

Apuntes de la Cátedra de

MAQUINAS E INSTALACIONES ELECTRICAS

Universidad Tecnológica Nacional
Departamento de ELECTRÓNICA
Profesor Titular: ing. Fernando R. Samsó

Facultad Regional Mendoza

El presente apunte constituye una guía de estudio para los alumnos de la especialidad ingeniería electrónica. Esta dotado de los conceptos, principios y experiencias que se vuelcan diariamente en el dictado de la materia. Tanto es así, que la Unidad Temática N° 1 de Transformadores, la he elaborado a partir de los apuntes tomados en clase (grabados en casete) por el alumno Marcos F. Iannussi durante el ciclo lectivo 2002, los que corregí y compaginé convenientemente. Bajo ningún concepto constituyen el único medio de estudio de la materia, dado que existe suficiente bibliografía sobre los temas abordados en el programa analítico de la materia y es el espíritu de la cátedra, que el alumno consulte la bibliografía recomendada en el programa, tomando como referencia del contenido y extensión a la presente guía.

Ing. Fernando R. Samsó
Mendoza, diciembre de 2004.-

La Unidad Temática N° 3 se ha compaginado a partir del tratado sobre los motores asíncronos y síncronos de la página de internet tuveras.com, participando en el trabajo de compilación y adaptación de formatos el alumno Juan Pablo Colagrande Martí durante el ciclo lectivo 2008.

Ing. Fernando R. Samsó
Mendoza, diciembre de 2008,-

Profesor Titular Ordinario: ing. Fernando Roque Samsó
Jefe de Trabajos Prácticos: ing. Pablo Mangiafico

UNIDAD N°1

Transformadores Monofásicos: Circuito equivalente, Diagrama vectorial, Tensiones y Corrientes, Tensión de cortocircuito, Ensayos del transformador.

Transformador Trifásico: Grupos de conexión, Puesta en paralelo

TRANSFORMADORES

“El transformador es un dispositivo eléctrico, estático, que transforma la energía eléctrica mediante un enlace electromagnético, entre dos o más circuitos eléctricos, modificando los valores de los parámetros de tensión y corriente a la misma frecuencia.”

ASPECTO CONSTRUCTIVO

En forma general se los puede clasificar según la potencia en:

- Transformadores de Potencia: Trifásicos, mayores de 1000 KVA. Tensión de trabajo: entre 33 KV y 500 KV. Pueden ser de dos o tres devanados. Se los utiliza generalmente para transmisión y en subestaciones a nivel.
- Transformadores de Distribución: relación de transformación: 13,2 KV / (0,4 – 0,230)KV
 - a) Trifásicos: hasta 1000 KVA. Construidos según normas IRAM.2250. Se los utiliza generalmente en subestaciones aéreas o subterráneas.
 - b) Monofásico y Rural: entre 5 y 16 KVA. Construidos según normas IRAM.2250. Se los utiliza generalmente montados sobre postes o columnas.
- Transformadores de uso General: Monofásicos de baja potencia
- Transformadores de Medición: TI, TV.

➤ Según los tipos y construcción de los transformadores:

- Monofásicos: - pueden ser de columnas (tipo A) o acorazado (tipo B).
 - auto transformadores
- Trifásicos: - pueden ser de columnas (tipo A); acorazado (tipo B); de 5 columnas
 - auto transformadores
- Hexafásicos: - pueden ser de tres columnas

A) TIPO NÚCLEO o COLUMNA:

Debe su nombre a que el circuito magnético es un núcleo rodeado por el bobinado.

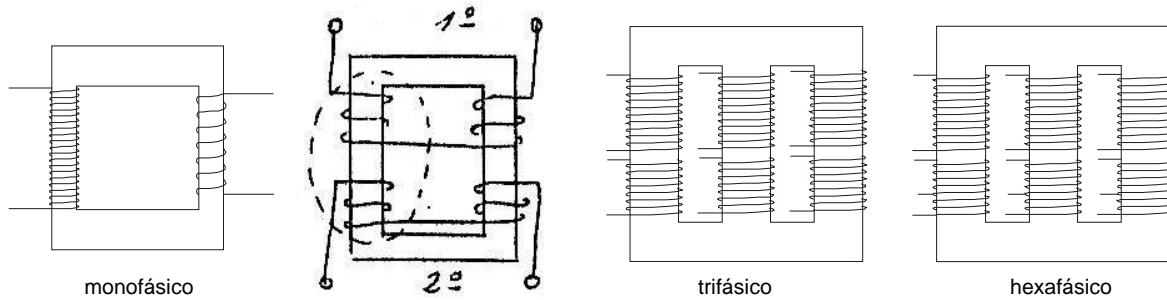


Figura [1]

B) TIPO ACORAZADO:

Deben su nombre a la coraza que forma el circuito magnético sobre el bobinado.

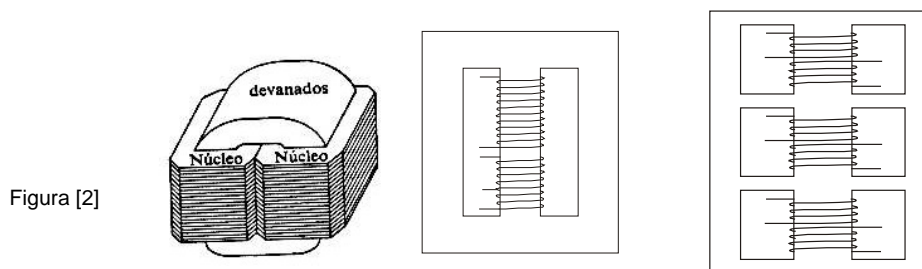
B-1) ACORAZADO:

Figura [2]

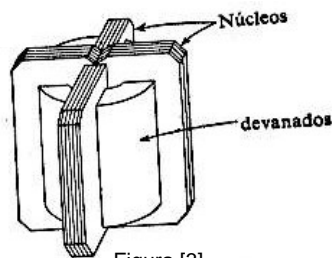


B-2) ACORAZADO DISTRIBUIDO:

Figura [3]

- El tipo de núcleo es de menor costo que el acorazado, sin embargo este último nos da un rendimiento un poco mayor. La potencia de un transformador de transmisión es directamente proporcional a la masa de hierro del núcleo.
- En el tipo acorazado, para transformadores pequeños y de uso común, el brazo medio tiene una geometría rectangular o cuadrada (), en cambio en grandes potencias se adecua este brazo a la forma de la bobina mediante el laminado con chapas de distinto ancho (); con esto se logra disminuir las pérdidas por flujo disperso, ya que en estas potencias el “alambre” (en realidad ya es una planchuela) del bobinado no es tan maleable como el utilizado en pequeñas potencias.
- Las laminaciones generalmente están hechas de acero al silicio, las que, para mejorar su permeabilidad, se las trata con laminaciones en frío o caliente; otro tipo son las de grano orientado que tienen muy baja reluctancia. Para grandes

potencias estas van remachadas o sujetas por pernos aislados que atraviesan la estructura, debido a que los esfuerzos electromagnéticos a los que se somete el transformador bajo cortocircuito son elevados (son proporcionales al cuadrado de la corriente). Para reducir las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault, las laminaciones están barnizadas o revestidas para aislarlas entre sí.

- El alambre que se utiliza en el bobinado es de cobre de alta pureza cuyo micrométrico recubrimiento aislante (esmalte) no afecta su conductividad, por tanto las pérdidas que introduce un transformador en vacío están mas ligadas al núcleo que al cobre. Es por ello que el factor determinante de la calidad del transformador pasa por el núcleo. No obstante todo lo expresado, la energía que absorbe el transformador en el primario es prácticamente igual a la que suministra en su secundario, lo que la hace una máquina de muy alto rendimiento.

➤ CONSTRUCCIÓN DEL NÚCLEO:

Para disminuir los entrehierros, el núcleo se construye por capas de chapas intercaladas (como en una pared):

Capas impares:

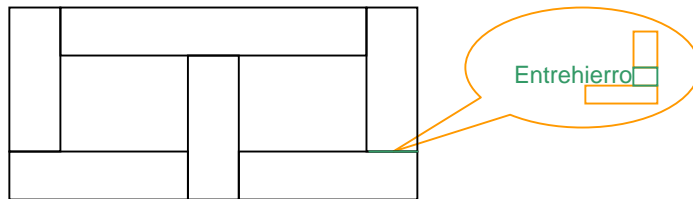


Figura [4]

Capas pares:

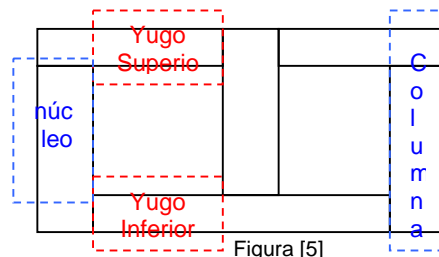


Figura [5]

➤ CONSTRUCCIÓN DEL BOBINADO:

A) BOBINADO:

El bobinado se puede construir en forma continua: la bobina se hace sin interrupciones; o por paquetes: la bobina se hace por paquetes de devanados que luego se montan en serie para generar la bobina completa; este último tiene la ventaja de que permite circular al aceite de la cuba por entre los paquetes de la bobina, logrando una mayor refrigeración, y además si se quema uno no hay que cambiar todos.

En ambos procedimientos primero se bobina el devanado de baja tensión (BT), encima de este, aislante de por medio, se bobina el devanado de alta tensión (AT); esto porque el núcleo del transformador está al potencial cero o de maza, por lo que mientras mas distancia respecto al núcleo tome el devanado de AT mayor será la aislación

entre ellos. Generalmente se los bobina encimados o en forma coaxial (a lo largo de un mismo núcleo), de esta forma se reduce al mínimo el flujo disperso. El papel aislante puede ser Prespan el cual tiene una rigidez de 1000V/mm, u otros materiales: madera, pertinax. etc...

B) AISLACIÓN:

Supongamos tener una bobina de 100 espiras y cuya tensión por espira es de 2V, entonces la diferencia de tensión entre la espira 1 y la 198 sería de 396V

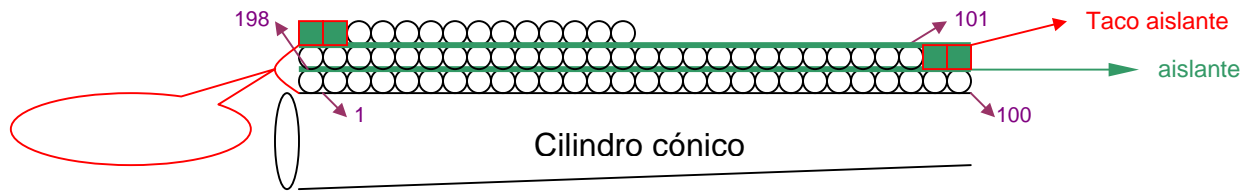


Figura [6]

Esta diferencia de potencial, puede llegar a tomar valores tales que puedan originar la perforación del aislante del conductor, por lo que se requerirá de un material aislante entre capa y capa del bobinado. También está el posible arco eléctrico que se puede dar entre las esquinas de las capas de bobinado, para lo cual se coloca un aislante de refuerzo al final de cada capa. Este refuerzo suele aumentarse con el objeto de soportar posibles descargas atmosféricas que se transmiten por las líneas.

En un transformador los bobinados deben estar bien prensados, apretados y vendados rígidamente para evitar que se desarmen ante un cortocircuito (en condiciones nominales no hay problema). Esto es debido a las fuerzas puestas en juego en dicha condición.

➤ REFRIGERACIÓN:

Los transformadores de pequeñas potencias presentan una superficie suficiente para disipar el calor generado; el problema aparece con los de media y alta potencia. En ellos se puede utilizar como medio refrigerante aire o aceite especial para transformadores:

- Por aire: se basan en la disipación por convección y de ser necesario con ventiladores. Esta refrigeración se utiliza en transformadores de cámaras subterráneas, que van en edificios, sótanos o ambientes cerrados generalmente, para reducir los riesgos contra incendios.
- Por aceite mineral: ofrece un mayor rendimiento en la disipación de calor que el anterior y además, debido a sus más de 20 KV/mm de rigidez dieléctrica, provee de aislación. Como este tipo de aceite es volátil, en presencia de un arco eléctrico (cortocircuito en el bobinado) se evapora violentamente y hay mucho riesgo de explosión, además de proveer una llama muy intensa al encenderse. Razón ésta por lo que se lo utiliza en transformadores al aire libre: estaciones aéreas monoposte, biposte y a nivel.

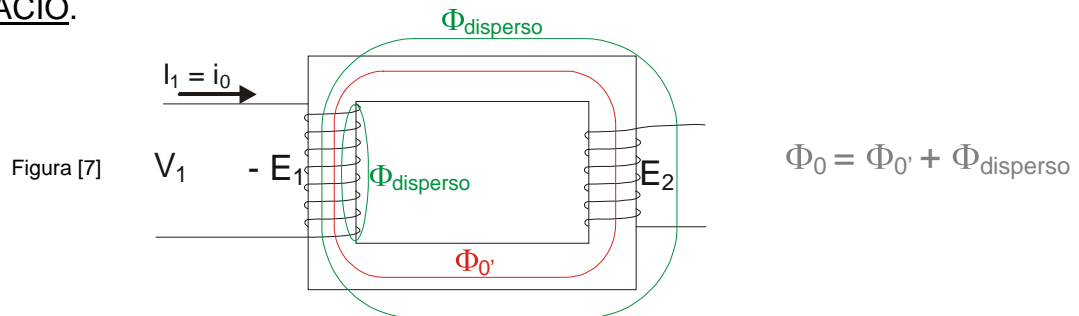
➤ PROTECCIÓN:

En general para transformadores de media y alta potencia, como protección para sobre corrientes se utilizan fusibles o llaves térmicas de tiempo inverso: a mayor corriente menor tiempo de respuesta; como protección para descargas atmosféricas se utilizan descargadores auto valvulares de sobre tensión que, colocados en las líneas que llegan al transformador, actúan como dispositivos pararrayos, derivando las sobre tensiones a tierra a través de una puesta a tierra conveniente.

FUNCIONAMIENTO

El transformador esta compuesto por dos circuitos eléctricos independientes (primario y secundario), más uno magnético que los vincula (núcleo).

➤ EN VACÍO.

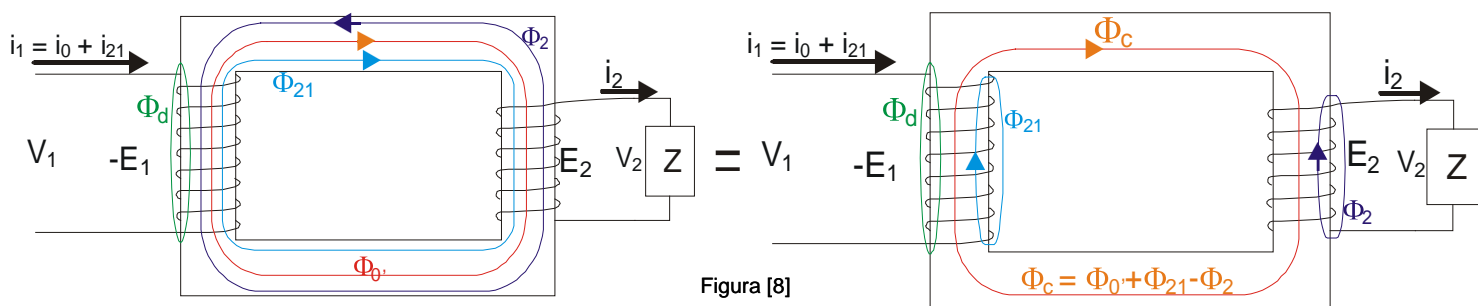


Al aplicar una tensión alterna V_1 en el primario (con secundario abierto), circula una corriente alterna i_0 por él y establece el flujo alterno Φ_0 que concatena a N_1 y N_2 , induciendo una fem E_2 en el secundario, que por estar en vacío, $E_2 \approx V_{20}$. En el primario, se autoinduce la fem ($-E_1$) (fuerza contra electromotriz), que se opone a la tensión aplicada V_1 .

El Φ_0 debido a la menor reluctancia \mathfrak{R} que le presenta el hierro en comparación al aire, sigue en su mayoría, el circuito ferromagnético. Las líneas de campo que se cierran a través del aire (espacios entre el núcleo y las bobinas) y que no aportan al flujo principal Φ_0 , constituyen el flujo disperso (Φ_d).

La corriente i_0 está compuesta por una corriente alterna magnetizante (i_m), en fase con el flujo principal Φ que produce y una corriente en cuadratura, por pérdidas magnéticas en el hierro (i_{pm} , histéresis y Foucault): $i_0 = i_m + i_{pm}$

➤ EN CARGA:



Al cerrar el secundario a través de una carga Z , circulará la corriente i_2 generando en el arrollamiento secundario un flujo Φ_2 , oponiéndose a la causa

que lo produce o sea, al flujo principal Φ_c , por lo que tenderá a disminuirlo y por consiguiente a $-E_1$. Esta disminución de la fem primaria origina un aumento en la corriente primaria a $i_1 = i_0 + i_{21}$, donde la i_{21} es la corriente i_2 referida o reflejada en el primario. En relación a los flujos, el primario reacciona a esta disminución con un flujo (Φ_{21}) de igual magnitud que Φ_2 pero que se adiciona al flujo principal (Φ_c); entonces **el flujo principal o flujo concatenante (Φ_c) se mantiene igual tanto en carga como en vacío** (un estudio detallado nos dará que el $\Phi_0 \approx \Phi_{carga}$, ya que en carga el Φ_c tiende a ser menor). Esto será así mientras no se sature el núcleo.

➤ BALANCE de las f.m.m.

Retomando lo dicho con respecto al $\Phi_{principal}$:

$$fmm_0 = fmm_1 + fmm_2$$

Ecuación de equilibrio magnético

Ley de Ampere
(ver anexo)

$$N_1 i_0 = \underbrace{N_1 i_1}_{\text{fmm en el primario}} + \underbrace{N_2 i_2}_{\text{fmm en el secundario}}$$

Ecuación de equilibrio eléctrico

$i_0 = i_1 + i_2$ Ecuac. de nodos de Kirchhoff

Permeabilidad del vacío, en nuestro sistema de unidades es = 1

$$\frac{N i_0}{\mathcal{R}} = \frac{N i_1}{\mathcal{R}} + \frac{N i_2}{\mathcal{R}}$$

$$\Phi = B S = \downarrow \mu_0 \mu H S =$$

$$\Phi = \frac{\mu N i S}{L} = \frac{N i}{\frac{L}{\mu S}} =$$

$$\Phi = \frac{fmm}{\mathcal{R}} \quad \mu S$$

N = nº de espiras
 μ = Permeabilidad
 L = longitud de la bobina
 S = sección del núcleo
 \mathcal{R} = Reluctancia
 fmm = Fuerza magneto-motriz

$$\frac{\mu N_1 i_0 S}{1} = \frac{\mu N_1 i_1 S}{1} + \frac{\mu N_2 i_2 S}{1}$$

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_{21}$$

$$\Phi_0 (\text{vacío}) = \Phi_{carga}$$

➤ PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO:

Son las que producen el calentamiento del núcleo y se corresponden con la suma de las pérdidas por histéresis y por Foucault P_{h+f} (se expresan en watts o Kw):

A) Por histéresis: La pérdida por histéresis P_h , que se visualiza mediante la corriente de pérdida histerética (i_{ph}) ó mas comúnmente conocida como corriente de histéresis (i_h), es la energía convertida en calor (pérdida) a causa del trabajo de estar cambiando de una orientación a otra la imanación del núcleo.

Para disminuir estas pérdidas hay que utilizar para el núcleo un material de mejores características histeréticas que se oponga menos a estos cambios.

La dimensión del núcleo determina la intensidad de la corriente magnetizante (i_m) necesaria para crear el flujo en el núcleo. La calidad del hierro del núcleo determina la corriente de pérdidas magnéticas (i_{pm}). $i_0 = i_{ph} + i_m$

Curva de histéresis ó magnetización

Inducción Magnética: cant. de líneas de campo que circulan por el material

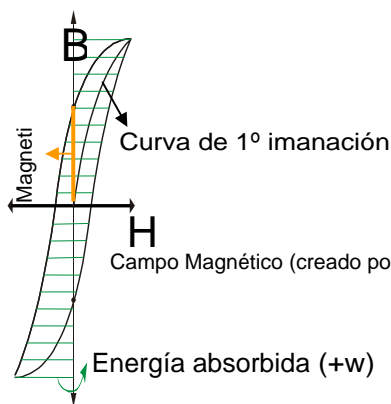
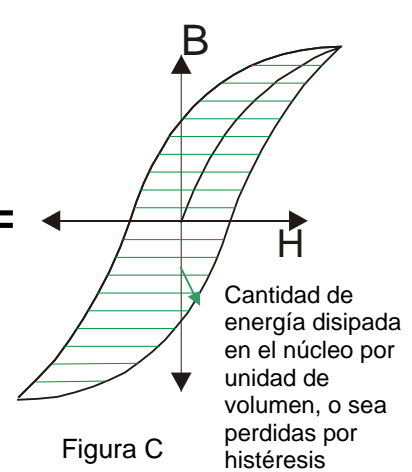
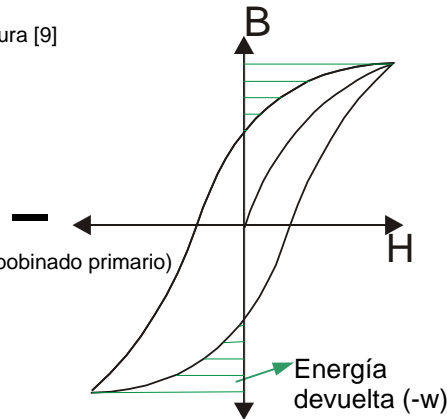


Figura [9]



- Mientras mas angosta sea la curva (\Rightarrow menos superficie) el material posee un mejor ciclo de histéresis por lo que tendrá menores pérdidas por histéresis.
- $W = \frac{1}{4\pi} \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB$
 - $+W \Rightarrow$ absorbe
 - $-W \Rightarrow$ entrega
- La intersección de la curva con el eje B da la magnetización remanente (al anular H).
- El tramo de curva en el 2º cuadrante indica que el material se opone a una magnetización "negativa", mientras que la del 3º cuadrante a una "positiva".

B) Por Foucault: el campo variable Φ también induce sobre el hierro del núcleo corrientes llamadas de Foucault, las cuales encuentran en él un circuito cerrado para circular con el consiguiente calentamiento del núcleo. Como estas pérdidas P_f dependen del cuadrado del espesor del material sobre el cual se inducen, para disminuirlas, se lamina el núcleo.

➤ INDUCTANCIAS DE DISPERSIÓN (L_d):

En el siguiente análisis despreciaremos la resistencia de los bobinados.

Las líneas de campo que no concatenan al bobinado secundario y que se cierran a través del aire entre la bobina primaria y el núcleo, constituyen el *flujo disperso primario* (Φ_{d1}), que da lugar a la *inductancia de dispersión primaria* (L_{d1}): Estos flujos no contribuyen a la generación de E_2 , aunque si son parte de E_1

$$L_{d1} = \frac{N\Phi_{d1}}{i} \Rightarrow X_{d1} = \omega L_{d1}$$

$$\Phi_{\text{prim}} = \Phi_{d1} + \Phi_1$$

siendo las dos componentes de $L_1 \Rightarrow L_m$ y L_{d1} dando

$$-j \cdot \bar{i}_o \omega L_m \quad \text{y} \quad -j \cdot \bar{i}_o \omega L_{d1}$$

la primera componente da lugar a la fem inducida por el flujo principal E_1 y a la segunda se la expresa mediante la *reactancia de dispersión primaria* (X_{d1}), sobre la cual se produce la fem inducida por el flujo de dispersión. Escribiendo la ecuación de Kirchhoff para esta malla:

$$\bar{V}_1 + \bar{E}_1 - j \bar{I}_1 X_{d1} = \bar{I}_1 R_1$$

la que podemos escribir como

$$\bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + j \bar{I}_1 X_{d1} + \bar{I}_1 R_1$$

donde $-E_1$ es la componente de la tensión primaria necesaria para vencer la fem inducida en el arrollamiento primario por el flujo principal y la $(+jI_1X_{d1})$ es la componente de la tensión primaria necesaria para vencer la fem inducida en el arrollamiento primario por el flujo de dispersión

En el secundario al conectar una carga circulará una corriente I_2 que produce un flujo secundario $\Phi_{\text{secundario}} = \Phi_2 + \Phi_{d2}$ siendo Φ_{d2} quien da lugar a L_{d2} y por ende a X_{d2} .

RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN: 'n'

A la relación N_1 / N_2 se le llama *relación de transformación*. Al ser la corriente de vacío i_0 pequeña, las caídas de tensión por resistencia y por reactancia, para el transformador en vacío, serán también pequeñas. Resulta que E_1 es prácticamente igual a V_1 y en el secundario en vacío, E_2 es igual V_{20} . De aquí que la *relación de transformación* se dé a menudo como la relación entre las tensiones en vacío:

$$E_1 = 4,44 f_1 N_1 \Phi \cdot 10^{-8}$$

$$E_2 = 4,44 f_1 N_2 \Phi \cdot 10^{-8}$$

$$n = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_{20}}$$

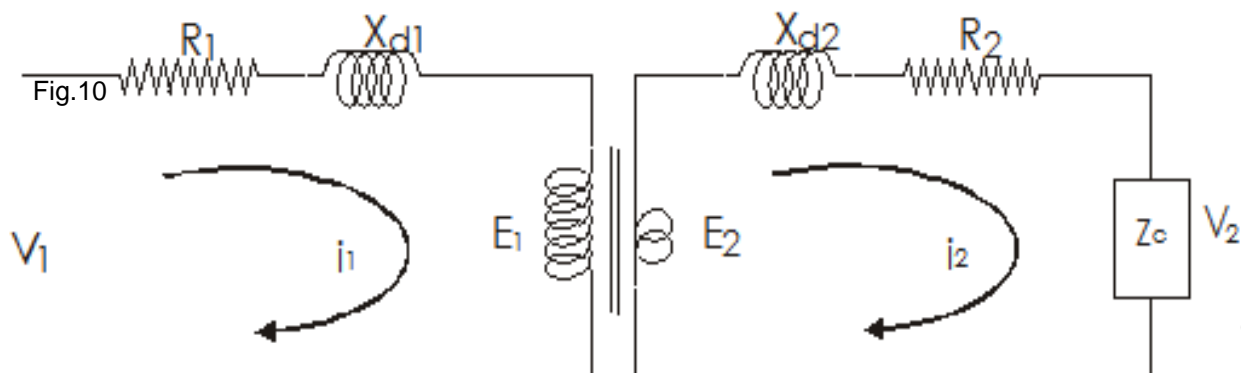
* Considerando al transformador a plena carga, la i_0 también es pequeña con respecto a i_1 y por lo tanto despreciable. De la ecuación:

$$N_1 \vec{i}_0 = N_1 \vec{i}_1 + N_2 \vec{i}_2$$

Despreciando i_0 y tomando módulos: $N_1 I_1 \approx N_2 I_2$

por lo tanto
$$n = \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1}$$

CIRCUITO EQUIVALENTE y TRAZADO DEL DIAGRAMA VECTORIAL:



Ecuaciones de Kirchhoff para dos mallas independientes:

para la malla del primario

$$V_1 = i_1 (R_1 + j X_{d1}) - E_1 \quad ; \text{ con } X_{d1} = \omega L_{d1}$$

para la malla del secundario:

$$E_2 = i_2 (Z_c + R_2 + j X_{d2}) \quad ; \text{ con } X_{d2} = \omega L_{d2}$$

➤ DIAGRAMA VECTORIAL

Trazado del diagrama vectorial:

Para trazar el diagrama vectorial, como referencia y punto de partida se toma al flujo concatenante (Φ_c), ya que este es común a ambos circuitos eléctricos. En fase a este tendremos la corriente que lo produce: la corriente magnetizante (i_m), que es una de las componentes de la corriente de vacío (i_0). A 90° en adelante esta i_h (corriente de pérdidas por histéresis y Foucault).

De acuerdo con la ley de Faraday, en una espira: $e = - \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ [V]}$

Considerando a Φ un flujo senoidal

$$\Phi = |\Phi| \sin(\omega t) \Rightarrow \vec{e} = - \omega |\Phi| \cos(\omega t) \cdot 10^{-8} = \omega |\Phi| \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \cdot 10^{-8} \Rightarrow \text{para un bobinado de } N_1$$

espiras:

$$\vec{E}_1 = N_1 \vec{e} = N_1 \omega |\Phi| 10^{-8} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \text{ lo que indica que la fem } E_1 \text{ atrasa } (\frac{\pi}{2}) \text{ respecto del flujo: } \Phi = |\Phi| \sin(\omega t); \text{ y debido a que se opone a la causa que lo produce, está desfasada } 180^\circ \text{ de } V_1.$$

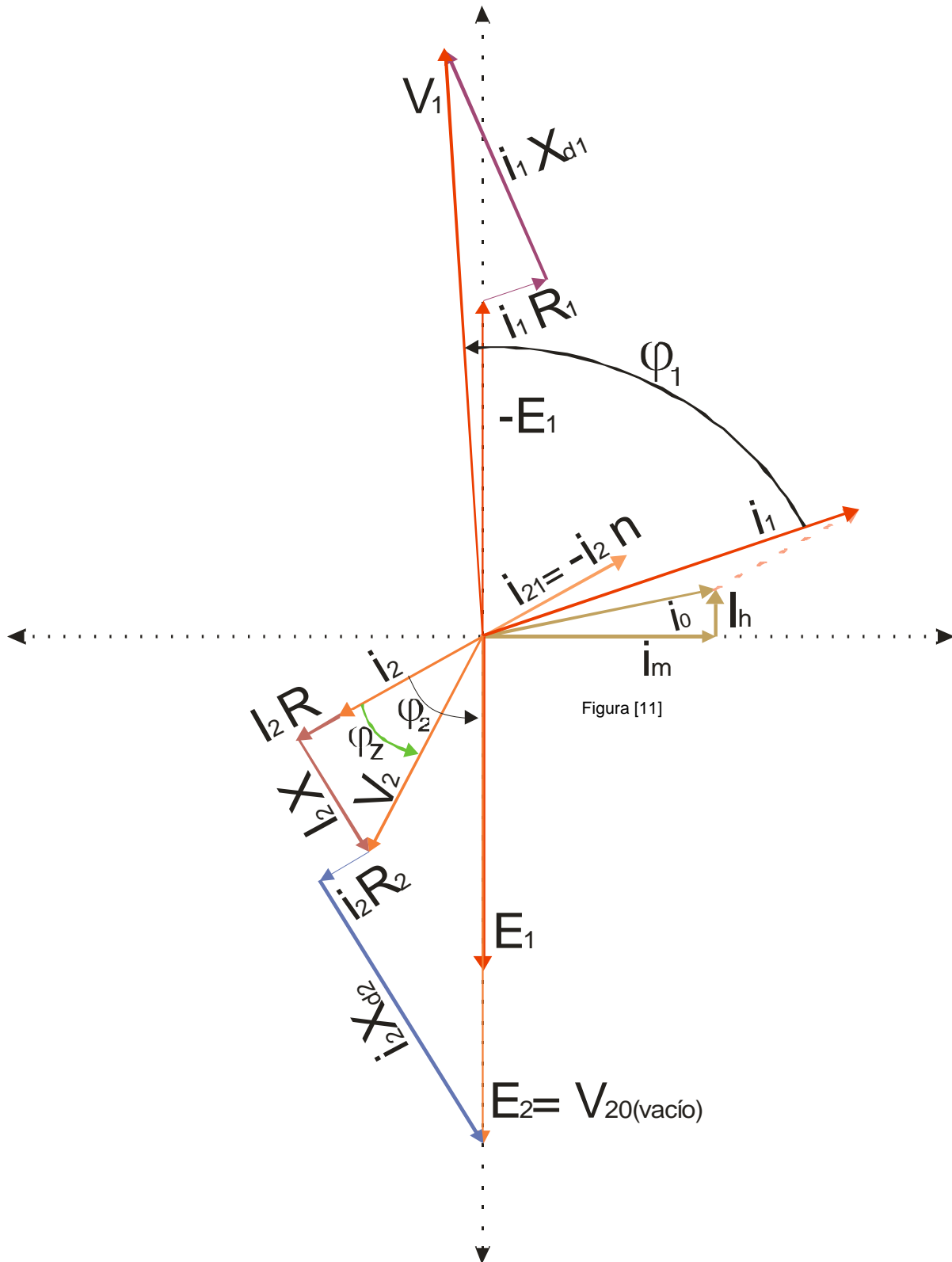


Diagrama vectorial con carga Inductiva

En realidad el desfase respecto a V_1 es aproximadamente 180° por las pérdidas que introduce i_0 .

F R S.

El mismo flujo que da lugar a E_1 concatena a la bobina secundaria por lo que en ella tendremos:

$$\overline{E_2} = N_2 \omega |\Phi| \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \cdot 10^{-8}$$

por lo que también, la fem E_2 atrasa $(\frac{\pi}{2})$ respecto del flujo.

Esto nos permite trasladar los fasores de E_1 y E_2 al diagrama vectorial, dibujándolos sobre el eje de los 270°

Si conectamos una carga: $Z = R + j X = R + j (\omega L - 1/\omega C)$

la impedancia total secundaria quedará: $Z_2 = R_2 + j X_2 + Z$

donde $X_2 = \omega L_2$

quedando $Z_2 = (R_2 + R) + j (X_2 + X)$

Aparecerá una i_2 desfasada φ_2 de V_2 $\overline{i_2} = \overline{E_2} / \overline{Z_2}$

siendo $\overline{E_2} = -j \omega N_2 |\Phi|$

quedará $\overline{i_2} = \frac{-j \omega N_2 |\Phi|}{(R_2 + R) + j (X_2 + X)}$

$$\text{tg } \varphi_2 = (X_2 + X) / (R_2 + R)$$

cuyo valor instantáneo será: $\overline{i_2} = |i_2| \sin [\omega t - (\pi/2 + \varphi_2)]$

Tensión en los bornes de salida del transformador: $\overline{U_2} = \overline{i_2} Z = \overline{i_2} (R + j X)$
 $\text{tg } \varphi_z = X / R$

A partir de E_2 podemos trasladar al diagrama vectorial los fasores i_2 y U_2 estando ambos retrasados por lo que quedarán indicados en el 3er cuadrante:

$R i_2$ en fase con i_2

$j X i_2$ en cuadratura con i_2

U_2 adelantada en φ de i_2

V_2 es menor y desfasada en atraso de E_2 debido a las caídas internas de tensión del secundario, las que están formadas por las pérdidas resistivas del arrollamiento secundario $i_2 R_2 = V_{R2}$ que está en fase a i_2 (debido a su carácter "resistivo") y a las pérdidas producida por la reactancia inductiva del flujo de dispersión secundario $i_2 X_{d2} = V_{xd2}$, quien está adelantada en 90° de i_2 (por su carácter inductivo).

En el diagrama vectorial quedarán representadas en fase y cuadratura respectivamente con i_2 y dibujadas a partir del extremo del fasor U_2 , cerrándose el polígono en el extremo de E_2 .

La circulación de la corriente i_2 por el bobinado secundario, crea una f.m.m. $N_2 i_2$ que se opone a la causa que la produce, tendiendo a debilitar el flujo Φ del núcleo y por consiguiente a disminuir a E_1 . La reacción del bobinado primario, es una *corriente secundaria reflejada en el circuito primario* llamada i_{21} , que crea una f.m.m. $N_1 i_{21}$ que contrarresta a la creada por i_2 . De esta manera, el flujo Φ prácticamente no se ve alterado (figura 8).

De la ecuación de equilibrio de las fuerzas magnetomotrices (f.m.m.): $N_1 i_o = N_1 i_1 + N_2 i_2 \Rightarrow$ resulta
 $i_1 = i_o + (-i_2 N_2/N_1)$

el término $(-i_2 N_2/N_1)$ es el representado por la corriente i_{21} la que sumada a la corriente de vacío i_o da lugar a la corriente primaria i_1 . Por tanto:
 $i_1 = i_o + i_{21}$

Trazamos en el diagrama vectorial un fasor para i_{21} del mismo módulo y a 180° que i_2 y en la misma escala en que se encuentra trazada i_0 . Por una simple composición de fuerzas, encontramos el fasor de i_1 . Para completar el trazado del circuito primario, dibujamos un fasor sobre el eje de 90° con un módulo igual y opuesto a E_1 que se corresponde con la f.c.e.m. ($-E_1$), que contrarresta la tensión aplicada U_1 .

Las caídas internas de tensión del circuito primario del transformador están formadas por la caída de tensión resistiva ($i_1 R_1$) del bobinado, en fase con i_1 y la caída de tensión en la reactancia del flujo de dispersión primario ($j i_1 X_{d1} = V_{xd1}$), quien está adelantada en 90° de i_1 (por su carácter inductivo). La ecuación del circuito primario queda:

$$U_1 = -E_1 + i_1 R_1 + j i_1 X_1$$

$$\tan \varphi_1 = X_1 / R_1$$

Por el extremo del fasor de ($-E_1$) trazamos ($R_1 i_1$) paralelo a i_1 y el fasor ($X_{d1} i_1$) en cuadratura, cerrándose el polígono de fasores con la tensión primaria U_1 , la que está desfasada en φ_1 respecto de ($-E_1$), quedando así conformado el circuito primario en el 1er cuadrante, y el diagrama vectorial para el transformador.

En el diagrama se han expresado las cantidades en módulo y fase, sin embargo si queremos corroborar los cálculos con mediciones habrá que trabajar con valores eficaces ya que los instrumentos vienen calibrados en dichos valores; entonces si queremos el valor eficaz de, por ejemplo, la tensión $|E_1|$:

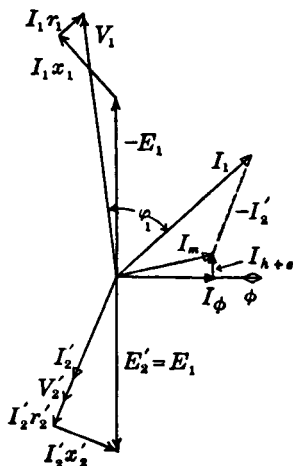
$$|E_1| = |E_1| = N_1 w |\Phi| 10^{-8} = 2 \pi f N_1 w |\Phi| 10^{-8} = 4,44 f N_1 |\Phi| 10^{-8} \text{ [V]}$$

la tensión por espira será:

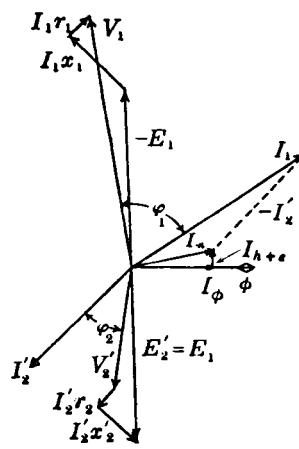
$$E_n = E/N = 4,44 \times 50 |\Phi| 10^{-8} = 222 |\Phi| 10^{-8} \text{ [V]}$$

En el diagrama vectorial dibujado, los parámetros del primario del transformador están en el 1er cuadrante, mientras que los del secundario están en el 3er cuadrante. Por razones puramente didácticas, ambos cuadrantes están mostrados en el mismo orden de magnitud. En un diagrama vectorial real, por la relación de transformación, los parámetros primarios y los secundarios difieren considerablemente entre sí. Por ejemplo, para un transformador de distribución cuya relación de tensiones es de 13.200V a 380V ($n = 34$), sería engorroso dibujar la tensión primaria y secundaria en una misma escala.

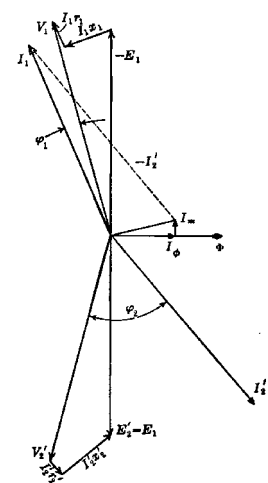
Variaciones del diagrama vectorial según distintos tipos de carga: R, R L, C



Carga Resistiva



Carga inductiva



Carga capacitiva

Figura 12

Reducción del circuito equivalente a la malla del primario:

La relación de transformación n nos expresa una relación constante entre ambos circuitos (ya que N_1 y N_2 no varían) por lo que si expresamos los parámetros de un circuito como cantidades del otro podremos armar un “circuito unificado”; esto es:

$$n = \frac{\bar{E}_1}{E_2} \cong \frac{\bar{I}_2}{I_1}$$

Partiendo de:

$$E_2 = i_2 (Z_c + R_2 + j X_{d2}),$$

dividiendo a ambos miembros por “n” y recordando que $\bar{E}_2 = \frac{\bar{E}_1}{n}$

$$\frac{\bar{E}_1}{n^2} = \frac{\bar{I}_2}{n} \cdot (R_2 + j X_{d2} + Z_c)$$

$$E_1 = -I_{21} n^2 (R_2 + j X_{d2} + Z_c)$$

$$-E_1 = I_{21} (R_2 n^2 + j X_{d2} n^2 + Z_c n^2)$$

donde R, X y Z están afectados por la relación de transformación, por lo tanto expresan:

$$\left. \begin{array}{l} R_2 n^2 = R_{21} \\ X_{d2} n^2 = X_{d21} \\ Z_c n^2 = Z_{c21} \end{array} \right\} \Rightarrow E_1 = I_{21} (R_{21} + X_{21} + Z_{c21})$$

Ecuación que refleja los parámetros secundarios sobre el primario. De esta deducimos los factores de reducción al primario:

- Las tensiones secundarias se afectan por “n”.
- Las corrientes secundarias se afectan por “ $\frac{1}{n}$ ”.
- Las impedancias secundarias (resistencias, reactancias) se afectan por “n²”

Retomando, las ecuaciones de los circuitos eléctricos para el primario y secundario quedan ahora en una misma malla:

$$V_1 = -E_1 + i_1 (R_1 + j X_{d1})$$

$$n E_2 = i_{21} (R_{21} + X_{21} + Z_{c21})$$

donde hemos reemplazado la discontinuidad eléctrica por un nodo

➤ Circuito Equivalente Reducido:

Por lo expuesto precedentemente, si aplicamos la primera ley de Kirchhoff

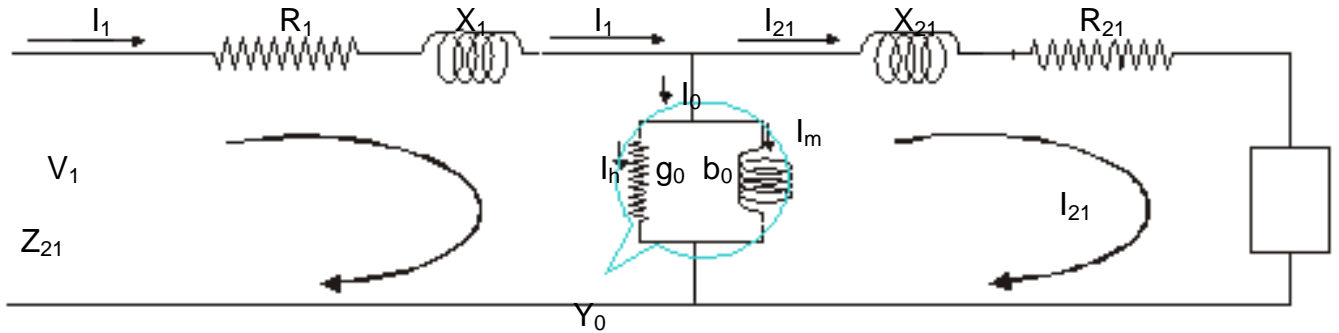
$$i_1 = i_0 + i_{21}$$

donde $i_o = i_h + i_m$

podemos representar la discontinuidad por una admitancia

$$Y_0 = g_0 + j b_0$$

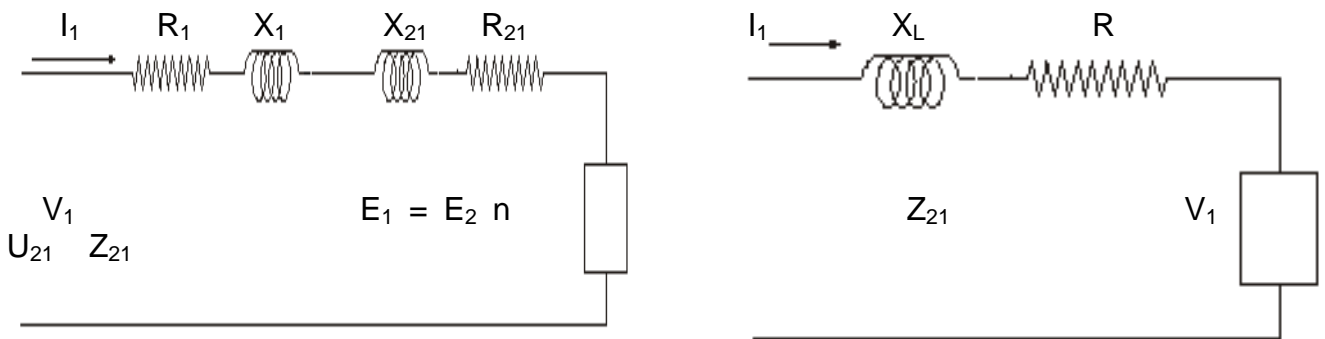
Figura 13



donde i_h es la corriente histerética de pérdidas del circuito magnético (histéresis y foucault) e i_m la corriente magnetizante.

➤ Circuito Equivalente Reducido y Simplificado

Sin gran error, podemos despreciar la corriente de vacío i_0 que es pequeña respecto a la corriente I_N (4 al 6)% para transformadores de potencia (5 a 30 MVA) y (6 AL 10)% para transformadores de distribución (10 a 1000 KVA).



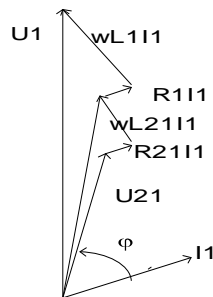


Figura 14

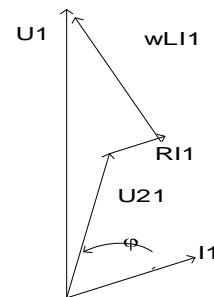


Figura 15

Conclusiones:

1. El transformador desfasa la corriente de salida respecto de la de entrada en aproximadamente 180° .
2. Al ser el transformador una carga netamente inductiva, este desmejora el $\cos \phi$ de la línea.
3. A igualdad de las potencias activas P (KW) para una línea que alimenta una carga a través de un transformador con respecto a la misma línea sin transformador, en el primer caso la corriente i_1 es mayor que la i del segundo y por tanto, las pérdidas $R i_1^2$ también crecen: $U i \cos \phi = U i_1 \cos \phi_1$
 $i_1 > i$
4. El flujo Φ del núcleo prácticamente queda invariable al pasar el transformador de la condición de vacío a carga. Esto evita la saturación del núcleo en condiciones de plena carga y sobrecarga.
5. En condiciones de plena carga, la i_o de vacío es pequeña con respecto a la i_1 por lo que se la puede despreciar quedando las relaciones de transformación:
 $N_1 i_1 \cong N_2 I_2$
 $U_1 / U_{20} = N_1 / N_2 \cong i_2 / i_1$
6. En los transformadores de medición TI y TV, el error de ángulo provocado por desfases que no son exactamente 180° entre las corrientes o las tensiones respectivamente, origina errores sobre los aparatos de medición y/o protección, acoplados a los secundarios de los mismos.
7. Cuando la frecuencia en la red difiere de la de diseño, se pueden originar inconvenientes en el funcionamiento del transformador. Observemos el siguiente caso práctico:

Análisis del porqué un transformador diseñado para 60Hz no funciona para 50Hz pero si a la inversa.

F R S.

Tomemos un transformador diseñado para 220V y 60Hz:

$$E_1 = 4,44 f N |\Phi| 10^{-8}$$

$$220 \text{ V} = 4,44 \cdot 60 \text{ N} |\Phi| 10^{-8} \Rightarrow \text{N} |\Phi| 10^{-8} = 0,82 \text{ (*)}$$

Si ahora lo hacemos trabajar a 50Hz, la tensión primaria requerida será:

$$E_1 = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,82 = 182 \text{ V}$$

182 < 220, por lo que al conectarlo a 220 Vca, *el núcleo se saturará, aumentará sus pérdidas y no dará la tensión secundaria esperada.*

(*) Al producto $N \cdot |\Phi| \cdot 10^{-8}$ se lo llama “concatenaciones” y no se debe modificar su valor una vez construido si se desea un correcto funcionamiento.

Ahora tomemos un transformador diseñado para 220 V y 50Hz:

$$220 \text{ V} = 4,44 \cdot 50 \text{ N} |\Phi| 10^{-8} \Rightarrow \text{N} |\Phi| 10^{-8} = 0,99$$

Si ahora lo hacemos trabajar a 60Hz la E_1 necesaria será:

$$E_1 = 4,44 \cdot 60 \cdot 0,99 = 264 \text{ V}$$

264 > 220, por lo que al conectarlo a los 220 Vca *funcionará con menos pérdidas*

REGULACION DE TENSIÓN: EL DIAGRAMA DE KAPP

También conocido como la “Variación de la tensión con la carga”, o simplemente “Regulación”. Las normas IRAM la define como: “*la diferencia entre la tensión secundaria nominal U_2 y la tensión secundaria bajo carga U_{20} . Se la puede expresar en valor porcentual o en por unidad, de la tensión nominal del arrollamiento de que se trata*”:

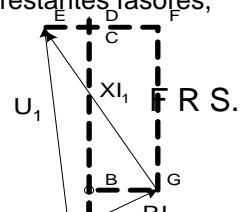
$$\Delta U\% = \frac{(U_{20} - U_2)}{U_{20}} \times 100$$

Para el circuito equivalente, donde todas las tensiones están referidas al primario en la relación de transformación n

$$\Delta U\% = \frac{(U_1 - U_{21})}{U_1} \times 100$$

1. Para un transformador en servicio, la determinación de la regulación se obtiene a partir de la medición de la U_2 a plena carga y de la U_{20} .
2. Para un transformador en ensayo dentro de la planta de fabricación, donde no es posible representar las condiciones reales de plena carga (caso de los transformadores de potencia), se utiliza otra expresión derivada del diagrama de Kapp.

3. **DIAGRAMA DE KAPP:** (fig. 16) Partiendo del diagrama vectorial correspondiente al circuito equivalente reducido y simplificado, donde hemos despreciado la corriente de vacío y su admitancia equivalente, por considerar al transformador a plena carga, trazamos una circunferencia con radio OE (fasor U_1) con centro en O hasta cortar en D a la recta prolongación de OA (fasor U_{21}). Las proyecciones sobre esta recta de los restantes fasores, determinan los puntos B, C, D que nos permiten deducir:



$$\Delta U = U_1 - U_{21} = AD = AB + BC + CD$$

$$AB = R \cdot I_1 \cos \phi$$

$$BC = X \cdot I_1 \sin \phi$$

del triángulo rectángulo DEH:

hemos tomado el punto H equidistante de D en la magnitud $2 U_1$

$$\frac{CD}{EC} = \frac{EC}{CH}$$

$$CD = \frac{EC^2}{CH} \cong \frac{(EF - CF)^2}{D \cdot H} \cong \frac{(X \cdot I_1 \cdot \cos \phi - R \cdot I_1 \cdot \sin \phi)^2}{2 \cdot U_1}$$

reemplazando y expresando en % U_1

$$U_r\% = \frac{R \cdot I_1}{U_1} 100 \quad (\text{caída ohmica porcentual})$$

$$U_x\% = \frac{X \cdot I_1}{U_1} 100 \quad (\text{caída reactiva porcentual})$$

$$\Delta U\% = U_r\% \cos \phi + U_x\% \sin \phi + \frac{(U_x\% \cdot \cos \phi - U_r\% \cdot \sin \phi)^2}{200}$$

El tercer término resulta despreciable por ser un valor menor que uno al cuadrado y dividido en 200.

Quedando para la regulación:

$$\Delta U\% = U_r\% \cos \phi + U_x\% \sin \phi$$

Las caídas ohmica y reactiva porcentuales, se determinan a partir del ensayo de corto circuito del transformador.

DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS:

➤ Ensayos de vacío y cortocircuito del transformador:

Básicamente estos ensayos se realizan en el laboratorio y/o en fábrica, constituyendo los ensayos de recepción de la máquina construida. A través de éstos, se determinan los parámetros del transformador y en forma indirecta, la regulación y el rendimiento. A continuación solo desarrollaremos los esquemas de los circuitos y sus ecuaciones para un transformador monofásico de dos arrollamientos, quedando para el trabajo práctico del laboratorio, el desarrollo completo de los ensayos según las normas IRAM.

Transformador en vacío:

Determinación de los parámetros I_0 y Z_0

El circuito de la figura se corresponde con un transformador monofásico en vacío, sin carga, al que se le aplica la tensión nominal U_1 en el lado primario (generalmente se toma el lado de baja tensión). Con los aparatos conectados como se muestra (amperímetro, voltímetro y vatímetro), se toman las lecturas de la corriente de vacío I_0 y de la potencia activa que consume el primario P_0 en watts. Al no circular corriente por el secundario, esta parte del circuito no aporta ningún consumo. Por

ello, tomando el circuito de la figura 13 y eliminando a Z_{21} nos queda el circuito equivalente del transformador en vacío (figura 17).

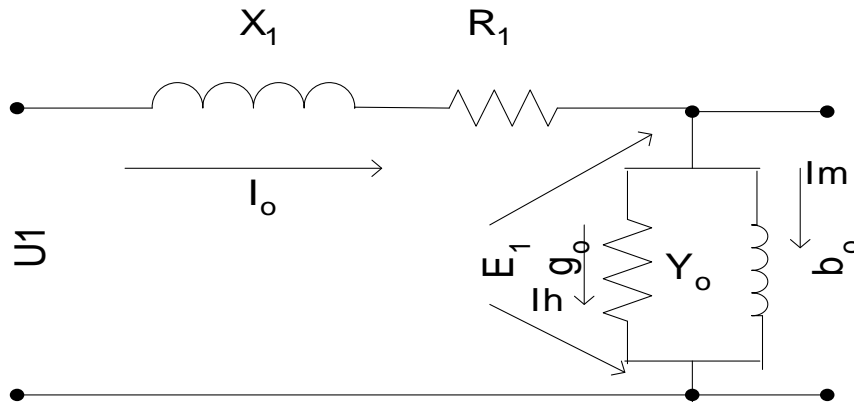


Figura 17

Consideraciones: por lo expuesto precedentemente, las pérdidas en el núcleo P_{h+f} se hacen iguales a las pérdidas P_0 medidas, por lo que la corriente indicada por el amperímetro se corresponde con la de vacío I_0 .

Del circuito eléctrico de la figura 17

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_0 \cdot Z_1 + \bar{I}_0 \cdot Z_0$$

donde

$$\bar{I}_0 = \frac{-\bar{E}_1}{Z_0} = -\bar{E}_1 \cdot Y_0 = -\bar{E}_1 \cdot (g_0 - j \cdot b_0)$$

a su vez

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_h + \bar{I}_m$$

De las dos últimas ecuaciones se deduce:

$$\bar{I}_h = -\bar{E}_1 \cdot g_0$$

$$\bar{I}_m = -j \cdot (-\bar{E}_1) \cdot b_0$$

La corriente histerética I_h está en fase con E_1 y por tanto se comporta como la componente resistiva de la I_0 , equivaliendo a las pérdidas por calor en el núcleo. Tales ya las hemos definido como las pérdidas P_{f+h} (W) las que se corresponden con la potencia activa P_0 medida.

La corriente magnetizante I_m está en cuadratura con E_1 y es la responsable del flujo concatenante Φ_c .

Al ser R_1 despreciable frente a la R_0 equivalente (se corresponde con las P_{f+h}) y la reactancia del flujo de dispersión X_{d1} también despreciable frente a la X_0 , podemos escribir:

$$-\bar{E}_1 \cong \bar{U}_1$$

$$Z_0 = R_0 + j \cdot X_0 \cong \frac{\overline{U}_1}{\overline{I}_0}$$

$$R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 \cdot I_0}$$

$$Y_0 = \frac{R_0}{Z_0^2} + j \cdot \frac{X_0}{Z_0^2}$$

Transformador en corto circuito:

Si en el circuito reducido de la figura 15 reemplazamos la impedancia de carga Z_{21} por un corto circuito, la U_{21} se reduce a cero y el transformador entra en la condición de corto circuito permanente (condición teórica). La corriente que circularía en esas condiciones I_{ccp} es del orden de las 40 I_N la que sería destructiva del bobinado:

$$\overline{I}_{ccp} = \frac{\overline{U}_1}{Z_{cc}} = \frac{\overline{U}_1}{\sqrt{R^2 + (w \cdot L)^2}}$$

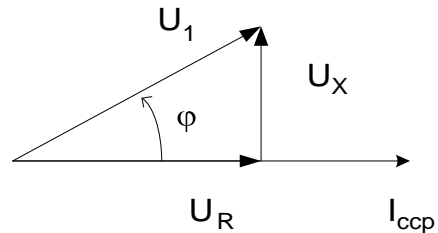
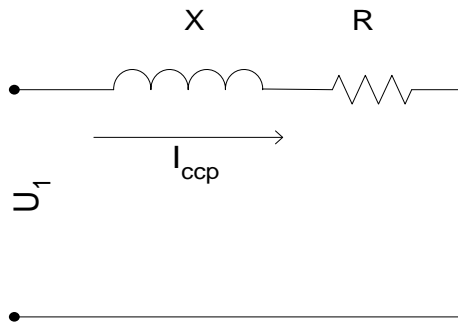


Figura 18

La norma IRAM establece como tensión de corto circuito U_{cc} a “la tensión a frecuencia nominal que debe aplicarse entre los bornes de línea de un arrollamiento, para que circule por él la corriente nominal, cuando los bornes del otro arrollamiento están en corto circuito; su valor está referido a 75° C para las clases de aislación A, E y B y 115° C para las F y H”.

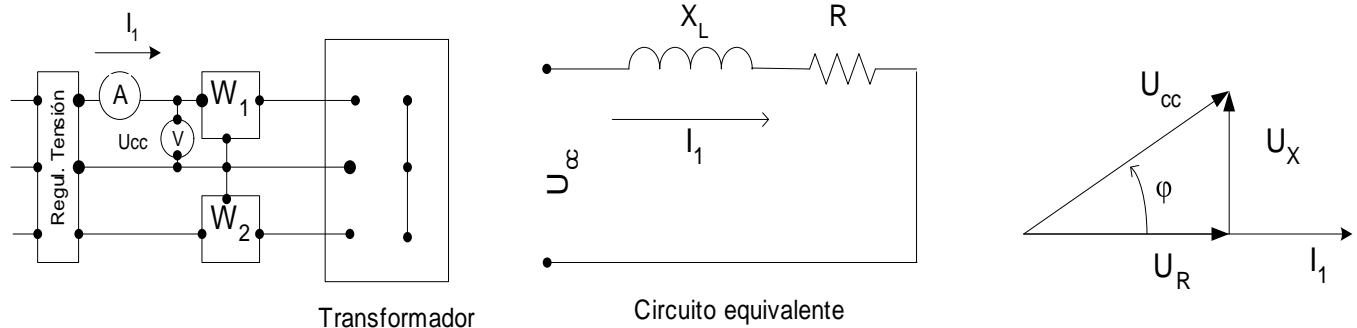


Figura 19

El circuito eléctrico para el ensayo es el de la figura 19, donde se han instalado dos vatímetros (conexión Aron), un amperímetro y un voltímetro. La tensión se regula desde cero con un variador de tensión. También se elige como primario el lado de menor tensión.

Consideraciones: La medición del vatímetro se corresponde con las pérdidas totales en el cobre y en el núcleo

$$P_{cc} = P_{Cu} + P_{h+fe}$$

$$P_{cc} = \overline{U}_{cc} \cdot \overline{I}_1 \cdot \cos \varphi_{cc} \Rightarrow \text{se determina el } \cos \varphi_{cc}$$

del diagrama vectorial de la figura 18:

$$\overline{U}_R = \overline{U}_{cc} \cdot \cos \varphi$$

$$\overline{U}_X = j \cdot \overline{U}_{cc} \cdot \sin \varphi$$

$$U_r\% = \frac{R \cdot \overline{I}_1}{\overline{U}_1} 100$$

$$U_x\% = \frac{X \cdot \overline{I}_1}{\overline{U}_1} 100$$

la tensión de corto circuito porcentual

$$U_{cc}\% = \frac{\overline{U}_{cc}}{\overline{U}_1} \cdot 100$$

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS:

➤ Usos y Construcción del Núcleo: En los sistemas de transmisión y distribución eléctricos de potencia, se utiliza el sistema trifásico trifilar para altas y medias tensiones. Para la transformación de tensiones se pueden utilizar tres transformadores monofásicos interconectados para formar un sistema trifásico en triángulo, disponiendo a los mismos en un banco, de tal forma que, se utilice un transformador por cada fase, o también, utilizando un transformador trifásico de potencia equivalente. Veamos las ventajas de usar un transformador trifásico:

1. Menor costo de fabricación: Reducción notable del peso de núcleo (más de 1/3); una sola cuba; etc.
2. Mejor rendimiento.
3. Menor espacio ocupado en la playa de transformadores

4. Simplificación del mantenimiento y las operaciones de playa.

Veamos ahora las desventajas:

1. Mayor costo de las reservas cuando la capacidad económica es la demanda. Para los tres transformadores monofásicos este costo es de un tercio.
2. Mayor costo de reparación cuando la falla es por cortocircuito en una fase.

Las disposiciones más empleadas para la fabricación de núcleos son:

- De columnas con las culatas en estrella
- Acorazado con las culatas en estrella
- Acorazado de culatas dobles

Circuito magnético:

Partiendo de un sistema trifásico equilibrado y simétrico de tensiones, los flujos magnéticos que se crearán en los devanados primarios de tres transformadores monofásicos, serán también equilibrados y simétricos si los bobinados son iguales entre sí, con flujos que estarán desfasados en 120° y 240° eléctricos. Como la sumatoria de los tres flujos es siempre igual a cero, podemos reunir tres de las seis columnas y suprimirlas sin que se altere el flujo resultante. De aquí la simplificación del núcleo magnético de un transformador trifásico, donde se han reunido los tres núcleos monofásicos en uno solo compuesto de tres columnas y dos yugos. Para esta disposición, las corrientes magnetizantes de cada bobinado serán diferentes por ser de distinta longitud los caminos magnéticos para cada uno de los flujos. Estas asimetrías, son de bajo valor por ser el flujo en carga casi igual al de vacío y por ende, las corrientes magnetizantes del orden del 4% al 8% de las nominales. De aquí que a plena carga, el transformador trifásico pueda comportarse como un sistema trifásico simétrico.

Diagrama vectorial:

Como hemos partido de tres transformadores monofásicos idénticos, cada uno aportará un diagrama vectorial igual al que ya estudiamos, con la salvedad que cada uno estará desfasado de los otros en 120° y 240° respectivamente.

➤ Puesta en paralelo de transformadores trifásicos:

El aumento de la disponibilidad de potencia eléctrica en los centros de transformación para transmisión y/o distribución, lleva a la necesidad de la puesta en paralelo de transformadores, básicamente trifásicos, la que puede llevarse a cabo por el acople en paralelo de sus secundarios o bien, por el de sus primarios y secundarios a la vez. Tomando el segundo caso, estableceremos las condiciones que se deben cumplir para realizar una puesta en paralelo exitosa:

1. *Igual desfase secundario respecto del primario.*
2. *El sentido de rotación de las fases secundarias ha de ser el mismo en todos los transformadores*

Estas dos condiciones son excluyentes para la puesta en paralelo. La primera esta relacionada con los grupos de conexión de los transformadores trifásicos, los que a su vez, están determinados por los tres tipos principales de conexión: estrella, triángulo y zig-zag. Los diagramas vectoriales correspondientes a cada conexión, reflejan los

desfasajes que se producen entre primario y secundario de cada transformador, pudiendo tener como consecuencia, diferencias angulares entre fases homologas, lo que invalidaría la puesta en paralelo (ver apéndice). La segunda de no cumplirse, crearía entre fases homologas, diferencias de potencial de hasta el doble de la tensión nominal.

3. Igual relación de transformación y tensiones de línea.

Si bien esta condición no es excluyente, solo se admite una diferencia en la relación de transformación que no exceda en un 0,5% de la tensión nominal. Esto provoca una circulación de corrientes entre los transformadores que puede ser dañina para los bobinados.

4. Iguales las tensiones de cortocircuito % y en lo posible, iguales también las componentes resistivas e inductivas.

Si bien esta condición no es excluyente, afecta al rendimiento de la instalación. Cuando las $U_{cc} \%$ son iguales y sus componentes, las corrientes de carga se suman aritméticamente y por tanto las potencias, dando un rendimiento de uno. Cuando hay diferencias, la suma es algebraica y el rendimiento cae en proporción al desfase entre las corrientes de carga.

5. La relación de potencias se admite hasta 1:5

Si bien esta condición no es excluyente, esta en relación directa con la condición anterior (N° 4), porque al aumentar la potencia del transformador, aumenta también su U_{cc} y por tanto, dejan de ser iguales.

UNIDAD Nº 2

Máquinas de C.C. Principios de funcionamiento. Reacción de inducido. Clasificación. Generadores de C.C. Tipos. Curvas características. Conexión en paralelo. Motores de C.C. Principios básicos de funcionamiento. Motor paralelo, serie y compuesto. Curvas par-velocidad y potencia-velocidad. Control de la velocidad.

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

2.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

2.1.1 Principio de funcionamiento.

► **Devanado de Estator (campo):**

- **Objetivo:** producir el campo que posibilita la conversión de energía.

► **Devanado del rotor (armadura):**

- **Objetivo:** realizar la conversión de energía eléctrica-mecánica.

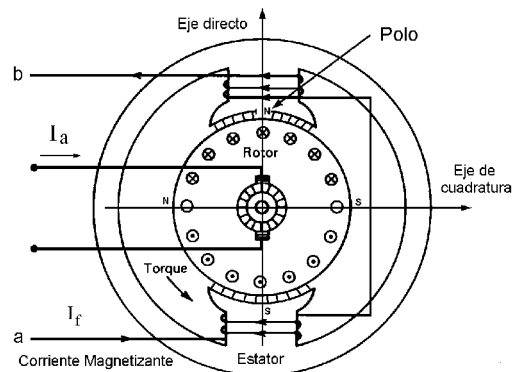


Fig.2.1.: Esquema básico de una máquina de corriente continua.

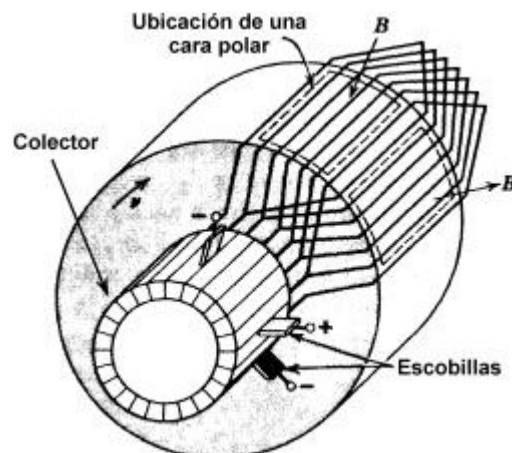


Fig.2.2.: Diagrama de alimentación del rotor de una máquina de corriente

continua.

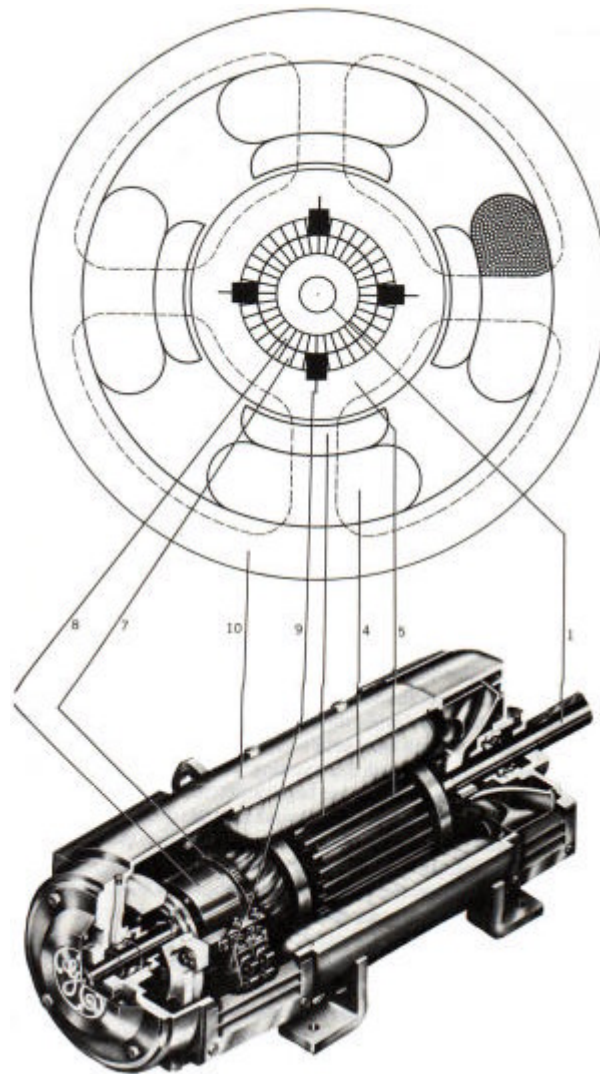


Fig.2.3.: Visión global de una máquina de corriente continua.

El sentido de giro de las máquinas eléctricas se determina, por lo general, desde el eje. Al mirar la máquina desde ese lado, se denomina “giro a la derecha” si ésta gira en sentido reloj, y “giro a la izquierda” si ésta gira en sentido contrareloj. El giro normal es el de la derecha.

2.1.2. La reacción de armadura.

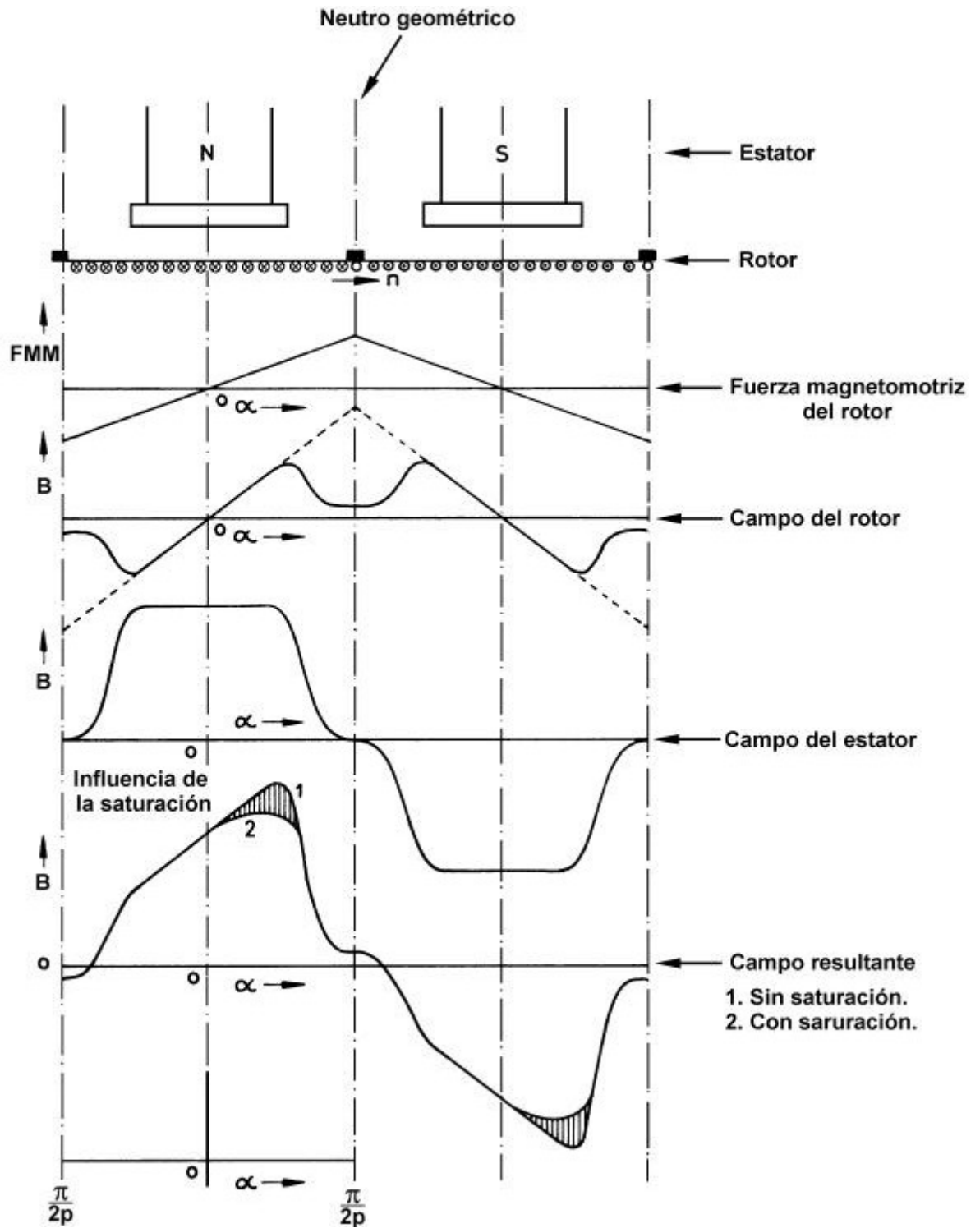


Fig.2.4. Campos de la máquina de corriente continua.

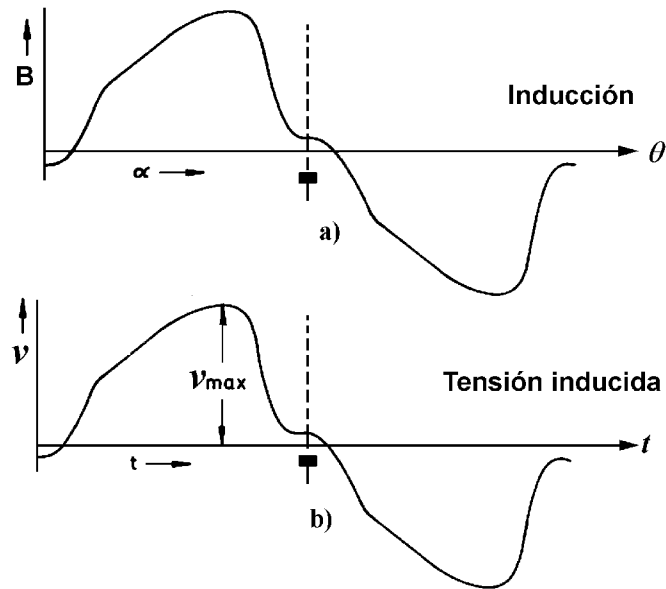


Fig.2.5.: Efecto del campo en la tensión inducida en una bobina.

2.1.3 El circuito eléctrico equivalente de la máquina de corriente continua.

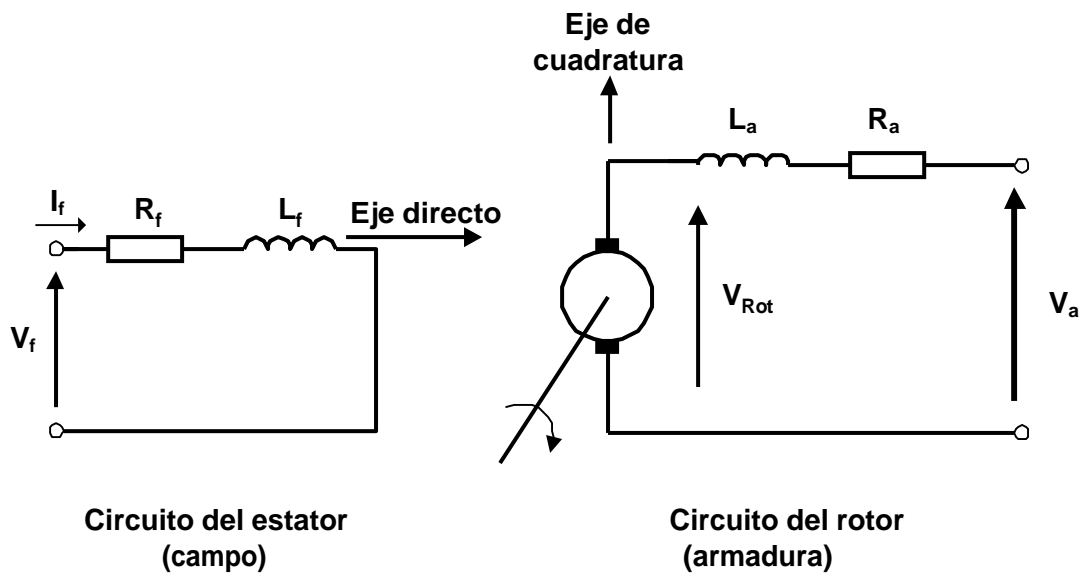


Fig.2.6.: Circuito equivalente.

2.1.4 Medidas para compensar los efectos de la reacción de armadura.

► Uso de devanados de compensación

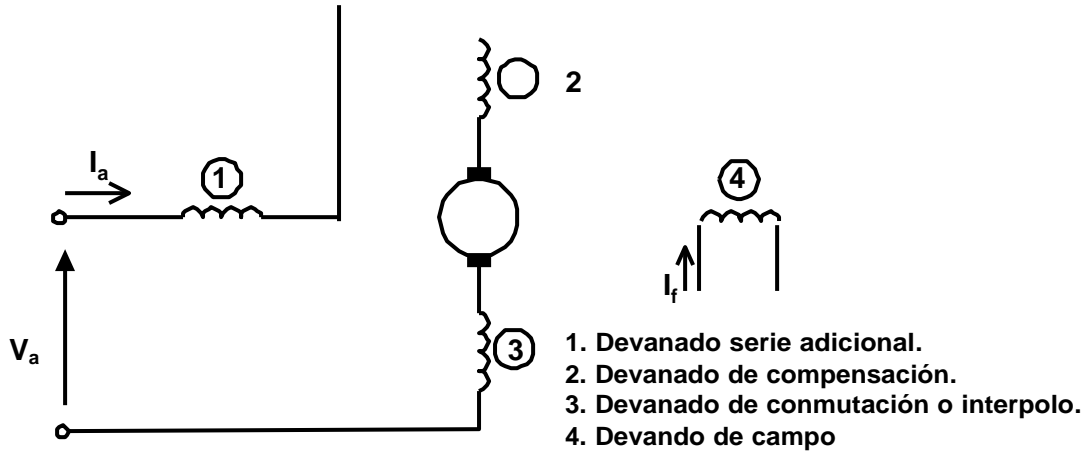


Fig.2.7.: Devanados de compensación en una máquina de corriente continua.

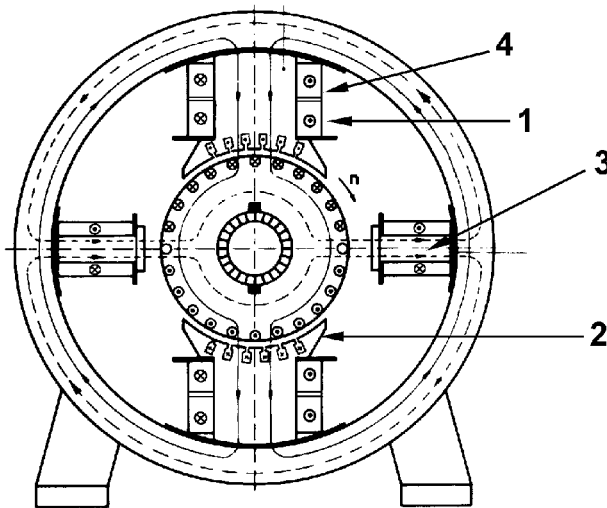


Fig.2.8.: Disposición física de los devanados de compensación.

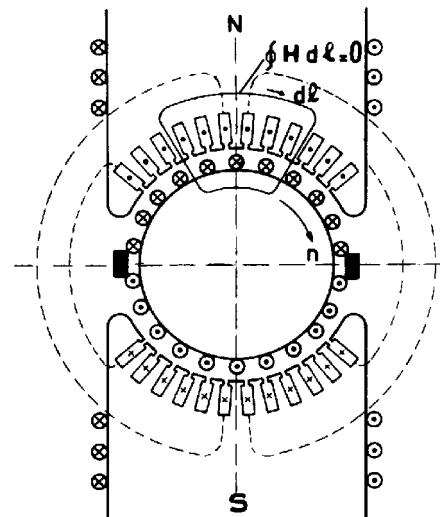


Fig.2.9.: Vista detallada de un devanado de compensación.

2.2. ECUACIONES GENERALES DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.

2.2.1 Ecuaciones del generador.

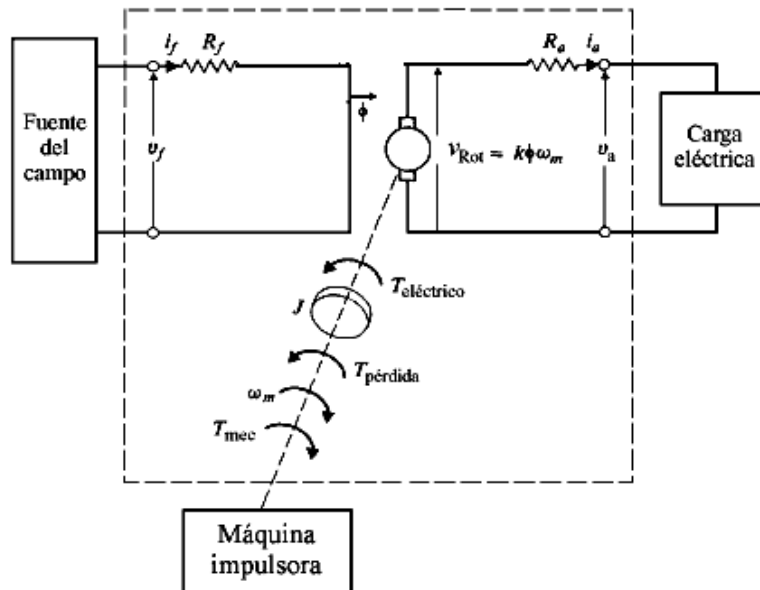


Fig.2.10. Circuito equivalente de un generador de corriente continua.

En general, al ser ésta máquina de excitación independiente, en el circuito eléctrico del rotor encontramos los arrollamientos de la armadura o inducido que tienen una resistencia (R_A) y según el tamaño de la máquina, los arrollamientos de los polos de conmutación (R_W) y los de compensación (R_K). Como estas resistencias están en serie se pueden reemplazar por una resistencia interna total (R_i), también llamada (R_a) (de armadura):

$$R_i = R_A + R_W + R_K$$

Aplicando Kirchhoff al circuito de la fig.2.10, la ecuación de la tensión en los generadores de c.c. resulta:

$$E = V_a + (\sum I_i \cdot R_i + 2 \cdot \Delta V_e) \quad (V) \quad (2)$$

Multiplicando por la corriente de inducido o de carga I_i obtenemos la ecuación energética de la máquina: (ver fig. 2.21.a)

$$E \cdot I_i = V_a \cdot I_i + \sum R_i \cdot I_i^2 + 2 \cdot \Delta V_e \cdot I_i \quad (W)$$

2.2.2 Ecuaciones del motor.

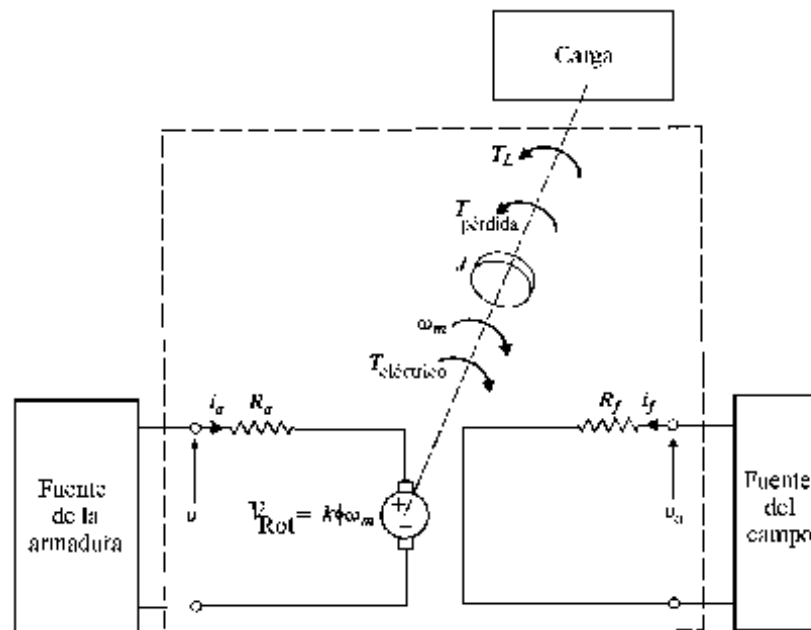


Fig.2.11.: Circuito equivalente del motor de CC.

La máquina eléctrica de CC de la fig. 2.11 es en principio la misma que la de la fig. 2.10, por lo que son válidas las mismas consideraciones realizadas para la resistencia del circuito del rotor R_i . Aplicando Kirchhoff al circuito de la fig.2.11, la ecuación de la tensión en los motores de C.C. resulta:

$$U - E = \sum R_i \cdot I_i + 2 \cdot \Delta V_e \quad (2.2.a)$$

$$U = E + (\sum R_i \cdot I_i + 2 \cdot \Delta V_e) \quad (2.2.b)$$

La diferencia de signos entre la U (tensión aplicada desde la red o fuente de C.C.) y la E en la ecuación 2.2.a muestra también porqué la f.e.m. inducida E se llama fuerza contra electromotriz del motor. (En el capítulo 2.5 se trata más extensamente el tema).

2.2.3 Clasificación de las máquinas de corriente continua.

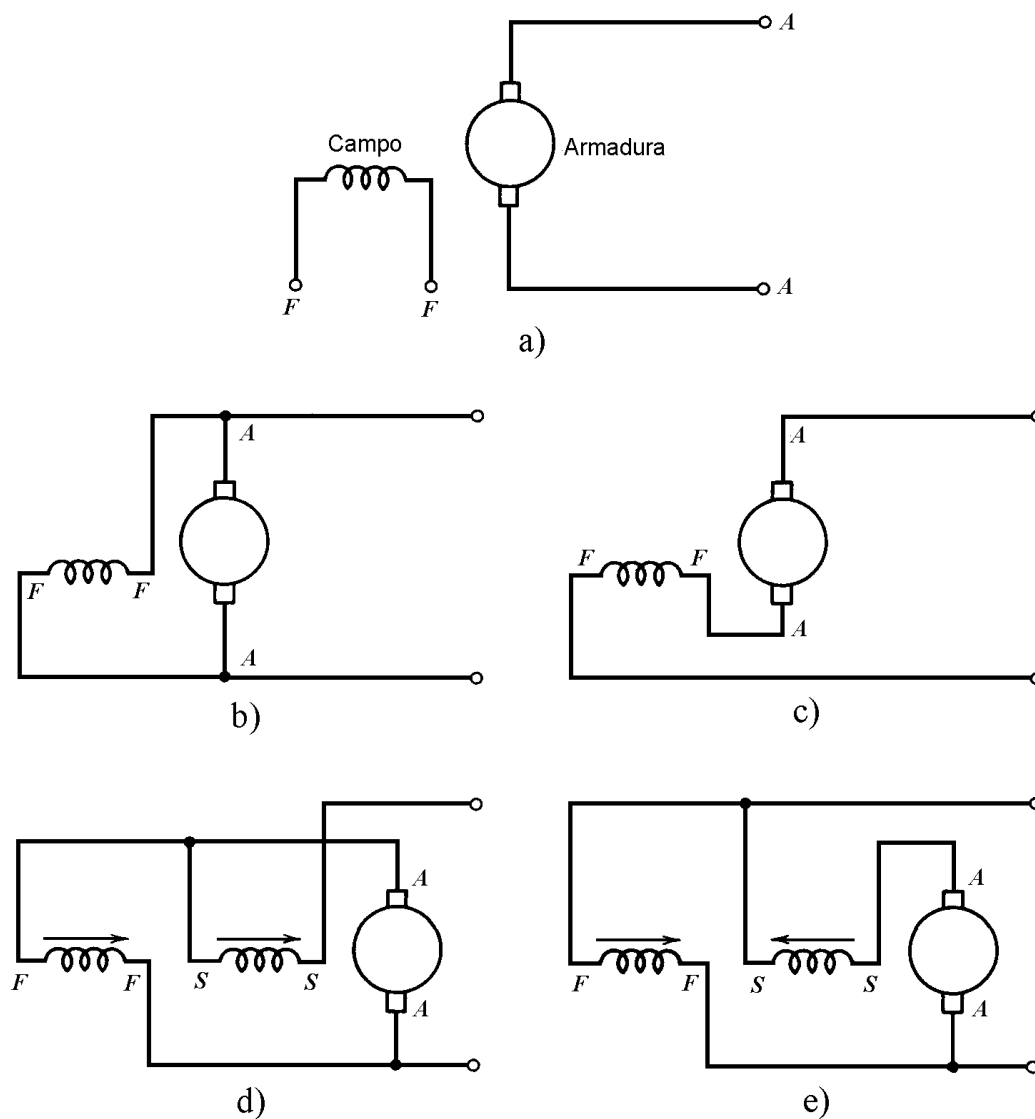


Fig.2.12.: Conexiones de algunas máquinas de corriente continua: **a)** de excitación independiente; **b)** shunt; **c)** serie; **d)** compensada acumulativa; **e)** compensada diferencial.

2.3 GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA:

2.3 Generadores de corriente continua

Según la fuente de energía empleada para la generación del campo magnético en el generador, éstos se pueden dividir en dos tipos principales:

1. Excitación independiente o separada
2. Auto excitados

2.3.1 Generador de excitación independiente:

Funcionamiento en vacío: Las características de funcionamiento de los generadores se estudiarán, en un comienzo, en uno de los estados más fáciles, el de vacío ($I=0$).

En las espiras de la armadura del generador en vacío, se genera una tensión

$$U_q \propto F \cdot n$$

$$U_q = k_1 \cdot F \cdot n \quad (2.3)$$

Por lo general, en la práctica, la velocidad del generador es constante, ya que está gobernada por un regulador de velocidad en la máquina o motor impulsor; es por eso que la ecuación de la tensión queda:

$$U_q \propto f(F)$$

Entonces, en vacío, la tensión en el generador $U_0 = U_q$ sólo depende del flujo polar y con eso de la corriente de excitación I_E .

Característica de Vacío o Curva de Magnetización: La función $U_0 = f(I_E)$, (con $I=0$ y n = constante) se llama característica de vacío de un generador. En la medición de vacío (diagrama de conexiones fig. 2.13) se conecta la bobina de excitación del generador (terminales E_1 y E_2) a través de un reóstato de variación continua (R_F) a una fuente existente de corriente continua con los bornes P' y N' . Este tipo de excitación se llama **excitación independiente** debido a que una fuente separada de corriente continua existente e independiente, entrega la corriente de excitación.

Otro tipo de excitación independiente constante se obtiene en generadores pequeños con imanes permanentes.

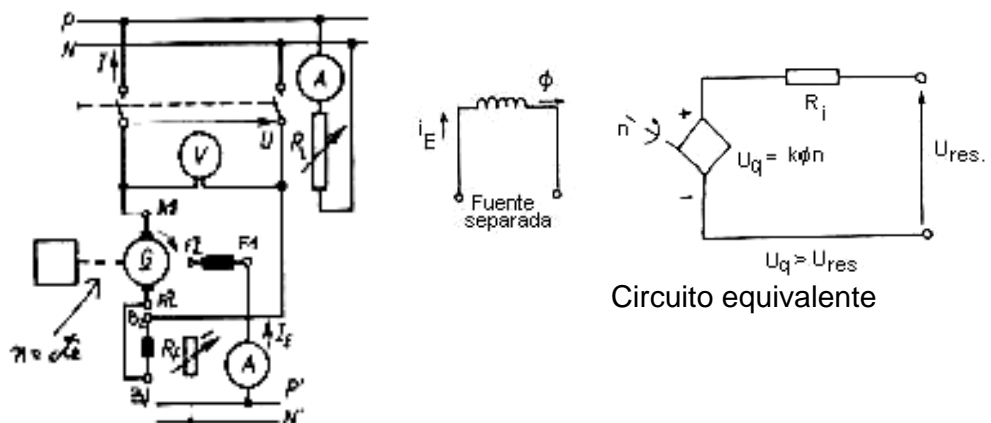


Figura 2.13 Obtención de la característica en vacío y en carga de un generador de excitación independiente

Denominación de terminales y sentido de giro: En la fig. 2.13 se emplearon las denominaciones de terminales según DIN 57 570, es decir:

- red de corriente continua P-N,
- armadura A_1 - A_2 ,
- polos de conmutación B_1 - B_2 ,
- bobina de excitación independiente F_1 - F_2

Las máquinas rara vez tienen en la caja de conexiones los 6 terminales (A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , F_1 , F_2). Por lo general, en el interior de la máquina ya está conectada la armadura en serie con los polos de conmutación (unión A_2 - B_1) de manera que en la caja de conexiones sólo aparecen 4 terminales A_1 , B_2 , F_1 , F_2 .

Graficando los valores U_0 e I_E medidos en la máquina según la conexión de la fig. 2.13 se obtiene la característica en vacío (fig. 2.14) también llamada **Curva de Magnetización de la Máquina** debido a que U_0 es proporcional al flujo.

Con la bobina de excitación desconectada ($I_E = 0$) genera la máquina, con el flujo de remanencia, una tensión de remanencia U_{0R} cuyo valor es aproximadamente 5 a 10% de la tensión nominal U_N .

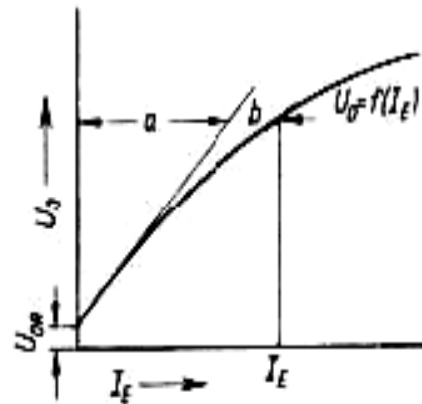


Figura 2.14 Característica de vacío $U_0 = f(I_E)$ de un generador de C.C. de excitación independiente para $n = \text{cte}$.

Al volver a conectar el circuito eléctrico de la excitación e incrementada la corriente de excitación I_E , el flujo magnético crecerá y con eso U_0 crecerá primeramente en forma lineal, debido a que el hierro no estará saturado, debido a la influencia del entrehierro.

Al seguir incrementando la corriente de excitación, la saturación del hierro empezará a influenciar en la curva, la cual se aplanará. La porción de magnetización para el entrehierro que está representada en la fig. 2.14, por el trecho a, crece linealmente; la porción del hierro b, crece según la curva de magnetización, de manera que la corriente de excitación debe crecer cada vez más para conseguir un incremento determinado de flujo magnético y con eso de tensión.

La curva de vacío o de magnetización, da una buena impresión de las relaciones magnéticas de las máquinas eléctricas. Ella muestra como la tensión U_0 se puede variar variando la corriente de excitación I_E . La medición de vacío se efectúa hasta la mayor corriente de excitación posible, la cual induce una tensión U_0 de 10 a 30% mayor que la U_N . Esta reserva de tensión es necesaria al cargar el generador.

En máquinas con imanes permanentes, el flujo magnético es constante, la tensión de terminales U_0 se puede variar, según la ecuación (2.3), sólo aumentando la velocidad. Tienen aplicación en generadores de pequeña potencia, por ejemplo indicadores de RPM.

Funcionamiento con carga: El generador de excitación independiente está conectado según la fig. 2.13. Al cerrar el interruptor, la resistencia de carga variable R_L hará circular la corriente I . Esta corriente de armadura o de carga I de la máquina, circula por los

arrollamientos de la armadura que tiene una resistencia R_A y, según el tamaño de la máquina, por los arrollamientos de los polos de conmutación (R_W) y los de compensación (R_K). Como estas resistencias están en serie se pueden reemplazar por una resistencia interna total (R_i):

$$R_i = R_A + R_W + R_K$$

En R_i habrá una pérdida (caída de tensión) $I \cdot R_i$, de manera que la tensión en los terminales A-H del generador será:

$$U = U_q - I \cdot R_i \quad (2.4)$$

Se tiene que $U < U_q$ en $I \cdot R_i$ y con ello dependiente de la corriente de carga I .

Característica externa (en carga): $U = f(I)$ (con $I_E = \text{constante}$ y $n = \text{constante}$) según la fig. 2.13 con el interruptor cerrado, el generador es impulsado con una velocidad constante y la corriente de excitación I_E es mantenida constante con ayuda del reóstato R_F .

Al ir variando la resistencia de carga R_L se miden pares de valores de U e I entre vacío y carga nominal. Se obtiene con esto la característica de carga $U = f(I)$, mostrada en la fig. 2.15. Debido a que se mantienen constante n e I_E , U_q también es constante (según la ecuación (2.3), de manera que la tensión de terminales U del generador, entre vacío y plena carga cae linealmente (según la ecuación (2.4). La pérdida o caída de tensión entre vacío y plena carga es de un 5% en máquinas grandes y de aproximadamente 10 a 20% en máquinas medianas y chicas.

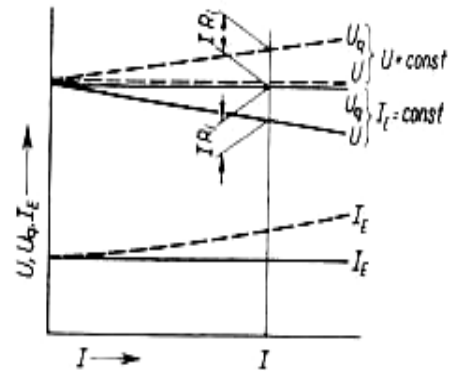


Figura 2.15 Característica de carga $U = f(I)$ de un generador excitación separada. $I_E = \text{constante}$ y $n = \text{constante}$

La baja de tensión en terminales al aumentar la carga es indeseada debido a que los artefactos eléctricos por lo general se diseñan para ser alimentados con la tensión nominal o de placa. Según la ecuación (2.4) se obtiene una tensión de terminales U constante, si U_q es siempre mayor que U en un factor $I \cdot R_i$. Esto se puede obtener aumentando la corriente de excitación I_E de acuerdo con la característica de vacío de la fig. 2.14. Esta variación de la corriente de excitación se dibujó también en la fig. 2.15 con líneas segmentadas.

2.3.2 Generador Auto excitado:

En la excitación separada, como se vio en el capítulo anterior, la corriente de excitación se extrae de una fuente de tensión independiente. Esto se puede realizar alimentando la bobina de excitación desde una red de corriente continua separada (fig. 2.15) o desde un pequeño generador (excitatriz) que está acoplado al mismo eje del generador principal. Este último tipo se llama **excitación propia**.

Para la auto excitación, no es necesario una fuente de tensión ajena para el suministro de la corriente de excitación, el generador se auto excita como muestra la fig.

2.16; se auto suministra su corriente de excitación. Esto sólo es posible si en la máquina queda un pequeño campo magnético (remanente).

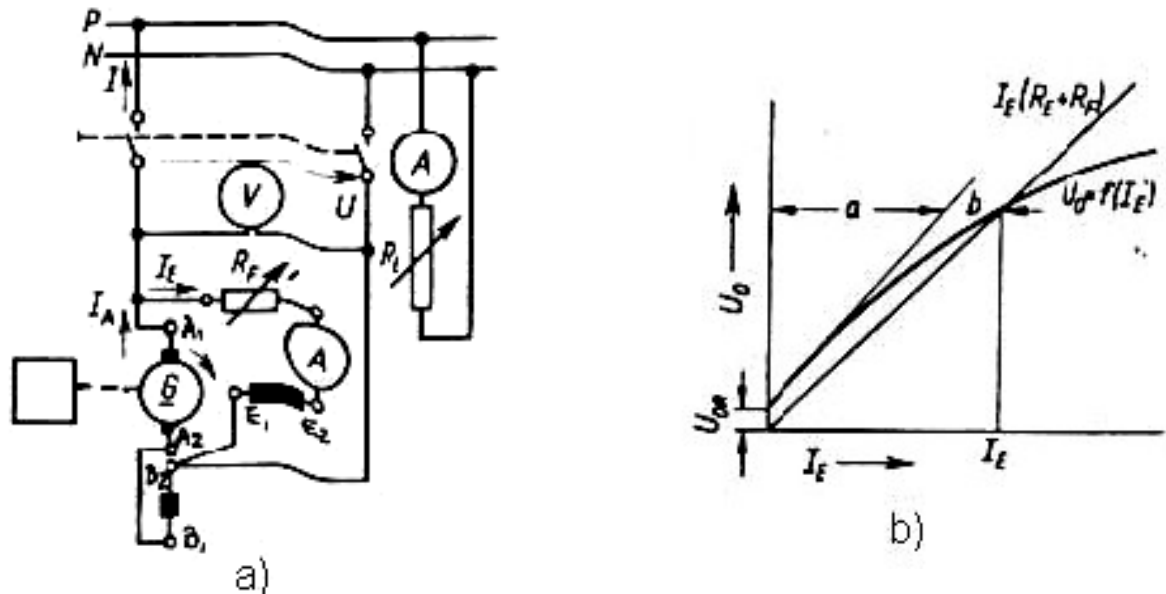


Figura 2.16 Obtención de las curvas características de un generador auto excitado

Característica de Vacío: En la fig. 2.16.a, al conectar (para auto excitación) la bobina de excitación (E_1 - E_2), en paralelo con la armadura (excitación en derivación o shunt) la tensión de remanencia U_{0R} (fig. 2.16.b) produce primero una pequeña corriente de excitación, en la bobina de excitación. Cuando el campo magnético producido por esta pequeña corriente de excitación tiene el mismo sentido que el campo remanente, aumentará el campo magnético de la máquina. Con esto aumenta la tensión generada U_0 y con ello nuevamente la corriente de excitación, el campo y la tensión generada U_0 , etc. En pocos segundos se establece una tensión que resulta de la intersección de la recta de la resistencia $U_0 = I_E(R_E + R_F)$ con la característica de vacío $U_0 = f(I_E)$ (fig. 2.16.b). Si se quiere variar la tensión de la máquina, se varía la resistencia del reóstato de excitación R_F . Con esto varía la inclinación de la recta de resistencia, resultando un punto de intersección distinto para U_0 .

Característica externa (en carga): $U = f(I)$ (con $I_E = \text{constante}$ y $n = \text{constante}$). Después que el generador se auto excitó en vacío hasta la tensión $U_0 = U_q$, se carga el generador con la resistencia de carga R_L , cerrando el interruptor de la fig. 2.16. Ahora la corriente de armadura I_A se divide en una corriente hacia la red (I) y una corriente de excitación (I_E):

$$I_A = I + I_E$$

Por la pérdida de tensión en el interior de la máquina, se reduce la tensión de terminales U , tomando el valor de:

$$U = U_q - I_A \cdot R_i$$

Esta nueva tensión de terminales U , que también está aplicada al circuito de excitación, disminuye al aumentar la carga. Por esto al mantenerse constante la resistencia del circuito de excitación, la excitación disminuye, con lo cual también disminuye U_q ; por lo tanto, la máquina auto excitada tiene una variación de tensión mayor (fig. 2.17) que la máquina de excitación separada (fig. 2.15) a corriente de excitación constante. Esto es válido bajo la suposición que la resistencia del circuito de excitación se mantiene constante. Con la auto excitación está la ventaja de ahorrarse una fuente separada de corriente continua para la excitación, pero su costo se traduce en una característica de carga más desventajosa comparada con la de excitación independiente.

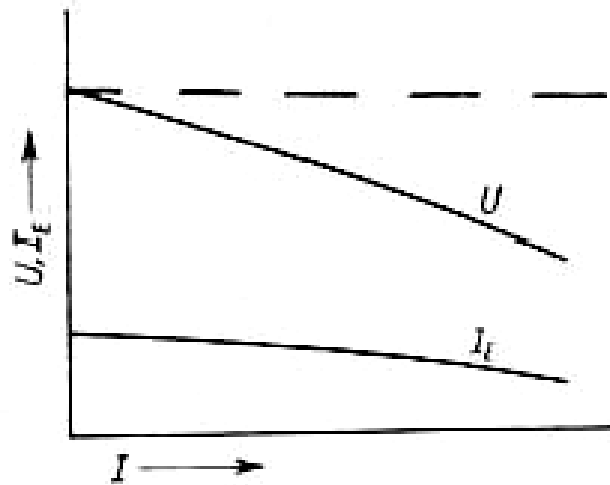


Figura 2.17 Características de carga $U = f(I)$ del generador auto excitado con circuito de excitación de resistencia constante, $n = \text{cte}$.

Si se aumenta la corriente de excitación I_E en función de la carga (ver curva segmentada fig. 2.15) se puede obtener, con auto excitación, una tensión de terminales constante. Lo anterior se puede conseguir empleando un regulador de tensión que varíe el reóstato de excitación automáticamente, obtiene así un generador de corriente continua con auto excitación en derivación, con tensión de terminales constante.

2.3.3 Generador de Auto-excitación Compensada (Compound):

En la máquina de la fig. 2.18.a se tiene una bobina de excitación en derivación (terminales D_1-D_2) y una bobina de excitación en derivación más pequeña (terminales E-F) enrollados en los mismos polos magnéticos. En vacío, prácticamente sólo actúa la excitación en derivación. Al aumentar la carga, el campo magnético aumenta por efecto de la bobina de excitación en serie, con lo cual se aumenta U_q . Para casos especiales se puede conectar la bobina serie de manera que disminuya el campo magnético (excitación compuesta diferencial). Dependiendo de la relación de los flujos de ambas bobinas, se obtienen distintas características de carga (fig. 2.18.b) con tensión de terminales constante (curva a) o incluso con tensión de terminales aumentando (curva b). Con esto se puede, algunas veces, ahorrar el regulador de tensión e incluso se puede compensar la pérdida de tensión en la línea entre el generador y el consumidor.

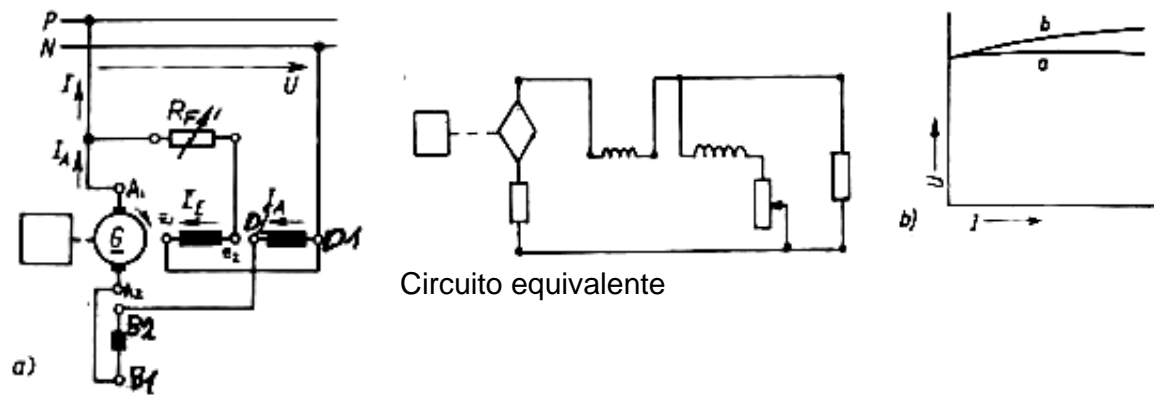


Figura 2.18 Generador de C.C. de auto excitación compensado
a) circuito de conexiones b) características de carga

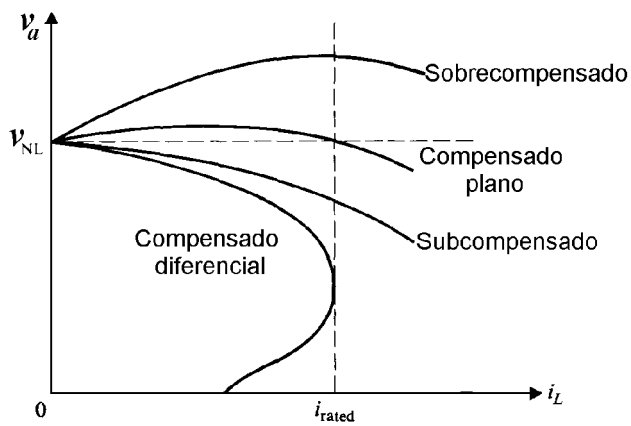


Fig. 2.19: Característica de carga de un generador auto-excitado compensado

2.3.4 Generadores en paralelo a una red:

Funcionamiento en vacío: conexión

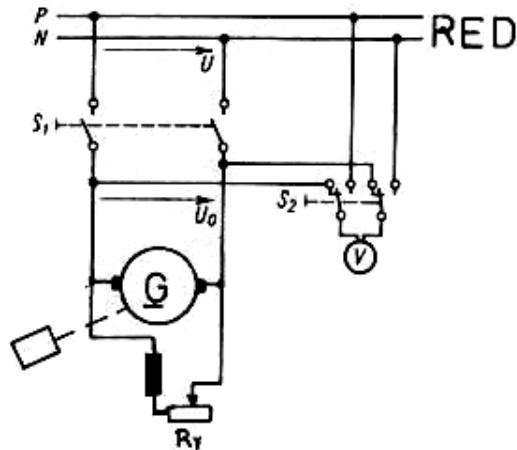


Figura 2.20 Funcionamiento en paralelo de un generador en una red de corriente continua

Al conectar por intermedio del interruptor S_1 (fig. 2.20), un generador de corriente continua en derivación a una red de corriente continua de tensión U sobre la cual trabajan otros generadores o baterías, se desea que la conexión se realice sin perturbaciones eléctricas. Esto se obtiene cuando los valores de las tensiones U_0 y U y sus sentidos son iguales. Esta condición se comprueba, según la fig. 2.20 con un voltímetro de bobina móvil. Si en ambas posiciones del selector S_2 , la deflexión tiene el mismo sentido y es de igual magnitud, entonces la magnitud y la polaridad de U_0 y U será la misma. Si las magnitudes son diferentes es posible variar la de U_0 ajustando el reóstato R_F (fig. 2.13). Si las polaridades son distintas se puede cambiar los terminales del generador en el interruptor S_1 .

Funcionamiento con carga:

Después de conectar se aumentará lentamente, con ayuda del reóstato R_F , la corriente de excitación I_E . Si la velocidad de la máquina impulsora se mantiene constante, por el uso de un regulador de velocidad, aumentará U_q sobre U y circulará corriente desde el generador hacia la red, el generador generará energía eléctrica (ver ecuación 2.4). Por intermedio de la variación de la corriente de excitación del generador, se puede gobernar la entrega de potencia del generador hacia la red.

Desconexión:

Antes de desconectar el generador de la red, se recomienda variar la corriente de excitación de manera que el generador no entregue corriente a la red ($U = U_0$). Ahora se puede desconectar el generador y se puede posteriormente detener la máquina impulsora.

2.4.1 Diagramas Sankey

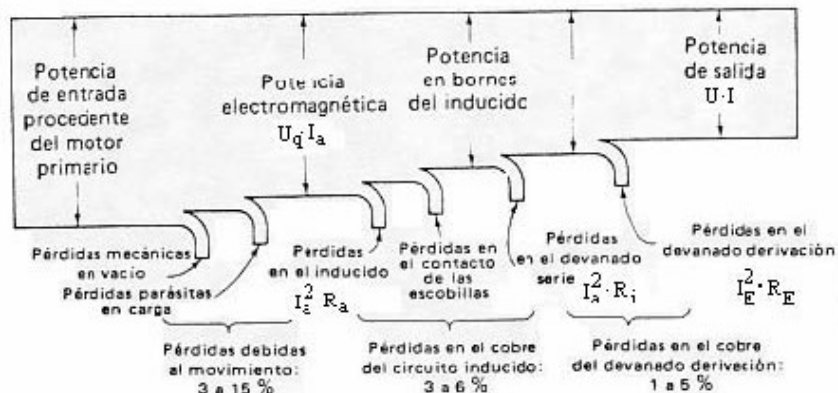


Figura 2.21.a Reparto de potencia en un generador de corriente continua

2.5 MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

2.5.1- Características generales

Ya se dijo al estudiar el principio de funcionamiento de la máquina de corriente continua que la misma, como todo convertidor electromecánico de energía es reversible. Si se conecta convenientemente a una red eléctrica distribuidora de tensión continua, la energía eléctrica que la máquina absorberá será restituida bajo forma mecánica en el eje. Supuestas las pérdidas despreciables, en todo momento tendremos que la potencia eléctrica absorbida será igual a la potencia mecánica desarrollada. Todos los tipos de máquinas de corriente continua que estudiamos al considerar el funcionamiento como generador de este convertidor, tienen pues sus equivalentes como motor. De ahí las designaciones de motor serie, derivación, compuesto, independiente, según la conexión del devanado de excitación con relación al devanado inducido. También existen y cada día encuentran más aplicaciones, motores de corriente continua excitados por imanes permanentes.

El proceso de conversión de energía que tiene lugar en todos estos tipos de motores es derivado de los principios fundamentales que ya se analizaron, que son inducción de una f.e.m. y creación de un par electromagnético. F.e.m. inducida y par electromagnético se hallan siempre presentes. En el caso de los motores, la f.e.m. aparece como reacción del campo magnético de acoplamiento sobre el sistema eléctrico y actúa por tanto en sentido opuesto al de la corriente que toma el inducido de la red, de ahí que también sea llamada en estos casos fuerza contraelectromotriz. La expresión de esta f.c.e.m. así como la del par electromagnético interno desarrollado por el motor, son idénticas a las que se determinaron para el funcionamiento como generador a partir de los principios fundamentales citados:

$$\text{Fuerza electromotriz } E = \frac{p \cdot n}{a \cdot 60} \cdot N \cdot F \quad (V)$$

$$\text{Par electromagnético } M = \frac{p}{2 \cdot p} \cdot I_l \cdot N' \cdot F \quad (N \cdot m)$$

Al ser la f.e.m. opuesta a la tensión aplicada al inducido tendremos la siguiente conocida ecuación:

$$U_i - E = (R_i + R_a) \cdot I_i + 2 \cdot u_e$$

Multiplicando ambos miembros por I_i , tendremos:

$$U_i \cdot I_i - E \cdot I_i = (R_i + R_a) \cdot I_i^2 + 2 \cdot u_e \cdot I_i$$

El primer miembro $U \cdot I_i$, es la potencia eléctrica absorbida por el inducido y $E \cdot I_i$, la potencia eléctrica interna transformada toda ella en mecánica. Su diferencia como pone de manifiesto la ecuación anterior y el principio general de transformación de la energía podíamos ya prever, corresponde a la potencia perdida por efecto Joule en las resistencias de los circuitos del inducido y en los polos auxiliares y por caída de tensión en las escobillas. No toda la potencia mecánica se desarrolla en el inducido:

$$E \cdot I_i = M \cdot \omega \quad \omega = \frac{2 \cdot p \cdot n}{60}$$

Una parte de esta potencia se disipa en calor por causa de las denominadas pérdidas en el hierro de inducido, por histéresis magnética y corrientes parásitas, por los inevitables roces mecánicos y pérdidas adicionales. La potencia útil que resta es la potencia útil que cede el motor al sistema mecánico. Como ilustrativo de lo precedente, se muestra el diagrama de Sankey:

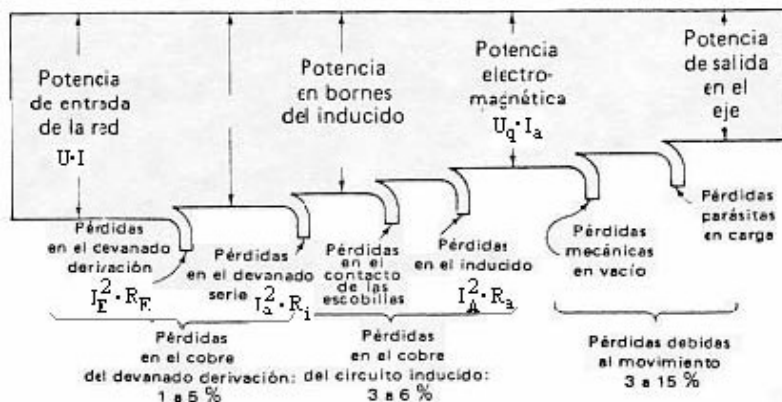


Figura 2.21.b Reparto de potencia en un motor de corriente continua

En los motores eléctricos, a diferencia de las restantes máquinas motrices, el equilibrio de los pares motor y resistente, requisito fundamental de un régimen a velocidad constante o estacionario, es automático, sin precisar por tanto el auxilio de un regulador de velocidad, como es general en el resto de máquinas motrices. El papel de regulador es desempeñado por la f.c.e.m. inducida, la cual ajusta en todo momento su valor al necesario para alcanzar aquel equilibrio. Si consideramos la expresión anterior:

$$U_i - E = (R_i + R_a) \cdot I_i + 2 \cdot u_e$$

Obtendremos el valor de la intensidad de inducido:

$$I_i = \frac{U_i - E - 2 \cdot u_e}{R_i + R_a}$$

Esta corriente es la que nos determina el par mecánico interno que desarrolla el motor, según la expresión simplificada conocida:

$$M = C_2 \cdot I_i \cdot \phi$$

Par que en régimen estacionario es equilibrado por el par resistente mecánico, suma del par útil, en el eje de salida del motor y del par equivalente a las pérdidas en el hierro, mecánicas y adicionales:

$$M = M_u + M_p$$

Si en un determinado momento se produce un incremento del par resistente mecánico, por la causa que fuere, el motor tenderá rápidamente a perder velocidad y dado que a flujo sensiblemente constante, la f.e.m. es proporcional a la velocidad, la f.e.m. disminuirá también. Al disminuir E, la corriente de inducido, aumentará y en consecuencia aumentará el par motor hasta alcanzar el valor del nuevo par resistente. Inversamente si el par resistente se reduce, la diferencia de pares será positiva, aparece un par acelerador que tenderá a incrementar la velocidad y la f.e.m. Con ello disminuye la diferencia $U_i - E$ y en consecuencia la corriente del inducido I_i . A menor corriente, menor par motor, el par acelerador se reduce hasta que al igualarse de nuevo el par motor al par resistente se establece el equilibrio si bien a una velocidad ligeramente superior a la inicial.

De ahí se desprende también que la velocidad de un motor eléctrico no viene definida de una manera absolutamente precisa a priori, sino que esta establece a tenor del par útil que se le exigirá. La corriente absorbida de la red viene asimismo fijada por el par que se le exige.

2.- Velocidad y par

Aun cuando podemos determinar el par electromagnético que se desarrolla en el inducido de la máquina de corriente continua, aplicando por ejemplo el punto de vista electromagnético, que se basa en la acción de un campo magnético sobre una capa de corriente, es mucho más interesante deducirlo a partir de la fuerza electromagnética que actúa sobre cada conductor del inducido, cuando es recorrido por una corriente y se halla bajo la acción de un campo magnético de inducción B_c . Esta fuerza, cuando el conductor es normal al campo magnético, vale:

$$F_c = B_c \cdot l \cdot i_c \quad N$$

Y determina sobre el eje de giro de la máquina un par:

$$M_c = B_c \cdot l \cdot i_c \cdot R \quad N \cdot m$$

El sentido de la fuerza electromagnética y en consecuencia el par de giro se obtendrá aplicando la regla de la mano izquierda. El par total de la máquina será la suma algebraica de los pares determinados por los N' conductores de su devanado inducido, pares que estando las escobillas sobre las zonas neutras, son todos de igual sentido. En consecuencia:

$$\sum_1^{N'} B_c \cdot l \cdot i'_c \cdot R = l \cdot i_c \cdot R \cdot \sum_1^{N'} B_c$$

Con un número elevado de conductores N' , el valor total de la sumatoria de B_c es igual al valor medio de la inducción multiplicado por el número de conductores N' , es decir:

$$\sum_1^{N'} B_c = N' \cdot B$$

La inducción B es igual a:

$$B = \frac{\phi}{t_p \cdot l} = \frac{\phi}{\frac{2 \cdot \pi \cdot R}{2 \cdot p} \cdot l} = \frac{p \cdot \phi}{\pi \cdot R \cdot l}$$

$p \Rightarrow$ nº de pares de polos

Y la corriente i_c , a:

$$i_c = \frac{I_i}{2 \cdot a}$$

$a \Rightarrow$ nº de ramas en paralelo en el inducido

Valores que sustituidos en la expresión del par, nos dan el par total la expresión:

$$M = \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot I_i \cdot N' \cdot \phi$$

Esta expresión también puede escribirse de la siguiente forma:

$$M = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot (2 \cdot p \cdot \phi) \cdot \left(N' \cdot \frac{I_i}{2 \cdot a} \right)$$

Que dice que el par electromagnético de la máquina de corriente continua es proporcional al producto del flujo de todos los polos por la corriente de todos los conductores del inducido. Considerando que en una máquina construida p , a y N' son valores conocidos y constantes, podemos escribir la fórmula del par en la siguiente forma simplificada:

$$M = C_2 \cdot I_i \cdot \phi \quad N \cdot m$$

Siendo:

$$C_2 = \frac{p}{2 \cdot p \cdot a} \cdot N'$$

Como se dijo al estudiar la expresión de la f.e.m. inducida, si las escobillas no están sobre la línea neutra, sino desplazadas un cierto ángulo, el par de algunos conductores del inducido será de sentido opuesto a los restantes y en consecuencia el par total resultará inferior al que nos da la fórmula anterior. Puesto que el desplazamiento de las escobillas, cuando tiene lugar suele ser siempre de muy pequeña cuantía, apenas afecta prácticamente al valor del par. Este par electromagnético llamado también par interno de la máquina, se halla siempre presente en el servicio de la máquina de corriente continua, tanto si actúa como motor o como si lo hace como generador. En el primer caso, el par interno es un par motor que tiende a hacer girar la máquina venciendo a otros pares opuestos resistentes. En el segundo caso el par interno actúa en el sentido de oponerse al movimiento de giro de la máquina impuesto por el motor primario que la acciona, es decir

actúa como un par resistente.

3.- Arranque del motor de corriente continua

La primera fase que se presenta en el funcionamiento de un motor con su carga, es la del arranque o puesta en marcha. En el instante inicial, velocidad nula del sistema motor-carga, el motor debe desarrollar un par superior al que exige la carga, de lo contrario el sistema estará en reposo, con el peligro que la corriente que circula por el motor, por su elevado valor, pueda dañarlo. Para prevenir esta contingencia es obligado proteger el motor por adecuados cortacircuitos fusibles o interruptores automáticos, que separen el motor de la red de alimentación caso de mantenerse excesivo tiempo la corriente anormal. Estas consideraciones aplicables a todos los tipos de motores eléctricos, en el caso particular del motor de corriente continua obligan a tomar determinadas providencias si queremos limitar la corriente inicial de conexión, así como la que absorberá durante el periodo de aceleración, por bajo de un determinado límite. Según hemos visto, la corriente en el inducido del motor en régimen de marcha, viene dada por la expresión:

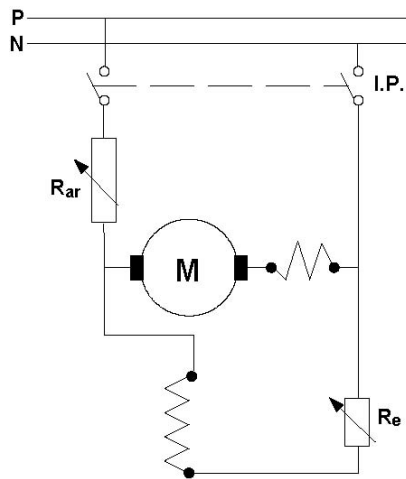
$$I_i = \frac{U_i - E - 2 \bullet u_e}{R_i + R_a}$$

En el momento del arranque, al cerrar el interruptor de conexión a la red, el motor esta en reposo y por consiguiente su f.c.e.m. es nula. En consecuencia la corriente absorbida de la red vendrá limitada únicamente por la resistencia propia del devanado inducido R_i , alcanzando a los pocos instantes, una vez transcurrido el periodo transitorio de conexión, que la autoinducción del devanado inducido impone el valor:

$$I_i = \frac{U_i}{R_i}$$

Corriente que dado el reducido valor de R_i , puede alcanzar valores muy elevados, del orden de las 20 veces, y aun más, la corriente nominal en motores de gran potencia, con los consiguientes riesgos de un calentamiento del inducido y de un exagerado choque mecánico sobre la carga por la brusca aplicación de un par motor demasiado grande. Para limitar la corriente de punta de arranque a valores compatibles con las exigencias del servicio, ya que el par motor es superior al par resistente de puesta en marcha, debemos reducir la tensión aplicada al inducido, o incrementar la resistencia propia del inducido. Esta segunda solución implicaría una pérdida de energía por efecto Joule excesiva y permanente, por lo que debe desecharse.

La reducción de la tensión aplicada al inducido puede obtenerse bien por medio de una resistencia R_{ar} , intercalada entre la red de alimentación y el inducido, según muestra la siguiente figura, bien por grupos rotativos especiales motor-generador, variadores de tensión, o bien por equipos electrónicos a base de componentes de estado sólido, como son los diodos y tiristores.



Puesto que a medida que el motor va acelerándose, salvando el periodo de despegue, se desarrolla en su inducido un f.c.e.m., creciente con la velocidad, que dará lugar a que la corriente y el consiguiente par vayan reduciéndose. Si queremos mantener la corriente y el par motor a los valores tope admisibles habrá que aumentar la tensión U_i , ya sea reduciendo el valor de la resistencia de arranque, o aumentando la tensión de salida del grupo especial rotativo o del grupo electrónico. Las resistencias de valor variable, utilizadas para este menester son llamadas reóstatos de arranque.

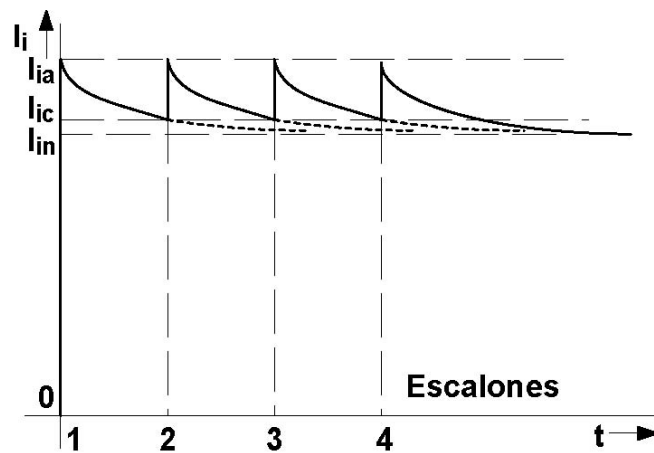
Estos reóstatos de arranque, en el caso de los motores de corriente continua, suelen estar constituidos por varias resistencias metálicas en serie, refrigeradas al aire o en baño de aceite. El número de contactos fijos del reóstato depende de la resistencia del motor y de la suavidad deseada en el arranque. Para obtener el máximo par posible en el arranque, compatible con el valor límite de la corriente en el instante inicial, los motores de excitación derivación y compuesta se arrancarán con plena excitación, reduciendo a cero si existe la resistencia de excitación R_e , del reóstato en serie con el devanado derivación y aplicando a este la tensión de línea, lo que implica que el reóstato de arranque debe estar en serie exclusivamente en el devanado inducido.

La corriente media de arranque, definida según las normas V.D.E., se corresponde con el valor de la media geométrica de la corriente de punto de arranque I_{ia} y de conexión I_{ie} .

$$I_{im} = \sqrt{I_{ia} \cdot I_{ie}}$$

La corriente de punto de arranque es el valor máximo de la corriente en el periodo de arranque y la de conexión, es el valor mínimo de la corriente en el mismo periodo, como se interpreta en la ecuación de la corriente de inducido, a medida que el motor se acelera, la f.c.e.m. se incrementa y la corriente del inducido disminuye. Al alcanzar la corriente el valor de I_{ie} (de un 10 a un 20% superior a la corriente nominal I_n) se pasa al segundo escalón del reóstato R_{ar} , eliminándose con ello su primera sección. Esta reducción de R_{ar} , debe producir un incremento prácticamente instantáneo de la corriente para alcanzar de nuevo el valor tope I_{ia} , lo que significará un incremento similar del par motor y de la aceleración de las masas móviles.

La f.c.e.m. sigue aumentando, de nuevo se reduce el valor de la corriente I_{ia} , a I_{ic} , en cuyo momento se elimina la segunda sección de R_a , a partir de cuyo instante la corriente sigue en curso decreciente que se termina al alcanzar el motor la velocidad de régimen permanente, para la cual $M_i = M_r$ y la corriente queda estabilizada al valor de I_{in} , según la siguiente figura.



La resistencia total del reóstato de arranque R_{ar} , se deducirá de la expresión de la corriente de punta de arranque en el instante inicial cuando el motor está aun en reposo y la f.c.e.m., es nula:

$$I_i = \frac{U_i}{R_i + R_{ar}}$$

De donde:

$$R_{ar} = \frac{U_i}{I_{ia}} - R_i$$

Hoy día en que los motores de corriente continua son alimentados mayoritariamente a través de equipos convertidores conectados directamente, o por medio de transformadores, a las redes de distribución alterna, su arranque tiene lugar más bien por dispositivos variadores de tensión a base de grupos convertidores dinámicos o de equipos electrónicos estáticos. Como estos dispositivos, bastante más caros que los simples reóstatos, aparte de su función de limitar la corriente en el proceso de arranque, tiene fundamentalmente la misión de regular la velocidad de los motores, los describiremos sucintamente al tratar el tema de la regulación de velocidad.

4.- Características par-velocidad para los distintos sistemas de excitación

Si en el servicio como generador son la característica exterior y la de regulación, aparte de la de vacío común a todas las máquinas, las de mayor interés, en el servicio como motor funcionando la máquina sobre una red de tensión constante, las características más importantes son:

- La característica de velocidad, o curva de variación de la velocidad de giro en función de la corriente de inducido:

$$n = f_1(I_i)$$

- La característica de par o curva de variación del par en función de la corriente del inducido:

$$M = f_2(I_i)$$

- La característica mecánica, llamada también dinámica, o curva de variación del par en función del par en función de la velocidad:

$$M = f(n)$$

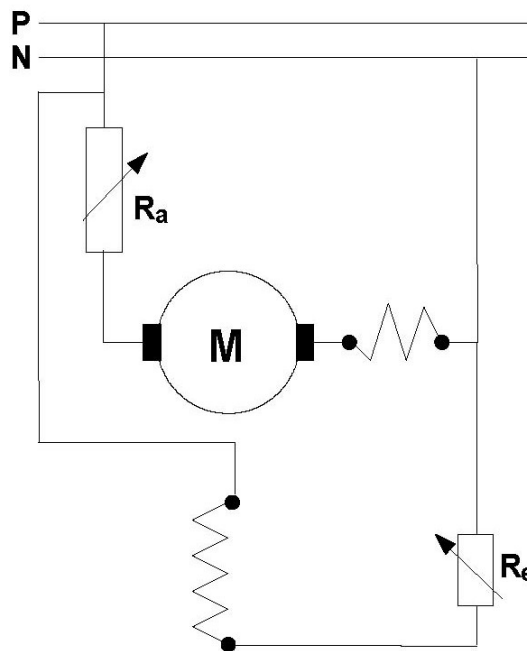
O bien su inversa:

$$n = f^{-1}(M)$$

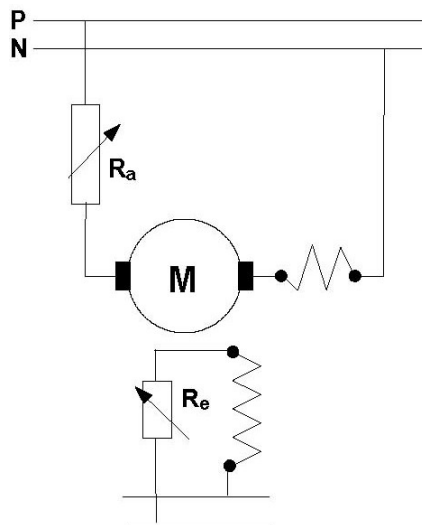
Esta última característica, la más importante para el estudio del sistema motor-carga, puede deducirse fácilmente de las dos anteriores eliminando en ellas la corriente de inducido. Vamos a estudiar para cada tipo de motor de corriente continua el curso de estas características.

4.1.- Motor de excitación derivación

En el motor derivación, como pone de manifiesto su esquema de conexiones, según la siguiente figura.



El circuito inductor está directamente conectado a la red, por tanto queda excitado a tensión constante al igual que se tiene en un motor de excitación independiente, cuyo inductor este alimentado por una fuente de tensión constante, distinta en general a la que se aplica al inducido, según la siguiente figura.



En consecuencia las características funcionales de los dos tipos de motores serán idénticas. La característica de velocidad se deduce de las conocidas ecuaciones:

$$E = C_1 \cdot n \cdot \phi$$

$$U_i - E = (R_i + R_a) \cdot I_i + 2 \cdot u_e$$

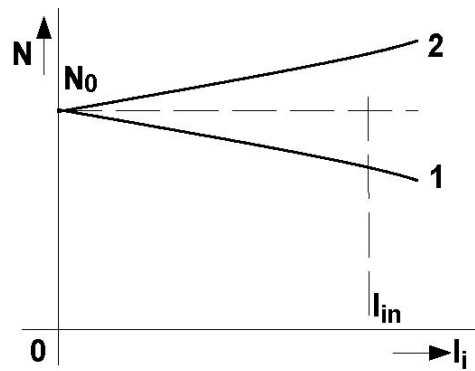
Sustituyendo en la primera el valor del E deducido de la segunda, lo que nos da la función buscada:

$$n = \frac{U - (R_i + R_a) \cdot I_i - 2 \cdot u_e}{C_1 \cdot \phi}$$

Si admitiésemos despreciable la reacción de inducido, en la fórmula anterior serían constantes todos sus términos, excepto la corriente de inducido, variable independientemente de la función que buscamos. En consecuencia la velocidad varía linealmente con la corriente de inducido:

$$n = \frac{U - 2 \cdot u_e}{C_1 \cdot \phi} - \frac{(R_i + R_a) \cdot I_i}{C_1 \cdot \phi}$$

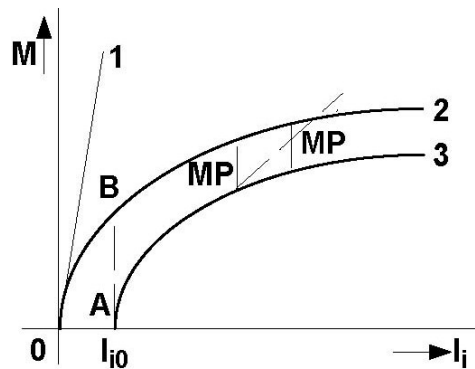
El reducido valor de las resistencias R_i y R_a , así como el valor prácticamente despreciable de la caída de tensión en las escobillas, determinan una muy pequeña disminución de la velocidad con la carga. La representación gráfica de esta ecuación nos da para la característica de velocidad la siguiente figura.



Si la reacción de inducido tiene un valor apreciable, el flujo útil disminuirá al aumentar la carga, supuesto mantenemos las escobillas fijas en la línea neutra y como este término figura en el denominador de la expresión de n , su influencia es opuesta a la del término sustractivo del numerador $(R_i + R_a)I_i$. Sin ambos efectos se compensaran, la velocidad permanecería sensiblemente constante con la carga. Y si la reacción de inducido tuviera un efecto predominante la velocidad aumentaría con la carga, curva 2 de la figura anterior. La pequeña variación de la velocidad respecto a la carga hace que se conozca el motor derivación como motor autorregulador de la velocidad o característica dura. La característica de par corresponde a la gráfica de la ecuación del par en función de la corriente de inducido:

$$M = C_2 \cdot I_i \cdot \phi \cdot N \cdot m$$

En un sistema cartesiano de abscisas I_i y ordenadas el par M . Esta característica si admitimos el flujo constante, lo cual supone una reacción de inducido despreciable o compensada, será una recta que pasa por el origen, según muestra la recta 1 de la siguiente figura.



La debilitación del flujo con la carga, a causa de la reacción de inducido en máquinas no compensadas, da lugar a partir de cierto valor de I_i el par deja de crecer linealmente, variando según la curva 2. La característica mecánica, puede obtenerse, como se ha indicado mas arriba buscando, a partir de las dos características anteriores, los valores de M y de n corresponden a cada valor de la corriente de inducido I_i , valores que llevaremos como abscisas y ordenadas de un sistema de ejes coordenados, o bien directamente reemplazando en la ecuación:

$$n = \frac{U - 2 \cdot u_e}{C_1 \cdot \phi} - \frac{(R_i + R_a) \cdot I_i}{C_1 \cdot \phi}$$

Que nos da la velocidad del motor, la corriente del inducido I_i por su equivalente en

función del par:

$$I_i = \frac{M}{C_2 \cdot \phi}$$

Lo que nos da:

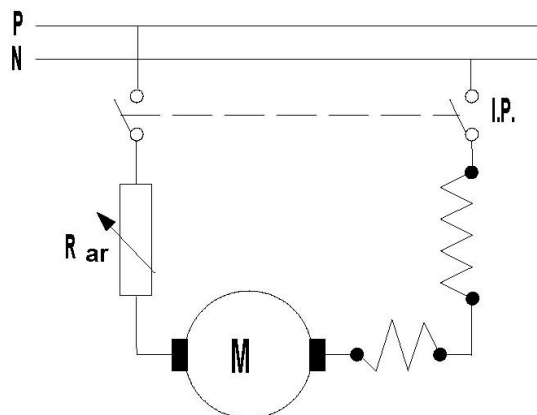
$$n = \frac{1}{C_1 \cdot \phi} \left[(U - 2 \cdot u_e) - (R_i + R_a) \cdot \frac{M}{C_2 \cdot \phi} \right] = n_0 - \Delta n$$

Siendo n_0 la velocidad que tenemos en vacío despreciando la caída en las escobillas y la caída en las resistencias R_i y R_a y Δn la disminución de la velocidad debida al momento M y a la resistencia del circuito inducido y polos auxiliares. Si el flujo lo consideramos constante, la curva del par será una recta ligeramente descendente. Al considerar el efecto desmagnetizante de la reacción de inducido puede suceder que la reacción del motor, en lugar de ser ligeramente descendente, con el par sea ascendente, lo que puede ocasionar, que el funcionamiento del motor sea inestable.

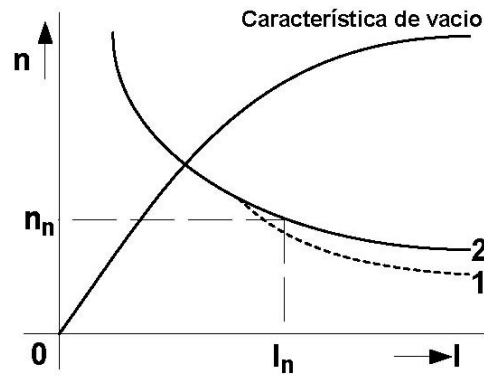
De ahí que hoy en día la mayoría de motores de corriente continua, excitación derivación o independiente, destinados a accionamientos en los que se exige una amplia regulación de la velocidad y una fuerte estabilidad dinámica, para reforzar la excitación al aumentar la carga, van provistos de un segundo devanado inductor, de pocas espiras conectado en serie con el inducido denominado devanado estabilizador o compensador de la reacción de inducido. De hecho se trata de un motor de excitación compuesta en el que la misión del devanado serie es solo mantener el flujo constante.

4.2.- Motor de excitación serie

En este motor el devanado inductor está conectado en serie con el inducido y es recorrido, en el caso general, por la misma corriente, el esquema de conexiones es el siguiente.



En esta figura también se ha representado el reóstato de arranque R_{ar} , el cual una vez el motor alcanza su régimen de velocidad queda fuera del circuito. En este motor la dependencia del flujo con la carga, por ser la corriente del inducido a la vez corriente de excitación, da lugar a que sus características funcionales difieren ostensiblemente del motor derivación. La característica de velocidad curva 1 de la siguiente figura, muestra una acusada caída de la velocidad con la carga como podía esperarse de la fuerte dependencia del flujo útil con la corriente I .



En efecto la ecuación de la velocidad en función de la f.c.e.m.:

$$n = \frac{E}{C_1 \cdot \phi}$$

Sustituyendo en ella E por la diferencia $U - (R_t I + 2u_e)$, siendo la R_t la resistencia total del inductor, el inducido y los polos auxiliares, todos ellos en serie, y despreciando la caída de tensión en las escobillas, obtendremos:

$$n = \frac{U - (R_t \cdot I + 2 \cdot u_e)}{C_1 \cdot \phi}$$

Ecuación que si admitimos que el flujo es proporcional a I_i , situación de máquina no saturada, corresponde a la ecuación de una hipérbola, curva 1 de la figura anterior. Conforme aumenta la carga y el circuito magnético va saturándose, el flujo deja de crecer linealmente con la carga y la curva real de velocidad se aparta tanto más de la hipérbola cuanto más saturado está el motor, curva 2 de la figura anterior. Especial atención debe presentarse al hecho de que con cargas reducidas la velocidad alcanza valores muy altos, lo que podría acarrear la destrucción del inducido por efecto de las elevadas fuerzas centrífugas a que se someterían los elementos de sujeción del devanado.

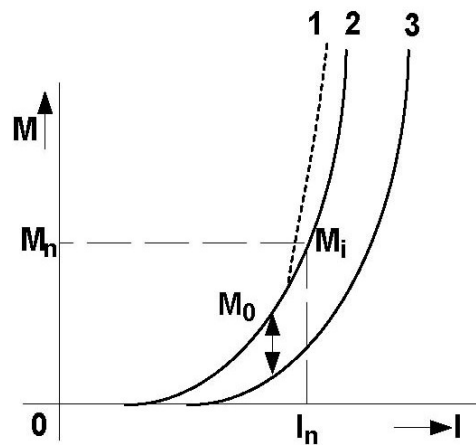
Por esta circunstancia los motores serie, exceptuando los de muy pequeña potencia en los que el propio momento resistente pasivo limita el embalamiento, no deben funcionar nunca en vacío, incluyéndose incluso aquellos accionamientos en los que hay la posibilidad, en que la carga pueda ocasionalmente desaparecer, como son, por ejemplo, los accionamientos por transmisión por correa del motor a la carga.

La característica de par, curva 1, pone de manifiesto que hasta tanto no se alcanza la saturación y pueda admitirse que el flujo es proporcional a la corriente I_i , el par motor interno será proporcional al cuadrado de I_i , por cuanto la ecuación del par:

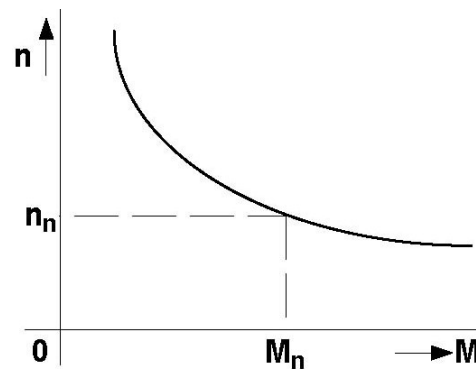
$$M = C_2 \cdot I_i \cdot \phi$$

Se reducirá a:

$$M = C'_2 \cdot I_i^2$$



Y hasta que la máquina empieza a saturarse la curva representativa del par será una parábola. A medida que el circuito magnético del motor va saturándose, es decir en cuanto la corriente de carga excede del valor correspondiente al inicio del codo de la curva de magnetización, el par deja de crecer linealmente con la corriente, lo que hace que la curva del par se aparte cada vez mas de la variación parabólica curva 2. La característica de par, mas o menos parabólica, del motor serie hace que esté especialmente indicado para accionamientos que exigen elevados pares de arranque y aceleración, como son los servicios de tracción eléctrica, aparatos de elevación, etc. Por último, la característica mecánica se representa con una curva como la que muestra la siguiente figura.



Curva que podemos obtener por puestos a partir de los dos anteriores, como se ha dicho en el motor derivación, o analíticamente eliminando en las fórmulas de la velocidad y del par:

$$n = \frac{U - (R_t \cdot I + 2 \cdot u_e)}{C_1 \cdot \phi}$$

$$M = C_2 \cdot I_i \cdot \phi$$

La corriente de inducido, si bien ahora al depender del flujo de la corriente de inducido, la resolución analítica presenta mayor complejidad. En primera aproximación, dentro de la zona de no saturación donde el flujo es proporcional a la corriente de inducido, tendremos:

$$C_1 \cdot \phi = C'_1 \cdot I$$

$$M = C_2' \cdot I^2$$

Lo que nos da:

$$n = \frac{U - \left(R_t \cdot \sqrt{\frac{M}{C_2'}} + 2 \cdot u_e \right)}{C_1' \cdot \sqrt{\frac{M}{C_2'}}} = C_3 \cdot \frac{U}{\sqrt{M}} - C$$

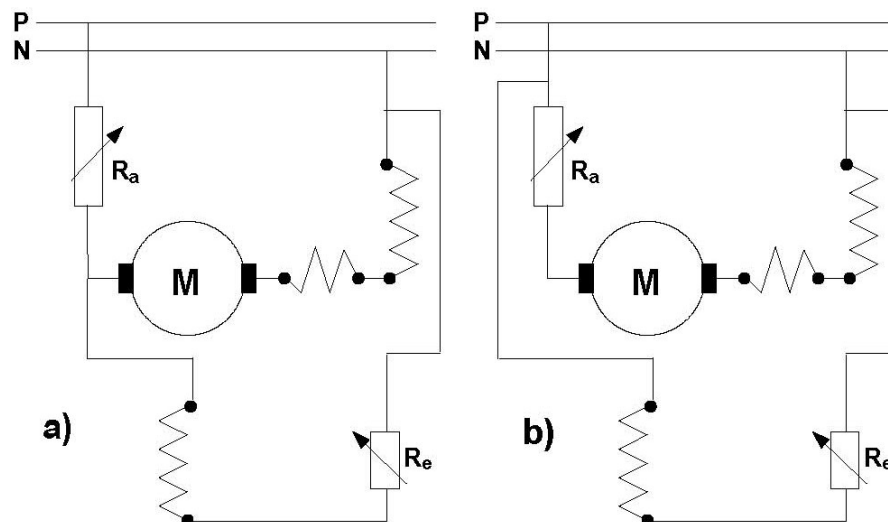
Que nos dice que esta característica hasta tanto no se alcanza la saturación es de forma hiperbólica, de la misma conforme el circuito magnético va saturándose. El curso acentuadamente descendente de esta característica concede al motor serie un alto grado de estabilidad de marcha, a la vez que pone de manifiesto que la potencia útil desarrollada:

$$P_u = M \cdot \omega = M_u \cdot \frac{2 \cdot p \cdot n}{60}$$

Es prácticamente constante. Esta circunstancia hace que sea conocido el motor serie como motor autorregulador de la potencia.

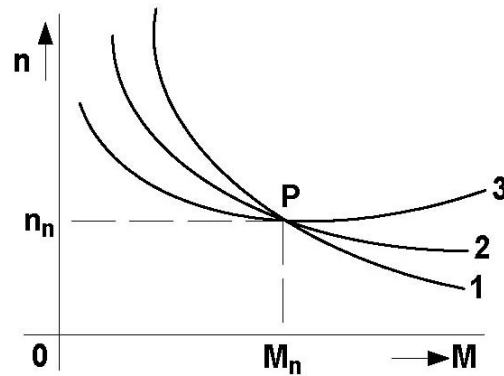
4.3.- Motor de excitación compuesta

El campo magnético de este tipo de motor está excitado, como ya sabemos por dos devanados inductores, uno serie recorrido por la corriente del inducido o por la corriente total absorbida de la red, caso de la excitación compuesta larga o corta, de hilo o pletina conductora de cobre de gruesa sección y pocas espiras y otro derivación de hilo fino y elevado número de espiras, conectado a la tensión de la red o a los bornes del inducido cuyas excitaciones magnéticas pueden ser del mismo sentido caso de la compuesta aditiva, o de sentidos opuestos caso de la compuesta sustractiva o diferencial, según muestra la figura siguiente donde la parte a corresponde a la compuesta aditiva y la b la compuesta diferencial.

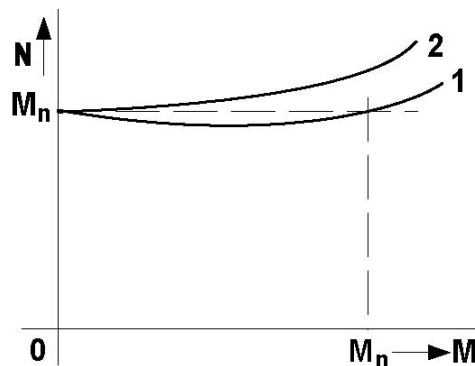


Las características de un motor excitación compuesta aditiva estarán comprendidas evidentemente entre las del motor derivación y las del serie. La presencia de los ampervueltas derivación, de valor prácticamente constante, da lugar a que el flujo, aún en vacío, tenga un cierto valor, eliminándose con ello el peligro de embalamiento que presenta el motor serie al reducirse la carga.

El curso de las tres características fundamentales dependerá de la proporción que se tenga entre los ampervueltas del devanado serie y los del devanado de derivación. Si predominan los primeros estaremos en presencia de un motor de características más próximas al serie, con un límite máximo de velocidad en vacío. Por el contrario si son los ampervueltas derivación son los que prevalecen se tratará de un motor de característica mecánica ligeramente descendente. Este tipo de característica es muy interesante para el accionamiento de máquinas dotadas de volante de inercia gracias al cual se limita el golpe de corriente sobre la red al incrementarse bruscamente el par resistente. La siguiente figura muestra la característica mecánica $[n = f(M)]$, de tres variantes de motores de excitación compuesta aditiva, de igual velocidad y par nominal, punto P.



La curva 1 corresponde a uno en el que predomina la excitación serie, la 2 a uno mas bien equilibrado en sus dos excitaciones y la 3 uno en el que la excitación derivación es la que prevalece. En el motor de excitación compuesta diferencial, el flujo útil vendrá determinado por la diferencia de excitaciones, y consecuentemente al valor que corresponde al funcionamiento en vacío, que es máximo se irá debilitando conforme la carga aumente. Esto traerá como consecuencia que la velocidad del motor bajo una determinada carga resulte superior a la del mismo motor excitado solo por el devanado derivación. Según la magnitud de los ampervueltas serie, las diferencias entre ambas curvas será mas o menos acusada. Una débil excitación serie puede dar lugar a que la velocidad del motor sea sensiblemente constante de vacío a plena carga curva 1 de la siguiente figura.



Por el contrario si el número de ampervueltas serie es importante, la velocidad tendería a incrementarse con la carga, curva número 2 y el funcionamiento del motor sería inestable.

5.- Regulación de velocidad en los motores de corriente continua.

La regulación de velocidad de un motor, se define como la variación de la velocidad que el motor experimenta al pasar del funcionamiento nominal a plena carga al funcionamiento en

vacío, expresada en tanto por ciento de la velocidad a plena carga:

$$r_v = \frac{n_0 - n}{n} \cdot 100$$

Siendo n_0 la velocidad de vacío y n la de plena carga. Cuanto menor sea este valor mejor se dice que es la regulación del motor. A tenor de ello teniendo a la vista las características de velocidad de los motores de derivación, serie y compuesto, diremos que los primeros son de regulación buena, la de los segundos es muy pobre y la de los últimos intermedios entre unos y otros, a tenor de la relación entre los AV derivación y los AV de serie. El motor de excitación diferencial tiene una regulación negativa que cabe asociarla a una inestabilidad de funcionamiento.

Otro concepto de la regulación de velocidad es el que dice que tiene por objeto mantener la velocidad tan próxima como sea posible a un valor fijado, cualesquiera que sean los factores perturbadores que actúan sobre ella, o variar la velocidad entre límites más o menos amplios a tenor de las exigencias del servicio. La velocidad de régimen de los motores eléctricos viene condicionada, como sabemos por la igualdad de los pares motor y resistente, igualdad definida por el punto de intersección de las respectivas características mecánicas. Trasladando este punto de equilibrio dinámico a la característica electromecánica de par del motor, obtendremos la corriente absorbida por este a la velocidad de equilibrio.

Si consideramos que la característica mecánica de carga es invariable, el problema de la regulación de la velocidad consistirá en desplazar adecuadamente la característica mecánica del motor eléctrico, actuando sobre aquellos parámetros funcionales que, originalmente fueron considerados constantes e iguales a los valores nominales de la máquina y que como es lógico, tengan alguna influencia sobre la citada característica. A este propósito recordemos que la velocidad y el par de los motores de corriente continua vienen expresados por las fórmulas fundamentales:

$$n = \frac{U - (R_t \cdot I + 2 \cdot u_e)}{C_1 \cdot \phi}$$

$$M = C_2 \cdot I_t \cdot \phi$$

La primera nos dice que a par constante, ya que I_t y el flujo son constantes, se puede variar la velocidad del motor desde cero a su valor nominal, variando la tensión aplicada a los bornes del inducido, bien sea intercalando una resistencia en serie con el inducido, llamada regulación por resistencia, o bien variando la tensión del circuito de alimentación del inducido, regulación por control de velocidad. El sistema de regulación por resistencia es el más simple y fácil de aplicar a cualquier tipo de motor. Se puede aprovechar a este propósito el mismo reóstato de arranque del motor, si bien en el caso de ser utilizado como reóstato de regulación, deberá prestarse particular atención a sus condiciones de refrigeración para que no alcance temperaturas peligrosas.

La regulación por control de la tensión de alimentación del inducido requiere disponer de un equipo, mas o menos complejo, que facilite una tensión continua regulable, aproximadamente entre los límites en que deseamos variar la velocidad, como podemos deducir observando que a flujo constante la velocidad es sensiblemente proporcional a la tensión en bornes del inducido, salvo para valores muy bajos de esta tensión en bornes del inducido, salvo para valores muy bajos de esta tensión para los que la caída óhmica $(R_i + R_a) \cdot I_t$, deja de ser despreciable. Este método si el equipo regulador de tensión permite

una variación continua de la tensión desde cero al valor nominal, elimina el reóstato de arranque en la puesta en marcha, a la vez que posibilita el más amplio margen de regulación de la velocidad, de cero a su valor nominal.

Cabe incluir dentro de este método la modificación del conexionado eléctrico de varios motores cuando estos accionan un mismo sistema mecánico. Tal se tiene por ejemplo, con los motores serie de las locomotoras y automotores eléctricos y con los de los troles. En el caso de una locomotora equipada con cuatro motores de tensión nominal U , igual a la de la línea de alimentación, caben tres velocidades económicas, es decir sin reóstato de regulación, la primera con los cuatro motores en serie, tensión por motor:

$$U_m = \frac{U}{4}$$

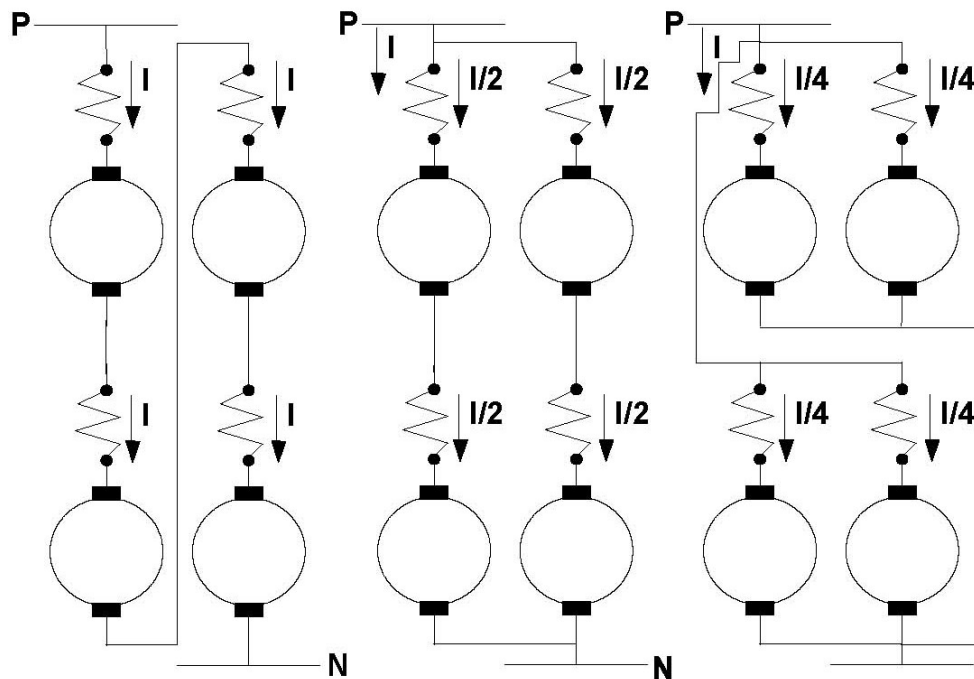
La segunda con dos grupos en paralelo de dos motores conectados en serie:

$$U'_m = \frac{U}{2}$$

Y la tercera con todos sus motores en paralelo:

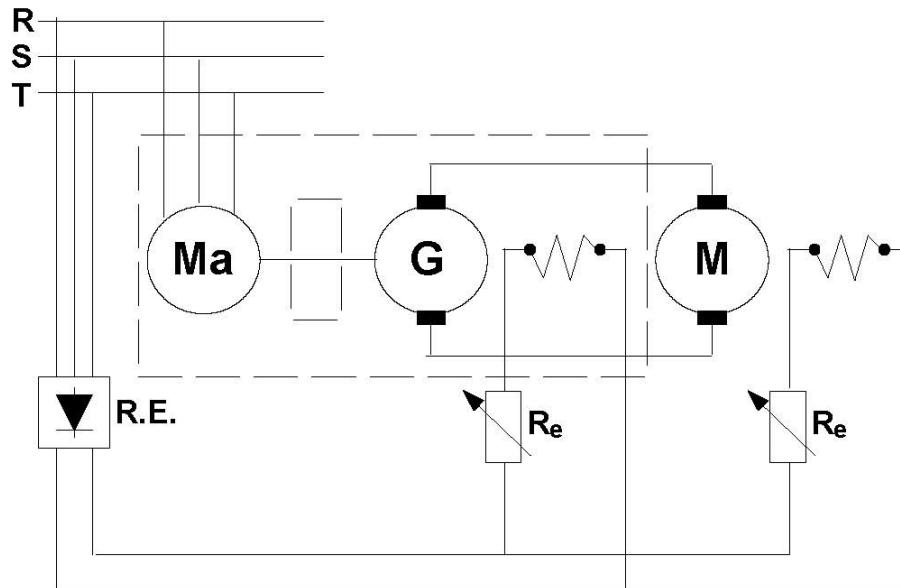
$$U'' = U$$

Estas tres situaciones se pueden ver en la siguiente figura.



Entre los sistemas rotativos empleados para regular la tensión aplicada al inducido, sin solución de continuidad, mencionaremos el grupo elevador-reductor y el grupo Ward-Leonars, sin o con volante de inercia. El primero utilizado varias veces en máquinas elevadoras de minas, ha sido con mucho superado por el grupo Ward-Leonard, por los que nos limitaremos al estudio de este último. El grupo Ward-Leonard, conocido universalmente por el nombre de sus inventores, esta constituido por un convertidor rotativo, motor-

generador, de la misma potencia que el motor cuya velocidad necesitamos regular y con la exclusiva misión de alimentar a este. La siguiente figura muestra el esquema de conexiones de este sistema.



G es el generador de corriente continua de excitación independiente que juntamente con el motor de corriente alterna M_a que lo acciona, constituye el grupo W-L. El generador alimenta al motor de corriente continua a regular M, de excitación independiente y en la mayoría de casos a flujo constante. Los devanados de excitación del generador y motor, hasta hace poco se alimentaban con una pequeña dinamo excitatriz de excitación derivación, o compuesta movida por el mismo motor de corriente alterna, pero modernamente estos devanados se alimentan de la propia red de corriente alterna, haciendo uso de rectificadores estáticos a base de placas de selenio o de diodos de silicio.

El reostato de regulación de la dinamo, juntamente con el conmutador o inverso, permiten regular de cero a un máximo, en uno u otro sentido, la corriente de excitación de la dinamo y consecuentemente su f.e.m. inducida E_g . La tensión en bornes del motor será:

$$U_i = E_g - (R_{ig} + R_{ag}) \cdot I_i - 2 \cdot u_{eg}$$

Y variará sensiblemente entre los mismos límites que la f.e.m. del generador E_g , R_{ig} , R_{ag} y u_{eg} representan respectivamente la resistencia del inducido, la resistencia de los polos de conmutación y la caída de tensión en una línea de escobillas del generador del grupo Ward-Leonard. Si invertimos la polaridad de la f.e.m. E_g , se invertirá la polaridad de la tensión U_i y en consecuencia el sentido de giro del motor. Para un estado de funcionamiento estacionario la corriente que circula por los inducidos del generador del grupo y del motor regulado M, viene dada por la ecuación:

$$I_i = \frac{E_g - E_m - 2 \cdot u_{eg} - 2 \cdot u_{em}}{(R_{ig} + R_{ag}) + (R_{im} + R_{am})}$$

Y puesto que ambas máquinas son sensiblemente iguales:

$$I_i = \frac{E_g - E_m - 4 \bullet u_e}{2 \bullet (R_i + R_a)} \cong \frac{E_g - E_m}{2 \bullet (R_i + R_a)}$$

Esta fórmula pone de manifiesto que si estando el motor funcionando a un cierto régimen de marcha, determinando por la igualdad de pares motor y resistente, debilitamos la excitación de la dinamo reduciendo E_g , a valores inferiores al que tiene E_m , el sentido de la corriente se invertirá, el motor M pasará a funcionar como generador ya que I_i tiene ahora el mismo sentido que E_m , a expensas de la energía cinética del sistema motor-carga y la dinamo G funcionará como motor, ya que E_g e I_i serán ahora de sentidos opuestos, dando lugar a que se desarrolle un par del mismo sentido que el del motor M_a , acelerándose la marcha de este grupo y dando lugar con ello a que M_a pase a funcionar como generador devolviendo la energía de frenado del motor M a la red. Cuanto mayor sea la diferencia entre E_g y E_m más enérgico será el frenado del motor M.

Cuando estos grupos se someten a servicios con fuertes y rápidas variaciones de la carga, como es el caso de los laminadores reversibles, es conveniente disponer sobre el eje del grupo W-L, un volante que por su inercia compense las bruscas oscilaciones del grupo y nos limite los golpes de corriente sobre la red. En este caso conviene que el motor de inducción presente un deslizamiento apreciable para dar lugar a la intervención del volante. Estos grupos son conocidos con el nombre de Leonard-Ilgnier. El segundo medio de regulación de velocidad que la fórmula siguiente pone de manifiesto al actuar sobre el flujo útil.

$$n = \frac{U - (R_i + R_a) \bullet I_i - 2 \bullet u_e}{C_1 \bullet \phi}$$

A igualdad de corriente en el inducido la velocidad es inversamente proporcional al flujo. La variación del flujo inductor se consigue fácilmente regulando la corriente de excitación mediante un reóstato en serie con el inductor en el caso de un motor serie. Este método de regulación es muy simple y de reducido consumo de energía. Observemos que la corriente que se regula es muy pequeña fracción de la nominal del motor en el caso de que este sea derivación, o el reóstato presenta muy pequeña resistencia en el caso del motor serie.

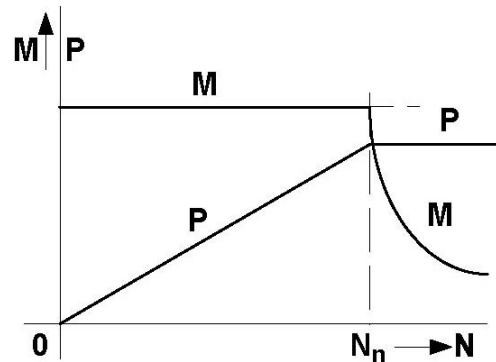
Los motores que se regulan por este medio se proyectan para funcionar a velocidad nominal cuando están plenamente excitados, trabajando sobre el punto medio del codo de su característica magnética y la regulación tiene lugar desde esa velocidad hacia arriba, reduciendo gradualmente la corriente de excitación. Por este procedimiento los más modernos motores de excitación derivación o independiente, especialmente proyectados pueden alcanzar un margen de regulación de uno a cuatro y excepcionalmente de uno a cinco. Un motor ordinario solo permite, por excitación variable, un incremento de velocidad del orden del 30 al 40% de la velocidad nominal. La regulación de la velocidad de un motor derivación o de excitación independiente, por variación de la excitación es designada por regulación a potencia constante, en tanto que la regulación por resistencias o por control de tensión aplicada al inducido se llama regulación a par constante.

La razón de estos nombres esta en el hecho de que el límite de potencia que puede desarrollar una máquina eléctrica viene fijado por su calentamiento y este depende esencialmente de la carga I_i . En la regulación por flujo útil, la f.c.e.m. E , en régimen estable, permanece sensiblemente constante, pues el efecto de la debilitación del flujo es debilitado por el incremento de velocidad, luego el producto $E \bullet I_i$ que define la potencia interna de la máquina es constante en todo el campo de variación de la velocidad. En cambio en la regulación por control de la tensión, al ser el flujo constante lo será también el par desarrollado, pues viene dado como ya sabemos por:

$$M = C_2 \cdot I_i \cdot \phi$$

Algunas veces se combinan sobre el mismo motor los métodos de regulación descritos anteriormente, regulación de la tensión del inducido U_i y regulación por campo, que equivale a una regulación de la corriente de excitación. En estos casos la velocidad nominal del motor, o velocidad de base, es la que corresponde a la tensión nominal del inducido y a la excitación máxima del campo. Velocidades por bajo de la nominal se obtienen reduciendo la tensión aplicada al inducido, y las velocidades superiores a la nominal reduciendo la excitación.

Según hemos indicado, en la regulación mediante la variación de la tensión aplicada al inducido, el par puede mantenerse constante, en cuyo caso la potencia aumenta proporcionalmente a la velocidad. En cambio en la regulación por debilitamiento del flujo manteniendo las posibilidades máximas del motor, sin sobrecalentamientos, la potencia se mantiene constante, por lo que el par debe reducirse, siguiendo una línea hiperbólica, al aumentar la velocidad según muestra la siguiente figura.



El margen de regulación normal en el primer caso puede oscilar entre 1 a 10 y 1 a 20, margen que al combinarse con el segundo medio permite obtener campos de regulación de 1 hasta 40 hasta 1 a 100, con márgenes de precisión del orden del 0,5% y aun menor.

6.- Utilización de los motores de corriente continua

Cuando nos enfrentamos con el problema de la elección del tipo de motor más idóneo para una determinada aplicación, tres puntos principales se han de tener en consideración:

- 1.- La velocidad, constante, variable entre determinados límites o regulable en función de un determinado parámetro.
- 2.- El par de arranque, inferior, igual o mayor que el nominal o de plena carga, a tenor de las exigencias de la máquina operadora y de la inercia del sistema móvil.
- 3.- La corriente de punta de arranque, el valor máximo de la corriente en la conexión del motor a la red viene limitado por las empresas de distribución de energía eléctrica, o por reglamentos del E.P.R.E. a fin de evitar perturbaciones molestas en el servicio.

A tenor de los puntos citados, las características estudiadas permiten deducir los tres tipos de motores de corriente continua, el más apropiado. Para fijar mejor las ideas acerca del problema, consideremos las características de estos motores. En todas ellas se supone que los motores tienen a plena carga la misma velocidad nominal n y el par M_n . A partir de estas figuras la comparación entre los distintos tipos de motores es inmediata.

6.1.- Motor derivación

Según se observa en la característica de velocidad para este tipo de motores, su velocidad se mantiene constante independientemente de la carga. Interesará pues el mando de las máquinas de velocidad prácticamente constante cualquiera que sea la carga. Este es el caso de la mayor parte de las máquinas útiles como tornos, taladros, fresas, etc. También para el accionamiento de ejes de transmisión cuando el par de arranque no es demasiado grande como de ventiladores, bombas, etc. El motor derivación se usa también en máquinas de elevación en las que la carga puede ser bruscamente suprimida y por tanto donde un motor serie sería de temer el embalamiento. Como puede observarse en la característica de par, el par desarrollado en el motor derivación es proporcional a la corriente.

6.2.- Motor serie

El tipo más conveniente para la tracción eléctrica, tanto en locomotoras como en troles, por las siguientes razones, en el arranque es necesario un gran par, el cual una vez que el vehículo en régimen se reduce al requerido para vencer las resistencias pasivas. Precisamos pues un motor capaz de darnos este fuerte par, y según se puede observar en su característica de par, es el motor serie el que da mayor incremento de par motor para un determinado aumento de corriente. Por otra parte, según muestra la característica de velocidad, en el motor serie la velocidad varía con la carga en forma acusada, lo que constituye una ventaja mas en el caso de tracción eléctrica. En efecto, cuando un vehículo sube una rampa debe aumentar mucho el par motor y ello supone en un motor serie una disminución de velocidad.

En consecuencia el producto $M \cdot \omega$, permanece prácticamente constante, de modo que la potencia absorbida de la línea apenas varía. Los incrementos de corriente en la línea son pues muy reducidos. Esto no sucederá con motores derivación, que al mantener constante la velocidad, el aumento del par motor implica un aumento proporcional de la potencia absorbida. El motor serie es un motor robusto, su arrollamiento de excitación, de hilo grueso y con pocas espiras, soporta mejor las sobrecargas que el derivación. Otra aplicación frecuente de los motores serie es en grúas, debido a su elevado par de arranque y porque con cargas ligeras van a mas velocidad aumentando, por tanto la producción. Sin embargo no podrán usarse si hay peligro de embalamiento al subir con el gancho vacío. En general este peligro no se presenta por efectuarse la transmisión por engranajes que ofrecen resistencias pasivas.

6.3.- Motor compuesto

Presentará características intermedias entre el motor derivación y el motor serie. Puede ser utilizado tanto para aplicación en talleres como en tracción, estando especialmente indicado en aquellos trabajos donde no es necesaria una velocidad constante y en cambio se requiere un buen par de arranque, excepto en casos en que debe emplearse el motor serie por su mayor par.