a la nominal, lo cual se refleja como un aumento en su temperatura de operación.

Ejemplo

La prueba de circuito abierto de un transformador indica una corriente de excitación de 5 A y demanda una potencia de 180 Watts, cuando se alimenta por el devanado de baja tensión a 127 volts.

Si la prueba se hubiera realizado aplicando 2200 volts en el devanado de alta tensión, con la misma potencia demandada, calcular el factor de potencia del transformador.

Solución

La relación de transformación es:

$$a = \frac{2200}{127} = 17.32$$

La corriente de excitación es entonces:

$$I_o = \frac{5}{17.32} = 0.288A$$

La corriente de histéresis: $Ih = \frac{P_o}{V} = \frac{180}{2200} = 0.08181$

La componente de magnetización de esta corriente es:

$$I_M = \sqrt{I_e^{\,2} - Ih^2} = \sqrt{(0.288)^2 - (0.08181)^2}$$

$$I_M = 0.276A$$

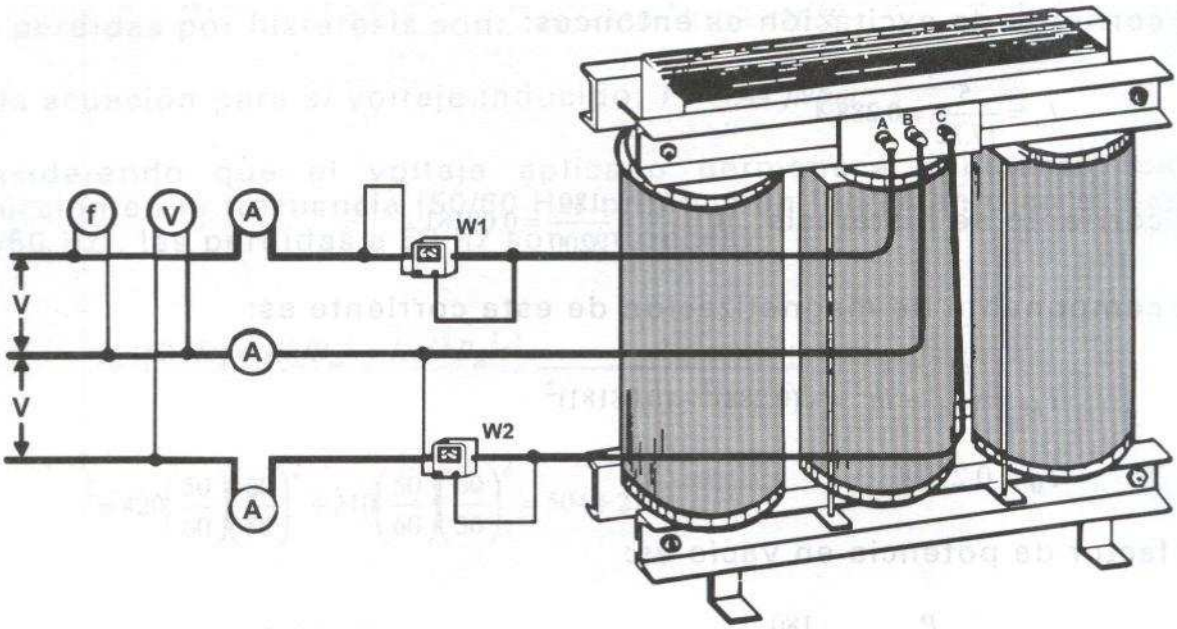
El factor de potencia en vacío es:

$$Cos\ \theta_0 = \frac{P_o}{VI_e} = \frac{180}{2200\ x\ 0.238} = 0.2841$$

Ejemplo

Se realizó la prueba de vacío en un transformador trifásico enfriado por aceite (OA), cuyos datos son los siguientes:

Potencia nominal.	⇒	630 KVA.
Tensión nominal primaria.	⇒	15000 V.
Tensión nominal secundaria.	⇒	400V.
Frecuencia nominal.	⇒	60 Hz.
Conexión.	⇒	Delta/Estrella



Los datos obtenidos de la prueba se indican en la tabla siguiente, a un valor de f = 60 Hz constante.

LECTURAS						
V KV=4	I Ka=0.5	I_b KV=0.5	I_c Kc=0.05	W_1 K=4X6=240	W_2 K=240	$W=V_1+W_2$ K=240
8.0	40	34	40	22	-15.2	6.8
9.0	60	51	60	30.8	-22	8.8
97.5	82	70	80.5	45.8	-35	10.8
101.2	101.5	84	101.5	54.5	-42.3	12.2
105	131	109	131	68.8	-55	13.8

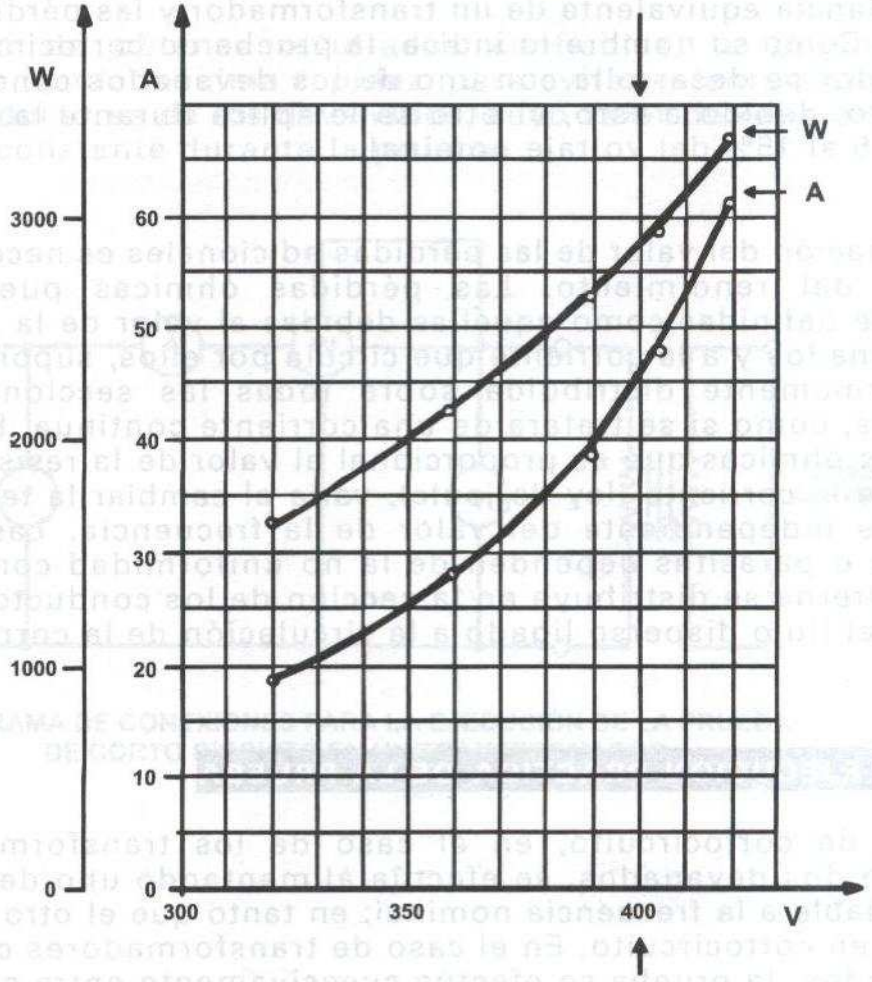
Se desea obtener las pérdidas y factor de potencia en cada caso.

Solución

De la tabla anterior, se elabora la siguiente con valores calculados a la frecuencia constante f= 60 Hz.

VALORES CALCULADOS						
V (Volts)	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)	$I_o = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} (A)$	P_l (W)	$Cos\theta_o = \frac{P_o}{\sqrt{3}VI_o}$
320	20	17	20	19	1630	0.155
360	30	25.5	30	28.5	2110	0.118
390	41	35	40.3	38.8	2600	0.100
405	50.7	42	450.7	47.8	2930	0.081
420	65.5	54.5	65.5	61.8	3310	0.074

En la gráfica siguiente, elaborada con los datos de la tabla anterior, se muestran las curvas de pérdidas (W) y de corriente de vacío (A).



De la gráfica, se leen los valores que corresponden a la tensión nominal del transformador de 400 V.

CORRIENTE DE VACÍO

Valor medio. ⇒ 45 A
45/910 ⇒ 4.95%
Potencia absorbida en vacío ⇒ Pérdidas en el núcleo=2820W

5.13 LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

Esta prueba se lleva a cabo para determinar experimentalmente el valor de la impedancia equivalente de un transformador y las pérdidas en los devanados. Como su nombre lo indica, la prueba de cortocircuito en un transformador se desarrolla con uno de los devanados conectados en cortocircuito, debido a esto, al otro se le aplica durante la prueba un voltaje del 5 al 15% del voltaje nominal.

La determinación del valor de las pérdidas adicionales es necesaria para el cálculo del rendimiento. Las pérdidas óhmicas pueden estar exactamente definidas como aquéllas debidas al valor de la resistencia de los devanados y a la corriente que circula por ellos, suponiendo que está uniformemente distribuida sobre todas las secciones de los conductores, como si se tratara de una corriente continua. El valor de las pérdidas óhmicas que es proporcional al valor de la resistencia y al cuadrado de la corriente (ley de joule), varía al cambiar la temperatura, en tanto es independiente del valor de la frecuencia. Las pérdidas adicionales o parásitas dependen de la no uniformidad con la que la corriente alterna se distribuye en la sección de los conductores, y son producto del flujo disperso ligado a la circulación de la corriente.

5.13.1 LA EJECUCIÓN PRÁCTICA DE LA PRUEBA

La prueba de cortocircuito, en el caso de los transformadores de potencia de dos devanados, se efectúa alimentando uno de éstos con tensión variable a la frecuencia nominal; en tanto que el otro devanado, se conecta en cortocircuito. En el caso de transformadores con más de dos devanados, la prueba se efectúa sucesivamente entre cada par de devanados, dejando los otros libres.

La selección del devanado por alimentar es indistinto y depende sólo de la facilidad de la medición. Por ejemplo, para un transformador con una relación de transformación de 13800/440 V es conveniente alimentar por el devanado de alta tensión, poniendo en cortocircuito el de baja tensión.

Durante la prueba es necesario medir la frecuencia (f), la tensión de cortocircuito (V_{cc}), la corriente de cortocircuito (I_{cc}), la potencia absorbida (P_{cc}) y la temperatura de los devanados.

En las máquinas enfriadas por aire, la temperatura se mide directamente con los termómetros sobre los devanados, en tanto que para las máquinas con enfriamiento por aire y aceite, se obtiene la temperatura poniendo un contacto con el aceite a través de un tubo o elemento de contacto al termómetro.

Con el fin de obtener resultados confiables, la prueba se debe desarrollar con la máxima rapidez, para evitar calentamiento excesivo en los conductores de los devanados, cuyo valor de resistencia se debe mantener constante durante la prueba.

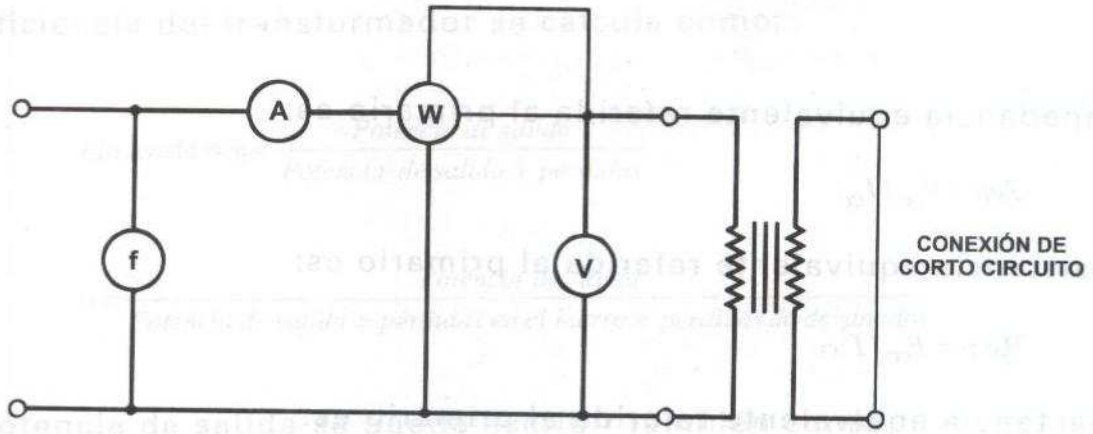
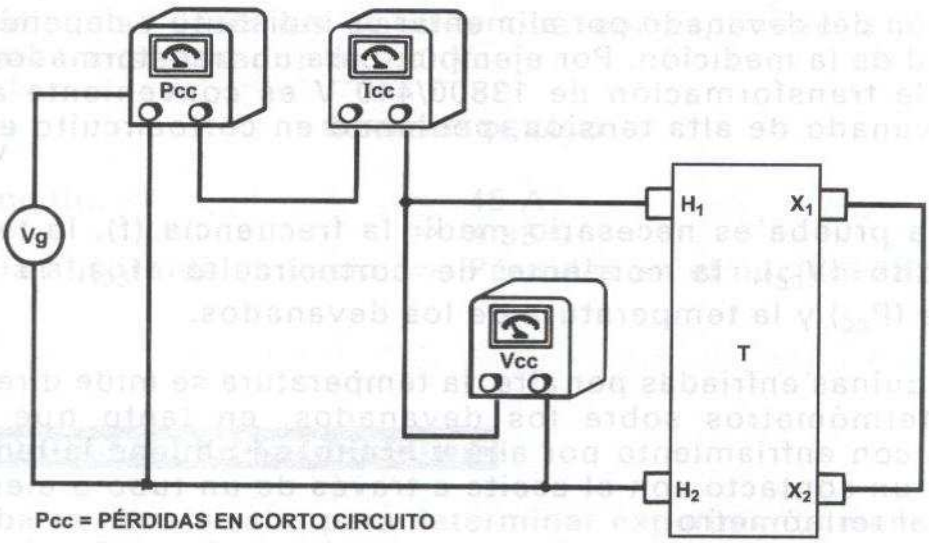


DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA EJECUCIÓN DE LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO EN UN TRANSFORMADOR



Pcc = PÉRDIDAS EN CORTO CIRCUITO

Vcc = VOLTAJE DE CORTO CIRCUITO
(CAÍDA DE VOLTAJE POR IMPEDANCIA)

Icc = CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO
(VALOR NOMINAL DEL DEVANADO ALIMENTADO)

DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CORTO CIRCUITO

La impedancia equivalente referida al primario es:

$$Zep = V_{CC} / I_{CC}$$

La resistencia equivalente referida al primario es:

$$\mathrm{Re}\,p = P_{CC} / I^2{}_{CC}$$

La reactancia equivalente referida al primario es:

$$X_{ep} = \sqrt{Z^2 ep - R^2 ep}$$

De la prueba de cortocircuito, las pérdidas a plena carga en los devanados se obtienen como:

$$P_{CC} = I_{CC}{}^2 R_1$$

Donde:

R_1 es el valor de la resistencia referida al devanado de alimentación.

$$R_1 = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^{\ 2}}$$

La impedancia equivalente referida al devanado de alimentación se calcula como:

$$Z_1 = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

De aquí, la reactancia equivalente referida al devanado de alimentación se calcula como:

$$X_1 = \sqrt{(Z_1)^2 - (R_1)^2}$$

La eficiencia del transformador se calcula como:

$$Eficiencia = \eta = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ \ de\ salida + pérdidas}$$

$$\eta = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ de\ salida + pérdidas\ en\ el\ hierro + pérdidas\ de\ devanados}$$

La potencia de salida se puede escribir también como:

$$P_S = V_S\, I_S \cos\phi$$

Donde:

V_S, I_S son el voltaje y corriente en el secundario o lado de la carga.

Las pérdidas en el núcleo (P_o) tienen un valor constante en forma independiente del valor de la carga.

Las pérdidas en los devanados varían con la carga, así por ejemplo, el valor de las pérdidas a un valor x de la carga es:

Pérdidas en los devanados a "x" carga.	=	X^2P_{CC}
A plena carga:	=	X = 1

La eficiencia del transformador se puede expresar entonces como:

$$\eta = \frac{V_S\, I_S \cos\phi}{V_S\, I_S \cos\phi + P_o + X^2 P_{CC}}$$

De los datos de prueba, se puede calcular también la regulación de voltaje del transformador como:

$$\%\, Reg = \frac{I_S R_S \cos\phi \, I\, I_S X_S \text{ sen } \phi}{Voltaje\ de\ vacío} x\, 100$$

El signo + se usa para carga inductiva.

El signo – se usa para carga capacitiva.

$$\%\, Reg = \frac{I_S\, R_S \cos\phi \; + \; /- I_S\, X_S \text{ sen } \phi}{E_S} x\, 100$$

R_S y X_S son la resistencia y reactancia equivalente del transformador referidas al secundario.

Ejemplo

De la prueba de cortocircuito en un transformador monofásico de 20 KVA, 2400/220V, 60 Hz, se alimenta por alta tensión, obteniendo los siguientes resultados:

$$V_{CC} = 72\,V \qquad I_{CC} = 8.33\,A \qquad P_{CC} = 268\,W$$

Calcular los parámetros del transformador referidos al devanado de alto voltaje.

Solución

La resistencia:

$$R_{ep} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} = \frac{268}{(8.33)^2} = 3.86\Omega$$

La impedancia:

$$Z_{ep} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} = \frac{72}{8.33} = 8.64\Omega$$

Ejemplo

Una prueba de circuito abierto en el devanado de 240 V de un transformador cuyo circuito se muestra y los datos se indican.

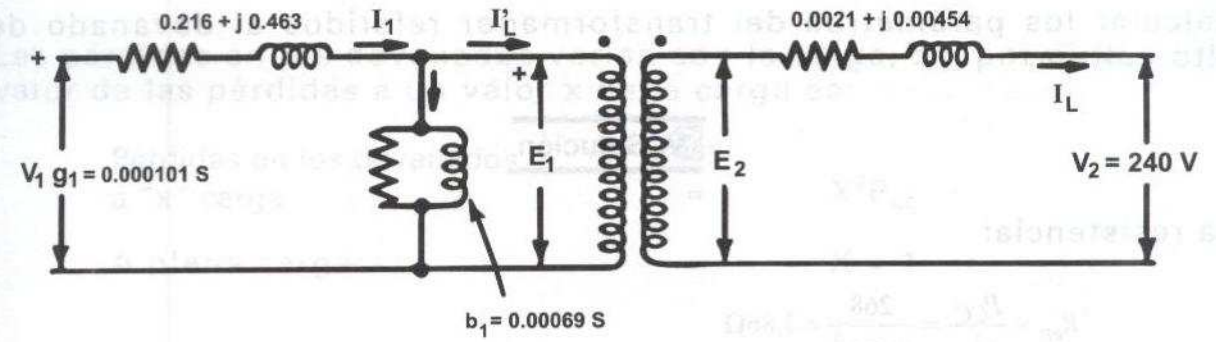
Volts	Amperes	watts
240	16.75	580

1) Calcular la admitancia de excitación, la conductancia y la susceptancia.

2) Los datos siguientes se obtuvieron en la prueba de cortocircuito del transformador, con el devanado de bajo voltaje en corto circuito.

Volts	Amperes	watts
63.0	62.5	1660

Calcular: (a) la impedancia del primario, (b) la reactancia equivalente del primario y (c) la resistencia equivalente del primario.



Solución

1) La admitancia de excitación es:

$$y = \frac{I_{exc}}{V} = \frac{16.75}{240} = 0.0698\ Siemens$$

$$g = \frac{P_o}{V^2} = \frac{580}{(240)^2} = 0.0101\ Siemens$$

De aquí la susceptancia de excitación es:

$$b = \sqrt{y^2 - g^2}$$

$$= \sqrt{(0.0698)^2 - (0.0101)^2}$$

$$b = 0.069\ Siemens$$

2) La impedancia equivalente referida al primario:

a) $Z_{ep} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} = \frac{63.0}{62.5} = 1.008\ \Omega$

b) La resistencia equivalente referida al primario:

$$R_{ep} = \frac{P_{CC}}{{I_{CC}}^2} = \frac{1660}{(62.5)^2} = 0.425\ \Omega$$

La reactancia equivalente referida al primario es entonces:

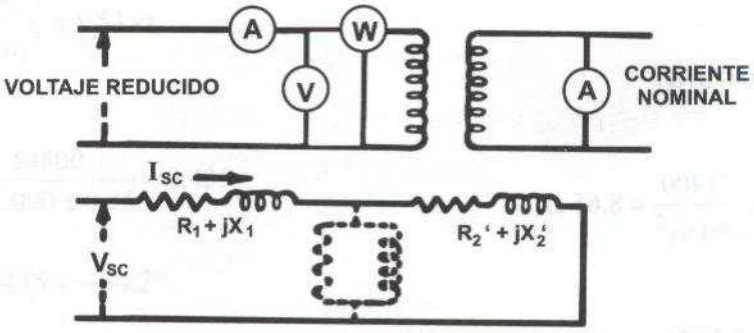
$$X_{ep} = \sqrt{Z_{ep}{}^2 - R_{ep}{}^2} = \sqrt{(1.008)^2 - (0.425)^2} = 0.915\Omega$$

Ejemplo

Las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto de un transformador de potencia de 12000 KVA, 60 Hz, 132/22 KV dan los datos siguientes:

	CORTOCIRCUITO	CIRCUITO ABIERTO
Voltaje, primario.	10,900	132,000
Voltaje, secundario	0	22,020
Corriente, primaria	90.9	0.95
Corriente	545.5	0
secundaria	71.4	54.5
Entrada kW		

Las resistencias primaria y secundaria son en C.D. a 75°C y sus valores son: r_P=4.11Ω, r_S=0.0975Ω. Calcular las constantes del transformador.



PRUEBA DE CORTO CIRCUITO

Solución

a) $\frac{N_P}{N_S} = \left(\frac{I_S}{I_P}\right)_{CC} = \left(\frac{V_P}{V_S}\right)_o = \left(\frac{545.5}{90.9}\right)_{CC} = 6.0$ es decir: a = 6

También: $\frac{N_P}{N_S} = \left(\frac{132,000}{22,020}\right) = 5.99$

b) $\cos\theta_{CC} = \frac{P_{CC}}{V_{CC}\, I_{CC}} = \frac{71400}{10.900\ x\ 90.9} = 0.0721$

$\theta_{CC} = \cos^{-1}(0.0721) = -85.85°$

$sen\,\theta_{CC} = 0.9974$

c) La impedancia de cortocircuito:

$Z_{CC} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} = \frac{10900}{90.9} = 120\ \Omega$

d) La resistencia:

$R_{CC} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} = \frac{71400}{(90.9)^2} = 8.65\ \Omega$

e) La reactancia:

$X_{CC} = \sqrt{Z_{CC}^2 - R_{CC}^2} = \sqrt{(120)^2 - (8.65)^2}$

$X_{cc} = 119.6\,\Omega$

f) La resistencia del primario:

$$R_P = \left(\frac{r_P}{r_p + a^2 r_S}\right) R_{CC} = \frac{4.11\,x\,8.65}{4.11 + 0.0975\,x\,36}$$

$$R_P = 4.67\Omega$$

El valor equivalente de la resistencia del secundario:

$$R_S^{'} = 8.65 - 4.67 = 3.98\,\Omega$$

$$R_S = R_S^{'} \Big/ a^2 = \frac{3.98}{(6)^2} = 0.1106\,\Omega$$

La reactancia del primario:

$$X_P = \frac{4.11\,x\,119.6}{7.62} = 64.5\Omega$$

La reactancia equivalente del secundario:

$$X_S^{'} = X_{CC} - X_P = 119.6 - 64.5 = 55.1\,\Omega$$

$$X_S = \frac{X_S^{'}}{a^2} = \frac{55.1}{(6)^2} = 1.53\,\Omega$$

$$\cos\theta_o = \frac{54500}{132{,}000\,x\,0.95} = 0.435$$

$$\theta_o = \cos^{-1} 0.435 = -64.2°$$

$$sen\,\theta_o = 0.9002$$

El voltaje de vacío:

$$E_o = 132{,}000 - (64.7\angle 85.85°)(0.95\angle -64.2°)$$

$$E_o = 131{,}943 - j\,23\,V$$

g)

$$Y_o = \frac{T_o}{E_o} = \frac{0.95}{131{,}944} = 7.20\ x\ 10^{-6}\ mho$$

h)

$$G_o = \frac{P_o - R_P I_o^2}{E_o^2} = \frac{54{,}500 - 4.67\ x\ 0.95^2}{131{,}944}$$

$$G_o = 3.313\ x 10^{-6}\ mho$$

i)

$$B_o = \sqrt{Y_o^2 - G_o} = \sqrt{(7.20)^2 - (3.13)^2}\ x\ 10^{-6}$$

$$B_o = 6.49\ x 10^{-6}\ mho$$

Ejemplo

Se tiene un transformador reductor de 20 KVA, 2300/230V, monofásico, conectado para prueba con el lado de bajo voltaje en corto circuito. Los datos de la prueba de cortocircuito con medición en el lado de alto voltaje son:

Lectura del wáttmetro	=	250 W
Lectura del vóltmetro	=	50 V
Lectura del ampérmetro	=	8.7 A

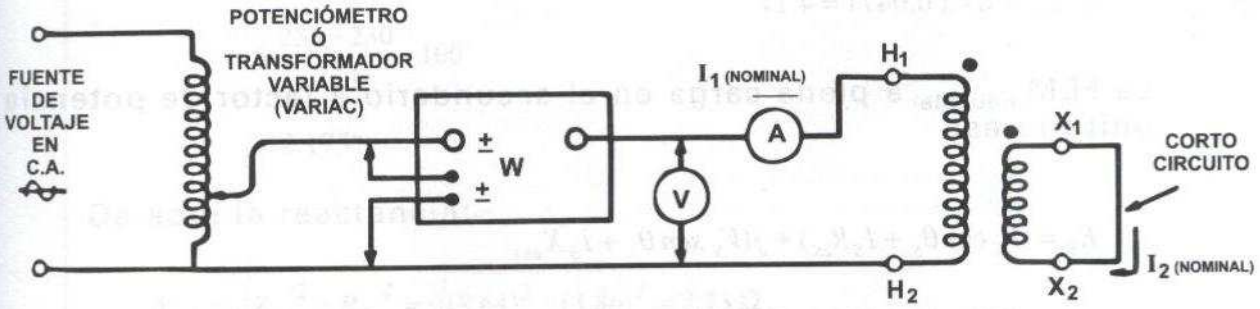
Calcular:

a) La impedancia, resistencia y reactancia referidas al lado de alto voltaje.

b) La impedancia, resistencia y reactancia referidas al lado de bajo voltaje.

c) La regulación de voltaje a factor de potencia unitario.

d) La regulación de voltaje a factor de potencia 0.7 atrasado.



Solución

a) $$Z_{eP} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} = \frac{50\ V}{8.7A} = 5.75\ \Omega$$

La resistencia equivalente referida al primario:

$$R_{eP} = \frac{P_{CC}}{(I_{CC})^2} = \frac{250}{(8.7)^2} = 3.3\Omega$$

$$X_{eP} = \sqrt{Z_{eP}{}^2 - R_{eP}{}^2} = \sqrt{(5.75)^2 - (3.3)^2} = 4.71\ \Omega$$

b) Los valores referidos al secundario:

$$Z_{eS} = \frac{Z_{eP}}{a^2} = \frac{5.75}{(10)^2} = 0.033\ \Omega$$

$$X_{eS} = \frac{X_{eP}}{a^2} = \frac{4.71}{(10)^2} = 0.0471\ \Omega$$

c) La corriente nominal en el secundario:

$$I_S = \frac{KVA\ x\ 1000}{V_S} = \frac{20\ x\ 10^3}{230} = 87A$$

Las caídas de voltaje por resistencia y reactancia:

$$I_S R_{eS} = 87\, x\, 0.033 = 2.87V$$

$$I_S X_{eS} = 87\, x\, 0.0471 = 4.1V$$

La $FEM_{inducida}$ a plena carga en el secundario a factor de potencia unitario es:

$$E_S = (V_S \cos\theta_S + I_S R_{eS}) + j(V_S\, sen\,\theta_S + I_S X_{eS})$$

$$= (230\, x\, 1 + 2.87) + j(0 + 4.1)$$

$$= 232.87 + j4.1$$

$$E_S = 232.9V$$

La regulación de voltaje a factor de potencia unitario.

$$\%\, Reg = \frac{E_S - V_S}{V_S} x\, 100$$

$$= \frac{232.9 - 230}{230} x\, 100$$

$$= 1.26\%$$

d) La $FEM_{inducida}$ a plena carga en el secundario a factor de potencia 0.7 atrasado.

$$E_S = (V_S \cos\theta_S + I_S R_{eS}) + j(V_S\, sen\,\theta_S + I_S X_{eS})$$

$$E_S = (230\, x\, 0.7 + 2.87) + j(230\, x\, 0.713 + 4.1)$$

$$= (161 + 2.87) + j(164 + 4.1)$$

$$= 163.9 + j168.1$$

$$E_S = 235V$$

La regulación de voltaje a factor de potencia 0.7 atrasado es:

$$\% Reg = \frac{E_S - V_S}{V_S} x\, 100$$

$$= \frac{235 - 230}{230} x\, 100$$

$$= 2.175\%$$

De aquí la reactancia:

$$X_{ep} = \sqrt{Z_{ep}{}^2 - R_{ep}{}^2} = \sqrt{(8.64)^2 - (3.86)^2} = 7.73\ \Omega$$

Ejemplo

En un transformador de 50 KVA de las pruebas de vacío y de corto circuito, se encontró que las pérdidas de vacío fueron: P_o= 500 Watts y las de cortocircuito P_{CC}=800 Watts. Calcular la eficiencia.

a) A factor de potencia unitario.

b) A factor de potencia 0.8 atrasado.

Solución

a) Las pérdidas en el núcleo: P_o = 500 W = 0.5 kw.

Las pérdidas de cortocircuito en los devanados, por lo general se reportan a plena carga. P_{CC} =800 W = 0.8 kW

A factor de potencia unitario (cos ϕ =1.0) la potencia de salida es:

$$P_{sal} = KVA \cos\phi = 50\, x\, 1 = 50\, kW$$

La potencia de entrada es:

$$P_{ent} = P_{sal} + P_o + P_{CC} = 50 + 0.5 + 0.8 = 51.3\, kW$$

La eficiencia:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} x\, 100$$

$$\eta = \frac{50}{51.3} x\, 100 = 97.46\%$$

b) A factor de potencia 0.8 atrasado:

$$P_{sal} = kVA \cos\phi = 50\, x\, 0.8 = 40kW$$

La potencia de entrada:

$$P_{ent} = P_{sal} + P_o + P_{CC} = 40 + 0.5 + 0.8 = 41.3\, kW$$

La eficiencia:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} x\, 100$$

$$\eta = \frac{40}{41.3} x\, 100 = 96.35\%$$

6 LA OPERACIÓN EN PARALELO Y LAS CONEXIONES DE TRANSFORMADORES

6.1 INTRODUCCIÓN

Cuando por razones de incremento en la carga o en la tendencia de crecimiento de las empresas suministradoras, se requiere aumentar la corriente a plena carga, entonces por lo general a un transformador existente se le conecta en paralelo otro u otros transformadores, con esto se trata de:

a) Prevenir sobrecalentamientos debidos a cargas excesivas.

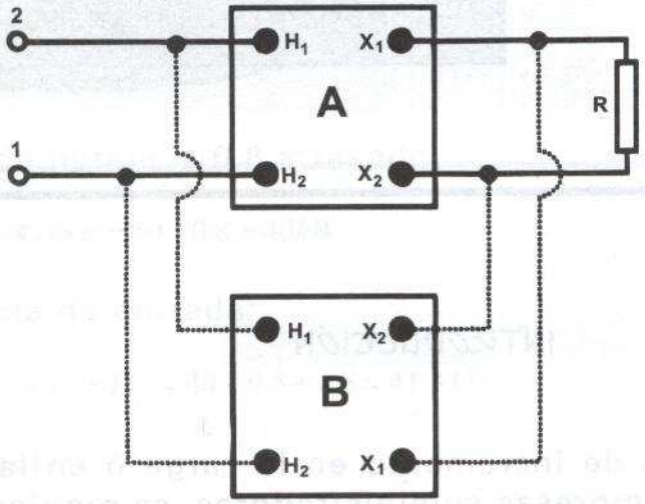
b) Operar a una eficiencia óptima.

c) Modificar (cuando se requiere) el flujo de potencia reactiva en las líneas asociadas.

Para que los transformadores puedan operar en paralelo, existen varias condiciones que se deben cumplir:

1. Los transformadores deben tener igual relación de transformación.
2. Las impedancias en porciento o en par unidad deben ser iguales.
3. La relación de R a X debe ser la misma en ambos transformadores.
4. Para transformadores polifásicos las secuencias de fase y los defasamientos deben ser los mismos.

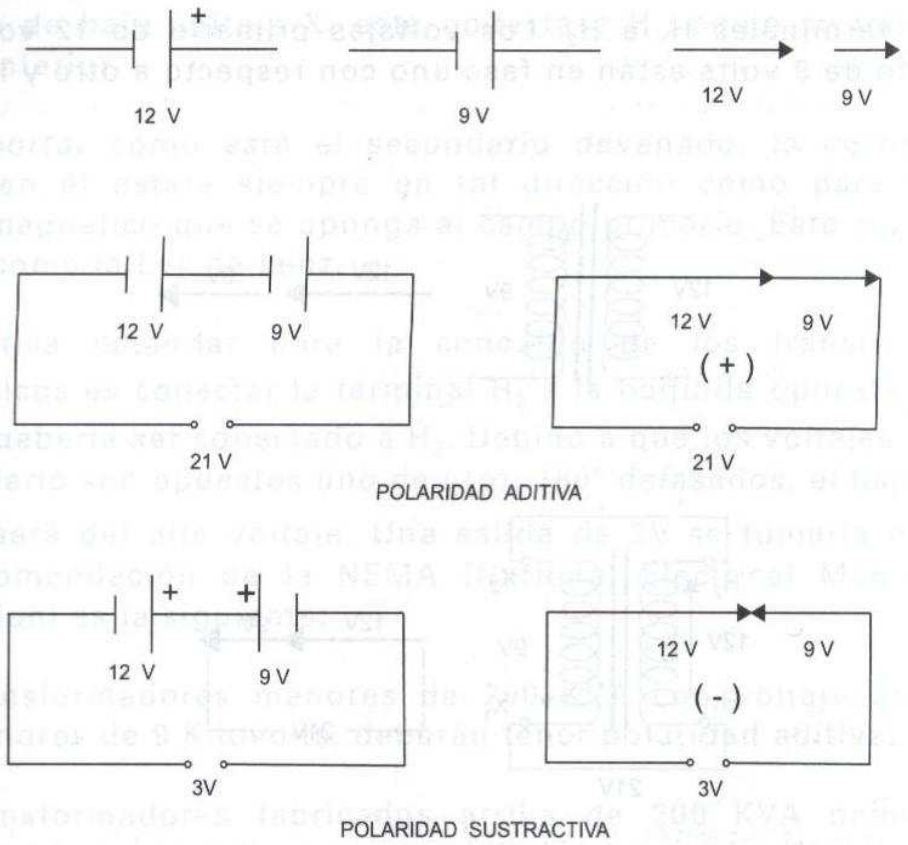
Se debe poner atención particular a la polaridad de cada transformador, de manera que solo las terminales que tienen la misma polaridad están conectadas juntas. Un error en la polaridad produce un corto circuito tan pronto como el transformador se excita.



CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES EN PARALELO PARA ALIMENTAR UNA CARGA

6.2 POLARIDAD DE UNA BATERÍA

En la figura siguiente, se muestra la relación entre polaridades, usando baterías de C.D. cuando éstas se conectan en serie con polaridad opuesta, sus voltajes se suman. Esto se puede representar por medio de vectores en donde las flechas están en la misma dirección, uniendo el final de uno con el principio del otro. Si la polaridad de una de las baterías se invierte, los voltajes se cancelan uno a otro, esto se representa indicando las flechas de los vectores en sentido opuesto.

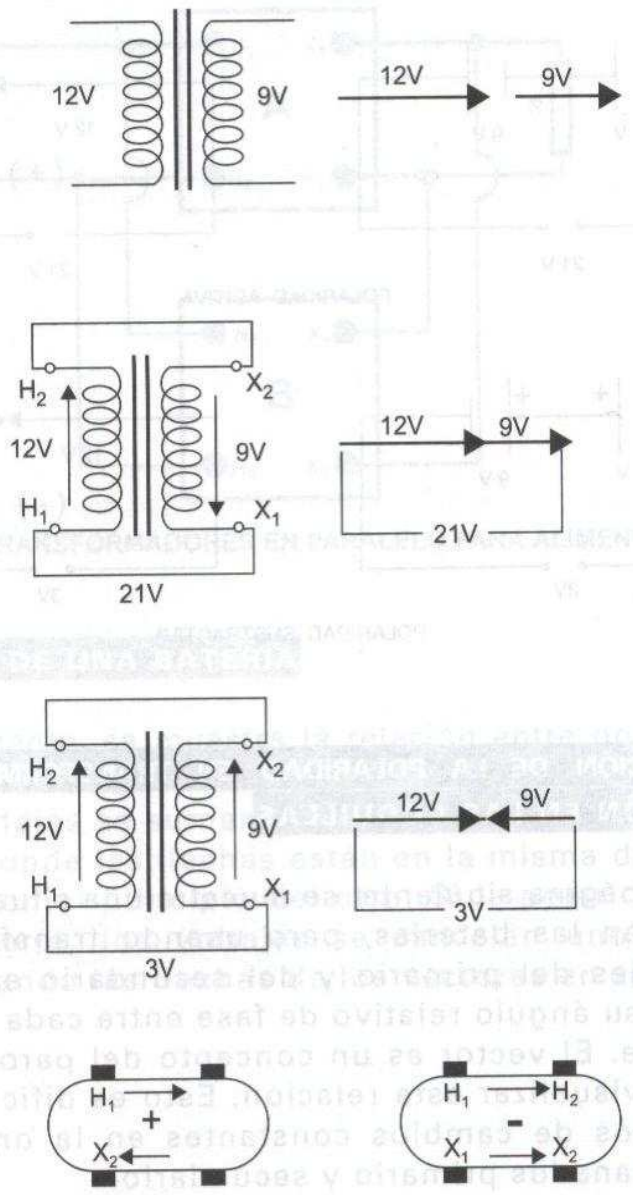


6.2.1 IDENTIFICACIÓN DE LA POLARIDAD EN TRANSFORMADORES, USANDO NUMERACIÓN EN LAS BOQUILLAS

En la figura de la página siguiente, se muestra una situación similar a la de la polaridad en las baterías, pero usando transformadores, aún cuando los voltajes del primario y del secundario están cambiando constantemente, su ángulo relativo de fase entre cada uno (o de uno a otro) es constante. El vector es un concepto del paro de movimiento que nos permite visualizar esta relación. Esto es difícil de hacer si se piensa en términos de cambios constantes en la onda senoidal de voltaje en los devanados primario y secundario.

La práctica estándar para conectar un transformador monofásico con polaridad aditiva o salida con alto voltaje es, conectar la boquilla de alta tensión H_2 a la boquilla opuesta de baja tensión X_1; cuando se coloca del lado de bajo voltaje del transformador, H_1 quedará a la izquierda del observador y H_2 a la derecha. El voltaje de salida se mide

entre las terminales H_1 a H_2. Los voltajes primario de 12 volts y el secundario de 9 volts están en fase uno con respecto a otro y la salida es 21 V.



Los transformadores se pueden fabricar también con polaridad sustractiva. Esto se logra devanando la bobina del secundario en sentido opuesto con relación al primario. Con este tipo de arreglo, la

boquilla de bajo voltaje X_1 está opuesta a H_1, como se indica en la figura anterior.

Sin importar cómo esté el secundario devanado, la corriente que circula en él estará siempre en tal dirección como para crear un campo magnético que se oponga al campo primario. Este concepto se conoce como la Ley de Lenz.

La práctica estándar para la conexión de los transformadores monofásicos es conectar la terminal H_2 a la boquilla opuesta, en este caso X_2 debería ser conectado a H_2. Debido a que los voltajes primario y secundario son opuestos uno de otro, 180° defasados, el bajo voltaje se sustraerá del alto voltaje. Una salida de 3V se tomaría de H_1-X_1. Una recomendación de la NEMA (National Electrical Manufacturer Association) es la siguiente:

1) Transformadores menores de 200 KVA con voltaje nominales menores de 9 Kilovolts, deberán tener polaridad aditiva.

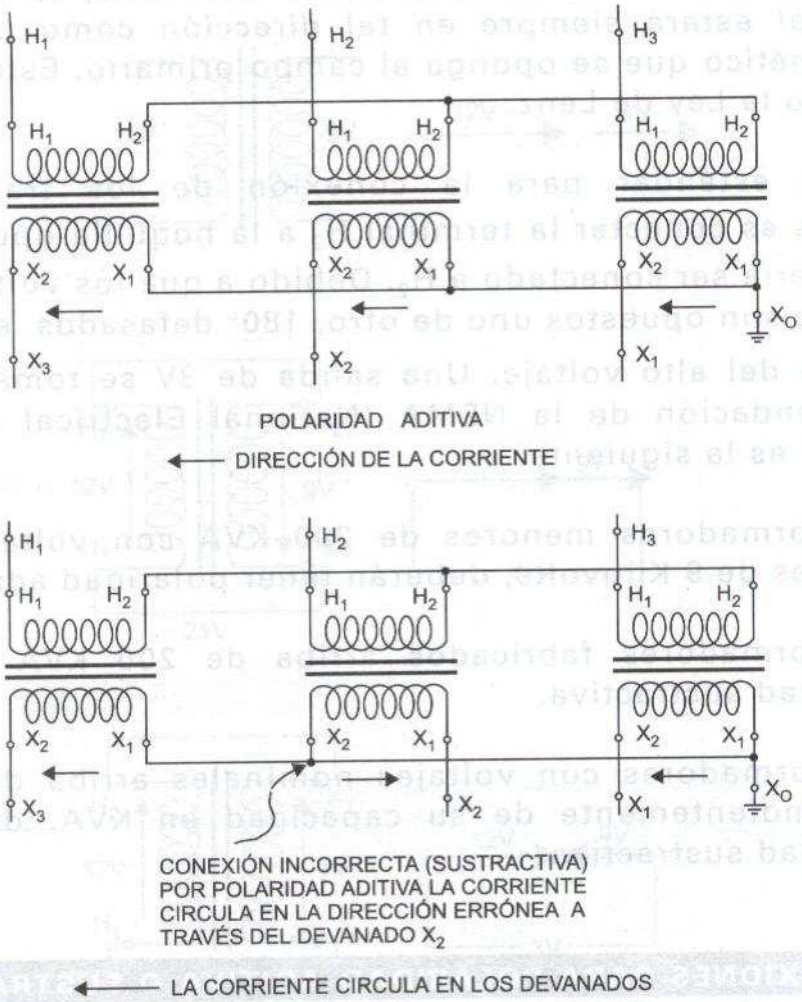
2) Transformadores fabricados arriba de 200 KVA deben tener polaridad sustractiva.

3) Transformadores con voltajes nominales arriba de 9 Kilovolts independientemente de su capacidad en KVA, deberán tener polaridad sustractiva.

6.2.2 Conexiones para polaridad aditiva o sustractiva

Cuando los devanados de los transformadores se conectan con polaridad aditiva, los voltajes inducidos en los devanados primario y secundario estarán en direcciones opuestas. Las bobinas están devanadas en la misma dirección para transformadores conectados con polaridad aditiva. Un transformador con polaridad sustractiva se puede conectar y usar como aditiva invirtiendo el flujo de corriente a través de los devanados, si alguno de éstos estuviera erróneamente conectado con polaridad sustractiva, puede ocurrir que se opere la protección de sobrecorriente del transformador, o bien que el transformador opere en forma incorrecta.

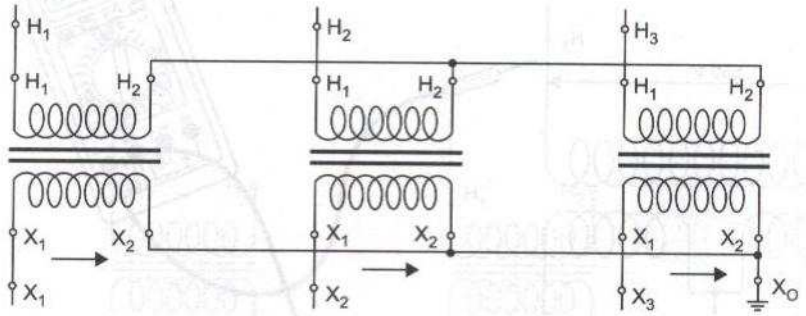
En la figura siguiente, se muestra la conexión del transformador para polaridad aditiva.



CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES CON POLARIDAD ADITIVA

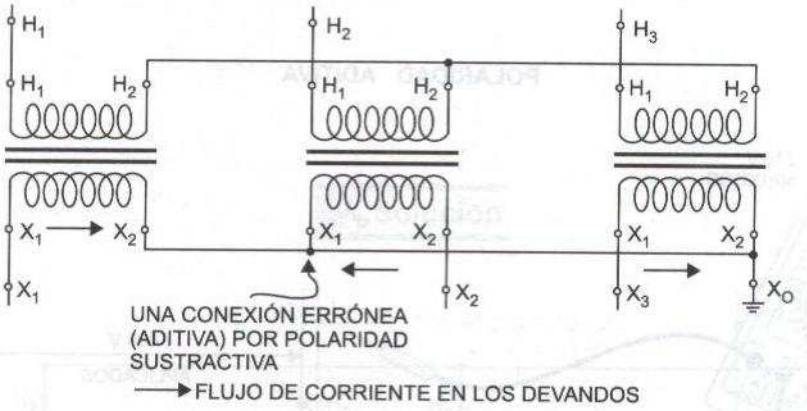
Cuando los devanados del transformador están conectados todos con polaridad sustractiva, los voltajes inducidos en los devanados primario y secundario podrían estar en la misma dirección. De igual forma, un transformador con polaridad sustractiva se puede conectar y usar como un transformador de polaridad aditiva invirtiendo el flujo de corriente a través de los devanados.

Si alguno de los devanados estuviera erróneamente conectado en polaridad aditiva, puede ocurrir que opere la protección de sobrecorriente del transformador, o bien que el transformador opere en forma incorrecta.



POLARIDAD SUSTRACTIVA

LA CORRIENTE CIRCULA EN LA MISMA DIRECCIÓN EN CADA DEVANADO



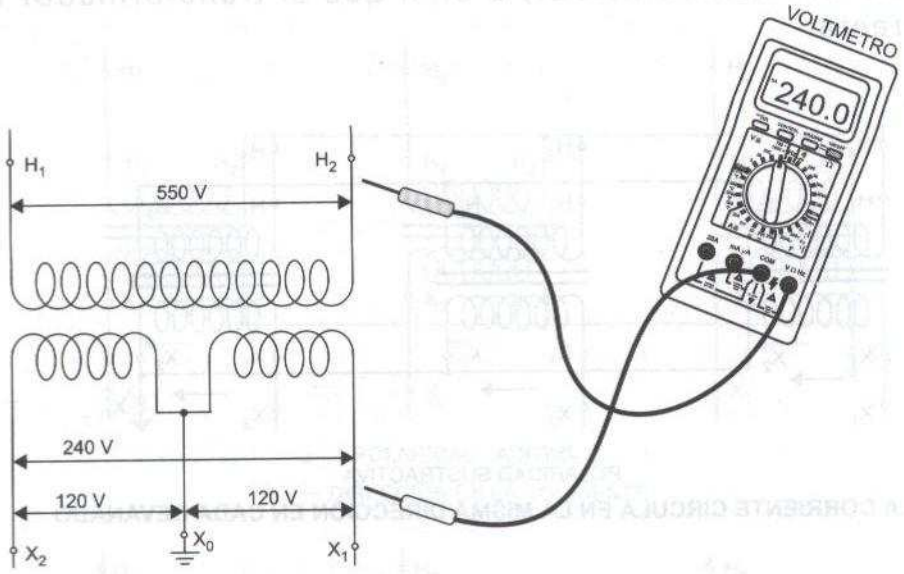
CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES CON POLARIDAD SUSTRACTIVA

La identificación de si los devanados de los transformadores tienen polaridad aditiva o sustractiva se hace midiendo los voltajes primario y secundario.

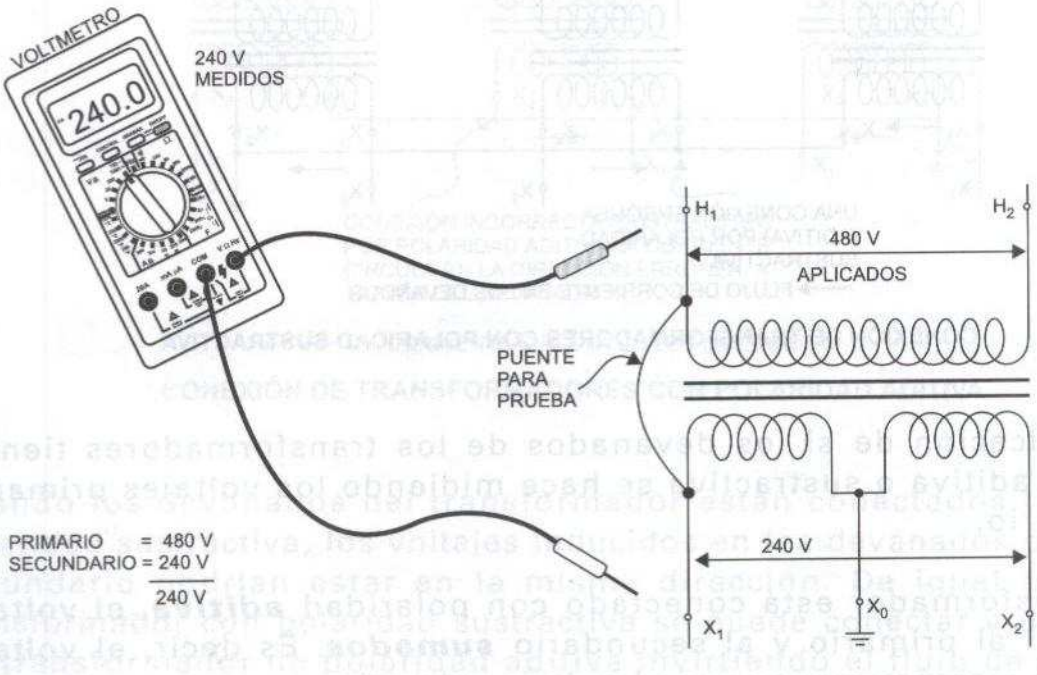
Si un transformador está conectado con polaridad ***aditiva***, el voltaje sería igual al primario y al secundario ***sumados***. Es decir, el voltaje medido es siempre mayor que el voltaje primario.

Si un transformador se conecta con polaridad sustractiva, el voltaje sería igual al primario menos el secundario. El voltaje medido es siempre

Menor que el voltaje primario. Esto, bajo la suposición de que el voltaje primario es mayor que el secundario.



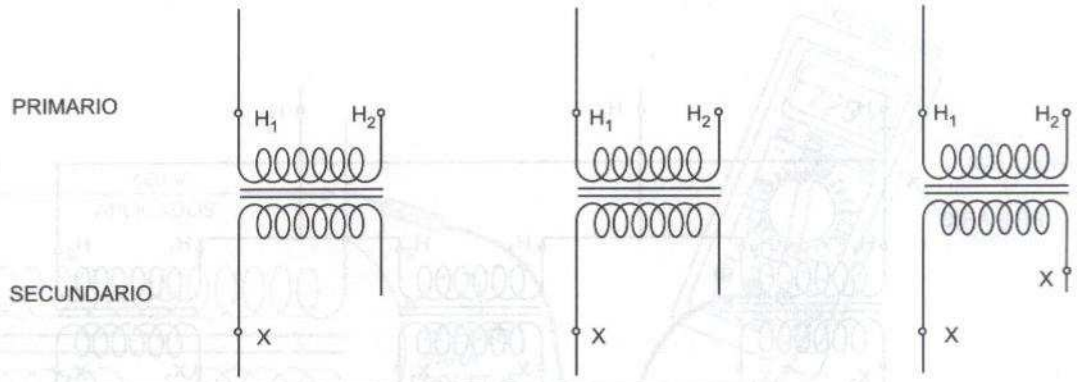
POLARIDAD ADITIVA



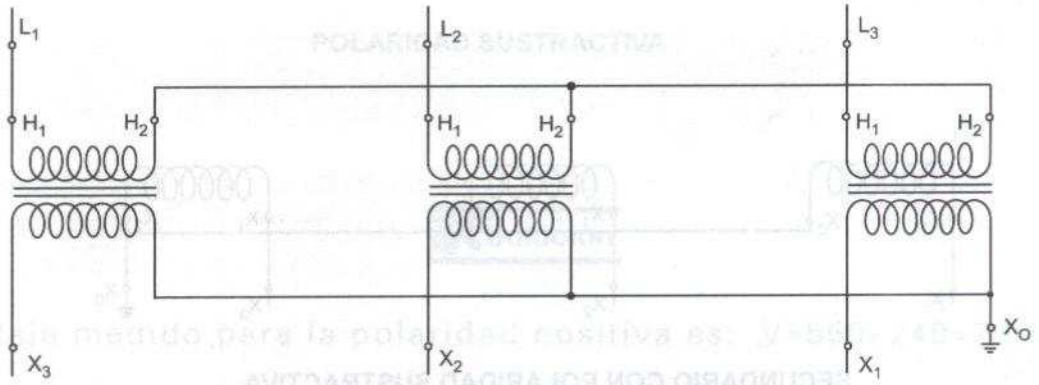
POLARIDAD SUBSTRACTIVA

Ejemplo

Conectar los siguientes devanados para polaridad aditiva y agregar los números de los subíndices en las terminales del secundario, usando conexión estrella.

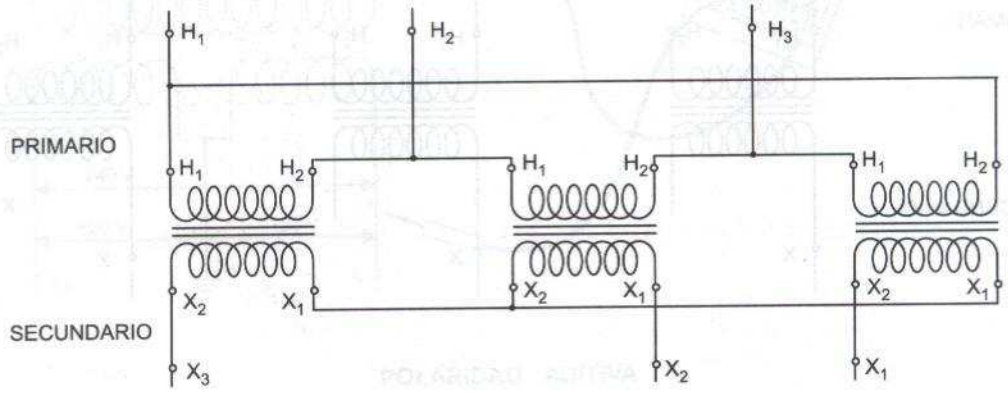


Solución

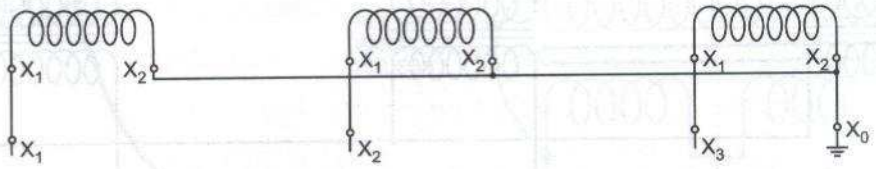


Ejemplo

Reconectar los siguientes devanados para la operación apropiada, usando devanados conectados con polaridad sustractiva, usando la conversión para las marcas de polaridad con subíndices en los devanados de alta y baja tensión.



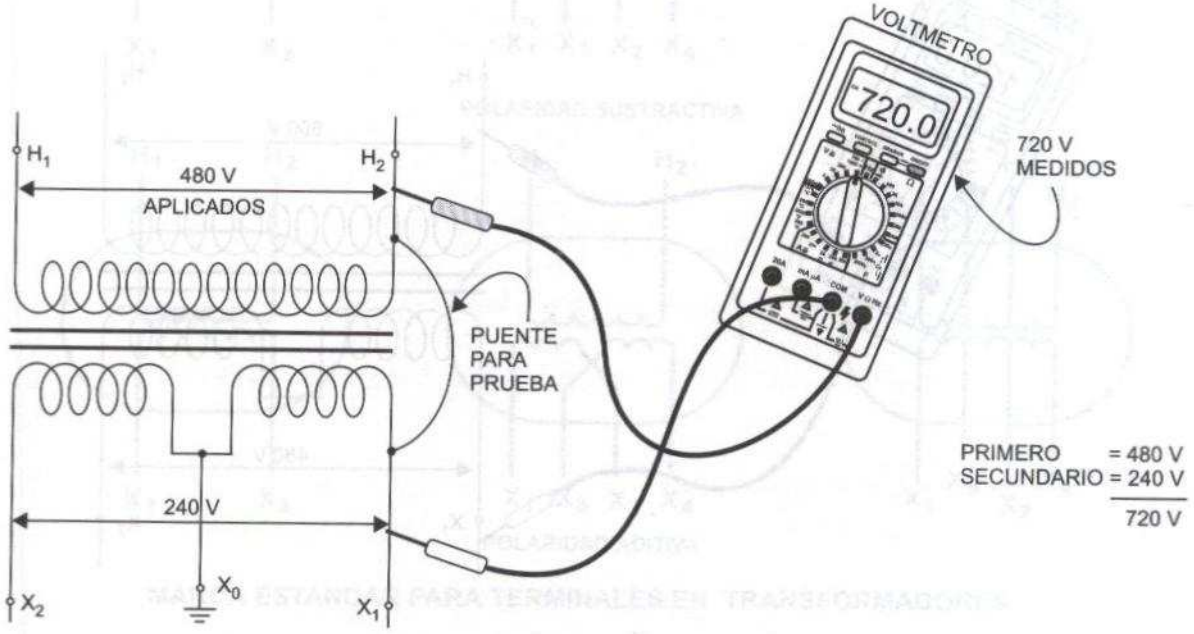
Solución



SECUNDARIO CON POLARIDAD SUSTRACTIVA

Ejemplo

Para polaridad aditiva, determinar el voltaje que lee el vóltmetro del primario al secundario.



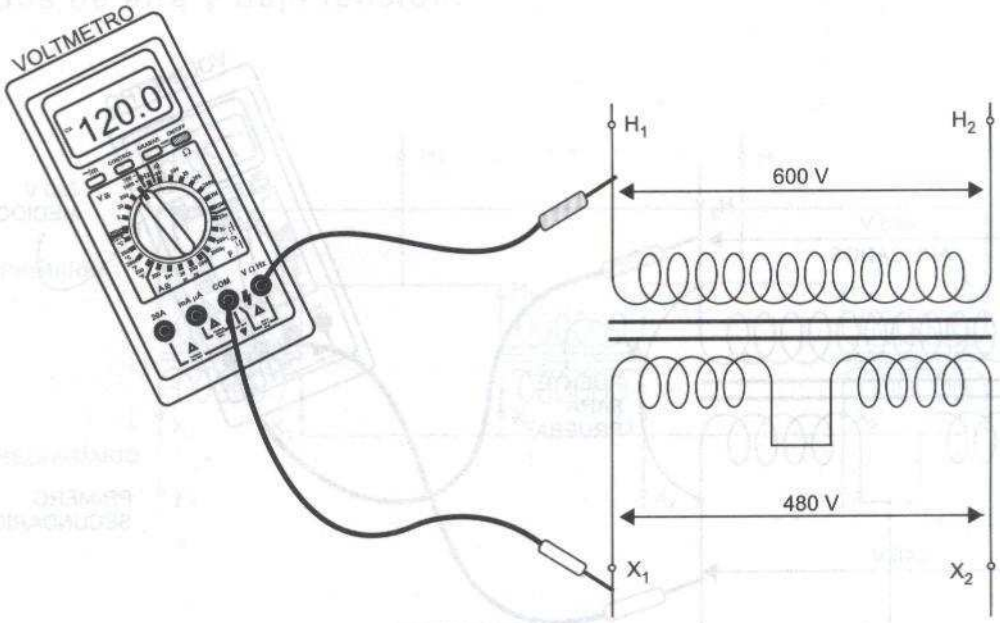
POLARIDAD SUSTRACTIVA

Solución

El voltaje medido para la polaridad positiva es: V=550+240=790V

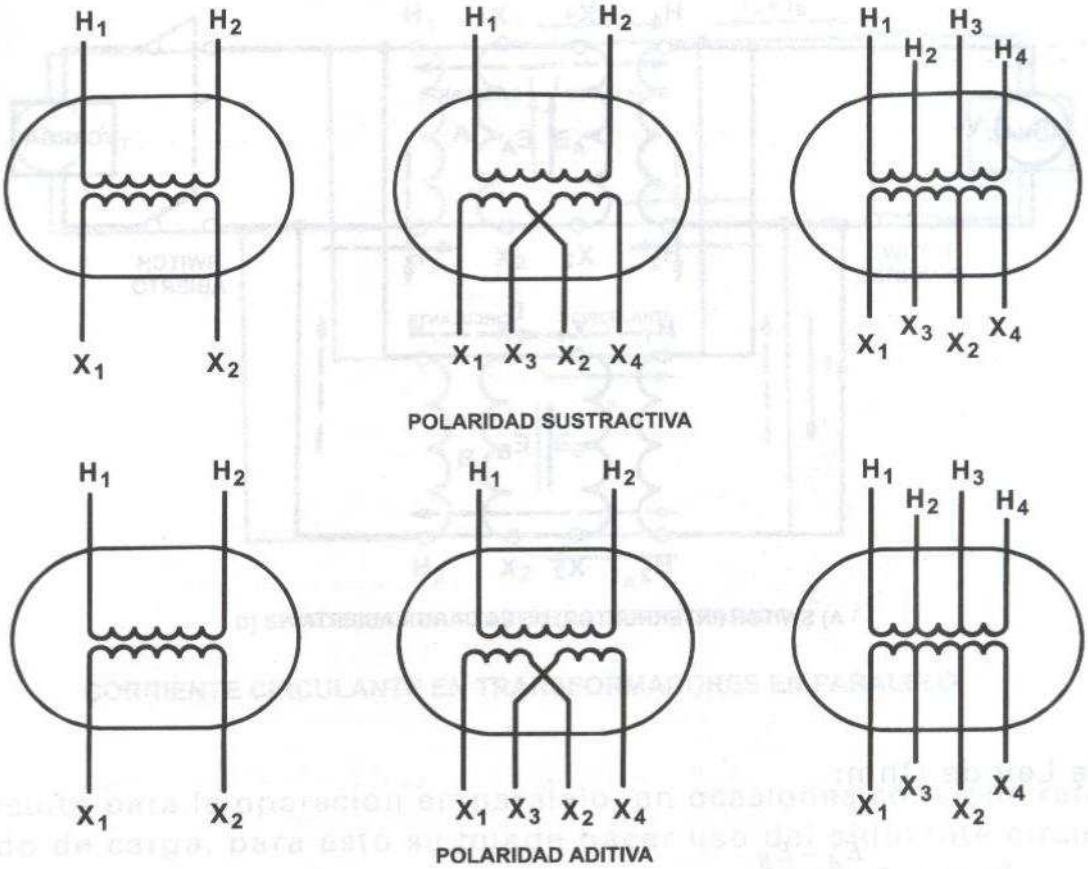
Ejemplo

Determinar el voltaje del primario al secundario para polaridad sustractiva.



Solución

Para la indicación de la conexión con polaridad sustractiva (H_1 coincide con X_1) la lectura del vóltmetro debe ser: V=600-480=120V.

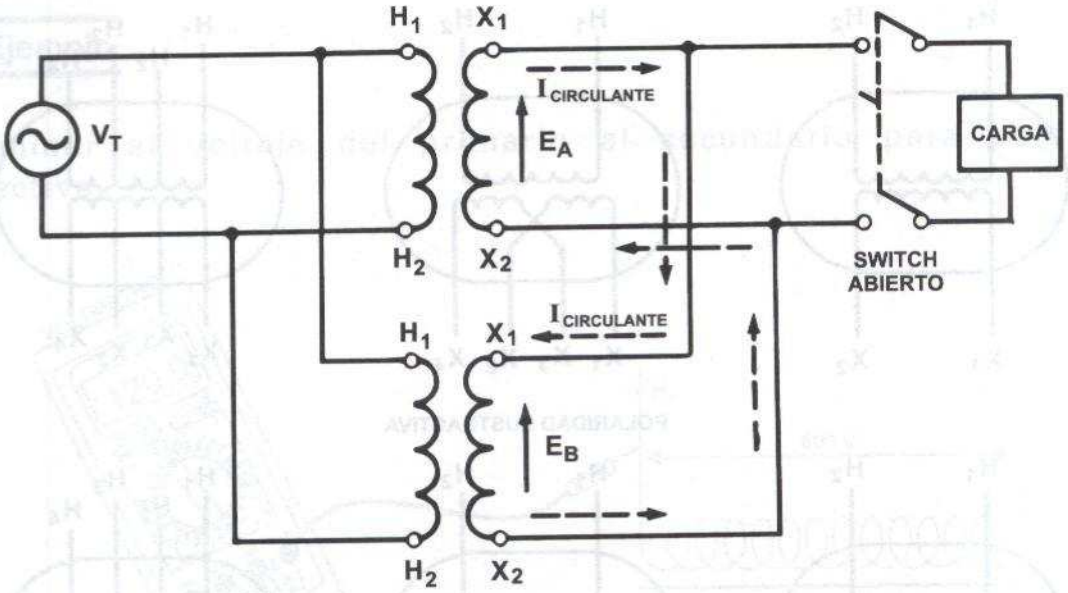


MARCA ESTANDAR PARA TERMINALES EN TRANSFORMADORES

6.3 EFECTO DE LAS DISTINTAS RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN EN LA OPERACIÓN EN PARALELO

En la siguiente figura, se muestra a dos transformadores operando en paralelo (también conocido como banco de transformadores en paralelo) sin carga conectada a los secundarios.

Suponiendo distintas relaciones de transformación, los voltajes de salida E_A y E_B no son iguales y circulará una corriente en el lazo o malla cerrada formada por los dos secundarios. La corriente circulante está indicada por flechas interrumpidas, como se indica en A. La suma fasorial de los voltajes es E_A-E_B y la impedancia de la malla es Z_A+Z_B.

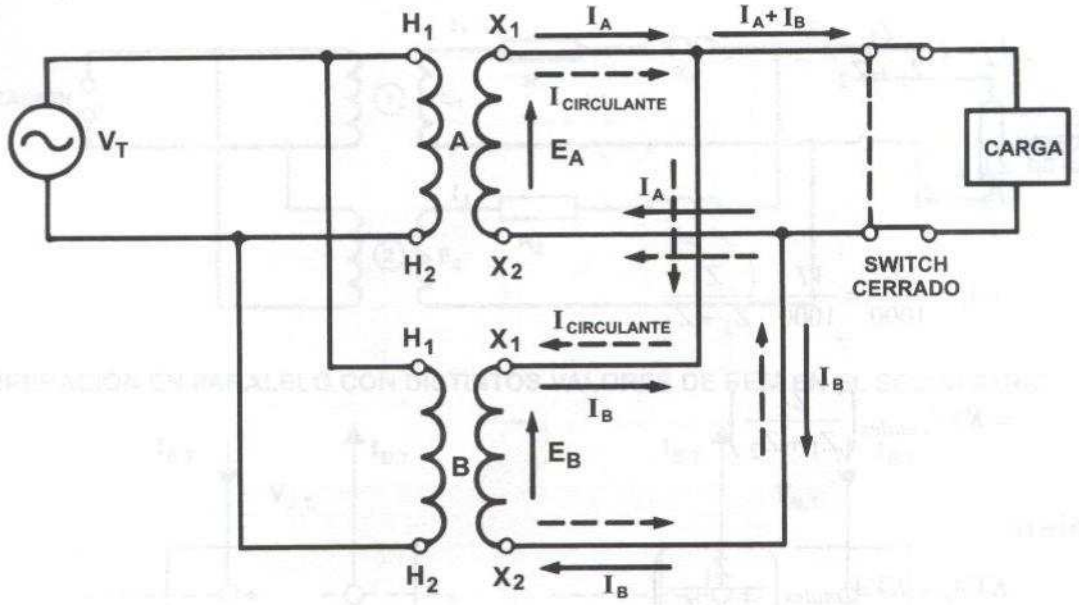


A) SWITCH (INTERRUPTOR) DE LA CARGA ABIERTA

Por la Ley de Ohm:

$$I_{circulante} = \frac{E_A - E_B}{Z_A + Z_B}$$

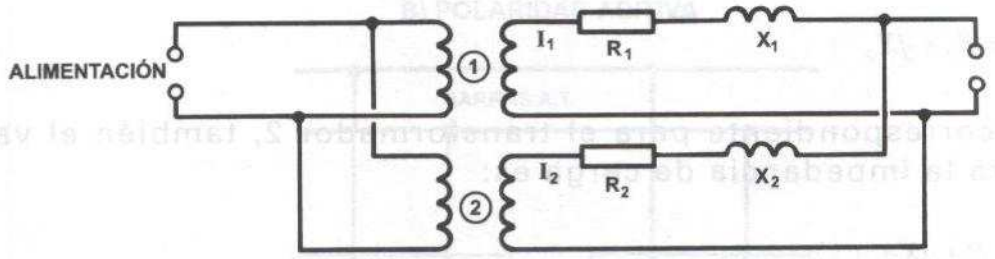
Cuando se cierra al switch de la carga, como se muestra en la figura B, la corriente circulante se suma a la corriente de carga de un transformador y se resta de la corriente de carga en el otro transformador, por lo tanto, si el banco de transformadores está operando a carga nominal, el transformador con el voltaje secundario más alto se sobrecarga y el otro transformador opera a baja carga.



B) SWITCH (INTERRUPTOR) DE LA CARGA CERRADO

CORRIENTE CIRCULANTE EN TRANSFORMADORES EN PARALELO

El circuito para la operación en paralelo, en ocasiones conviene referirlo al lado de carga, para esto se puede hacer uso del siguiente circuito.



CIRCUITO DE OPERACIÓN EN PARALELO, LAS CANTIDADES SE REFIEREN DE LADO DE LA CARGA

Aplicando las leyes de Kirchhoff a la red secundaria, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$I_1 = I\,\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_2 = I\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

y $$KVA_1 = \frac{VI_1}{1000} = \frac{VI}{1000}\ \frac{Z_2}{Z_1+Z_2}$$

$$= KVA_{Totales}\left(\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}\right)$$

También:

$$KVA_2 = KVA_{Totales}\left(\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}\right)$$

Para transformadores trifásicos las dos ecuaciones anteriores por $\sqrt{3}$.

Las cantidades usadas son complejas y $Z_1 = R_1 + jX_1$ que representa la impedancia del transformador 1 referida al secundario.

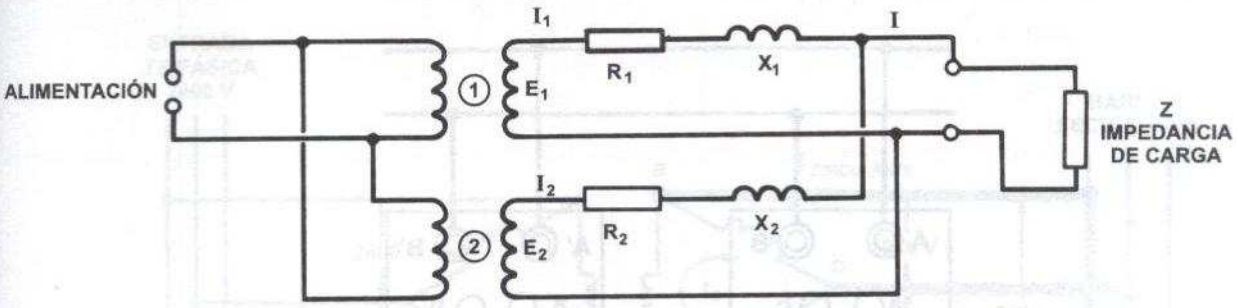
La impedancia:

$$Z_2 = R_2 + jX_2$$

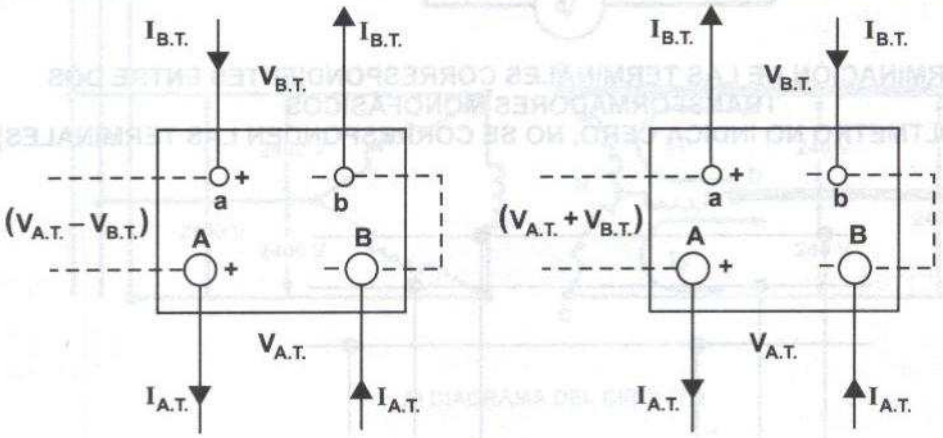
Es el valor correspondiente para el transformador 2, también el valor efectivo para la impedancia de carga es:

$$Z = R + jX$$

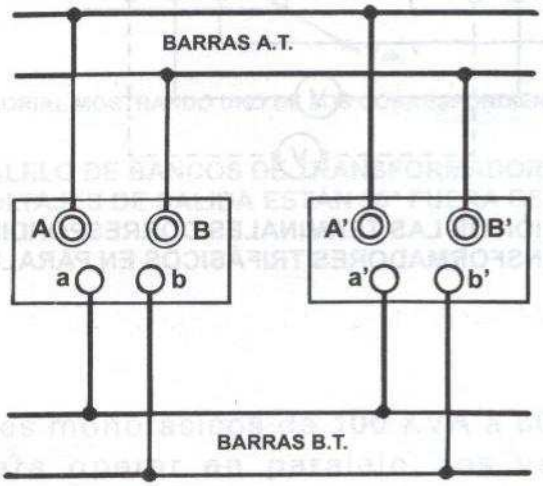
El circuito equivalente para la operación en paralelo con distintos valores de voltaje FEM en el secundario es el siguiente:



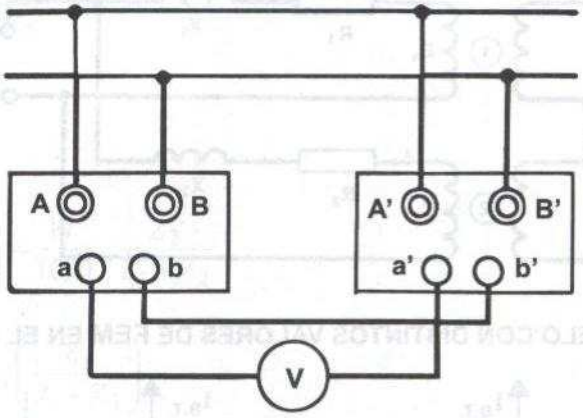
OPERACIÓN EN PARALELO CON DISTINTOS VALORES DE FEM EN EL SECUNDARIO



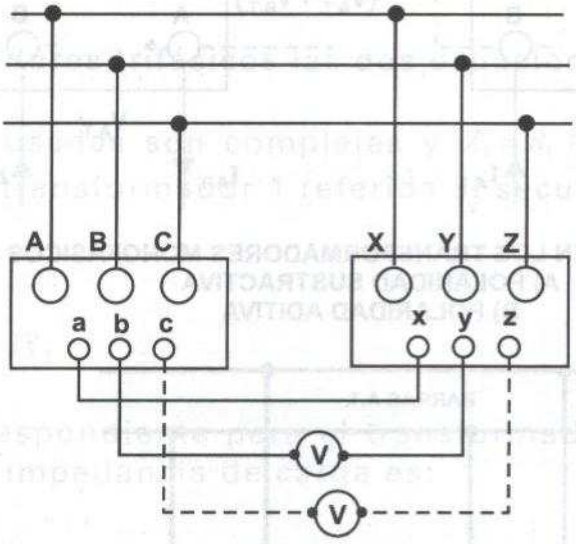
POLARIDAD EN LOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS :
A) POLARIDAD SUSTRACTIVA
B) POLARIDAD ADITIVA



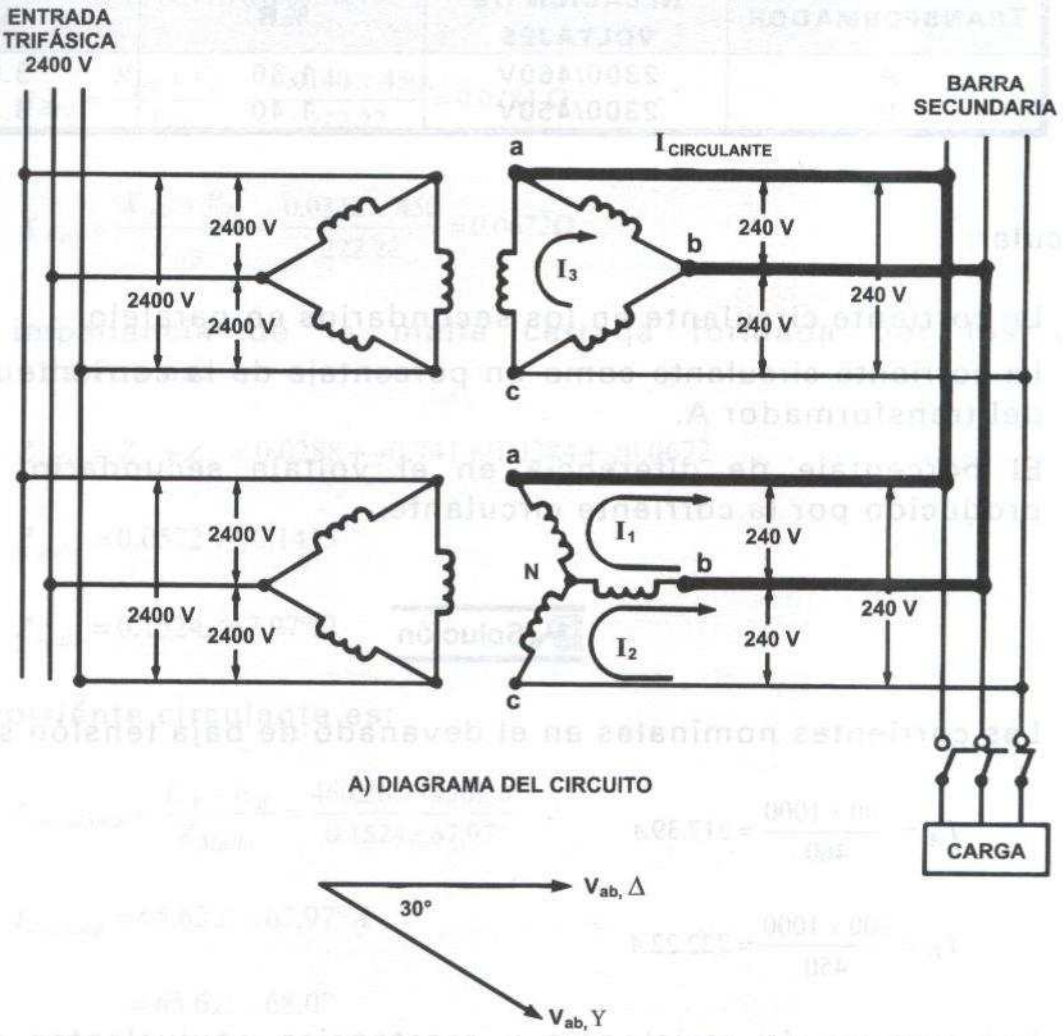
TRANSFORMADORES EN PARALELO



DETERMINACIÓN DE LAS TERMINALES CORRESPONDIENTES ENTRE DOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS
(SI EL VÓLTMETRO NO INDICA CERO, NO SE CORRESPONDEN LAS TERMINALES)



DETERMINACIÓN DE LAS TERMINALES CORRESPONDIENTES EN LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN PARALELOS



A) DIAGRAMA DEL CIRCUITO

B) DIAGRAMA FASORIAL MOSTRANDO UNO DE LOS CORRESPONDIENTES VOLTAJES DE FASE

CONEXIÓN EN PARALELO DE BANCOS DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CUYOS VOLTAJES DE SALIDA ESTÁN 30° FUERA DE FASE

Ejemplo

Dos transformadores monofásicos de 100 KVA a 60 Hz, denominados A y B, se conectan para operar en paralelo, los valores respectivos de relación de transformación en vacío y de impedancias se obtiene de los datos de placa y son los siguientes:

TRANSFORMADOR	RELACIÓN DE VOLTAJES	%R	%X
A	2300/460V	1.36	3.50
B	2300/450V	1.40	3.32

Calcular:

a) La corriente circulante en los secundarios en paralelo.

b) La corriente circulante como un porcentaje de la corriente nominal del transformador A.

c) El porcentaje de diferencia en el voltaje secundario, que es producido por la corriente circulante.

Solución

a) Las corrientes nominales en el devanado de baja tensión son:

$$I_A = \frac{100\ x\ 1000}{460} = 217.39A$$

$$I_B = \frac{100\ x\ 1000}{450} = 222.22A$$

Los valores de resistencia y reactancias equivalentes de cada transformador referidas al lado de baja tensión son:

$$R_{pu} = \frac{I_N\ \mathrm{Req}}{V_N}$$

Para el transformador **A**.

$$R_{Aeq} = \frac{R_{pu}\ x\ V_N}{I_{NA}} = \frac{0.0136\ x\ 460}{217.39} = 0.0288\ \Omega$$

$$X_{Aq} = \frac{X_{pu}\ x\ V_N}{I_{NA}} = \frac{0.035\ x\ 460}{217.39} = 0.0741\ \Omega$$

Para el transformador **B**.

$$R_{Beq} = \frac{R_{pu}\ x\ V_N}{I_{NB}} = \frac{0.0140\ x\ 450}{222.22} = 0.0284\ \Omega$$

$$X_{Beq} = \frac{X_{pu}\ x\ V_N}{I_{NB}} = \frac{0.0332\ x\ 450}{222.22} = 0.0672\Omega$$

La impedancia de la malla cerrada formada por los dos secundarios es:

$$Z_{Malla} = Z_A + Z_B = 0.0288 + j0.741 + 0.0284 + j0.0672$$

$$Z_{Malla} = 0.0572 + j0.1413$$

$$Z_{Malla} = 0.1524\angle 67.97°\Omega$$

La corriente circulante es:

$$I_{circulante} = \frac{E_A - E_B}{Z_{Malla}} = \frac{460\angle 0° - 450\angle 0°}{0.1524\angle 67.97°}$$

$$I_{circulante} = 65.62\angle -67.97°\ A$$

$$= 65.6\angle -68.0°$$

b) $$\frac{I_{circulante}}{I_A}\ x\ 100 = \frac{65.62}{217.39}\ x\ 100 = 30.2\%$$

c) $$\frac{E_A - E_B}{E_A}\ x\ 100 = \frac{460 - 450}{460}\ x\ 100 = 2.2\%$$

Ejemplo

Se tienen dos transformadores monofásicos de 1500 KVA, 4500/16000V, 60 Hz con rp= 0.03 Ω, Xp= 0.092 Ω operando en paralelo para alimentar una carga de 2500 KVA a factor de potencia 0.8

atrasado, un transformador alimenta originalmente la carga y un segundo idéntico se conecta en paralelo. Si hubieran pequeñas diferencias en características, como las mostradas en la tabla, calcular la distribución de la carga.

	TRANSFORMADOR 1 EXISTENTE	TRANSFORMADOR 2 ADICIONAL
Relación de voltaje	4500/16000	4500/16000
$KVA_{Nominales}$	1500	1500
Resistencia total R_T (Ω)	0.819	0.800
Reactancia total X_T (Ω)	2.503	2.31

El transformador 2 tiene un valor de resistencia y reactancia ligeramente distinto.

$$Z_A = 0.819 + j2.503 = 2.666\angle 71.88°\,\Omega$$

$$Z_B = 0.800 + j2.31 = 2.445\angle 70.9°\,\Omega$$

$$Z_A + Z_B = 1.619 + j4.813 = 5.078\angle 71.4°\Omega$$

La carga total que se alimenta a factor de potencia 0.8 atrasado es:

$$KVA_{Total} = 2500\angle -36.87°$$

De manera que la potencia que toma el transformador **A** es:

$$KVA_A = \frac{VI}{1000}\ \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} = KVA_{Total}\left(\frac{Z_B}{Z_A + Z_B}\right)$$

$$KVA_A = 2500\angle -36.87°\frac{2.445\angle 70.9°}{5.078\angle 71.4°}$$

$$KVA_A = 1203.7\angle 37.37°$$

O bien:

$KW = 1203.7\cos(37.37)° = 956.6$ a factor de potencia 0.79 atrasado.

En forma similar el transformador **B** toma la carga:

$$KVA_B = KVA_{Total}\ \frac{Z_A}{Z_A + Z_B}$$

$$= 2500\ \angle -36.87° \frac{2.66\ \angle 71.88°}{5.078\ \angle 71.4°}$$

$$KVA_B = 1296.3\ \angle -36.39°$$

También:

$$KW_B = 1296.3 \cos(-36.39°) = 1043.5\ KW\ a$$

$$\cos\varphi = 0.805\ atrasado$$

La corriente total es:

$$I_T = \frac{2500\ x\ 10^3}{16000} = 156.3 \angle -36.87°\ A$$

Las corrientes individuales en cada transformador son:

$$I_A = I_T\ \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} = 156.3 \angle -36.87°\ \frac{2.445\ \angle 70.9°}{5.078\ \angle 71.4°}$$

$$I_A = 75.26 \angle -37.37°$$

$$I_B = I_T\ \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} = 156.7 \angle -36.87°\ \frac{2.633\ \angle 71.88°}{5.078\ \angle 71.4°}$$

$$I_B = 81.04\ \angle -36.39°\ A$$

Debido a que los transformadores son nominalmente los mismos, el transformador B toma aproximadamente 7% más carga que el transformador A, de manera que trabajando a la máxima capacidad de 3000 KVA, resulta impráctico, debido a que un transformador debe trabajar arriba de su valor de plena carga.

6.4 Los valores de impedancias en porciento y en por unidad

El valor real absoluto de las impedancias de los transformadores, frecuentemente no está disponible en forma directa y entonces los fabricantes proporcionan los valores en porciento o en por unidad (p.u.), esto no hace diferencia en el procedimiento descrito antes para los cálculos. El sistema en por unidad es un sistema de cálculo en donde todas las cantidades relevantes están expresadas como FRACCIONES de valores seleccionados como BASE, este sistema tiene una gran aplicación en cálculos de los sistemas de potencia, particularmente cuando una red eléctrica incluye varias transformaciones de voltaje, la relación entre un valor en por unidad (p.u.) y un valor real o absoluto para una cantidad es:

$$\underset{unidad}{Valores\ en\ por} = \frac{Cantidad\ real}{Cantidad\ seleccionada\ como\ base}$$

La selección de los valores base se puede hacer de distintas maneras, pero una de éstas es como se indica:

1. Seleccionar un voltaje base V_b.
2. Seleccionar una corriente base I_b.

Los VA_{base} (ó KVA_{BASE}) son iguales a $V_b I_b$.

También:

$$R_b = \frac{V_b}{I_b} = X_b = Z_b$$

Por lo mismo:

$$Y_b = \frac{I_b}{V_b}$$

Para el ejemplo que se está resolviendo, la impedancia en por unidad es:

$$Z_{pu} = \frac{I_{pc} Z}{V_{Fase}} = \frac{93.75 \; x \; 2.633}{16000} \angle 71.88°$$

$$= 0.0154 \; pu$$

$$= 0.0154 \; x \; 100 = 1.54\%$$

$$R_{pu} = \frac{I_{pc} R}{V_{Fase}} = \frac{93.75 \; x \; 0.819}{16000} = 0.0048$$

$$= 0.0048 \; x 100$$

$$= 0.48\%$$

Finalmente la reactancia:

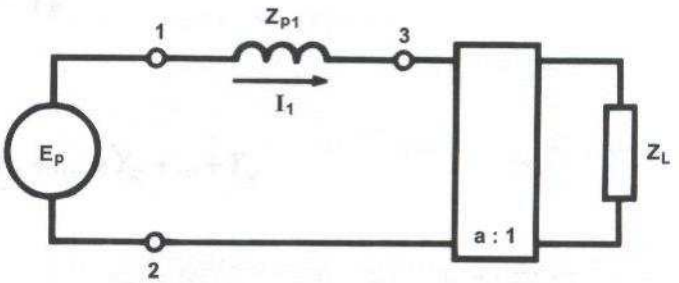
$$X_{pu} = \frac{93.75 \; x \; 2.503}{16000} = 0.0147 \, pu$$

También:

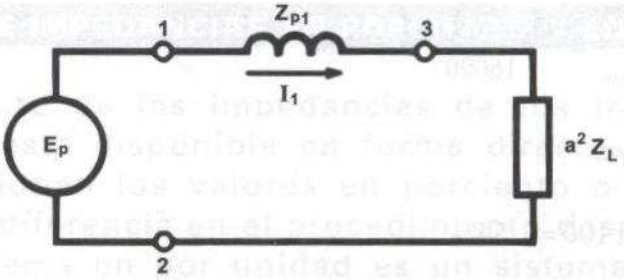
$$X_{pu} \; x 100 = X\% = 0.0147 \; x 100 = 1.47\%$$

6.5 DISTRIBUCIÓN DE CARGA ENTRE TRANSFORMADORES EN PARALELO

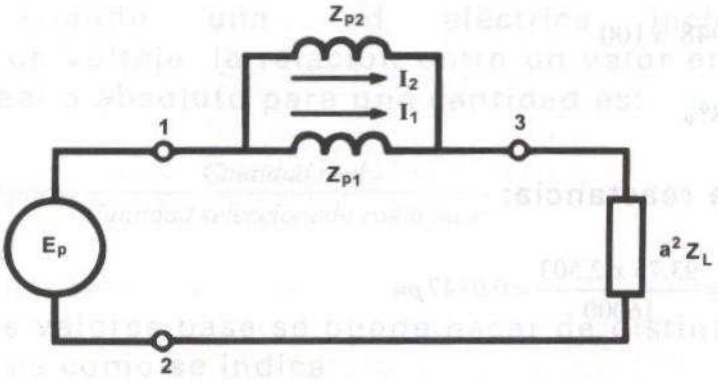
Como se ha indicado antes, un transformador se puede representar por una impedancia equivalente en serie con el voltaje de alimentación y la impedancia de la carga, con estos valores de impedancia del transformador e impedancia de la carga referidos al primario.



CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR ALIMENTANDO UNA CARGA

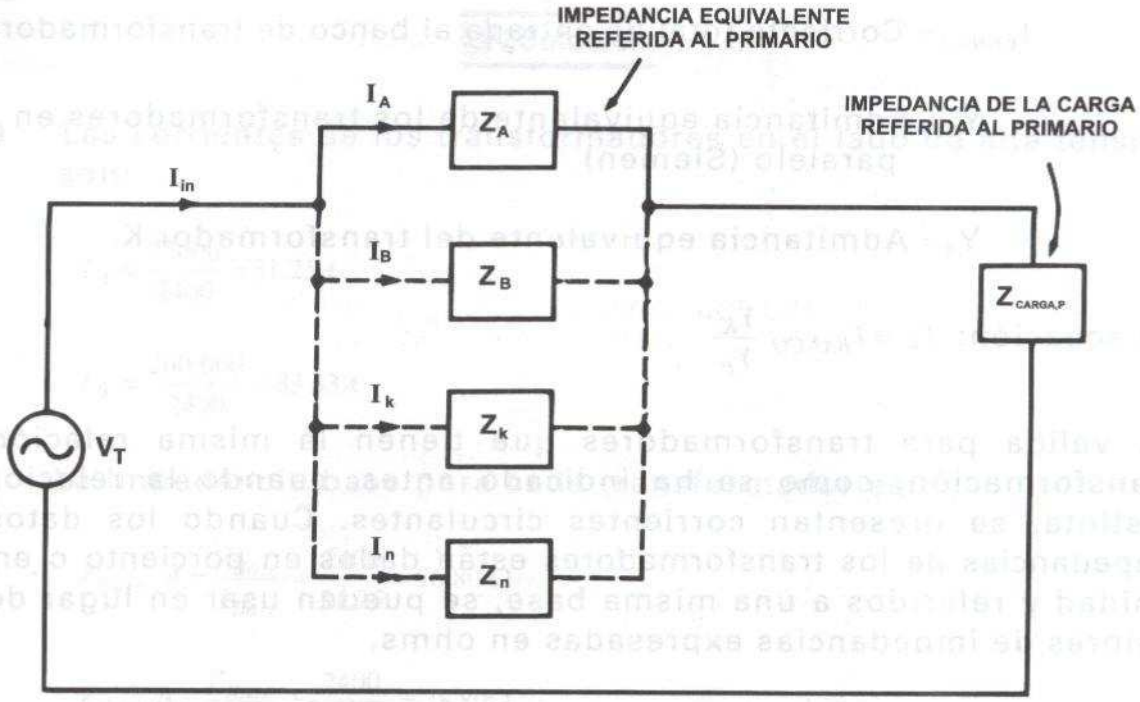


CIRCUITO EQUIVALENTE CON TODAS LAS IMPEDANCIAS REFERIDAS AL LADO PRIMARIO



CIRCUITO EQUIVALENTE DE DOS TRANSFORMADORES EN PARALELO ALIMENTANDO UNA CARGA Z_1

Si la relación de transformación de los transformadores conectados en paralelo es distinta, entonces se pueden representar por impedancias conectadas en paralelo, como se muestra en la siguiente figura, para cualquier número de transformadores conectados en paralelo.



CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA CONEXIÓN EN PARALELO DE TRANSFORMADORES

Para los transformadores de la figura anterior: se puede hacer:

$$Y_A = \frac{1}{Z_A}, \quad Y_B = \frac{1}{Z_B}, \ldots \quad Y_K = \frac{1}{Z_K}$$

$$Y_N = \frac{1}{Z_N}$$

Usando la regla del divisor de corriente.

$$I_K = I_{Banco} \frac{Y_K}{Y_P}$$

Donde:

$$Y_P = Y_A + Y_B + \ldots + Y_K + \ldots + Y_N$$

Siendo:

I_K = Corriente primaria en el transformador K.

I_{BANCO}= Corriente total de entrada al banco de transformadores.

Y_P= Admitancia equivalente de los transformadores en paralelo (Siemen)

Y_K= Admitancia equivalente del transformador K.

La ecuación: $I_K = I_{BANCO} \dfrac{Y_K}{Y_P}$

Es valida para transformadores que tienen la misma relación de transformación, como se ha indicado antes, cuando la relación es distinta, se presentan corrientes circulantes. Cuando los datos de impedancias de los transformadores están dados en porciento o en por unidad y referidos a una misma base, se pueden usar en lugar de los valores de impedancias expresadas en ohms.

Ejemplo

Un transformador (A) de 75 KVA se va a conectar en paralelo con otro transformador (B) de 200 KVA, ambos transformadores tienen una relación de transformación de 2400/240 volts y se operan en el modo reductor de voltaje. La impedancia de los transformadores (A) y (B) basadas en sus potencias individuales son:

$$Z_A = (1.64 + j3.16)\%, \qquad Z_B = (1.10 + j4.03)\%$$

Calcular:

a) La corriente nominal del transformador en el devanado de alta tensión de cada transformador.

b) El porcentaje de la corriente de carga o de banco que toma cada transformador.

c) La máxima carga que se puede alimentar sin sobrecargar a ninguno de los transformadores.

Solución

a) Las corrientes de los transformadores en el lado de alta tensión son:

$$I_A = \frac{75000}{2400} = 31.25A$$

$$I_B = \frac{200,000}{2400} = 83.33A$$

b) La impedancia base para cada transformador es:

$$Z_{Base}\ A = \frac{V_{Base}}{I_{Base}} = \frac{2400}{31.25} = 76.80\ \Omega$$

$$Z_{Base}\ B = \frac{V_{Base}}{I_{Base}} = \frac{2400}{83.333} = 28.80\Omega$$

Las impedancias equivalentes para cada transformador:

$$\%Z_A = 1.64 + j3.16 = 3.5602\angle 62.571°$$

$$\%Z_B = 1.10 + j4.03 = 4.1774\angle 74.733°$$

$$Z_{EQ}A = Z_{Base}A.Z_{pu}A = 76.80\ x\ 0.035602\angle 65.571°$$

$$= 2.7342\angle 62.571°\ \Omega$$

$$Z_{EQ}\cdot B = Z_{Base}B\cdot Z_{pu}B = 26.80\ x\ 0.041774\angle 74.733°$$

$$= 1.2031\angle 74.733°\ \Omega$$

$$Y_{EQA} = \frac{1}{Z_{EQA}} = \frac{1}{2.7342\angle 62.5710} = 0.36573\angle -62.571°$$

$$Y_{EQA} = (0.16847 - j0.32462)S$$

$$Y_{EQB} = \frac{1}{Z_{EQB}} = \frac{1}{1.2031\angle 74.733°} = 0.83119\angle -74.733°$$

$$Y_{EQB} = (0.21887 - j0.80185)S$$

La admitancia equivalente:

$$Y_P = (0.16847 - j0.3246) + (0.21887 - j0.80185)$$

$$Y_P = 1.19121\angle -71.0245°\ S$$

La corriente que circula por cada transformador:

$$I_A = I_{Banco}\frac{Y_A}{Y_P} = I_{Banco}\frac{0.36573}{1.19121} = 0.307\ I_{Banco}$$

$$I_B = I_{Banco}\frac{Y_B}{Y_P} = I_{Banco}\frac{0.83119}{1.19121} = 0.6978\ I_{Banco}$$

Por lo tanto, el transformador (A) de 75 KVA toma aproximadamente el 30.7% de la carga y el transformador (B) de 200 KVA toma en forma aproximada el 70% de la carga total.

c) La carga o capacidad del banco basada en la carga que toma el transformador A:

$$I_A = 0.307\ I_{Banco}$$

$$I_{Banco} = \frac{I_A}{0.307} = \frac{31.25}{0.307} = 101.79\ A$$

Si se toma como referencia la carga que toma el transformador **B**.

$$I_B = 0.6978\ I_{Banco}$$

$$I_{Banco} = \frac{I_B}{0.6978} = \frac{83.333}{0.6978} = 119.42\ A$$

Se selecciona una capacidad del banco de 101.79A para prevenir sobrecalentamiento en el transformador A, por lo tanto la potencia que se alimenta a la carga a banco es:

$$S_{Banco} = V_{Banco} \cdot I_{Banco} = \frac{2400\ x\ 101.79}{1000} = 244\ KVA$$

Ejemplo

Dos transformadores de 60 KVA, monofásico de 2300/230V, 60 Hz, designados como A y B, se conectan para operar en paralelo, los valores de sus impedancias en porciento son:

$$Z_A = (1.58 + j3.01)\%, \qquad Z_B = (1.09 + j3.98)\%$$

Calcular el porcentaje de la corriente total del banco o carga, que toma cada uno de los transformadores.

Solución

Debido a que los transformadores tienen la misma potencia aparente, tienen también la misma impedancia base y el problema se puede resolver entonces usando valores en por unidad.

$$Z_{Apu} = 0.0158 + j0.0301 = 0.033995\angle 62.3043°$$

$$Z_{Bpu} = 0.0109 + j0.0398 = 0.041266\angle 74.6840°$$

$$Y_{Apu} = \frac{1}{Z_{Apu}} = \frac{1}{0.033995\angle 62.3043°} = 29.416\angle -62.3043°$$

$$Y_{Apu} = 13.672 - j26.046$$

$$Y_{Bpu} = \frac{1}{0.041266\angle 74.684°} = 24.233\angle -74.6848 = 6.401 - j23.373$$

La admitancia equivalente:

$$Y_{Ppu} = Y_{Apu} + Y_{Bpu}$$

$$Y_{Ppu} = (13.672 - j26.046) + (6.401 - j23.373) = 53.340\angle -67.89^{\circ}$$

$$I_A = \frac{Y_{Apu}}{Y_{Ppu}} x\ 100 = \frac{29.416}{53.340} x\ 100 = 55.15\%$$

$$I_B = 100 - 55.15 = 44.85\%$$

6.6 LA CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES

Las conexiones de los transformadores y sus aplicaciones han tenido a lo largo de los años una gran variedad de configuraciones que, en algunos casos, tienen un cierto grado de complejidad para ser comprendidas. Estas conexiones varían, dependiendo si se trata de transformadores monofásicos o trifásicos. No es la intención de este capítulo cubrir todas las posibles conexiones trifásicas y cómo se pueden obtener de éstas todas las corrientes trifásicas y voltajes, y cómo se entregan; sólo se tratan con detalle las más comunes.

La decisión de no tratar con detalle algunas de las conexiones especiales, se basa en que la mayoría de los electricistas no trabajan en casos que se requieran conocimientos profundos de las conexiones especiales para el alambrado de transformadores de potencias similares a los de distribución.

De los conceptos más importantes a verificar en los voltajes involucrados en las instalaciones y la potencia en KVA del transformador, las preguntas que quedan por contestar son las siguientes:

¿El voltaje suministrado por la compañía proveedora satisface con el voltaje del devanado primario del transformador?

¿Llena el voltaje secundario con los requerimientos de las cargas?

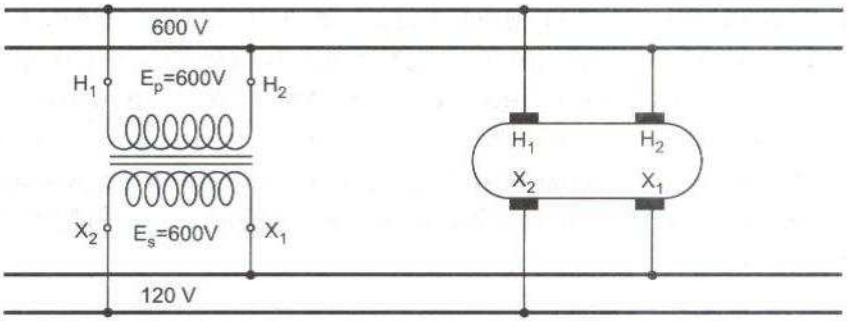
¿Son los KVA del transformador mayores o iguales a la carga que se va a alimentar?

Los párrafos siguientes plantean una posibilidad técnica de respuesta a las interrogantes.

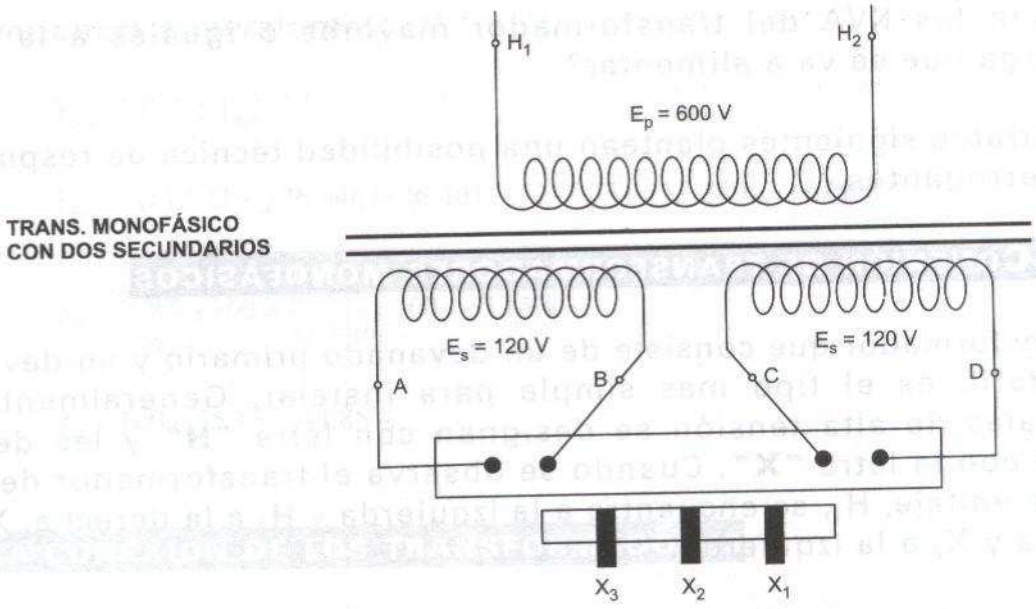
6.6.1 CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Un transformador que consiste de un devanado primario y un devanado secundario es el tipo más simple para instalar. Generalmente, las terminales de alta tensión se designan con letra **"H"** y las de bajo voltaje con la letra **"X"**. Cuando se observa el transformador del lado de bajo voltaje, H_1, se encuentra a la izquierda y H_2 a la derecha, X_1 a la derecha y X_2 a la izquierda.

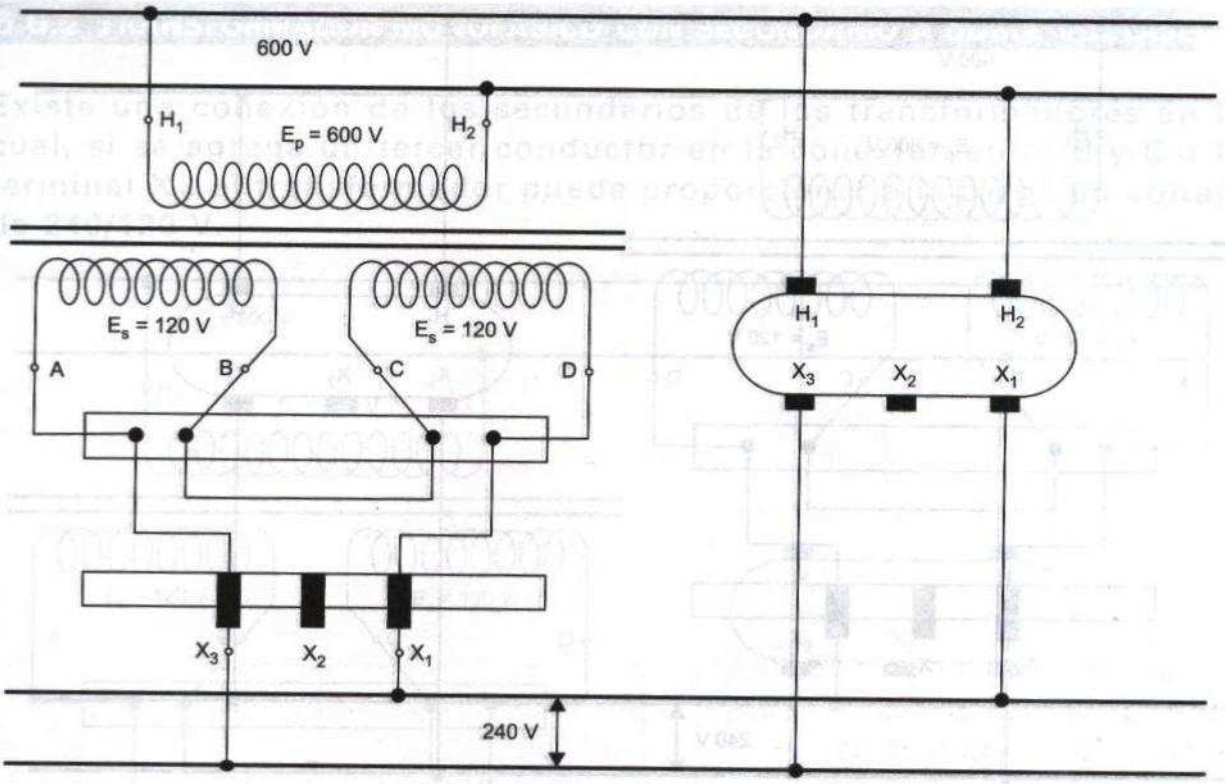
CONEXIONES PARA UN TRANS. MONOFÁSICO



En algunos casos, los transformadores monofásicos tienen dos devanados secundarios, de manera que puedan entregar dos voltajes diferentes a la carga. Este tipo de transformadores es el típico para alimentar a clientes residenciales o a pequeños negocios. La conexión más común es para 240/120 volts.



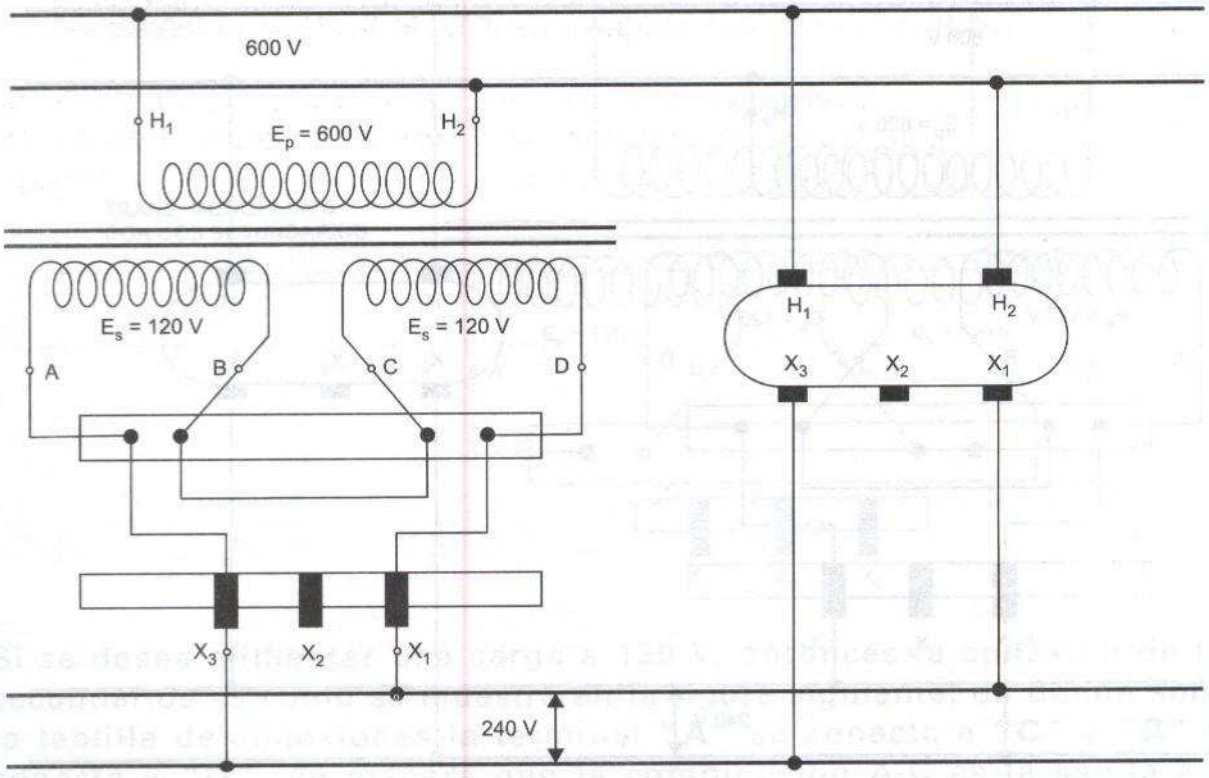
Si se desea alimentar una carga a 120 V, entonces la conexión de los secundarios es como se muestra en la figura siguiente, en donde sobre la tablilla de conexiones la terminal **"A"** se conecta a **"C"** y **"B"** se conecta a **"D"**, de manera que la combinación A-C es la salida a la terminal X_2 y la conexión B-D es la salida a la conexión X_1. Las líneas de fuerza se conectan a X_1 y X_2, en tanto que H_1 y H_2 se conectan a la alimentación.



CONEXIÓN TÍPICA PARA TRANSFORMADORES CON DOS DEVANADOS Y SALIDA EN ALTO VOLTAJE (SECUNDARIOS EN SERIE)

La conexión anterior corresponde a poner en paralelo a los dos secundarios, con lo cual se duplica la corriente disponible. Cada devanado puede entregar la mitad de los KVA usados. Debido a que los secundarios son parte de un transformador y tienen igual capacidad, no se requieren consideraciones adicionales cuando se hace este tipo de instalaciones.

Cuando se alimentan cargas a 240 V (dos veces el voltaje de cada devanado secundario en general), entonces los devanados secundarios se conectan en serie entre sí. Sobre la tablilla de conexiones B y C se conectan juntas y el punto de unión es la salida a la terminal X_2, A se conecta a X_3 y D a X_1. Bajo estas condiciones, el voltaje sobre los secundarios de los devanados se suma para dar los 240 volts. La corriente de salida es la mitad de la del arreglo en paralelo.



CONEXIÓN TÍPICA PARA TRANSFORMADORES CON DOS DEVANADOS Y SALIDA EN ALTO VOLTAJE (SECUNDARIOS EN SERIE)

Ya sea que se conecten los secundarios para bajo o para alto voltaje, el voltaje en el primario es el mismo y los máximos KVA disponibles a la carga son iguales en ambas circunstancias. Los KVA del primario deben ser igual a los KVA de secundario, menos las pérdidas del transformador. Por ejemplo, si el transformador tiene una potencia de 6 KVA, el devanado primario demandará 10 A plena carga: 6 KVA=600 V X 10A.

Los secundarios a 120 V pueden entregar 50 amperes. Cada devanado puede suministrar 25 amperes.

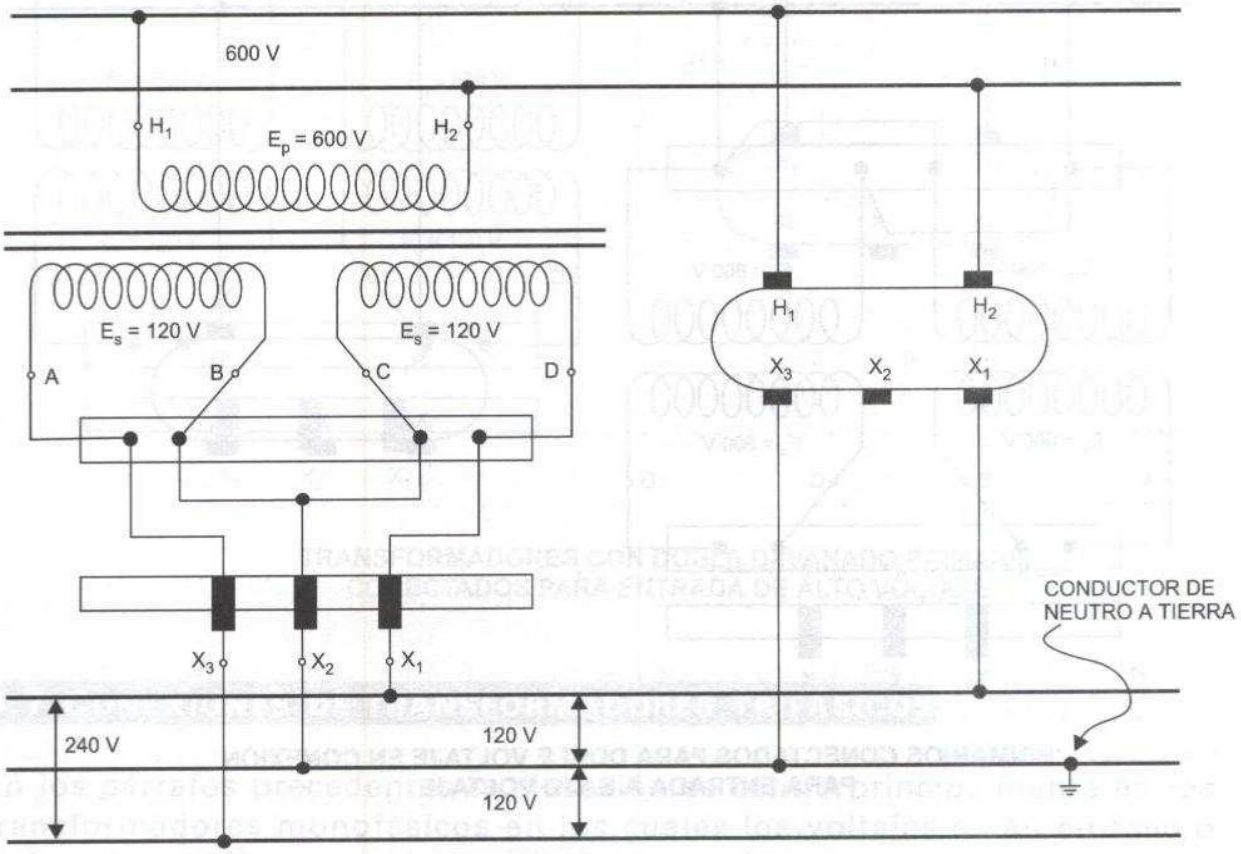
$$6\,KVA = 120\,V\ x\ 50A \qquad 6\,KVA = 2(120V\ \ x\ \ 25A)$$

Cuando se entregan 240 V a la carga conectando los secundarios en serie, el transformador puede entregar 25A de corriente de utilización.

$$6\,KVA = 240V\ x\ 25A$$

6.6.2 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO CON SECUNDARIO A DOBLE VOLTAJE

Existe una conexión de los secundarios de los transformadores en la cual, si se agrega un tercer conductor en la conexión entre B y C a la terminal X_2, el transformador puede proporcionar a la carga un voltaje de 240/120 V.



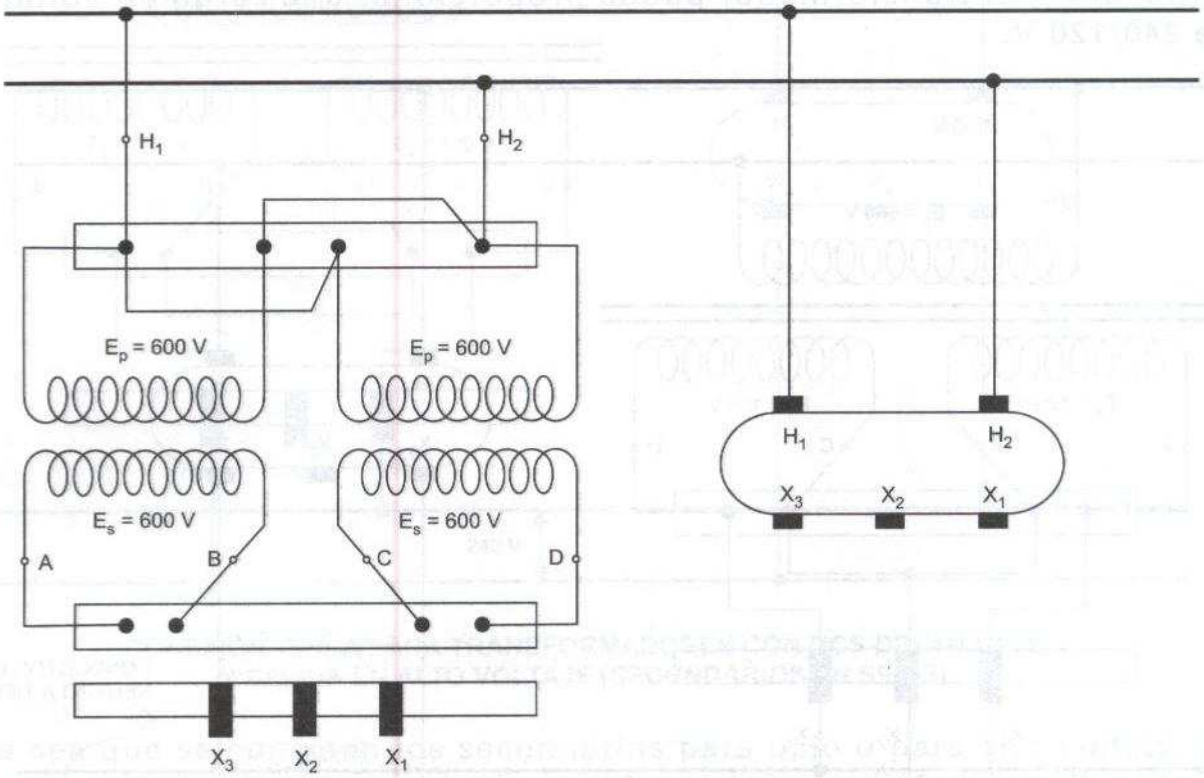
CONEXIÓN TÍPICA DE SECUNDARIOS DOBLES CONECTADOS PARA SALIDA A DOBLE VOLTAJE

Las terminales A y D están alambradas a X_3 y X_1 respectivamente. El voltaje entre: X_1 y X_2, y X_3 y X_2 es 120 volts. X_2 representa el neutro aterrizado en este sistema. El voltaje entre X_1 y X_3 es 240 volts.

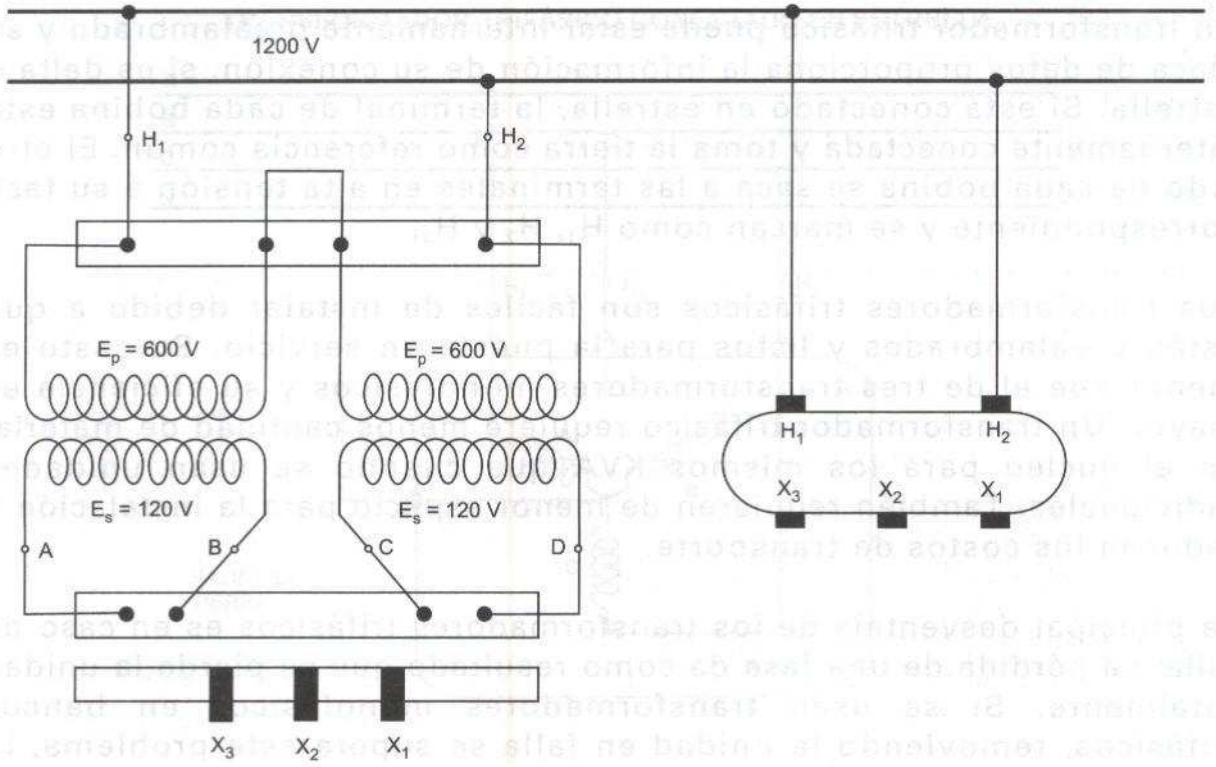
6.6.2 DEVANADOS PRIMARIOS A DOBLE VOLTAJE

Los transformadores pueden tener dobles devanados primarios, así como dobles devanados secundarios, como en los párrafos anteriores, se ilustra con un ejemplo de transformadores monofásicos a 600 V en

el primario y 120 V en el secundario, la forma de hacer estas conexiones, tanto para entrada a bajo voltaje (600 V) en conexión en paralelo de los devanados primarios, como para entrada a alto voltaje, conectando en serie los devanados de alto voltaje.



PRIMARIOS CONECTADOS PARA DOBLE VOLTAJE EN CONEXIÓN PARA ENTRADA A BAJO VOLTAJE



TRANSFORMADORES CON DOBLE DEVANADO PRIMARIO CONECTADOS PARA ENTRADA DE ALTO VOLTAJE

6.7 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

En los párrafos precedentes la discusión se centró principalmente en los transformadores monofásicos en los cuales los voltajes están en fase o defasados 180°, y por lo tanto, los voltajes se suman o se restan aritméticamente. Aún cuando los sistemas monofásicos son los más usados por los equipos de utilización, no resultan económicos para sistemas de distribución grandes o para la alimentación de cargas grandes. Para este propósito los sistemas trifásicos resultan los más populares, ya que requieren aproximadamente 25% menos de conductor (cobre o aluminio) para entregar la misma potencia a una carga.

Adicionalmente, los transformadores trifásicos son más pequeños que un banco de transformadores monofásicos de igual capacidad y también resultan más fáciles de fabricar, con mejores características operativas que los monofásicos.

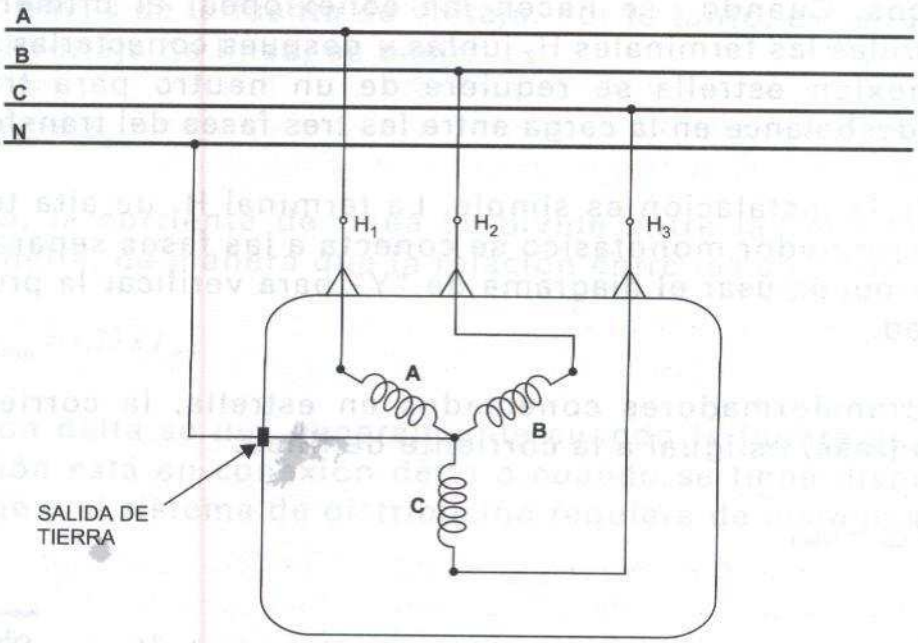
Un transformador trifásico puede estar internamente prealambrado y su placa de datos proporciona la información de su conexión, si es delta o estrella. Si está conectado en estrella, la terminal de cada bobina está internamente conectada y toma la tierra como referencia común. El otro lado de cada bobina se saca a las terminales en alta tensión a su fase correspondiente y se marcan como H_1, H_2 y H_3.

Los transformadores trifásicos son fáciles de instalar debido a que están prealambrados y listos para la puesta en servicio. Su costo es menor que el de tres transformadores monofásicos y su eficiencia es mayor. Un transformador trifásico requiere menos cantidad de material en el núcleo para los mismos KVA que cuando se usan unidades individuales. También requieren de menor espacio para la instalación y reducen los costos de transporte.

La principal desventaja de los transformadores trifásicos es en caso de falla. La pérdida de una fase da como resultado que se pierda la unidad totalmente. Si se usan transformadores monofásicos en bancos trifásicos, removiendo la unidad en falla se supera este problema, lo cual no es posible con una unidad trifásica.

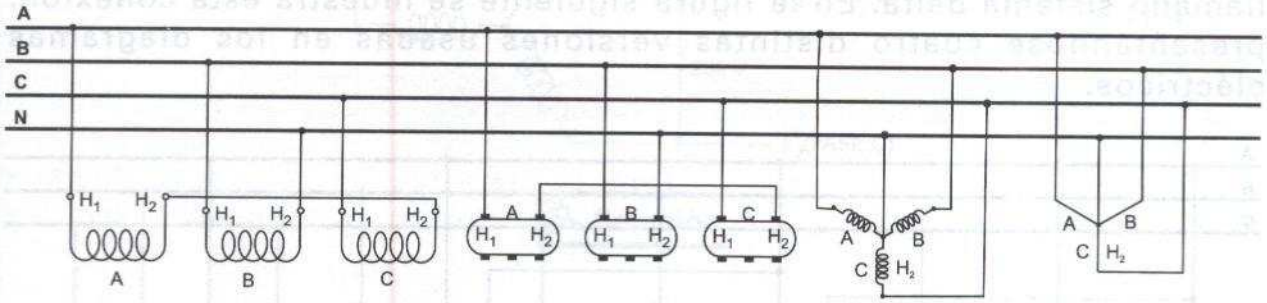
El costo de reparación de una unidad trifásica es superior al de una unidad monofásica que se podría usar en el sistema para restablecer el servicio. Los transformadores trifásicos reducen su capacidad cuando son del tipo autoenfriado. Aún con estas desventajas, los transformadores trifásicos son cada vez más populares, ya que con mejores diseños son más confiables y, la frecuencia de fallas se hace más rara.

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CONECTADO EN ESTRELLA



6.7.1 LA CONEXIÓN ESTRELLA

Los transformadores conectados en estrella, también conocidos como **"Y"** se usan normalmente cuando la fuente de voltaje proviene de un secundario conectado en estrella.



DEVANADOS DE TRANSFORMADORES CONECTADOS EN ESTRELLA

En la figura anterior, se indican cuatro representaciones con el objeto de comprender mejor las conexiones. En la práctica, se puede usar

cualquiera de éstas, en donde se muestran tres transformadores monofásicos. Cuando se hacen las conexiones, el primer paso es alambrar todas las terminales H_2 juntas y después conectarlas al neutro. En la conexión estrella se requiere de un neutro para transportar cualquier desbalance en la carga entre las tres fases del transformador.

El resto de la instalación es simple. La terminal H_1 de alta tensión de cada transformador monofásico se conecta a las fases separadas de la fuente. Se puede usar el diagrama de "Y" para verificar la precisión de la actividad.

Para los transformadores conectados en estrella, la corriente en el devanado (fase) es igual a la corriente de línea:

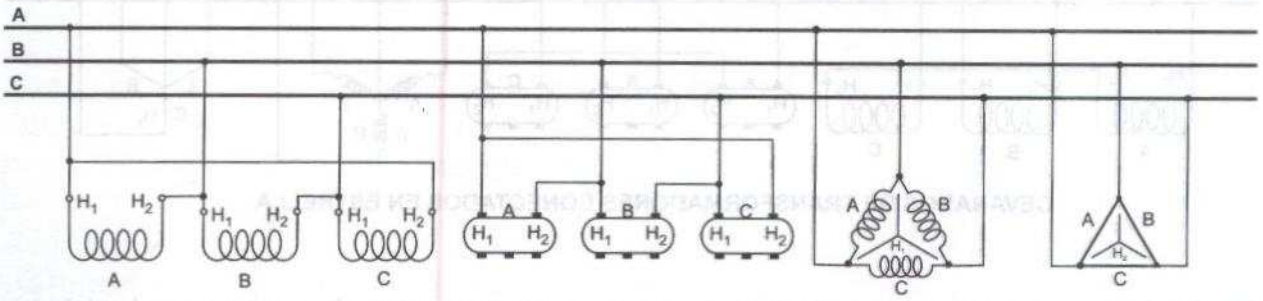
$$I_{fase} = I_{linea}$$

Los voltajes de línea en la conexión estrella se calculan con respecto a los voltajes de fase de acuerdo con la siguiente expresión:

$$E_{linea} = 1.732\ E_{linea}$$

6.7.2 LA CONEXIÓN DELTA

El otro método común de conexión de transformadores trifásicos es el llamado sistema delta. En la figura siguiente se muestra esta conexión, presentándose cuatro distintas versiones usadas en los diagramas eléctricos.



DISTINTAS FORMAS DE REPRESENTAR LA CONEXIÓN DELTA DE TRANSFORMADORES

En la conexión delta, cada fase o grupo de bobinas del transformador se conecta a través de la fuente de voltaje. Por lo tanto, el voltaje de fase es igual al voltaje de línea, es decir:

$$E_{fase} = E_{linea}$$

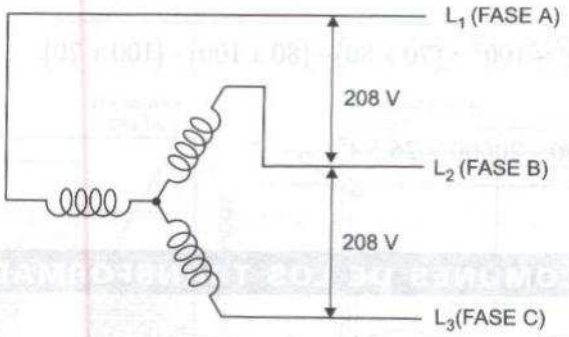
En cambio, la corriente de línea se divide entre las dos fases de la conexión delta, de manera que la relación entre las corrientes es:

$$I_{linea} = 1.73\, x\, I_{fase}$$

La conexión delta se usa generalmente cuando la fuente de voltaje o alimentación está en conexión delta o cuando se tiene disponible un solo voltaje y el sistema de distribución requiere de distancias cortas.

Ejemplo

¿Cuál es el voltaje de fase a neutro de un sistema trifásico conectado en estrella si el voltaje de fase a fase es 208 volts?

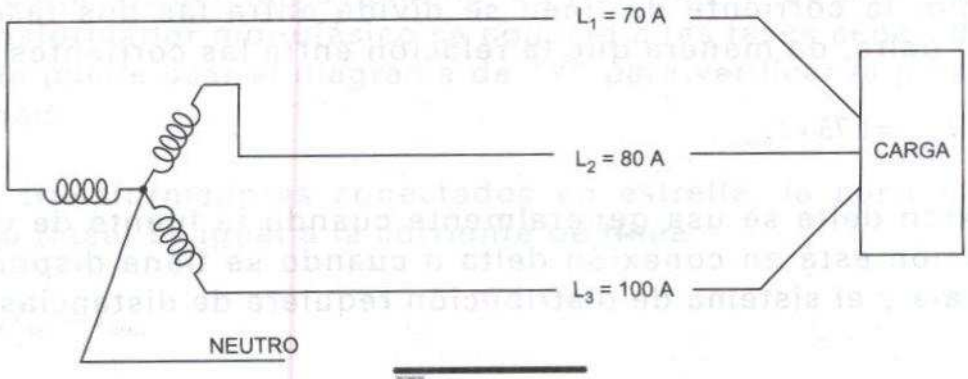


Solución

$$E_{fase} = \frac{E_{linea}}{\sqrt{3}} = \frac{208}{1.732} = 120V$$

Ejemplo

Calcular la corriente que circula por el neutro de una estrella desbalanceada, cuyas corrientes de fase son: L_1 = 70 A, L_2=80 A, L_3=100 A.



Solución

La corriente de desbalance a través del neutro se calcula como:

$$I_N = \sqrt{I_{L1}^2 + I_{L2}^2 + I_{L3}^2 - (I_{L1} x I_{L2}) - (I_{L2} x I_{L3}) - (I_{L3} x I_{L1})}$$

$$I_N = \sqrt{70^2 + 80^2 + 100^2 - (70 \ x \ 80) - (80 \ x \ 100) - (100 \ x \ 70)}$$

$$I_N = \sqrt{21300 - 20600} = 26.5A$$

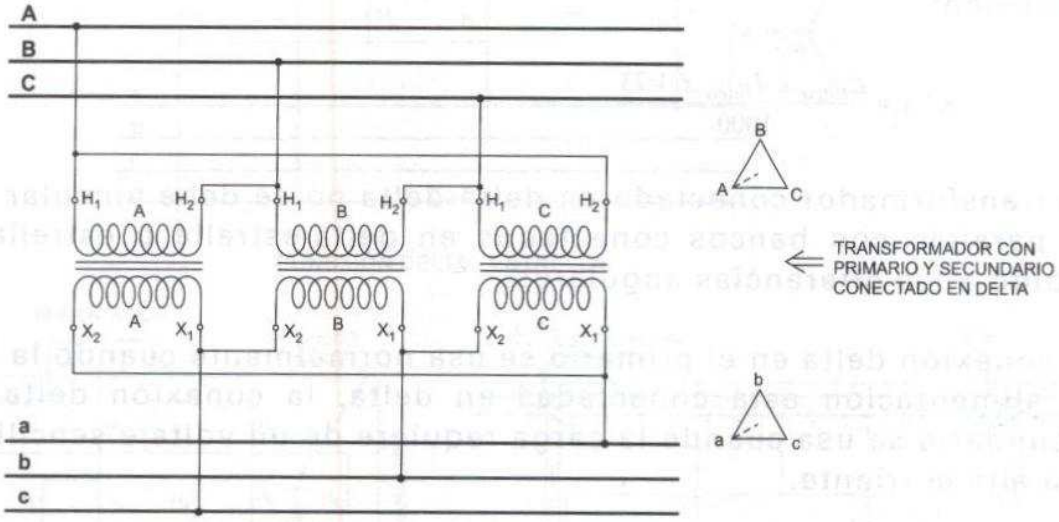
6.8 CONEXIONES COMUNES DE LOS TRANSFORMADORES

Las conexiones más comunes de transformadores, ya sean monofásicos formando bancos trifásicos o bien transformadores trifásicos, son las siguientes:

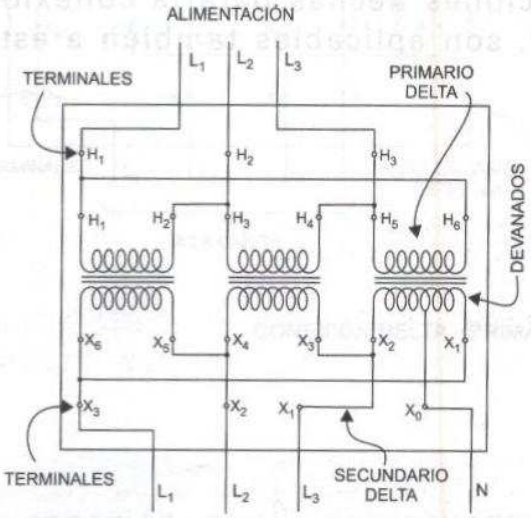
PRIMARIO	SECUNDARIOS
Delta	Delta
Delta	Estrella
Estrella	Estrella
Estrella	Delta

Cada uno de estos arreglos tiene ventajas y desventajas, dependiendo de la aplicación que se dé.

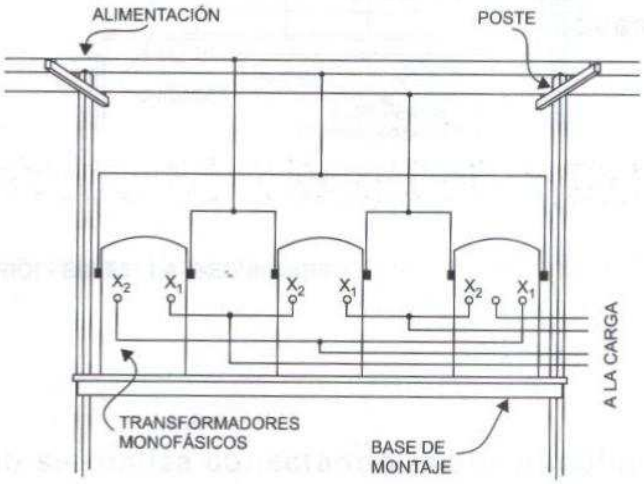
La figura siguiente muestra el diagrama de alambrado o de conexiones para una conexión delta-delta en un transformador monofásico, tanto el primario como el secundario están conectados en serie.



CONEXIÓN DELTA - DELTA



CONEXIÓN DELTA EN EL PRIMARIO Y EL SECUNDARIO



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EN DELTA - DELTA

De la figura anterior, el H_1 de cada bobina se conecta a su respectiva fase sobre el alimentador y el X_1 de cada bobina del secundario se conecta de igual forma al circuito de carga.

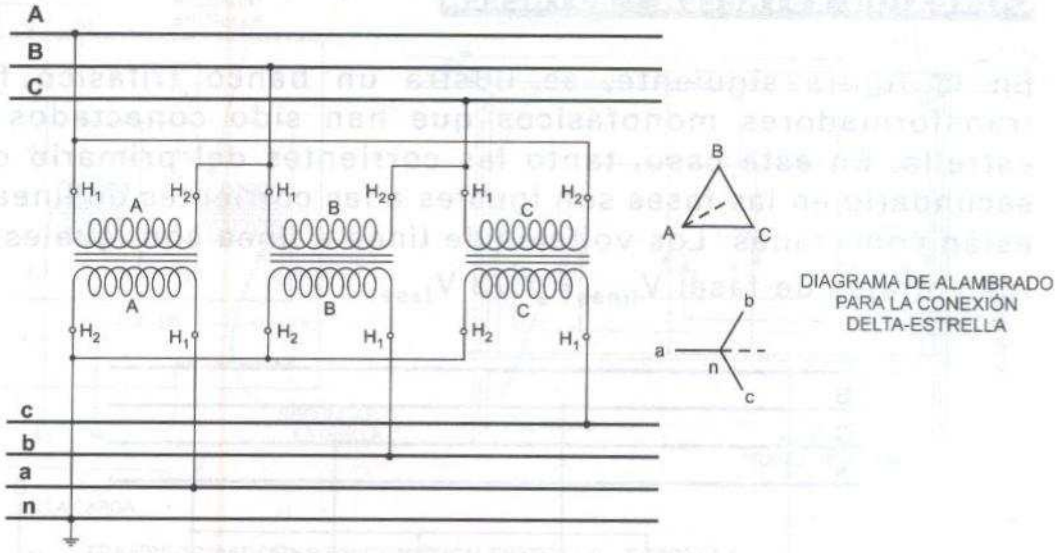
En la conexión delta, la carga se debe dividir por igual entre cada transformador. Por ejemplo, si la carga es de 75 KVA, cada transformador deberá ser de 25 MVA ó 1/3 de la carga total. El valor total de la potencia entregada al circuito se puede calcular con la expresión:

$$KVA = \frac{E_{línea} \ x \ I_{línea} \ x \ 1.73}{1000}$$

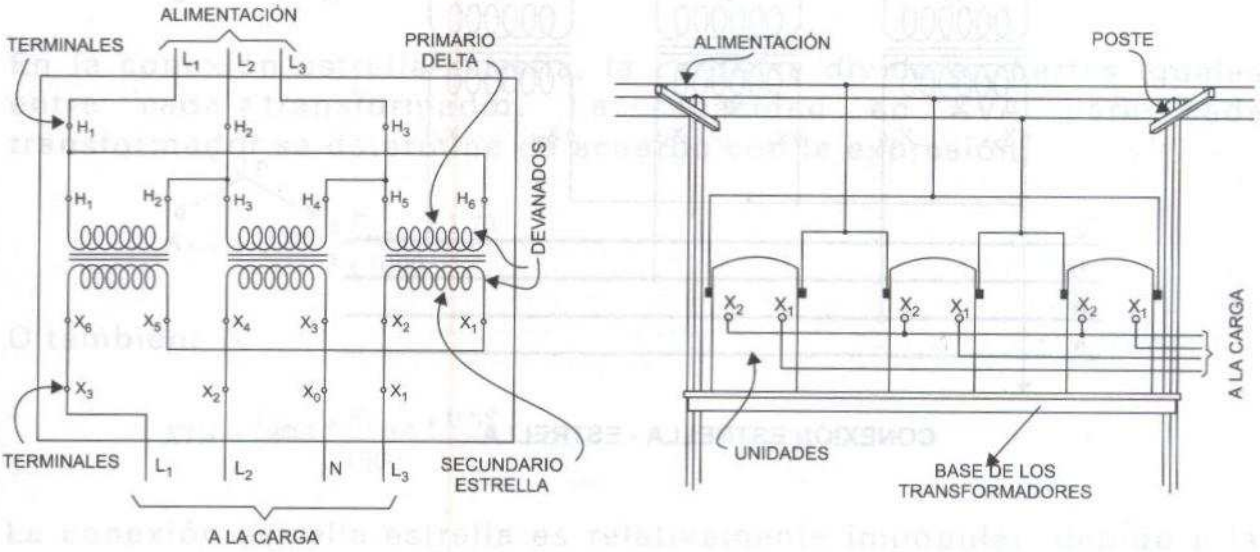
Un transformador conectado en delta-delta no se debe vincular nunca en paralelo con bancos conectados en delta/estrella o estrella/delta debido a las diferencias angulares.

La conexión delta en el primario se usa normalmente cuando la fuente de alimentación está conectadas en delta, la conexión delta en el secundario se usa cuando la carga requiere de un voltaje sencillo y de una alta corriente.

En la figura siguiente se muestra el diagrama de alambrado para una conexión delta estrella, las consideraciones hechas para la conexión delta realizadas en el párrafo anterior, son aplicables también a este caso.



CONEXIÓN DELTA - ESTRELLA

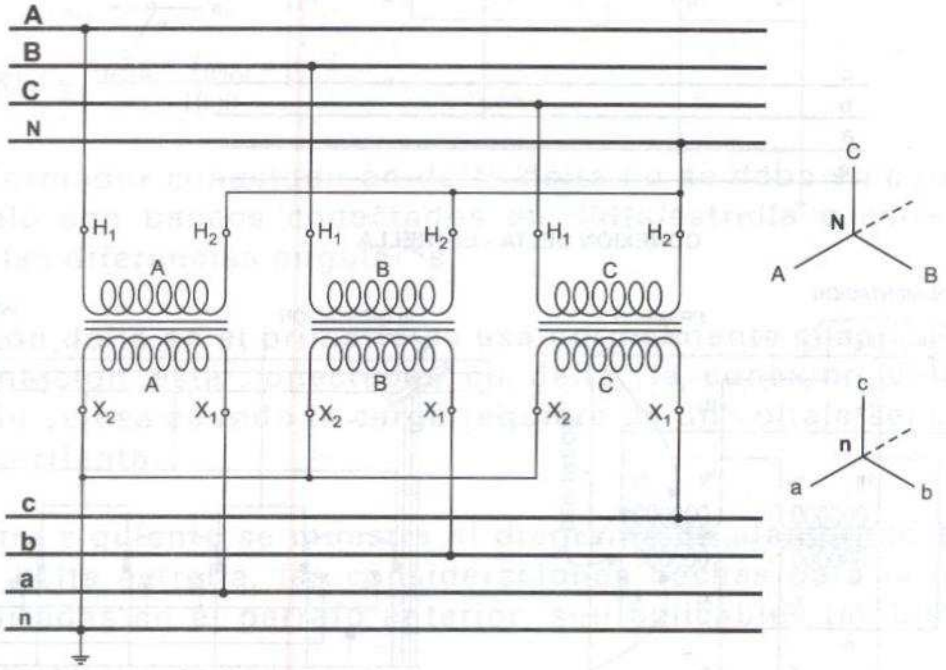


CONEXIÓN DELTA (PRIMARIO) - ESTRELLA (SECUNDARIO)

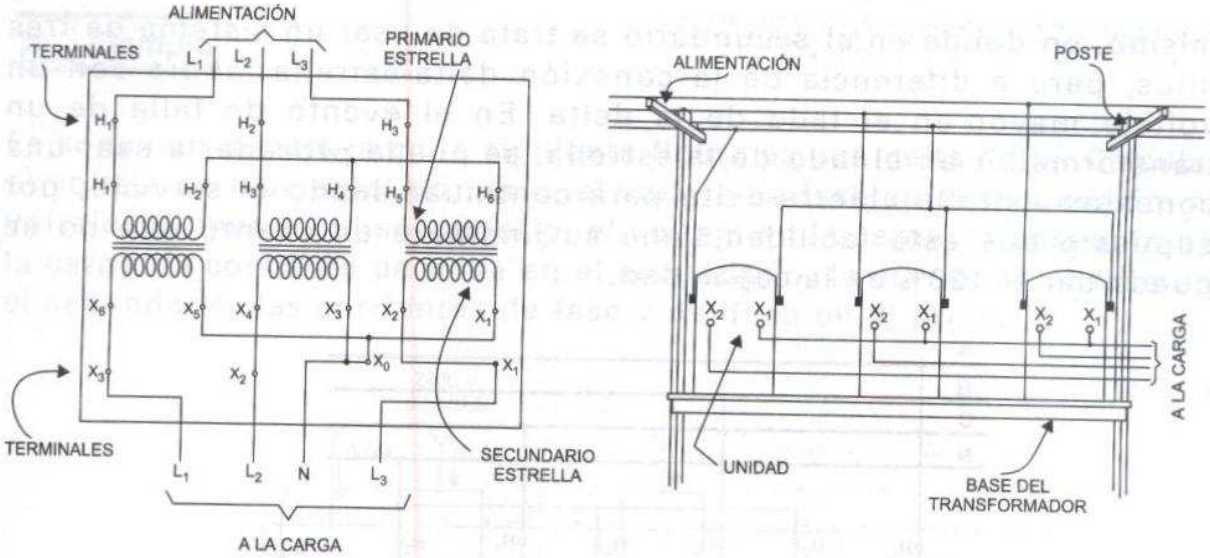
La conexión estrella del secundario se realiza conectando las terminales X_2 de las bobinas juntas o unidas y éstas al neutro de tierra. El voltaje secundario a la carga se obtiene multiplicando por 1.73 el voltaje de fase.

CONEXIÓN ESTRELLA - ESTRELLA

En la figura siguiente, se ilustra un banco trifásico formado por transformadores monofásicos que han sido conectados en estrella-estrella. En este caso, tanto las corrientes del primario como las del secundario en las fases son iguales a las corrientes de línea a las cuales están conectadas. Los voltajes de línea a línea son iguales a 1.73 veces los voltajes de fase: $V_{línea} = 1.73\ V_{fase}$



CONEXIÓN ESTRELLA - ESTRELLA



TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN ESTRELLA - ESTRELLA

En la conexión estrella-estrella, la carga se divide en partes iguales entre cada transformador. La capacidad en KVA para cada transformador se determina de acuerdo con la expresión.

$$KVA = \frac{I_{línea}\ x\ E_{línea}\ x\ 1.73}{3\ x\ 1000}$$

O también:

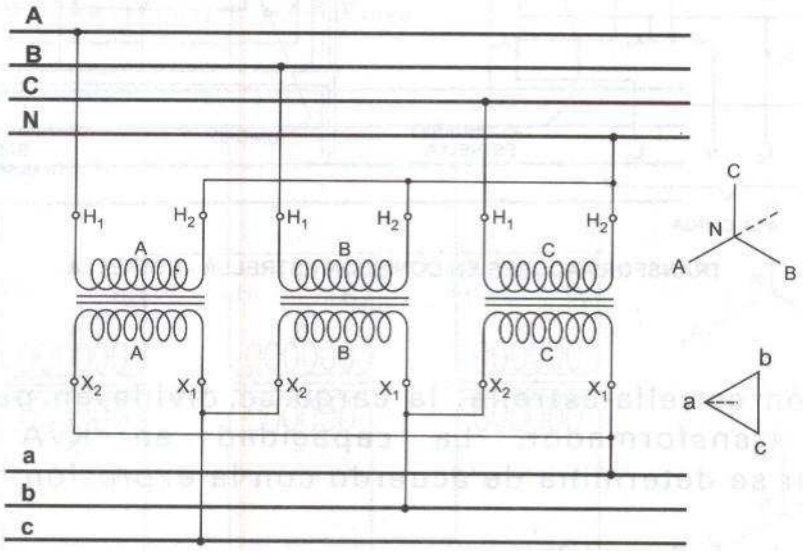
$$KVA = \frac{I_{línea}\ x\ E_{línea}\ x\ 0.58}{1000}$$

La conexión estrella-estrella es relativamente impopular, debido a la inherente inestabilidad del neutro y esto se debe al hecho de que las corrientes que circulan en las ramas de la conexión estrella no son independientes unas de otras.

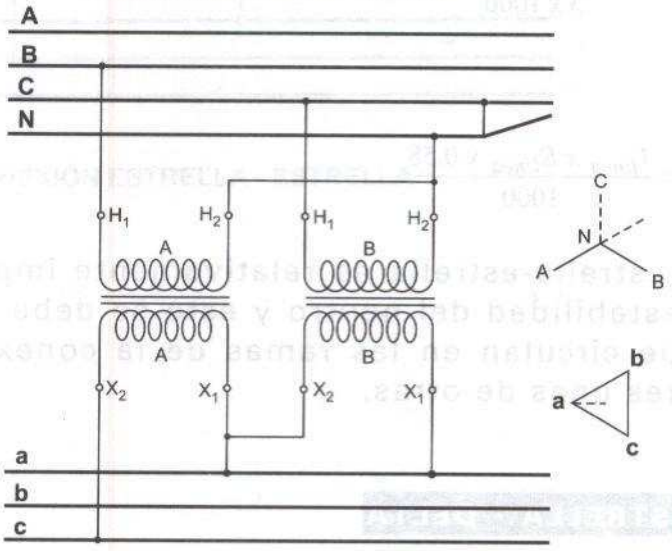
CONEXIÓN ESTRELLA - DELTA

La tendencia de las compañías de distribución de la energía eléctrica es a usar voltajes de distribución más altos. En los sistemas con conexión estrella-delta generalmente no se tiene una ligadura firme al neutro del

mismo, en donde en el secundario se trata de usar un sistema de tres hilos, pero a diferencia de la conexión delta-estrella, ahora con un voltaje mayor en el lado de la delta. En el evento de falla de un transformador en el lado de la estrella, se puede proceder a usar una conexión estrella abierta-delta para continuar dando el servicio, por supuesto que esta facilidad tiene su limitante en cuanto que no se puede dar el 100% de la capacidad.



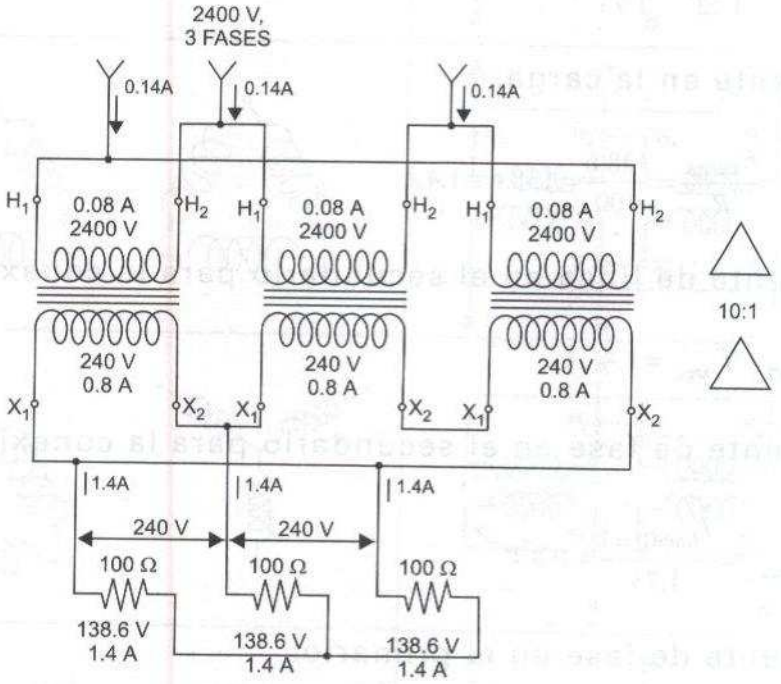
CONEXIÓN ESTRELLA - DELTA



CONEXIÓN ESTRELLA ABIERTA - DELTA

Ejemplo

La conexión mostrada en la siguiente figura es una delta-delta. Calcular el voltaje de fase en el primario, el voltaje de fase en el secundario, el voltaje de línea en el secundario, el voltaje en la carga, la corriente en la carga, la corriente de línea en el secundario, la corriente de fase en el secundario, las corrientes de fase y de línea en el primario.



Solución

a) Para una conexión delta, el voltaje de fase es igual al voltaje de línea:

$$E_{fase(prim)} = E_{linea(prim)} = 2400\,V$$

b) El voltaje de fase línea en el secundario para una relación de transformación de 10:1.

$$E_{fase(\sec)} = \frac{E_{fase(prim)}}{a} = \frac{2400}{10} = 2400\ V$$

c) El voltaje de línea en el secundario del voltaje de línea es:

$$E_{línea(\sec)} = E_{fase(\sec)} = 240\ V$$

d) El voltaje en la carga para una conexión estrella sería:

$$E_{\text{carga}} = \frac{E_{línea}}{1.73} = \frac{240}{1.73} = 138.6\ \ V$$

e) La corriente en la carga:

$$I_{\text{carga}} = \frac{E_{\text{carga}}}{R} = \frac{138.6}{100} = 138.6 \cong 1.4A$$

f) La corriente de línea en el secundario para la conexión estrella:

$$I_{línea(\sec)} = I_{carga} = 1.4\ \ A$$

g) La corriente de fase en el secundario para la conexión delta:

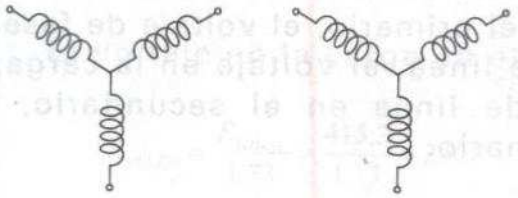
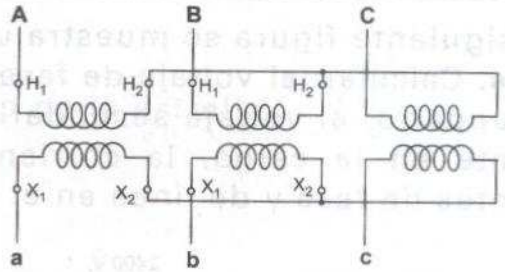
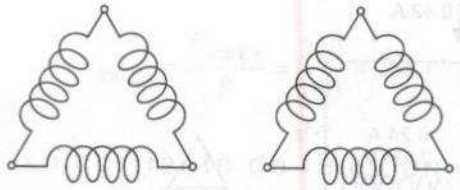
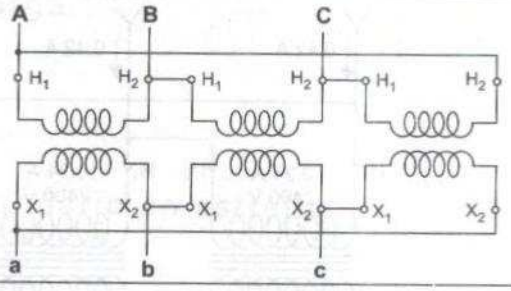
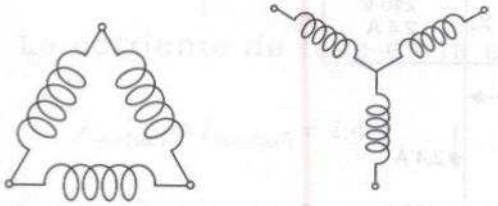
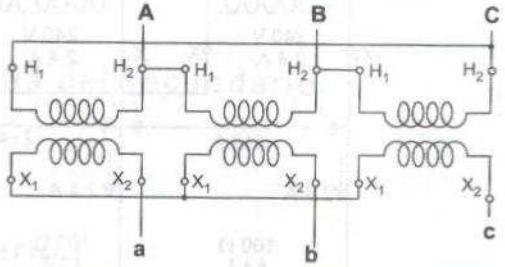
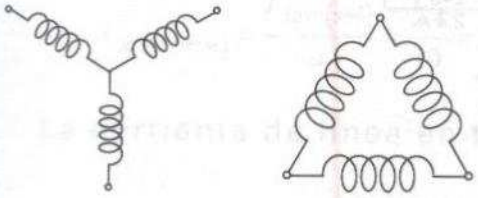
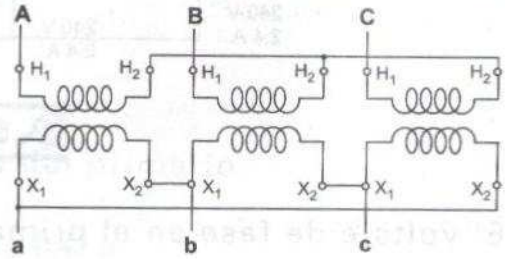
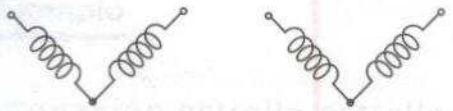
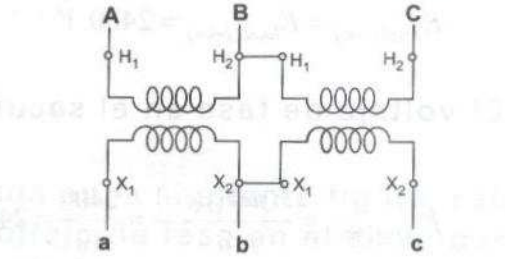
$$I_{fase(\sec)} = \frac{I_{línea(\sec)}}{1.73} = 0.8\ V$$

h) La corriente de fase en el primario:

$$I_{fase(prim)} = \frac{I_{fase(\sec)}}{a} = \frac{0.8}{10} = 0.08A$$

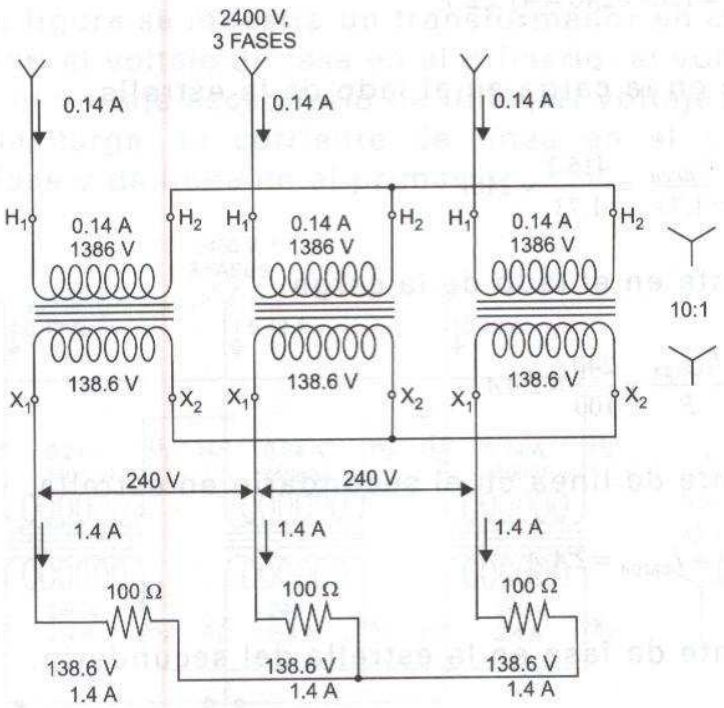
i) La corriente de línea en la delta del primario.

$$I_{línea(prim)} = I_{fase(prim)}\ \ x\ 1.73 = 0.08\ x\ 1.73 = 0.14\ \ A$$

DIAGRAMAS ELEMENTALES	DIAGRAMAS DE CONEXIÓN
	
	
	
	
	

CONEXIONES TRIFÁSICAS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

la carga, la corriente de línea en el secundario, la corriente de fase en el secundario, las corrientes de fase y de línea en el primario.



Solución

a) El voltaje primario de fase en el lado estrella.

$$E_{fase(prim)} = \frac{E_{línea(prim)}}{1.73} = \frac{2400}{1.73} = 1386\ V$$

b) El voltaje de fase en secundario.

$$E_{fase(\sec)} = \frac{E_{fase(prim)}}{a} = \frac{1386}{10} = 138.6\ V$$

c) El voltaje de línea en la estrella del secundario.

$$E_{línea(\sec)} = 1.73\ x\ E_{fase(\sec)} = 138.6\ x\ 1.73 = 240\ V$$

d) El voltaje en la carga en el lado de la estrella.

$$E_{\text{carga}} = \frac{E_{línea}}{1.73} = \frac{240}{1.73} = 138.6\ V$$

e) La corriente en el lado de la carga.

$$I_{\text{carga}} = \frac{E_{\text{carga}}}{R} = \frac{138.6}{100} = 1.386 = 1.4\ A$$

f) La corriente de línea en la estrella del secundario.

$$I_{línea(\sec)} = I_{\text{carga}} = 1.4\ A$$

g) La corriente de fase en la estrella del secundario.

$$I_{fase(\sec)} = I_{línea(\sec)} = 1.4\ A$$

h) La corriente de fase en el primario.

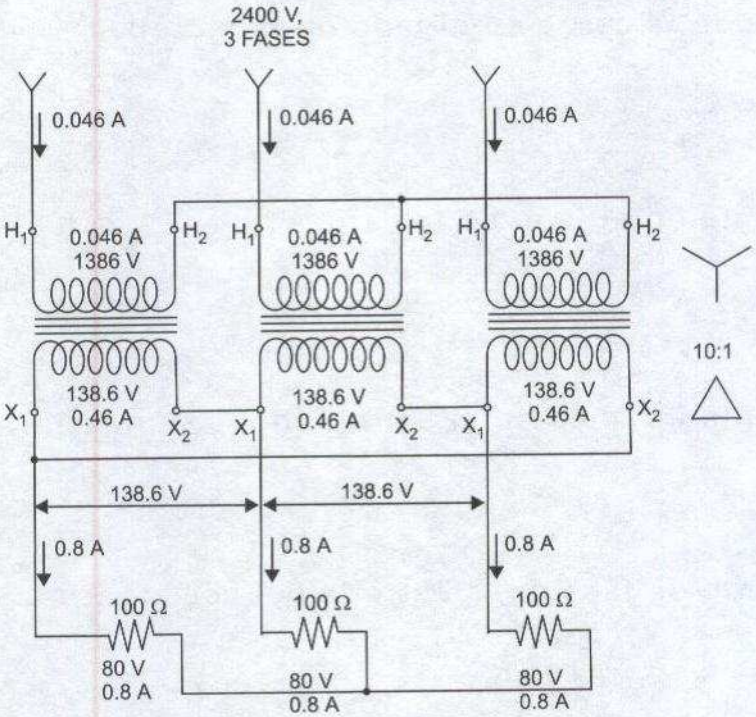
$$I_{fase(prim)} = \frac{I_{fase(\sec)}}{a} = \frac{1.4}{10} = 0.14\ A$$

i) La corriente de línea en la estrella del primario.

$$I_{línea} = I_{fase} = 0.14\ A$$

Ejemplo

En la figura siguiente se muestra una conexión estrella-delta. Calcular: El voltaje de fase en el primario, el voltaje de fase en el secundario, el voltaje de línea en el secundario, el voltaje en la carga, la corriente de línea en el secundario, la corriente de fase en el secundario, la corriente de fase en el primario y la corriente de línea en el primario.



Solución

a) El voltaje de fase en la estrella del primario.

$$E_{fase(prim)} = \frac{E_{línea(prim)}}{1.73} = \frac{2400\ V}{1.73} = 1386\ V$$

b) El voltaje de fase en el secundario.

$$E_{fase(\sec)} = \frac{E_{fase(prim)}}{a} = \frac{1386}{10} = 138.6\ V$$

c) El voltaje de línea en la delta del secundario.

$$E_{línea(\sec)} = E_{fase(\sec)} = 138.6\,V$$

d) El voltaje en la carga en el lado de la estrella.

$$E_{\text{carga}} = \frac{E_{línea}(\sec)}{1.73} = \frac{138.6}{1.73} = 80\ V$$

e) La corriente en el lado de la carga.

$$I_{\text{carga}} = \frac{E_{\text{carga}}}{R} = \frac{80}{100} = 0.8\ A$$

f) La corriente de línea en el secundario.

$$I_{línea}(\sec) = I_{\text{carga}} = 0.8\ A$$

g) La corriente de fase en la delta del secundario.

$$I_{fase}(\sec) = \frac{I_{línea}}{1.73} = \frac{0.8}{1.73} = 0.46\ A$$

h) La corriente de fase en el primario.

$$I_{fase}(prim) = \frac{I_{fase}(\sec)}{a} = \frac{0.46}{10} = 0.046\ A$$

i) La corriente de línea en la estrella del primario.

$$I_{línea}(prim) = I_{fase}(prim) = 0.46\ A$$

7 MOTORES DE INDUCCIÓN

7.1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de las máquinas eléctricas en la industria son motores trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla, normalmente son robustos, no son caros y requieren de muy poco mantenimiento, el rango de fabricación de estos motores va desde unos cuantos watts hasta alrededor de 10000 HP. Los motores de inducción grandes (generalmente de 5 HP o mayores) se diseñan para operar en forma trifásica, la principal razón es que: es deseable una carga trifásica simétrica en la red.

La velocidad de un motor de inducción es casi constante cayendo sólo un pequeño porcentaje de su operación en vacío a su operación a plena carga; los motores de inducción presentan también algunas desventajas como son:

1. Requieren de accionamientos electrónicos para cambiar su velocidad.
2. Operan a factor de potencia bajo, cuando tienen cargas ligeras.
3. Su corriente de arranque puede ser de cinco a siete veces el valor de la corriente nominal o a plena carga.

Los motores monofásicos de inducción se usan en forma extensiva en aplicaciones industriales, comerciales y de tipo doméstico, por ejemplo se puede observar su uso en: relojes, refrigeradores, congeladores, ventiladores, bombas, máquinas de lavado, máquinas herramientas,

etc., a diferencia de los motores trifásicos de inducción, se tiene una gran diversidad o variantes de diseño para distintas aplicaciones con los motores monofásicos, cuyos nombres dependen de la aplicación y el tipo constructivo, por ejemplo, hay motores monofásicos tipo universal, de arranque con capacitor, de fase partida, etc.

Las características de operación de los motores trifásicos son, como se estudia más adelante, superiores a las de los motores monofásicos, la razón principal para esto es que, el sistema monofásico suministra cero potencia al motor en la medida que alterna. Las alternaciones ocurren dos veces cada ciclo. Si el factor de potencia es menor que la unidad para un sistema monofásico, la potencia que va hacia la carga es negativa durante parte del ciclo. La potencia de un motor trifásico es casi constante para el ciclo completo.

Los motores trifásicos de inducción se construyen básicamente en dos tipos, de acuerdo al tipo de rotor o parte giratoria del motor:

- De jaula de ardilla.
- De rotor devanado.

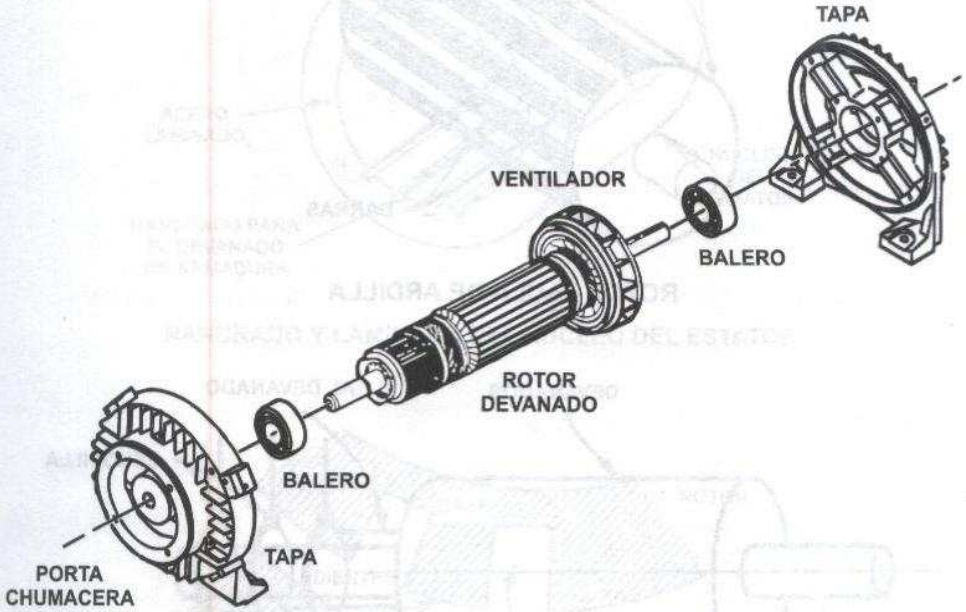
De estos dos tipos, el de jaula de ardilla es el más usado en la mayoría de las aplicaciones, especialmente las industriales.

7.2. La construcción del estator

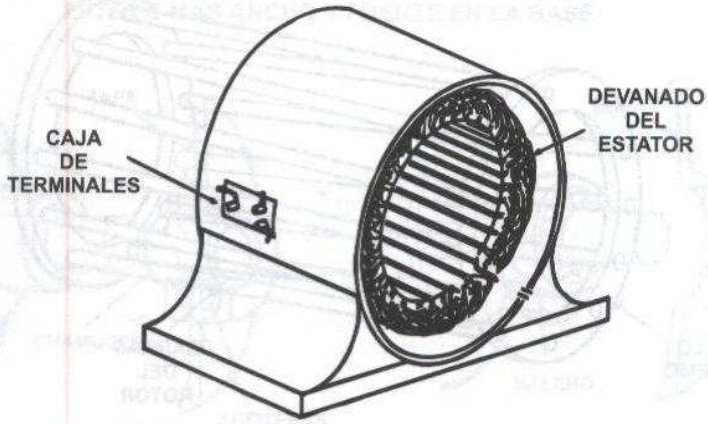
Los estatores de todos los tipos de motores trifásicos constituyen la parte estacionaria. Se construyen en forma similar a los motores monofásicos, de hojas de lámina, llamadas laminaciones en forma troquelada. El acero usado es altamente refinado, para producir buenas propiedades magnéticas con mínimas pérdidas. Las laminaciones se aíslan unas de otras por un óxido que se forma en la superficie durante el tratamiento de calor y también se juntan en forma de paquetes. Cuando se trata de máquinas grandes, el paquete se forma de la unión de un número mayor de segmentos circulares.

El paquete de laminaciones se coloca dentro de la carcaza que cumple entonces con una doble función: servir de soporte de los paquetes de laminaciones que constituyen el estator y también de las tapas del

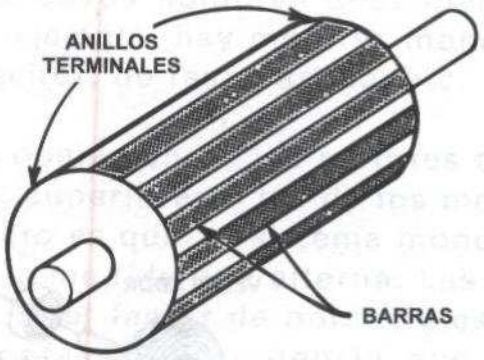
motor que contienen, a su vez, a las chumaceras que soportan la flecha del rotor, es decir, la carcaza tiene funciones de tipo estático.



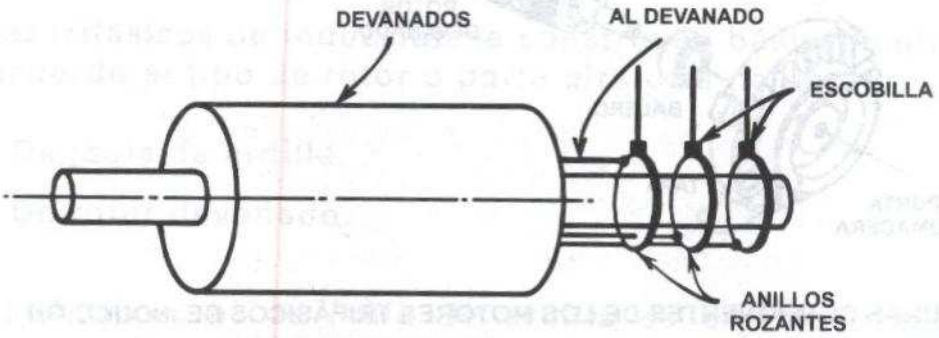
ALGUNAS COMPONENTES DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN



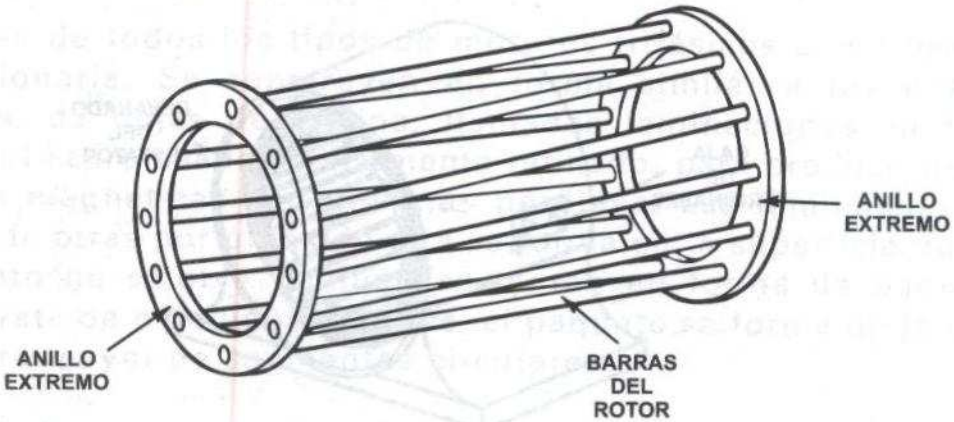
ESTATOR Y CARCAZA



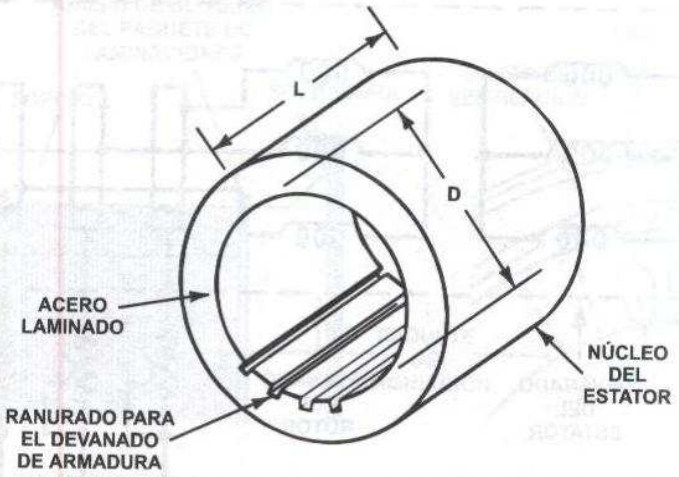
ROTOR JAULA DE ARDILLA



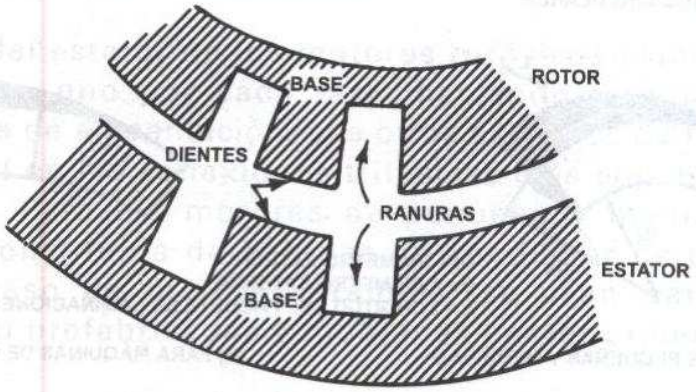
ROTOR DEVANADO



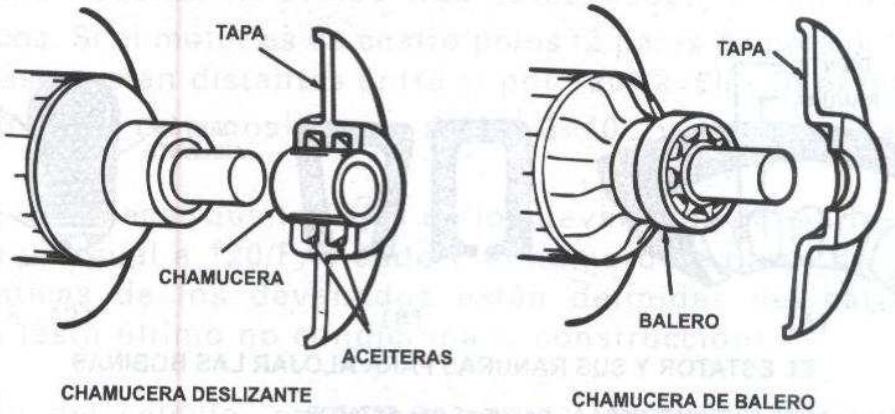
ROTOR JAULA DE ARDILLA



RANURADO Y LAMINADO DEL NÚCLEO DEL ESTATOR



PARA IGUAL PROFUNDIDAD DE RANURA DE LOS DIENTES EN EL ESTATOR ESTE ES MÁS ANCHO Y FUERTE EN LA BASE



TIPOS DE CHAMUCERAS DESLIZANTES EN MOTORES

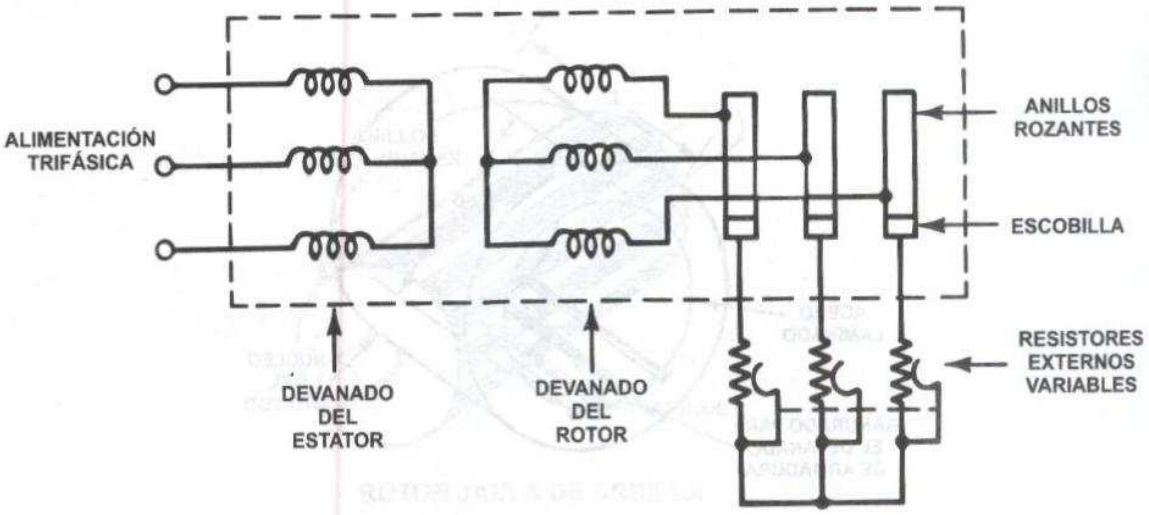
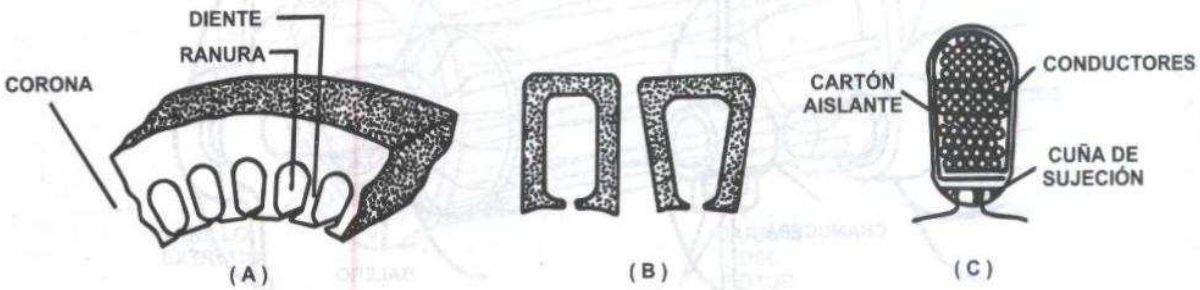


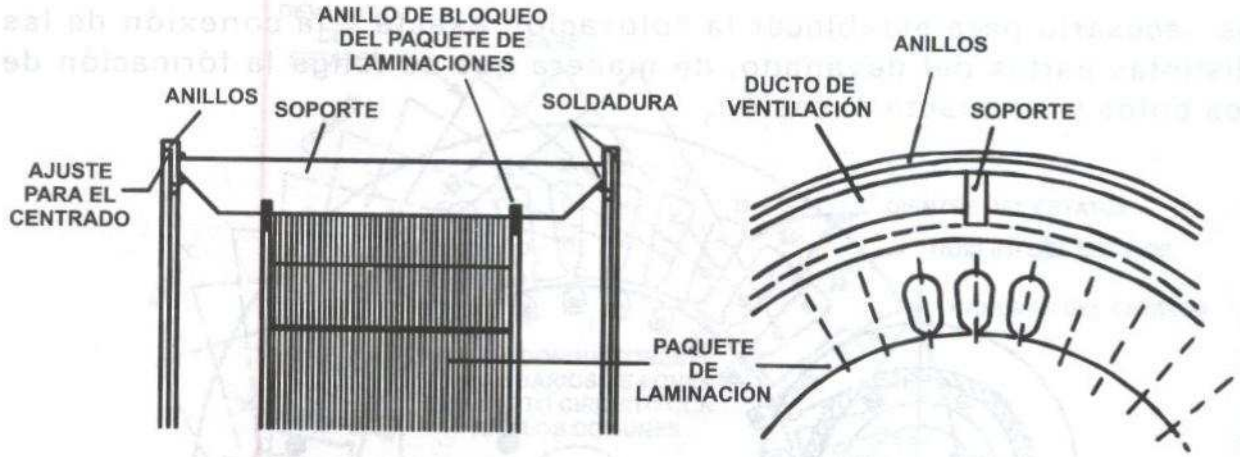
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO

EL ESTATOR DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN ESTÁ FORMADO DE UNA SERIE DE DISCOS DE LAMINACIÓN MAGNÉTICA



EL ESTATOR Y SUS RANURAS PARA ALOJAR LAS BOBINAS

A) DISTINTAS FORMAS PUEDEN TENER LAS RANURAS DEL ESTATOR
B) LOS CONDUCTORES SE PUEDEN AISLAR DE LAS RANURAS
C) VISTA DE LA RANURA CON LOS CONDUCTORES



MONTAJE DEL PAQUETE DE LAMINACIÓN SOBRE LA CARCAZA

7.2.1 Los devanados del estator

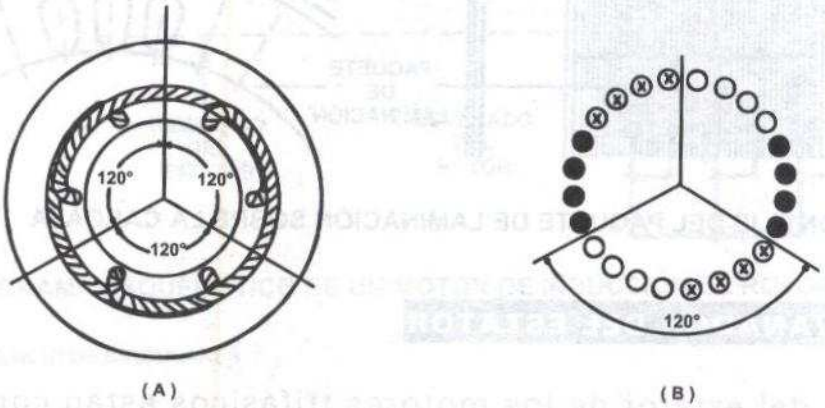
Los devanados del estator de los motores trifásicos están constituidos por tres circuitos, uno por cada fase, haciendo terminación por un extremo a la línea de alimentación. Los otros extremos de los circuitos se conectan entre sí en las conexiones trifásicas más comunes, ya sea en delta o estrella. Para los motores de pequeña y mediana potencia, cada fase está constituida de bobinas de conductor de cobre aislado, o bien, en el caso de motores grandes, se usan barras de cobre aisladas, que son prefabricadas y montadas posteriormente.

Los ejes geométricos de cada devanado, se deben encontrar a 120° eléctricos uno de otro. Precisamente, si el motor es de dos polos: los ejes de los devanados de las tres fases deben encontrarse a 120° geométricos. Si el motor es de cuatro polos (2 pares de polos): los ejes de las tres fases están distantes entre sí por 120°/2=60°. Si el motor es de 6 polos (3 pares de polos): están a 120°/3=40°, y así sucesivamente.

Se puede establecer que los ejes de los devanados deben formar entre sí un ángulo igual a 120/P, siendo P el número de pares de polos. Las características de los devanados están definidas del cálculo y del diagrama (esto último no condiciona la construcción).

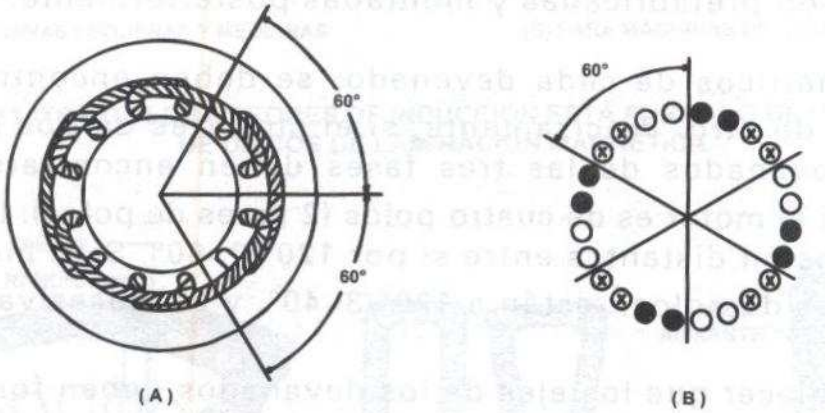
Por medio del cálculo, se determina la relación de la tensión a la corriente nominal, el número de conductores y su sección. El diagrama

es necesario para establecer la colocación exacta y la conexión de las distintas partes del devanado, de manera que se tenga la formación de los polos y su exacta sucesión.



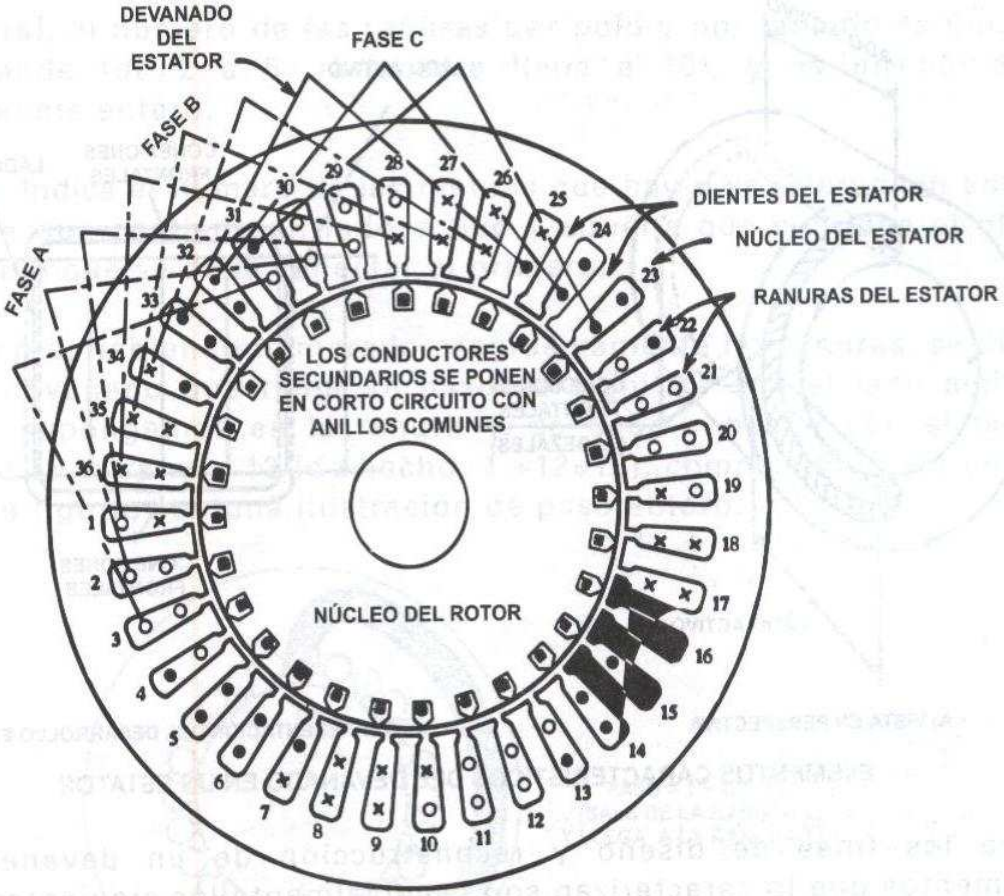
(A) DISPOSICIÓN FRONTAL DEL DEVANADO DEL ESTATOR DE UN MOTOR TRIFÁSICO DE DOS POLOS. POR SIMPLICIDAD EN LA REPRESENTACIÓN SE IMAGINA QUE CADA FASE ESTA CONSTITUIDA POR UNA SOLA BOBINA (EL ESTATOR TIENE 6 RANURAS).

(B) EN REALIDAD EL DEVANADO ESTA REPARTIDO EN MAS RANURAS PARA UNA MEJOR DISTRIBUCIÓN DE FLUJO COMO SE MUESTRAN CON 4 RANURAS POR CADA FASE.



(A) DISPOSICIÓN FRONTAL DEL DEVANADO DEL ESTATOR DE UN MOTOR DE 4 POLOS.

(B) SE OBSERVA EL CASO PARA EL CUAL CADA FASE ESTA PREVISTA DE DOS RANURAS POR POLO Y POR FASE.



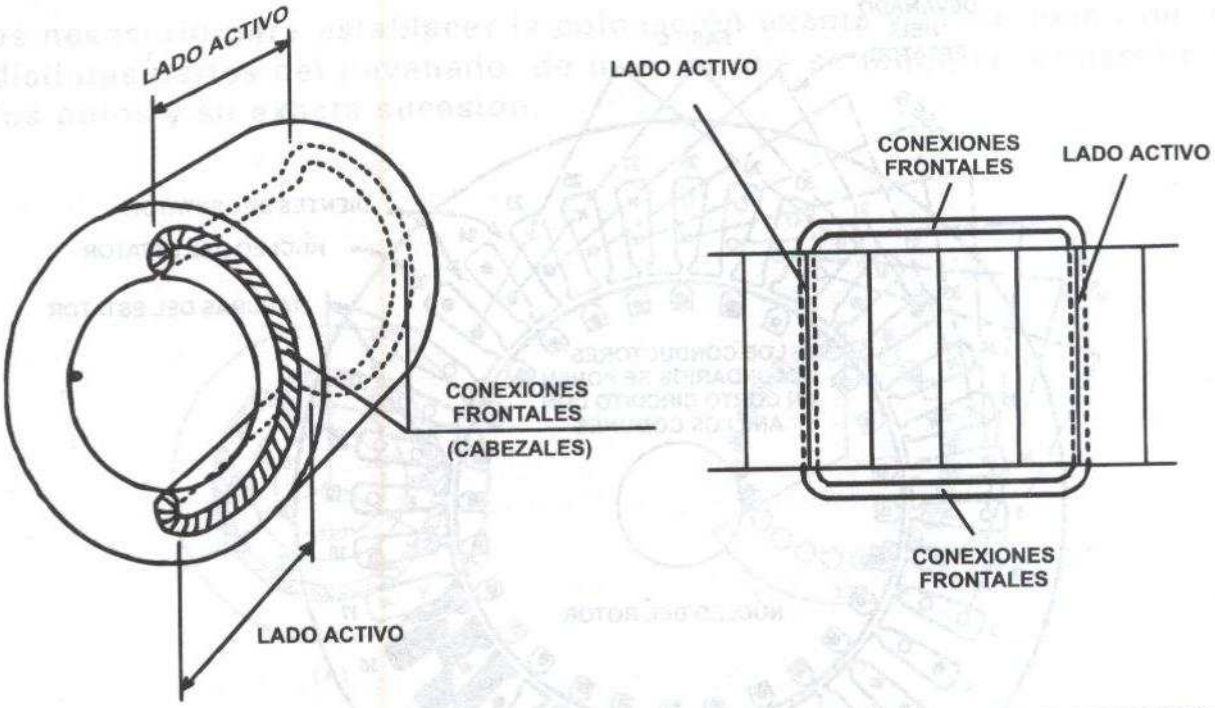
O FASE A, X FASE B, ● FASE C

DISTRIBUCIÓN DE LOS CONDUCTORES DE FASE EN LAS RANURAS DEL ESTATOR

7.2.2 Elementos característicos de los devanados

Cada una de las fases del motor trifásico está constituida de una o más bobinas, éstas a su vez están formadas de secciones. En cada sección se distinguen:

- Los lados activos, es decir, las dos partes contenidas a lo largo de la longitud de las ranuras.
- Las conexiones frontales y cabezales, que están destinadas a conectar entre sí a las partes activas.



A) VISTA EN PERSPECTIVA

B) REPRESENTACIÓN DEL DESARROLLO EN UN PLANO

ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DEL DEVANADO EN UN ESTATOR

Para los fines de diseño y reconstrucción de un devanado, los elementos que lo caracterizan son esencialmente los siguientes:

a) El número de ranuras por polo y por fase.
b) El paso del devanado.
c) La forma de los cabezales.

7.2.3 EL NÚMERO DE RANURAS POR POLO Y POR FASE Y EL PASO DE UN DEVANADO

Los primeros elementos se resumen por medio de las siguientes relaciones:

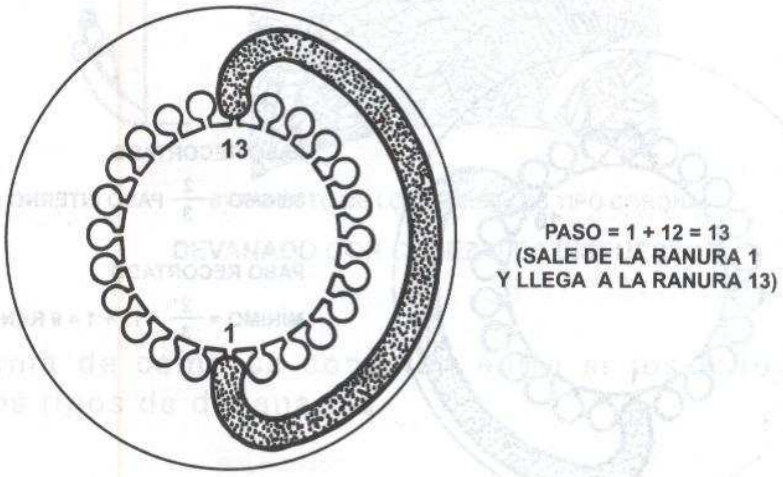
$$No.\ de\ ranuras\ por\ polo\ y\ por\ fase = \frac{No.\ total\ de\ ranuras}{No.\ de\ polos\ x\ No.\ de\ fases}$$

$$Paso\ del\ devanado = \frac{No.\ total\ de\ ranuras}{No.\ de\ polos}$$

En general, el número de las ranuras por polo y por fase no es nunca muy grande (de 2 a 5, raramente llega a 10), y es un número normalmente entero.

El paso. Indica el número de las ranuras que hay o se interponen entre la ranura que contiene un lado activo y aquélla que contiene el otro lado activo que se debe conectar al primero.

Por ejemplo, habiendo numerado progresivamente las ranuras, se dice que un devanado que tiene un paso 12 significa que el lado activo situado, supongamos en la ranura 1, se debe conectar con el lado colocado en la ranura 13 (de hecho, 1 +12=13), como se muestra en la siguiente figura, con una ilustración de paso entero:



DEVANADO CON PASO ENTERO

Los devanadores o bobinadores, como se conoce a las personas que hacen y colocan las bobinas, casi siempre prefieren indicar el paso, empleando la fórmula mencionada anteriormente, donde se tienen los números correspondientes a los lados que se deben conectar entre sí.

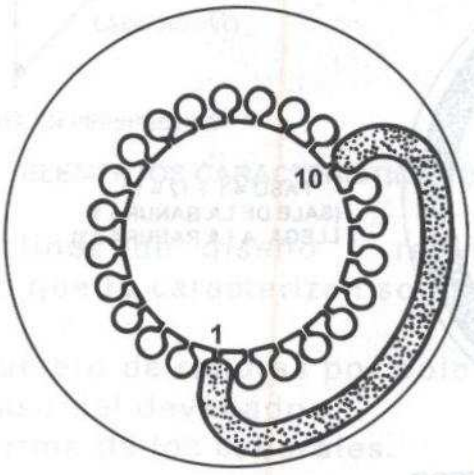
Por ejemplo: en lugar del paso 12 se dice ***"El paso de 1 a 13",*** de manera que el paso representa, en otras palabras, cuánto *"progresa"* el devanado. El paso de la figura anterior representa un paso interno.

En la práctica, se usa mucho el llamado ***"paso acortado",*** o sea, un paso un poco inferior al paso interno encontrado con la fórmula:

$$Paso = \frac{No.\ total\ de\ ranuras}{No.\ de\ polos}$$

El paso acortado permite una economía en el cobre del devanado, siendo menor la longitud de las conexiones frontales. De hecho, el paso acortado contribuye a mejorar la forma del campo magnético. Se debe tener cuidado de que el acortamiento no sea excesivo, para evitar que dos lados activos se encuentren instantáneamente bajo polos del mismo nombre.

Como regla, en una máquina trifásica el paso no debe ser nunca inferior a los 2/3 del paso interno.



PASO RECORTADO

MÍNIMO = $\frac{2}{3}$ PASO INTERNO + 1

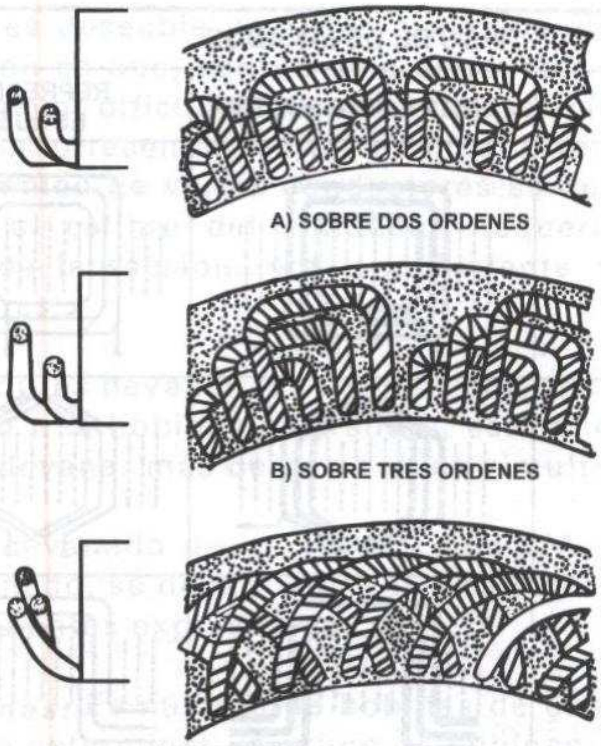
PASO RECORTADO

MÍNIMO = $\frac{2}{3}$ * 12 + 1 = 9 RANURAS

DEVANADO CON PASO RECORTADO

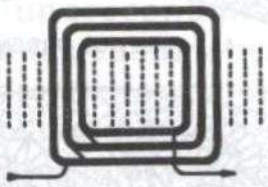
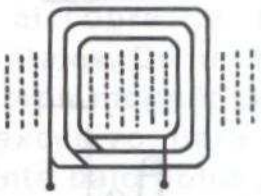
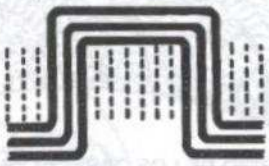
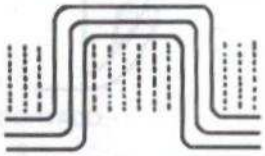
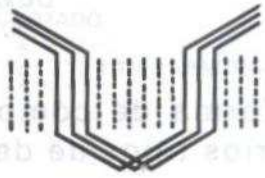
7.2.4 FORMA DE LOS CABEZALES DE LOS DEVANADOS

Un devanado, entre otras cosas, está caracterizado por la disposición de las conexiones frontales que determinan la forma de las secciones y el aspecto exterior de todo el devanado. Se pueden tener conexiones de dos tipos: De órdenes o de corona.



DEVANADO CON CABEZALES DISPUESTOS

Según la forma de cómo se conectan entre sí los lados activos, se derivan varios tipos de devanados.

TIPOS DE DEVANADOS		
TIPO	FORMA CONSTRUCTIVA	REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA
DE MADEJA CONCÉNTRICO		
DE MADEJA IMBRICADO		
ONDULADO CONCÉNTRICO		
ONDULADO IMBRICADO		
DE MADEJAS IGUALES O DE CORONA		

Las bobinas de los motores se pueden devanar con un alambre sencillo o con varios alambres o conductores en la mano, pero en ambos casos, las bobinas son devanadas prácticamente en lo mismo; excepto que cuando se devanan a mano se requiere más formado.

Algunas veces, es deseable usar dos o más conductores en lugar de sólo uno, la razón es que, con un sólo conductor de mayor sección a veces se tiene mayor dificultad para su manipulación, en tanto que los de menor sección, ofrecen la ventaja de más facilidad de manejo. Otra razón para el empleo de varios conductores es que, en ocasiones, no se cuenta con el calibre del conductor requerido, y entonces se recurre al uso de la sección (área) equivalente mediante el uso de varios conductores.

Algunos bobinadores devanan las bobinas con dos o tres conductores, donde hay dos o tres bobinas por ranura; esto ahorra tiempo, debido a que se puede devanar más de una bobina simultáneamente.

Tratándose del devanado de los motores de C.A., antes de iniciar el proceso de bobinado, se deben verificar o calcular algunos términos a partir de las siguientes expresiones:

Grupo de bobinas: Es número de bobinas de una fase para un polo. La ecuación para determinar un grupo de bobinas, es por tanto:

$$Bobinas\ por\ grupo = \frac{No.\ de\ ranuras}{No.\ de\ polos\ x\ No.\ de\ fases}$$

$\frac{z}{2p \cdot m}$

Paso de bobina completo: Es la bobina que abarca de una ranura en un polo a la ranura o posición correspondiente en el polo siguiente. La ecuación que permite calcular el paso completo de bobina es:

$$Paso\ completo\ de\ bobina = \frac{No.\ de\ ranuras}{No.\ de\ polos} + 1$$

Grados eléctricos por ranura: Es el término que se usa comúnmente para expresar la porción del polo que es cubierto por una ranura. La expresión para calcular es la siguiente:

$$Grados\ eléctricos\ por\ ranura = \frac{180\ x\ No.\ de\ polos}{No.\ de\ ranuras}$$

Ejemplo

Calcular el número de bobinas por grupo y la longitud del paso completo, para el estator de un motor trifásico de inducción que tiene 36 ranuras, opera a 60 Hz y 1200 RPM.

Solución

El número de bobinas por grupo se calcula como:

$$No.\ de\ bobinas\ por\ grupo = \frac{No.\ de\ ranuras}{No.\ de\ polos\ x\ No.\ de\ fases}$$

Donde el número de polos se calcula de la expresión:

$$f = \frac{No.\ de\ polos\ x\ RPM}{120}; \qquad f = Frecuencia\ en\ Hertz$$

$$No.\ de\ polos = \frac{120\ x\ f}{RPM} = \frac{120\ x\ 60}{1200} = 6$$

Por tanto:

$$No.\ de\ bobinas\ por\ grupo = \frac{36}{6\ x\ 3} = 2\ bobinas\ /\ grupo \begin{cases} ranuras \\ por\ polo \\ y\ por\ fase \end{cases}$$

El paso completo se obtiene de la expresión:

$$Paso\ completo\ por\ bobina = \frac{No.\ de\ ranuras}{No.\ de\ polos} + 1$$

$$Paso\ completo\ por\ bobina = \frac{36}{6} + 1 = 7$$

Es decir que, la bobina debe cubrir o abarcar de las bobinas en las ranuras 1 a 7 del total de 36 disponibles.

Una vez que las ranuras del estator se han aislado en forma conveniente, se coloca un lado de la primer bobina en cualquier ranura y un lado de la siguiente bobina se pone entonces en la ranura a la izquierda de la primera, lo que hará que el devanado avance en la dirección de las manecillas del reloj. Entonces, se colocan cuatro bobinas más en las ranuras en una forma similar, saliendo de la parte superior de la salida de todas ellas.

Cuando el lado inferior de la séptima bobina se sitúa en la séptima ranura, su lado superior está conectado al lado de arriba de la primera bobina, con la parte inferior o de abajo de la octava bobina, colocada en la octava ranura.

7.3 Principio de operación de los motores trifásicos de inducción

En los motores de inducción, normalmente no hay conexión eléctrica al rotor, pero en forma análoga al principio de operación de un transformador, las corrientes se inducen en el circuito del rotor y se produce entonces la reacción entre los campos de la armadura y el rotor, al conducir corriente los conductores del rotor dentro del campo magnético, produciéndose una fuerza en los conductores que tiende a moverlos en ángulo recto con respecto al campo.

Cuando el estator o devanado primario de un motor trifásico de inducción se conecta a una alimentación de C.A. trifásica, se establece un campo magnético rotatorio que gira a la velocidad de sincronismo. La dirección de las revoluciones de este campo dependerá de la secuencia de fases de las corrientes del primario y, por lo tanto, del orden o secuencia en cómo se conecten las terminales del primario a la alimentación.

La dirección de rotación del campo se puede invertir intercambiando la conexión a la alimentación en dos de los tres conductores del motor trifásico.

El número de polos magnéticos del campo magnético rotatorio es el mismo que aquél cuando está devanada cada fase del primario del estator. La velocidad a la cual el campo, producido por las corrientes primarias, gira a la "velocidad síncrona" del motor, se obtiene de la expresión:

$$N_S = \frac{120f}{P}$$

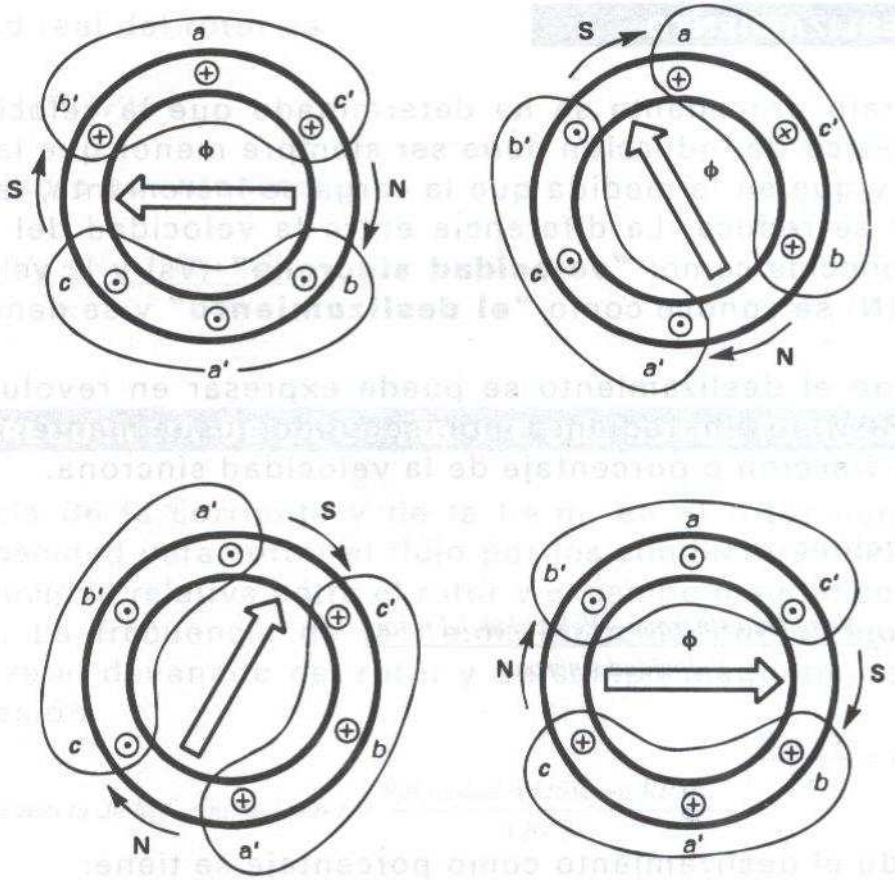
f = Frecuencia de la alimentación.

P = Número de polos del estator.

El campo magnético rotatorio producido por las corrientes del primario atraviesa los conductores del rotor e induce una f.e.m. en los mismos. Debido a que el devanado del rotor está, o en corto directamente (jaula de ardilla) o bien cerrado a través de alguna resistencia externa (rotor devanado), la fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida en el secundario por el campo rotatorio ocasiona que circule una corriente en los conductores del rotor; en éste se produce un ***Par*** que lo hace girar, esto ocurre porque la dirección de la f.e.m. podría estar en tal trayectoria que se trataría de oponer a la causa que la origina.

Debido a que la causa que produce las corrientes inducidas es la velocidad relativa entre el campo magnético rotatorio y los conductores estacionarios del rotor, éstos circulan en tal forma que se crea un par en el rotor que tiende a seguir al campo magnético rotatorio y reducir la velocidad relativa.

Un motor de inducción no puede operar a su velocidad síncrona. Si fuera posible por algún medio llevar al rotor a la velocidad de sincronismo, entonces el rotor no tendría movimiento relativo con respecto al campo giratorio y, por lo tanto, no se induciría una f.e.m. en el rotor que produciría un flujo de corriente y, en consecuencia, ***no se desarrollaría un par.***



ROTACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO DEL ESTATOR DURANTE ½ CICLO DE LA FRECUENCIA DE ALIMENTACIÓN

Un motor de inducción operando en vacío puede tener una velocidad muy cercana a la velocidad de sincronismo y, por lo tanto, la f.e.m. en el rotor es muy pequeña. Esta f.e.m. da una pequeña corriente que produce un par suficiente para superar las pérdidas como las debidas a la fricción y ventilación y, mantener el rotor en movimiento.

En la medida que se aplica una carga mecánica sobre el eje del motor, tiende a girar más lentamente, debido a que el par desarrollado en vacío no es suficiente para mantener al rotor girando a su velocidad de vacío, debido al par adicional de oposición de la carga. Es decir, en la medida que la carga aumenta, el motor se va frenando hasta que el movimiento relativo entre el rotor y el campo magnético rotatorio sea suficiente para desarrollar el ***par necesario para una carga particular.***

7.4 EL DESLIZAMIENTO

En el párrafo procedente se ha determinado que la velocidad de un motor trifásico de inducción debe ser siempre menor que la velocidad síncrona, y que en la medida que la carga se incrementa, la velocidad del motor se reduce. La diferencia entre la velocidad del campo del estator, conocida como: **"velocidad síncrona"** (Vs) y la velocidad real del rotor (N) se conoce como **"el deslizamiento"** y se denota por S.

Aún cuando el deslizamiento se puede expresar en revoluciones por minuto (RPM) o en radianes por segundo, usualmente se expresa como una fracción o porcentaje de la velocidad síncrona.

Como fracción:

$$S = \frac{Velocidad\ síncrona - Velocidad\ del\ rotor}{Velocidad\ síncrona}$$

$$S = \frac{N_S - N}{N_S}$$

Expresando el deslizamiento como porcentaje se tiene:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S} x\, 100$$

Ejemplo

Un motor trifásico de inducción tiene 6 polos, cuando se conecta a una alimentación de 60 Hz opera a 1150 RPM. Calcular su deslizamiento.

Solución

La velocidad síncrona es:

$$N_S = \frac{120 f}{P} = \frac{120\ x\ 60}{6} = 1200\ RPM$$

La velocidad real del rotor es:

$$N = 1150\ RPM$$

El deslizamiento es entonces:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S} = \frac{1200\ x\ 1150}{1200} = 0.041$$

7.4.1 LA FRECUENCIA DE LA CORRIENTE DEL ROTOR (O DE LA F.E.M.)

La frecuencia de la corriente y de la f.e.m. en el rotor depende del índice o capacidad para cortar el flujo por los conductores del rotor, es decir, la velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético giratorio del estator. La frecuencia de la f.e.m. inducida por el movimiento relativo entre el devanado del rotor y un campo magnético está dada por la expresión.

$$Frecuencia\ de\ la\ f.e.m.\ del\ rotor = \frac{Velocidad\ relativa\ en\ RPM}{120/P}$$

$$= \frac{N_S - N}{N_S}$$

Pero como:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S} \qquad N_S - N = S N_S = S\ x \frac{120 f}{P}$$

Sustituyendo:

$$fr = S\ x \frac{120 f}{P} x \frac{P}{120} = sf$$

$$fr = sf$$

Es decir, que la frecuencia de la corriente en el rotor o f.e.m., se obtiene multiplicando el deslizamiento por la frecuencia de alimentación.

Ejemplo

Calcular la frecuencia del rotor, si se alimenta a 60 Hz a un motor trifásico de inducción que tiene un deslizamiento a plena carga del 3%.

Solución

La velocidad síncrona es:

$$N_S = \frac{120f}{P} = \frac{120\ x\ 60}{6} = 1200\ RPM$$

De la expresión para el deslizamiento:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S}$$

$$\frac{\frac{3600}{P} - \frac{X}{P}}{\frac{360}{P}} = 903$$

La velocidad a plena carga es:

$$\frac{\frac{3600 - X}{P}}{\frac{3600}{P}} = 903$$

$$N = N_S - SN_S$$

$$N = N_S(1 - S) = 1200\ (1 - 0.03)$$

$$3600 - X = 3600 \cdot 0.03$$

$$(1-0.03)\,3600 = X$$

$$N = 1164\ RPM$$

La frecuencia de la f.e.m. del rotor es:

$$fr = sf = 0.03\ x\ 60 = 1.8\ Hz.$$

Ejemplo

Un motor trifásico de 500 HP se alimenta a 440 V, 60 Hz, si el motor tiene 6 polos y opera a 1170 R.P.M. Calcular el deslizamiento y cuántas alternaciones puede hacer el voltaje del rotor por minuto.

Solución

La velocidad síncrona es:

$$N_S = \frac{120f}{P} = \frac{120\ x\ 60}{6} = 1200\ RPM$$

La velocidad de operación es:

$$N = 1170\ RPM.$$

El deslizamiento es:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S} = \frac{1200 - 1170}{1200} = 0.025\ ó\ 2.5\%$$

La frecuencia de la f.e.m. del rotor es:

$$fr = sf = 0.025\ x\ 60 = 1.5\ Hz$$

Las alteraciones completas hechas por la f.e.m. del rotor son:

1.5 x 60=90

7.4.2 LA FUERZA ELECTROMOTRIZ DEL ROTOR (F.E.M.)

Cuando el rotor está frenado, el motor es equivalente a un transformador trifásico con el secundario en cortocircuito, de manera que la f.e.m. inducida por fase E_R en el rotor, cuando está parado o frenado, es decir, en el instante del arranque, está dado por la expresión:

$$E_R = E_E \; x \; \frac{N_R}{N_E}$$

Donde:

E_E = Voltaje aplicado por fase al primario, es decir, al devanado del estator.

N_R y N_E son el número de espiras del rotor y del estator respectivamente.

Cuando el rotor inicia su operación, la velocidad relativa de éste con respecto al flujo del estator, es decir, el deslizamiento, se reduce. De aquí, la f.e.m. en el rotor que es directamente proporcional a la velocidad relativa, es decir, al deslizamiento, también se reduce y está dada por SE_R.

Para un deslizamiento **S** la f.e.m. inducida en el rotor es **S** veces la f.e.m. inducida en el rotor cuando está parado.

7.5 LA CORRIENTE EN EL ROTOR

Son la resistencia y la inductancia por fase del rotor R_R y L_R respectivamente, y la f.e.m. en el rotor estando frenado E_2.

A rotor frenado, la f.e.m. inducida por fase = E_R

La resistencia en el devanado del rotor/fase = R_R

La reactancia del devanado del rotor/fase = X_R

Siendo:

$X_R = 2\pi f L_R$ (donde **f** es la frecuencia de la alimentación).

La impedancia del rotor por fase es entonces:

$$Z_R = \sqrt{R_R^2 + X_R^2}$$

Y la corriente del rotor por fase es entonces:

$$I_R = \frac{E_R}{Z_R}$$

También:

$$I_R = \frac{E_R}{\sqrt{R_R^2 + X_R^2}}$$

A un valor de deslizamiento **S** la f.e.m. por fase en el devanado del rotor es: SE_R.

La resistencia del rotor por fase, como se indicó antes es: R_R.

La reactancia/fase del devanado del rotor es:

$$2\pi frL_R = 2\pi fSL_R = S(2\pi fL_R) = SX_R$$

La impedancia del rotor/fase:

$$Z_R = \sqrt{R_R^2 + (SX_R)^2}$$

La corriente del rotor/fase es entonces:

$$I_2 = \frac{SE_R}{\sqrt{R_R^2 + (SX_R)^2}}$$

El factor de potencia de la corriente del rotor:

$$\cos\theta_R = \frac{R_R}{\sqrt{R_R^2 + (SX_R)^2}}$$

Ejemplo

Se tiene un motor trifásico de inducción de 60 Hz, cuatro polos, 220V de rotor devanado. El estator está conectado en delta y el rotor conectado en estrella. El rotor tiene el 40% de las espiras que tiene el estator, para una velocidad de 1710 RPM, calcular:

a) El deslizamiento.

b) El voltaje inducido a rotor bloqueado por fase E_{RB}.

c) El voltaje inducido en el rotor por fase E_R.

d) El voltaje entre terminales del rotor cuando el rotor está bloqueado y en circuito abierto.

e) La frecuencia del rotor.

Solución

a) Cálculo del deslizamiento:

$$N_S = \frac{120f}{P} = \frac{120 \ x \ 60}{4} = 1800 \ RPM$$

$$S = \frac{N_S - N_R}{N_S} x \ 100 = \frac{1800 - 1710}{1800} x \ 100 = 5\%$$

b) El voltaje inducido a rotor bloqueado por fase:

$$E_{RB} = 40\% \ de \ E_E \ / Fase = 0.4 \ x \ 220 = 88 \ V \ / Fase$$

c) El voltaje inducido en el rotor por fase:

$$E_R =_S E_{RB} = 0.05 \ x \ 88 = 4.4 \ V$$

d) El voltaje entre terminales del rotor cuando el rotor está bloqueado y en circuito abierto:

$$V_{L-L(rotor)} = \sqrt{3} \ x \ E_{RB} = \sqrt{3} \ x \ 88 = 152.4 \ V$$

e) La frecuencia del rotor:

$$fr = sf = 0.05 \ x \ 60 = 3 \ Hz$$

Ejemplo

Se tiene un motor trifásico de inducción a 60 Hz, con 6 polos, que tiene una velocidad a plena carga de N=1140 RPM, se desea calcular la frecuencia de la corriente del rotor bajo las siguientes condiciones:

a) A rotor frenado.

b) Motor operando a 500 RPM en la misma dirección del campo rotatorio.

c) Motor operando a 500 RPM inducción opuesta al campo rotatorio.

d) Motor operando a 2000 RPM en la misma dirección del campo rotatorio.

Solución

a) La velocidad síncrona del motor es:

$$N_S = \frac{120f}{P} = 120\ x\ \frac{60}{6} = 1200\ RPM$$

El deslizamiento es:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S},\quad a\ rotor\ frenado:\ \ N = 0$$

$$S = \frac{1200 - 0}{1200} = 1$$

La frecuencia del voltaje inducido (y de la corriente inducida) es:

$$f_R = sf = 1\ x\ 60 = 60\ Hz$$

b) Cuando el motor opera en la misma dirección del campo, su velocidad es positiva (N=500 RPM) y el deslizamiento es entonces:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S} = \frac{(1200-500)}{1200} = 0.583$$

La frecuencia del voltaje (y la corriente) inducido en el rotor es ahora:

$$f_R = sf = 0.583\ x\ 60 = 35\ Hz$$

c) Cuando el motor gira en la dirección opuesta al campo, la velocidad del motor es negativa, por lo tanto, N=-500 RPM y el deslizamiento es ahora:

$$S = (N_S - N)/N_S = \left[(1200-(-500)\right]/1200 = \frac{1700}{1200} = 1.417$$

Un deslizamiento mayor que 1.0 implica que el motor está operando como FRENO. La frecuencia del voltaje inducido en el voltaje y corriente del rotor es:

$$f_R = sf = 1.417\ x\ 60 = 85\ Hz$$

d) La velocidad del motor en este caso es positiva ya que el rotor gira en la misma dirección del campo:

$$N = +2000\ RPM$$

El deslizamiento es:

$$S = (N_S - N)/N_S$$

$$S = (1200-2000)/1200$$

$$= -800/1200 = -0.667$$

El deslizamiento negativo implica que el motor opera como generador.

El par. El par de un motor de inducción, debido a la interacción de los campos del rotor y el estator, depende de la resistencia de estos campos y de la relación entre ellos, matemáticamente: $T \alpha \phi I_R \cos\phi_R$

Donde:

T = Par.

ϕ = Flujo rotatorio del estator.

I_R = Corriente del rotor por fase.

Cos ϕ_R= Factor de potencia del rotor.

Dado que la f.e.m./fase del rotor frenado E_2 es proporcional al flujo.

$$T \alpha E_R I_R \cos\phi_2$$

$$T = KE_R I_R \cos\phi_R$$

Donde **K** es una constante.

Anteriormente se determinó que:

$$I_R = \frac{SE_R}{\sqrt{R_R^2 + S^2 X_R^2}}$$

Por lo tanto:

$$T = KE_R \frac{SE_R}{\sqrt{R_R^2 + S^2 X_R^2}} x \frac{R_R}{\sqrt{R_R^2 + S^2 X_R^2}}$$

$$T = \frac{KSR_R E_R^2}{R_R^2 + S^2 X_R^2}$$

7.6 EL PAR DE ARRANQUE

En el arranque el deslizamiento es **S=1**, y entonces, si se sustituye esta condición en la ecuación para el par, se obtiene la ecuación del par de arranque:

$$T = \frac{KR_R E_R^2}{R_R^2 + X_R^2}$$

El par máximo desarrollado por el rotor se obtiene como:

$$T_{max} = \frac{KE_R^2}{2X_R}$$

Ejemplo

Se tiene un motor trifásico de inducción de 4 polos a 60 Hz, que tiene una resistencia del rotor por fase de 0.024 Ω y una reactancia a rotor frenado de 0.6 Ω por fase. Calcular la velocidad a la cual se desarrolla el par máximo.

Solución

La resistencia del rotor por fase es: $R_R = 0.024\,\Omega$

La reactancia a rotor frenado (por fase): $X_R = 0.6\,\Omega$

Dado que el par, bajo condiciones de operación, es máximo al valor al cual el deslizamiento hace que la reactancia del rotor por fase sea igual a la resistencia del rotor por fase, el deslizamiento correspondiente al máximo par es:

$$S\omega = \frac{R_R}{X_R} = \frac{0.024}{0.6} = 0.04$$

La velocidad correspondiente al máximo par es:

$$N = N_S(1 - S\omega) = \frac{120f}{P}(1 - S\omega) = \frac{120\ x\ 60}{4}(1 - 0.04)$$

$$N = 1728\,RPM$$

7.7 POTENCIA DE SALIDA DEL ROTOR

Cuando un motor de inducción está operando normalmente, el deslizamiento es tan pequeño que la frecuencia en el rotor es del orden de uno o dos por segundo, por lo tanto, las pérdidas en el hierro que se presentan en el rotor son insignificantes y se pueden despreciar, de aquí:

Potencia del estator = Potencia de entrada al rotor + Pérdidas en el cobre del rotor

Si el estator ejerce un par **T** sobre el rotor, la salida del estator, es decir, la potencia de entrada al rotor es $T\omega$, donde ω, es la velocidad angular del campo del estator.

En forma similar la potencia de salida del rotor es $T\omega_1$, donde ω_1, es la velocidad angular del rotor. De lo anterior se tiene que:

Pérdidas en el cobre = Potencia de entrada al rotor - Potencia de salida del rotor

Pérdidas en el cobre = $T\omega - T\omega_1 = T(\omega - \omega_1)$

El deslizamiento:

$$S = \frac{\omega - \omega_1}{\omega} = \frac{T(\omega - \omega_1)}{T\omega}$$

O bien, el deslizamiento:

$$S = \frac{\textit{Pérdidas en el cobre}}{\textit{Potencia de entrada al rotor}}$$

También:

Pérdidas en el cobre = deslizamiento x potencia de entrada al rotor

Ejemplo

La f.e.m. del rotor de un motor trifásico de 6 polos, 440 volts, 60 Hz, alterna a 3 Hz. Calcular la velocidad y el porcentaje de deslizamiento del motor. Calcular también las pérdidas/fase en el cobre del rotor, si la potencia de entrada al rotor es 111.9 KW.

Solución

La frecuencia de alimentación al estator es:

$$f = 60\ Hz.$$

La frecuencia de la f.e.m. del rotor es:

$$fr = 3\ Hz.$$

El deslizamiento es entonces:

$$S = \frac{fr}{f} x\ 100 = \frac{3}{60} x\ 100 = 5\%$$

La velocidad del motor es:

$$N = N_S(1-S) = \frac{120f}{P}(1-S)$$

$$N = \frac{120\ x\ 60}{6}(1-0.05)$$

$$N = 1140\ RPM$$

Si la potencia de entrada al rotor es:

$$\Pr = 111.9\ KW$$

Las pérdidas en el cobre del rotor:

Pérdidas en el cobre del rotor = S x Potencia de entrada al rotor

= 0.05 x 111.9

= 5.6 KW

Las pérdidas en el cobre del rotor por fase: 5.6/3=1.8666 KW

Ejemplo

Un motor trifásico de inducción tiene una velocidad síncrona de 1200 RPM y demanda 80 KW de un alimentador trifásico. Las pérdidas en los devanados del estator y en el hierro son de 5 KW, si el motor opera a una velocidad de 1152 RPM calcular:

a) La potencia activa transmitida al rotor.

b) Las pérdidas RI^2 en el rotor.

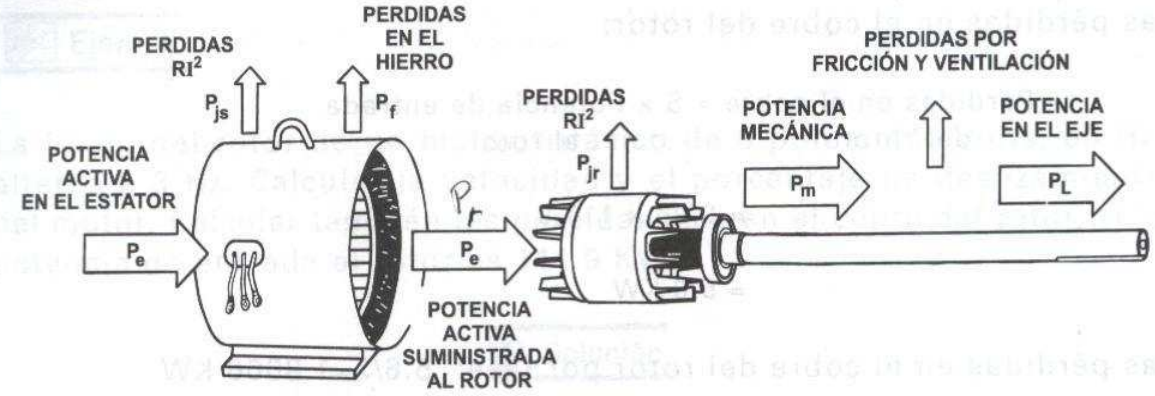
c) La potencia mecánica desarrollada.

d) La potencia mecánica entregada a la carga.

e) La eficiencia del motor.

Solución

El flujo de potencia en un motor trifásico se muestra a continuación:



FLUJO DE POTENCIA EN UN MOTOR TRIFÁSICO

a) La potencia activa al rotor es:

$$\Pr = Pe - P_{joule} - P_{fierro}, \qquad P_{joule} + P_{fierro} = 5\ KW$$

$$\Pr = 80 - 5 = 75\ KW$$

b) El deslizamiento es:

$$S = (N_S - N)/N_S = (1200 - 1152)/1200$$

$$S = 0.04$$

Las pérdidas RI² en el rotor son:

$$P_{joule\ rotor} = SP_R = 0.04\ x\ 75 = 3\ KW$$

c) La potencia mecánica desarrollada es:

75 - 3

$$P_M = P_R - RI^2 rotor$$

$$P_M = 72\ KW$$

d) La potencia mecánica P_L entregada a la carga es ligeramente menor que P_M, debido a las pérdidas por fricción y ventilación.

$$P_L = P_M - P_V = 72 - 2 = 70\ KW$$

e) La eficiencia del motor es:

$$\eta = P_L / P_C = 70/80$$

$$\eta = 0.875 \quad ó \quad 87.5\%$$

Ejemplo

La potencia de entrada al rotor de un motor trifásico de 6 polos a 60 Hz., tipo anillos rozantes es 40 KW y el motor opera a 1150 R.P.M. La resistencia del rotor por fase es 0.25 Ω. Calcular el valor de la corriente del rotor por fase.

La velocidad síncrona se calcula como:

$$N_S = \frac{120f}{P} = \frac{120\ x\ 60}{6} = 1200\ RPM$$

La velocidad a la que opera el motor es:

$$N = 1150\ RPM$$

El deslizamiento es entonces:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S} = \frac{1200 - 1150}{1200} = 0.04$$

Las pérdidas totales en el cobre del rotor son:

Pérdidas totales cobre del rotor = S x Potencia de entrada al rotor

= 0.04 x 40000

= 1600 watts

Las pérdidas del rotor/fase = 1600/3= 533.3 watts.

La corriente del rotor se calcula de la expresión:

$$\Pr = RrI_R^2$$

$$I_R = \sqrt{\frac{P_R}{R_R}} = \sqrt{\frac{533.3}{0.25}} = 46.18\,A$$

Ejemplo

Un motor trifásico de inducción de 6 polos, 3 fases, desarrolla 30 HP, incluyendo las pérdidas mecánicas totales iguales a 2 HP a la velocidad de 1100 R.P.M. sobre una línea de alimentación a 550 V, 60 Hz. El factor de potencia es 0.90. Calcular para esta carga:

a) El deslizamiento.

b) Las pérdidas en el cobre del rotor.

c) La potencia de entrada total si las pérdidas del estator son de 200 watts.

Solución

La velocidad síncrona es:

$$N_S = \frac{120f}{P} = \frac{120\,x\,60}{6} = 1200\,RPM$$

Como la velocidad del motor es:

$$N = 1100\,R.P.M.$$

El deslizamiento es:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S} = \frac{1200-1100}{1200} = 0.083$$

La potencia mecánica desarrollada es 30 HP.

$$P = 30 \, x \, 735.5 = 22065 \, watts$$

a) La potencia de entrada al rotor:

$$Potencia\ de\ entrada\ al\ rotor = \frac{P_{mecánica}}{1-S} = \frac{22065}{1-0.083}$$

$$= 24062.16 \, Watts$$

$P_{ENT\,ROT} - S \cdot P_{ENT\,ROT} = P_{MEC}$

$P_{MEC} = P_{EN\,ROT} - P_{CU\,ROT}$

b) Las pérdidas en el cobre del rotor son:

Pérdidas rotor = S x Potencia de entrada al rotor

= 0.083 x 24062

= 1997 watts.

c) La potencia total de entrada es:

Potencia de entrada = Potencia de entrada + Pérdidas en estator
ESTATOR al rotor

= 24062 + 200

= 24262 watts

Ejemplo

Un motor trifásico de inducción de 4 polos, se alimenta de una fuente a 60 Hz y operando en su condición de carga tiene un deslizamiento de S = 0.03, calcular:

a) La velocidad del rotor en RPM.

b) La frecuencia de la corriente en el rotor.

c) La velocidad del campo magnético del rotor con respecto al campo magnético rotatorio del estator en RPM.

Solución

a) La velocidad síncrona:

$$N_S = \frac{120f}{P} = \frac{120(60)}{4} = 1800\ RPM$$

La velocidad del rotor:

$$N = (1-S)N_S = (1-0.03)x1800$$

$$N = 1746\ RPM$$

b) La frecuencia de la corriente en el rotor:

$$f_R = sf = 0.03\,x\,60 = 1.8\ Hz$$

c) El campo magnético rotatorio producido por el rotor, tiene una velocidad relativa al rotor de:

$$Nr = \frac{120f_R}{P} = \frac{120sf}{P} = SN_S$$

La velocidad del rotor relativa al estator es N = (1-s)N_S, por lo tanto la velocidad del campo del rotor con respecto al estator es:

$$N'_S = N_R + N = N_S$$

En este caso 1800 RPM.

Ejemplo

El rotor de un motor trifásico de 60 Hz, 4 polos toma 120 KW a 3 Hz, tiene pérdidas en el cobre del estator de 3 KW, sus pérdidas mecánicas son de 2 KW y las pérdidas en el núcleo del estator (vacío) son de 1.7 KW, calcular:

a) La velocidad del rotor.

b) Las pérdidas en el cobre del rotor.

c) La potencia de salida en el eje del motor.

d) La eficiencia (despreciando las pérdidas en el núcleo del rotor).

Solución

a) El deslizamiento.

$$S = \frac{f_R}{f} = \frac{3}{60} = 0.05$$

La velocidad del motor.

$$N = (1-s)N_S, \quad N_S = \frac{120f}{P} = \frac{120 \ x \ 60}{4} = 1800 \ RPM$$

$$N = (1-s\ )N_S = (1-0.05)(1800) = 1710 \ RPM$$

b) Las pérdidas en el cobre del rotor son:

Pérdidas en el cobre del rotor = *S x Potencia de entrada al rotor*

= (0.05)(120)

= 6 Kw

c) La potencia de salida del motor es:

$$Potencia\ de\ salida = 120 - 6 - 2 = 112\ KW$$

d) La potencia de entrada al motor

$$Potencia\ \text{de}\ entrada = 120 + 3 + 1.7 = 124.7\ KW$$

La eficiencia:

$$\eta = \frac{Pot.\ salida}{Pot.\ entrada} = \frac{112}{124.7} = 0.898$$

También:

$$\eta = 89.8\%$$

Ejemplo

Un motor trifásico de inducción a 60 Hz, 6 polos, toma 48 KW de demanda a 1140 RPM. Las pérdidas en el cobre del estator son de 1.4 Kw, las pérdidas en el núcleo del estator son de 1.6 Kw y las pérdidas mecánicas del rotor son de 1 Kw. Calcular la eficiencia del motor.

Solución

La velocidad sincronía del motor es:

$$N_S = \frac{120f}{P} = \frac{120(60)}{2} = 1200RPM$$

El deslizamiento:

$$S = \frac{N_S - N}{N_S} = \frac{1200-1140}{1200} = 0.05$$

Pot. entrada rotor=Pot. salida estator =Pot. Entrada estator – Pérdidas estator

= 48 – (1.4+1.6)=45 KW

Pot. salida rotor = (1-S) x Pot. entrada = (1-0.05)(45)

Rotor = 42.75 KW

Pot. salida motor = Pot. salida rotor – pérdidas rotacionales

= 42.75 - 1=41.75

Eficiencia del motor:

$$\eta = \frac{41.75}{48} x\, 100 = 87\%$$

Ejemplo

La velocidad síncrona de un motor de inducción trifásico es 900 RPM. Bajo las condiciones de rotor bloqueado, la potencia de entrada al motor es 45 Kw a 193.6 A. La resistencia del estator por fase es 0.2 Ω y la relación de transformación a=2. Calcular: (a) El valor óhmico de la resistencia del rotor por fase. (b) El par de arranque del motor. Tanto el estator como el rotor están conectados en estrella.

Solución

a) De la prueba de rotor bloqueado del motor se sabe que:

$$R_e = R_E + a^2 R_R = \frac{P_E}{I_E^2}$$

Para este ejemplo:

$$0.2 + (2)^2 R_R = \frac{\left(45x10^3\right)/3}{(193.6)^2}$$

De donde:

$$R_R = 0.05\,\Omega$$

b) Refiriendo al estator, la resistencia del rotor por fase es:

$$R_R^{'} = a^2 R_R = (2)^2 (0.05) = 0.2\Omega$$

Por lo tanto, el par de arranque es:

$$T_{arranque} = \frac{3 I_E^2 R_R^{'}}{W_S} = \frac{3(193.6)^2(0.2)}{2\pi(900)/60} = 238.6\ N - m$$

7.8 MOTORES MONOFÁSICOS DE CORRIENTE ALTERNA

Un gran número de motores de capacidades comparativamente pequeñas se fabrican para operar con alimentación monofásica. La mayoría de ellos se producen en potencias fraccionarias de HP y se denominan técnicamente "motores pequeños". Los motores monofásicos desarrollan una gran variedad de servicios útiles en aplicaciones del hogar, la oficina, las fábricas y los comercios, así como otros usos diversos. Los motores de C.A. monofásicos se pueden dividir en tres categorías generales.

- Motores de inducción.
- Motores con conmutador.
- Motores síncronos.

Los motores de inducción, a su vez, se pueden clasificar como motores de fase partida, motores de polos sombreados y motores de inducción-repulsión, de acuerdo con el método de producir el par de arranque. Los motores más comunes con conmutador son los llamados motores tipo universal, así como los de inducción-repulsión.

El tipo original de motor monofásico es el que se conoce como de repulsión, de acuerdo a su forma de arranque, pero en la actualidad estos motores han sido perfeccionados a través de los años a partir del tipo original de repulsión, en varios tipos mejorados y que se conocen como:

inducción

- Motores de fase partida.
- Motores de arranque con capacitor.
- Motores con capacitor permanente.
- Motores de inducción-repulsión.
- Motores de polos sombreados.
- Motores universales.

7.8.1 MOTORES MONOFÁSICOS DE FASE PARTIDA

Este tipo de motores fue uno de los primeros tipos de motores monofásicos usados en la industria y aún permanece su aplicación en forma popular. Se usan en: máquinas herramientas, ventiladores, bombas, lavadoras, secadoras y una gran variedad de aplicaciones distintas, la mayoría de estos motores se fabrica en el rango de 1/30 HP (24.9 W) a 1/2 HP (373 W).

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Todos los motores monofásicos tienen un problema en común que es arrancar, ya que normalmente para producir el par de arranque se requiere de algún medio auxiliar que produzca la reacción con la onda de C.A. de la alimentación para producir el par. De aquí que, en los motores de C.A. monofásicos se hable de un "devanado de trabajo" y otro devanado de arranque o algún medio auxiliar como el capacitor.

Dentro del título de fase partida se agrupan los motores de arranque con capacitor y de arranque con resistencia. Algunos de éstos son monofásicos de inducción cuyos nombres o títulos son: De arranque con capacitor, de fase partida, de polos sombreados, con capacitor y arranque con capacitor, con capacitor permanente, etc.

Cuando se aplica un voltaje de C.A. al devanado de trabajo de un motor de inducción, la corriente circula a través de los devanados, la cual produce un campo magnético que expande, contrae y cambia la polaridad en fase con la corriente. Los devanados de trabajo actúan como el primario de un transformador. Su campo magnético induce una corriente hacia el secundario (rotor o armadura de motor). La corriente en la armadura crea un campo magnético que se opone al campo magnético del devanado de trabajo, esto hace que los polos distintos se atraigan uno a otro y prevengan al rotor de girar. Bajo estas condiciones, existe sólo una fuerza en el plano horizontal sin fuerza en el sentido vertical que cause que el rotor gire.

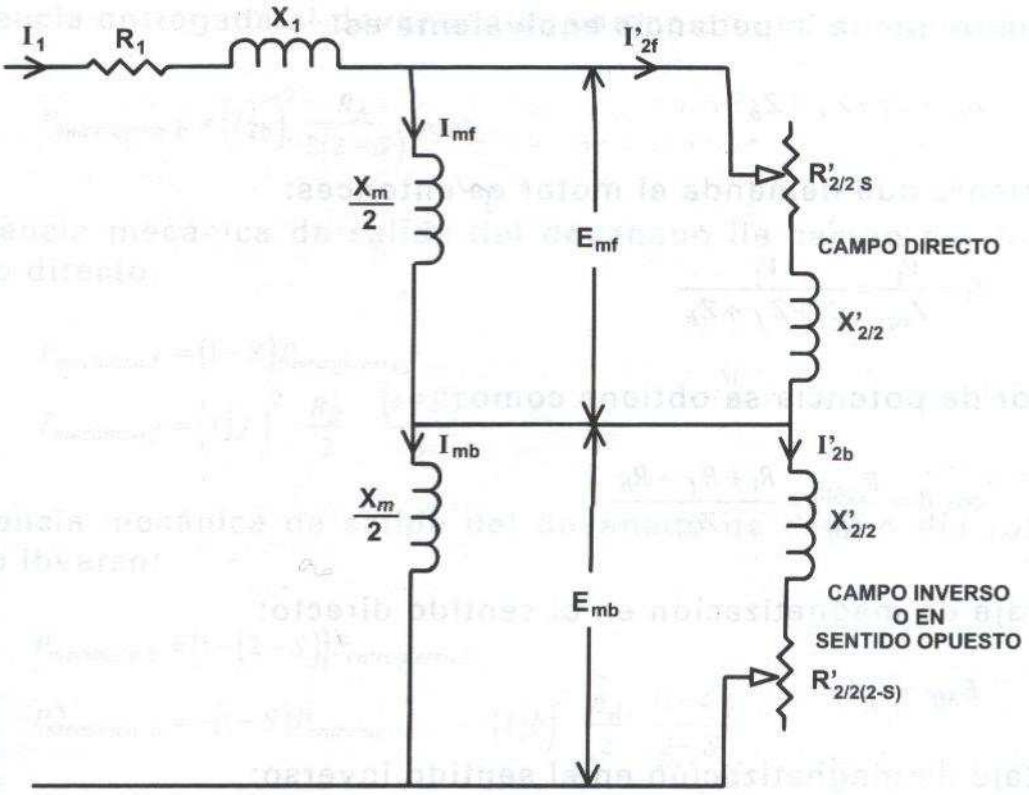
Cuando la polaridad del campo magnético cambia, debido a la variación en la polaridad de la corriente, la polaridad del campo del rotor cambia al mismo tiempo. Los dos campos se están constantemente atrayendo uno a otro, por lo tanto, el rotor es puesto en posición y no girará.

Si se hace girar el rotor manualmente, entonces inicia su movimiento en la misma dirección, sólo que a una velocidad inferior a la de sincronismo. Esto significa que para producir el par giratorio en un motor de inducción monofásico, se requiere de un impulso adicional, pero la forma de hacerlo manualmente no es práctica, de manera que se tiene que incorporar algún elemento que de diseño permita cumplir con el inicio de la rotación del motor.

7.8.2 Características de comportamiento

Las características de comportamiento de un motor de inducción monofásico, cuando opera únicamente con su devanado principal energizado, se pueden determinar a partir del diagrama de su circuito equivalente para distintos valores de deslizamiento.

El circuito de la página siguiente se refiere a la base de un motor monofásico de inducción que tiene un devanado del estator y dos rotores imaginarios. La impedancia del estator (Z_1) contiene los valores usuales de resistencia (R_1) y reactancia inductiva (X_1). Debido a que a rotor frenado los dos campos son de idéntica magnitud, los valores de impedancias secundaria y de reactancia de magnetización se dividen entre 2 para obtener los valores correspondientes a los campos separados. Por simplificación, se desprecian las pérdidas en el hierro y sólo se representa la reactancia de magnetización (X_m).



Los cálculos se basan en el mismo principio que se aplica al circuito equivalente para los motores polifásicos de inducción. En los cálculos para el motor monofásico de inducción, las pérdidas en vacío se tomarán como pérdidas rotacionales.

La impedancia para el campo del rotor en el sentido directo es:

$$Z_1 = Rf + jXf = \frac{R_R}{2S} + \frac{jX_R}{2} \quad en\ paralelo\ con\ \frac{jX_M}{2}$$

La impedancia para el campo del rotor en el sentido inverso:

$$Zb = Rb + jXb = \frac{R_R}{2(2-S)} + \frac{jX_R}{2} \quad en\ paralelo\ con\ \frac{jX_M}{2}$$

La impedancia del estator es:

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

De manera que la impedancia equivalente es:

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_f + Z_b$$

La corriente que demanda el motor es entonces:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{eq}} = \frac{V_1}{Z_1 + Z_f + Z_b}$$

El factor de potencia se obtiene como:

$$\cos\phi = \frac{R_{total}}{Z_{eq}} = \frac{R_1 + R_f + R_b}{Z_{eq}}$$

El voltaje de magnetización en el sentido directo:

$$E_{Mf} = I_1 Z_f$$

El voltaje de magnetización en el sentido inverso:

$$E_{Mb} = I_1 Z_b$$

Las corrientes en los circuitos de magnetización en el sentido directo y en el sentido inverso son:

$$I_2^1 f = \frac{E_{Mf}}{\frac{R_R}{2S} + j\frac{X_R}{2}} = \frac{I_1 Z_b}{\sqrt{\left(\frac{R_R}{2S}\right)^2 + \left(\frac{X_R}{2}\right)^2}}$$

$$I_{2b}^1 = \frac{E_{Mb}}{\frac{R_R}{2(2-S)} + j\frac{X_R}{2}} = \frac{I_1 Z_b}{\sqrt{\left(\frac{R_R}{4-2S}\right)^2 + \left(\frac{X_R}{2}\right)^2}}$$

La potencia entregada al devanado del rotor en el sentido directo:

$$P_{entrehierro\,f} = \left(I_2^1 f\right)^2 \frac{R_R}{2S} \text{ watts}$$

La potencia entregada al devanado de campo en el sentido inverso es:

$$P_{entrehierro\ b} = \left(I_{2b}^{1}\right)^2 \frac{R_R}{2(2-S)}\ watts$$

La potencia mecánica de salida del devanado de campo del rotor en sentido directo:

$$P_{mecánica\ f} = (1-S)P_{entrehierro\ f}$$

$$P_{mecánica\ f} = \left(I_{2}^{1}f\right)^2 \frac{R_R}{2} \frac{(1-S)}{S}$$

La potencia mecánica de salida del devanado de campo del rotor en sentido inverso:

$$P_{mecánica\ b} = (1-(2-S))P_{entrehierro\ b}$$

$$P_{mecánica\ b} = -(1-S)P_{entrehierro\ b} = -\left(I_{2}^{1}b\right)^2 \frac{R_R}{2} \frac{(1-S)}{2-S}$$

La potencia mecánica de salida es entonces:

$$P_{mecánica} = P_{mecánica\ f} + P_{mecánica\ b}$$

$$= (1-S)P_{entrehierro\ f} + \left(-(1-S)P_{entrehierro}\right)$$

$$= (1-S)P_{entrehierro\ f} - P_{entrehierro\ b})$$

$$= P_{mecánica\ f} - P_{mecánica\ b}$$

La potencia de salida neta:

$$P_{neta} = P_{mecánica} - \textit{Pérdidas por fricción} - \textit{Pérdidas en vacío y ventilación}$$

La eficiencia del motor:

$$\eta = \frac{\textit{Potencia de salida}}{\textit{Potencia de entrada}}$$

Ejemplo

Un motor monofásico de 125 W, 4 polos, 127 volts, entrega potencia nominal con un deslizamiento del 6%, teniendo unas pérdidas totales en el cobre de 25 watts. Calcular su eficiencia a plena carga y las pérdidas de cobre en el rotor, causadas por el campo en el sentido inverso. Las pérdidas por fricción y ventilación son de 25 watts. Despreciar las pérdidas en el cobre en el devanado del estator.

Solución

$$Potencia\ de\ salida\ del\ motor = 125\ watts$$

$$Pérdidas\ rotacionales = 25\ watts$$

La potencia mecánica desarrollada por el rotor.

$$P_{mecánica} = P_{salida} + Pérdidas\ por\ fricción\ y\ ventilación = 125 + 25 = 150\ watts$$

Con el deslizamiento del 6%: $S = 0.06$

La potencia de entrada al rotor:

$$P_{rotor} = P_{entrehierro\ f} - P_{entrehierro\ b} = \frac{\text{Potencia mecánica}}{1-S}$$

$$P_{rotor} = \frac{150}{1-0.06} = 160\ watts$$

Es decir que:

$$P_{entrehierro\ f} - P_{entrehierro\ b} = 160\ watts$$

Pero también:

$$SP_{entrehierro\ f} + (2-S)P_{entrehierro\ b} = Pérdidas\ totales\ en\ el\ cobre\ del\ rotor \qquad (a)$$

$$0.6P_{entrehierro\ f} + 1.94P_{entrehierro\ b} = 25 \qquad (b)$$

Resolviendo (a) y (b) se tiene:

$$\begin{aligned} &\textit{Pérdidas en el cobre debidas al} \\ &\textit{campo en el sentido inverso} = (2-S)\textit{Pérdidas en hierro b} = 14.94\,W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textit{Potencia de entrada al motor} &= \textit{Potencia de entrada} + \textit{Pérdidas en el cobre} \\ &\quad \textit{al rotor} \qquad\qquad \textit{del estator} \\ &= 160\ \textit{watts} \end{aligned}$$

La eficiencia (despreciando las pérdidas en el cobre del estator):

$$\eta = \frac{\textit{Potencia de salida}}{\textit{Potencia de entrada}} x\,100 = \frac{125}{160} x\,100$$

$$\eta = 78.12\%$$

Ejemplo

Calcular la velocidad de un motor de inducción monofásico de arranque con capacitor, que tiene 4 polos, opera a 60 Hz y tiene un deslizamiento del 3%.

Solución

La velocidad sincronía del motor es:

$$N_S = \frac{120f}{P} = \frac{120\ x\ 60}{4} = 1800 RPM$$

La velocidad N está dada por:

$$S = (N_S - N)/N_S$$

$$0.03 = (1800 - N)/1800$$

$$N = 1800 - 1800\ x\ 0.03 = 1746\ RPM$$

7.9 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS A MOTORES MONOFÁSICOS

Las características de comportamiento (eficiencia, pérdidas y factor de potencia) de los motores de inducción monofásicos se obtienen aplicando carga a los mismos y midiendo potencia de salida, potencia de entrada, velocidad y corriente, en los motores que usualmente son de baja potencia. Para determinar las constantes de la máquina es necesario desarrollar varias pruebas; las más comunes que se realizan sobre los motores monofásicos de inducción para la determinación de varias constantes son:

a) Medición de la resistencia de los devanados del estator.

La resistencia de cada devanado del estator se mide por separado, y en el caso de los motores de arranque con capacitor, el condensador se omite.

b) La prueba de rotor bloqueado.

Esta prueba se desarrolla con los devanados principal y de arranque separados y las cantidades de entrada: voltajes, corrientes y potencia (watts) se miden en cada caso. Esta prueba, en algunos casos, se hace a voltaje reducido (del orden del 40% del voltaje nominal) para evitar un valor excesivo de corriente de cortocircuito y de calentamiento.

c) Prueba de vacío.

Esta prueba se desarrolla a voltaje nominal, excitando únicamente al devanado principal y se miden: la corriente, voltaje, potencia, así como la velocidad.

d) Determinación de las pérdidas por fricción y ventilación.

En esta prueba el voltaje aplicado al motor se reduce hasta que éste pueda arrancar y se pueda medir la potencia de entrada, ésta es entonces suficiente para mantener operando en vacío; y esta lectura, en estas condiciones, representa las pérdidas por fricción y ventilación.

Ejemplo

A un motor monofásico de fase partida de 1/4 HP, 1725 RPM, 115 V, 60 Hz, se le hace la prueba de rotor bloqueado a voltaje reducido en los devanados principal y auxiliar, obteniéndose los siguientes resultados:

	DEVANADO PRINCIPAL	DEVANADO AUXILIAR
Voltaje aplicado	E = 25 V	E = 25 V
Corriente	I_S=4.5 A	I_a=1.5 A
Potencia activa	P_S=73W	P_a= 32 W

Se desea calcular:

a) El ángulo de fase entre I_a e I_s.

b) La corriente a rotor bloqueado que demanda la línea a 115 V.

Solución

a) Se calcula primero el ángulo de fase entre I_S y E en el devanado principal.

La potencia aparente es:

$$S_S = E\,I_S = 25\,x\,4.5 = 112.5\ VA$$

El factor de potencia:

$$\cos\varphi_S = \frac{P_S}{S_S} = \frac{73}{112.5} = 0.65$$

$$\varphi_S = \cos^{-1} 0.65 = 49.45°$$

I_S se atrasa 49.45° con respecto al voltaje E, se calcula ahora el ángulo de fase entre I_a y E para el devanado auxiliar.

La potencia aparente es:

$$S_a = E\,I_a = 25\,x\,1.5 = 37.5\ VA$$

El factor de potencia correspondiente:

$$\cos\ \varphi_a = \frac{P_a}{S_a} = \frac{32}{37.5} = 0.85$$

$$\varphi_a = \cos^{-1}\ 0.85 = 31.78°$$

El ángulo de fase entre I_S e I_a es:

$$\alpha = I_S - I_a = 49.45° - 31.78° = 17.67°$$

b) Para calcular la corriente de línea total, se calculan primero los valores totales de P y Q demandados por ambos devanados y de aquí se obtiene la potencia total aparente S.

La potencia activa total absorbida es:

$$P = P_S + P_a$$

$$= 60 + 30 = 90W$$

Las potencias reactivas se obtienen como:

$$Q_S = \sqrt{S_{S^2} - P_{S^2}} = \sqrt{(112.5)^2 - (73)^2} = 85.59\ VAR$$

$$Q_a = \sqrt{S_a^2 - P_a^2} = \sqrt{(37.5)^2 - (32)^2} = 19.55\ VAR$$

La potencia reactiva total absorbida por el motor es:

$$Q = Q_S + Q_a = 85.59 + 19.55 = 105.14\ VAR$$

La potencia aparente total absorbida es ahora:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(90)^2 + (105.14)^2} = 138.4\ VA$$

$$= \frac{577}{(15)^2}$$

$$R_{eq} = 2.564\ \Omega$$

La resistencia del devanado del rotor referida al estator es:

$$R_2^1 = R_{eq} - R_1 = 2.564 - 1.50 = 1.064\ \Omega$$

La reactancia equivalente de los devanados del motor:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{(8.4)^2 - (2.564)^2}$$

$$X_{eq} = 8.0\ \Omega$$

La reactancia del devanado del rotor referida al estator:

$$X_2^1 = \textit{Reactancia del devanado del estator}.$$

$$X^1 = \frac{X_{eq}}{2} = \frac{8.0}{2} = 4.0\ \Omega$$

Suponiendo que la reactancia de magnetización es la misma en los ejes principal y transversal:

¿ $X_M = \cancel{\dfrac{2\ x\ Voltaje\ de\ vacío}{Corriente\ de\ vacío}}$? $\Rightarrow X_M = \dfrac{V_0}{I_0 \operatorname{sen} \varphi_0}$ o $X_M \approx \dfrac{V_0}{I_0}$

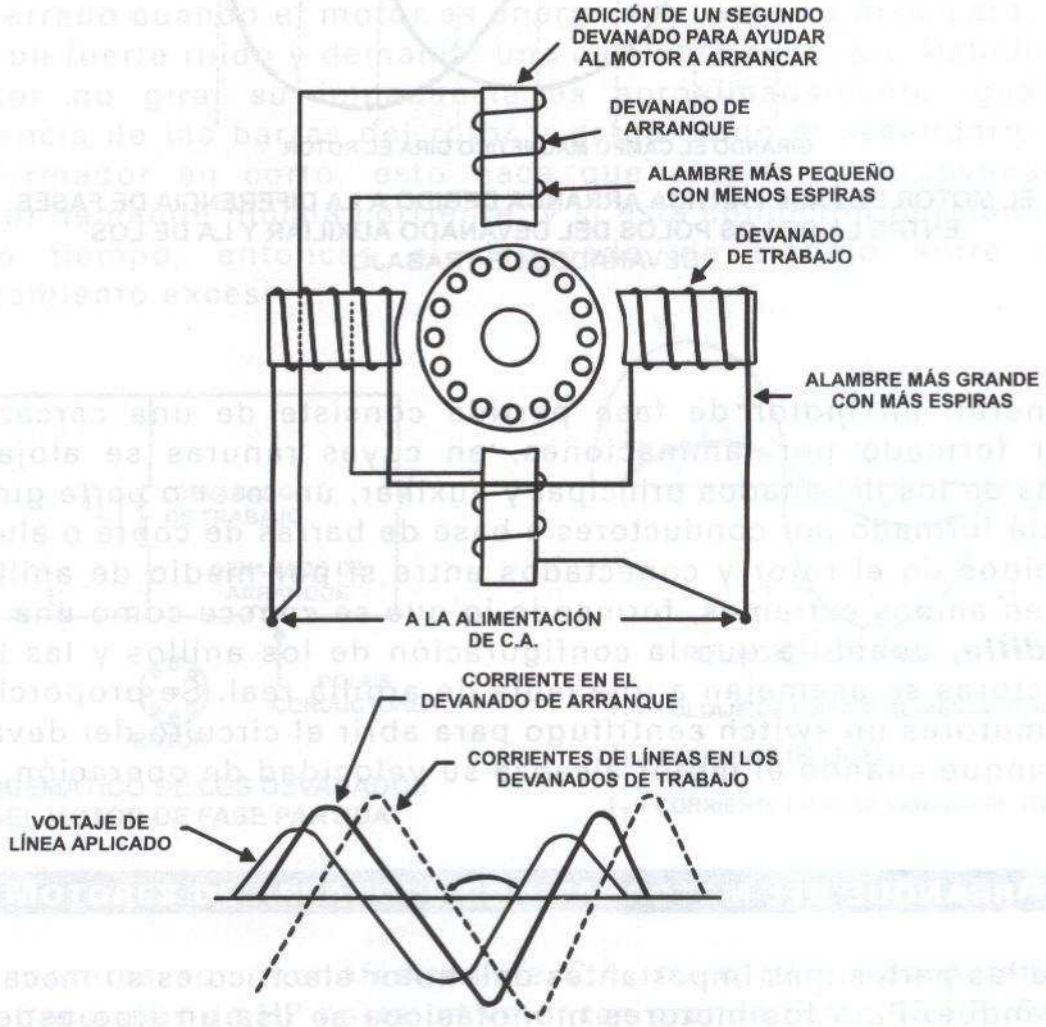
¿ $X_M = \dfrac{2\ x\ 220}{6.15} = 71.5\Omega$?

7.10 Los devanados del estator

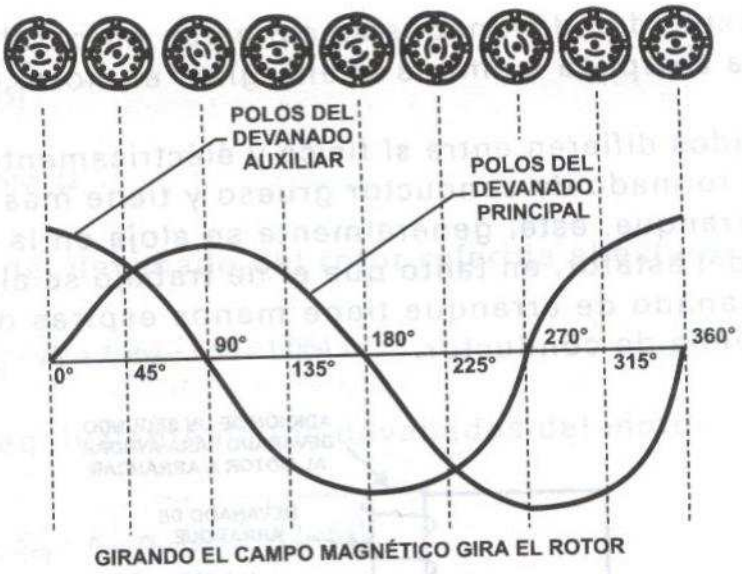
El motor práctico de fase partida tiene dos grupos de devanados en el estator. El primer grupo se conoce como el devanado principal o devanado de trabajo; el segundo, se le conoce como devanado auxiliar o

de arranque. Estos dos devanados se conectan en paralelo entre sí, el voltaje de línea se aplica a ambos al energizar el motor.

Los dos devanados difieren entre sí física y eléctricamente. El devanado de trabajo está formado de conductor grueso y tiene más espiras que el devanado de arranque, éste, generalmente se aloja en la parte superior de las ranuras del estator, en tanto que el de trabajo se aloja en la parte inferior. El devanado de arranque tiene menos espiras de una sección delgada o pequeña de conductor.



LA CORRIENTE FUERA DE FASE PRODUCE UN CAMPO MAGNÉTICO ROTATORIO



EL MOTOR DE FASE PARTIDA ARRANCA DEBIDO A LA DIFERENCIA DE FASES ENTRE LA DE LOS POLOS DEL DEVANADO AUXILIAR Y LA DE LOS DEVANADOS DE TRABAJO

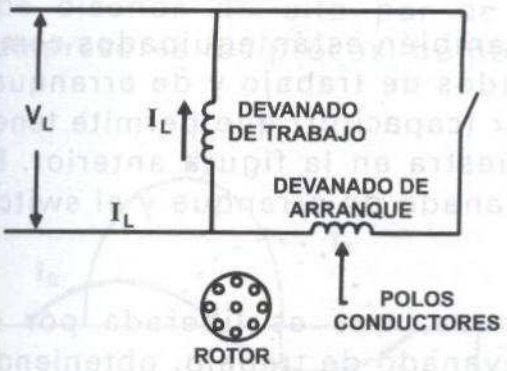
En general, un motor de fase partida consiste de una carcaza, un estator formado por laminaciones, en cuyas ranuras se alojan las bobinas de los devanados principal y auxiliar, un rotor o parte giratoria que está formado por conductores a base de barras de cobre o aluminio embebidos en el rotor y conectados entre sí por medio de anillos de cobre en ambos extremos, formando lo que se conoce como una ***Jaula de ardilla,*** debido a que la configuración de los anillos y las barras conductoras se asemejan a una jaula de ardilla real. Se proporciona a estos motores un switch centrífugo para abrir el circuito del devanado de arranque cuando el motor alcanza su velocidad de operación.

7.11 Arranque del motor

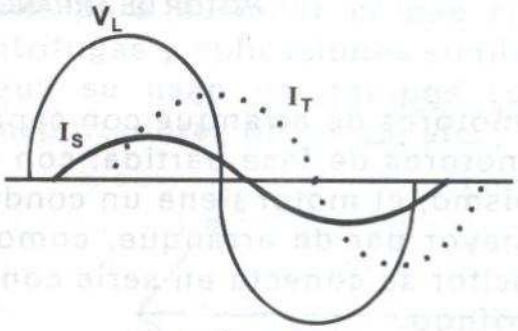
Una de las partes más importantes del motor eléctrico es su mecanismo de arranque. Para los motores monofásicos se usa un tipo especial a base de un switch centrífugo para desconectar el devanado de arranque cuando el motor ha alcanzado de un 75% a un 80% de su velocidad de operación, de manera que, a velocidad nominal el motor funciona sólo con su devanado de operación.

Como se observa del circuito de arranque, el switch centrífugo está conectado en serie con el devanado de arranque. Este switch está normalmente cerrado cuando el motor está en reposo, al arrancar permanece cerrado hasta que se alcanza del 75% al 80% de su velocidad de operación. A esta velocidad, un mecanismo a base de resorte debido a la fuerza centrífuga del rotor, vence la fuerza que hace que el switch permanezca cerrado y se abre.

El motor continúa operando debido a las corrientes inducidas en el devanado del rotor, debido a su movimiento. Si el switch centrífugo no está cerrado cuando el motor es energizado, éste no arrancará. Puede hacer un fuerte ruido y demanda una corriente excesiva. Debido a que el rotor no gira, su impedancia es aproximadamente igual a la resistencia de las barras del rotor y actúa como el secundario de un transformador en corto, esto hace que el primario (devanado de trabajo) demande mucha corriente, y si esta condición permanece por mucho tiempo, entonces el devanado de trabajo sufre de un calentamiento excesivo.



ESQUEMÁTICO DE LOS DEVANADOS DEL MOTOR DE FASE PARTIDA



RELACIÓN DE FASE

V_L = VOLTAJE DE LÍNEA O ALIMENTACIÓN

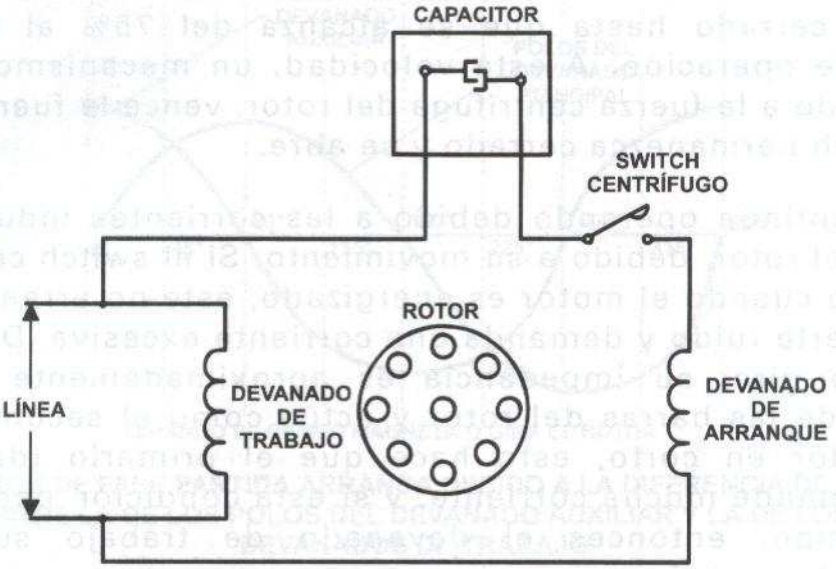
I_L = CORRIENTE DE LÍNEA

I_T = CORRIENTE EN EL DEVANADO DE TRABAJO

7.12 MOTORES DE ARRANQUE CON CAPACITOR

Estos motores son monofásicos de C.A. cuyo rango de potencia va desde fracciones de HP hasta un valor tan grande como 15 HP. Se usan ampliamente en muchas aplicaciones de tipo monofásico, tales como: accionamiento de máquinas herramientas (taladros, pulidoras, etc), compresores de aire, refrigeradores, etc. Este tipo de motor es similar en su construcción al motor de fase partida, excepto que se conecta un

capacitor en serie con el devanado de arranque, como se muestra en la figura:



MOTOR DE ARRANQUE CON CAPACITOR

Los motores de arranque con capacitor también están equipados como los motores de fase partida: con devanados de trabajo y de arranque, asimismo, el motor tiene un condensador (capacitor) que permite tener un mayor par de arranque, como se muestra en la figura anterior. El capacitor se conecta en serie con el devanado de arranque y el switch centrífugo.

La corriente en el devanado de arranque, que es liberada por el capacitor, se adelanta al voltaje en el devanado de trabajo, obteniendo de esta manera un desplazamiento angular mayor entre los devanados de arranque y de trabajo. Esto proporciona un incremento en el par de arranque para el motor. Para dar una idea de orden de magnitud, un motor de fase partida con capacitor tiene un par dos veces mayor que el motor de fase partida sin capacitor.

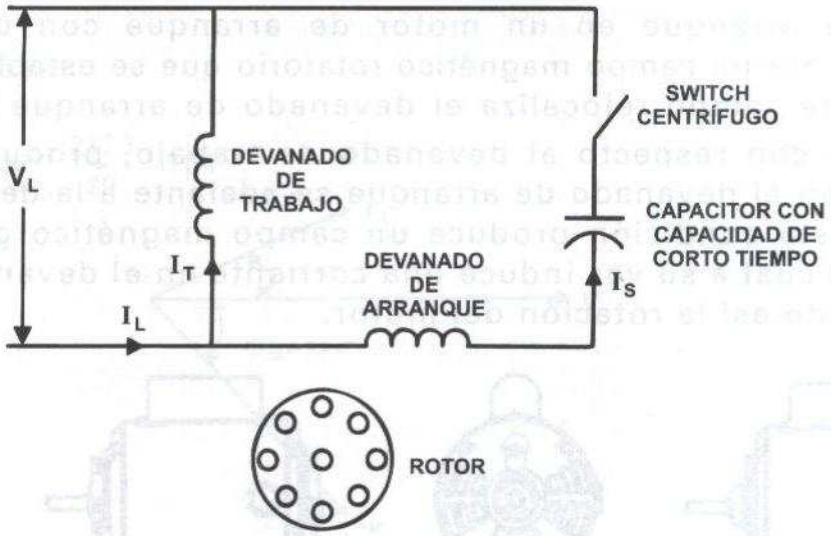
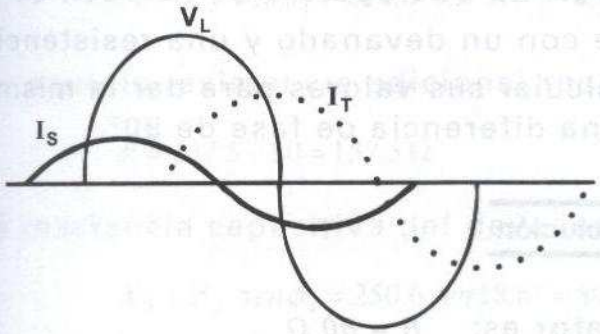


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LOS DEVANADOS DE UN MOTOR DE C.A. MONOFÁSICO DE ARRANQUE CON CAPACITOR

Los motores de arranque con capacitor se encuentran disponibles en las versiones de par de arranque normal para accionar cargas como: ventiladores, sopladores, bombas centrífugas y aplicaciones similares. Los diseños de alto par de arranque se usan en equipos como: compresores recíprocos, bombas, transportadores de carga, etc.



RELACIÓN DE FASE PARA LAS CANTIDADES DEL MOTOR DE ARRANQUE CON CAPACITOR

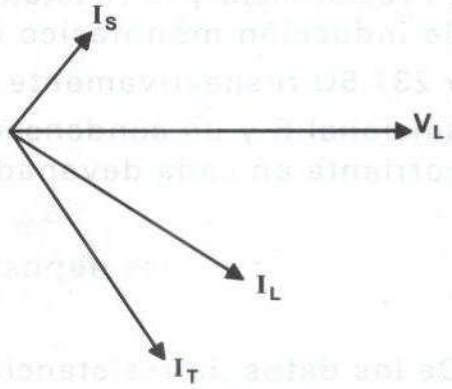
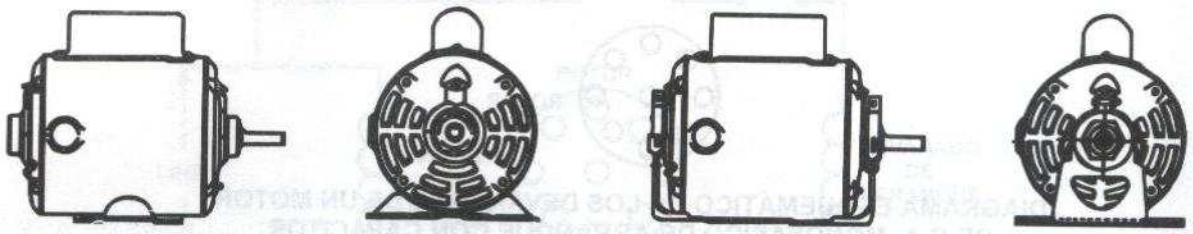


DIAGRAMA VECTORIAL PARA LA RELACIÓN DE FASE

Los motores de fase partida de arranque con capacitor son los que requieren el menor mantenimiento de todos los tipos de motores monofásicos, pero tienen un par de arranque muy bajo, lo que hace que no sea deseable para ciertas aplicaciones.

El par de arranque en un motor de arranque con capacitor está producido por un campo magnético rotatorio que se establece dentro del motor. Este campo relocaliza el devanado de arranque 90° eléctricos defasados con respecto al devanado de trabajo, produciendo que la corriente en el devanado de arranque se adelante a la del devanado de trabajo. Esta condición produce un campo magnético giratorio en el estator, el cual a su vez induce una corriente en el devanado del rotor, produciendo así la rotación del motor.



BASE RÍGIDA DE BASE FLEXIBLE

ASPECTO DE UN MOTOR DE ARRANQUE CON CAPACITOR

Ejemplo

La resistencia y la reactancia inductiva de cada devanado de un motor de inducción monofásico de fase partida que opera a 60 Hz., son 80 Ω y 237.5Ω respectivamente. En serie con un devanado y una resistencia adicional R y un condensador C. Calcular sus valores para dar la misma corriente en cada devanado, con una diferencia de fase de 90°.

Solución

De los datos, la resistencia del estator es: $R = 80\ \Omega$

La reactancia del estator: $X = 237.5\ \Omega$

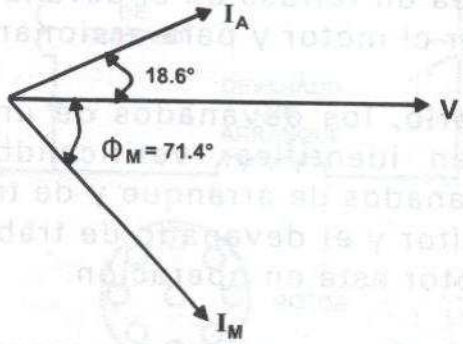
La impedancia de cada devanado del estator es entonces:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(80)^2 + (237.5)^2}$$

$$Z = 256.6\ \Omega$$

El ángulo de fase:

$$\phi = tan^{-1}\frac{237.5}{80} = 71.4°$$



La impedancia del arranque después de conectar la resistencia R y la capacitancia C en serie con cualquiera de los devanados, debe ser igual a su valor original, es decir: 250.6 Ω y con su ángulo de fase de 18.6°, de manera que la corriente en cada devanado sea igual y con un defasamiento de 90°, esto es: $Z_A = 250.6\,\Omega$, $\phi A = 18.6°$

La resistencia del devanado de arranque:

$$R_A = Z_A \cos\phi_A = 250.6 \cos 18.6 = 237.5\ \Omega$$

De aquí, la resistencia adicional requerida es:

$$R = 237.5 - 80 = 157.5\,\Omega$$

La reactancia capacitiva del devanado de arranque es:

$$X_A = Z_A\ sen\,\phi_A = 250.6\,sen\,18.6° = 80\,\Omega$$

De aquí que la reactancia capacitiva adicional requerida es:

$$X_C = 80 - (-237.5) = 317.5\ \Omega$$

La capacitancia adicional requerida es:

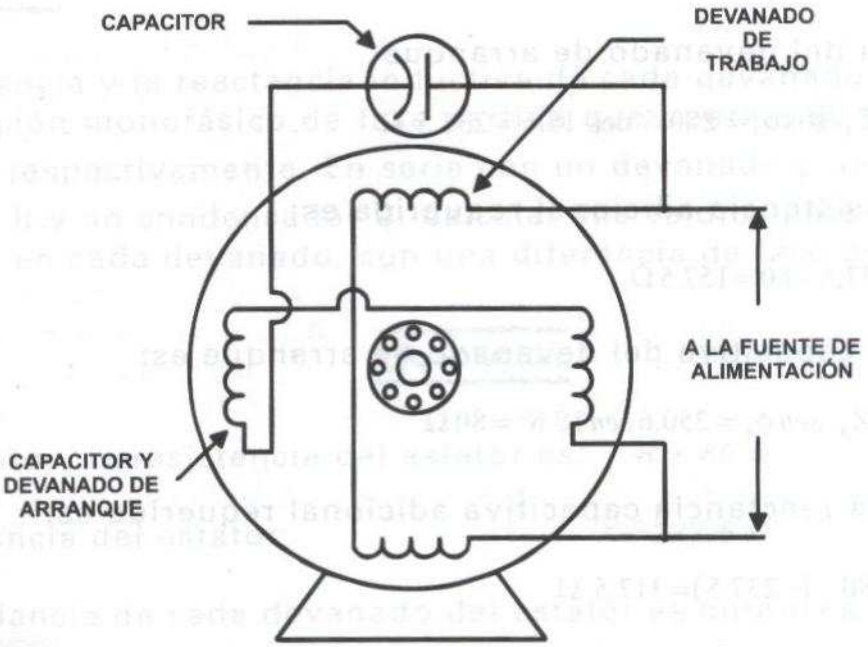
$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi\, x\, 60\, x\, 317.5} = 8.35\mu F$$

7.13 MOTORES DE FASE PARTIDA CON CAPACITOR PERMANENTE

Los motores de fase partida con capacitor permanente usan un capacitor conectado en serie con los devanados de arranque y de trabajo. El capacitor crea un retraso en el devanado de arranque que es necesario para arrancar el motor y para accionar la carga.

En caso de ser necesario, los devanados de un motor con capacitor permanente se pueden identificar verificando los valores de las resistencias de los devanados de arranque y de trabajo. El devanado de arranque con su capacitor y el devanado de trabajo permanecen en el circuito mientras el motor está en operación.

La principal diferencia entre un motor con capacitor permanente y un motor de arranque con capacitor es que no se requiere de switch centrífugo para los motores con capacitor permanente. Los motores con capacitor permanente no pueden arrancar y accionar cargas que requieran un alto par de arranque.



MOTOR DE C.A. MONOFÁSICO CON CAPACITOR PERMANENTE, NO REQUIERE DE SWITCH CENTRÍFUGO YA QUE EL CAPACITOR NO SE MUEVE NUNCA DEL CIRCUITO

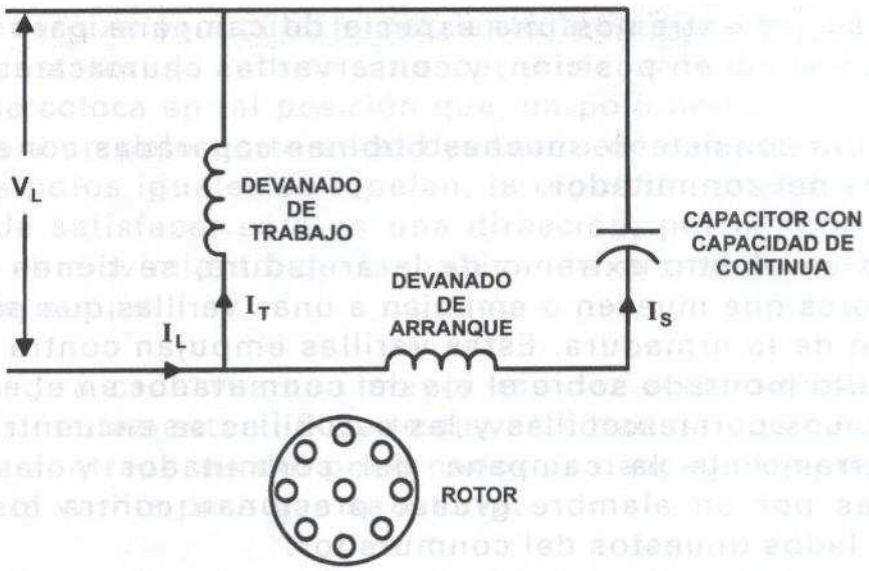


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LOS DEVANADOS DEL MOTOR MONOFÁSICO DE C.A. CON CAPACITOR PERMANENTE

7.14 MOTORES DE INDUCCIÓN REPULSIÓN

El motor de inducción-repulsión arranca con un principio de operación y cuando casi alcanza su velocidad, cambia a otro tipo de operación. Se desarrollan fuerzas tensionales muy altas durante el arranque por la repulsión entre el polo magnético en la armadura y la misma clase de polo en el campo adyacente del devanado del estator.

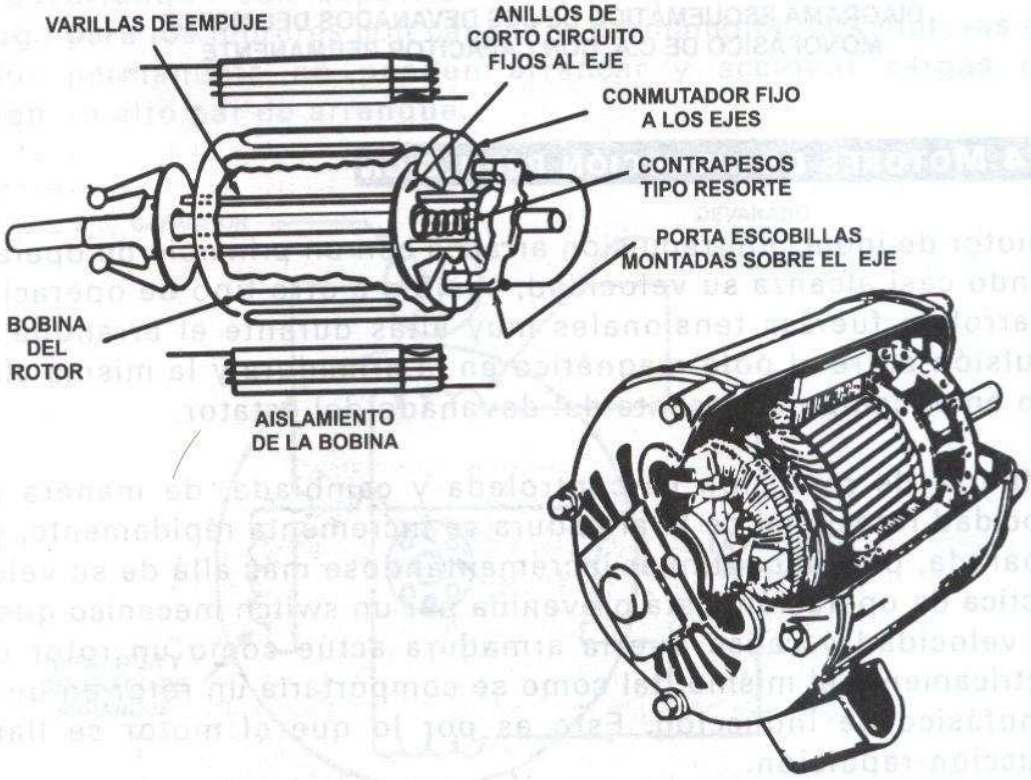
La fuerza de repulsión es controlada y cambiada, de manera que la velocidad rotacional de la armadura se incrementa rápidamente, y si no es parada, podría continuar incrementándose más allá de su velocidad práctica de operación. Está prevenida por un switch mecánico que actúa por velocidad y causa que la armadura actúe como un rotor que es eléctricamente el mismo, tal como se comportaría un rotor en un motor monofásico de inducción. Esto es por lo que el motor se llama de inducción-repulsión.

El estator de este tipo de motor se construye en forma similar al de motor de fase partida o de arranque con capacitor, pero sólo hay un devanado de trabajo o de campo montado en el interior.

Se tiene en los extremos una especie de campana para mantener la armadura y el eje en posición, y conservar las chumaceras en el eje.

La armadura consiste de muchas bobinas separadas conectadas a los segmentos del conmutador.

Montados en el otro extremo de la armadura, se tienen contrapesos gobernadores que mueven o empujan a unas varillas que pasan a través del núcleo de la armadura. Estas varillas empujan contra un anillo en cortocircuito montado sobre el eje del conmutador en el extremo de la armadura. Los portaescobillas y las escobillas se encuentran montadas en el extremo de la campana del conmutador y las escobillas, conectadas por un alambre grueso presionan contra los segmentos sobre los lados opuestos del conmutador.



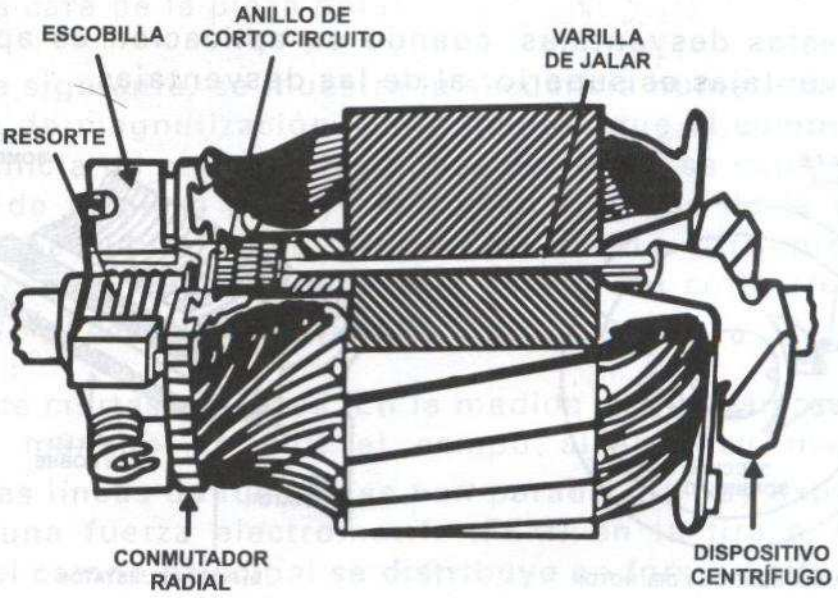
MOTOR MONOFÁSICO DE ARRANQUE CON REPULSIÓN Y OPERACIÓN COMO INDUCCIÓN

Cuando el motor se para, la acción de los contrapesos del gobernador mantienen el cortocircuito en el anillo por contacto con el conmutador.

Cuando se energiza y circula la corriente a través del devanado de campo del estator se induce una corriente en las bobinas de la armadura y se coloca en tal posición que, un polo norte en la armadura está próximo a un polo norte en el devanado de campo en el estator. Dado que los polos iguales se repelen, la repulsión producida en este caso se puede satisfacer sólo en una dirección, por la rotación de la armadura y el movimiento de la bobina de armadura lejos de los devanados de campo.

La armadura gira cada vez con mayor rapidez acelerando hasta que alcanza aproximadamente el 80% de su velocidad de operación. A esta velocidad los contrapesos del gobernador se despegan y presionan al sujetador de la varilla para que se mueva.

Cuando el gobernador alcanza su velocidad de diseño, las varillas se pueden mover juntas eléctricamente en la misma forma que el disco de aluminio, fundido como en los rotores de jaula de ardilla de los motores de inducción. Esto significa que el motor opera como un motor de inducción. Este motor se aplica en donde se requiera arrancar cargas relativamente pesadas, sin demandar demasiada corriente. Se fabrican de 1/2 HP hasta 20 HP y se emplean con cargas típicas como: compresores de aire grandes, equipo de refrigeración, etc.



ROTOR DE UN MOTOR TIPO INDUCCIÓN - REPULSIÓN

7.15 MOTOR DE POLOS SOMBREADOS

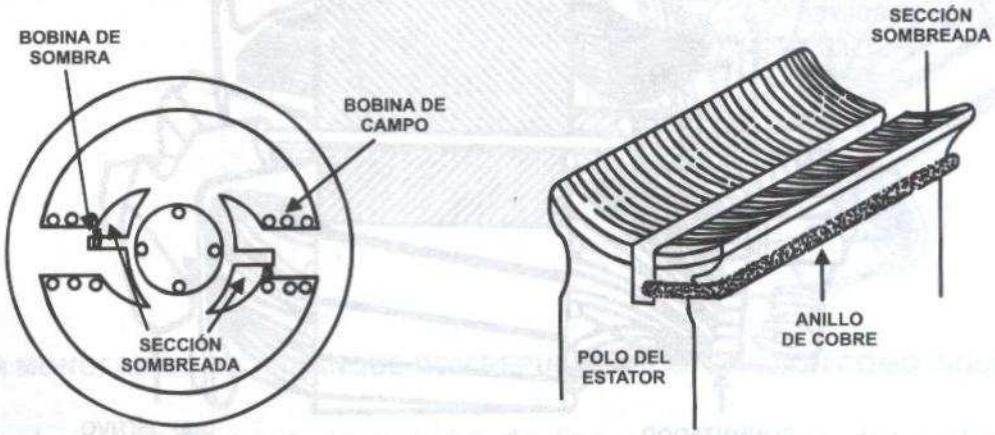
Este tipo de motores se aplica en casos muy específicos, como es el accionamiento de ventiladores o sopladores que tienen requerimientos de potencia muy bajos. Su rango de potencia está comprendido entre valores desde 0.0007 hasta 1/4 HP, y la mayoría se fabrica en el rango de 1/100 a 1/20 de HP. La principal ventaja de estos motores es su simplicidad de construcción, su confiabilidad y su robustez, además de que tienen un bajo costo.

A diferencia de otros motores monofásicos de C.A., los motores de fase partida no requieren de partes auxiliares como: capacitores, escobillas, conmutadores o partes móviles como switches centrífugos. Esto hace que también su mantenimiento sea mínimo y relativamente sencillo.

Las principales desventajas de los motores de polos sombreados son:

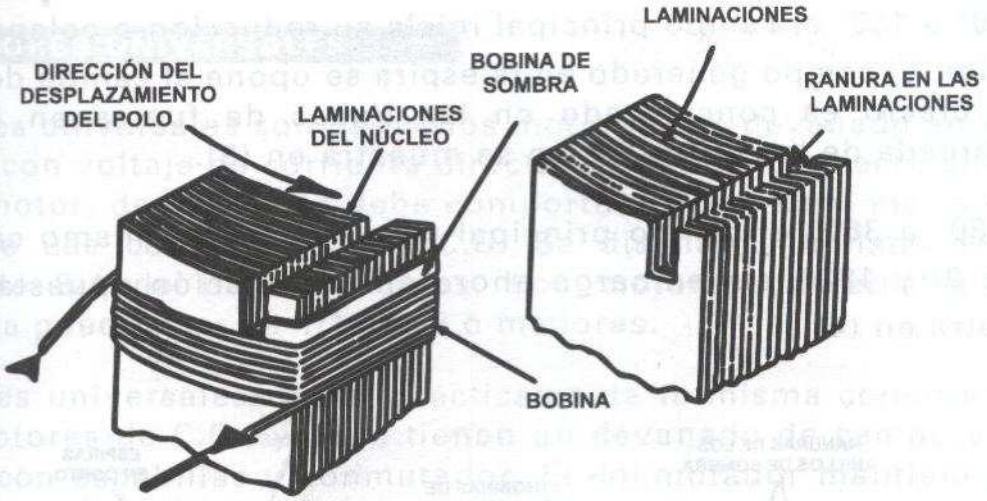
- Tienen un par de arranque muy bajo.
- Su eficiencia es muy baja, por ejemplo, un motor de 1/20 HP tiene una eficiencia del orden del 35%.
  Para motores más pequeños puede llegar a ser hasta del 5%.
- Su factor de potencia es muy pobre.

A pesar de estas desventajas, cuando su aplicación es apropiada, el peso de las ventajas es superior al de las desventajas.



A) VISTA DEL ESTATOR Y DEL ROTOR B) POLO DEL ESTATOR

CONSTRUCCIÓN DE UN MONOFÁSICO DE C.A. DE POLOS SOMBREADOS



SOMBREADO DE LOS POLOS DE UN MOTOR DE C.A. DE POLOS SOMBREADOS

El motor de inducción de polos sombreados es, como se ha mencionado, un motor monofásico que usa como único método para arrancar la rotación del rotor. El efecto de un campo magnético móvil es producido por la construcción del estator en una forma especial.

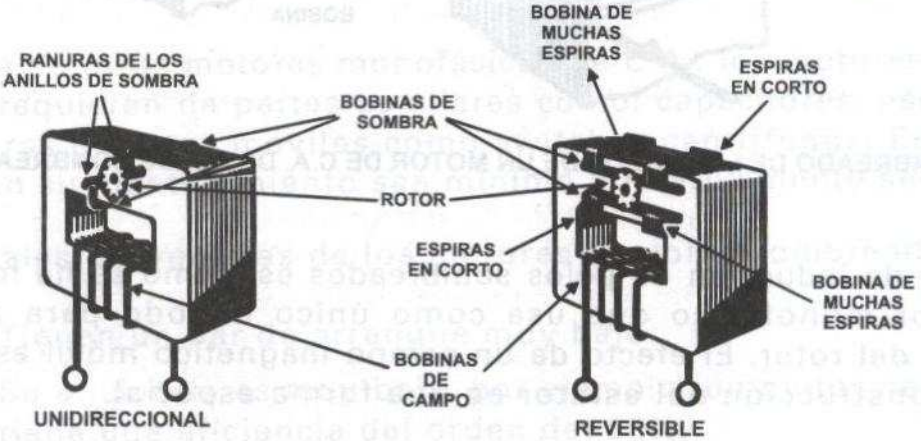
Las porciones de las superficies de la pieza polar están rodeadas por una tira o espira gruesa de cobre denominada "La bobina de sombra". La tira de cobre produce que el campo se mueva hacia otras y pase a través de la cara de la pieza polar.

En la figura siguiente, se muestra la secuencia numerada y los puntos de la curva de magnetización. En la medida que el campo alterno del estator se inicia de cero (1), las líneas de fuerza se expanden a través de la cara de la pieza polar y la cortan a través de la tira o espira sombreada. Se induce un voltaje en esta tira. La corriente que resulta genera un campo que se opone a la acción del corte (reduciendo su resistencia) del campo principal.

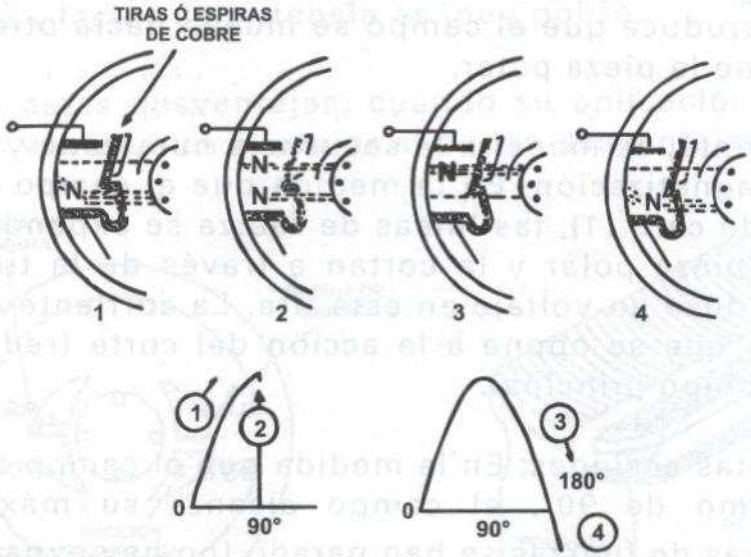
Esto produce ciertas acciones: En la medida que el campo aumenta de cero a un máximo de 90°, el campo alcanza su máximo valor. Entonces, las líneas de fuerzas se han parado (no hay expansión) y no se genera una fuerza electromotriz (FEM) en la tira o espira como resultado, el campo principal se distribuye en forma uniforme a través de los polos (2).

De 90° a 180° el campo principal inicia su reducción o colapso hacia el interior. El campo generado en la espira se opone al campo decreciente, y el efecto es concentrado en las líneas de fuerza en la sección sombreada de los polos, como se muestra en (3).

De 180° a 360° el campo principal va a través del mismo cambio que entre 0° y 180°, sin embargo ahora en la dirección opuesta, como se muestra en (4).



MOTORES DE POLOS SOMBREADOS REVERSIBLES Y UNIDIRECCIONAL



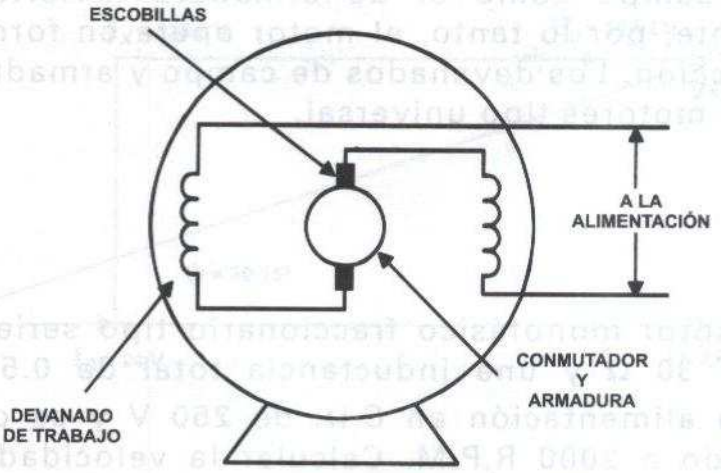
POLOS SOMBREADOS Y SU ACCIÓN EN LOS MOTORES MONOFÁSICOS DE C.A.

7.16 MOTORES UNIVERSALES

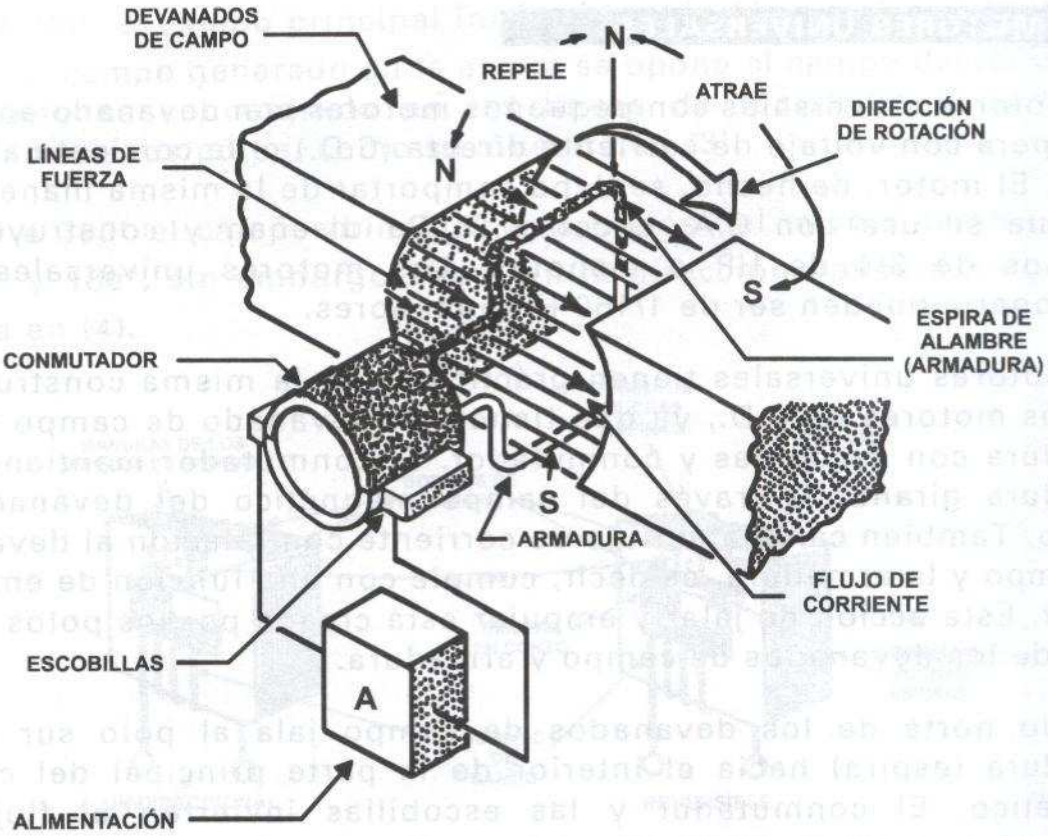
Los motores universales son pequeños motores con devanado en serie que opera con voltaje de corriente directa (C.D.) o de corriente alterna (C.A.). El motor, de hecho, se debe comportar de la misma manera, ya sea que se use con C.A. o con C.D. Se diseñan y construyen en tamaños de 3/4 de HP o menores. Los motores universales tipo fraccionaria pueden ser de 1/150 HP ó menores.

Los motores universales tienen prácticamente la misma construcción que los motores de C.D., ya que tienen un devanado de campo y una armadura con escobillas y conmutador. El conmutador mantiene a la armadura girando a través del campo magnético del devanado de campo. También cambia el flujo de corriente con relación al devanado de campo y la armadura, es decir, cumple con una función de empujar y jalar. Esta acción de jalar y empujar está creada por los polos norte y sur de los devanados de campo y armadura.

El polo norte de los devanados de campo jala al polo sur de la armadura (espira) hacia el interior de la parte principal del campo magnético. El conmutador y las escobillas invierten el flujo de corriente a través de la armadura, creando un polo norte en la espira. El polo norte del devanado de campo repele entonces al polo norte de la armadura. Esta acción de empujar y jalar produce la acción de giro de la armadura a través del campo magnético del devanado de campo, estableciendo de esta manera la operación del motor.



LOS DEVANADOS DE CAMPO Y ARMADURA SE CONECTAN EN SERIE CON LAS ESCOBILLAS EN EL MOTOR UNIVERSAL



UN MOTOR UNIVERSAL TIENE DEVANADO DE CAMPO, UN CONMUTADOR Y LA ESPIRA DE ALAMBRE QUE REPRESENTA LA ARMADURA

Cuando el motor universal opera con C.A., la corriente cambia constantemente de dirección en los devanados de campo. Tanto el devanado de campo como el de armadura invierten la corriente simultáneamente, por lo tanto, el motor opera en forma similar a un motor de inducción. Los devanados de campo y armadura se conectan en serie en los motores tipo universal.

Ejemplo

Se tiene un motor monofásico fraccionario tipo serie que tiene una resistencia de 30 Ω y una inductancia total de 0.5 H. Cuando se conecta a una alimentación en C.D. de 250 V y se carga, demanda 0.8 A, operando a 2000 R.P.M. Calcular la velocidad y el factor de potencia cuando se conecta a una alimentación en C.A. de 250 V, 60 Hz y demande la misma corriente de carga.

Solución

Cuando se conecta a la alimentación en C.D. la fuerza contra electromotriz desarrollada es:

$$E_b = V - IR = 250 - 0.8\,x\,30 = 226\,volts$$

Cuando se conecta a la alimentación en corriente alterna:

El voltaje aplicado es 250 V.

La corriente de línea 0.8 A.

La caída de voltaje por resistencia es entonces:

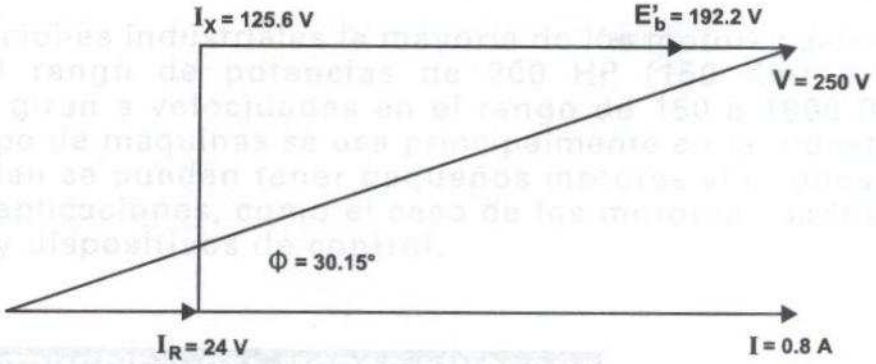
$$IR = 0.8\,x\,30 = 24\,volts$$

La caída de voltaje por reactancia es:

$$IX = I\,x\,2\pi\,fL = 0.8\,x\,2\pi\,x\,60\,x\,0.5$$

$$IX = 150.79\,volts$$

$$IX = 125.6\,V$$



Del diagrama anterior:

$$\phi = \text{sen}^{-1}\frac{IX}{V} = \text{sen}^{-1}\frac{125.6}{250} = 301.5°$$

El factor de potencia correspondiente es:

$$\cos\phi = \cos 30.15° = 0.8648$$

La fuerza contraelectromotriz desarrollada:

$$E^1b = V\cos\phi - IR = 250\,x\,0.8648 - 24 = 192.2\ V$$

La velocidad de operación sería entonces:

$$N^1 = N\,x\ \frac{E^1b}{Eb} = 2000\,x\ \frac{192.2}{226} = 1700\ RPM$$

8 MOTORES SÍNCRONOS

8.1 INTRODUCCIÓN

Estrictamente se podría afirmar que un generador síncrono puede operar también como un motor, que se conoce como "motor síncrono", estos motores, como su nombre lo indica, operan en sincronismo con el campo giratorio, por lo tanto, la velocidad de rotación está ligada a la frecuencia de la fuente de alimentación y debido a que esta frecuencia es fija, la velocidad del motor permanece constante en forma independiente de la carga o voltaje de la línea trifásica de alimentación.

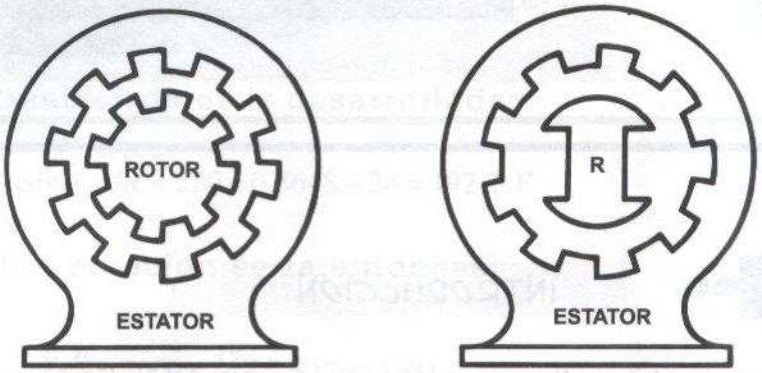
Esta propiedad de los motores síncronos es importante, pero no son usados sólo por esto, sino también por otros aspectos que se estudiarán en este capítulo.

Para aplicaciones industriales la mayoría de los motores síncronos están dentro del rango de potencias de 200 HP (150 Km) a 20,000 HP (10 MW) y giran a velocidades en el rango de 150 a 1800 RPM, por lo que este tipo de máquinas se usa principalmente en la industria pesada, pero también se pueden tener pequeños motores síncronos usados en pequeñas aplicaciones, como el caso de los motores usados en relojes eléctricos y dispositivos de control.

8.2 CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO

Desde el punto de vista constructivo, los motores síncronos son idénticos a los generadores de C.A. síncronos de polos salientes. El estator está compuesto de un núcleo magnético ranurado que

contiene al devanado trifásico (en capas generalmente) y es muy parecido también al devanado de un motor trifásico de inducción. El rotor tiene un grupo de polos salientes que se excitan con corriente directa, las bobinas de excitación están conectadas en serie a dos anillos rozantes y la corriente directa se alimenta a los devanados desde un sistema de excitación externo.



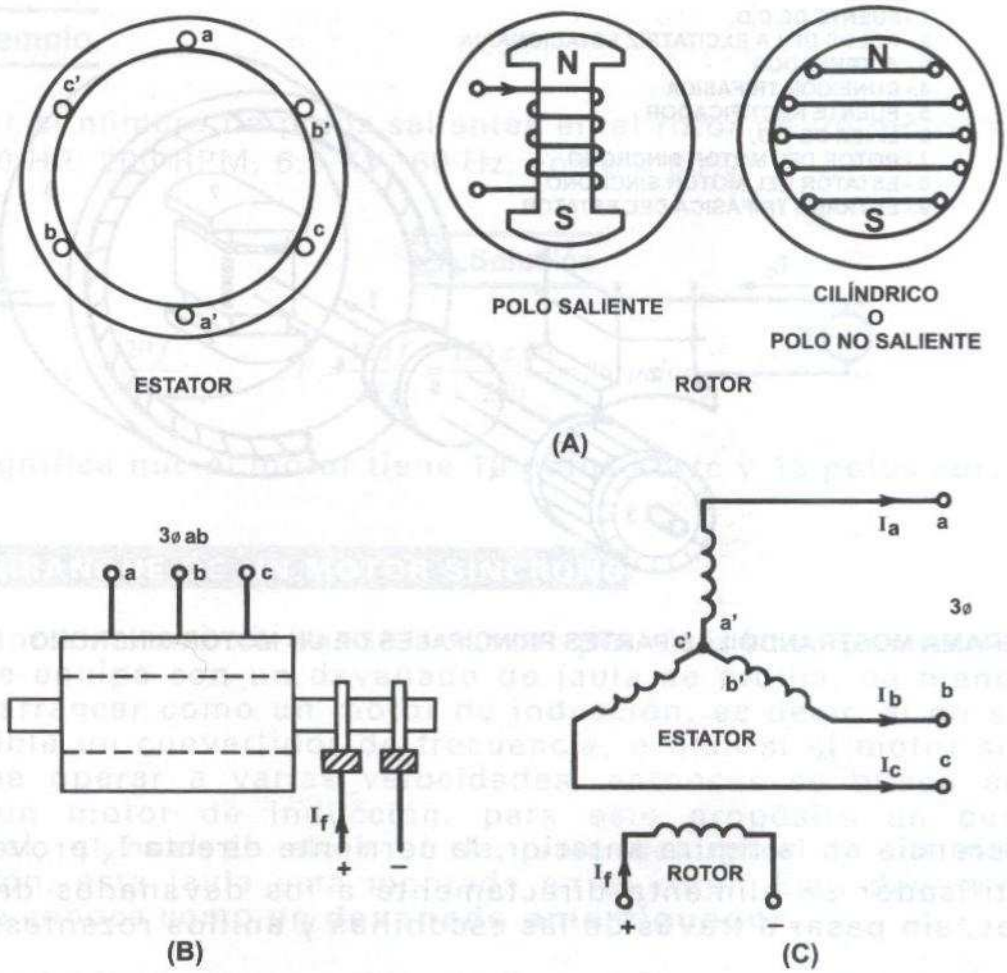
A) ROTOR CILÍNDRICO B) POLOS SALIENTES

ESTRUCTURA GENERAL DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA

Un motor síncrono, como cualquier máquina eléctrica rotatoria tiene una estructura básica formada por dos componentes principales:

Estator: Representa la parte de la máquina que no se mueve y por lo general es la parte externa de la máquina.

Rotor: Esta es la parte de la máquina que está libre para el movimiento y normalmente es la parte interior de la máquina.



I_f = CORRIENTE DE CAMPO APLICADO AL DEVANADO DEL ROTOR

ESTRUCTURA BÁSICA PARA UNA MÁQUINA SÍNCRONA TRIFÁSICA

Los motores síncronos modernos frecuentemente emplean sistemas de excitación sin escobillas, similares a aquellos usados en los generadores síncronos, también pueden haber pequeños, relativamente pequeños generadores trifásicos, llamados **excitadores** y un rectificador trifásico que están montados en un extremo del eje del motor, como se muestra en la figura:

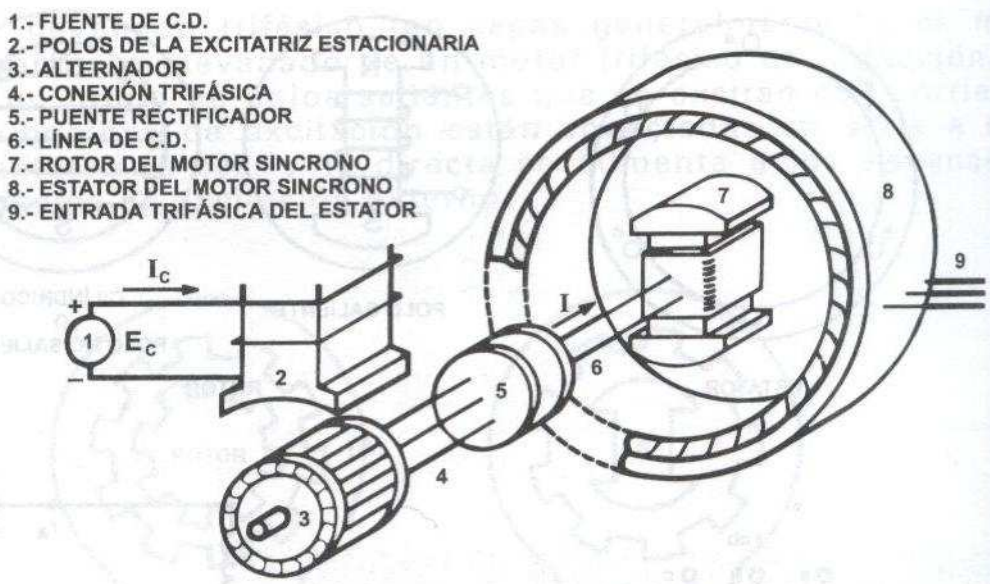


DIAGRAMA MOSTRANDO LAS PARTES PRINCIPALES DE UN MOTOR SINCRONO

Con referencia en la figura anterior, la corriente directa I_X proveniente del rectificador se alimenta directamente a los devanados de polos salientes, sin pasar a través de las escobillas y anillos rozantes.

La corriente se puede modificar controlando la pequeña corriente de excitación I_C que circula en el devanado del campo estacionario de la excitatriz.

El estator y el rotor siempre tienen el mismo número de polos y como en el caso de los motores de inducción, el número de polos determina la velocidad síncrona del motor:

$$N_S = \frac{120 f}{P}$$

Donde:

N_S = Velocidad síncrona en RPM.

f = Frecuencia de la fuente de alimentación (Hz).

P = Número de polos.

Ejemplo

Calcular el número de polos salientes en el rotor de un motor síncrono de 4000 HP, 200 RPM, 6.9 KV, 60 Hz, cos φ = 80%.

Solución

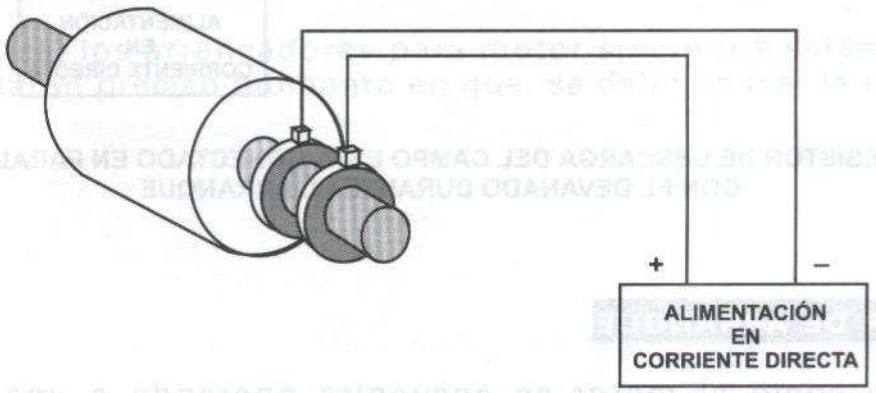
$$N_S = \frac{120f}{P}; \qquad P = \frac{120f}{N_S} = \frac{120 \times 60}{200} = 36 \ polos$$

Esto significa que el motor tiene 18 polos norte y 18 polos sur.

8.3 ARRANQUE DE UN MOTOR SÍNCRONO

Un motor síncrono no puede arrancar por si mismo, por lo mismo el rotor se equipa con un devanado de jaula de ardilla, de manera que pueda arrancar como un motor de inducción, es decir, si no se tiene disponible un convertidor de frecuencia, o bien si el motor síncrono no debe operar a varias velocidades, entonces se puede arrancar como un motor de inducción, para este propósito un devanado adicional, el cual se aloja en la jaula del rotor de un motor de inducción, esta jaula está montada en el rotor. Este devanado tipo jaula se conoce como un **devanado amortiguador.**

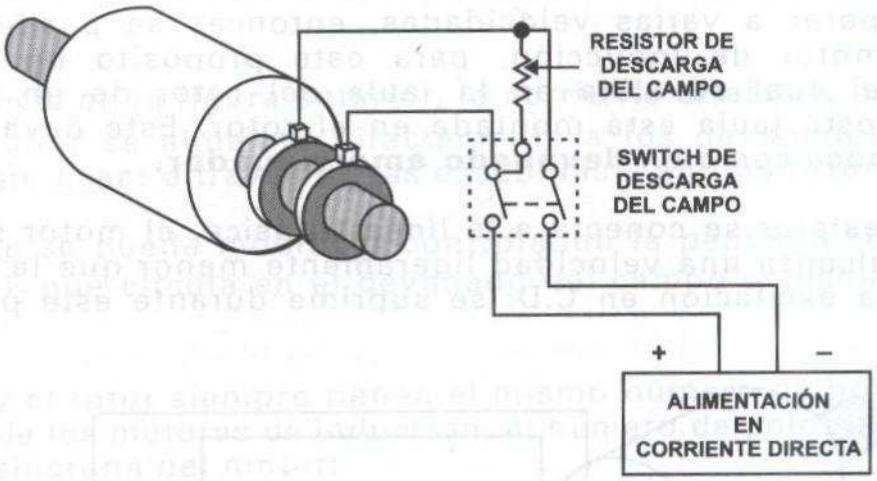
Cuando el estator se conecta a la línea trifásica, el motor se acelera hasta que alcanza una velocidad ligeramente menor que la velocidad síncrona. La excitación en C.D. se suprime durante este período de arranque.



ALIMENTACIÓN EN C.D. AL ESTATOR DEL MOTOR

Mientras el motor se acelera, el flujo rotatorio creado por el estator corta o atraviesa a los polos salientes de movimiento lento. Debido a que las bobinas sobre el rotor tienen un número relativamente grande de espiras, se induce un alto voltaje cuando gira a velocidades bajas, este voltaje aparece entre los anillos rozantes y decrece en la medida que el rotor se acelera, llegando a ser eventualmente despreciable cuando el rotor se aproxima a su velocidad síncrona. Para limitar el voltaje y para mejorar el par de arranque, se puede, ya sea poner en cortocircuito los anillos rozantes, o bien conectar éstos a un resistor auxiliar durante el periodo de arranque.

En el caso que la capacidad en potencia de la línea de alimentación esté limitada, algunas veces es necesario aplicar voltaje reducido al estator, como en el caso de los motores de inducción, se puede usar ya sea autotransformadores o reactores en serie para limitar la corriente de arranque. En el caso de instalaciones muy grandes, el motor se puede llevar hasta su velocidad por medio de una fuente electrónica de frecuencia variable.

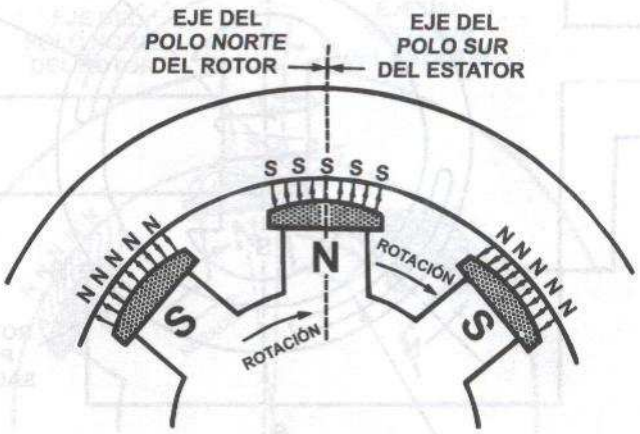


EL RESISTOR DE DESCARGA DEL CAMPO ESTA CONECTADO EN PARALELO CON EL DEVANADO DURANTE EL ARRANQUE

8.3.1 PAR DE ARRANQUE

Tan pronto como el motor se encuentra operando a una velocidad cercana a la velocidad síncrona, el rotor se excita con la C.D. esto

produce polos alternos N y S alrededor de la circunferencia del rotor, si sucede que los polos en este momento quedan frente a polos de polaridad opuesta en el estator, se presenta una fuerte atracción magnética entre ellos.



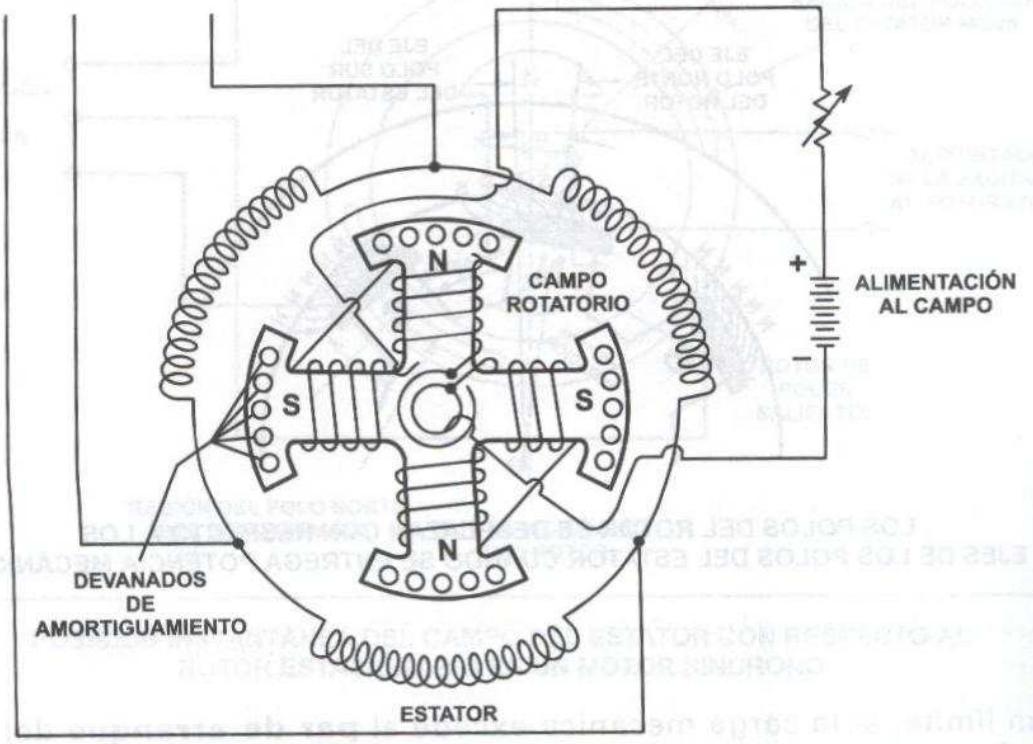
LOS POLOS DEL ROTOR SON ATRAÍDOS A LOS POLOS OPUESTOS SOBRE EL ESTATOR EN VACÍO

La atracción mutua fija a los polos del rotor y del estator juntos, el par desarrollado en este momento se denomina en forma apropiada "**par de arranque**".

El par de arranque en un motor síncrono es poderoso, pero la corriente directa se debe aplicar en el momento correcto, ya que podría resultar por ejemplo que los polos emergentes N y S del rotor sean opuestos a los polos N y S del estator, entonces la repulsión magnética resultante produce un violento impacto (shock) mecánico, el motor bajará inmediatamente su velocidad y se dispara el interruptor.

En la práctica, los arrancadores para motor síncronos están diseñados para detectar el preciso momento en que se debe aplicar la excitación.

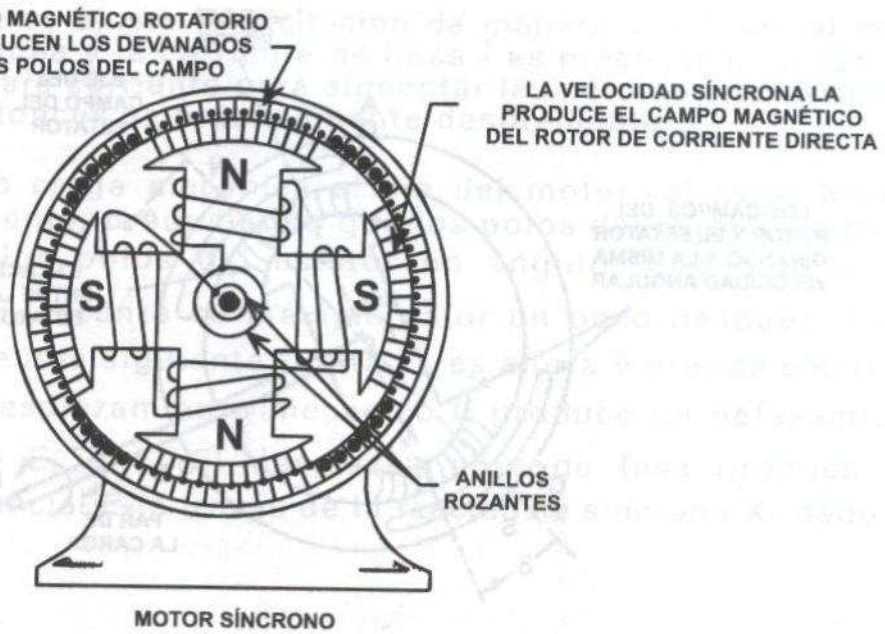
Los ángulos mayores corresponden a cargas mecánicas mayores y la potencia aumentada solo puede venir de una fuente de alimentación trifásica.



MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO
EL ROTOR DEL MOTOR SÍNCRONO TIENE POLOS MAGNÉTICOS FIJOS

Como se muestra en la figura anterior, el rotor del motor síncrono tiene polos magnéticos fijos, estos polos resultan de la corriente entregada por una fuente de C.D., o bien pueden estar incorporados en un rotor con imanes permanentes.

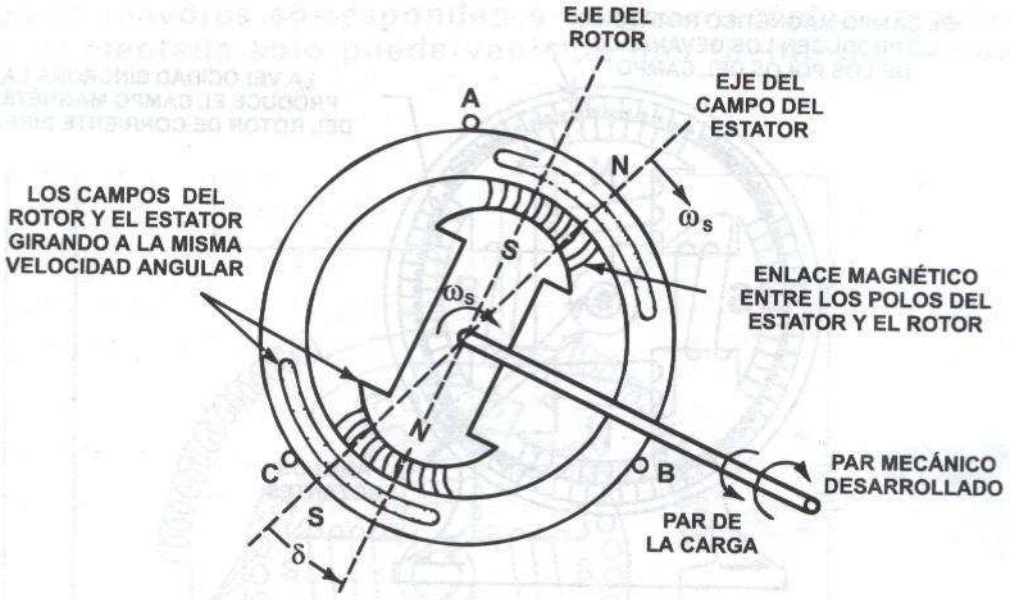
Hay una tercera posibilidad y que puede ser el uso de un rotor de hierro sin devanados, en cuyo caso los polos requeridos desarrollan en la medida que el motor llega a sincronismo, un campo rotatorio.



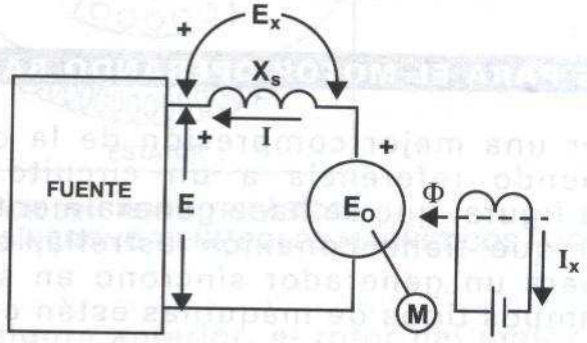
EL PAR REQUERIDO PARA GIRAR EL ROTOR DE UN MOTOR SÍNCRONO SE PRODUCE CUANDO EL CAMPO DEL ROTOR SE FIJA

8.4 CÁLCULOS PARA EL MOTOR OPERANDO BAJO CARGA

Se puede tener una mejor compresión de la operación de un motor síncrono, haciendo referencia a un circuito equivalente como el mostrado en la figura, que se hace generalmente en forma monofásica para un motor que tiene conexión estrella, esto se hace en forma idéntica que para un generador síncrono en su circuito equivalente, debido a que ambos tipos de máquinas están construidas de la misma forma.



PAR DESARROLLADO EN UN MOTOR SÍNCRONO

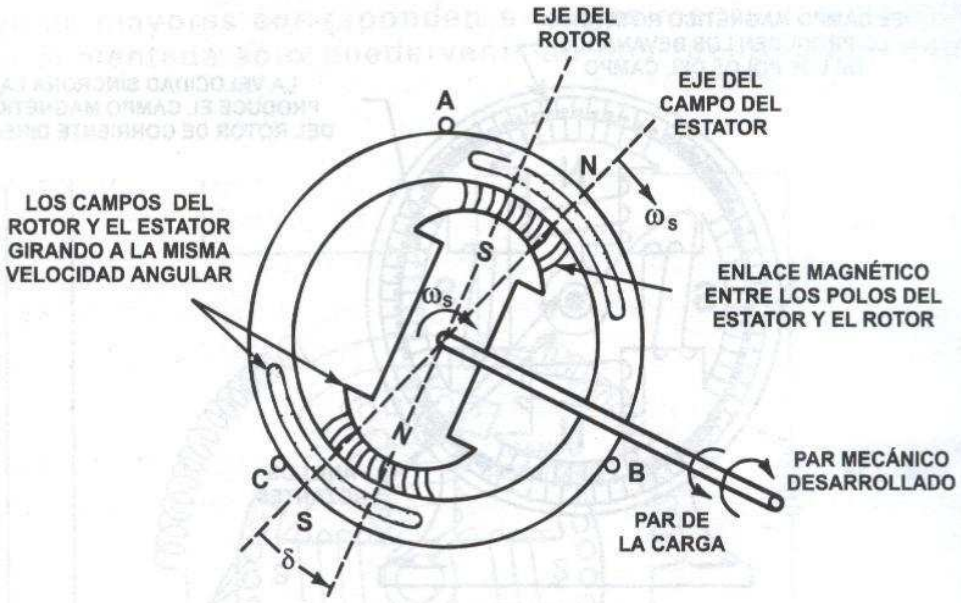


CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR SÍNCRONO MOSTRANDO UNA FASE

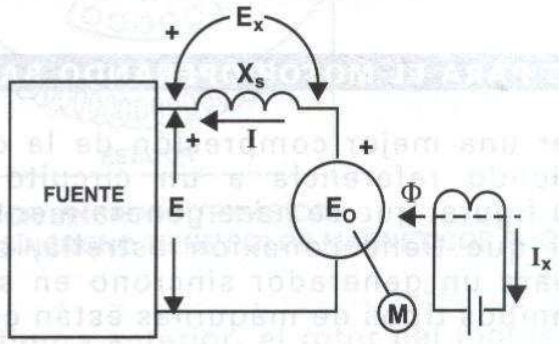
Cuando el flujo ϕ creado por el rotor induce un voltaje E_o en el estator, el valor del flujo depende de la corriente de excitación en C.D. I_x, por lo tanto E_o varía con I_x.

Como ya se ha mencionado, los polos del rotor y del estator están alineados cuando el motor opera en vacío, bajo estas condiciones se induce un voltaje E_o que está en fase con el voltaje de línea a neutro E.

$$\xrightarrow{\quad E,\ E_o \quad}$$



PAR DESARROLLADO EN UN MOTOR SÍNCRONO



CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR SÍNCRONO MOSTRANDO UNA FASE

Cuando el flujo ϕ creado por el rotor induce un voltaje E_o en el estator, el valor del flujo depende de la corriente de excitación en C.D. I_X, por lo tanto E_o varía con I_X.

Como ya se ha mencionado, los polos del rotor y del estator están alineados cuando el motor opera en vacío, bajo estas condiciones se induce un voltaje E_o que está en fase con el voltaje de línea a neutro E.

$$E, E_o$$

Si adicionalmente se ajusta la excitación de manera que E_o=E el motor "flota" sobre la línea y la corriente de línea I es prácticamente cero, ya que sólo se requiere corriente para alimentar las pérdidas por fricción y ventilación, y entonces es prácticamente despreciable.

Cuando se aplica carga mecánica al eje del motor, el rotor baja su velocidad lentamente, produciendo que los polos del rotor se retrasen con respecto a los polos del estator un ángulo α, debido a este desplazamiento E_o alcanza su máximo valor un poco después, por lo tanto si se refiere a la siguiente figura E_o es ahora δ grados eléctricos detrás de E. El desplazamiento mecánico α produce un defasamiento eléctrico δ entre E_o y E. El desplazamiento de fase produce una diferencia de potencial E_X a través de la reactancia síncrona X_S dado por la expresión:

$$E_X = E - E_o$$

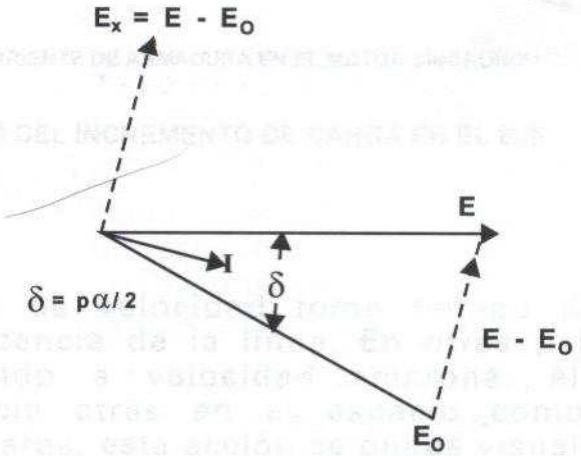
En consecuencia, una corriente I debe circular en el circuito dada por:

$$j' I X_S = E_X$$

De donde:

$$I = -j\, Ex / X_S$$

$$= -j(E - E_o) / X_S$$



MOTOR BAJO CARGA

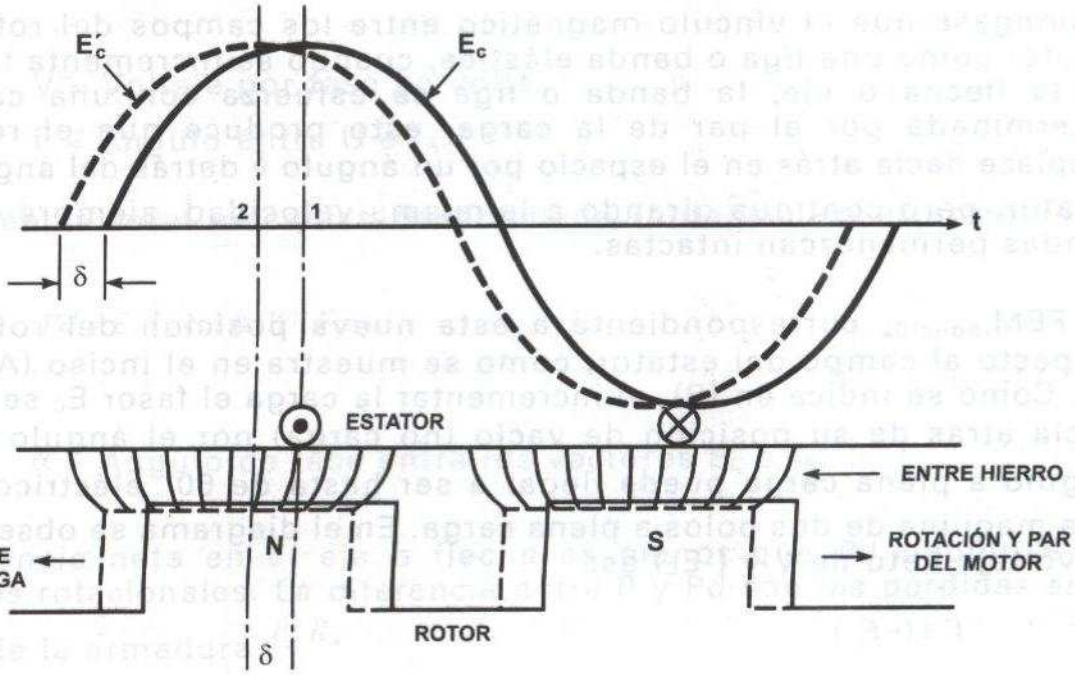
La corriente se atrasa 90° detrás de E_X debido a que X_S es inductiva, el diagrama vectorial bajo carga es el de la figura anterior, debido a que I está casi en fase con E, el motor absorbe potencia reactiva, esta potencia se transforma totalmente en potencia mecánica, excepto por las relativamente pequeñas pérdidas en el cobre y en el hierro en el estator.

En la práctica, el voltaje de excitación E_o se ajusta para ser mayor o menor que el voltaje de alimentación E, su valor depende de la potencia de salida del motor y del valor deseado del factor de potencia.

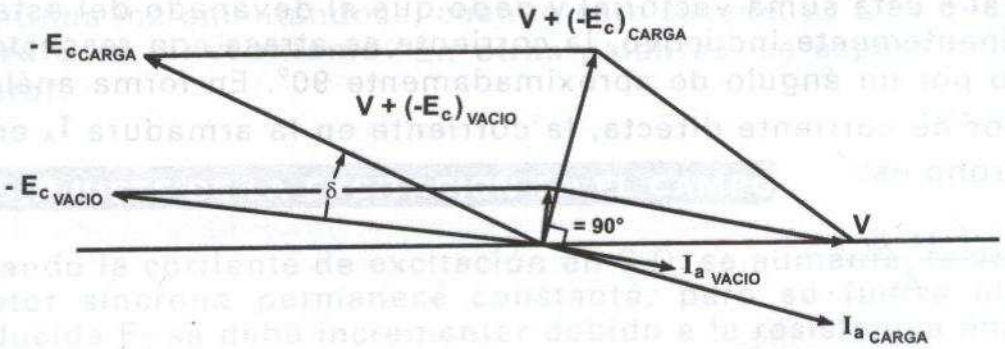
Regresando al asunto original de cómo un motor síncrono ajusta por si mismo los cambios en la carga, supóngase que la carga se incrementa en el eje, debido a que la velocidad promedio debe permanecer constante, no puede demandar que se incremente la corriente de línea en la misma forma como ocurre con los motores de corriente directa (es decir, operando a velocidad reducida).

Para ver qué ajuste debe tener lugar en un motor síncrono, se puede hacer referencia la siguiente figura, donde se muestran dos polos salientes, en un instante cuando están opuestos dos conductores en el estator, los conductores se supone que tienen un paso polar separado y la $FEM_{inducida}$ en los conductores, es como se muestra; máxima cuando los conductores están opuestos al centro del polo y cero cuando están a la mitad de los mismos.

Para cualquier otra posición con respecto a las caras polares el voltaje inducido, es como se muestra por la curva E_C. Al aplicar un incremento en el eje del rotor, se presenta una reducción de velocidad momentánea.



A) POSICIÓN DEL ROTOR



B) CORRIENTE DE ARMADURA EN EL MOTOR SÍNCRONO

EFECTO DEL INCREMENTO DE CARGA EN EL EJE

Con la reducción de velocidad toma tiempo para que un motor incremente su potencia de la línea. En otras palabras, aún cuando permanezca girando a velocidad síncrona, el rotor tendrá un deslizamiento hacia atrás en el espacio como resultado de un incremento en la carga, esta acción se puede visualizar como sigue:

Supóngase que el vínculo magnético entre los campos del rotor y el estator como una liga o banda elástica, cuando se incrementa la carga en la flecha o eje, la banda o liga se esfuerza con una cantidad determinada por el par de la carga, esto produce que el rotor se desplace hacia atrás en el espacio por un ángulo δ detrás del ángulo del estator, pero continua girando a la misma velocidad, siempre que las bandas permanezcan intactas.

La $FEM_{inducida}$ correspondiente a esta nueva posición del rotor con respecto al campo del estator, como se muestra en el inciso (A) como E'_C. Como se indica en (B), al incrementar la carga el fasor E_C se desliza hacia atrás de su posición de vacío (no carga) por el ángulo δ. Este ángulo a plena carga puede llegar a ser hasta de 60° eléctricos, para una máquina de dos polos a plena carga. En el diagrama se observa que el voltaje neto de V y ($-E_C$) es:

$$V+(-E_C)$$

y depende de la posición de E_C, el valor de I_A es directamente proporcional a esta suma vectorial y dado que el devanado del estator es predominantemente inductivo, la corriente se atrasa con respecto al voltaje neto por un ángulo de aproximadamente 90°. En forma análoga con el motor de corriente directa, la corriente en la armadura I_A en el motor síncrono es:

$$I_A=\frac{V+(-E_C)}{Z_S}$$

Donde:

Z_S= Impedancia por fase del devanado del estator.

Por lo tanto, cuando se carga la máquina el rotor asume una posición angular de retorno a su posición de vacío o no carga, esto produce que el motor incremente su demanda de potencia de la red o línea de alimentación, para compensar el incremento en la carga en su eje y sin cambiar su velocidad promedio. La potencia total suministrada al motor por fase es:

$$P=V\,I_A\cos\theta\ W/Fase$$

Donde:

V = Voltaje por fase en volts.

θ = Angulo entre U e I_A.

La potencia total mecánica desarrollada (potencia en el entrehierro) es:

$$Pd = E_C I_A \cos\alpha \; W/Fase$$

Donde:

α = Ángulo de fase entre los vectores E_C e I_A.

La potencia neta en el eje o flecha es menor que Pd debido a las pérdidas rotacionales. La diferencia entre P y Pd son las pérdidas en el cobre de la armadura $I_A^2 R_A$

Finalmente, la banda de hule se rompe si la carga en la máquina continua incrementándose, cuando esto sucede, se dice que la máquina **perdió el sincronismo.** En otras palabras, se espera demasiado del motor.

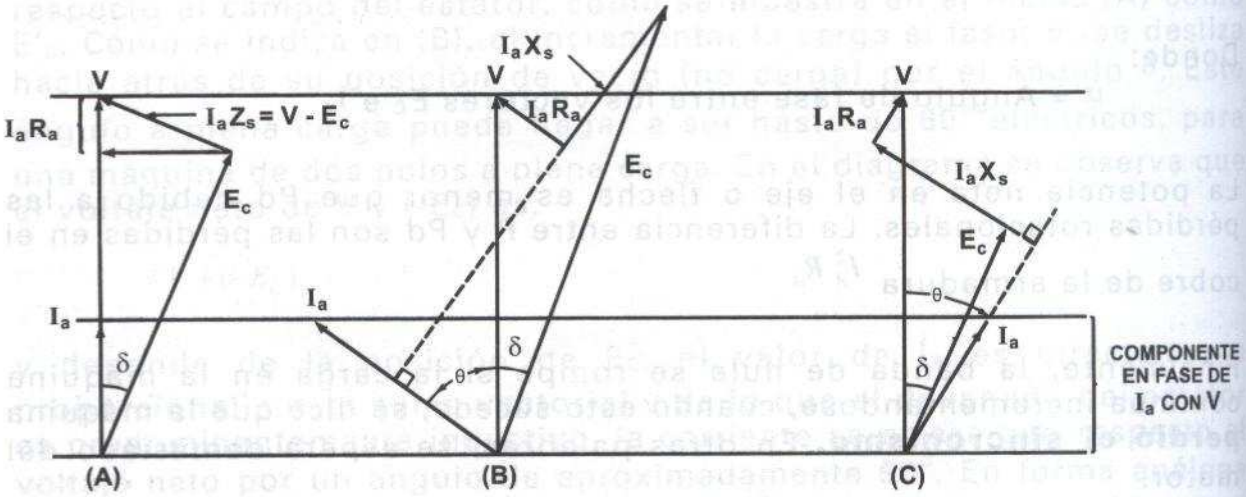
8.5 AJUSTE DE LA EXCITACIÓN EN EL CAMPO

Cuando la corriente de excitación en C.D. se aumenta, la velocidad del motor síncrono permanece constante, pero su fuerza electromotriz inducida E_C se debe incrementar debido a la resistencia del campo del rotor, podría parecer que el motor se para o bien arranca para actuar como generador cuando la fuerza electromotriz inducida tiende a ser igual o mayor que el voltaje de línea respectivamente; sin embargo, el motor síncrono continúa operando como motor, aún cuando la FEM exceda al voltaje de línea.

En estas condiciones, se dice que el **motor opera sobreexcitado**, con el resultado que demanda potencia de la línea de alimentación y con factor de potencia adelantado, se muestra cómo sucede esto en la siguiente figura.

Suponiendo que el motor se ajusta de manera tal que opera a factor de potencia unitario, es decir, la corriente de armadura I_A está en fase con el

voltaje de línea, como se muestra en (A), todos los cálculos se hacen por fase, de la ecuación $I_A = \frac{V - E_C}{Z_S}$ se observa que la corriente de armadura es proporcional a la suma vectorial del voltaje de línea V y la fuerza contraelectromotriz y E_C limitada por la impedancia Z_S. Bajo esta suposición del valor de excitación de campo E_C aumentado pero con la carga en la máquina sin aumentar, el ángulo δ permanece sin cambio.



MOTOR SÍNCRONO EN CARGA CONSTANTE AJUSTADO PARA OPERAR

(A) FACTOR DE POTENCIA UNITARIO
(B) FACTOR DE POTENCIA ADELANTADO
(C) FACTOR DE POTENCIA ATRASADO CON AJUSTE DE LA CORRIENTE DE CAMPO

Debido a que la suma de los vectores V y E_C se incrementa y la impedancia es constante, la corriente de armadura se debe incrementar; sin embargo, la potencia de la carga permanece constante, lo cual implica que el ángulo de fase se debe cambiar de tal manera que la componente en fase de la corriente de armadura con el voltaje terminal permanece sin cambio, es decir: $I_A \cos \theta$ es constante, como se muestra en (B) de la figura anterior considerando a continuación un decremento en la excitación del campo, la fuerza contra electromotriz E_C tiende a ser menor, y como antes, la componente en fase de la corriente de armadura con el voltaje de línea V debe permanecer dado que la potencia entregada es constante, esto significa que la suma vectorial de V y E_C otra vez es mayor, comparada con el caso de factor de potencia unitario.

La corriente de armadura se incrementará dependiendo de si este voltaje se incremente, y esto se puede hacer sólo cambiando el factor de potencia a un ángulo atrasado, como se muestra en la figura (C). El signo menos en E_C sólo indica un defasamiento de 180° por fase, de modo que:

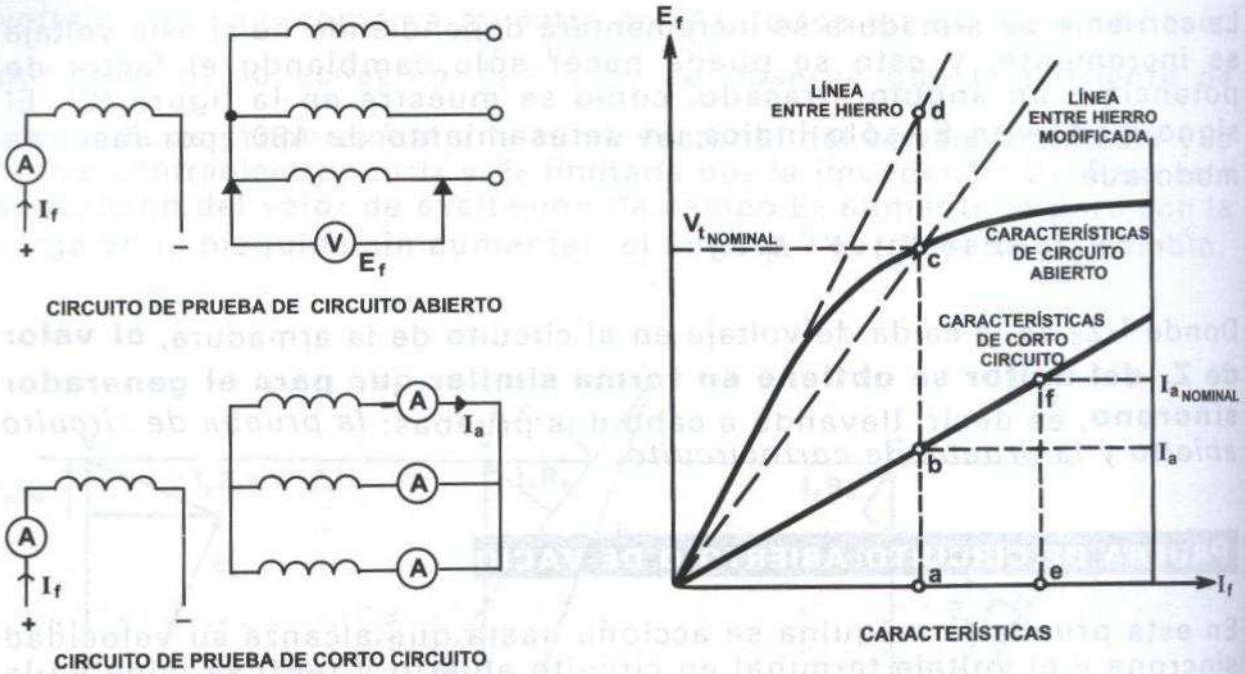
$$I_A Z_S = V + (-E_C) = V - E_C$$

Donde $I_A Z_S$ es la caída de voltaje en el circuito de la armadura, **el valor de Z_S del motor se obtiene en forma similar que para el generador síncrono**, es decir, llevando a cabo dos pruebas: *la prueba de circuito abierto y la prueba de cortocircuito.*

PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO O DE VACÍO

En esta prueba la máquina se acciona hasta que alcanza su velocidad síncrona y el voltaje terminal en circuito abierto V (=Ef) se mide en la medida que se va modificando la corriente de campo If. La curva que muestra la variación de Ef con If se conoce como la característica de **circuito abierto**, debido a que las terminales se mantienen abiertas, esta curva muestra la variación del voltaje de excitación Ef con la corriente de campo If.

Se debe observar que en la medida que la corriente de campo se incrementa, el circuito magnético muestra el efecto de saturación. La línea que pasa a través de la parte lineal de la característica de circuito abierto se conoce como "la línea de entrehierro". El voltaje de excitación podría tener cambios a lo largo de esta línea, si no hay efectos de saturación magnética en la máquina.

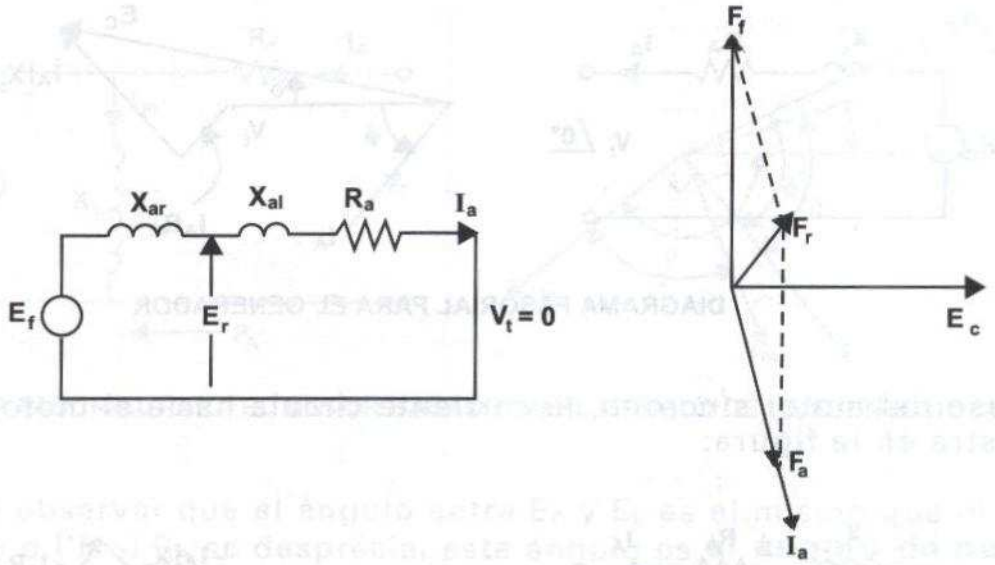


CARACTERÍSTICAS DE CIRCUITO ABIERTO Y DE CORTO CIRCUITO

LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

El arreglo del circuito para esta prueba se indica también en la figura anterior, los ampérmetros se conectan en cada fase y las terminales se ponen en corto, la máquina síncrona se acciona a velocidad síncrona. La corriente de campo If se varía y el promedio de las tres corrientes de armadura se mide, la variación de la corriente de armadura con la corriente de campo se muestra en la curva característica anterior "característica de cortocircuito".

Obsérvese que **esta característica es una línea recta** y esto se debe al hecho de que bajo condiciones de cortocircuito, el circuito magnético no se satura debido a que el flujo de entrehierro permanece a un nivel bajo, se puede explicar esto con el circuito equivalente que bajo condiciones de cortocircuito y como R_A es mucho menor que X_S, la corriente de armadura I_A se atrasa con respecto al voltaje de excitación E_C por casi 90°. El circuito equivalente es el mostrado en la figura, donde: $Er = I_A (R_A + jX_A\ell)$, debido a que tanto R_A como $X_A\ell$ son pequeños, a corriente nominal el voltaje de entrehierro es menor en 20% del voltaje nominal.



CIRCUITO Y DIAGRAMA VECTORIAL DE LA OPERACIÓN DEL GENERADOR BAJO CONDICIONES DE CORTOCIRCUITO

8.6 Los diagramas fasoriales

Los diagramas fasoriales muestran la relación entre voltajes y corrientes tanto para los generadores como para los motores síncronos y se muestran en las siguientes figuras, estos diagramas están basados en los circuitos equivalentes por fase para una máquina síncrona. El voltaje terminal se toma como el fasor de referencia para la construcción del diagrama fasorial.

El circuito equivalente para un generador se muestra a continuación en donde por conveniencia la corriente I_A se indica saliendo de la máquina (generador) en el caso del motor se mostraría entrando. El fasor para el voltaje de excitación E_C se obtiene sumando las caídas de voltaje I_AR_A y jI_AX_S al voltaje terminal V_t.

$$E_C = V_t + I_A R_A + jI_A X_S$$

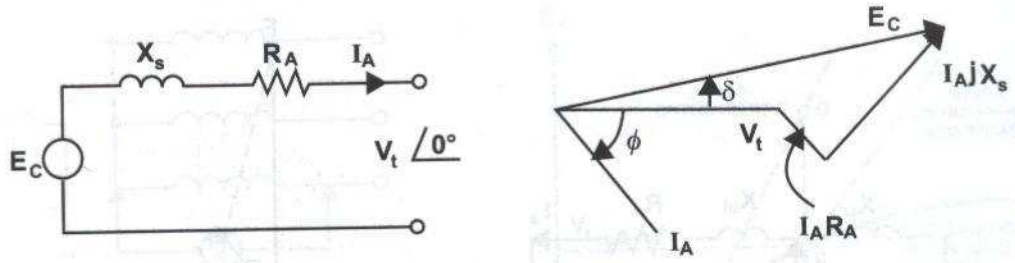


DIAGRAMA FASORIAL PARA EL GENERADOR

En el caso del motor síncrono, la corriente circula hacia el motor, como se muestra en la figura:

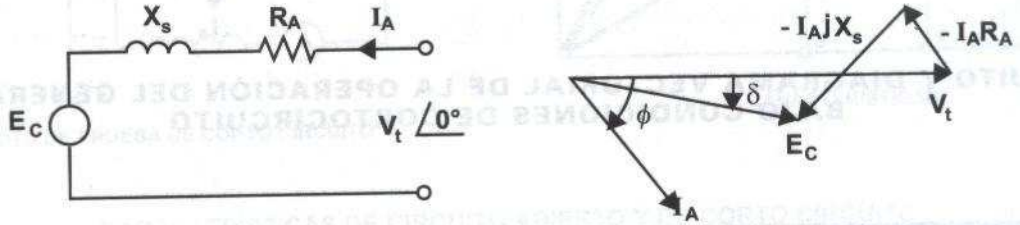


DIAGRAMA FASORIAL PARA EL MOTOR

$$V_t = E_C + I_A R_A + jI_A X_S$$

$$E_C = V_t \angle 0° - I_A R_A - jI_A X_S = \overline{E_C} \angle -\delta$$

El fasor E_C se construye restando las caídas de voltaje con respecto al voltaje terminal, en este caso, también se considera que el motor demanda corriente atrasada de la fuente de alimentación. Es importante notar que el ángulo δ entre V_t y E_C es positivo para la acción del generador y negativo para la acción del motor, este ángulo δ, conocido también como ángulo de potencia juega un papel muy importante en la potencia transmitida y en la estabilidad de la operación de una máquina síncrona.

El diagrama fasorial basado en el modelo de la fuente de corriente equivalente es el que se muestra a continuación, en este caso la corriente del estator I_A se toma como referencia por ser más conveniente.

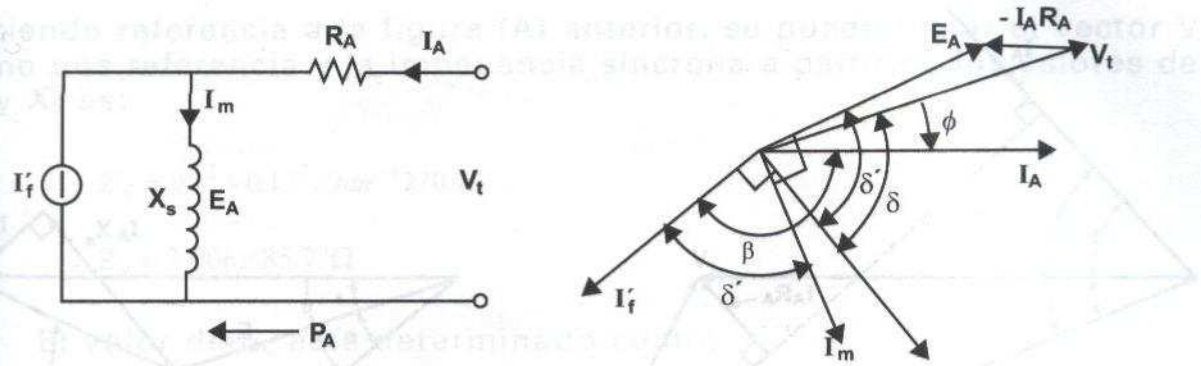


DIAGRAMA FASORIAL PARA EL MOTOR BASADO EN EL MODELO DE LA FUENTE DE CORRIENTE

Se debe observar que el ángulo entre E_A y E_C es el mismo que el ángulo entre Im ó I'f. si R_A se desprecia, este ángulo es **el ángulo de potencia** (ángulo entre los fasores V_t y E_C) al ángulo entre I_A e I'f se le conoce como ángulo β.

Ejemplo

Un motor síncrono de 75 HP, 440V, 900 RPM trifásico, está conectado en estrella y tiene una resistencia de armadura efectiva de $R_A = 0.15\ \Omega$ con una reactancia síncrona $X_S = 2.0\ \Omega$/fase, operando a plena carga y factor de potencia 0.8 atrasado calcular:

a) El ángulo del par δ.

b) La potencia mecánica desarrollada, suponiendo una eficiencia del 90%.

Solución

a) En general, la operación de un motor síncrono sobreexcitado o subexcitado se puede representar de acuerdo con los siguientes diagramas fasoriales.

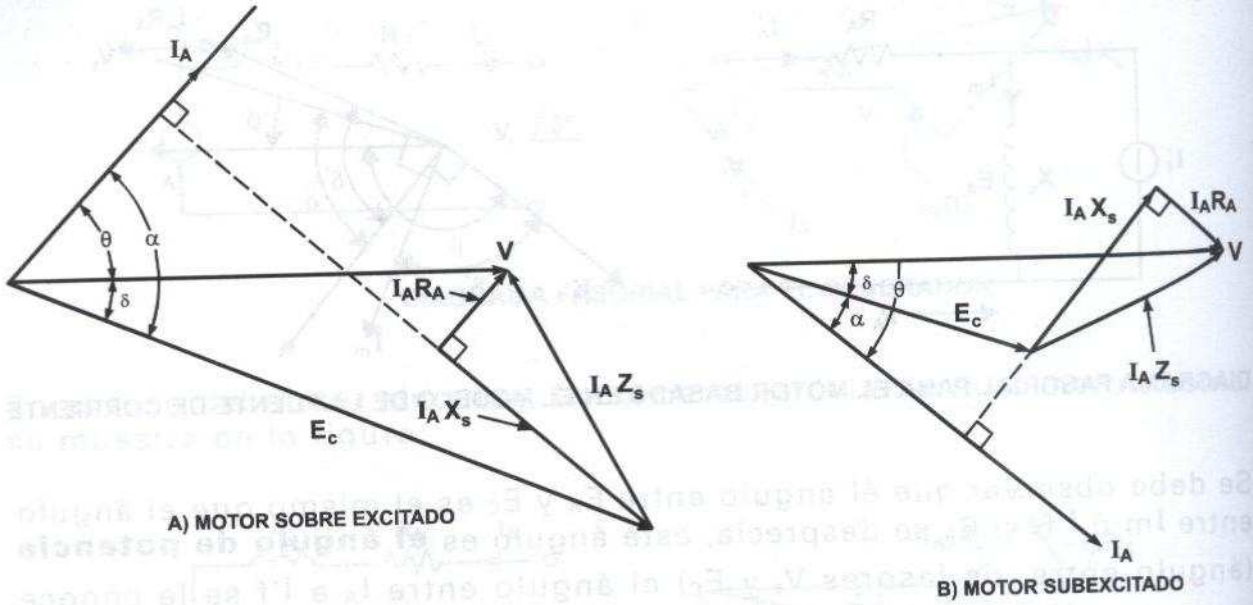


DIAGRAMA FASORIAL DEL MOTOR SÍNCRONO

La potencia de entrada al motor es:

$$P_{en} = \frac{HP\ x\ 746}{\eta} = \frac{75\ x\ 746}{0.90} = 62167W$$

La corriente de línea:

$$I = \frac{P_{en}}{\sqrt{3}\ V_L \cos\theta} = \frac{62167}{\sqrt{3}\ x\ 440\ x\ 0.8} = 102\,A$$

El voltaje al neutro:

$$V_N = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254V$$

El ángulo de fase:

$$\theta = \cos^{-1} 0.8 = 36.9° \ \ adelantado$$

Haciendo referencia a la figura (A) anterior, se puede tomar el vector V como una referencia y la impedancia síncrona a partir de los valores de R_A y X_S es:

$$Z_S = \sqrt{2^2 + 0.15^2} \angle tan^{-1} 2/0.15$$

$$Z_S = 2.006 \angle 85.7° \Omega$$

El valor de E_C está determinado como:

$$E_C = V - I_A Z_A = V\angle 0° - I_A \angle \theta \; x \; Z_S \angle \beta$$

$$= 254\angle 0° - 102\angle 36.9° \; x \; 2.006\angle 85.7°$$

$$E_C = 364 - j172 = 403\angle -25.3° V$$

El signo negativo indica que E_C se atrasa por un ángulo de 25.3° que representa el ángulo del par δ.

b) La potencia mecánica desarrollada se obtiene a partir de la ecuación.

$$Pd = 3E_C I_A \cos\alpha$$

$$= 3 \; x \; 403 \; x \; 102 \; x \cos \; 62.2°$$

$$= 62167 - 3 \; x \; 102^2 \; x \; 0.15$$

$$= 57484 W$$

Ejemplo

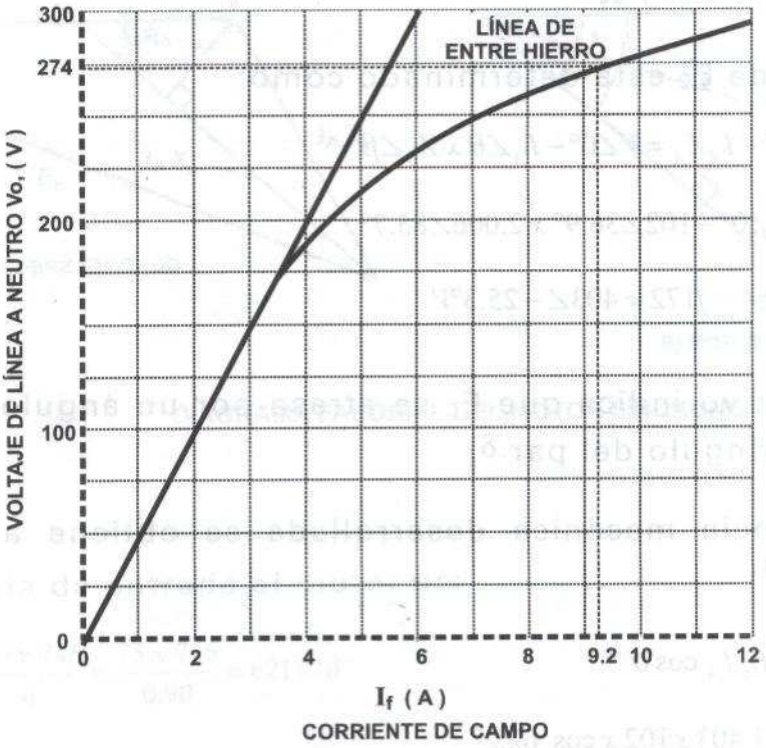
Se tiene un motor síncrono trifásico conectado en estrella de 15 HP, 400 V que tiene una eficiencia a plena carga del 90%, su reactancia síncrona X_S= 3Ω/Fase, R_A=0.15 Ω/Fase. El motor opera a plena carga a un factor de potencia de 0.8 adelantado. Determinar:

(a)El ángulo de potencia.

(b) La corriente de campo.

(c) La mínima corriente de armadura y la correspondiente corriente de campo, despreciando el valor de R_A.

La característica de saturación para este motor se da en la siguiente figura.



Solución

a) El voltaje de fase a neutro:

$$V_t = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231V$$

La potencia de entrada al motor:

$$Pe = \frac{HP\ x\ 746}{\eta} = \frac{15\ x\ 746}{0.90} = 12433W$$

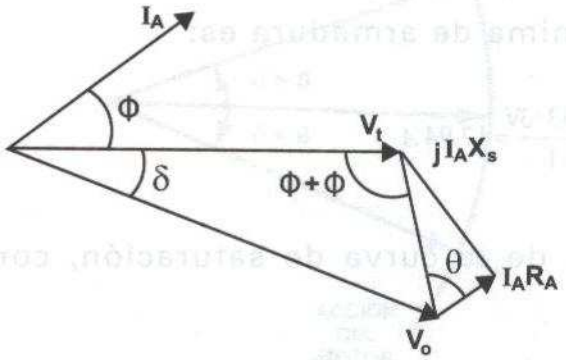
La corriente de armadura:

$$I_A = \frac{Pe/3}{V_t \cos\theta} = \frac{12433/3}{231\,x\,0.8} = 22.4\,A$$

La caída de voltaje por impedancia:

$$I_A Z_S = (22.4)\left(\sqrt{3^2 + 0.15^2}\right) = 67.2V$$

El diagrama fasorial correspondiente es el siguiente:



$$\phi = \cos^{-1} 0.8 = 36.9°; \quad \theta = tan^{-1}\frac{3}{0.15} = 87.13°$$

Aplicando la ley de los cosenos en la figura anterior:

$$V_o^2 = V_t^2 + (I_A Z_S)^2 - 2V_t(I_A Z_S)\cos(\theta + \phi)$$

$$= (231)^2 + (67.2)^2 - 2(231)(67.2)\cos\ 124°$$

$$V_o^2 = 75237$$

$$V_o = 274V$$

Sobre el mismo diagrama se aplica ahora la *ley de los senos*.

$$\text{sen } \delta = \frac{I_A Z_S}{V_o} \text{sen } (\theta + \phi) = \frac{67.2}{274} \text{sen } 124°$$

$$sen\ \delta = 0.203$$

$$\delta = \text{sen}^{-1}(0.203) = -11.7°$$

b) De la característica de saturación dada en la figura anterior, para V_o = 274 V.

$$If = 9.2A$$

c) La corriente mínima de armadura es:

$$I_A = \frac{P/3}{V_t} = \frac{12433/3}{231} = 17.94A$$

Con cos ϕ = 1, de la curva de saturación, con θ = 90° y ϕ=0° se tiene:

$$V_o^2 = V_t^2 + (I_A X_S)^2 = (231)^2 + (53.8)^2$$

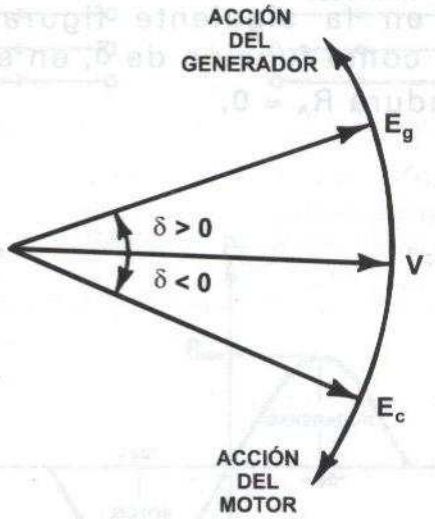
V_o = 237.2 V, a este valor corresponde de la curva: If = 6.2 A

8.7 EL FLUJO DE POTENCIA

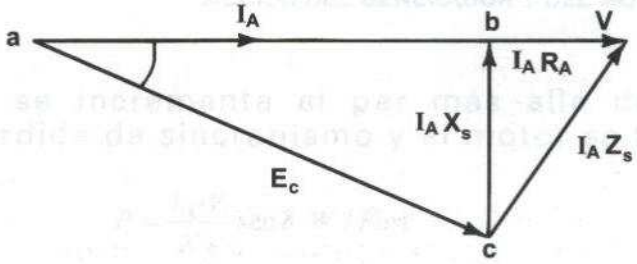
Como se ha observado de los diagramas fasoriales para un motor síncrono, el voltaje terminal V de la máquina está adelantado a la fuerza electromotriz E_C y es independiente del factor de potencia al cual el motor opera, en el caso del generador el voltaje terminal está atrasado con respecto a la FEM, **tanto para el motor como para el generador el factor de potencia se puede controlar ajustando la corriente de excitación del campo.**

En un generador, cuando se aumenta el par del primomotor tiende a aumentar la velocidad y la FEM generada tiende a seguir el avance del rotor, esto se puede observar en la siguiente figura, el ángulo δ, conocido como ángulo de potencia o ángulo de par, es una medida de la

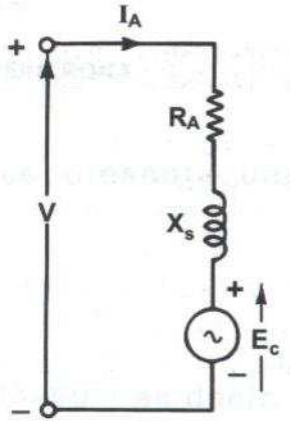
potencia real entregada por la máquina. Es positivo cuando E_G se adelanta a V, es decir cuando el flujo de potencia sale de la máquina, si se aplica un par negativo, reduciendo el par en el primomotor con relación al valor requerido por la carga, entonces la red "jala" a la máquina, diciendo esto en otras palabras, **la máquina actúa como motor** y jala algo de la carga. En el caso que E_C esté atrasado con respecto a V y el flujo resultante en el entrehierro entonces tiende a atrasar la posición del rotor, esto implica que el flujo fluye hacia la máquina, esta acción se predice cuando el **ángulo δ es negativo.**



FLUJO DE POTENCIA EN UNA MÁQUINA SÍNCRONA
(δ > 0 ACCIÓN DEL GENERADOR, δ < 0 ACCIÓN DEL MOTOR)



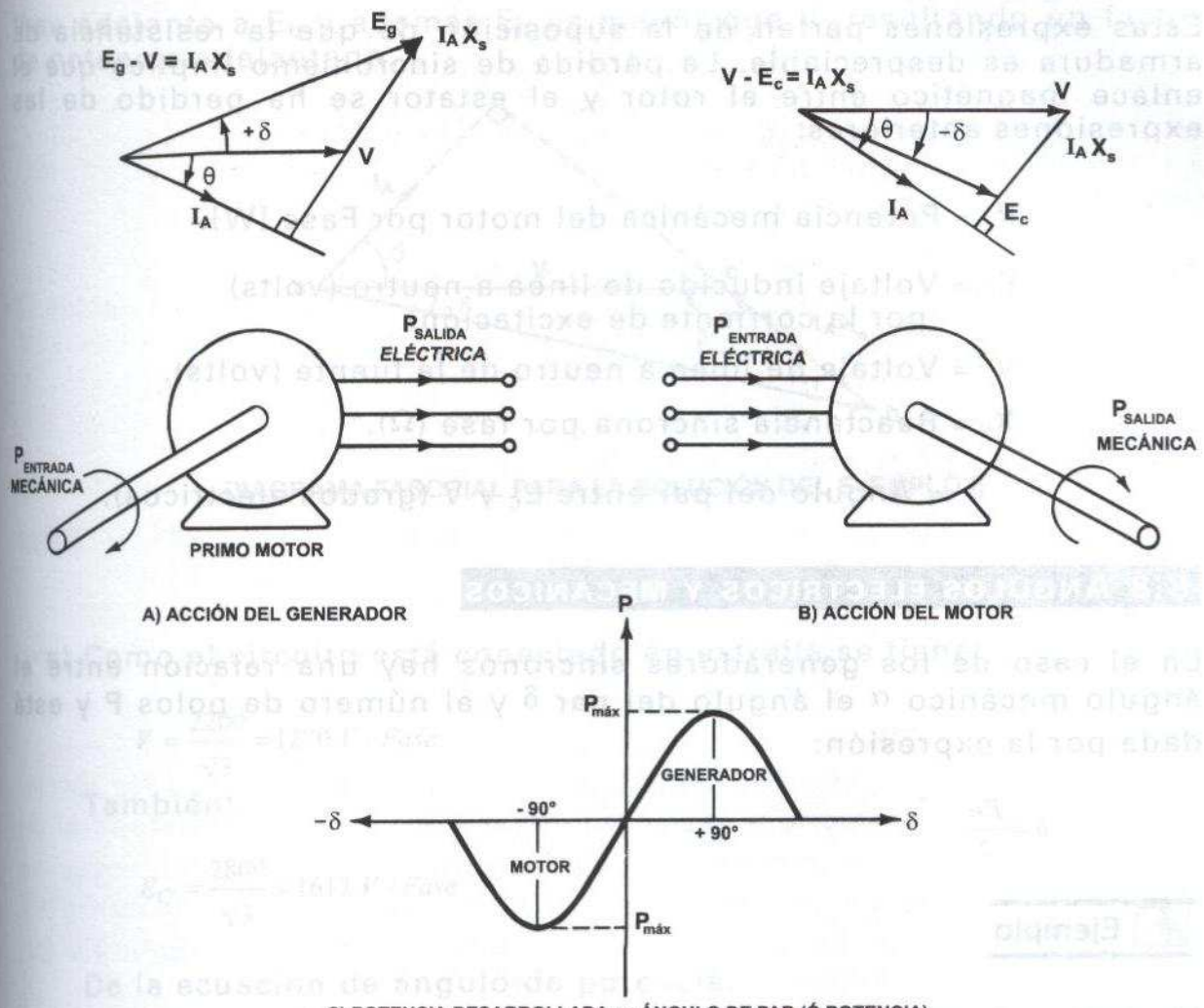
A) DIAGRAMA FASORIAL DE UN MOTOR SÍNCRONO (POR FASE) OPERANDO EN FACTOR DE POTENCIA UNITARIO



B) DIAGRAMA DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

En la medida que se cambia la corriente de campo en cualquier condición de operación, no tiene lugar ningún cambio en la potencia real o el par entregado por el primomotor, podrá haber un cambio indirecto en la máquina, aumentando a un pequeño ajuste del ángulo de potencia, en la siguiente figura se hace un resumen de las diferencias entre la acción de generador o de motor.

Se puede considerar ahora una situación en donde el par sobre el motor se incrementa, bajo esta suposición la potencia desarrollada podrá alcanzar un valor máximo cuando $\delta = -90°$ para un motor y $\delta = +90°$ para un generador, en la siguiente figura en (C) se muestra la potencia desarrollada como función de δ, en esta curva se supone que la resistencia de armadura $R_A = 0$.



ACCIÓN DEL GENERADOR Y DEL MOTOR DE UNA MÁQUINA SINCRONA

Si se incrementa el par más allá de este punto, se presenta una pérdida de sincronismo y el motor se frena.

$$P = \frac{E_C V}{X_S} \operatorname{sen}\delta \ W / Fase$$

La máxima potencia (P_{MAX}) ocurre cuando sen δ = 1.0 (δ=90°) es decir:

$$P_{MAX} = \frac{E_C V}{X_S} \ W / Fase$$

Estas expresiones parten de la suposición de que la resistencia de armadura es despreciable. La pérdida de sincronismo implica que el enlace magnético entre el rotor y el estator se ha perdido de las expresiones anteriores:

P = Potencia mecánica del motor por Fase [W].

E_C = Voltaje inducido de línea a neutro (volts) por la corriente de excitación.

V = Voltaje de línea a neutro de la fuente (volts).

X_S = Reactancia síncrona por fase (Ω).

δ = Ángulo del par entre E_C y V (grados eléctricos).

8.8 ÁNGULOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS

En el caso de los generadores síncronos hay una relación entre el ángulo mecánico α el ángulo del par δ y el número de polos P y está dada por la expresión:

$$\delta = \frac{P\alpha}{2}$$

Ejemplo

Un motor síncrono trifásico conectado en estrella, tiene una reactancia síncrona X_S = 2.6 Ω/Fase, se supone que la resistencia de armadura R_A=0, la potencia de entrada al motor es 820 KW, en tanto que la excitación del campo es tal que la fuerza contra electromotriz es 2800V, calcular:

a) El ángulo del par.

b) La corriente de línea y el factor de potencia.

Solución

Para observar que sucede en forma **cualitativa** se puede construir un diagrama fasorial para lo cual se puede ver que para el motor síncrono

V se adelanta a E_C y además E_C es mayor que V, resultando un factor de potencia adelantado.

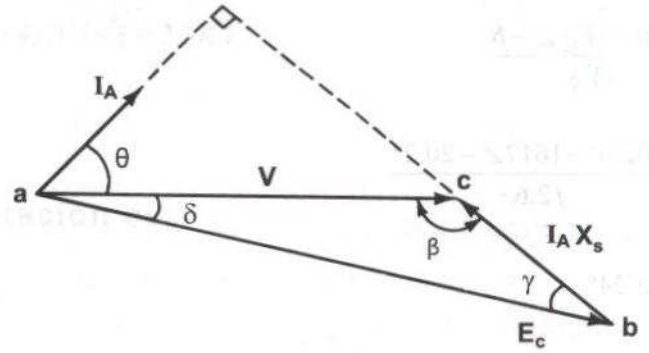


DIAGRAMA FASORIAL PARA LA SOLUCIÓN DEL EJEMPLO

a) Como el circuito está conectado en estrella se tiene:

$$V = \frac{2200}{\sqrt{3}} = 1270\ V\ /\ Fase$$

También:

$$E_C = \frac{2800}{\sqrt{3}} = 1617\ V\ /\ Fase$$

De la ecuación de ángulo de potencia.

$$P = \frac{E_C V}{X_S} \operatorname{sen}\delta\ W\ /\ Fase$$

P es potencia por fase, por lo que:

$$\frac{820000}{3} = \frac{1617\ x\ 1270}{2.6}\ x\ \operatorname{sen}\delta$$

O bien:

$$\operatorname{sen}\ \delta = 0.346$$

$$\delta = \operatorname{sen}^{-1}\ 0.346 = 20.2°\ \textit{eléctricos}$$

b) Para el cálculo del factor de potencia es necesario el ángulo θ, que se puede obtener a partir de la ecuación:

$$I_A\angle\theta = \frac{V\angle\theta^\circ - E_C\angle-\delta}{jX_S}$$

$$I_A\angle\theta = \frac{1270\angle 0^\circ - 1617\angle -20.2^\circ}{j2.6}$$

$$I_A\angle\theta = 235\angle 24^\circ$$

De aquí:

θ = 24° y se obtiene que Fp = cos θ = cos 24° = 0.914 (adelantado)

Ejemplo

Se tiene un motor síncrono trifásico de 600 KW, 4 kV, 180 RPM, 60 Hz que tiene una reactancia síncrona X_S= 1.4 Ω y la resistencia de armadura R_A= 0. Operando a plena carga los polos del rotor se desplazan en ángulo mecánico de 1° con relación a su posición de operación en vacío. Si la excitación de línea a neutro es: E_C = 2.2 kV, calcular la potencia mecánica desarrollada.

Solución

Para 180 RPM y 60 Hz, el número de polos se calcula de:

$$f = \frac{PN}{120}; \quad P = \frac{120f}{N} = \frac{120\ x\ 60}{180} = 40$$

El par de ángulo del par es:

$$\delta = \frac{P\alpha}{2} = \frac{(40\ x\ 1^\circ)}{2} = 20^\circ$$

Como el motor está conectado en estrella, el voltaje V aplicado al motor es:

$$V = VL/\sqrt{3} = 4KV/\sqrt{3} = 2.3KV$$

$$V = 2300V$$

El voltaje de excitación es:

$$E_C = 2200V$$

La potencia mecánica desarrollada por fase es:

$$P = \frac{E_C V}{X_S} \text{sen } \delta$$

$$= \frac{2300 \, x \, 2200}{1.4} \text{sen } 20°$$

$$P = 1236 \, KW$$

La potencia trifásica total:

$$P = 3 \, x \, 1236 = 3708 \, KW$$

Como:

1Hp = 0.746 Kw

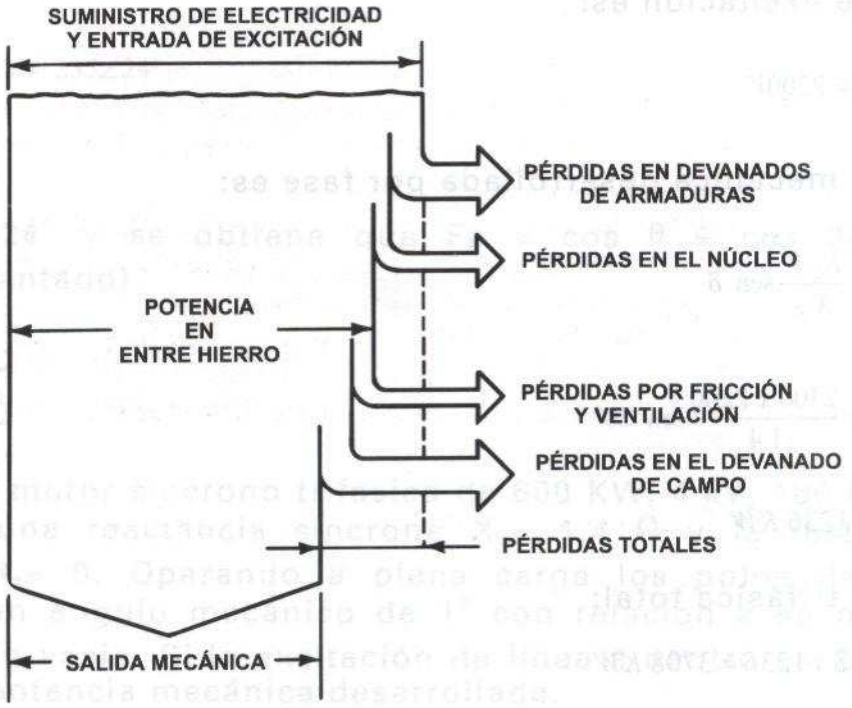
P= 4970.5 Hp

8.9 EFICIENCIA

Para dejar completa la idea del flujo de potencia en un motor síncrono, se deben considerar las pérdidas que ocurren en un motor síncrono, como es de esperar esto es similar al caso del generador síncrono, en la siguiente figura se muestran las pérdidas que se tienen en un motor síncrono. Las pérdidas del motor restadas de la potencia de entrada dan la eficiencia, cuyo valor es generalmente del orden del 80% al 90%, las pérdidas se manifiestan como calor que se debe retirar del motor, como

se puede observar, los números de la eficiencia pueden variar en forma amplia, dependiendo de qué se considere, por ejemplo en ocasiones no se consideran las pérdidas, las pérdidas de excitación.

Para calcular la eficiencia se procede como en el caso de los generadores síncronos o bien de los motores de inducción.



FLUJO DE POTENCIA PARA UN MOTOR SÍNCRONO

La eficiencia se calcula entonces como:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida+pérdidas}} x\,100$$

Donde: P_{salida} = potencia de salida en el eje este valor es igual al par en el eje multiplicado por la velocidad radial a la cual es desarrollado.

$$P_{salida} = W\,T_{eje}\,(Watts)$$

La potencia de entrada es simplemente:

$$Pe = \sqrt{3}\, V_{LL}\, I_L \cos\theta$$

La ecuación para la eficiencia se puede escribir también como:

$$\eta = \frac{W\,T_{eje}}{WT_{eje} + 3R_A I_A^2 + I_F V_F + P_{Nucleo} + Pf + V} x\,100$$

Donde:

V_F = Voltaje en el devanado de campo (V).
I_F = Corriente que circula a través del devanado de campo (A).
R_A = Resistencia del devanado de armadura.
I_A = Corriente a través del devanado de armadura (A).
P_{NUCLEO} = Pérdidas en el núcleo (watts).
P_{f+v} = Pérdidas por fricción y ventilación (watts).

Si se excluyen las pérdidas en el circuito de excitación, la potencia de salida se puede escribir como:

$$P_{salida} = Pd - P_{f+V+Núcleo} - P_{ro} + (watts)$$

Ejemplo

Se tiene una máquina síncrona trifásica de 10 MVA, 6.6 kV conectada en estrella con una R_A = 0.13 Ω/Fase de la que se proporcionan los siguientes datos para las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto.

Corriente de campo (A)	25	50	75	100	125	150	175	200	225
FEM de línea (V)	2.4	4.8	6.1	7.1	7.6	7.9	8.3	8.5	8.7
Corriente de corto circuito (A)	288	582	875						

El motor alimenta una carga mecánica tal que la entrada con respecto al bus produce un retardo en el ángulo de 20°, el voltaje inducido o FEM por fase es 3417V. Las condiciones de operación son las mostradas en la figura. Calcular la potencia de entrada al motor.

Solución

En términos de motorización para una corriente positiva:

$E_R = V - E\ volts$, por lo tanto

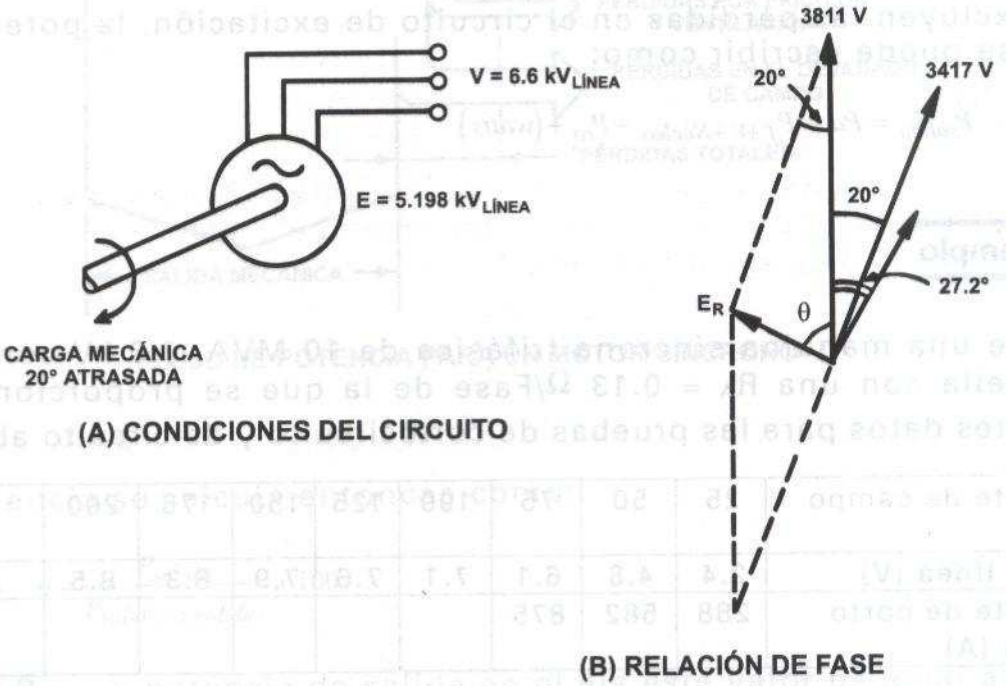
Dando:

$$E_R = 1314V$$

La corriente circulante es:

$$I = \frac{E_R}{Z_S} = \frac{1314}{4.02} = 326.9A$$

Esta corriente se retrasa 90°



Aplicando la *ley de los senos*:

$$\frac{E_R}{\text{sen } 20°} = \frac{3417}{\text{sen } \theta}$$

$$\text{sen } \theta = \frac{3417 \text{ sen } 20°}{E_R} = \frac{3417 \text{ sen } 20°}{1314} = 0.8894$$

$$\theta = sen^{-1} 0.8894 = 62.8°$$

El ángulo de la corriente con respecto al voltaje de fase es:

$$90° - 62.8° = 27.2°$$

Por lo tanto, la potencia suministrada por la máquina síncrona es:

$$P = \frac{\sqrt{3}\, x\, 6.6\, x\, 10^3\, x\, 326.9\, x \cos 27.2°}{10^6}$$

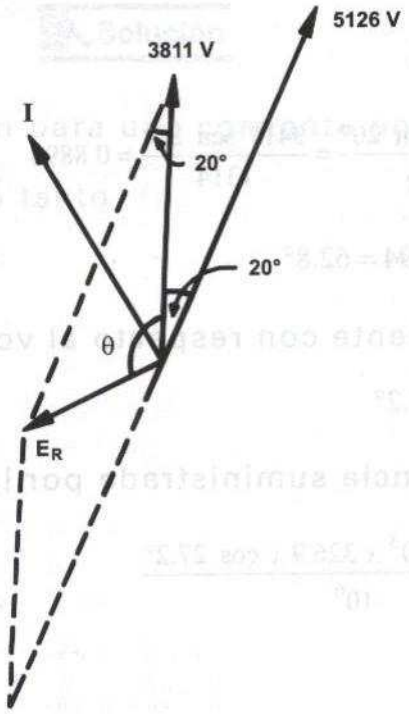
$$P = 3.32\, MW$$

Ejemplo

Para analizar el efecto del incremento en la excitación en el motor, supóngase que para el motor del ejemplo anterior se da un incremento del 50% en la excitación.

Solución

La FEM se incrementa: 3417 x 1.5 = 5125.5V por fase y de la nueva configuración.



CONFIGURACIÓN FASORIAL

De la nueva configuración fasorial.

$$E_R^2 = (5125.5)^2 + (3811)^2 - 2\ x\ 5125.5\ x\ 3811\ \cos\ 20°$$

$$E_R = 2021V$$

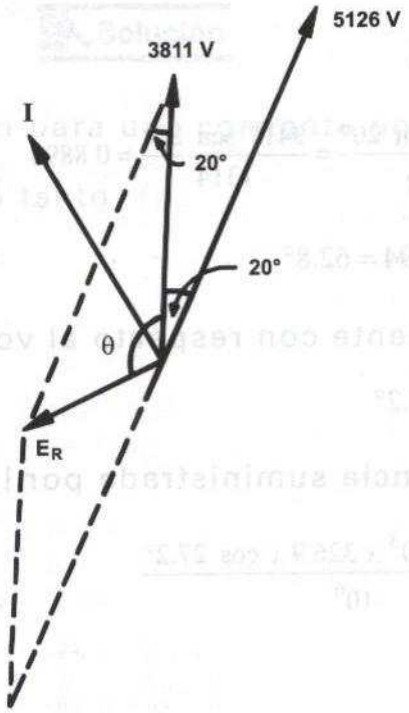
Por lo tanto:

$$I = \frac{2021}{4.02} = 502.7A$$

Es decir que este valor es mayor del 50% de incremento.

Aplicando la ley de los senos se obtiene θ = 119.8°, el valor de la corriente se adelanta ahora por un valor de: 119.8° - 90°=29.8°, el cambio de potencia en la máquina se calcula como:

$$P = \frac{\sqrt{3}\ x\ 6.6\ x\ 10^3\ x\ 502.7\ \cos\ 29.8°}{10^3} = 4.99\ MW$$



CONFIGURACIÓN FASORIAL

De la nueva configuración fasorial.

$$E_R^2 = (5125.5)^2 + (3811)^2 - 2\ x\ 5125.5\ x\ 3811\ \cos\ 20°$$

$$E_R = 2021V$$

Por lo tanto:

$$I = \frac{2021}{4.02} = 502.7A$$

Es decir que este valor es mayor del 50% de incremento.

Aplicando la ley de los senos se obtiene θ = 119.8°, el valor de la corriente se adelanta ahora por un valor de: 119.8° - 90°=29.8°, el cambio de potencia en la máquina se calcula como:

$$P = \frac{\sqrt{3}\ x\ 6.6\ x\ 10^3\ x\ 502.7\ \cos\ 29.8°}{10^3} = 4.99\ MW$$

También:

$$Z_S = 0.5 + j4.0 = 4.031\angle 82.9°\Omega$$

De aquí se tiene:

$$I_A = \frac{I_A Z_S}{Z_S} = \frac{143\angle 130.9°}{4.031\angle 82.9°} = 35.5\angle 43° A$$

a) La corriente de línea, usando los resultados anteriores:

$$I_L = \sqrt{3}\, I_A = \sqrt{3}\ x\ 35.5 = 61.5A$$

(considerando que la armadura está conectada en delta).

b) El ángulo de la corriente de armadura es:

$$\theta = 48°$$

Por lo tanto, el factor de potencia.

$$\cos\ \theta = \cos\ 48° = 0.669\ Adelantado$$

c) La potencia de entrada se puede calcular como:

$$Pe = \sqrt{3}\ V_{LL}\ \cos\ \theta = 3\ VI_A\ \cos\ \theta$$

$$= 3\ x\ 415\ x\ 35.5\ x\ 0.669$$

$$= 29573W$$

Las pérdidas en el cobre de la armadura:

$$P_{CU} = 3R_A I_A^2 = 3\ x\ 0.5\ x\ (35.5)^2$$

$$P_{CU} = 1890W$$

La potencia desarrollada en el entrehierro es entonces:

$$Pd = Pe - P_{CU} = 3E_C I_A \cos(\theta + \delta)$$

$$= 29{,}573 - 1890$$

$$= 27683\ W$$

La potencia de salida es:

$$P_S = Pd - \Pr ot = 27683 - 2000 = 25683W$$

d) La eficiencia es:

$$\eta = \frac{P_S}{Pe} x\ 100 = \frac{25683}{29573} x\ 100 = 86.8\%$$

e) Los HP desarrollados en el eje son:

$$HP = \frac{P_S}{746} = \frac{25683}{746} = 34.4$$

El par a la carga es:

$$T_{eje} = \frac{25683}{2\pi x\ 900/60} = 273\ N - m$$

Ejemplo

PARA EL MOTOR TRIFÁSICO de 10 MVA, 6.6 KV en conexión estrella con R_A = 0.13 Ω/Fase, suponiendo una potencia mecánica de salida de 6.0 MW, debido a que el factor de potencia está controlado por la excitación y se puede cambiar fácilmente, supóngase una excitación inicial de 1.2 veces la nominal, calcular la relación entrada/salida.

Solución

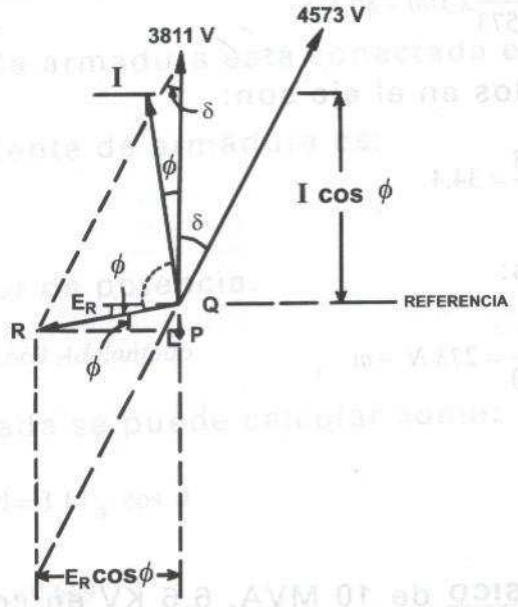
Para un valor fijo de línea de 6.6 kV y una potencia de salida fija de 6 MW, el valor Icosϕ cosϕ permanece constante; si se desprecian las pérdidas mecánicas.

$$I\cos\phi = \frac{6\ x\ 10^6}{\sqrt{3}\ x\ 6.6\ x\ 10^3} = 525A$$

También:

$$E = \frac{1.2\ x\ 6.6}{\sqrt{3}} = 4573V$$

Con estos números se elabora el siguiente diagrama:



Los Ángulos δ, ϕ y θ son desconocidos y dependen de la relación entre E_R y Z_S, la figura anterior se puede construir por mediciones de las cantidades, conociendo Icosϕ y $E_R$cosϕ ó bien resolviendo en forma geométrica, se supone también que Z_S es mucho mayor que R_A, es decir:

$$E_R = I_A Z_S$$

$$E_R \cos\phi = I_A Z_S \cos\phi = P_R$$

$$= Z_S\left(I\cos\phi\right) = 4.02\ x\ 525 = 2110.5V$$

También:

$$\delta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{2110.5}{4573}\right) = 27.5°$$

De la misma manera:

$$P\phi = 4573 \ \cos 27.5° - 3811$$

$$P\phi = 245.3V$$

El ángulo ϕ

$$\phi = tan^{-1}\left(\frac{245.3}{2110.5}\right) = 6.63°$$

Por lo que:

$$\cos \ \theta = \cos \ 6.63 = 0.993$$

Por lo tanto la potencia:

$$P = \frac{\sqrt{3}\, x\, 6.6\, x\, 10^3\, x\, 525}{10^6}$$

$$P = 6MW$$

Si la potencia de salida debe ser 6 MW, con una eficiencia de η = 0.96, la potencia de entrada debe ser:

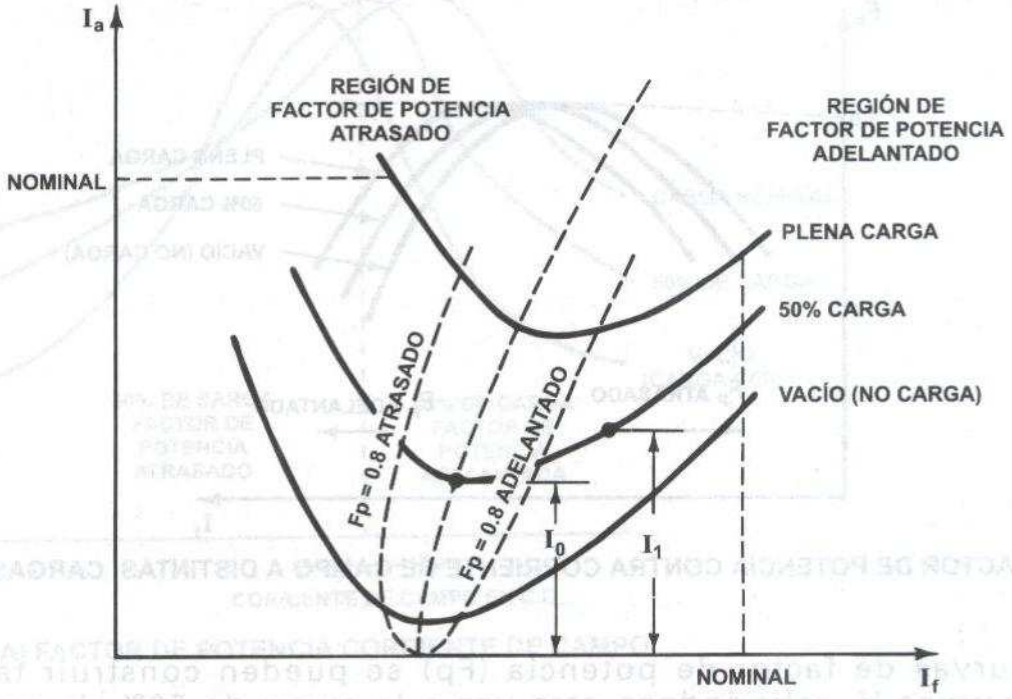
$$Pe = \frac{P_S}{\eta} = \frac{6.0}{0.96} = 625MW$$

8.10 Las curvas V de los motores síncronos

Como se ha demostrado, el factor de potencia de un motor síncrono se puede controlar modificando la corriente de campo, de los ejemplos anteriores se ha estudiado que no solo cambia el factor de potencia, también se ve afectada. Bajo la suposición de una carga constante, la potencia de entrada al motor no cambia en forma apreciable y se puede suponer que permanece el mismo valor, por supuesto, cuando la

corriente aumenta, las pérdidas en el cobre aumentan de alguna manera, así como las pérdidas en el núcleo debido a un ligero cambio en el flujo; sin embargo este incremento en las pérdidas no cambia la potencia de entrada demasiado. Para mostrar como la corriente de campo controla el factor de potencia, se considera una gran reducción en la excitación del campo, la cual a su vez reducirá la $FEM_{inducida}$ E_C y causa un atraso en la corriente de línea.

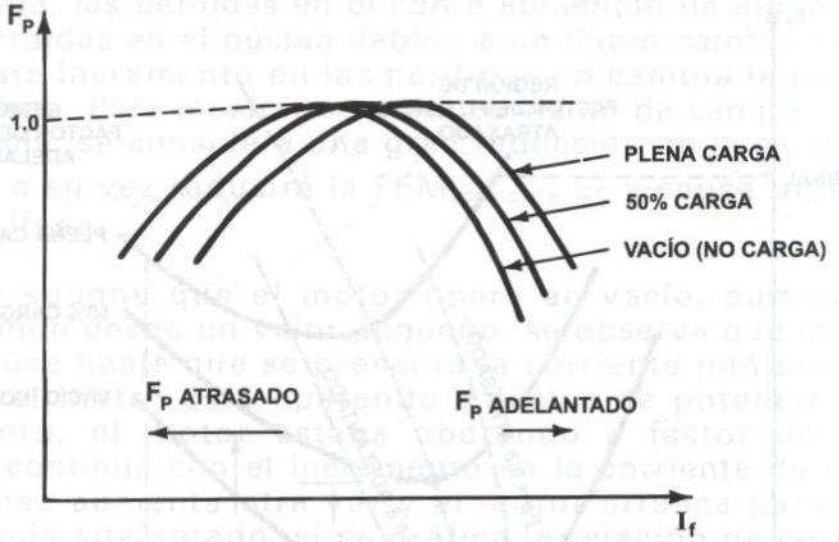
También, si se supone que el motor opera en vacío, aumentando la corriente de campo desde un valor pequeño, se observa que la corriente de línea se reduce hasta que se presenta la corriente mínima de línea, indicando que el motor está operando a factor de potencia unitario, hasta este punto, el motor estaba operando a factor de potencia atrasado, si se continua con el incremento en la corriente de campo, la corriente de línea aumenta otra vez y el motor arranca para operar a factor de potencia adelantado, si se gráfica la relación de corriente de armadura contra corriente de campo, se obtiene una figura como la siguiente y repitiendo este proceso a varios valores de carga incrementados para el motor, resulta una familia de curvas como se muestra. Debido a la forma resultante, estas curvas se conocen comúnmente como "curvas V".



CURVAS SÍNCRONAS DE MOTOR

El punto en el cual el factor de potencia es la unidad, representa al punto en donde la corriente de armadura es mínima, esto está indicado por I_o, por ejemplo, para la curva tomada cuando el motor síncrono entrega el 50% de su carga nominal. Conectando los puntos más bajos de todas las curvas V, resulta la curva de líneas discontinuas, indicada como "Factor de potencia unitario" en la figura, a esta curva se le conoce también como "curva compuesta", se pueden dibujar otras para distintos valores de factor de potencia, como está indicado.

Tomando los datos necesarios durante esta prueba, se puede dibujar también el factor de potencia para cada punto y dibujando el factor de potencia contra la corriente de campo resulta una familia de curvas como las mostradas en la siguiente figura, las cuales son curvas V invertidas, el punto más alto sobre cada una de estas curvas indica factor de potencia unitario, estas muestran que si la excitación se ajusta a un cierto valor de carga para factor de potencia unitario, aumentando la carga, se obtiene un factor de potencia atrasado.



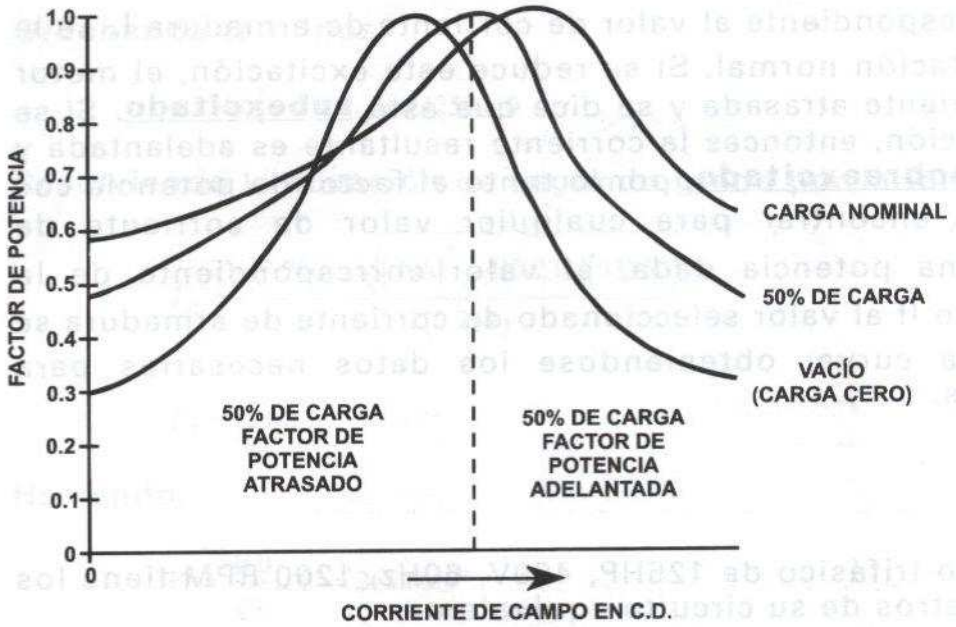
FACTOR DE POTENCIA CONTRA CORRIENTE DE CAMPO A DISTINTAS CARGAS

Estas curvas de factor de potencia (Fp) se pueden construir también de las curvas V, refiriéndose otra vez a la curva de 50% de corriente nominal o carga, si se hace I_1, el valor de la corriente de armadura a algún factor de potencia θ, la potencia por fase es:

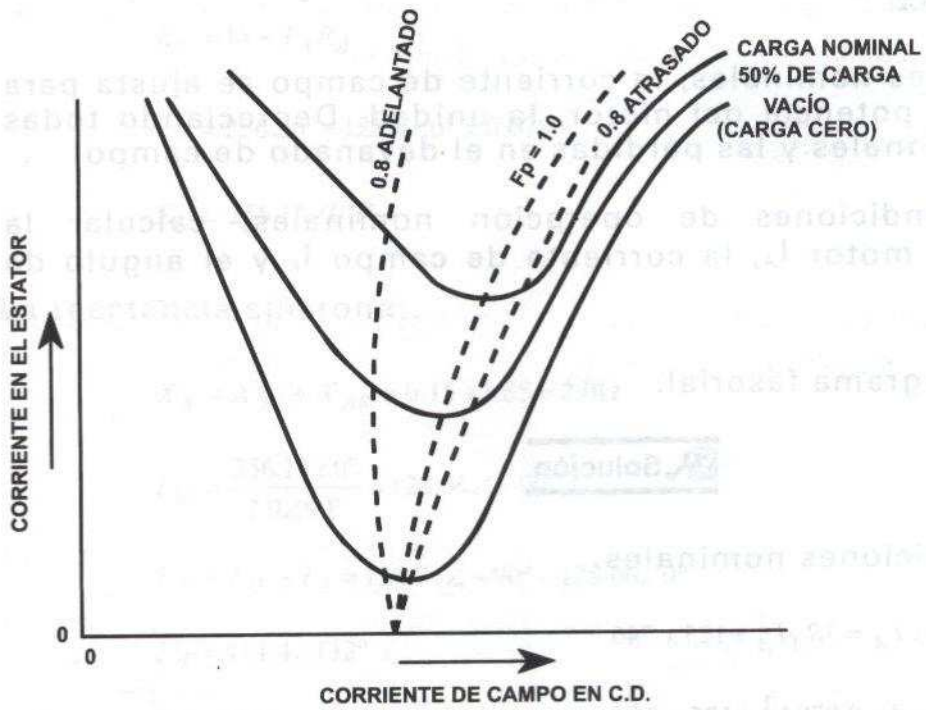
$$P = VI_1, \cos\theta = \frac{1}{2} - \text{carga}$$

$$I_1 \cos\theta = I_o$$

Para todos los valores de θ, dado que la potencia entregada por la máquina para esta curva es constante.



A) FACTOR DE POTENCIA CORRIENTE DE CAMPO



B) CORRIENTE EN EL ESTATOR CONTRA CORRIENTE DE CAMPO

La excitación correspondiente al valor de corriente de armadura I_o se le denomina la excitación normal. Si se reduce esta excitación, el motor demanda una corriente atrasada y se dice que está **subexcitado**. Si se aumenta la excitación, entonces la corriente resultante es adelantada y se dice que está **sobreexcitado**, por lo tanto el factor de potencia cos $\theta = I_o/I_1$ se puede encontrar para cualquier valor de corriente de armadura I_1 y una potencia dada, el valor correspondiente de la corriente de campo If al valor seleccionado de corriente de armadura se puede leer de la curva, obteniéndose los datos necesarios para graficar las curvas.

Ejemplo

Un motor síncrono trifásico de 125HP, 460V, 60Hz, 1200 RPM tiene los siguientes parámetros de su circuito equivalente:

$$R_A = 0.078\Omega, \quad X_{A\ell} = 0.15\Omega, \quad X_{Ar} = 1.85\Omega$$

$$Nre / Nse = 28.2$$

Para las condiciones nominales, la corriente de campo se ajusta para hacer el factor de potencia del motor, la unidad. Depreciando todas las pérdidas rotacionales y las pérdidas en el devanado de campo.

a) Para las condiciones de operación nominales, calcular la corriente del motor I_A, la corriente de campo I_F y el ángulo de potencia δ.

b) Dibujar el diagrama fasorial.

Solución

a) Para las condiciones nominales.

$$Pe = \sqrt{3}\, x\, 460\, x\, I_A = 3R_A I_A^2 + 125\, x\, 746$$

$$\sqrt{3}\, x\, 460\, x\, I_A = 3\, x\, 0.078 I_A^2 + 125\, x\, 746$$

$$796 I_A = 0.234 I_A^2 + 93250$$

Ordenando términos:

$$0.234I_A^2 - 796I_A + 93250 = 0$$

Resolviendo la ecuación de segundo grado por la fórmula general.

$$I_A = \frac{-(-796) \pm \sqrt{(796)^2 - 4(0.234)(93250)}}{2(0.234)}$$

$$I_A = 121.8A$$

Haciendo:

$$Vt = \frac{460}{\sqrt{3}}\angle 0° = 265.6\angle 0°$$

$$I_A = 121.8\angle 0°$$

$$E_C = Vt - I_A R_A$$

$$= 256\angle 0° - 121.8\angle 0° \; x \; 0.078$$

$$E_C = 256.13\angle 0° V$$

La reactancia síncrona:

$$X_S = X_{A\ell} + X_{AR} = 0.15 + 1.85 = 2.0\Omega$$

$$I_M = \frac{256.13\angle 0°}{2.0\angle 90°} = 128.06\angle -90° A$$

$$I'_F = I_M - I_A = 134.74\angle -90° - 128.06\angle 0°$$

$$I'_F = 181.4\angle 132°$$

$$\beta = -132°$$

También:

$$\eta = \frac{\sqrt{2}}{3} x\ 28.2 = 13.29$$

Donde:

Nre= Número de espira efectivas del devanado de campo.

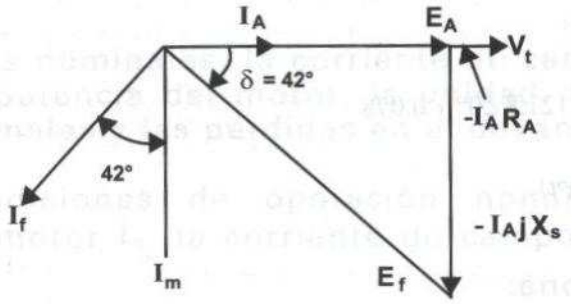
Nse= Número efectivo de espiras por fase del estator.

También:

$$I'_F = \frac{X_{AR}}{X_S} \eta If$$

$$I'_F = \frac{181.4}{13.29} x \frac{1.9}{1.85} = 14.02A$$

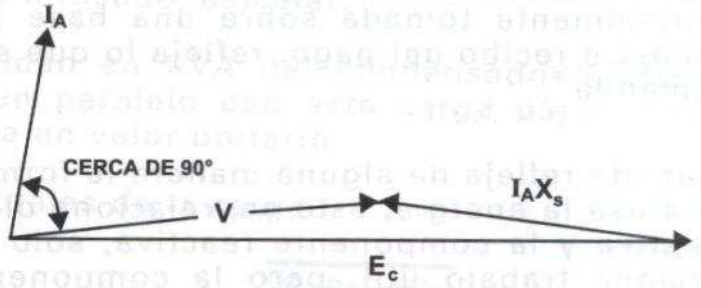
$$\delta = -132° + 90° = -42°$$



8.11 EL CONDENSADOR SÍNCRONO

Cuando un motor síncrono se opera sin carga, demanda cierta potencia de la línea de alimentación, para alimentar las pérdidas internas, como son las de fricción y ventilación y las pérdidas en el núcleo, como se ha estudiado antes, estas pérdidas son mínimas y por lo tanto la componente por fase de la corriente de armadura es también pequeña, aun cuando este valor puede ser grande, dependiendo de la corriente de excitación en C.D.

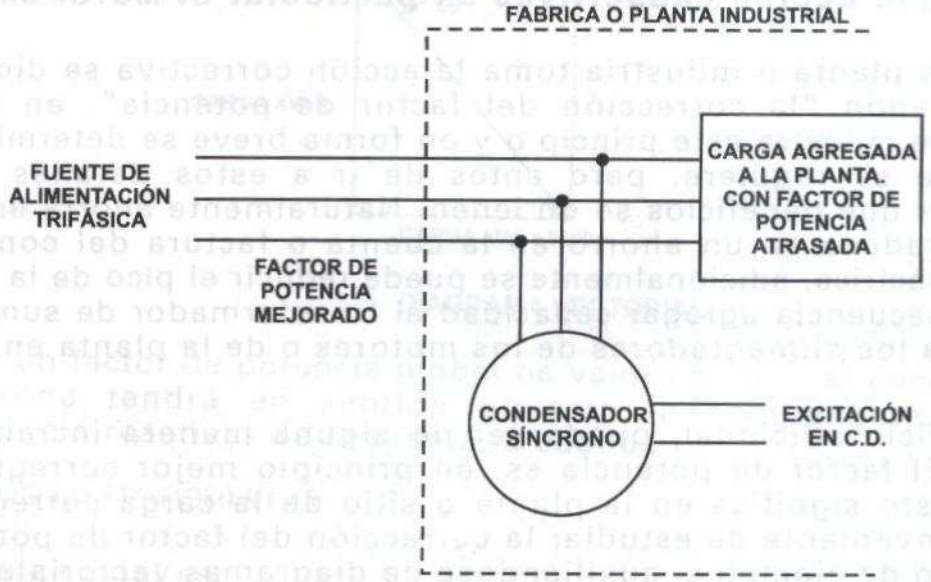
Cuando el motor se opera sobreexcitado toma una corriente con factor de potencia adelantado muy baja y se comporta como un capacitor, como se muestra en la siguiente figura donde la corriente de armadura se adelanta casi 90° al voltaje de suministro E_C.



MOTOR SÍNCRONO VACÍO SOBRE EXCITADO

En las grandes plantas que operan con factor de potencia pobre, se puede tomar ventaja de este hecho. La máquina síncrona se coloca en paralelo con las líneas de alimentación entrantes.

De manera que el factor de potencia global de la línea entrante a la planta se puede mejorar, tal conexión se hace como se muestra en la figura siguiente y entonces se conoce al motor como **condensador síncrono** y puede operar en vacío con una fuerte corriente de excitación de C.D en el campo.



8.12 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN PLANTAS INDUSTRIALES

Cuando una planta industrial compra energía de una empresa eléctrica, la cantidad total de energía eléctrica se mide también como la máxima tasa a la cual es consumida la energía eléctrica, esta medición (o lectura) está normalmente tomada sobre una base mensual y una porción de la cuenta o recibo del pago, refleja lo que se conoce como "el cargo por demanda".

El cargo por demanda refleja de alguna manera la forma en cómo una planta o industria usa la energía, esto es, relaciona directamente a la componente resistiva y la componente reactiva, solo la componente resistiva proporciona trabajo útil, pero la componente reactiva es necesaria en la mayoría de las máquinas dado que se podría decir que es la que hace que las **cosas sucedan**, la relación entre la componente activa y la componente reactiva, se conoce como el factor de potencia.

Como se ha estudiado en el estudio de otros tipos de máquinas, la potencia reactiva requerida es una función del tipo de motor y transformador instalados, por ejemplo, cargas ligeras en los motores de inducción (lo mismo para los transformadores) tienen factores de potencia **pobres**, esto implica que la componente reactiva es relativamente grande. No hay mucho que se pueda hacer con relación a esto, pero se pueden tomar algunas acciones correctivas, que es donde interviene **la acción capacitivas en particular el MOTOR SÍNCRONO.**

Cuando la planta o industria toma la acción correctiva se dice que se está haciendo "la corrección del factor de potencia", en la figura anterior se muestra este principio y en forma breve se determinará que es lo que se requiere, pero antes de ir a estos detalles se debe considerar que beneficios se obtienen. Naturalmente ahorra energía, lo cual se traduce en un ahorro en la cuenta o factura del consumo de energía eléctrica, adicionalmente se puede reducir el pico de la demanda y en consecuencia agregar capacidad al transformador de suministro o también a los alimentadores de los motores o de la planta en general.

Un beneficio adicional, puede ser de alguna manera incrementar el voltaje. El factor de potencia es, en principio mejor corregido en la fuente, esto significa en la planta o sitio de la carga corregida, una forma conveniente de estudiar la corrección del factor de potencia, es por medio de ejemplos, auxiliándose de diagramas vectoriales.

Ejemplo

Una planta industrial representa una carga de 1600 KVA a un factor de potencia de 0.6 atrasado, calcular:

a) La capacidad en KVA del condensador síncrono que se debe instalar en paralelo con esta carga para corregir el factor de potencia a un valor unitario.

b) Los KW totales de la carga.

Solución

El diagrama vectorial correspondiente a esta condición se muestra en la siguiente figura.

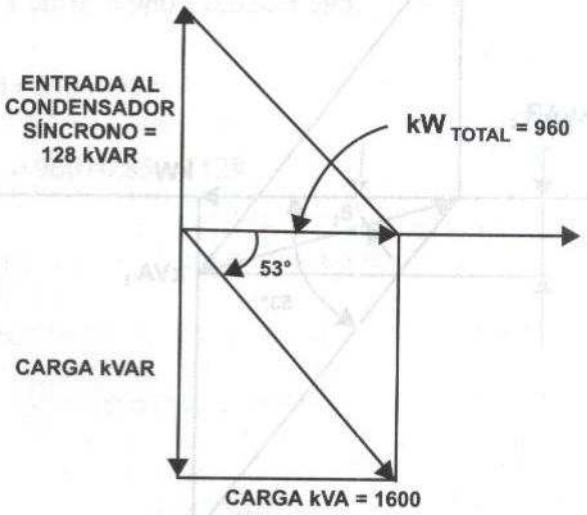


DIAGRAMA VECTORIAL

a) Para un factor de potencia global de valor unitario, el condensador síncrono tendrá en sentido opuesto la componente vertical (potencia reactiva) de la planta la cual es:

$$1600\, sen\, 53° = 1280\, KVAR$$

b) La carga total es:

$$1600\, x \cos 53° = 960\, KW$$

Se observa que la capacidad de suministro se reduce de 1600 KVA a 900 KVA (Fp 0 1.0) a la capacidad de 1280 KVA del condensador síncrono.

Ejemplo

Con relación a los datos de la planta del ejemplo anterior calcular:

a) La capacidad requerida en KVA del condensador síncrono para alcanzar el factor de potencia de 0.85.

b) La carga total en KVA.

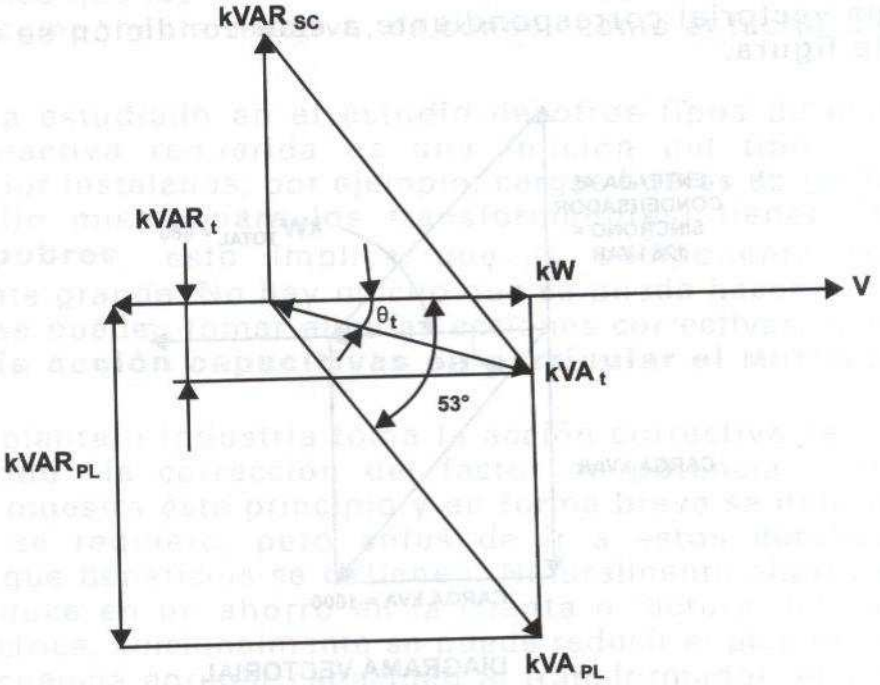


DIAGRAMA VECTORIAL

Solución

De los datos:

$$\theta_t = \cos^{-1} 0.85 = 31.8°$$

$$sen\,\theta_t = sen\,31.8° = 0.527$$

$$\tan\theta_t = \tan 31.8° = 0.620$$

Del diagrama vectorial mostrado en la figura anterior, se observa que los nuevos o $KVAR_{totales}$ son la diferencia entre los KVAR de la planta y que para el condensador síncrono, por lo tanto:

$$KVAR_{SC} = KVAR_{PL} - KVAR_t$$

Ahora:

$$KVAR_{PL} = 1600\,x\,sen\,53° = 1280\,KVA$$

y dado que la potencia total no cambia.

$$KVAR_t = KW\,x\,\tan\theta_t = 960\,x\,0.620 = 595$$

y $$KVAR_{SC} = 1280 - 595 = 685$$

b) $$KVA_t = KW_t / {}_{FP} = 960/0.85 = 1129$$

En la actualidad, el estudio de las máquinas eléctricas rotatorias y de los transformadores continúa siendo un tema de interés, no sólo por las aplicaciones que se tienen en la industria eléctrica, sino también en la industria y el comercio en general.

En este libro, se tratan los temas relacionados con el estudio de las máquinas eléctricas rotatorias y transformadores en una forma didáctica, en capítulos profusamente ilustrados y con un gran número de ejemplos resueltos para dar mayor claridad a cada tema.

Está dirigido a estudiantes de nivel medio, de licenciatura en carreras que estudien estos temas, así como a técnicos y profesionales que requieren de este tipo de información.

USM. BIBLIOTECA CENTRAL
35609001218 73

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA BIBLIOTECAS
CUIDAME
A todos nos gusta estudiar con material en buen estado

imusa@noriega.com.mx
riega.com.mx