

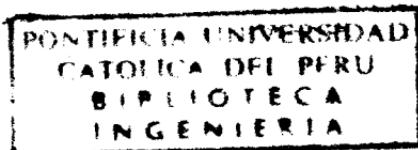
VARGAS

Maquinas Eléctricas Rotativas

PUC

MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS

Federico Vargas-Machuca
Saldarriaga



Auspiciado por CONCYTEC

MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS

© Copy rights Federico Vargas-Machuca Saldarriaga
Junio de 1990 Printed in Peru

Libro producido por **Megaprint Ediciones s.a.** Natalio Sánchez 220 Of. 903 Lima-Perú
Diseño de carátula y diagramación de interiores a cargo de **Gerardo Huallanca Valdivia**



Dedicatoria

*A mis padres Ricardo y Mercedes,
y a mi esposa Celeste*



Contenido

PROLOGO	7
INTRODUCCION	9
CAPITULO 1: Caracteristicas Generales	
1.1 Generalidades	13
1.2 Clasificación de las máquinas eléctricas	16
1.3 Características comunes	21
1.4 El motor y el generador elementales	22
1.5 Materiales eléctricos conductores	25
1.6 Materiales eléctricos aislantes	25
1.7 Materiales magnéticos	26
CAPITULO 2: Principio de funcionamiento de la máquina de corriente continua	
2.1 Principio de funcionamiento	29
2.2 Campo magnético producido por el estator	32
2.3 La fuerza electromotriz inducida	34
2.4 Campo magnético producido por el rotor o reacción de armadura	37
2.5 Arrollamiento de compensación e interpolos	39
2.6 El torque electromagnético	41
CAPITULO 3: Aspectos constructivos de la máquina de corriente continua	
3.1 Polos, bobinas de campo y yugo del estator	45
3.2 Interpolos y arrollamiento de compensación	47
3.3 El colector	48
3.4 El arrollamiento de armadura	51
3.5 El modelo del circuito equivalente	56
CAPITULO 4: El generador de corriente continua en régimen estable	
4.1 Formas de excitación	61
4.2 Circuitos equivalentes. Ecuaciones	63
4.3 Curvas características	74
4.4 Generadores en paralelo	83
CAPITULO 5: El motor de corriente continua en régimen estable	
5.1 Formas de conexión	91
5.2 Circuitos equivalentes. Ecuaciones	91
5.3 Curvas características	98
5.4 Arranque, puesta en marcha, vacío y trabajo con carga	107
5.5 Características de operación	113
5.6 Distribución de pérdidas y potencias en máquinas de corriente continua	124
5.7 Eficiencia	125
5.8 Datos de placa	126
CAPITULO 6: Aspectos constructivos y principio de funcionamiento de la máquina síncrona trifásica	
6.1 Aspectos físicos y constructivos	131
6.2 Campos magnéticos del rotor y del estator	136
6.3 El torque electromagnético	141

6.4 La f.e.m. inducida	144
6.5 Factores de distribución y de paso	149
CAPITULO 7: La máquina síncrona en régimen estable	
7.1 La máquina de rotor cilíndrico	153
7.2 Circuito equivalente	154
7.3 Reactancia síncrona	155
7.4 La regulación	156
7.5 Características internas: curva de vacío y del cortocircuito	157
7.6 Las reactancias síncronas no saturada y saturada	160
7.7 Ecuación potencia-ángulo	164
7.8 La máquina de polos salientes	166
7.9 Potencia, pérdidas y eficiencia	170
7.10 Curvas características	171
7.11 El motor síncrono	173
7.12 Generadores en paralelo	174
7.13 Datos de placa	176
CAPITULO 8: La máquina asíncrona trifásica	
8.1 Aspectos constructivos	179
8.2 Principio de funcionamiento	180
8.3 El deslizamiento	181
8.4 Circuito equivalente del motor de inducción trifásico	182
8.5 Ecuaciones	184
8.6 Potencias, pérdidas y eficiencia	184
8.7 El circuito equivalente simplificado	186
8.8 Las curvas características	186
8.9 Arranque, vacío y trabajo con carga	190
8.10 Ensayos de vacío y de rotor bloqueado	191
8.11 Determinación de parámetros del circuito equivalente	193
8.12 El diagrama circular del motor	198
8.13 Motores de doble jaula o de barras profundas	203
8.14 Los motores de dos o más tensiones	207
8.15 Métodos de arranque	209
8.16 La inversión de marcha	218
8.17 Los motores de dos velocidades	219
8.18 El frenado eléctrico	225
8.19 Designación, conexión y marcado de terminales	229
8.20 Datos de placa	234
CAPITULO 9: Selección de motores asíncronos trifásicos	
9.1 Criterios de selección	239
9.2 Características del ambiente	239
9.3 Características de la carga	243
9.4 Características del motor	246
9.5 Elección del motor eléctrico	250
CAPITULO 10: Motores monofásicos	
10.1 Generalidades	261
10.2 El motor monofásico de inducción	261
10.3 Tipos de motores monofásicos de inducción	263
10.4 El motor universal	267
10.5 Otros tipos de motores monofásicos	269
BIBLIOGRAFIA	271

Prólogo

El presente libro ha sido elaborado con el fin de contribuir a una mejor formación de los alumnos de ingeniería mecánica, eléctrica y electrónica de las universidades del país.

Aquí se desarrollan todos los temas que se exige en la mayoría de los programas universitarios y que no es posible encontrar en un sólo libro o texto típico de máquinas eléctricas rotativas, los cuales en su mayoría, están orientados hacia el diseño y el análisis de las máquinas o presentan un nivel más bien técnico.

Con este libro en sus manos, los alumnos pueden disponer de más tiempo para desarrollar problemas típicos, o para profundizar en los temas de interés desde el punto de vista de la aplicación y el uso de las máquinas.

El libro sirve también como introducción a los cursos posteriores de laboratorio de máquinas eléctricas rotativas.

El libro no contiene problemas, los cuales deberán ser seleccionados por el profesor del curso tratando que sean problemas de aplicación de cada tema desarrollado.

Las observaciones y sugerencias que alumnos, profesores y profesionales de la especialidad tengan a bien hacer, se tomarán en cuenta con el fin de que una próxima edición del presente libro se vea enriquecida y mejorada por el bien de la formación de nuestros ingenieros.

El autor agradece a los ingenieros Kurt Paulsen, Ludvik Médic, Eduardo Ismodes y Oscar Melgarejo y al técnico Silverio Durand, quienes con sus consejos y apoyo académico hicieron posible que esta obra esté al alcance de los alumnos de la especialidad.

Asimismo, un agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC por haber hecho posible la primera edición de esta publicación.

EL AUTOR

Introducción

El objetivo de este libro es proporcionar a los estudiantes de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica los conocimientos básicos sobre el principio de funcionamiento y la constitución de las máquinas eléctricas de corriente continua y de corriente alterna.

Dichos conocimientos se orientarán hacia la capacitación del estudiante en la aplicación, selección y operación de las máquinas eléctricas en su empleo tanto como motores como generadores.

En el primer capítulo se hace una exposición de los aspectos generales de las máquinas eléctricas rotativas incluyendo una clasificación sencilla y sus características comunes.

En el segundo capítulo se explica el principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas de corriente continua. Se describe asimismo los campos magnéticos que intervienen en la conversión de energía y sus efectos.

En el tercer capítulo se hace una descripción de los aspectos constructivos de la máquina de corriente continua y se concluye con el modelo de circuito eléctrico que la representará en régimen estable.

En los capítulos cuatro y cinco se estudia respectivamente el generador y el motor de corriente continua en régimen estable incluyendo una interesante aproximación de las curvas de características eléctricas y mecánicas de estas máquinas en sus diferentes formas de conexión.

En el capítulo seis se describe los aspectos constructivos de las máquinas síncronas trifásicas. Asimismo se explica su principio de funcionamiento, incluyendo una descripción de los campos magnéticos que participan en el proceso de conversión de energía.

En el capítulo siete se hace un estudio de la máquina sín-

crona en régimen estable tendiendo siempre a relacionar los aspectos teóricos del circuito equivalente con los ensayos de la máquina en un laboratorio.

En el capítulo ocho se explica primero el principio de funcionamiento de las máquinas asíncronas trifásicas. Se describe luego los aspectos constructivos hasta llegar al circuito equivalente. Posteriormente, considerando la importancia de los motores eléctricos de este tipo en el desarrollo industrial del país, se expone, con amplitud, todos los aspectos relacionados con el funcionamiento, operación y conexión de estas máquinas.

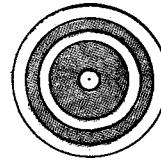
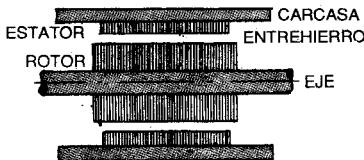
En el capítulo nueve se expone los criterios para efectuar una adecuada selección de los motores asíncronos trifásicos que son los motores más comunes en nuestro medio estableciéndose una metodología de cálculo con las recomendaciones respectivas.

Finalmente, en el capítulo diez se hace una exposición de los diferentes tipos de motores monofásicos más comunes y sus aplicaciones.

Capítulo 1

CARACTERISTICAS GENERALES

- 1.1 Generalidades
- 1.2 Clasificación de las máquinas eléctricas
- 1.3 Características comunes
- 1.4 El motor y el generador elementales
- 1.5 Materiales eléctricos conductores
- 1.6 Materiales eléctricos aislantes
- 1.7 Materiales magnéticos



CARACTERISTICAS GENERALES

1.1 GENERALIDADES

Frecuentemente en la industria se requiere convertir una forma de energía disponible en otra compatible con una aplicación determinada.

Existe una gran variedad de estos convertidores de energía, siendo los más comunes los motores eléctricos y los generadores eléctricos.

Otros tipos de convertidores de energía, como los electroimanes y los transformadores se estudian en el curso anterior.

Los motores y generadores eléctricos que se estudiará en el presente libro son máquinas electro-magnético-mecánicas de aplicación en la industria, en el campo, en el comercio y en el hogar, las cuales utilizan el campo magnético como medio de acoplamiento para la conversión de la energía eléctrica en mecánica y viceversa.

Un motor convierte energía eléctrica en energía mecánica, mientras que un generador convierte energía mecánica en energía eléctrica. En la figura 1.1 puede verse un esquema de ambas formas de conversión.

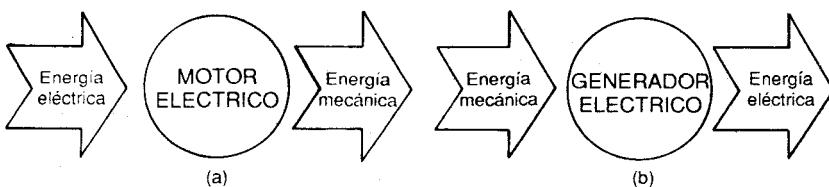


Figura 1.1 La conversión de energía (a) en un motor; (b) en un generador

La razón principal por la que el uso de las máquinas electromagnéticas se encuentra tan difundido se explica por la gran facilidad con que se puede almacenar la energía en un campo magnético durante la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa.

1.1.1. Máquinas eléctricas rotativas

Los generadores y motores eléctricos convencionales, llamados "máquinas eléctricas", convierten energía mediante un movimiento rotatorio.

Los motores eléctricos se construyen en tamaños desde una pequeña fracción de caballo de potencia, hasta miles de caballos de potencia.

En los generadores eléctricos actuales, son comunes valores nominales de cientos de miles de Kilowatts.

La sencillez en la construcción y la solidez del diseño, así como la naturaleza de los aparatos que se conectan (en el caso del generador, el motor primo y, en el caso del motor, la carga impulsada) exigen de un movimiento rotatorio para los generadores eléctricos y la mayoría de los motores.

Las cantidades enormes de potencia utilizada por la industria proviene usualmente de la potencia mecánica suministrada a los generadores eléctricos por medio de turbinas de vapor, de agua y, en algunos casos, por motores de combustión interna.

Debido a las grandes cantidades de energía envueltas en el proceso de conversión de energía, son extremadamente importantes la economía de la operación, así como la confiabilidad del equipo.

Las máquinas eléctricas rotativas consisten de un circuito magnético, uno o más circuitos eléctricos y soportes mecánicos, con, por lo menos, un embobinado. Véase, por ejemplo, la figura 1.2.

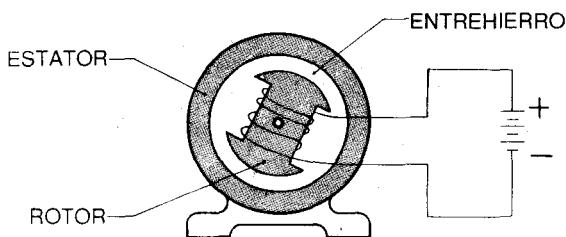


Fig. 1.2 Constitución de una máquina eléctrica rotativa.

Para un motor, tal embobinado se alimenta desde una fuente de energía eléctrica y, para un generador, tal embobinado (si hay solamente uno), es una fuente de energía eléctrica.

El circuito magnético contiene hierro interrumpido por un entrehierro entre el miembro estacionario o estator y el miembro rotativo o rotor, tal como se observa en la figura 1.2.

Los núcleos magnéticos sujetos a flujos magnéticos alternos o flujos que sufren rápidas variaciones en el tiempo son usualmente laminados (formados por placas paralelas) para asegurar bajas pérdidas por corrientes parásitas y respuestas rápidas. Véase la figura 1.3.

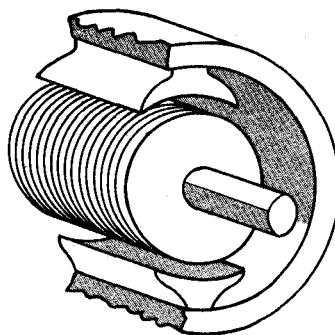


Fig. 1.3 Núcleo del rotor de una máquina eléctrica hecho de placas

Sin embargo, aparatos más pequeños, con circuitos magnéticos de configuraciones complejas, generalmente tienen estructuras laminadas para reducir los costos de fabricación, ya sea que la excitación sea de corriente continua o de alterna.

Los embobinados de las máquinas pequeñas se hacen con alambre redondo. En máquinas grandes, el material conductor tiene una sección transversal rectangular para un empacado más compacto en el espacio ocupado por el embobinado.

El material conductor más común es el cobre. El aluminio tiene un uso limitado.

Las máquinas rotativas se estudiarán mayormente en su estado estable, es decir, funcionando en condiciones permanentes.

1.1.2 Usos de las máquinas eléctricas rotativas

Toda la energía eléctrica producida comercialmente es generada y distribuida en la forma de corriente alterna, y sólo una pequeña fracción de aquélla se utiliza en la forma de corriente continua actualmente en nuestro medio.

Aunque los motores de corriente continua se adaptan mejor para procesos industriales que demandan altos grados de flexibilidad en el control de velocidad y torque de lo que están los motores de corriente alterna convencionales que operan de fuentes de frecuencia constante, su uso en nuestro medio ha decadido bastante.

• Se les usa sobre todo en buques y aviones comerciales y de combate y en aplicaciones industriales específicas (laminadoras, por ejemplo).

En la industria nacional, la máquina que mueve las fábricas y los talleres es el motor de corriente alterna que con fuentes de frecuencia variable viene superando definitivamente a los motores de corriente continua.

1.1.3 Los campos magnéticos

Las máquinas rotativas presentan dos campos magnéticos, el del estator y

el del rotor. Uno de ambos es el campo principal, es decir, aquél sin el cual la máquina eléctrica no puede funcionar de ninguna manera como tal (ni con carga, ni sin ella); a este campo se le suele llamar también **inductor** y el circuito eléctrico que lo origina se denomina de excitación o de campo.

El otro campo, que se origina en la otra estructura, se denomina **inducido**; al circuito eléctrico que lo produce se le suele llamar **armadura**. Este campo aparece cuando la máquina trabaja con carga. En vacío, este campo es prácticamente nulo.

1.2 CLASIFICACION DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS

Las máquinas eléctricas se clasifican, en general, como **máquinas estáticas** (reactores y transformadores, por ejemplo) y **máquinas móviles** o de movimiento mecánico **lineal** (electroimanes de armadurra) y de movimiento **rotativo** (motores y generadores).

A su vez, las máquinas **rotativas** pueden ser de dos tipos: las hay de **corriente continua** (porque toda la potencia eléctrica intercambiada con la red exterior es de corriente continua) y de **corriente alterna** (porque la mayor parte o toda la potencia eléctrica intercambiada con la red exterior es de corriente alterna).

1.2.1 Máquinas de corriente continua

Las máquinas de corriente continua convencionales presentan siempre la misma configuración, es decir, las estructuras del estator y del rotor tienen en todas la misma forma, tal como puede verse en la figura 1.4. El estator es de polos salientes y el rotor es cilíndrico.

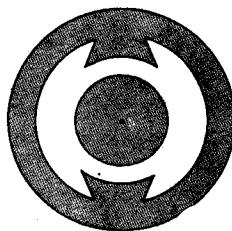


Fig. 1.4 Configuración de una máquina de corriente continua.

Asimismo, el campo inductor es originado en el estator, mientras que el inducido, en el rotor.

Por el bobinado del estator circula corriente continua de valor constante.

Por el bobinado mismo del rotor circulan corrientes alternas, aunque cuan-

do este bobinado se pone en contacto con la red exterior de continua un dispositivo, el colector, convierte dicha corriente alterna en continua.

Como ejemplo de estas máquinas se tiene los antiguos generadores de automóviles, llamados también dinamos y los siempre aplicables motores eléctricos para el arranque de los vehículos automotores, llamados también arrancadores. Los pequeños motores de juguete son también un buen ejemplo de este tipo de máquinas.

1.2.2. Máquinas de corriente alterna

Las máquinas de corriente alterna convencionales son un poco más difíciles de clasificar por cuanto, si bien la configuración de la estructura del estator es la misma en todos los tipos, es decir, se trata de una estructura cilíndrica, sin excepciones, sin embargo, en lo que respecta a los rotores, se advierte algunas diferencias, tal como puede verse en la figura 1.5.

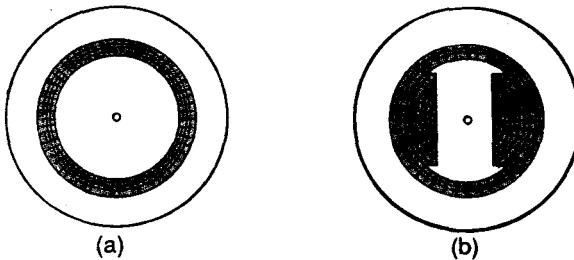


Fig. 1.5 Tipos de rotores de máquinas de corriente alterna:
(a) cilíndrico (b) de polos salientes.

Existen máquinas de corriente alterna con rotor cilíndrico, figura 1.5 (a), que son la mayoría, y las máquinas con rotor de polos salientes, figura 1.5 (b).

Por otro lado, la ubicación de los bobinados inductor e inducido difiere de unas máquinas a otras y hasta puede ocurrir que se utilice corriente continua para alimentar uno de los bobinados. De allí que las máquinas de corriente alterna, a su vez, tengan una clasificación más. Estas pueden ser **síncronas** o **asíncronas**.

1.2.2.1 Máquinas síncronas

Estas son máquinas de corriente alterna cuya característica esencial de funcionamiento es que su velocidad es constante, es decir, que permanece invariable con la carga; como dicha velocidad se denomina velocidad de sincronismo, estas máquinas adquirieron ese nombre.

El estator de estas máquinas es cilíndrico y la corriente que circula por el bobinado del estator es corriente alterna, usualmente trifásica.

El rotor, en cambio, puede ser cilíndrico o de polos salientes, tal como se observó al principio, ver la figura 1.5 nuevamente, pero la corriente que circula por el bobinado del rotor es corriente continua.

El campo inductor es originado por la corriente continua del rotor.

El campo del inducido o armadura es originado por las corrientes alternas del estator.

La corriente continua del bobinado del rotor proviene, en principio, de una fuente exterior de corriente continua (así era en los generadores antiguos; en los generadores modernos, proviene de un generador auxiliar de corriente alterna cuya tensión es rectificada por medio de un dispositivo rectificador de diodos, montado en el mismo eje de la máquina principal).

En los generadores antiguos, para poder introducir la corriente continua en el rotor se utilizaba un sistema de anillos deslizantes más escobillas, tal como se ve en la figura 1.6 (a).

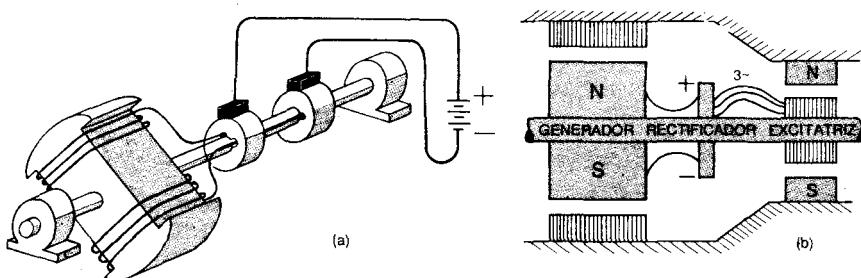


Fig. 1.6 Forma de alimentar el bobinado del rotor de una máquina síncrona:
(a) antigua, (b) moderna.

Estas máquinas, en la actualidad, se usan sobretodo como generadores en las centrales eléctricas, hidráulicas y térmicas, en los pequeños grupos electrógenos, pudiéndose de alguna forma incluir en esta clasificación a los alternadores de los vehículos automotores.

Su aplicación como motor en nuestro medio no está difundida.

1.2.2.2 Máquinas asíncronas

Estas también son máquinas de corriente alterna, pero que se diferencian de las máquinas síncronas porque su velocidad no es la misma en vacío que con carga, sino que conforme se aumenta la carga, la velocidad disminuye algo, siendo la máxima cuando trabaja en vacío.

En vacío, la velocidad del motor es cercana a la denominada velocidad de sincronismo.

En estas máquinas, tanto el estator como el rotor son estructuras magnéticas cilíndricas y por ambas estructuras circulan corrientes alternas.

El campo inductor es originado por las corrientes que circulan por el bobinado del estator, mientras que el inducido, por las del rotor.

Si bien el rotor es cilíndrico, existen dos tipos de bobinados de rotor, uno formado por barras longitudinales cortocircuitadas en sus extremos y que por su forma recibe el nombre de **rotor de jaula de ardilla**, ver figura 1.7 (a), y otro, formado por bobinas realizadas de idéntica forma que en el estator y que por su forma el rotor se denomina **rotor bobinado**, ver figura 1.7 (b).

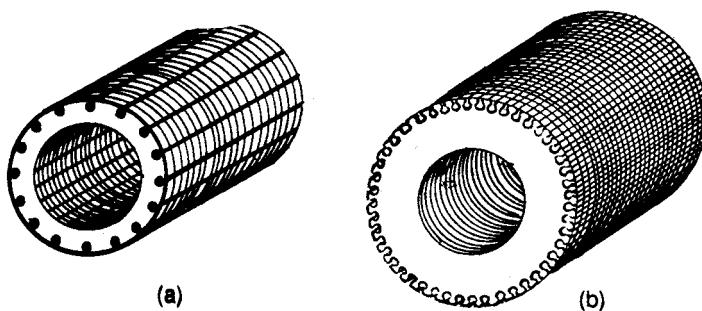


Fig. 1.7 Formas de rotores de máquinas asincrónas:
(a) rotor de jaula de ardilla, (b) rotor bobinado.

El uso más difundido de esta máquina es como motor y en nuestro medio se usa más, y también se construye, los motores con rotor de jaula de ardilla.

Los motores de rotor bobinado son muy caros y no se construyen en el país.

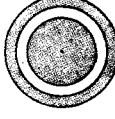
En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de la clasificación de las máquinas eléctricas convencionales que serán materia del presente libro.

Realmente, éstos son los únicos tipos de máquinas eléctricas rotativas convencionales de importancia que existen.

Nótese que esta clasificación general es independiente de que la máquina trabaje como motor o como generador. Las máquinas eléctricas rotativas se caracterizan por tener un comportamiento reversible, es decir, que la misma máquina se puede hacer funcionar como motor o también como generador.

Las máquinas que no están incluidas en esta clasificación son máquinas de pequeña potencia o son máquinas de laboratorio o son máquinas especiales

Tabla 1.1 Clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas convencionales

Clases de Máquina	Tipo de máquina	Configuración del rotor	Esquema	Ubicación (corriente) Inductor (...) Inducido (...)
cc				estator (cc) rotor (ca)
Observaciones – Uso del colector: conmutador más escobillas.				
	Síncronas	Rotor cilíndrico		rotor (cc) estator (ca)
Observaciones.– Uso de anillos deslizantes más escobillas.				
ca	Asíncronas	Jaula de ardilla		estator (ca) rotor (ca)
Observaciones.– El motor de rotor bobinado usa anillos rozantes más escobillas.				

cuya aplicación no está difundida y que, por lo tanto, no conviene incluirlas para evitar una complicación innecesaria en el mencionado esquema.

1.3 CARACTERISTICAS COMUNES

Todas las máquinas eléctricas tienen características que les son comunes desde el punto de vista geométrico y de funcionamiento.

Desde el punto de vista geométrico, se puede decir que toda máquina eléctrica rotativa está constituida por:

- a) una carcasa o cubierta exterior;
- b) una estructura magnética fija cilíndrica o estator;
- c) una estructura magnética móvil cilíndrica o rotor;
- d) un entarjero o espacio de aire que separa el estator del rotor para que este último pueda girar;
- e) un bobinado estatórico; y
- f) un bobinado rotórico.

Desde el punto de vista del funcionamiento, se puede decir que en todas las máquinas eléctricas rotativas:

- a) existe un campo magnético inductor;
- b) existe un campo magnético inducido;
- c) interactúan en el entarjero los campos magnéticos inductor e inducido;
- d) se convierte energía mecánica en eléctrica y viceversa;
- e) la conversión de energía utiliza el campo magnético como medio de acoplamiento;
- f) es posible un comportamiento reversible como motor o como generador (principio de reciprocidad de Lenz); y
- g) se regulan automáticamente (es decir, por si mismas) ante las variaciones de la carga dentro de un amplio rango.

También puede agregarse las siguientes características comunes:

- a) los núcleos de ambas estructuras magnéticas son de material ferromagnético;
- b) los conductores de los bobinados son de cobre; y
- c) el entarjero es de aire.

En la figura 1.8 puede verse el esquema común de las máquinas eléctricas rotativas.

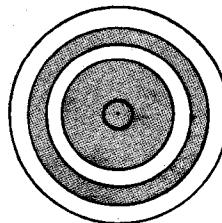
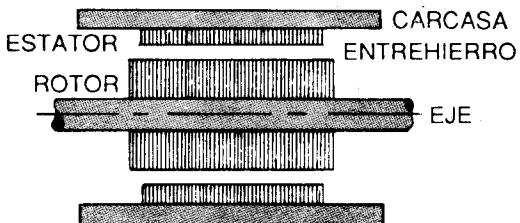


Fig 1.8 Geometría común a todas las máquinas eléctricas rotativas.

1.4 EL MOTOR Y EL GENERADOR ELEMENTALES

En los cursos de Física se estudia el principio físico de un motor y un generador eléctricos partiendo de un modelo muy sencillo, es decir, un campo magnético inductor \mathbf{B} formado por dos polos N y S y un conductor metálico de longitud l entre los polos, tal como se ve en la figura 1.9.

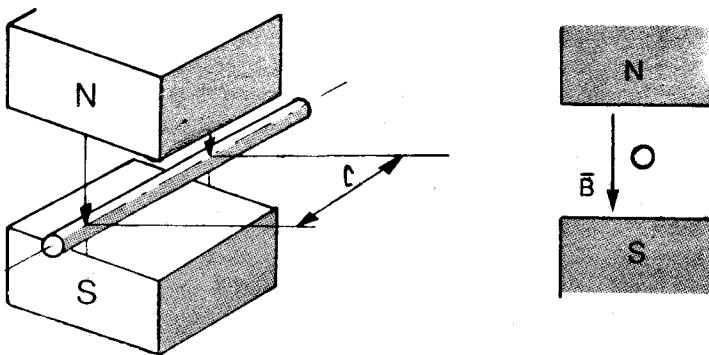


Fig. 1.9 Componentes del modelo elemental de una máquina eléctrica.

Para una mejor comprensión de los fenómenos se recurre a dos leyes fundamentales, la ley de Faraday o ley del flujo cortante, cuya forma vectorial es útil en este caso:

$$\overline{\mathbf{E}} = \int_{\text{cortante}} \overline{\mathbf{v}} \times \overline{\mathbf{B}}$$

donde \mathbf{E} es la f.c.m. inducida en los bornes del conductor cuando éste se desplaza transversalmente al campo \mathbf{B} con una velocidad \mathbf{v} . Véase la figura 1.10 y obsérvese que la f.c.m. apunta hacia adentro.

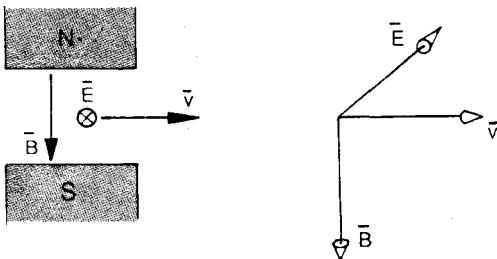


Fig. 1.10 Generador eléctrico elemental

Esta ley expresa claramente el principio de funcionamiento de un generador eléctrico con los terminales abiertos o desconectados, es decir, suponiendo que no pasa corriente por el conductor.

La otra ley o ley de la fuerza F sobre un conductor, se expresa también matemáticamente de la forma siguiente:

$$\overline{F} = I \overline{I} \times \overline{B}$$

donde I es la corriente eléctrica (supongamos continua por ahora) que circula por el conductor quieto cuando éste es alimentado por una fuente de energía eléctrica y se encuentra entre los polos del campo. Véase la figura 1.11. Se observa que la fuerza apunta hacia la izquierda tratando de llevarse al conductor en ese sentido.

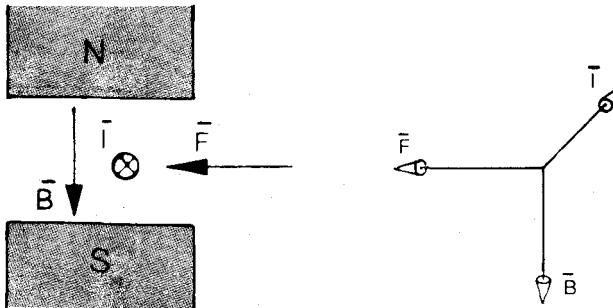


Fig. 1.11 El motor eléctrico elemental.

Esta ley expresa claramente el principio de funcionamiento de un motor eléctrico.

Volviendo al modelo del generador elemental, figura 1.10, ciérrese ahora el circuito del conductor por medio de una carga que consume una corriente I cuando se le aplica la f.e.m. E , tal como se ve en la figura 1.12.

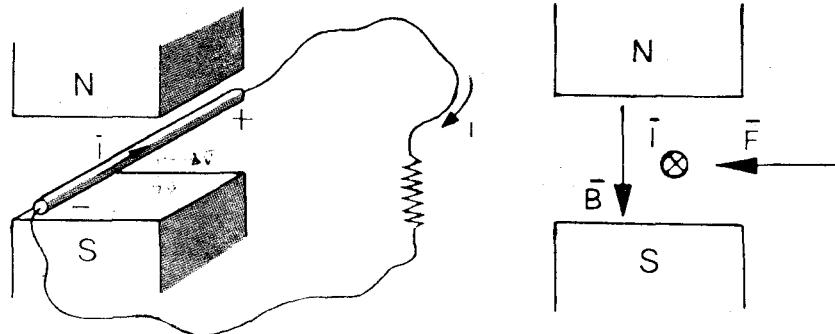


Fig. 1.12 El generador elemental con carga.

Aplicando la ley de la fuerza resulta que el paso de la corriente I por el conductor produce la aparición de una fuerza electromagnética de sentido contrario al movimiento que tiende a detener el conductor; a esta fuerza se le llama fuerza antagonista.

Para que el conductor pueda mantener su movimiento es necesario que un motor primo suministre una fuerza que equilibre a dicha fuerza F .

Ahora bien, en el modelo del motor elemental, figura 1.11, se puede apreciar que el movimiento del conductor hacia la izquierda con una velocidad v inducirá en los bornes del conductor una f.c.m. E cuya polaridad se opone al sentido de la corriente I que pasa por el conductor, tal como se observa en la figura 1.13.

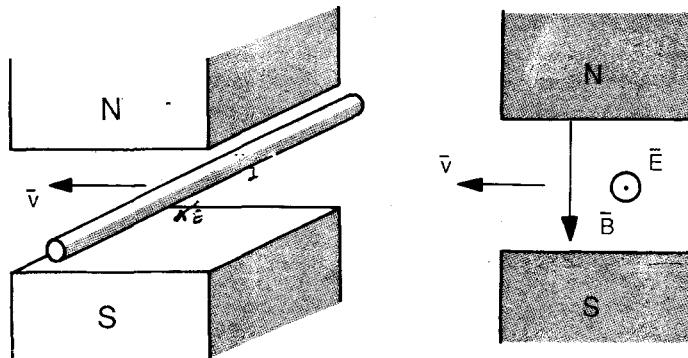


Fig. 1.13 El motor elemental con carga.

Por el carácter de dicha E se denomina usualmente fuerza contraclectromotriz f.c.e.m.

1.5 MATERIALES ELECTRICOS CONDUCTORES

En la construcción de máquinas eléctricas se emplean con fines conductores casi exclusivamente dos materiales: el cobre y el aluminio, especialmente el cobre por ser entre los materiales industriales el de más alta conductividad.

La plata, todavía más conductora queda excluida a causa de su precio.

El aluminio, cuya resistividad es 61% superior a la del cobre, se emplea a veces en ciertas bobinas polares de máquinas rotativas, para aprovechar las ventajas de su menor peso, y sobretodo, fundido, a presión, en los rotores de los motores pequeños de jaula de ardilla (devanados de aluminio inyectados) donde, además de ofrecer un sistema de construcción sólido y económico, que el cobre no admite por su dificultad de colada, proporciona más seguridad durante los períodos transitorios de sobrecarga (en los arranques, por ejemplo), teniendo en cuenta la capacidad térmica y la ausencia de soldadura.

El cobre se usa mayormente en estado de recocido y en forma de hilo o de barra. Si el hilo o barra no está muy bien recocido, las dificultades para formar y montar las bobinas aumentan bastante, pues el material se endurece muy de prisa con la manipulación y plegados sucesivos.

El cobre duro sólo se emplea en las máquinas para ciertas conexiones sometidas a esfuerzos mecánicos, y como delgas o segmentos de colector o en las jaulas de los motores asincrónicos.

El hierro laminado o fundido se usa mucho en reóstatos de arranque.

El carbono y sus derivados, grafito, electrografito, constituyen materiales de contacto y para escobillas.

1.6 MATERIALES ELECTRICOS AISLANTES

Las máquinas eléctricas necesitan aislamientos para su construcción.

Aislamiento es la unión o combinación modelada (conformada constructivamente de aislantes diversos o distintos) de distintos aislantes, que se complementan en sus propiedades.

Aislamiento es la suma de las propiedades eléctricas que se obtienen con este aislante, incluso en condiciones anormales de servicio.

Los materiales aislantes deben tener buenas propiedades mecánicas, pero sobretodo, eléctricas y térmicas.

La capacidad de carga y las sobretemperaturas admisibles dependen mucho del aislante o combinación de aislantes utilizados.

Se utiliza una diversidad de materiales aislantes en los aislamientos de las máquinas eléctricas.

En la construcción de motores y generadores se utilizan, por ejemplo, la madera aislante, la madera prensada con resina sintética y papel aislante como aislamiento poco solicitado eléctricamente.

El presspán (papel húmedo prensado) se usa en máquinas de calidad normal, en las ranuras por su buen plegado.

Las virutas aglomeradas se usan como revestimientos de ranuras con altas solicitudes. También se usa la mica.

Los aislamientos para altas solicitudes térmicas se hacen a base de tejidos de fibra de vidrio.

Las cintas aislantes autoadhesivas se usan en el aislamiento de bobinas.

1.7 MATERIALES MAGNETICOS

Los materiales magnéticos forman una parte indispensable de las máquinas eléctricas rotativas. Se les conoce con el nombre de materiales ferromagnéticos.

Los materiales ferromagnéticos que más se utilizan en la construcción de máquinas eléctricas son el acero al silicio de diferentes calidades, el acero fundido, el hierro colado, el acero en chapas y forjado, aleaciones de acero especiales (para los imanes permanentes), etc.

Para el circuito magnético, las propiedades más importantes de estos materiales son la curva de magnetización y las pérdidas en función de la inducción y la frecuencia. A veces, también se requiere buenas propiedades mecánicas.

El acero al silicio es de reciente aplicación a las máquinas rotativas.

El hierro colado se emplea en las carcchas de las máquinas de corriente continua y en los rotores de las máquinas síncronas, en las que durante el funcionamiento de la máquina el flujo no varía.

La fundición de acero tiene las mismas aplicaciones que el hierro colado.

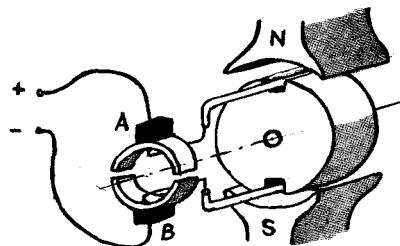
El acero en chapas se usa en las carcchas soldadas de las máquinas síncronas de alta velocidad.

Para la fabricación de imanes permanentes para las máquinas magnetoelectrivas se emplean aleaciones de acero especiales que poseen después de la magnetización una gran remanencia y una gran fuerza coercitiva.

Capítulo 2

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

- 2.1 Principio de funcionamiento**
- 2.2 Campo magnético producido por el estator**
- 2.3 La f.e.m. inducida**
- 2.4 Campo magnético producido por el rotor o reacción de armadura**
- 2.5 Arrollamiento de compensación e interpolos**
- 2.6 El torque electromagnético**



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En el bobinado del rotor o armadura de una máquina de corriente continua se producen cantidades eléctricas alternas (tensiones y corrientes).

Gracias a un ingenioso dispositivo mecánico, denominado colector se ha podido convertir estas cantidades alternas en cantidades de continua, es decir, de valor medio constante.

Para comprender de manera sencilla el funcionamiento del colector conviene utilizar la máquina de continua elemental operando como generador. En la figura 1.10 se vio el esquema de un generador elemental cuyo inducido estaba constituido por un solo conductor desplazándose transversalmente al campo.

Sea un generador con un rotor de doce ranuras diametralmente opuestas, las cuales alojarán los dos conductores de una espira, tal como se ve en la figura 2.1.

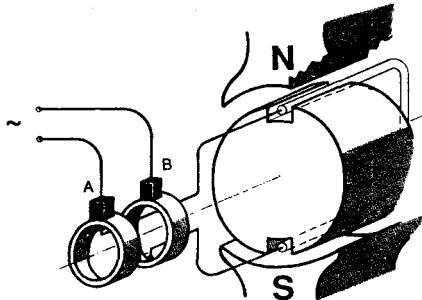


Fig. 2.1 Generador elemental de alterna con una sola espira.

Los extremos de la espira se han conectado a dos anillos aislados entre si, y sobre los anillos se han instalado las escobillas A y B, a las cuales se conecta los bornes externos del generador.

Se conviene en llamar a la línea que pasa por el centro del inducido, justamente por la mitad de la distancia entre los polos N y S, línea neutra geométrica; y a la parte de la circunferencia del inducido τ , que corresponde a un polo, paso polar.

La máquina representada en la figura 2.1 tiene dos pasos polares y un par de polos.

Al girar el rotor de radio r con una velocidad angular ω cada conductor se desplazará a lo largo de la periferia del rotor con una velocidad tangencial $v = \omega r$ induciéndose instantáneamente en cada uno de ellos una f.e.m. de valor:

$$\begin{aligned} E &= 1 . v . B . \operatorname{sen} \omega t \\ &= (E_{\max}) \operatorname{sen} \omega t \end{aligned}$$

que dice claramente de la naturaleza alterna de la f.e.m. inducida en los bornes de la espira.

En una vuelta completa de la espira la f.e.m., variable con el tiempo, cambia su polaridad dos veces.

Como los dos conductores están en serie, la f.e.m. resultante en los bornes de la espira es el doble de la de cada conductor.

En la figura 2.2 se muestra la sinusoidal de la f.e.m.

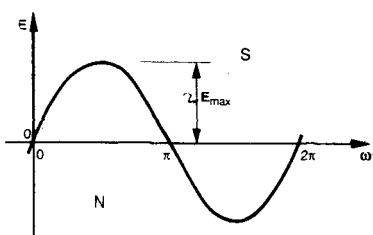


Fig. 2.2 Curva de la f.e.m. en los bornes de una espira de un alternador.

Recuérdese que el número de polos es siempre par.

Examinando la figura 2.1, se ve que cada escobilla está conectada por intermedio del anillo con un solo conductor. Por consiguiente, en los bornes del circuito exterior, por consiguiente, en los bornes del circuito exterior surge tensión variable con el tiempo y por éste se genera una tensión alterna de una cierta frecuencia.

Para obligar a esta tensión a aparecer por el circuito exterior en una sola dirección cualquiera, es decir, rectificarla, la máquina es dotada de un dispositivo especial llamado colector. Véase la figura 2.3.

Su principio de funcionamiento consiste en lo siguiente. Los extremos de la espira se conectan a dos segmentos de cobre (llamados también delgas o láminas de colector) aislados entre si con mica y montado el conjunto sobre el mismo eje del rotor aunque eléctricamente aislado de él.

Sobre las delgas se colocan las escobillas A y B, fijas en el espacio, las cuales conectan la espira con el circuito exterior. La disposición de las escobillas en las delgas tiene mucha importancia.

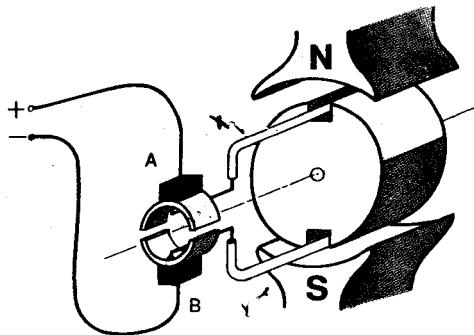


Fig. 2.3 Esquema de funcionamiento de una máquina de corriente continua.

Para rectificar totalmente la tensión alterna es necesario colocar las escobillas a lo largo de la línea media que pasa por los polos denominada también **eje principal**: de este modo la f.e.m. inducida en la espira se hace igual a cero cuando la escobilla pasa de una delga a otra.

Entonces, al girar el rotor, en la espira se sigue generando f.c.m. variable, pero cada una de las escobillas hará contacto sólo con aquella delga y, por consiguiente, con aquel conductor que se encuentre bajo el polo de polaridad dada.

Por ejemplo, la escobilla A hace contacto siempre sólo con la delga a la cual va conectado el conductor bajo el polo N; al contrario, la escobilla B hace contacto sólo con el conductor que se encuentra bajo el polo S.

Esto significa que la polaridad de las escobillas permanece invariable del mismo modo que no varía la polaridad del campo inductor. La tensión en la escobilla A será siempre mayor que la tensión en la escobilla B, de allí los signos + y -.

Por consiguiente, la tensión se aplicará al circuito exterior sólo en una dirección, en otras palabras, tiene lugar la rectificación de la f.e.m. variable inducida y alterna en la espira a f.e.m. pulsante en las escobillas y, por lo tanto, en el circuito exterior.

Si logramos fijar la escobilla B a una tensión de referencia, por ejemplo, la tensión cero, se obtiene la gráfica de la figura 2.4.

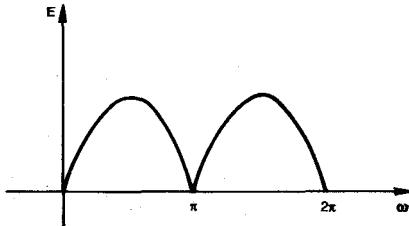


Fig. 2.4 F.e.m. rectificada en función del tiempo.

La pulsación de la tensión en la figura 2.4 tiene lugar en los límites desde su valor máximo hasta cero.

La tensión media o continua entre escobillas es:

$$E_m = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \omega \phi \operatorname{sen} \omega t d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \omega \phi$$

Más adelante se mostrará que la pulsación de la f.e.m. se suaviza si en el inducido se arrolla un devanado compuesto por un gran número de conductores, ejecutado de manera correspondiente y conectado al colector.

2.2 CAMPO MAGNETICO PRODUCIDO POR EL ESTATOR

Este subcapítulo tiene por finalidad explicar el modo en que se crea la fuerza magnetizante de los polos principales, necesaria para la creación del flujo inductor o flujo magnético principal.

El flujo inductor de una máquina de continua es el flujo en el entrehierro EH en un área correspondiente a un paso polar τ , en marcha en vacío de la máquina.

En la figura 2.5 se muestra en forma esquemática una forma de una máquina de continua de cuatro polos y se representa el cuadro del flujo magnético creado por los polos principales.

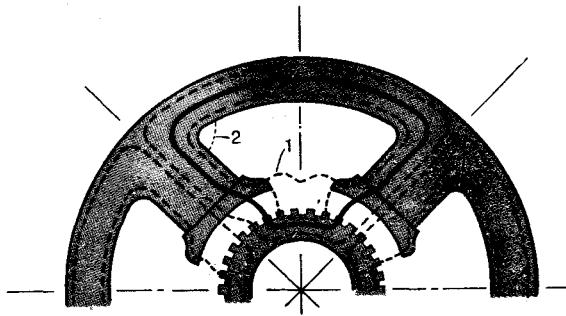


Fig. 2.5 Circuito magnético de los polos principales de una máquina de continua.

En virtud de la simetría completa de la máquina, el flujo creado por cada uno de los polos se divide respecto de la línea axial del polo en dos partes, que forman dos circuitos magnéticos iguales dispuestos simétricamente a ambos lados de la línea axial del polo dado.

El número de estos circuitos es igual al número de polos de la máquina, pero el cálculo de la fuerza magnetomotriz f.m.m. toma en cuenta sólo uno de ellos.

La parte del flujo principal, correspondiente a la mitad del polo, se muestra en la figura 2.5 con línea de trazos gruesos, que determinan los límites exterior e interior del circuito, y una línea plena que pasa por la mitad del circuito.

El flujo principal constituye sólo una parte del flujo creado por el polo. La otra parte del flujo, llamada **flujo de dispersión**, se deriva al espacio entre los polos y, por lo tanto, no pasa al inducido y no participa en la creación de f.e.m.

En la figura 2.5 el flujo de dispersión se muestra convencionalmente con dos líneas finas de trazos 1 y 2.

En la figura 2.6 se muestra un polo del estator desarrollado sobre una recta para mayor claridad.

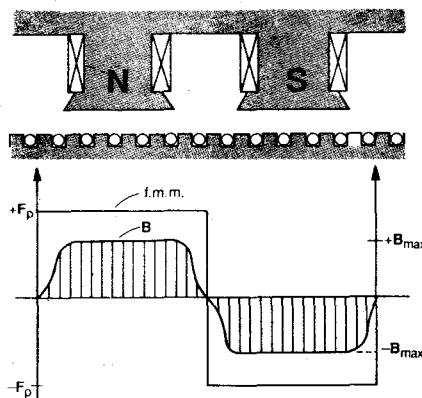


Fig. 2.6 Distribución de la f.m.m. y de la densidad de campo inductoras en el EH de una máquina de continua.

Por la bobina de N_p espiras circula una corriente continua I de valor constante, dando lugar a la aparición de una f.m.m. por polo F_p de valor constante e igual a:

$$\text{Sea magneto nulo} \quad F_p = N_p \cdot I$$

Esta f.m.m. se aplica al núcleo del circuito magnético considerado originando la aparición de los flujos principal y de dispersión. Estos flujos originan caída de tensión magnética o de f.m.m. en las partes de hierro y sobretodo en el entrehierro.

En la determinación de la inducción magnética B o densidad de campo magnético en cada punto de la superficie del entrehierro se requiere conocer la longitud del EH. Esta es constante frente a los polos y se hace cada vez mayor conforme se acerca a la línea neutra, en donde esta longitud se hace máxima, tal como puede verse en la figura 2.5.

Nota La densidad de campo resulta ser inversamente proporcional a la longitud del EH, tal como lo demuestran las siguientes relaciones:

$$F_{mm} = \mathcal{B} \cdot \phi$$

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{F_p}{R \cdot A} = \frac{\mu \cdot F_p \cdot A}{l \cdot A} = \frac{\mu \cdot F_p}{l}$$

donde: R es la Reluctancia del circuito magnético, μ es la permeabilidad del núcleo, A es la sección transversal que atraviesa el flujo ϕ , y l es la longitud del circuito magnético.

En la figura 2.6 puede verse la curva de distribución resultante de B a lo largo de la periferia del rotor. Téngase en cuenta el cambio de polaridad para la consideración del signo de F_p y de B. B cambia de signo al pasar por la línea neutra.

2.3 LA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

La distribución de la densidad de campo B puede aproximarse a una distribución senoidal en el espacio. Las dos ranuras que contenían inicialmente los dos conductores de una espira contendrán ahora a dos bobinas en paralelo de Ns espiras en serie cada una conectadas en la forma que se ve en la figura 2.7.

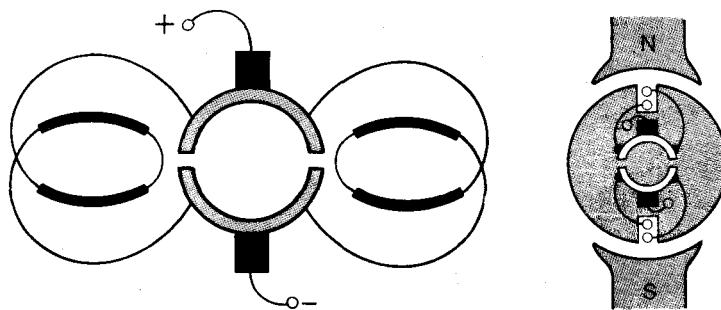


Fig. 2.7 Máquina de corriente continua de dos polos y dos bobinas concentrada en la armadura en paralelo.

La velocidad eléctrica ω_e y la velocidad mecánica ω_m están relacionadas a través del número de polos, resultando siempre que la velocidad mecánica es menor o igual que la velocidad eléctrica:

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m$$

Por aplicación de la ley de Faraday de la inducción electromagnética en una bobina de N_s espiras que es cortada por un flujo magnético de p polos de densidad B cuando el rotor gira a la velocidad ω_m , se tiene lo siguiente:

$$e = \frac{d\lambda}{dt}$$

En la figura 2.7 (a) puede verse un esquema de la distribución del flujo magnético ϕ desde un polo al otro a través de la estructura ferromagnética del rotor:

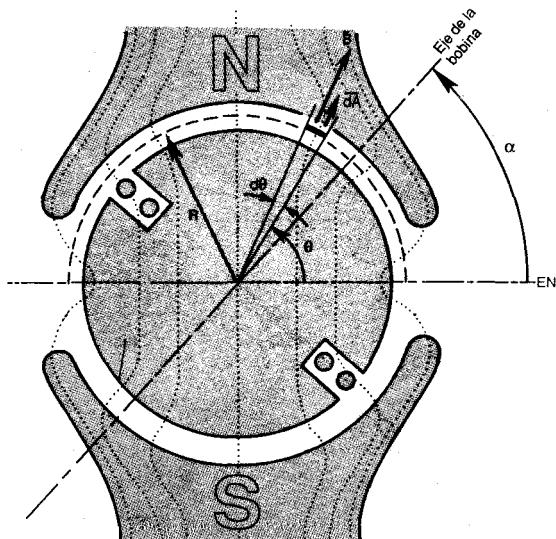


Fig. 2.7 (a) Esquema de flujo en la máquina de corriente continua.

El flujo concatenado $d\lambda$ es igual a:

$$\begin{aligned} d\lambda &= N_s \cdot d\phi = N_s \cdot lB \cdot dA = N_s \cdot B_{\max} \cdot \operatorname{sen} \theta \cdot dA \cos 0 \\ &= N_s \cdot B_{\max} \cdot \operatorname{sen} \theta \cdot l \cdot R \cdot d\theta \cdot 1 \quad , \quad l = \text{longitud efectiva} \\ &\qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{de los conductores} \\ &= N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R \cdot \operatorname{sen} \theta \cdot d\theta \quad R = \text{radio de giro de la} \\ &\qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{espira} \end{aligned}$$

El flujo concatenado λ para una posición angular α del eje de la bobina de N_s espiras girando a la velocidad angular ω_m es:

$$\lambda = N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R \cdot \int_{\alpha - \frac{\pi}{2}}^{\alpha + \frac{\pi}{2}} \sin \theta \, d\theta$$

$$= N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R \cdot \left[\frac{\alpha + \frac{\pi}{2}}{\alpha - \frac{\pi}{2}} \right]$$

$$\begin{aligned}\lambda &= -N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R (-\sin \alpha - \sin \alpha) \\&= 2 N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R \sin \alpha \\&= 2 N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R \sin \omega_m t && , \quad \alpha = \omega_m t \\&= N_s \cdot B_{\max} \cdot A \cdot \sin \omega_m t && , \quad \text{suponiendo } \alpha_0 = 0 \\&= \lambda_{\max} \sin \omega_m t && , \quad \lambda_{\max} = N_s \cdot B_{\max} \cdot A\end{aligned}$$

Entonces, la f.e.m. resulta ser igual a:

$$\begin{aligned}e &= \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d}{dt} (\lambda_{\max} \sin \omega_m t) \\&= \lambda_{\max} \omega_m \cos \omega_m t \\&= e_{\max} \cos \omega_m t && , \quad e_{\max} = \omega_m \lambda_{\max} \\&= e_{\max} \cos \omega_e t && , \quad \omega_m = \omega_e \quad \text{para } p = 2\end{aligned}$$

Como se sabe, en los bornes se produce tensión rectificada cuyo valor medio e_m es igual a:

$$e_m = \frac{2}{\pi} e_{\max} = \frac{2}{\pi} N_s \cdot A \cdot B_{\max} \cdot \omega_e$$

La última expresión puede ponerse en función del flujo máximo ϕ_{\max} y de la velocidad mecánica ω_m :

$$e_m = \frac{2}{\pi} N_s \cdot A \cdot \frac{\phi_{\max}}{A} \cdot \frac{p}{2} \omega_m$$

$$e_m = \frac{1}{\pi} p \cdot N_s \cdot \phi_{\max} \cdot \omega_m$$

Si en lugar del número de espiras en serie N_s se considera el número total de conductores activos Z_c , la expresión que se obtiene es la siguiente:

$$e_m = \frac{p \cdot Z_c}{2 \pi a} \phi_{\max} \cdot \omega_m$$

En la expresión anterior, Z_c es igual a 2 veces $N_s \cdot a$; y el número de ramas en paralelo a depende del tipo de bobinado del inducido, tema que se verá más adelante: $a=2$, si el bobinado es ondulado; $a=p$, si el bobinado es imbricado.

Una forma bastante útil de esta última expresión es la siguiente:

$$E_m = k_a \cdot \phi_{\max} \cdot \omega_m$$

donde, k_a es igual a $p \cdot Z_c / (2 \pi a)$

2.4 CAMPO MAGNETICO PRODUCIDO POR EL ROTOR O REACCION DE ARMADURA

Cuando una máquina de continua ideal trabaja en vacío, es decir, sin carga la corriente de armadura I_a es nula y, por lo tanto, no existe el campo magnético del rotor.

Sin embargo, cuando la máquina trabaja con carga, por la armadura circula una corriente I_a , la cual producirá una f.m.m. en el rotor, cuya dirección será la del **eje neutro**, es decir, perpendicular a la dirección del campo principal. Véase la figura 2.8.

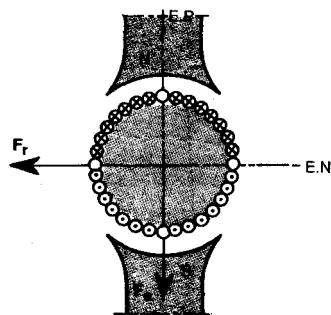


Fig. 2.8 Fuerzas magnetomotrices del estator y del rotor en una máquina de continua.

La dirección y el sentido del campo magnético del rotor se determina con

ayuda de la figura 2.8, basándose en la configuración del bobinado del rotor. Como se observa, por encima de la línea neutra, las corrientes tienen un sentido mientras que por debajo, sentido contrario.

Esta configuración, en su conjunto, es como si se tratase de una bobina común envuelta alrededor de un núcleo, de modo que la dirección y el sentido del campo resultante se determina de idéntica forma, tal como se ve en la figura 2.8.

Los valores de f.m.m. en el espacio se distribuyen según una onda aproximadamente triangular, siendo nula en el eje principal y máxima en el eje neutro. Véase la figura 2.9. En esta figura se muestra cómo son las trayectorias de las líneas de flujo magnético.

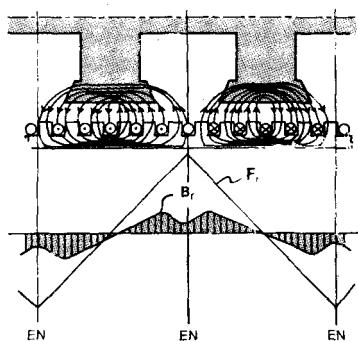


Fig. 2.9 Ondas en el espacio de la f.m.m. y de la densidad de campo de la armadura.

Por la ley de Ampere se sabe que la f.m.m. es proporcional a la cantidad de corriente abrazada por una línea cerrada. Por lo tanto, cuanto mayor sea el número de conductores envueltos por una línea de flujo, mayor será también la f.m.m. en ese punto.

En la figura 2.9 se muestra también la onda de valores en el espacio de la densidad de campo de la armadura. Recuérdese que la densidad de campo es inversamente proporcional a la longitud del entrehierro.

Se observa que la f.m.m. de la armadura produce una apreciable densidad de flujo que equidista de los polos.

A esta f.m.m. de la armadura se le conoce como **reacción de armadura** y tiene un efecto desmagnetizante en el campo.

Nótese que frente a cada polo las corrientes tienen sentidos diferentes y que en cada bobina de la armadura, contenida en un par de ranuras diametralmente opuestas, la corriente está variando en forma alterna, siendo máxima cuando los conductores pasan por el eje principal y nula cuando pasan por el eje neutro.

Justamente es de interés el paso de los conductores por el eje neutro, momento en el cual se produce en la bobina un cambio en el sentido de la corriente con una serie de efectos perjudiciales para el buen funcionamiento de la máquina. A este fenómeno se le conoce con el nombre de **comutación**.

2.5 ARROLLAMIENTO DE COMPENSACION E INTERPOLOS

La corriente de campo y la corriente de armadura están presentes bajo carga y sus f.m.m.s combinadas producen una onda de la densidad de flujo algo parecida a la mostrada por la línea punteada en la figura 2.10, con la región de densidad de flujo cero desplazada del eje neutro, en el sentido de rotación para un generador y en el sentido contrario para un motor.

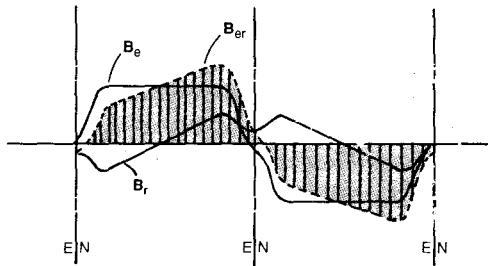


Fig. 2.10 Ondas de la densidad de los flujos inductor, inducido y resultante

Una componente del flujo en el eje de cuadratura causa dificultades en la comutación en máquinas de continua, y, usualmente, se toman medidas para minimizarlas.

Es importante que los lados de las bobinas que sufren una comutación caigan en una región de baja densidad de flujo.

Existen dos métodos comúnmente usados para eliminar los efectos indeseables de la reacción de armadura en la comutación.

El primero, usado en máquinas antiguas y en máquinas actuales pequeñas, consiste en desplazar las escobillas en el sentido de rotación para los generadores y en contrasentido para los motores.

El segundo método hace uso de los polos comutables (polos de comutación o interpolos) colocados en el eje neutro cuyos embobinados se conectan en serie opuestos a la armadura. La f.m.m. de los interpolos es, por lo tanto, siempre proporcional a la corriente de la armadura.

En la figura 2.11 se muestra un diagrama simplificado de una máquina de continua con polos comutadores.

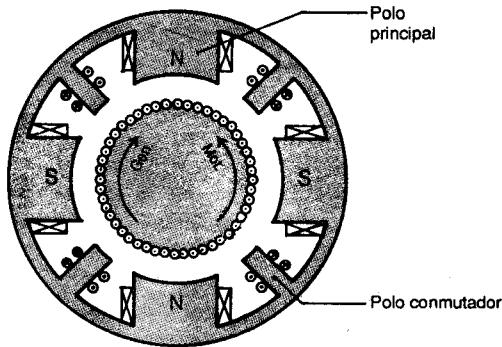


Fig. 2.11 Máquina de continua con polos de conmutación.

La tensión existente entre delgas adyacentes tiene una distribución en el espacio similar a la de la densidad de flujo resultante, siendo la tensión más elevada entre delgas adyacentes donde el lado de la bobina conectada cae en el campo más fuerte.

En algunas aplicaciones las máquinas están sujetas a fuertes sobrecargas o cargas que varían rápidamente, como en el caso de motores de las fábricas de acero.

Durante sobrecargas extremas o cambios de carga repentinos, la tensión entre delgas adyacentes puede volverse suficientemente elevada como para causar que el commutador se arquee desde una escobilla hasta la siguiente de polaridad opuesta, resultando en un cortocircuito y algunas veces quemando el commutador.

Estas puntas en los valores de la densidad y de la tensión se neutralizan mediante el uso de un embobinado compensador colocado en las caras de los polos de campo principales como se indica en la figura 2.12.

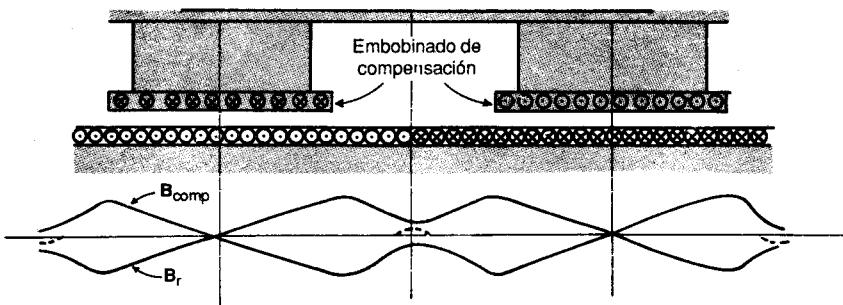


Fig. 2.12 Vista simplificada de una máquina de continua de dos polos con un embobinado de compensación.

El embobinado de compensación se conecta en serie con la armadura y el número de conductores en éste es tanto, como para hacer su f.m.m. igual a la de los conductores de la armadura bajo cada cara de polo.

2.6 EL TORQUE ELECTROMAGNETICO

Si a los bornes de una máquina de continua, cuyo campo principal B está excitado, se aplica una diferencia de potencial, entonces, por los conductores del rotor circulará una corriente I_c igual a:

$$I_c = \frac{I_a}{a}$$

donde I_a es la corriente de armadura total y a es el número de ramas en paralelo.

Como resultado de esto, sobre cada conductor se ejercerá una fuerza electromagnética F cuyo sentido y valor se determinan a partir de la conocida ley:

$$\bar{F} = 1. \bar{I}_c \times \bar{B}$$

$$F = 1. I_c . B$$

Los Z_c conductores del rotor originarán, entonces, un torque T_{em} igual a:

$$T_{em} = Z_c . F . r$$

$$T_{em} = Z_c . 1 . I_c . B . r$$

donde r es el radio del rotor y B puede expresarse de una manera más útil:

$$B = \frac{p \cdot \phi_{max}}{2 \pi r \cdot l}$$

donde ϕ_{max} es el flujo producido por un polo.

Reemplazando en la última expresión del torque los valores de B e I_c se tiene la expresión:

$$T_{em} = Z_c \cdot 1 \cdot \frac{I_a}{a} \cdot \frac{p \cdot \phi_{max}}{2 \pi r \cdot l} \cdot r$$

$$T_{em} = \frac{p \cdot Z_c}{2 \pi a} \cdot \phi_{max} \cdot I_a$$

$$T_{em} = k_a \cdot \phi_{max} \cdot I_a$$

Nótese el parecido de la expresión de T_{em} con la de E_m .

Es importante observar que el torque electromagnético se produce por la existencia de los campos magnéticos del estator y del rotor que están desfasados en 90° .

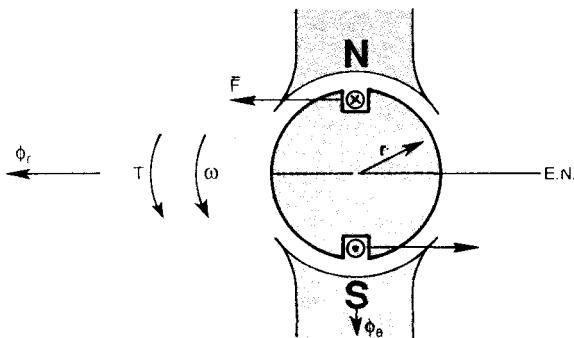


Fig. 2.13 El torque electromagnético en una máquina de continua.

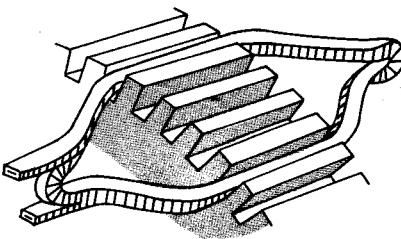
El torque electromagnético se produce por la tendencia a alinearse de los dos campos. Si no existiera el conmutador, los campos se alinearían y el torque T_{em} desaparecería. El conmutador no permite que esto suceda y mantiene siempre la dirección del flujo de la armadura a 90° con el campo del estator, por lo que el torque permanece constante a pesar del movimiento.

En los generadores este torque tiene sentido contrario al movimiento, por lo que ese dice que se trata de un torque antagonista que se opone al movimiento. En los motores este torque tiene el mismo sentido del movimiento por lo que se le llama torque motor.

Capítulo 3

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

- 3.1 Polos, bobinas de campo y yugo del estator**
- 3.2 Interpolos y arrollamiento de compensación**
- 3.3 El colector**
- 3.4 El arrollamiento de armadura**
- 3.5 El modelo del circuito equivalente**



ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

La máquina de continua consta de dos partes principales:

- 1) la parte inmóvil, destinada principalmente para crear el flujo magnético, y
- 2) la parte rotatoria, llamada **inducido**, en la que transcurre el proceso de transformación de la energía mecánica en eléctrica (generador eléctrico) o a la inversa, la transformación de la energía eléctrica en mecánica (motor eléctrico).

Las partes inmóvil y rotatoria están separadas una de otra por un espacio denominado **entrehierro**.

La parte inmóvil o **estator** de la máquina de continua está compuesta por los **polos principales**, destinados a crear el flujo magnético principal; los **polos auxiliares o polos de commutación**, instalados entre los principales y que sirven para lograr el funcionamiento sin chispas de las escobillas en el colector (en el caso de falta de espacio en las máquinas de pequeña potencia los polos auxiliares no se instalan); y el **armazón** o yugo.

El **inducido** representa un cuerpo cilíndrico, que gira en el espacio entre los polos, y está compuesto por el **núcleo dentado del inducido**, el **devanado** arrollado a éste, el **colector** y el **aparato de escobillas**.

A continuación se da una breve descripción de los elementos constructivos principales de la máquina de corriente continua.

3.1 POLOS, BOBINAS DE CAMPO Y YUGO DEL ESTATOR

3.1.1. Polos principales

El polo principal viene dado en la figura 3.1. Este consta del **núcleo polar** (inductor) armado de chapas de acero para transformadores de 1mm de espesor con ayuda de espárragos.

Por el lado que da al inducido, el núcleo polar tiene la **zapata o expansión polar** que sirve para facilitar el paso del flujo magnético a través del entrehierro.

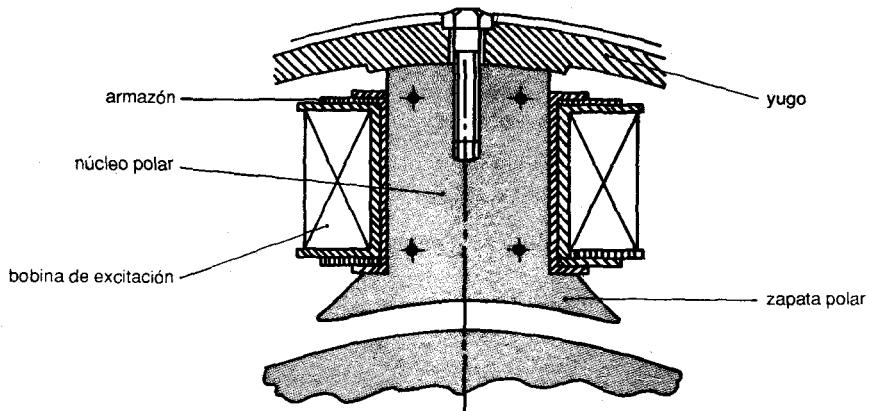


Fig. 3.1 Polo principal

La sujeción de los polos al yugo o armazón se realiza con auxilio de pernos especiales.

3.1.2 Bobinas de campo

En el núcleo polar va colocada la **bobina de excitación** o de campo, por la cual pasa corriente continua. Véase la figura 3.1

La bobina se arrolla a un armazón hecho de chapa de acero de 1–2 mm de espesor con ailante de cartón de 2–3 mm, o de plástico o de papel de baquelita.

En las máquinas de pequeña y mediana potencia, las bobinas de los polos principales se practican sin armazón.

Con el fin de disminuir la higroscopidad y aumentar la conductibilidad térmica, las bobinas se impregnán con compuesto aislador o se someten a una impregnación múltiple en lacas calientes con el secado posterior en hornos.

Para mejorar el enfriamiento la bobina se divide por su altura en dos o varias partes, entre las cuales se dejan canales de ventilación de suficiente anchura.

3.1.3 Yugo del estator

Se llama **yugo** o **armazón** a la parte inmóvil de la máquina, a la que se sujetan los polos principales y auxiliares y con ayuda de la cual la máquina se sujeta a la cimentación.

La parte del yugo que sirve para conducir el flujo de los polos principales y auxiliares se llama **culata**.

El yugo se fabrica de fundición o de acero. Si el diámetro del rotor es menor de 40 cm, entonces, además de los polos, al yugo se sujetan también las cajas de los apoyos.

3.2 INTERPOLOS Y ARROLLAMIENTO DE COMPENSACION

3.2.1 Interpolos

El polo auxiliar o **interpolo** consta también de un **núcleo polar** que termina en una **zapata polar**, de una u otra forma, y de la **bobina** que va colocada en el núcleo. Véase la figura 3.2.

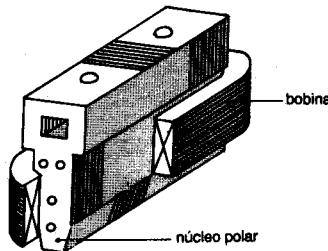


Fig. 3.2 Esquema de un interpozo.

Los interpolos se instalan estrictamente por la mitad entre los polos principales y van empernados al yugo.

Generalmente, los interpolos se hacen macizos, pero en las máquinas que funcionan con carga bruscamente variable, se hacen de acero en chapas.

3.2.2 Arrollamiento de compensación

El arrollamiento de compensación es uno de los medios más efectivos que contribuyen al mejoramiento de la comutación de las máquinas que funcionan con cargas bruscamente variables.

El objetivo de este arrollamiento es eliminar en el mayor grado posible la distorsión del campo magnético principal, provocada por la reacción de armadura. Para ello, el arrollamiento compensador se coloca en las ranuras estampadas en las expansiones polares de los polos principales, y se ejecuta según el esquema de la figura 3.3.

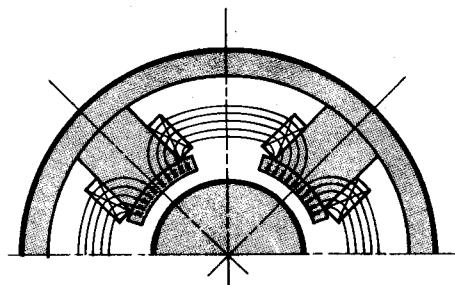


Fig. 3.3 Máquina de continua con arrollamiento compensador.

Para que la compensación tenga lugar a cualquier carga, es necesario conectar en serie el arrollamiento compensador con el devanado del inducido de tal modo, que las f.m.m.s. de ambos arrollamientos estén dirigidas en sentidos contrarios.

El uso de este arrollamiento aumenta el grado de fiabilidad de funcionamiento de la máquina en lo que se debe a la conmutación, pero complica su construcción y aumenta notablemente su costo.

Por esta razón, el arrollamiento compensador se emplea sólo en las máquinas de potencia relativamente grande, a partir de 150 kw.

3.3 EL COLECTOR

3.3.1 El conmutador

El devanado del inducido se conecta al **conmutador**, que puede ser de distintos tipos, según la potencia de la máquina y su velocidad.

En la figura 3.4 se muestra el tipo simple de conmutador cilíndrico. Generalmente, el conmutador se fabrica de pequeñas láminas de forma trapezoidal, llamadas también **delgas**, aisladas entre si y del cuerpo por medio de juntas y empaquetaduras de mica.

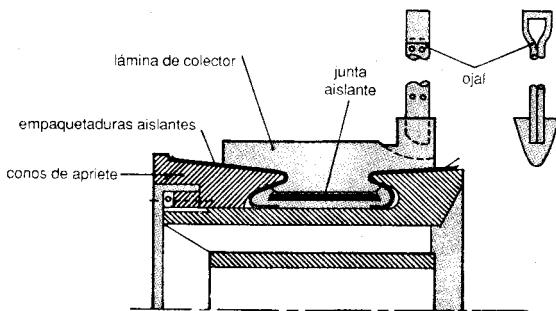


Fig. 3.4 Corte longitudinal de un conmutador cilíndrico.

Las delgas se sujetan con las colas de milano, y después de una serie de encajados en caliente el comutador se tornea con el fin de que su superficie sea estrictamente cilíndrica.

La conexión del devanado del inducido con el conmutador se puede efectuar de distinto modo.

Si la diferencia entre los diámetros del inducido y el conmutador no es muy grande, entonces los terminales de las secciones del devanado del inducido se sueldan directamente a las delgas del conmutador.

Las máquinas de gran potencia con velocidad normal de rotación frecuentemente tienen conmutador doble o separado.

3.3.2 El aparato de escobillas

Para la toma de corriente del commutador rotatorio y para suministrarle a éste corriente, se emplea el **aparato de escobillas**, que consta de:

- a) las escobillas,
- b) los portaescobillas,
- c) los pernos portaescobillas,
- d) la corona portaescobillas, y
- e) las barras colectoras.

En la figura 3.5 se muestra una de las estructuras típicas del portaescobillas de una máquina de continua.

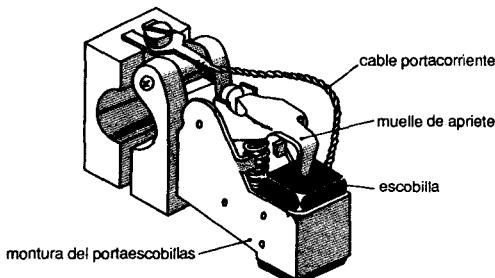


Fig. 3.5 Portaescobillas

En las máquinas modernas se emplea casi exclusivamente escobillas de carbón y grafito. Las de carbón y metal se emplean en las máquinas de continua de baja tensión.

La escobilla se coloca en el portaescobillas y con ayuda de un muelle se aprieta al commutador con una fuerza de $1.5 - 2.5 \text{ N/cm}^2$.

El portaescobillas se sujet a un perno portaescobillas y mantiene la escobilla en una posición determinada con relación al commutador. El tipo de portaescobillas más difundido, es el que le da a la escobilla posición radial y que le permite desplazarse en el collar del portaescobillas.

La transmisión de corriente de la escobilla al perno portaescobillas se realiza con el auxilio del cable flexible o cable portacorriente, figura 3.5. En cada perno generalmente se colocan dos o varias escobillas que funcionan en paralelo. Los pernos portaescobillas tienen forma cilíndrica o prismática, se sujetan a la corona portaescobillas y se aislan de ella con casquillos aislantes.

En la figura 3.6 se muestra uno de los métodos de sujeción de los pernos portaescobillas a la corona.

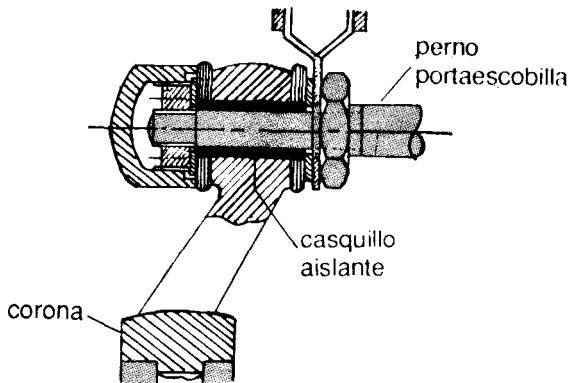


Fig. 3.6 Sujeción de los pernos portaescobillas a la corona.

En las máquinas de pequeña y mediana potencia, la corona se instala sobre cojinetes, tal como se ve en la figura 3.7. En las máquinas de gran potencia, la corona se sujeta al yugo.

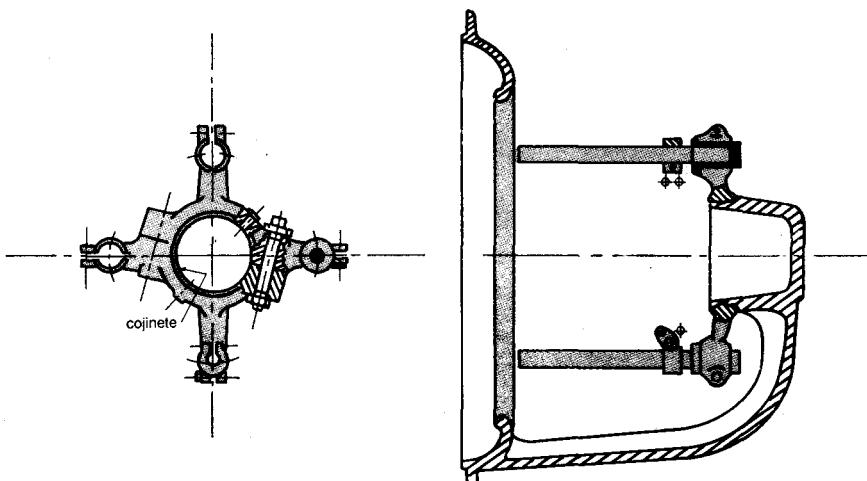


Fig. 3.7 Sujeción de la corona portaescobillas sobre el cojinete

Todas las escobillas de igual polaridad se unen entre si por medio de **barras colectoras**, de las cuales salen derivaciones a los terminales de la máquina.

3.4 EL ARROLLAMIENTO DE ARMADURA

3.4.1 El inducido o armadura

Actualmente, se emplea exclusivamente inducidos dentados de tambor, hechos de chapa de acero para transformadores de 0.5 mm de espesor para una frecuencia de remagnetización del inducido (20 – 60 Hz) normal para las máquinas de continua.

Las chapas de acero se arman en dirección axial de la máquina, y para reducir las pérdidas por corrientes parásitas se aislan una de otra con lacas o papel de 0.03–0.05 mm de espesor.

En la figura 3.8 puede verse una hoja de acero del inducido de tambor.

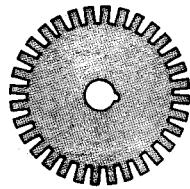


Fig. 3.8 Placa de armadura.

El núcleo del inducido se prensa por ambos lados con ayuda de dispositivos de apriete, que se sujetan de manera especial al árbol o van empernados a éste.

Para mejorar la refrigeración, las máquinas de pequeña potencia van dotadas de aletas; en las máquinas de gran potencia, en el árbol va montado un ventilador.

3.4.2 Devanados del inducido

Los devanados del inducido de tambor que se emplean en la actualidad se componen de secciones (figura 3.9) fabricadas con frecuencia en plantillas especiales y colocadas en las ranuras del núcleo del inducido.



Fig. 3.9 Sección separada del arrollamiento.

El devanado (arrollamiento) del inducido es el elemento más importante de la máquina, por cuanto con su participación directa transcurre la conversión de una forma de energía en otra.

3.4.2.1 Clasificación de los devanados de inducido de las máquinas de continua

Existen los siguientes tipos de devanados de inducido:

- a) imbricado simple,
- b) ondulado simple,
- c) imbricado combinado, y
- d) ondulado combinado.

Los devanados simples forman siempre un solo sistema de conductores cerrado en si mismo, mientras que los devanados combinados pueden formar tanto uno (devanado ordinario), como varios de estos sistemas (devanado múltiple).

En el presente libro se estudiará sólo los devanados simples.

Los bobinados imbricados se usan en máquinas de gran corriente (por presentar una gran cantidad de bobinas en paralelo), mientras que los ondulados, en las de gran tensión (por presentar un gran número de bobinas en serie).

En las máquinas con bobinado imbricado el número de escobillas es igual al número de polos. Las escobillas del mismo signo se unen entre si para constituir un mismo punto.

En las máquinas con bobinado ondulado el número de escobillas puede ser simplemente dos para cualquier número de polos.

3.4.2.2 Principios del bobinado de los arrollamientos de tambor

En la figura 3.10 se muestra la sección del arrollamiento de un inducido de

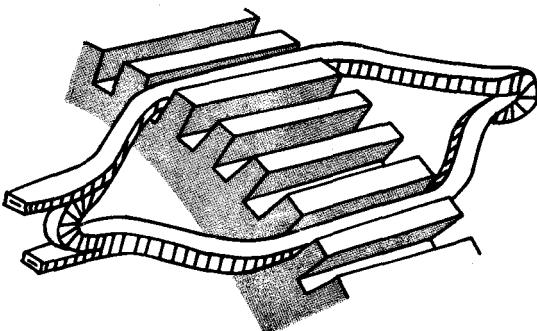


Fig. 3.10 Disposición de las secciones del arrollamiento de un inducido de tambor.

tambor. A las partes de la sección situadas en las ranuras se les llama **partes activas**, y a las partes de la sección con ayuda de las cuales los lados activos de ésta se conectan entre si y con el colector se les llama **partes frontales** de la sección.

Obsérvese que la sección de un inducido de tambor tiene dos lados activos. Estos se sitúan uno respecto al otro a una distancia igual, o aproximadamente igual, a un paso polar.

El arrollamiento de tambor se hace de dos capas, es decir, de tal modo, que un lado activo de cada sección está situado en la parte superior de la ranura, y el otro, en la inferior (véase la figura 3.10).

Si colocáramos ambos lados de la sección en un mismo plano, entonces, en tal arrollamiento de una capa, las partes frontales de las secciones se intersecciarían, lo que requeriría el doblado de estas partes, cosa extremadamente indecible desde el punto de vista de su construcción y bobinado.

A la capa situada cerca de la superficie exterior del inducido se le llama **capa superior**, y a la otra, **inferior**. La transición de una capa a otra se hace por la mitad de la parte frontal, como se muestra en la figura 3.10.

3.4.2.3 Construcción de los arrollamientos de un inducido de tambor

El elemento constructivo fundamental del arrollamiento de un inducido de tambor de una máquina de continua es la **sección del arrollamiento**. Se llama sección a la parte del arrollamiento que se encuentra entre dos delgadas sucesivas.

En la figura 3.11, (a) y (b), se muestran en forma esquemática las secciones de dos espiras de los arrollamientos imbricado y ondulado.

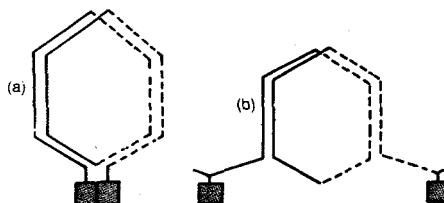


Fig. 3.11 Secciones de dos espiras de los arrollamientos:
(a) imbricado simple, (b) ondulado simple.

Las secciones más simples son las de una sola espira, ampliamente empleadas en las máquinas de potencia media y de alta potencia. En lo sucesivo se considerará sólo los esquemas con secciones de una espira (los lados de las secciones situados en la capa superior se representarán con línea plena, y en la

capa inferior, con línea de trazos), puesto que el aumento del número de espiras influye sólo en la magnitud de la f.c.m.

En la figura 3.12 se representan las secciones de un arrollamiento imbricado.

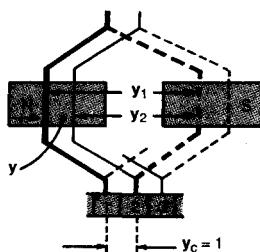


Fig. 3.12 Arrollamiento imbricado simple.

Para apreciar el arrollamiento ondulado simple hay que hacer un recorrido completo del inducido y correspondientemente del colector. Véase la figura 3.13.

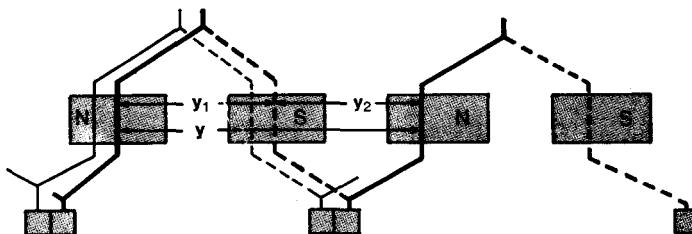


Fig. 3.13 Arrollamiento ondulado simple.

Las secciones del arrollamiento se hacen de conductores de cobre de sección circular o rectangular, aislados con hilo de algodón, esmalte, seda, cinta de mica, etc.

Cuando el número de secciones es grande y el de ranuras, pequeño (en máquinas de media y pequeña potencia), dos, tres, y en el caso general, n secciones se unen constituyendo una **bobina** con aislamiento común respecto a la ranura.

En la figura 3.14 se da una bobina de arrollamiento imbricado compuesta de tres secciones de una espira. El paso de la capa superior a la inferior se realiza doblando los conductores por la mitad de la parte frontal de la bobina. El arrollamiento hecho de tal modo se llama de **bobina**.

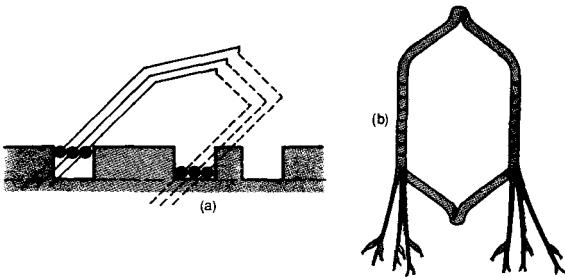


Fig. 3.14 (a) Arrollamiento de iguales secciones.
(b) Bobina compuesta de tres secciones de una espira.

3.4.2.4 Pasos de un devanado

Para montar correctamente el arrollamiento en el inducido y conectarlo con el colector, es necesario conocer los pasos de arrollamiento en el inducido y en el colector.

Se llama **paso de arrollamiento del inducido** y la distancia, medida en ranuras elementales (ranura elemental es la que contiene dos lados activos, véase la figura 3.15), entre los lados activos correspondientes (es decir, secciones consecutivas de acuerdo con el esquema del arrollamiento (véanse las figuras 3.12 y 3.13).

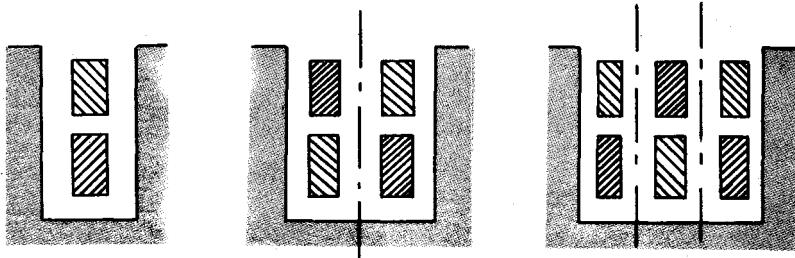


Fig. 3.15 Ranuras del inducido compuestas de (a) una, (b) dos y
(c) tres ranuras elementales.

Se llama **paso del arrollamiento en el colector** o **paso de delgas** y y_c la distancia entre las divisiones del colector a las que está conectada la sección, medida por el número de divisiones del colector.

Como se ve, en un devanado imbricado simple, el paso en el colector es igual a una división del colector, es decir,

$$y_c = 1$$

En la figura 3.16 se representan las secciones 1, 6, 11 y 12 de un devana-

do ondulado simple; este devanado se caracteriza porque al bobinarlo se recorre el inducido y correspondiente el colector, colocando en el inducido, debajo de cada par de polos una sección y, abarcando en el colector un paso y_c .

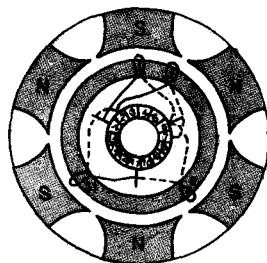


Fig. 3.16 Secciones de una espira del arrollamiento ondulado simple.

El requisito fundamental que debe satisfacer un devanado ondulado simple, consiste en que después de un recorrido del inducido y colector se debe llegar a la división del colector contigua a la de partida, situada a la izquierda o a la derecha de ella.

Si la máquina tiene p polos y el colector consta de s delgas, entonces en un recorrido se coloca en el inducido $p/2$ secciones, y en el colector se desplaza a $(p \cdot y_c)/2$ divisiones. De acuerdo con la condición.

$$\frac{p \cdot y_c}{2} = s + 1$$

de donde:

$$y_c = \frac{s + 1}{p/2}$$

En la máquina representada en la figura 3.16, $p = 6$ y $s = 14$, entonces:

$$y_c = \frac{14 + 1}{6/2} = 5$$

Para el bobinado correcto del arrollamiento, ambos pasos deben ser numéricamente iguales y corresponderse entre si.

3.5 EL MODELO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

En la figura 3.17 se representa en forma esquemática y sencilla las partes más importantes de una máquina convencional de continua.

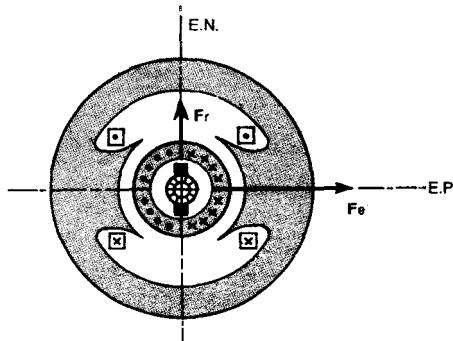


Fig. 3.17 Esquema real de una máquina de continua.

Obsérvese que las escobillas se han tenido que girar 90° para lograr un esquema más simple.

En la figura 3.18 se representa fielmente la misma máquina pero sólo con elementos de circuito eléctrico.

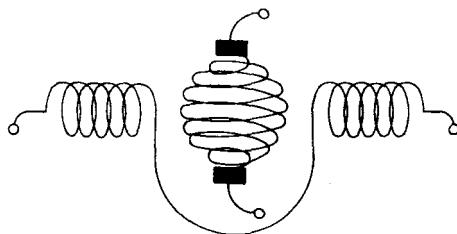


Fig. 3.18 Representación de la máquina de continua con elementos de circuito eléctrico.

Finalmente, en la figura 3.19 puede verse el modelo de circuito típico equivalente que se utiliza para representar con bastante exactitud a la máquina de continua, representación que se utilizará de ahora en adelante en la explicación de los fenómenos así como en la solución de problemas relacionados con el funcionamiento y operación de estas máquinas.

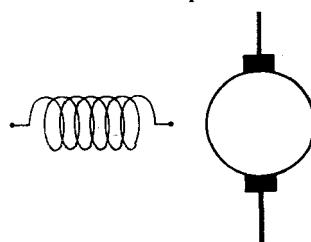
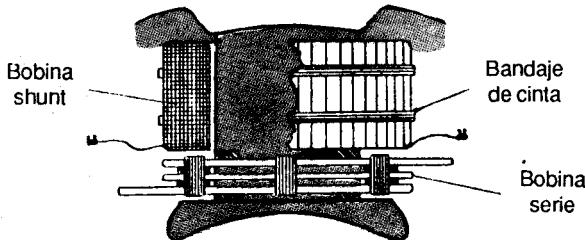


Fig. 3.19 Representación sencilla de los circuitos.

Capítulo 4

EL GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA EN REGIMEN ESTABLE

- 4.1 Formas de excitación
- 4.2 Circuitos equivalentes. Ecuaciones
- 4.3 Curvas características
- 4.4 Generadores en paralelo



EL GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA EN REGIMEN ESTABLE

En las centrales eléctricas modernas prácticamente se genera sólo energía eléctrica de corriente alterna trifásica. Una parte significativa de esta energía se usa en la misma forma de corriente alterna en la industria, comercio y residencias para fuerza y alumbrado.

En los casos en que por las condiciones de producción es necesaria o preferente la corriente continua (empresas de la industria química y metalúrgica, transporte o tracción eléctrica) ésta se obtiene, con más frecuencia, transformando la corriente alterna en continua con auxilio de convertidores estáticos. Los convertidores rotativos (un motor de corriente alterna se acopla en el mismo árbol con un generador de continua) están en desuso debido a su baja eficiencia.

En la actualidad, el campo de aplicación de los generadores de continua es bastante reducido. En los vehículos automotores el generador de continua, conocido antiguamente como dinamo o dinamo, ha sido sustituido eficazmente por el alternador. En las centrales eléctricas también ha sido desplazado por un pequeño generador síncrono con el inducido en el rotor que trabaja con un rectificador de diodos a la salida.

Si bien la aplicación del generador de continua es muy reducida, sin embargo, su estudio puede ser de interés para comprender mejor ciertos problemas y fenómenos que también se presentan en los generadores comunes de alterna.

El funcionamiento de un generador de cualquier tipo y, en particular, del generador de continua, se basa en el proceso de transformación de la energía mecánica suministrada a éste en energía eléctrica. Para ello, el generador se acopla con algún motor primo, por ejemplo, con un motor de combustión interna, que lo pone en rotación con una velocidad ω .

Un laboratorio de Máquinas Eléctricas que cuente con máquinas de continua, permitirá hacerlas trabajar como generadores y someterlas a varias pruebas de ensayo con la finalidad de conseguir las curvas características de funcionamiento. Estos generadores pueden ser fácilmente accionados por motores eléctricos por acoplamiento directo.

4.1 FORMAS DE EXCITACION

El método de excitación, es decir, el modo de alimentar el bobinado induktor, da origen a una clasificación de los generadores de continua.

Así se tiene que los generadores de continua pueden ser de excitación

independiente o separada (requieren de una fuente exterior o de imanes para funcionar) y también de **excitación propia o autoexcitados** (para funcionar, no requieren de una fuente exterior).

Los generadores con excitación independiente pueden ser, a su vez, **generadores excitados por una fuente de corriente continua exterior o generadores con imanes permanentes** (caso de los megóhmétros de manivela o de las bicicletas). Puesto que los últimos son de poca importancia, en lo sucesivo, se tendrá en cuenta sólo los primeros.

Los generadores autoexcitados se dividen, atendiendo al método de conexión de los arrollamientos de excitación, en **generadores shunt, derivación o paralelo** (el circuito del campo se conecta en paralelo con el de la armadura), **generadores serie** (el embobinado del campo se conecta en serie con el de la armadura) y **generadores compound, mixto o compuesto** (llevan un embobinado de campo en paralelo y otro embobinado de campo en serie con el de la armadura, ambos ubicados en los mismos polos).

En la figura 4.1 se representan los esquemas principales de los generadores de excitación independiente, en derivación, en serie y de excitación compuesta.

Estos esquemas de conexiones no incluyen los embobinados de conmutación ni de compensación.

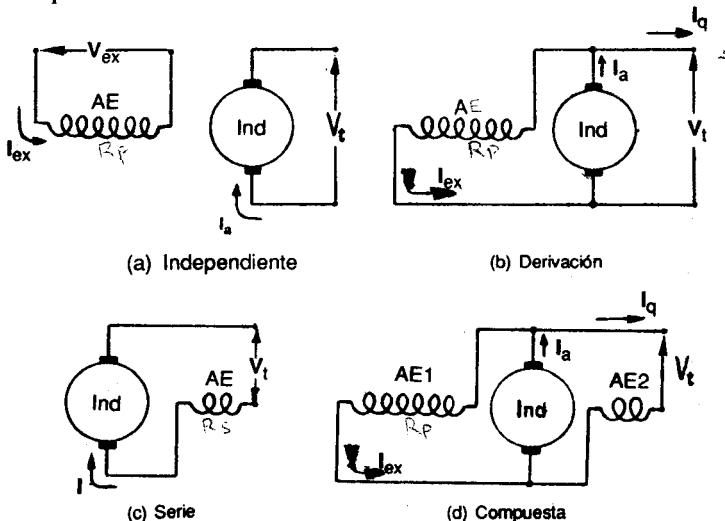


Fig. 4.1 Esquemas de principio de los generadores de corriente continua..

En la figura 4.1, Ind significa inducido; AE, arrollamiento de excitación; V_t y V_{ex} , las tensiones en los bornes del generador y del circuito de excitación, respectivamente; I_a , la corriente en la armadura o inducido; I_q , la corriente entregada por el generador a la red o a la carga, se llama, también corriente de línea; I_{ex} , la corriente de excitación.

En todos los casos, en la excitación del generador se consume el 1-3 % de su potencia nominal.

4.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES. ECUACIONES

El funcionamiento de estado estable de un generador de continua se describe por su característica de carga.

Las caídas de tensión a causa de los efectos inductivos son despreciables debido a que, bajo las condiciones de estado estable, las corrientes son constantes o, a lo más, con una variación ligera.

Mientras que la inductancia propia de las bobinas de la armadura que están sufriendo una conmutación y la inductancia mutua entre estas bobinas y el resto del bobinado de la armadura influyen en la conmutación, sus efectos en las características de carga de las máquinas de continua convencionales es despreciable.

En el circuito equivalente de cada tipo de conexión se debe incluir algunos elementos de circuito que permitan representar o explicar los efectos de los componentes reales.

Así, por ejemplo, una bobina de campo participa del circuito equivalente con su resistencia propia, la cual podrá medirse con un ohmímetro en la práctica. En el circuito se dibuja la bobina que representa al campo pero se le asigna sólo su resistencia.

La bobina shunt se caracteriza por tener muchas espiras de alambre delgado por lo que se le dibuja alargada con varias espiras y su resistencia se designa con R_p . El valor de esta resistencia es relativamente alto (50, 100, 250 ohmios, por ejemplo) comparado con otras resistencias de la máquina.

La bobina serie se caracteriza por tener pocas espiras de alambre grueso por lo que se le dibuja corta, con dos o tres espiras, designándose su resistencia con R_s . Esta resistencia presenta un valor bastante pequeño (0.01, 0.5, 1.0 ohmios, por ejemplo).

Si se midiera con un ohmímetro, estando la máquina apagada, la resistencia entre los bornes de las escobillas, se obtendría aproximadamente el valor de la resistencia del bobinado de la armadura. Esta resistencia se designa por r_a y se dibuja en serie con el símbolo de la armadura, para indicar que en ella se produce una caída de tensión debido al paso de la corriente de armadura I_a . La resistencia de armadura presenta valores tan pequeños como los de una bobina serie.

Para ajustar el valor de la corriente de campo, I_{ex} en la bobina shunt, se acostumbra conectar en serie con dicho bobinado de campo un resistor ajustable, conocido con el nombre de **réóstato de campo** y que se denota por R_{ex} .

Los interpolos y embobinados de compensación, cuando existen, se consideran como parte del circuito de armadura y la resistencia de estos embobinados, así como la de las escobillas, se incluye en r_a .

Conviene recordar, ahora, dos expresiones de suma importancia para el análisis de estas máquinas. Una es la expresión de la f.e.m. inducida $E_a = K_a \cdot \Phi_p \cdot \omega$ y la otra es la expresión del torque electromagnético o torque mecánico interno (*T.m.i.*) $T = K_a \cdot \Phi_p \cdot I_a$.

Para simplificar, se supone que el circuito magnético de la máquina es de carácter lineal y que, por lo tanto, el flujo Φ_p es proporcional a la corriente de excitación I_{ex} , por lo que las expresiones de la f.e.m. inducida y el *T.m.i.*

$$E = K \cdot I_{ex} \cdot \omega$$

$$T = K \cdot I_{ex} \cdot I_a$$

donde K sería una constante que depende de la reluctancia del núcleo supuestamente constante y del número de vueltas por polo N_p .

La caída de tensión en las escobillas durante el trabajo con carga es del orden del 1.0 % de la tensión nominal en bornes V_t (nom), por lo que, a veces, no se considera en los cálculos.

4.2.1 Generadores con excitación independiente

Estos generadores son los más sencillos de estudiar porque en ellos la corriente de excitación I_p no depende de la tensión inducida E_a por el propio generador:

$$I_p = \frac{V_{ex}}{R_p + R_{ex}}$$

En la figura 4.2 se muestra el circuito equivalente de un generador de continua con excitación independiente.

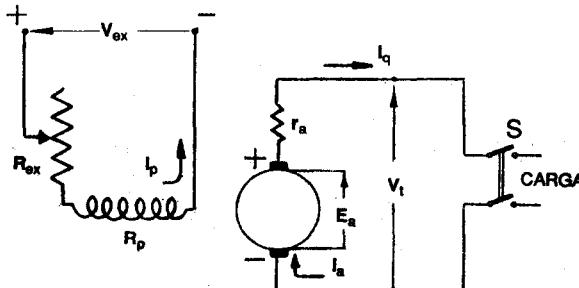


Fig. 4.2 Generador con excitación independiente.

Debido a que la corriente de campo I_p de estas máquinas es proporcionada por una fuente externa, la corriente de armadura I_a es igual a la corriente de carga I_q :

$$I_a = I_q$$

Aplicando la segunda ley de Kirchoff en el circuito de la armadura se cumple lo siguiente:

$$E_a = V_t + I_a \cdot r_a$$

Obsérvese que en el caso de generadores, $E_a > V_t$.

En vacío con el interruptor S abierto, se cumple que:

$$I_a = I_q = 0$$

y que: $V_t = E_a = K \cdot I_p \cdot \omega$

En la figura 4.3 se muestra la curva característica en vacío $V_t - I_p$ del generador de continua con excitación independiente.

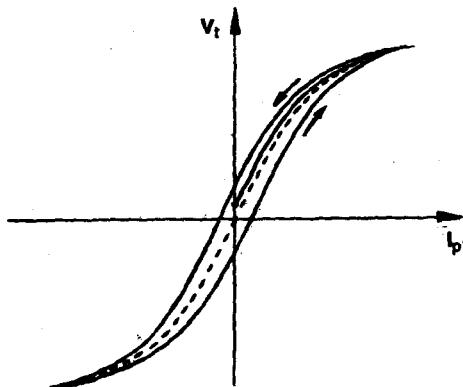


Fig. 4.3 Tensión de marcha en vacío en función de la corriente de excitación.

Como la velocidad ω del rotor es constante, V_t varía directamente con la corriente de excitación I_p y, de asumirse lineal el circuito magnético de la máquina, la curva de vacío sería una recta, en este caso, la denominada línea del entrehierro.

Cuando se ensaya una máquina real, la verdadera característica de vacío del generador es una curva, la denominada curva de vacío del generador y que tiene la misma forma de la curva de magnetización del circuito magnético del generador.

Obsérvese que, cuando la corriente de excitación es nula, en los bornes del generador aparece de todas maneras una pequeña tensión V_t . Esta tensión se llama **tensión remanente** y es, por ejemplo, de unos 6 voltios en un generador de 220 V.

En la solución de problemas de generadores de continua con carga, los valores de E_a que corresponden a cada I_p se toman directamente de esta curva.

Para una velocidad ω' distinta de ω se tiene otra curva de vacío, cuyos puntos se pueden encontrar para cada I_p a partir de la siguiente relación:

$$E_a = E_a \frac{\omega'}{\omega}$$

En la figura 4.4 puede verse las curvas de vacío de un generador de continua para dos velocidades ω' y ω'' distintas de la velocidad ω de ensayo en vacío.

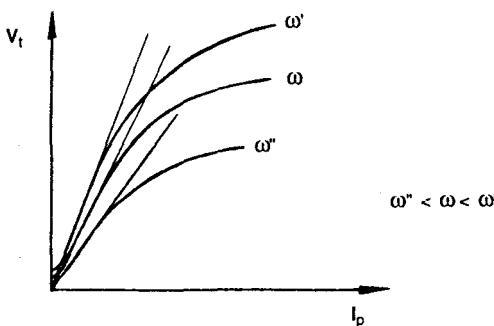


Fig. 4.4 Curvas de vacío de un generador de continua para diferentes velocidades.

4.2.2 Generadores autoexcitados

La autoexcitación es posible sólo mediante el magnetismo remanente. Es la excitación de la máquina por medio de una corriente que suministra ella misma o la misma red a la que va conectado el inducido.

Los polos del generador de continua son de material ferromagnético y adquieren su polaridad magnética cuando la bobina de excitación es alimentada por corriente continua. Cada vez que la bobina es desexcitada, desaparece su f.m.m., pero los polos, debido al magnetismo remanente propio de los materiales ferromagnéticos, mantienen una pequeña f.m.m. que no desaparece y que conserva su polaridad como si se tratase de un pequeño imán permanente.

Gracias a esta propiedad, los generadores de continua pueden proporcionar su propia excitación del campo a velocidad normal.

Considerando el trabajo del generador sin carga, para hacer crecer la tensión, desde la pequeña tensión remanente, es necesario que, en los generadores shunt y compound, se pongan en paralelo los circuitos de los bobinados de armadura y shunt, tal como lo sugieren las conexiones de los mismos, vistas desde un principio. El generador serie puede hacer crecer su tensión sólo bajo carga debido a que su corriente de carga es también la corriente de campo.

En la figura 4.5 puede verse los pasos fundamentales que explican el aumento de la tensión en los bornes del generador, considerando una conexión shunt.

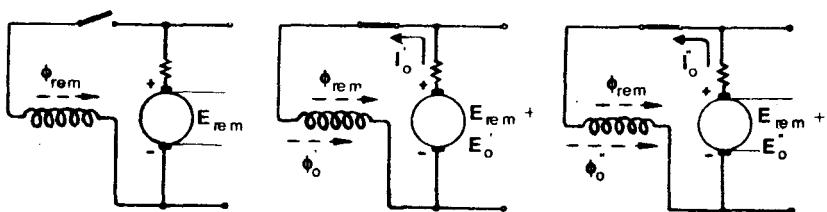


Fig. 4.5 Explicación gráfica del fenómeno de la autoexcitación en generadores de CC.

Para la excitación del generador es necesario que en éste exista un pequeño flujo remanente de magnetización Φ_{rem} (2–3 % del nominal).

Al cerrar el circuito de excitación (si se hace girar el generador con una velocidad nominal, por ejemplo, entonces, en sus terminales aparecerá una pequeña tensión remanente V_1 (rem) igual aproximadamente a un 2 – 3 % de la V_t (nom)) por el circuito de excitación circulará una pequeña corriente que creará el flujo adicional de magnetización Φ' .

Dependiendo del sentido de la corriente en el arrollamiento de excitación, el flujo Φ' puede ser dirigido bien en sentido opuesto respecto del flujo remanente Φ_{rem} , o bien en el mismo sentido que éste.

El generador se puede autoexcitar sólo cuando los dos flujos están dirigidos en un mismo sentido, es decir, el proceso de autoexcitación del generador puede transcurrir sólo en un sentido, determinado por el sentido del flujo Φ_{rem} .

Si ambos flujos tienen un mismo sentido, el flujo resultante de excitación aumenta; esto conduce al aumento de la f.e.m. inducida en el inducido y, a su vez, provoca el aumento ulterior de la corriente y el flujo de excitación... y, así, sucesivamente.

En realidad, la tensión en los bornes se puede expresar en función de los dos circuitos en paralelo:

$V_t = E_a + I_a \cdot r_a + d\lambda_a/dt$, λ_a es el flujo concatenado con el embobinado de la armadura.

$$V_t = K_a \cdot \Phi_{rem} \cdot \omega + K \cdot I_p \cdot \omega + I_a \cdot r_a + d\lambda_a/dt$$

$$V_t = E_{rem} + K \cdot I_p \cdot \omega + I_a \cdot r_a + d\lambda_a/dt$$

y:

$$V_t = I_p (R_p + R_{ex}) + d\lambda_p/dt, \quad \lambda_p \text{ es el flujo concatenado con la bobina de excitación}$$

Igualando las últimas expresiones, se deduce que la tensión en bornes V_t deja de crecer cuando:

$$I_p = \frac{E_{rem}}{R_p + R_{ex} - K \cdot \omega - r_a}$$

Suponiendo que el generador se arranca con $R_{ex} = 0$ y despreciando la resistencia de armadura por ser pequeña, se logra una forma más simple de esta expresión:

$$I_p = \frac{E_{rem}}{R_p - K \cdot \omega}$$

En la figura 4.6 se muestra las condiciones de autoexcitación de un generador shunt.

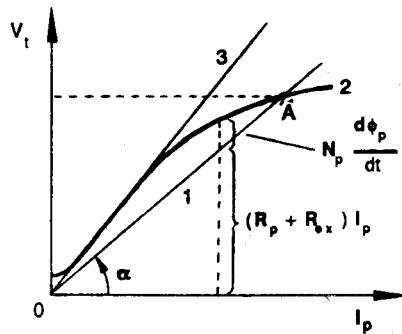


Fig. 4.6 El fenómeno de la autoexcitación en los generadores shunt en vacío.

Si $R_{ex} = \text{cte}$, entonces la caída de tensión $I_p (R_p + R_{ex})$ varía en forma directamente proporcional a la corriente de excitación I_p . Gráficamente, se

expresa por la recta 1 en la figura 4.6, que forma un ángulo α con el eje de las abscisas. Se cumple, además, que:

$$\operatorname{tg} \alpha \equiv I_p (R_p + R_{ex})/I_p = R_p + R_{ex}$$

Por lo tanto, a cada valor de R_{ex} le corresponde una recta particular que parte del origen de coordenadas bajo un ángulo determinado por la última fórmula.

En la misma figura 4.6, la curva 2 representa la característica en vacío. Los segmentos de las ordenadas entre las curvas 2 y 1 dan la diferencia $d\lambda_p/dt$.

Como se sabe, el proceso finaliza cuando se cruzan las curvas 1 y 2. Así, pues, el valor estacionario de la corriente I_p queda determinado por el punto de intersección A de las curvas 1 y 2.

Si se aumenta la resistencia R_{ex} , o sea, el ángulo α , entonces el punto A se deslizará por la curva de vacío en dirección hacia el punto O. Para cierta resistencia R_{cr} , llamada **resistencia crítica**, la recta 1 será tangente a la parte inicial de la curva de vacío (la recta 3 en la figura 4.6). En estas condiciones, el generador, prácticamente, no se excita.

4.2.2.1 Generador shunt

En la figura 4.7 se muestra el circuito equivalente de un generador de continua con excitación shunt.

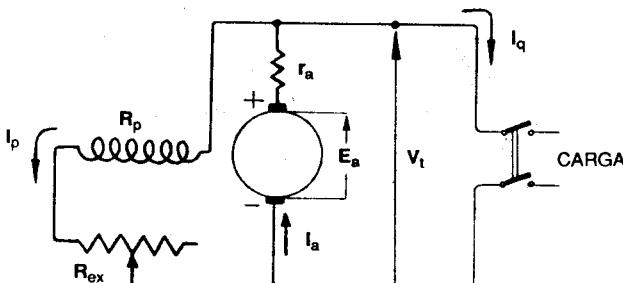


Fig. 4.7 Generador con excitación shunt.

Por aplicación de la ley de las corrientes en uno de los nudos del circuito, se cumple que la corriente de armadura I_a es igual a la suma de las corrientes de excitación I_p y de carga I_q :

$$I_a = I_p + I_q$$

La corriente de excitación I_p depende de la tensión en bornes V_t de la máquina:

$$I_p = \frac{V_t}{R_p + R_{ex}}$$

De la segunda ley de Kirchoff, en el circuito de la armadura, se cumple lo siguiente:

$$E_a = V_t + I_a \cdot r_a$$

En vacío se cumple que: $I_q = 0$

y que: $I_a = I_p$

Asimismo, se tiene que la tensión en los bornes V_t es, prácticamente, igual a la f.e.m. inducida E_a debido al pequeño valor de la caída de tensión en la resistencia de armadura r_a .

Dado que el generador shunt se autocexcita en un sólo sentido, entonces, también la curva de vacío de este generador puede ser trazada en un solo sentido. Véase la figura 4.8.

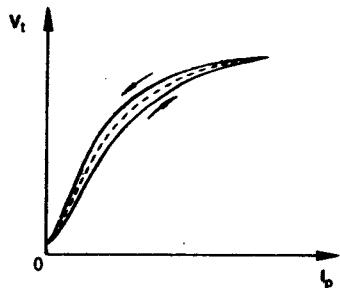


Fig. 4.8 Curva de vacío de un generador shunt.

Entre las curvas de vacío de los generadores de excitación independiente y excitación shunt no existe diferencia alguna esencial, puesto que la corriente de armadura $I_a = I_p$ que circula en el shunt no supera en más de 1 - 3 % la corriente nominal del generador y por eso no puede provocar una variación notable de la tensión en bornes V_t .

4.2.2.2 Generador serie

En la figura 4.9 puede verse el esquema de un generador serie.

En el generador de excitación serie se cumple que todas las corrientes son iguales:

$$I_a = I_{ex} = I_q = I$$

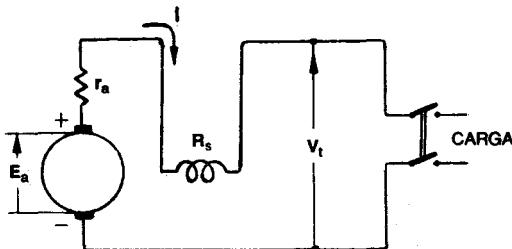


Fig. 4.9 El generador serie.

Dado que la tensión en bornes del generador serie varía bruscamente al variar la carga, en la práctica, este generador nunca se usó, sin embargo se le estudia debido a que permite explicar mejor el funcionamiento del generador compound.

En vacío, la característica del generador serie sería un punto en el eje de las ordenadas, es decir, el punto correspondiente a la tensión remanente.

Como se sabe, para que este generador pueda incrementar su tensión en bornes precisa que se le conecte una carga.

Cuando se le conecta una carga, se cumple lo siguiente, en el único circuito de la máquina:

$$E_a = V_t + I (r_a + R_s)$$

La única forma de trazar la curva de vacío del generador serie es conectándolo como un generador con excitación independiente. Véase la figura 4.2 y la figura 4.10.

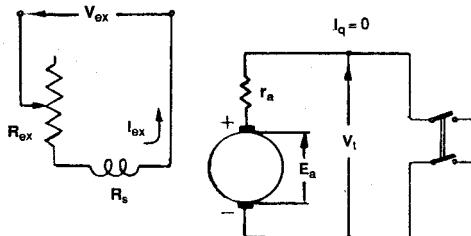


Fig. 4.10 Conexión del generador serie para obtener la curva de vacío.

4.2.2.3 El generador compound

Puesto que el generador de excitación compuesta tiene arrollamiento de excitación en derivación y en serie, reúne, en sí, las características de los generadores de ambos tipos.

En la figura 4.11 puede verse la forma en que normalmente se disponen las bobinas serie y paralelo en los núcleos polares de estas máquinas.

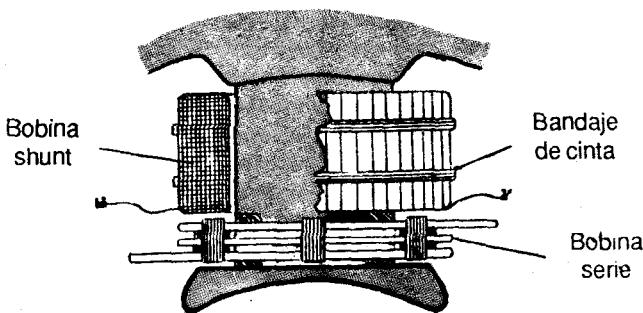


Fig. 4.11 Esquema constructivo de un polo de un generador compound.

La conexión de un generador compound puede ser ejecutada con shunt corto, como se muestra con línea continua en la figura 4.12 o, con shunt largo, como se muestra en el mismo esquema con línea de trazos.

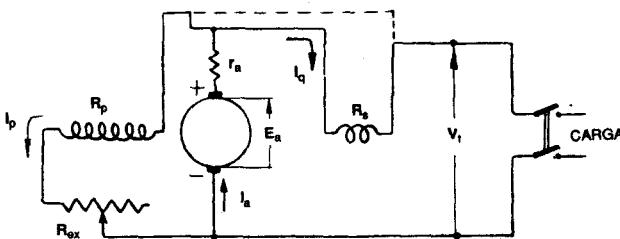


Fig. 4.12 Esquema de un generador de excitación compuesta.

Entre ambas conexiones no existe, prácticamente, ninguna diferencia ya que la resistencia del arrollamiento serie y correspondientemente la caída de tensión en sus bornes son bastante pequeñas.

Los arrollamientos de excitación se pueden conectar en un mismo sentido (generador compound acumulativo), es decir, de tal modo, que sus f.m.m.s se sumen. Como consecuencia de esto, al aumentar la carga, el flujo aumenta y también la f.e.m. generada.

En este caso, el papel principal lo desempeña el arrollamiento en derivación, mientras que el arrollamiento en serie tiene la finalidad de compensar la f.m.m. de la reacción del inducido a una carga determinada.

De este modo se logra la regulación automática de la tensión en bornes en determinados límites de la corriente de carga.

La conexión en sentidos opuestos de los arrollamientos de excitación (generador compound sustractivo) se emplea en esquemas especiales, por ejemplo, en algunos tipos de generadores para soldadura.

Como la f.m.m. equivalente F_{eq} depende de las f.m.m.s de los bobinados

shunt F_p y serie F_s , cuyos respectivos números de espiras por polo son N_p y N_s , se tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} F_{eq} &= F_p \pm F_s \\ F_{eq} &= N_p \cdot I_p \pm N_s \cdot I_s \end{aligned}$$

Conviene expresar la f.m.m. equivalente en términos de la bobina shunt con el fin de poder utilizar la curva de vacío del generador con excitación independiente en la solución de problemas del generador compuesto. Así, se tiene lo siguiente:

$$N_p \cdot I_{eq} = N_p \cdot I_p \pm N_s \cdot I_s$$

y de aquí se deduce que la corriente equivalente I_{eq} es igual a:

$$I_{eq} = I_p \pm \frac{N_s}{N_p} I_s$$

En esta expresión se cumple que la corriente de excitación shunt I_p , para el caso de conexión larga, es igual a:

$$I_p = \frac{V_t}{R_p + R_{ex}}$$

y que la corriente de excitación serie I_s es igual a:

$$\begin{aligned} I_s &= I_a \\ I_s &= I_p + I_q \end{aligned}$$

De modo que la corriente de excitación equivalente I_{eq} no es ninguna corriente circulando por alguna rama del circuito del generador.

Cuando esta corriente I_{eq} ha sido hallada partiendo de la expresión de arriba, se puede afirmar que la f.e.m. inducida E_a es producida por dicha corriente.

Para encontrar el valor de esta E_a se debe recurrir a la curva de vacío del generador funcionando con excitación independiente, a donde se ingresa con el valor calculado de I_{eq} .

Conociendo las características de los generadores shunt y serie, es fácil explicar las características del generador compound. Así, por ejemplo, la curva de vacío del generador compound, para $I_q = 0$ y $\omega = \text{constante}$, no se diferencia en nada de la correspondiente curva del generador shunt, ya que, en este caso, la corriente I_s es pequeña e igual a I_a y a I_p .

4.3 CURVAS CARACTERISTICAS

Las propiedades de los generadores se analizan con ayuda de las características que establecen la dependencia entre las magnitudes principales que determinan el funcionamiento del generador.

Tales magnitudes son:

- la tensión en los terminales del generador V_t ;
- la corriente de excitación I_{ex} ;
- la corriente de armadura I_a ; y
- la velocidad de rotación ω .

Puesto que los generadores funcionan, por lo general, con velocidad de rotación constante, el grupo fundamental de características se obtiene para ω constante.

De las otras tres magnitudes, la que mayor importancia tiene es la tensión V_t , por cuanto determina las cualidades del generador respecto a la red para la cual éste funciona.

Por esta razón, las características principales son:

1. La curva de carga $V_t - I_{ex}$, para I_q constante. En el caso particular, cuando $I_q = 0$, la curva de carga pasa a ser la curva de vacío, que tiene gran importancia en la evaluación del generador.
2. La curva de características exteriores $V_t - I_q$, para I_{ex} constante.
3. La curva de regulación $I_{ex} - I_q$, para V_t constante. En el caso particular, cuando $V_t = 0$, la curva de regulación pasa a ser la curva de cortocircuito.

Se examinará las características de los generadores para cada método de excitación. En realidad, se trata de mostrar la curva real capaz de ser obtenida haciendo el ensayo respectivo en el laboratorio.

Al mismo tiempo, se mostrará, con la ayuda de sucesivas expresiones, el método analítico que se puede seguir para llegar a la ecuación aproximada de las diferentes curvas. Este método se basa en el conocimiento de las distintas relaciones encontradas en el subcapítulo 4.2 para cada tipo de generador.

En el método analítico, se parte del supuesto que el circuito magnético tiene comportamiento lineal, de modo que las ecuaciones de las curvas obtenidas pertenecen a líneas rectas.

4.3.1 Curvas características de un generador con excitación independiente

En la figura 4.12 puede verse un esquema para el trazado de las curvas características de un generador de excitación independiente.

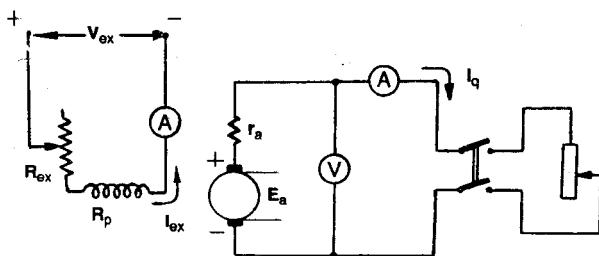


Fig. 4.12 Conexión del generador de continua con excitación independiente.

4.3.1.1 La curva de carga ($I_q = \text{cte.}$)

Partiendo de la expresión de la tensión en bornes V_t se tiene lo siguiente:

$$V_t = E_a - I_q \cdot r_a$$

$$V_t = E_{\text{rem}} + K \cdot I_{\text{ex}} \cdot \omega - I_q \cdot r_a$$

$$V_t = V_t (\text{vacío}) - I_q \cdot r_a$$

De la última expresión se deduce que las curvas de carga, suponiendo despreciable la reacción de armadura, se pueden obtener restando de la curva de vacío el producto $I_q \cdot r_a$, que es constante, tal como se ve en la figura 4.13.

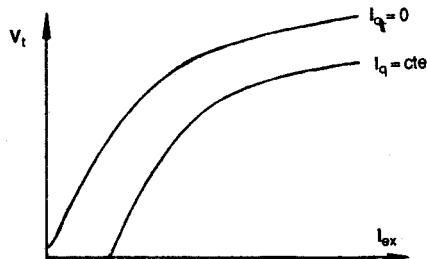


Fig. 4.13 Curvas de carga y de vacío de un generador con excitación independiente.

La ecuación obtenida puede quedar como la ecuación de una recta si se pone en la siguiente forma:

$$V_t = (E_{\text{rem}} - I_q \cdot r_a) + K \cdot \omega \cdot I_{\text{ex}}$$

De particular importancia es la curva de vacío de un generador con excitación independiente. Un ejemplo de estas curvas se muestra en las figuras 4.3 y 4.14.

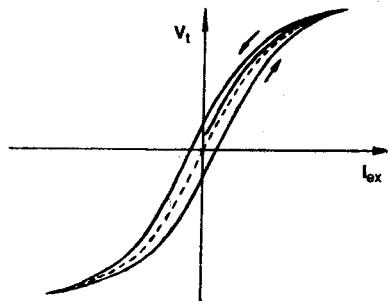


Fig. 4.14 Curva característica de marcha en vacío de un generador con excitación independiente.

Obsérvese que, en esta conexión del generador, es posible invertir la polaridad del campo inductor (invirtiendo el sentido de la corriente de la bobina del estator) obteniendo de esta manera el lazo de histéresis del circuito magnético de la máquina.

Como curva de vacío se suele tomar la curva media en línea de trazos.

Nótese que, cuando $I_q = 0$, se obtiene la curva de vacío:

$$V_t = V_t(\text{vacío})$$

4.3.1.2 La curva de características exteriores ($I_{ex} = \text{Cte.}$)

Si la corriente de excitación permanece constante, la expresión de la tensión en bornes queda reducida a la siguiente:

$$V_t = (E_{rem} + K \cdot I_{ex} \cdot \omega) - r_a \cdot I_q$$

que es la ecuación de una recta con una pendiente negativa muy pequeña, por ser r_a bastante pequeña.

En vacío, se cumple que:

$$V_t = E_a = E_{rem} + K \cdot I_{ex} \cdot \omega$$

En la figura 4.15 puede verse la curva de características exteriores de un generador con excitación independiente.

Para trazar esta curva, se pone el generador en rotación con velocidad nominal y se establece una corriente de excitación I_{ex} tal, que para una corriente $I_q = I_{nom}$, se tenga $V_t = V_{nom}$.

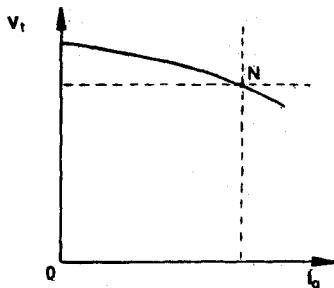


Fig. 4.15 Característica exterior de un generador con excitación independiente.

Lucgo se descarga gradualmente hasta la marcha en vacío, inclusive. La tensión del generador crece según la curva mostrada, ya que, a medida que disminuye la carga, disminuye la caída de tensión en el inducido.

4.3.1.3 La curva de regulación ($V_t = \text{Cte.}$)

Puesto que, para $I_{ex} = \text{cte.}$, la tensión en bornes V_t del generador disminuye con el aumento de la corriente de carga I_q y viceversa, véase la figura 4.15; entonces, para mantener constante la magnitud de la tensión en bornes V_t es necesario aumentar la corriente de excitación al aumentar la carga y disminuirla al disminuir esta última.

En el primer caso, se actúa por la parte ascendente de la curva de magnetización (véase la figura 4.14); en el segundo caso, por la parte descendente.

En correspondencia con esto, la curva de regulación tiene la forma mostrada en la figura 4.16. La curva media, trazada con línea de trazos entre las partes ascendente y descendente, se cuenta como característica práctica de regulación.

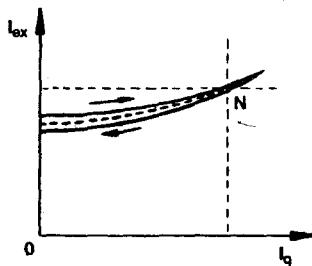


Fig. 4.16 Característica de regulación de un generador de excitación independiente.

Para encontrar una expresión aproximada de esta curva se parte, como siempre, de la expresión de V_t y se trata de poner la corriente de excitación I_{ex} en función de la corriente de carga I_q :

$$I_{ex} = \frac{V_t - E_{rem} + I_q \cdot r_a}{K \cdot \omega}$$

$$I_{ex} = (V_t - E_{rem}) / K \cdot \omega + (r_a / K \cdot \omega) I_q$$

que es la ecuación de una recta con una pendiente positiva, relativamente pequeña.

Para trazar la curva de cortocircuito, se pone el generador en rotación con la velocidad nominal y se conecta el circuito del inducido sólo con un amperímetro.

4.3.2 Curvas características de un generador con excitación shunt

El modo de hacer las conexiones del generador shunt para efectuar los ensayos se representa en la figura 4.17.

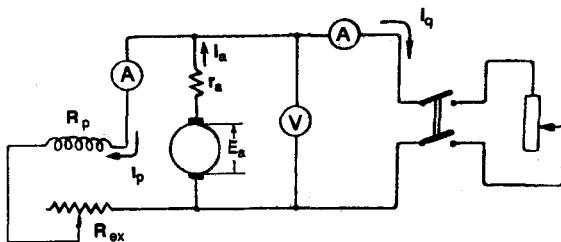


Fig. 4.17 Forma de conectar el generador shunt.

4.3.2.1 La curva de carga ($I_q = \text{cte.}$)

La tensión en bornes V_t es igual a:

$$V_t = E_a - I_a \cdot r_a$$

$$V_t = E_{rem} + K \cdot I_p \cdot \omega - I_a \cdot r_a$$

$$V_t = E_{rem} + K \cdot I_p \cdot \omega - (I_p + I_q) \cdot r_a$$

$$V_t = (E_{rem} - I_q \cdot r_a) + (K \cdot \omega - r_a) I_p$$

En la figura 4.18 se puede ver la forma de esta curva lograda en el laboratorio.

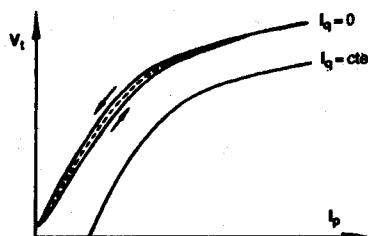


Fig. 4.18 Curvas de carga y de vacío de un generador shunt.

La última ecuación tiene la forma de una recta, que si se le compara con la del generador con excitación independiente, la del shunt quedaría un poco más abajo por tener una menor pendiente.

Nótese que, cuando $I_q = 0$, se obtiene la curva de vacío.

4.3.2.2 La curva de características exteriores ($I_p = \text{cte.}$)

En la ecuación de la tensión V_t , puede ponerse ésta como función de la corriente I_q , suponiendo que $R_{ex} = \text{cte.}$, de la siguiente forma:

$$V_t = E_{rem} + (K \cdot \omega - r_a) I_p - r_a \cdot I_q$$

$$V_t = E_{rem} + (K \cdot \omega - r_a) \frac{V_t}{R_p + R_{ex}} - r_a \cdot I_q$$

y de aquí, despejando V_t , queda:

$$\boxed{V_t} = \frac{E_{rem}}{\frac{K \cdot \omega - r_a}{1 - \frac{r_a}{R_p + R_{ex}}}} - \frac{r_a}{1 - \frac{r_a}{R_p + R_{ex}}} \boxed{I_q}$$

Esta es la ecuación de una recta que pasa por debajo de la respectiva curva del generador con excitación independiente, pues la pendiente es más negativa.

Para comparar, véase la ecuación correspondiente del generador de excitación independiente.

En la figura 4.19 se muestra la curva de características exteriores de un generador shunt.

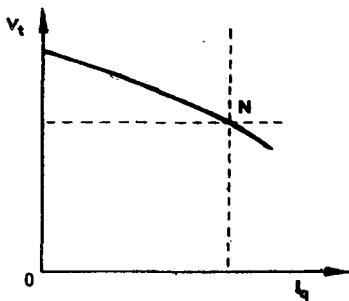


Fig. 4.19 Curva de características exteriores del generador shunt.

4.3.2.3 La curva de regulación ($V_t = \text{cte.}$)

La curva de regulación de un generador shunt tiene la forma mostrada en la figura 4.20

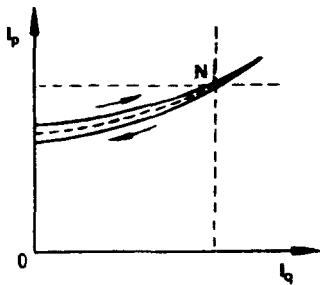


Fig. 4.20 Curva de regulación del generador shunt.

La expresión aproximada de esta curva se logra poniendo la corriente de excitación I_p en función de la corriente de carga I_q :

$$I_p = \frac{V_t - E_{rem} + I_q \cdot r_a}{K \cdot \omega - r_a}$$

y de aquí:

$$I_p = \frac{V_t - E_{rem}}{K \cdot \omega - r_a} + \frac{r_a}{K \cdot \omega - r_a} I_q$$

Se observa que la pendiente de esta recta es mayor que la de un generador con excitación independiente.

4.3.3 Curvas características de un generador con excitación serie

Para ensayar el generador serie, los instrumentos de medición y demás elementos del circuito se colocan según se ve en la figura 4.21.

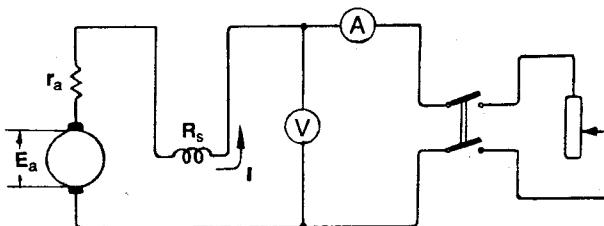


Fig. 4.21 Conexión del generador serie para ser ensayado.

El único ensayo que puede realizarse con este generador conectado en serie es uno que se puede considerar como de características exteriores, a pesar de que la corriente de excitación no es constante.

En el circuito de este generador se cumple, por la ley de las tensiones, lo siguiente:

$$E_a = V_t + (r_a + R_s) I$$

$$V_t = E_a - (r_a + R_s) I$$

$$V_t = E_{rem} + K \cdot I \cdot \omega - (r_a + R_s) I$$

$$\boxed{V_t} = E_{rem} + (K \cdot \omega - r_a - R_s) \boxed{I}$$

que es la ecuación de una recta de pendiente positiva.

La forma de la curva de $V_t - I$ obtenida en el laboratorio se muestra en la figura 4.22.

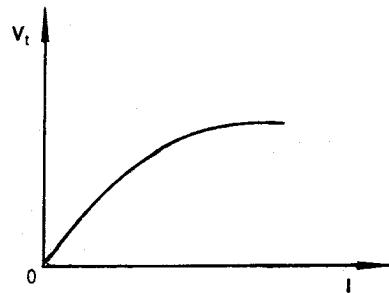


Fig. 4.22 Curva característica del generador serie.

4.3.4 Curvas características de un generador con excitación compuesta

En la figura 4.23 se puede apreciar el esquema para el trazado de las curvas características de un generador compound.

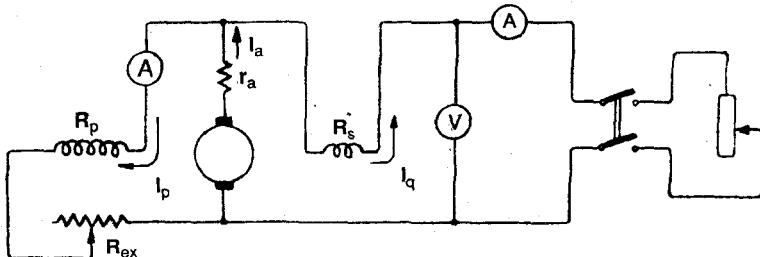


Fig. 4.23 Conexión del generador compound.

Conociendo las características de los generadores shunt y serie, es fácil explicar las del generador compound.

4.3.4.1 La curva de carga ($I_q = \text{cte.}$)

La curva de carga del generador compound tiene la misma forma que la respectiva característica del generador shunt, pero si el arrollamiento serie es lo suficientemente fuerte, estas curvas pueden estar situadas por encima de la curva de vacío, tal como se ve en la figura 4.24.

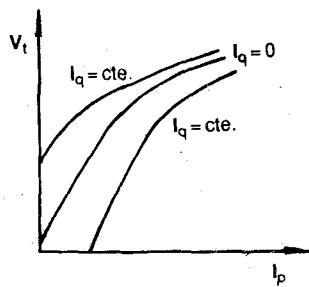


Fig. 4.24 Curva de carga de un generador de excitación compuesta.

4.3.4.2 La curva de características exteriores ($I_p = \text{cte.}$)

En la figura 4.25 puede verse la curva de características exteriores de un generador compound la cual no se diferencia mucho de la curva correspondiente de un generador shunt.

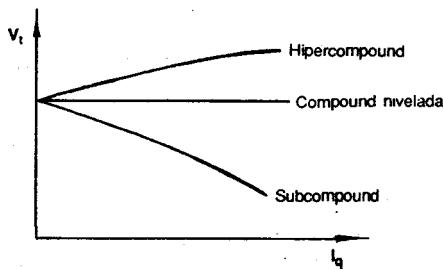


Fig. 4.25 Curva de características exteriores de un generador compound.

Para tener la posibilidad de mantener una tensión constante en los terminales de los receptores de energía eléctrica, hay que compensar la caída de tensión en la línea eléctrica.

En este caso se amplifica el arrollamiento serie de tal modo, que la curva de características exteriores tenga la forma de la curva superior representada en la figura 4.25.

Cuando los arrollamientos de excitación se conectan en oposición, la curva de características exteriores se obtiene del mismo modo que en el generador shunt. Véase la curva inferior de la figura 4.25

4.4 GENERADORES EN PARALELO

En las centrales y subestaciones de conversión de corriente continua, habitualmente se instalaba varios grupos de corriente continua con el fin de disponer de la reserva necesaria y, en el caso de carga variable, asegurar el funcionamiento de los grupos en las condiciones más favorables para los mismos.

Para el funcionamiento conjunto de los generadores de continua, es posible conectarlos en paralelo, conectando entre sí los puntos de potenciales de la misma polaridad.

4.4.1 Acoplamiento para el funcionamiento en paralelo

Para operar dos generadores de corriente continua en paralelo, según el circuito mostrado en la figura 4.26, se debería seguir los pasos que se muestra en la figura 4.26, suponiendo que el generador I se encuentra ya suministrando corriente a las barras, creando en éstas una tensión V_t .

Para conectar a las mismas barras el generador II, hay que observar dos condiciones, a saber:

- los terminales + y - del generador que se conecta se deben acoplar con los bornes del mismo signo de las barras colectoras;
- la f.e.m. del generador que se conecta debe ser prácticamente igual a la tensión V_t

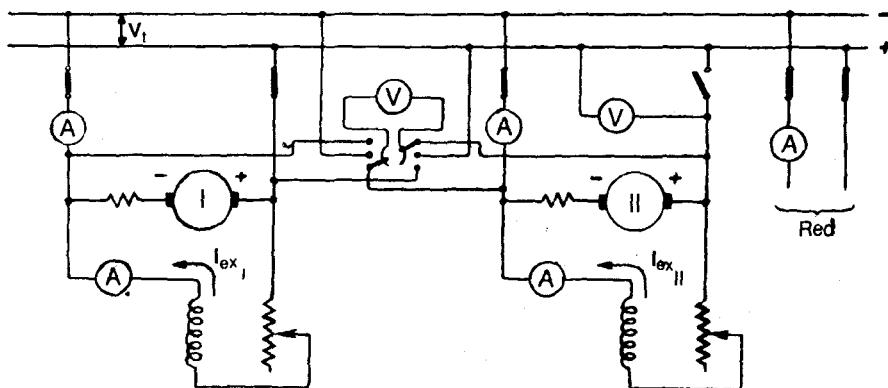


Fig. 4.26 Esquema del funcionamiento en paralelo de generadores shunt

Para cumplir estas condiciones se procede de la siguiente manera:

1. Se hace girar el generador **II** hasta su velocidad nominal.
2. Sin excitar el generador **II**, se cierra uno de sus interruptores, por ejemplo, el izquierdo.
3. Se conecta un voltímetro al interruptor derecho, que permanece desconectado. Este mide la tensión V_t (se desprecia la influencia del flujo remanente del generador **II**).
4. Se comienza a excitar el generador **II** y se comprueba con el voltímetro. Si su polaridad no coincide con la polaridad de las barras (ambos generadores están acoplados en serie), el voltímetro indicará la suma $V_t + E_a$ (**II**). En este caso, no se pueden conectar los generadores a las barras, puesto que esto correspondería al cortocircuito de ambas máquinas. Por el contrario, si la polaridad del generador que se acopla coincide con la polaridad de las barras, entonces, el voltímetro comenzará a disminuir sus indicaciones, indicando la diferencia $V_t - E_a$ (**II**).
5. Cuando esta diferencia se haga igual a cero, se podrá cerrar el interruptor derecho y con ello conectar el generador **II** a las barras. Si la f.e.m.

- E_a (II) del generador II es exactamente igual a la tensión de la red V_t , entonces, la corriente del generador II será igual a cero.
- Para dar carga al generador II hay que aumentar la potencia mecánica suministrada a éste por el motor primo. Esto se puede lograr de dos maneras: actuando directamente sobre el regulador de velocidad del motor primo del generador y con ello aumentando su velocidad de rotación, o aumentando la corriente de excitación I_{ex} (II) del generador II, reduciendo la resistencia de campo. Los amperímetros indicarán la carga que van tomando ambos generadores.

No es necesario que los generadores tengan la misma potencia nominal. La repartición de carga se hará automáticamente según las características externas de los generadores.

En el ejemplo mostrado en la figura 4.27, cuando la tensión en las barras sea de 125 V, los porcentajes de carga serán de 50 % y 75 % de la potencia nominal.

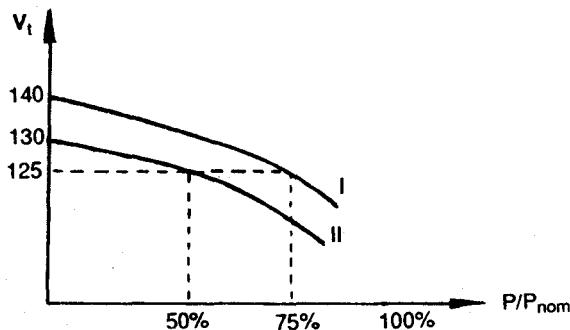


Fig. 4.27 Curvas de características exteriores de dos generadores acoplados en paralelo.

Si se excita más cualquiera de las máquinas, ésta elevará su f.c.m.; su curva característica subiría y tomaría, entonces, un porcentaje de carga mayor.

Cuando se trata de generadores compound, se requiere de una barra ecualizadora que conecte las bobinas serie, para evitar que éstas aumenten la tensión interna del generador, al aumentar la carga, lo que produciría un efecto acumulativo que haría pasar toda la carga a ese generador. Véase la figura 4.28, en la pág. 86.

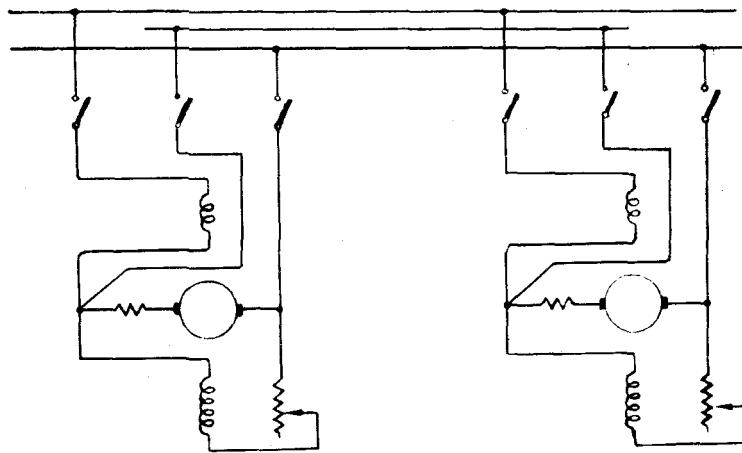
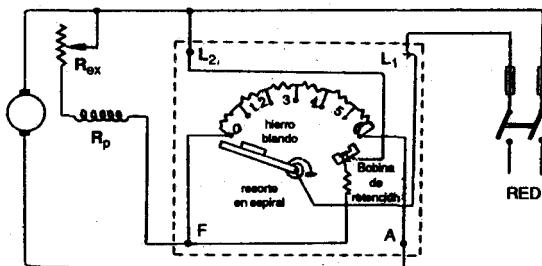


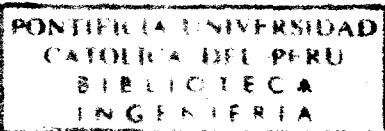
Figura 4.28 Generadores compound en paralelo

Capítulo 5

EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA EN REGIMEN ESTABLE

- 5.1 Formas de conexión
- 5.2 Circuitos equivalentes. Ecuaciones
- 5.3 Curvas características
- 5.4 Arranque, puesta en marcha, vacío y trabajo con carga
- 5.5 Características de operación:
 - control de velocidad
 - inversión del sentido de giro
 - frenado eléctrico
- 5.6 Distribución de pérdidas
- 5.7 Eficiencia
- 5.8 Datos de placa





EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA EN REGIMEN ESTABLE

Como toda máquina eléctrica rotativa, la de continua puede funcionar tanto como generador como motor (principio de reciprocidad de Lenz). Cuando trabaja como motor es necesario que la armadura reciba alimentación de corriente desde una fuente exterior, que puede ser la misma que alimenta la bobina de excitación, como sucede con frecuencia.

En resumen, un motor de continua recibe energía eléctrica de corriente continua y entrega en el eje energía mecánica a una carga mecánica (una bomba, un ventilador, un compresor, una grúa, una faja transportadora, un vehículo de tracción, un ascensor, un molino, una mezcladora, un generador eléctrico, una laminadora, una máquina-herramienta, etc.).

En la actualidad los motores de continua están siendo sustituidos por motores de corriente alterna asincrónicos alimentados por fuentes de frecuencia variable, en aquellas aplicaciones donde se requiere velocidad regulable.

En un motor, el sentido de la corriente de armadura I_a es opuesto a aquél que tiene cuando opera como generador para el mismo sentido de giro del rotor, si las polaridades de la tensión no se cambian. Lo mismo puede decirse de la corriente de línea o de carga I_q .

Si V_t es la tensión aplicada a los terminales del circuito de la armadura, entonces, se cumple que:

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a$$

donde E_a es la f.c.e.m. inducida.

Obsérvese que en este caso la tensión en bornes es mayor que la f.e.m. inducida:

$$V_t > E_a$$

Es importante, para la explicación de ciertos problemas que se presentan durante el funcionamiento, que se tome en cuenta que la tensión en bornes de las escobillas es igual a:

$$E_a \pm E_{rem} = K \cdot I_{ex} \cdot \omega \pm k_a \cdot \phi_{rem} \cdot \omega$$

En los cálculos prácticos se ignora E_{rem} .

En el subcapítulo 4.2 se vio una expresión para el torque electromagnético o torque mecánico interno T_{mi} :

$$T_{mi} = K \cdot I_{ex} \cdot I_a$$

Como la expresión de la f.e.m. inducida E_a es semejante a la del torque que:

$$E_a = K \cdot I_{ex} \cdot \omega$$

dividiendo ambas expresiones, se obtiene una expresión muy significativa, sabiendo que la corriente de excitación es la misma en ambas expresiones:

$$\frac{T_{mi}}{E_a} = \frac{I_a}{\omega}$$

De aquí se deduce que la potencia electromagnética o potencia mecánica interna P_{mi} se puede expresar en términos de variables eléctricas o de variables mecánica:

$$P_{mi} = E_a \cdot I_a = T_{mi} \cdot \omega$$

Esta expresión muestra la íntima relación que existe en el interior de una máquina eléctrica rotativa entre las potencias eléctrica y mecánica.

Los motores de continua se regulan automáticamente tomando más o menos corriente de la red según aumente o disminuya la carga mecánica, tal como se muestra a continuación.

Cuando la carga mecánica (y por lo tanto el torque) de un motor de CC aumenta desde T_1 hasta T_2 , la velocidad del motor ω disminuirá ligeramente (debido a la tendencia de un motor a frenarse cuando se le aumenta la carga) y, por lo tanto, disminuirá E_a (recuérdese que $E_a = K \cdot I_{ex} \cdot \omega$).

Esto traerá consigo un incremento de la corriente de armadura I_a ya que:

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{r_a}$$

Al aumentar I_a , se incrementará el torque motor (recuérdese que $T_{mi} = K \cdot I_{ex} \cdot I_a$) hasta hacerse igual al nuevo torque resistente de la carga T_2 y la velocidad del conjunto aumentará hasta un valor ligeramente inferior que el inicial sin que el motor se detenga.

Al disminuir la carga mecánica, el torque motor será momentáneamente superior al torque resistente de la carga y el motor se acelerará, aumentando E_a ($K \cdot I_{ex} \cdot \omega$); disminuirán, entonces, I_a y T_{mi} hasta hacerse igual al nuevo torque resistente, deteniéndose nuevamente el equilibrio a una velocidad ligeramente superior a la inicial.

5.1 FORMAS DE CONEXION

Lo mismo que los generadores, los motores de CC se clasifican por el método de conexión del arrollamiento de excitación con relación al inducido.

En correspondencia con esto, existen motores de excitación en:

- derivación (paralelo o shunt),
- serie, y
- compuesta (mixta o compound).

El esquema de principio de cada una de estas formas de conexión se muestra en la figura 5.1.

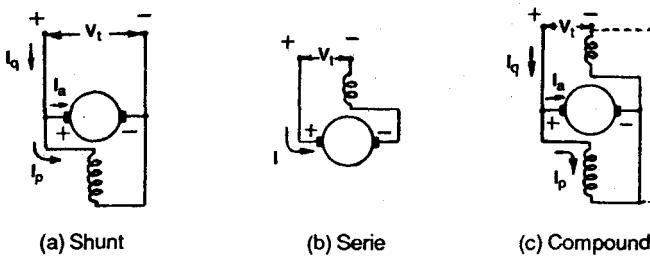


Fig. 5.1 Formas de conexión de los motores de corriente continua.

Todos estos tipos de motores se emplearon ampliamente y en correspondencia con las diversas exigencias planteadas a ellos por los distintos tipos de accionamientos, tienen características bastante diferentes.

Sin embargo, el funcionamiento de todos los tipos de motores se basa en un mismo proceso energético caracterizado por las ecuaciones de la f.e.m. y los torques.

Antes de comenzar el estudio de estos motores es conveniente conocer algo acerca del funcionamiento en vacío y del arranque de un motor.

Un motor funciona en vacío cuando no se acopla ninguna carga al eje del mismo. Si no existe carga acoplada al eje, el motor no tiene porqué suministrar torque útil alguno.

El arranque de un motor se produce en el preciso momento en que el motor es conectado a la red eléctrica y su velocidad todavía es cero, mejor dicho, el motor está aún en reposo y empieza a ponerse en marcha.

5.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES. ECUACIONES

Para los elementos de los circuitos equivalentes de los motores de continua se cumplen las mismas condiciones que para los generadores; los nombres y las designaciones son exactamente los mismos.

Las diferencias se presentan únicamente en el sentido de ciertas corrientes, tal como se explicara al principio.

5.2.1 Motor shunt

El circuito del motor shunt es el mismo que el de un generador shunt mostrado en la figura 4.7. Sin embargo, en el motor, la línea alimenta tanto a la armadura como al campo, de tal forma que los sentidos de la corriente de línea I_q y la corriente de armadura I_a son inversos de los indicados. Véase la figura 5.2.

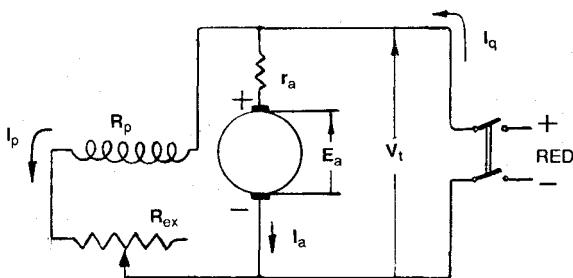


Fig. 5.2 Circuito equivalente de un motor shunt.

La corriente de línea es, por lo tanto:

$$I_q = I_a + I_p$$

En el circuito de la bobina de campo se cumple que la corriente de excitación es igual a:

$$I_p = \frac{V_t}{R_p + R_{ex}}$$

En el motor shunt, la corriente de excitación I_p no es afectada por la carga, con tal que la tensión aplicada al motor V_t permanezca constante. Por lo tanto, en la región lineal de magnetización, el flujo inductor es constante y el torque mecánico interno T_{mi} es proporcional a la corriente de armadura I_a :

$$T_{mi} = K \cdot I_p \cdot I_a = C \cdot I_a$$

donde C es la constante de proporcionalidad.

Un problema común consiste en calcular la velocidad en régimen perma-

nente, el torque y la potencia motores cuando se tiene como dato la curva de magnetización o de vacío (esta curva puede ser la misma que se obtiene haciendo funcionar la máquina como generador).

La curva de magnetización está dada para una velocidad determinada, normalmente la nominal o cercana a ella. Sin embargo, se sabe que esta información puede ser útil para cualquier otra velocidad, tal como se vio en el acápite 4.2.1.

Cuando se suministra potencia eléctrica P_{el} a un motor de CC la potencia entregada al mismo es igual al producto de la tensión en bornes V_t por la corriente de línea I_q consumida por el motor:

$$P_{el} = V_t \cdot I_q$$

En la figura 5.3 se muestra un diagrama de flujo de potencias en un motor shunt.

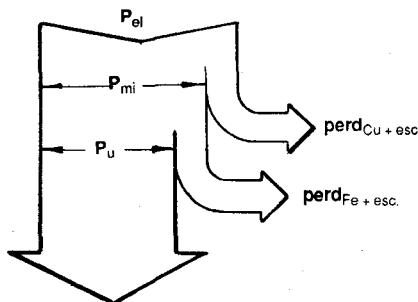


Fig. 5.3 Distribución de las potencias en un motor shunt.

Una parte de esta potencia se pierde en forma de calor en las resistencias de las bobinas de armadura r_a y de campo R_p y en el reóstato de excitación R_{ex} :

$$I_a^2 \cdot r_a + I_p^2 (R_p + R_{ex})$$

En las escobillas se estaría perdiendo una potencial igual a:

$$\Delta V_{esc} \cdot I_a$$

La potencia que queda es la que se conoce como potencia mecánica interna P_{mi} y que, como se sabe, es igual a:

$$P_{mi} = E_a \cdot I_a = T_{mi} \cdot \omega$$

En un motor ideal, sin pérdidas de fricción en los rodamientos, ni entre las escobillas y las delgas, ni entre las partes giratorias y el aire, sin pérdidas por ventilación ni pérdidas en el hierro por las corrientes parásitas y por la histéresis magnética, la potencia mecánica interna P_{mi} es la que el motor estaría entregando en el eje a la carga.

Sin embargo, en los motores reales, todas aquellas pérdidas existen y la potencia que se obtiene en el eje es menor que la potencia mecánica interna P_{mi} . Esta potencia mecánica externa se conoce con el nombre de potencial útil P_u o potencia en el eje.

La potencia útil P_u se puede expresar como el producto de un torque útil T_u y la velocidad mecánica de giro ω :

$$P_u = T_u \cdot \omega$$

Cuando no existe una carga mecánica acoplada al eje del motor funcionando, se dice que el motor está trabajando en vacío o sin carga. En estas condiciones, el torque útil es nulo y el torque mecánico interno T_{mi} es igual al conjunto de todas las pérdidas mecánicas más las pérdidas en el hierro.

En la figura 5.4 puede verse el diagrama circuitual del motor shunt en vacío:

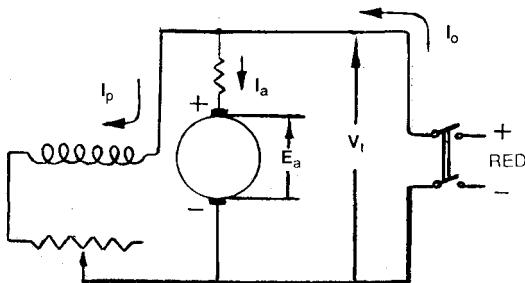


Fig. 5.4 Circuito equivalente del motor shunt en vacío.

Este torque de pérdidas T_{perd} se asume constante para cualquier carga acoplada al motor y se puede determinar rápidamente dividiendo la potencia mecánica interna en vacío ($P_{mi} = P_{el} - perd.$ Joule en la armadura - perd. Joule en el circuito de campo) entre la velocidad de giro medida en vacío:

$$T_{perd} = \frac{V_t \cdot I_q - I_a^2 \cdot r_a - I_p^2 (R_p + R_{ex})}{\omega}$$

Téngase en cuenta que, en vacío, debido a la ausencia de carga, la corriente de línea consumida por el motor es la más pequeña posible. Esta corriente se denomina corriente de vacío I_o y se puede determinar cuando se conoce el torque de pérdidas T_{perd} (supuesto constante) a partir de la siguiente expresión:

$$I_o = I_a + I_p$$

$$I_o = \frac{T_{perd}}{K \cdot I_p} + I_p$$

Cuando no se conoce K su determinación se hace a partir de los datos del motor funcionando con alguna carga, normalmente la nominal. Estos datos son la tensión en bornes V_t , la corriente consumida I_q , las resistencias de las bobinas, r_a y R_p y la de excitación R_{ex} , así como la velocidad de giro ω .

Con toda esta información, se determina la f.c.e.m. inducida E_a y, a partir de ella, el valor de K según la siguiente expresión:

$$K = \frac{E_a}{I_p \cdot \omega}$$

El motor shunt se aplica en el accionamiento de cargas que requieren una velocidad casi constante, pero que no requieren un alto torque de arranque, tales como sopladores, bombas centrífugas, ventiladores, máquinas herramientas, etc.

5.2.2 Motor serie

En la figura 5.5 puede verse el diagrama circuitual equivalente de un motor de CC conexión serie.

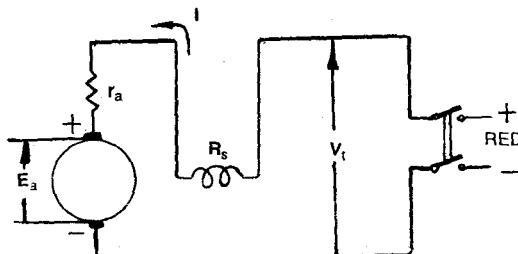


Fig. 5.5 Circuito equivalente del motor serie.

Debido a que el motor serie tiene su campo en serie con la armadura, la corriente de armadura I_a proporciona la excitación del campo. En consecuencia, a medida que la corriente de armadura aumenta, el flujo también aumenta. En la región lineal de magnetización, el flujo es proporcional a la corriente de armadura; el torque mecánico interno T_{mi} es, entonces, proporcional al cuadrado de la corriente. Sin embargo, cuando el hierro está saturado, sólo se tiene un aumento gradual en el flujo con una corriente que aumenta, y el torque aumenta en una proporción menor que el cuadrado de la corriente:

$$T_{mi} = K \cdot I_{ex} \cdot I_a$$

$$T_{mi} = K \cdot I^2$$

considerando que $I_{ex} = I_a = I$.

Es de gran interés hablar del comportamiento del motor serie cuando trabaja en vacío. En vacío, la corriente consumida es bajísima, pero peligrosa porque es inversamente proporcional a la velocidad del motor.

Se demuestra, más adelante, que estos motores, en vacío, se embalan adquiriendo velocidades peligrosas para el diseño mecánico de los componentes por efecto de la elevada fuerza centrífuga.

Por esta razón se recomienda que los motores seric tengan acoplada, siempre, una carga mínima de seguridad en el cje.

En cambio, con carga, disminuyen fuertemente su velocidad.

Debido a que el campo del motor serie está en serie con la armadura, la f.c.e.m. inducida debe ser:

$$E_a = V_t - (r_a + R_s) I$$

El funcionamiento del motor serie se analiza en base a la curva de magnetización, la resistencia de armadura y la del campo serie, así como de la f.m.m. desmagnetizante de la reacción de armadura que en este trabajo se deja de lado por simplificar el estudio de estos motores.

El motor serie se aplica en el accionamiento de aquellas cargas que requieren muy altos torques de arranque y donde la variación de velocidad no es objetable y donde el motor, bajo un operación normal, siempre impulsa una carga apreciable: tranvías eléctricos, tecles, grúas, arranque de vehículos automotores y de grupos electrógenos, etc.

5.2.3 Motor compound

El motor compound, igual que el generador compound, tiene un embotinado serie y uno shunt montados en los polos del campo principal.

En la figura 5.6 se ha representado el diagrama circuital equivalente del motor compound.

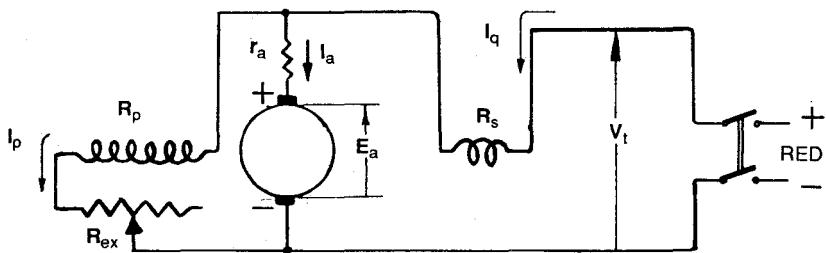


Fig. 5.6 Circuito equivalente de un motor de CC conexión compound.

Se trabajará con la conexión corta. Entonces, se cumplen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} I_q &= I_a + I_p \\ V_t &= E_a + I_a \cdot r_a + I_q \cdot R_s \\ V_t &= V_t' + I_q \cdot R_s \\ I_p &= \frac{V_t'}{R_p + R_s} \end{aligned}$$

Por su parte la f.c.e.m. inducida E_a depende de la corriente de excitación equivalente I_{eq} :

$$E_a = K \cdot I_{eq} \cdot \omega$$

donde I_{eq} es igual a:

$$I_{eq} = I_p \pm \frac{N_s}{N_p} I_s$$

El trabajo con I_{eq} para la solución de problemas es idéntico al que se realizó con el generador compound.

En la práctica, para la solución de problemas, se prescinde del valor de E_{rem} o de Φ_{rem} .

Las características del motor compound acumulativo (cuando las f.m.m.s de los campos serie y shunt se suman) son intermedias entre las del shunt y el serie. No tiene el inconveniente del embalamiento en vacío y su torque de

arranque es bastante elevado. Se le emplea mucho en lugar del motor serie para mover cargas pesadas.

En la figura 5.7 puede verse las curvas de torque mecánico interno T_{mi} en función de la corriente de armadura I_a para las tres formas de conexión de los motores de CC.

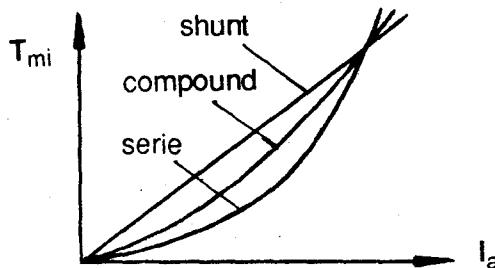


Fig. 5.7 Curvas de torque mecánico en función de la corriente de armadura.

En el motor shunt, la corriente de campo I_p no se afecta por la carga, con tal que la tensión en bornes V_t , aplicada al motor, sea constante.

El cálculo de la velocidad, potencia y torque del motor, en régimen estable, es un asunto sencillo cuando se tiene su curva de magnetización y otros datos.

La curva de magnetización está dada para una velocidad particular, usualmente la nominal, y puede usarse para cualquier f.c.e.m. del motor, para una excitación del campo dada, a cualquier otra velocidad, del mismo modo que se hacía en un generador.

5.3 CURVAS CARACTERISTICAS

Ciertas cualidades de los motores de CC se determinan por sus características de funcionamiento y mecánicas.

Por **características** de funcionamiento se entienden las relaciones velocidad ω y torque útil T_u en función de la corriente de línea I_q siendo constante la tensión en bornes V_t y las resistencias fijas (no regulables) en el circuito del inducido y de excitación.

Para el accionamiento eléctrico de los mecanismos industriales, tienen gran importancia las **características mecánicas**, que representan la relación del torque útil T_u con la velocidad de giro del rotor ω .

Existen otras características de mucha importancia para el estudio del motor de CC y que se tratarán más adelante.

5.3.1 Motor shunt

El esquema del motor shunt se da en la figura 5.8. Aquí, F son los fusibles. La tensión de la red V_t se aplica directamente a los terminalcs del motor. Se considera que $V_t = V_t$ (nom).

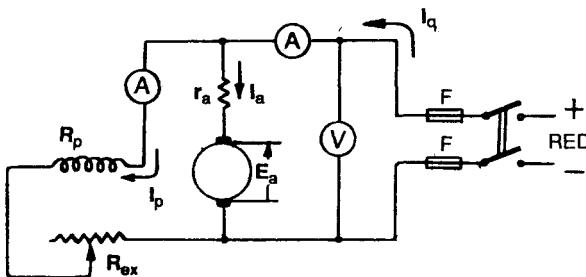


Fig. 5.8 Esquema de conexiones de un motor shunt.

El reóstato de excitación R_{ex} debe estar regulado de tal forma, que el motor desarrolle la potencia nominal P_u (nom) para los valores nominales de la tensión V_t (nom), la corriente I_q (nom) y la velocidad ω (nom). En esta posición, sin variación, debe permanecer todo el tiempo el reóstato R_{ex} , de modo que I_p sea constante.

Estrictamente hablando, en un motor de CC también está presente el flujo remanente, de tal forma, que la f.c.em. E_a y el torque mecánico interno T_{mi} tienen las siguientes expresiones:

$$E_a = k_a \cdot \phi_{max} \cdot \omega = K \cdot I_p \cdot \omega \pm k_a \cdot \phi_{rem} \cdot \omega$$

y:

$$T_{mi} = k_a \cdot \phi_{max} \cdot I_a = K \cdot I_p \cdot I_a \pm k_a \cdot \phi_{rem} \cdot I_a$$

Para el motor shunt, son ciertas las siguientes igualdades:

$$I_q = I_p + I_a$$

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a$$

El trazado de la curva característica $T_u - I_q$ requiere despejar el T_{mi} y reemplazar expresiones que contengan a I_q ; por el momento, por simplicidad, se supondrá que el T_{mi} depende sólo de la corriente de excitación I_p .

El torque mecánico interno T_{mi} es la suma del torque útil T_u más el torque de pérdidas T_{perd} :

$$T_{mi} = T_u + T_{perd}$$

El torque de pérdidas se asumirá constante a pesar de las variaciones de carga, dado que éste es un motor de velocidad casi constante, tal como se verá más adelante.

Despejando el torque útil T_u y remplazando expresiones:

$$T_u = T_{mi} - T_{perd}$$

$$T_u = K \cdot I_p \cdot I_a - T_{perd}$$

$$T_u = K \cdot I_p \cdot (I_q - I_p) - T_{perd}$$

$$T_u = -K \cdot I_p^2 - T_{perd} + K \cdot I_p \cdot I_q$$

$$T_u = Cte + K \cdot I_p \cdot I_q$$

La gráfica aproximada de $T_u - I_q$ se puede ver en la figura 5.9, en línea de trazos. La gráfica real se muestra con línea continua.

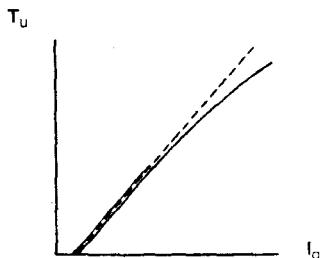


Fig. 5.9 Curvatura del torque útil en función de la corriente consumida.

En la gráfica de $T_u - I_q$ se puede ver que, aún cuando el torque útil es nulo (vacío), existe una pequeña corriente I_q que el motor consume por efecto, sobretodo, de las pérdidas mecánicas y en el hierro.

Para saber cómo depende el torque útil T_u de la velocidad ω , se procede de la siguiente manera:

Se parte de la expresión de la tensión en bornes V_t :

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a$$

$$V_t = K \cdot I_p \cdot \omega + I_a \cdot r_a$$

Se despeja I_a :

$$I_a = (V_t - K \cdot I_p \cdot \omega) / r_a$$

Y se remplaza en la expresión del torque:

$$T_u = K \cdot I_p \cdot I_a - T_{\text{perd}}$$

$$T_u = K \cdot I_p (V_t - K \cdot I_p \cdot \omega) / r_a - T_{\text{perd}}$$

$$T_u = K \cdot I_p \cdot V_t / r_a - T_{\text{perd}} - (K \cdot I_p)^2 \omega / r_a$$

Esta es la ecuación de una recta con una pendiente negativa bastante grande, por ser r_a muy pequeña. Véase la figura 5.10.

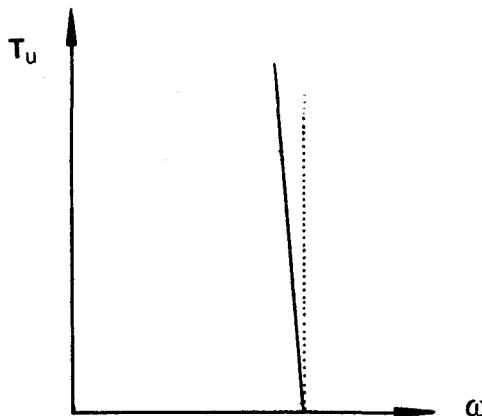


Fig. 5.10 Característica aproximada de $T - \omega$ para un motor shunt.

Para poner la corriente de línea I_q en función de la velocidad ω se igualan las dos expresiones del torque ya obtenidas y se despeja I_q :

$$T_u = -K \cdot I_p^2 - T_{\text{perd}} + K \cdot I_p \cdot I_q$$

$$T_u = K \cdot I_p \cdot V_t / r_a - T_{\text{perd}} - (K \cdot I_p)^2 \omega / r_a$$

$$I_q = V_t / r_a - I_p - K \cdot I_p \cdot \omega / r_a$$

Una gráfica aproximada de esta última expresión se puede ver en la figura 5.11.

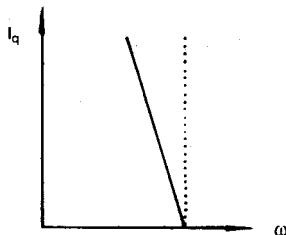


Fig. 5.11 Curva característica de $I_q - \omega$ para un motor shunt.

5.3.2 Motor serie

En la figura 5.12 puede verse el esquema de conexiones del motor serie.

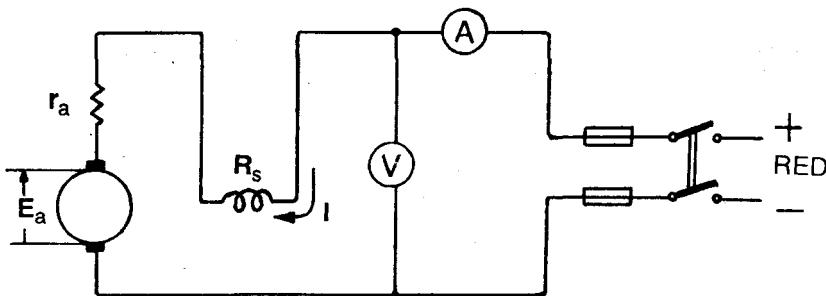


Fig. 5.12 Conexión del motor serie.

Del mismo modo que para el motor shunt, se parte de la expresión del T_{mi} :

$$T_{mi} = K \cdot I_{ex} \cdot I_a = K \cdot I^2 = K \cdot I_q^2$$

$$T_u = T_{mi} - T_{perd}$$

$$T_u = K \cdot I_q^2 - T_{perd}$$

El torque de pérdidas varía con la velocidad pero siempre es un valor pequeño comparado con el torque nominal por lo que se le considerará como de valor constante por simplicidad, en cuyo caso, la representación de la curva $T_u - I_q$ tendrá la forma que se ve en la figura 5.13.



Fig. 5.13 El torque útil en función de la velocidad para un motor serie.

La curva de torque útil en función de la velocidad ω se encuentra con el siguiente procedimiento:

$$V_t = E_a + I_a (r_a + R_s)$$

$$V_t = K \cdot I_p \cdot \omega + I_a (r_a + R_s)$$

$$V_t = (K \cdot \omega + r_a + R_s) I_q$$

Se despeja la corriente I_q :

$$I_q = \frac{V_t}{K \cdot \omega + r_a + R_s}$$

Y se remplaza en la última expresión del torque útil T_u :

$$T_u = K \cdot \frac{\frac{V_t^2}{(K \cdot \omega + r_a + R_s)^2} - T_{\text{perd}}}{\omega}$$

Una gráfica de esta relación se puede ver en la figura 5.14

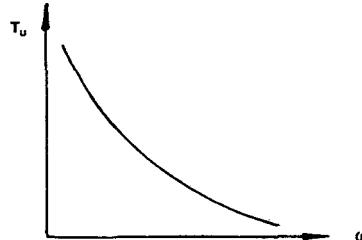


Fig. 5.14 Curva de torque útil en función de la velocidad de giro para un motor serie.

Es sencillo determinar los puntos extremos de esta gráfica; uno, cuando el motor está en vacío ($T_u = 0$) en que la velocidad es muy grande y, por lo tanto, peligrosa; y otro, cuando el motor es conectado a la red y la velocidad del motor todavía es cero ($\omega = 0$), en este caso, el torque desarrollado es muy grande.

Igualando las dos expresiones de torque útil, se obtiene de la corriente de línea I_q en función de la velocidad ω :

$$I_q = \frac{V_t}{K \cdot \omega + r_a + R_s}$$

Esta expresión dice claramente que cuando la velocidad del motor está creciendo, la corriente consumida por el mismo va disminuyendo, tal como se ve en la figura 5.15.

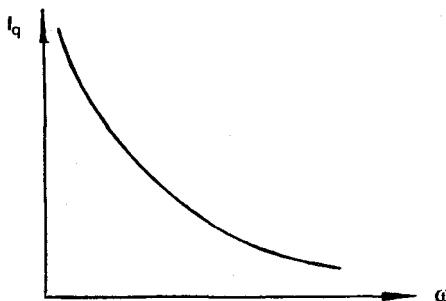


Fig. 5.15 Curvas de corriente en función de la velocidad del motor serie.

5.3.3 Motor compound

El esquema de un motor de excitación compound se da en la figura 5.16. El devanado de excitación serie puede ser conectado con relación al devanado de excitación shunt de tal forma, que sus f.m.m. se sumen (compound acumulativo) o se resten (compound sustractivo).

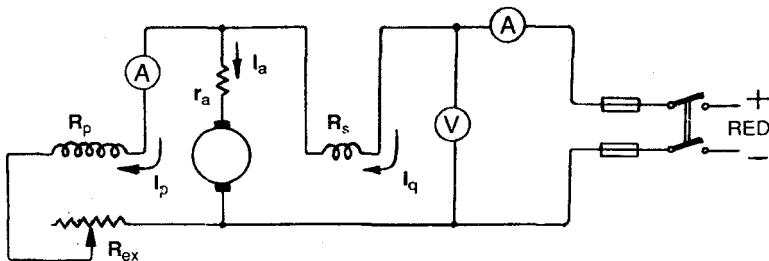


Fig. 5.16 Esquema simplificado de un motor de excitación compound.

El análisis del funcionamiento de un motor compound es similar al de los motores shunt y serie.

El motor compound acumulativo tiene características intermedias entre los motores shunt y serie.

Los motores de excitación compuesta con el campo del devanado serie muy dominante se comportan en todo aproximadamente igual que los motores serie, excepto en que el campo del devanado shunt limita la velocidad de vacío a un valor de seguridad aceptable.

Los motores de excitación compuesta con poco devanado serie tienen una característica velocidad-carga francamente descendente.

Para encontrar expresiones sencillas de las curvas características, se considerará sólo la relación entre el torque mecánico interno T_{mi} , la corriente de armadura I_a y la velocidad ω .

El torque mecánico interno T_{mi} es igual a :

$$T_{mi} = K \cdot I_{eq} \cdot I_a$$

Remplazando el valor conocido de I_{eq} , se tiene:

$$T_{mi} = K \left(I_p \pm \frac{N_s}{N_p} I_s \right) I_a$$

Cuando se trata del motor compound conexión larga, la corriente de excitación I_p es constante y la corriente de excitación I_s es igual a la corriente de armadura I_a . Por lo tanto, la expresión del torque queda como sigue:

$$T_{mi} = K \cdot I_p [I_a] \pm K \frac{N_s}{N_p} [I_a]^2$$

En la figura 5.17 se ha graficado la curva de $T_{mi} - I_a$ para los motores compound acumulativo y sustractivo.

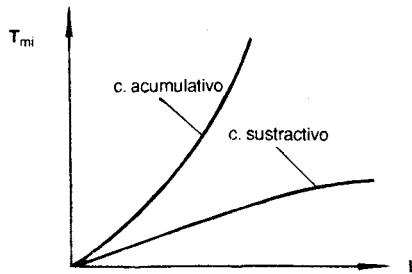


Fig. 5.17 Curvas de $T_{mi} - I_a$ para los motores compound.

La expresión del torque mecánico interno T_{mi} en función de la velocidad puede hallarse fácilmente partiendo de la ecuación de las tensiones:

$$V_t = E_a + I_a(r_a + R_s)$$

$$V_t = K \cdot I_{eq} \cdot \omega + I_a(r_a + R_s)$$

$$V_t = K \left(I_p \pm \frac{N_s}{N_p} I_a \right) \omega + I_a(r_a + R_s)$$

Despejando I_a en esta última expresión, queda:

$$I_a = \frac{V_t - K \cdot I_p \cdot \omega}{r_a + R_s \pm K \frac{N_s}{N_p} \omega}$$

Remplazando este valor de I_a en la expresión anterior del torque T_{mi} se obtiene la siguiente expresión de la característica mecánica del motor compound:

$$\begin{aligned} T_{mi} &= K \cdot I_p \frac{V_t - K \cdot I_p \cdot \boxed{\omega}}{r_a + R_s \pm K \frac{N_s}{N_p} \boxed{\omega}} \\ &\pm \frac{K \cdot N_s (V_t - K \cdot I_p \cdot \boxed{\omega})^2}{N_p \left(r_a + R_s \pm K \frac{N_s}{N_p} \boxed{\omega} \right)^2} \end{aligned}$$

En la figura 5.18 se ha dibujado las curvas características de $T - \omega$ para los motores de corriente continua conexión compound.

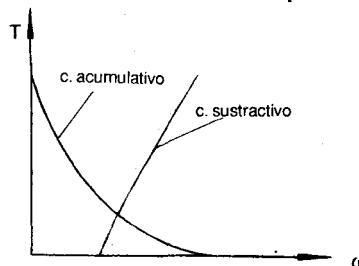


Fig. 5.18 Característica mecánica de los motores compound.

Se observa que en el motor compound sustractivo la velocidad crece bastante con la carga, lo cual lo hace impráctico para el accionamiento de cargas comunes. El problema de este motor es que tiende a embalarse, adquiriendo velocidades peligrosas, cuando se le aumenta la carga, lo cual no ocurre con ninguno de los otros tipos de motores.

Finalmente, en la figura 5.19 se puede ver la curva de la corriente de armadura I_a en función de la velocidad ω según la expresión obtenida más arriba.

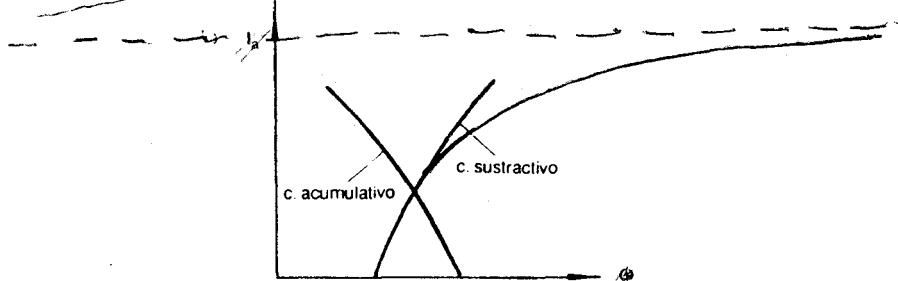


Fig. 5.19 Característica de funcionamiento $I_a - \omega$ para los motores compound.

5.4 ARRANQUE, PUESTA EN MARCHA, VACIO Y TRABAJO CON CARGA

El trabajo con motores eléctricos requiere el conocimiento de ciertos términos (relacionados con la operación y el funcionamiento) de uso frecuente no sólo en el análisis de las máquinas sino en el trabajo directo con las mismas en el taller o en la planta.

Esto obliga a definir con precisión las cantidades eléctricas y mecánicas que corresponden a los diferentes momentos de la operación de un motor.

La finalidad de un motor es suministrar en el eje un torque motor (a una velocidad angular determinada) a una carga mecánica la cual ofrecerá, en condiciones permanentes, es decir, a velocidad constante, un torque resistente igual al torque motor o motriz.

Sin embargo, antes que esto ocurra, el motor estuvo parado (quieto o en reposo), es decir, con velocidad $\omega = 0$ y con la red desconectada, o sea, el motor, sin alimentación de la red.

En el preciso momento en que se cierra el interruptor, la tensión de la red se aplica al circuito eléctrico del motor y éste empieza a moverse siendo su velocidad inicial cero ($\omega = 0$). A este momento inicial de la operación de un motor se le conoce con el nombre de **arranque**.

En el arranque, los motores de continua absorben una corriente muy alta, denominada **corriente de arranque** tal como puede verse en las figuras 5.11, 5.15 y 5.19, para $\omega = 0$.

Lo mismo puede decirse del torque de arranque. Véase las figuras 5.10, 5.14 y 5.18.

Entre el instante del arranque, $\omega = 0$, y el punto de operación, $\omega = \text{cte}$, transcurre un periodo que se denomina **período de puesta en marcha**. Durante este tiempo, el motor aumenta continuamente su velocidad con una aceleración angular $\alpha = d\omega/dt$ debida al torque acelerador T_{ac} .

El torque acelerador T_{ac} es la diferencia entre los torques motor T_{mot} y resistente T_{res} :

$$T_{ac} = T_{mot} - T_{res}$$

El torque acelerador se aplica sobre todas las masas giratorias cuyo momento de inercia referido al eje del motor es I y las acelera con una aceleración α , de tal modo, que:

$$T_{ac} = I \cdot \alpha$$

Así como los motores presentan curvas mecánicas características de $T - \omega$, las diferentes cargas también presentan sus propias características mecánicas que dependen de las particularidades de cada una de éstas. En la figura 5.20 puede verse algunas curvas de cargas mecánicas típicas.

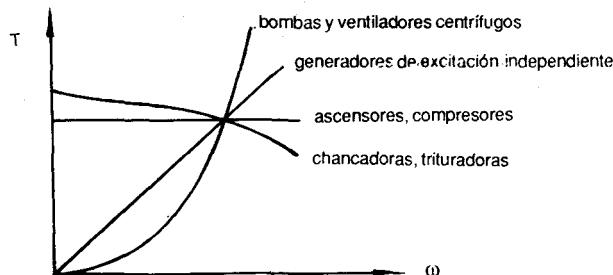


Fig. 5.20 Características mecánicas de cargas típicas.

En la figura 5.21 se ha trazado las curvas de características mecánicas de un motor y una carga cualquiera con el fin de aclarar los conceptos relacionados con los torques.

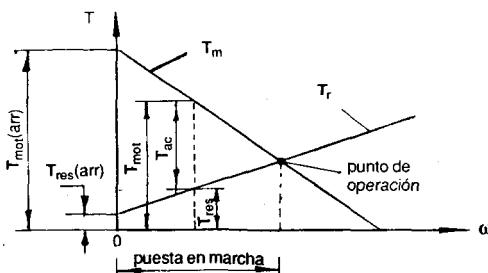


Fig. 5.21 Curvas de funcionamiento de un motor eléctrico acoplado a su carga.

Para que un motor pueda accionar una carga es necesario que el torque motor T_{mot} sea mayor que el torque resistente T_{res} . En caso contrario, el motor se queda parado consumiendo la elevada corriente de arranque que terminará quemándolo.

En el punto en que se cruzan las curvas del motor y de la carga, el torque acelerador se anula y, por lo tanto, la aceleración angular; entonces, la velocidad se hace constante y se dice que el motor alcanza su **punto de operación**, esto es, una posición de equilibrio.

No existe una sola curva para el motor ni para la carga. En uno y otro es posible trasladarse a otras curvas introduciendo variaciones o cambios en los valores o posiciones de sus componentes. Así, en el motor se puede cambiar el valor de la resistencia del reóstato de campo mientras que, en una bomba, por ejemplo, se puede cambiar la apertura de la válvula de descarga.

Si se mantiene invariables los parámetros del circuito del motor, la curva de características mecánicas no cambiará.

Con el fin de explicar el trabajo de un motor con carga, en vacío y con sobrecarga es necesario introducir variaciones en la carga y por lo tanto en sus curvas.

Supóngase que se trata de una bomba centrífuga, que, con una cierta apertura de la válvula de descarga, ha sido puesta en marcha. El conjunto motor-bomba se encuentra girando a una velocidad constante.

Si, de pronto, se quiere alcanzar el punto de operación nominal porque la carga es mediana y el motor no está desarrollando todavía su potencia de placa, entonces, se abre la válvula de descarga de la bomba hasta que se alcance el punto nominal N de operación. Esto equivale a haberse trasladado a una curva superior, tal como puede verse en la figura 5.22.

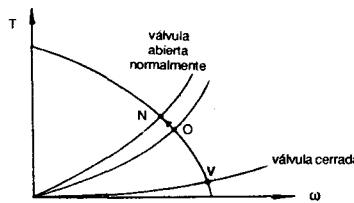


Fig. 5.22 Trabajo con distintas cargas de un motor eléctrico.

Para reducir la carga del motor basta con ir cerrando la válvula; entonces, se producirá un traslado de las curvas desde el punto N hacia el punto V, que corresponde a la válvula completamente cerrada y, por lo tanto, a una carga nula o trabajo en vacío para el motor con un torque útil mínimo muy bajo, el que corresponde a las fricciones mecánica y viscosa de la bomba.

Si la apertura de la válvula corresponde a una curva por encima de la que pasa por N, se dice que el motor está sobrecargado. En estas condiciones, el motor no debe trabajar por mucho tiempo porque las corrientes consumidas son mayores que la máxima permitida. En todo caso, sólo está permitido el trabajo con sobrecargas por tiempos breves.

5.4.1 Corriente y par de arranque

Para la mayoría de los motores de continua se cumple la siguiente ecuación, en mayor o menor grado:

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a$$

$$V_t = K \cdot I_{ex} \cdot \omega + I_a \cdot r_a$$

Como se sabe, en el momento del arranque, la f.c.m. es nula pues no hay movimiento todavía; por consiguiente, la corriente de armadura absorbida por el motor será igual a:

$$I_a = \frac{V_t}{r_a}$$

Como la resistencia de armadura r_a es pequeña, la corriente de arranque resultará ser muy alta, pudiendo llegar a ser hasta diez veces mayor que la corriente nominal del motor.

Este alto valor de la corriente perjudica no sólo al motor (comutación incorrecta), sino que también produce fluctuaciones de tensión en la red, perturbando el funcionamiento de otras cargas (otros motores conectados a la misma red bajan momentáneamente su velocidad y las lámparas reducen su intensidad luminosa, por ejemplo).

Por esta razón, todos los motores de continua, a excepción de los muy pequeños, se ponen en marcha utilizando un arrancador. El arrancador consiste en un reóstato que se denomina **reóstato de arranque** R_{arr} y que se conecta en serie con el circuito de la armadura, tal como se ve en la figura 5.23.

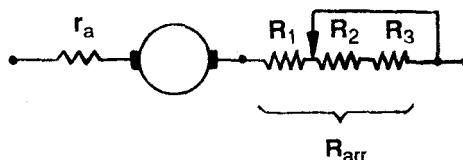


Fig. 5.23 Conexión del reóstato de arranque al circuito de la armadura.

El reóstato de arranque se diseña para limitar la corriente de arranque a valores comprendidos entre 1.5 y 2.0 veces la corriente nominal del motor.

La expresión de la corriente de armadura en el arranque con reóstato queda expresada de la siguiente manera:

$$I_a = \frac{V_t}{r_a + R_{arr}}$$

Conforme transcurre la puesta en marcha, las resistencias del reóstato se van cortocircuitando por etapas normalmente, ya sea manual o automáticamente, hasta anular su resistencia una vez que la máquina ha adquirido velocidad suficiente.

En la figura 5.24 se ha dibujado las curvas de corriente y de torque en función de la velocidad con el fin de comprender mejor lo que ocurre durante el arranque de un motor shunt cuando se usa un reóstato de arranque.

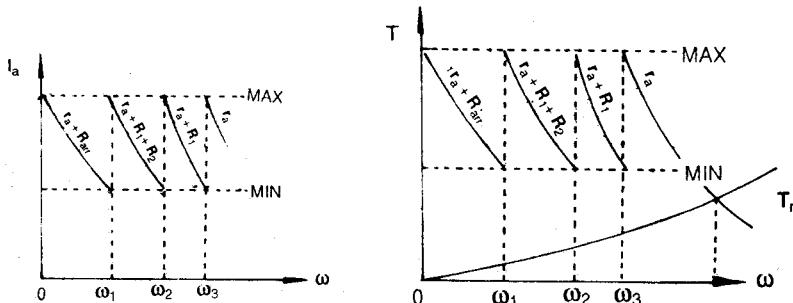


Fig. 5.24 Proceso de arranque de un motor shunt.

Las curvas de la figura 5.24 se han trazado basándose en las expresiones de la corriente y del torque en función de la velocidad ya obtenidas anteriormente y en las que se ha agregado la resistencia del reóstato de arranque:

$$I_a = \frac{V_t - K \cdot I_p \cdot \omega}{r_a + R_{arr}} ; T_m = K \cdot I_p \cdot \frac{V_t - K \cdot I_p \cdot \omega}{r_a + R_{arr}}$$

Se pretende que, durante el período de puesta en marcha, la intensidad en el inducido y, por tanto, el torque mecánico interno, no superen, por ejemplo, el doble de su valor nominal, y que se vayan eliminando las sucesivas resistencias del reóstato cada vez que la corriente en el inducido baja hasta su valor nominal.

Es posible diseñar un arrancador de modo que cumpla los requisitos exigidos en el párrafo anterior. El diseño consiste en determinar el número de resistencias en serie y sus valores respectivos. Se puede incluso predecir la velocidad a la cual se debe cortocircuitar cada resistencia del arrancador.

Si el motor se pusiera en marcha sin ir reduciendo el valor de la resistencia del reóstato de arranque, el motor se quedaría girando con la carga a una velocidad reducida, mucho menor que la nominal.

En la figura 5.25 se ha representado un motor shunt con un arrancador de resistencias en serie. Este arrancador es manual y se hace funcionar girando el cursor (brazo móvil) en sentido horario con la mano, desde la posición de máxima resistencia hasta a la de cortocircuito, tratando de vencer la fuerza del resorte antagonista.

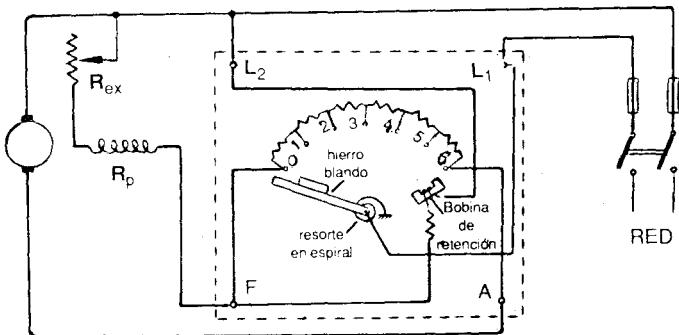


Fig. 5.25 El arrancador de tres terminales de un motor shunt.

Estos arrancadores incluyen una bobina de retención (en realidad, es un electroimán) que, por atracción magnética, mantiene el brazo móvil (viene a ser la armadura del electroimán) en la posición 6 de cortocircuito.

La bobina de retención se conecta en paralelo con el bobinado de armadura con el fin de garantizar que, cada vez que se apague el motor, el reóstato de arranque vuelva a su posición de máxima resistencia debido a la acción del resorte antagonista. De esta manera, el siguiente arranque se realizará normalmente.

Obsérvese que la f.m.m. de la bobina de retención y, por lo tanto, la fuerza de atracción electromagnética dependen directamente de la velocidad del motor. Si ésta es muy baja, la fuerza del resorte puede hacer que el reóstato vuelva a su posición inicial de máxima resistencia provocando que el motor se pare debido a la pequeña corriente de armadura.

Los motores grandes usan arrancadores automáticos. En estas instalaciones se requiere un sistema de control ya sea de la corriente de la armadura, o de la f.c.e.m. inducida que se encargue de efectuar en forma coordinada el cortocircuito de las resistencias en serie del reóstato de arranque.

5.5 CARACTERISTICAS DE OPERACION

Durante la operación del motor de continua se requiere muchas veces efectuar ciertos cambios que son propios del tipo de trabajo desarrollado por el equipo accionado por el motor.

A veces se requiere parar la máquina por distintas razones, debiendo, en estos casos, frenarla.

Otras veces el trabajo requiere, por ejemplo, que el equipo se mueva al revés o que regrese por la misma vía, en cuyo caso se requerirá que le sea invertido el sentido de giro al motor.

Existen aplicaciones que demandan un trabajo con velocidades distintas que son función de las características de la carga misma.

Es posible, también, que el motor sea requerido para realizar una combinación de todas estas alternativas de operación incluyendo arranques sucesivos, cuando se trata de cargas de tipo periódico con ciclos repetidos de arranques, frenados e inversiones de giro.

Los motores de continua presentan un comportamiento especial durante la operación. Las características de operación ya mencionadas se analizarán enseguida.

5.5.1 Control de velocidad

En lo que concierne a la regulación de la velocidad de rotación, los motores de continua poseen una serie de ventajas sumamente valiosas, que, en toda una serie de casos, han hecho que éstos sean insustituibles.

Aquí se tendrá principalmente en cuenta los límites de regulación de la velocidad y la economía de la operación de regulación.

La fórmula de la velocidad de un motor de continua obtenida a partir de la ecuación de las tensiones en el circuito de la armadura suministra información más que suficiente acerca de las posibilidades con que se cuenta para controlar la velocidad de estos motores:

$$\omega = \frac{V_t - I_a \cdot r_a}{k_a \cdot \phi_{ex}}$$

De esta fórmula se desprende que la velocidad de rotación de los motores de continua se puede regular:

- variando la tensión de la red V_t ;
- variando la caída de tensión en el circuito del inducido $I_a \cdot r_a$; y
- variando el flujo de excitación ϕ_{ex} .

El primer procedimiento es posible de realizar sólo en instalaciones especiales que permiten la regulación de la tensión V_t .

Los dos últimos procedimientos son posibles en las instalaciones comunes de tensión constante en la red.

5.5.1.1 Regulación de la velocidad del motor variando la excitación

Este procedimiento emplea un reóstato en el circuito del devanado shunt. Es el más empleado de los tres y constituye una de las cualidades de los motores shunt aunque, naturalmente, es aplicable también a los de excitación compuesta.

En la figura 5.26 se puede ver el diagrama circuital equivalente de un motor shunt incluyendo el reóstato de campo R_{ex} para la regulación de la velocidad del motor.

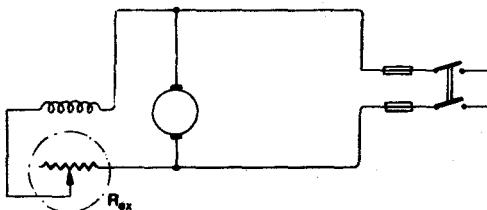


Fig. 5.26 Esquema del motor shunt con el reóstato de regulación de la velocidad.

El ajuste de la corriente de excitación y, por consiguiente, del flujo y de la velocidad, variando convenientemente la resistencia del circuito derivación, se logra con gran sencillez, economía y sin aumento sensible de las pérdidas en el motor.

La velocidad mínima consegurable es la que corresponde al campo máximo, o sea, anulando totalmente la resistencia del reóstato.

La velocidad máxima está limitada por los efectos de la reacción de armadura, que, cuando el campo es excesivamente débil, es motivo de inestabilidad y de commutación deficiente. Adicionalmente, los campos débiles originan velocidades de giro muy altas y peligrosas para la estructura mecánica de la máquina.

Una expresión más exacta de la velocidad ω en función de la corriente de excitación I_p se obtiene considerando que el flujo total de excitación Φ_{ex} se debe al flujo remanente Φ_{rem} y al flujo producido por la corriente de excitación I_p , de modo que el producto $k_a \cdot \Phi_{ex}$ puede ponerse en la siguiente forma:

$$k_a \cdot \Phi_{ex} = k_a \cdot \Phi_{rem} \pm K \cdot I_p$$

Asimismo, la corriente de armadura I_a es función del torque mecánico interno T_{mi} , el cual se puede considerar constante si el problema consiste en regular la velocidad de un motor cuya carga es de torque constante (por ejemplo, las cargas de elevación y de transporte), y del flujo de excitación Φ_{ex} .

Con todas estas consideraciones, la velocidad de giro queda expresada del modo siguiente:

$$\omega = \frac{V_t - \frac{T_{mi} \cdot r_a}{k_a \cdot \Phi_{rem} \pm K \cdot I_p}}{k_a \cdot \Phi_{rem} \pm K \cdot I_p}$$

En la figura 5.27 se muestra la curva de variación de la velocidad del motor shunt con la corriente de excitación. Obsérvese cómo aumenta la velocidad del motor al disminuir la corriente de excitación, es decir, al aumentar la resistencia de campo R_{ex} .

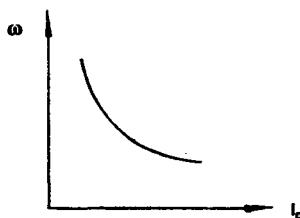


Fig. 5.27 Curva de velocidad $\omega - I_p$ para un motor shunt.

Con esta curva se comprende fácilmente porqué un motor shunt corre el riesgo de embalarse cuando el circuito de la bobina de campo shunt se abre intempestivamente durante la marcha del motor con carga o sin ella.

Esta falla es posible que ocurra durante el ensayo de este motor en el laboratorio cuando las vibraciones del motor, transmitidas a la mesa, acaban aflojando los conductores de las borneras. Este problema puede evitarse si, durante el ensayo, se chequea continuamente que las borneras permanezcan conectadas a los terminales de los conductores.

5.5.1.2 Regulación de la velocidad del motor variando la resistencia del circuito del inducido

Esta forma de regulación consiste en rebajar la velocidad insertando resistencias en serie en dicho circuito.

Este procedimiento puede utilizarse indistintamente en los motores serie,

shunt o compound; en estos dos últimos, la resistencia en serie debe conectarse entre el devanado shunt y el inducido y nunca entre el motor y la línea.

La velocidad de los motores serie generalmente se regula por este método.

La expresión de la velocidad en función de la resistencia del reóstato de regulación R_{reg} será la siguiente:

$$\omega = \frac{V_t - I_a (r_a + R_{reg})}{k_a \cdot \phi_{ex}}$$

En la figura 5.28 se ha trazado la curva de $\omega - R_{reg}$ para los motores de corriente continua.

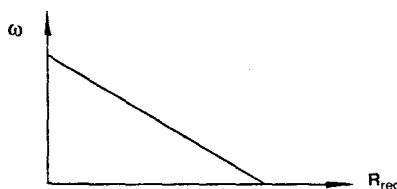


Fig. 5.28 Curva de regulación de velocidad por variación de la resistencia del inducido.

Para un valor dado de la resistencia en serie con el inducido, la velocidad varía muy ampliamente con la carga ya que depende de la caída de tensión en dicha resistencia, la que a su vez depende de la intensidad requerida por la carga.

Por ejemplo, un motor shunt de 1200 rpm cuya velocidad en carga se reduce a 750 rpm mediante resistencias en serie, recobrará su velocidad de 1200 rpm al cesar la carga, ya que el efecto de la intensidad en vacío sobre la resistencia es insignificante.

Las pérdidas de potencia en la resistencia exterior son muy crecidas, especialmente cuando se pretende una gran reducción de la velocidad; de hecho, si el par resistente es constante, la potencia de entrada en el motor y reóstato conjuntamente se mantiene uniforme, mientras que la potencia de salida en el eje decrece proporcionalmente con la velocidad, por lo que los costos de ejercicio son relativamente altos si se trabaja con poca velocidad durante períodos largos.

Sin embargo, siendo el costo inicial de instalación bastante económico, el procedimiento de las resistencias en serie encuentra aplicación cuando el tiempo en que hay que trabajar a velocidad reducida es pequeño.

5.5. 1.3 Regulación de la velocidad mediante la variación de la tensión en la red

Cuando el motor está destinado para el funcionamiento en condiciones en que varía ampliamente la velocidad, el método más conveniente de variación de su velocidad, desde el punto de vista de utilización del motor y de fiabilidad de su funcionamiento, es mediante la variación de la tensión en los bornes, siendo la excitación independiente, que permite tener la magnitud total del flujo Φ_{ex} para todas las velocidades.

En este caso, cuando la tensión en los bornes del motor se puede regular suavemente desde el valor cero hasta el máximo, es posible una amplia regulación de la velocidad del motor no sólo suave y económica, sino que también el arranque no reostático sin pérdidas en el reóstato de arranque.

El sistema más típico de este género es el sistema de Leonardo o sistema generador-motor uno de cuyos esquemas principales posibles se muestra en el figura 5.29.

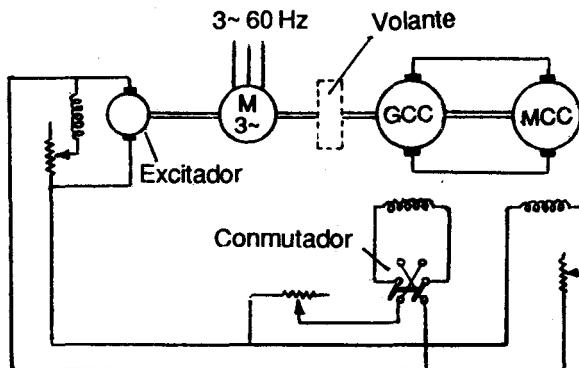


Fig. 5.29 Esquema principal del sistema generador-motor.

5.5.2 Inversión del sentido de giro

La operación de invertir el sentido de giro consiste en cambiar la marcha del motor, lo cual se puede hacer de dos maneras diferentes, tal como se deduce del capítulo 1.4 para un motor elemental. Véase la figura 1.11.

En la figura 5.30 se explica de un modo gráfico estas dos alternativas para la inversión del sentido de giro. Véase cómo cambia el sentido del vector de fuerza F que es el que tiene el sentido del movimiento, primero cuando se invierte la polaridad del campo inductor B (figura 5.30 b), segundo, cuando se invierte el sentido de la corriente por el conductor inducido (figura 5.30 c).

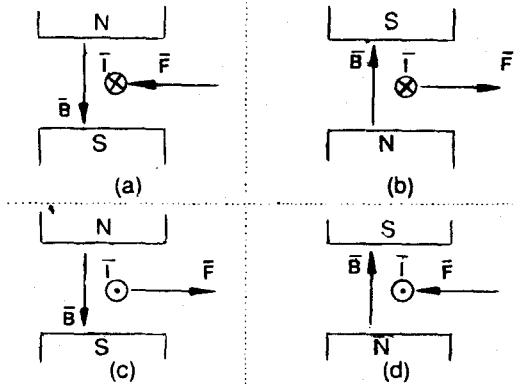


Fig. 5.30 Inversión del sentido del movimiento en un motor elemental.

Aplicando estos resultados a los motores reales se supondrá que el motor de continua, por ejemplo, el shunt, está conectado según se ve en la figura 5.31.

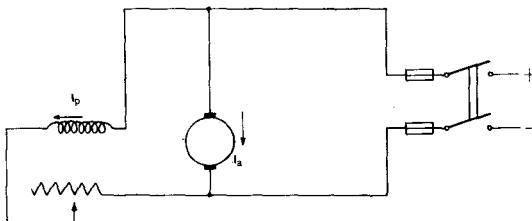


Fig. 5.31 Conexión inicial del motor shunt.

La primera forma de invertir la marcha sería, entonces, **invirtiendo el sentido de la corriente de excitación**, tal como puede verse en la figura 5.32.

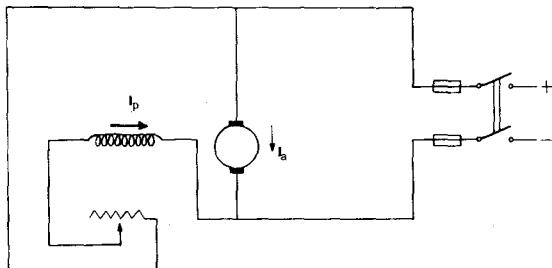


Fig. 5.32 Inversión del sentido de giro por inversión de la corriente de excitación.

La inversión de la marcha se podrá conseguir, también, invirtiendo la corriente de armadura. Véase la figura 5.33.

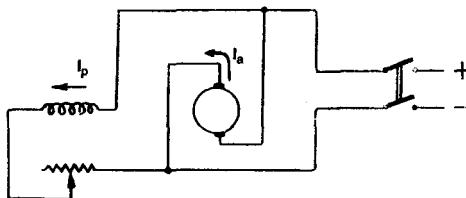


Fig. 5.33 Inversión del sentido de giro por inversión de la corriente de armadura.

Con la inversión simultánea de ambas corrientes, no se obtendría la inversión de la rotación. Véase la figura 5.30 d .

En el caso de los motores compound deberá tenerse cuidado que los campos serie y shunt permanezcan siempre aditivos, es decir, que la conexión sea siempre acumulativa.

5.5.3 Frenado eléctrico

Cuando se desea parar rápidamente un motor de continua, se puede utilizar frenos mecánicos o se puede aprovechar las mismas fuerzas magnéticas que se oponen al movimiento de un conductor en un campo magnético.

En toda una serie de instalaciones los regímenes de frenado eléctrico de los motores tienen gran importancia. El frenado puede ser:

- con recuperación de la energía en la red o regenerativo;
- por el método de conexión en oposición; y
- dinámico

5.5.3.1 Frenado regenerativo

Para un motor shunt el frenado regenerativo tiene lugar cuando la máquina, que funciona en el régimen de motor, se pone en rotación por el mecanismo accionado (caso del descenso de un ascensor aprovechando su peso) con una velocidad mayor que la velocidad de marcha en vacío ω_0 .

En este caso la f.e.m. $E_a = k_a \cdot \phi_p \cdot \omega$ se hace mayor que la tensión en la red V_t y, por lo tanto, la corriente de armadura $I_a = (V_t - E_a)/r_a$ varía de signo; correspondientemente, varía el signo del torque T_{mi} desarrollado por la máquina, es decir, la máquina comienza a funcionar en el régimen de generador en paralelo con la red.

Las partes de las características mecánicas que se refieren al régimen de fre-

nado regenerativo son la continuación de las correspondientes características del motor y están situadas en el cuarto cuadrante. Véase la figura 5.34.

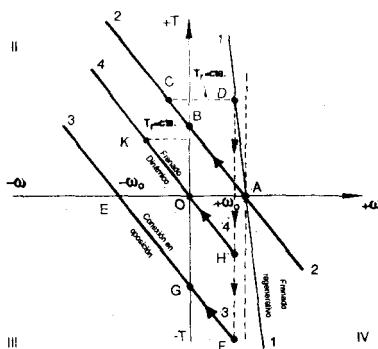


Fig. 5.34 Características mecánicas de un motor shunt en régimenes de frenado.

Para el motor serie el asunto es un poco más complicado, puesto que el motor no puede pasar, por si mismo, del régimen de motor al régimen de frenado regenerativo aumentando simplemente la velocidad.

Al aumentar la velocidad del motor serie, disminuye el flujo de excitación Φ_{ex} , y la f.c.e.m. E_a puede aproximarse a la tensión de la red V_t , pero no, sobrepasarla.

Por esta razón, el frenado regenerativo del motor serie se efectúa haciendo lo pasar a la excitación shunt y al funcionamiento correspondiente a esta excitación.

El frenado regenerativo de los motores serie se emplea ampliamente en el transporte eléctrico.

5.5.3.2 Frenado por el método de conexión en oposición

Otra forma de frenar eléctricamente el motor es invirtiendo su sentido de rotación. Este régimen se realiza por dos procedimientos:

- cuando la carga pone el motor en rotación en sentido contrario al de acción del torque motor

- cuando se invierte la marcha cambiando el sentido de la corriente de armadura I_a .

El primer caso tiene lugar, por ejemplo, al insertar en el circuito del inducido del motor, que eleva una carga, una resistencia R_f suficientemente grande.

Se supondrá que el torque resistente T_r es constante.

En un motor shunt, al conectar la resistencia R_f el motor pasa de la característica mecánica natural 1 (figura 5.34) a la característica mecánica 2 correspondiente a la resistencia R_f .

Si en el instante en que se conecta la resistencia R_f , la corriente I_a se limita en tal grado, que el torque motor $T_{mi} = k_a \cdot \Phi_p \cdot I_a$ se hace menor que el torque resistente T_r , en el eje del motor surge un torque acelerador negativo T_{ac} y la velocidad del motor comienza a decelerarse.

En este caso, la f.e.m. E_a disminuirá, mientras que la corriente $I_a = (V_t - E_a)/(r_a + R_f)$ aumentará, correspondientemente a lo cual aumentará también el torque T_{mi} .

Este proceso de disminución de la velocidad ω paralelamente con el aumento del torque motor transcurrirá hasta que el torque motor se iguale al torque resistente T_r . En este caso, el torque acelerador se hace nulo y cesa la ulterior variación de la velocidad.

Para valores de R_f y T_r suficientemente grandes, el motor, decelerándose, puede pararse (punto B de la característica 2 en la figura 5.34), y luego comenzar a girar en el sentido contrario.

La velocidad estacionaria de bajada se determina por el punto C en el que la característica 2 se intersecta con la recta de torque resistente constante T_r .

En el régimen considerado, al motor se le suministra una potencia de la red $P_{el} = V_t \cdot I_a$ y una potencia del eje de la carga $P_{mec} = E_a \cdot I_a$; siendo la suma $P_{el} + P_{mec} = V_t \cdot I_a + E_a \cdot I_a = I_a \cdot I_a (r_a + R_f)$, es decir, se consume totalmente en las resistencias del circuito del inducido.

Un proceso análogo tiene lugar durante el frenado de un motor serie. Al variar el sentido de rotación del rotor, la máquina puede pasar al régimen de generador con autoexcitación. Pero, con las resistencias R_f , que se insertan en el circuito del inducido para limitar la máquina prácticamente se excluye.

El segundo caso de frenado por conexión en oposición tiene lugar cuando se desea parar rápidamente, por ejemplo, el carro de una grúa. Para esto, se cambia la polaridad de los bornes del inducido y, por consiguiente, el sentido de la corriente I_a . Véase la figura 5.35.

Se considera nuevamente constantes el torque resistente T_r y la corriente de excitación I_p .

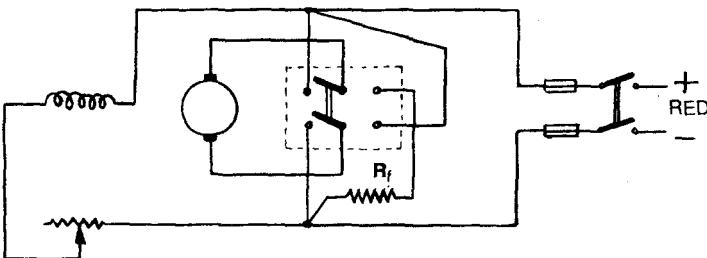


Fig. 5.35 Circuito de frenado de un motor shunt por inversión de la corriente de armadura.

En los primeros instantes, después de la conmutación, el inducido continuará girando en el mismo sentido que antes de la conmutación, utilizando la energía cinética de las piezas en movimiento del accionamiento.

En estas condiciones, el signo de la f.e.m. E_a permanece invariable, mientras que el signo de la tensión V_t de la red cambia respecto de E_a , por el contrario.

Por consiguiente:

$$I_a = \frac{-V_t - E_a}{r_a + R_f} = -\frac{V_t + E_a}{r_a + R_f}$$

En estas expresiones, R_f es la resistencia adicional insertada en el circuito del inducido para limitar la corriente de armadura I_a .

La corriente I_a cambia su signo por el contrario. En el eje del motor surge un torque de frenado $-T_{mi} = k_a \cdot \Phi_p \cdot (-I_a)$.

En el primer instante, después de la conmutación, el trabajo del motor se determina por el punto F (figura 5.34) que corresponde al torque $-T_{mi}$ y a la velocidad ω que tenía el motor antes de la conmutación.

Bajo la acción del torque de frenado $-T_{mi}$, el motor comenzará a decelerarse y, correspondientemente a esto, disminuirán la f.e.m. E_a , la corriente I_a y el torque T_{mi} .

El motor pasa al funcionamiento por la característica 3 y, para la resistencia R_f adecuadamente dada, puede pararse (punto G de la característica 3 en la figura 5.34), y luego comenzar a girar en el sentido del torque $-T_{mi}$, es decir, en sentido contrario respecto al inicial. Si esto es indeseable, el motor se desconecta de la red cuando $\omega = 0$.

Un proceso análogo tiene, también, lugar durante el frenado de un motor serie.

5.5.3.2 Frenado dinámico

Este procedimiento consiste en desconectar el motor de la red cuando está en marcha, pero, manteniendo su excitación energizada. El motor empieza a funcionar, entonces, como generador de excitación independiente sin motor primo que lo impulse, por lo que se parará rápidamente por efecto del torque resistente.

Para acelerar el frenado, se conecta la máquina a una resistencia que disipa la energía cinética de la máquina actuando como generador, en forma de calor. Véase la figura 5.36.

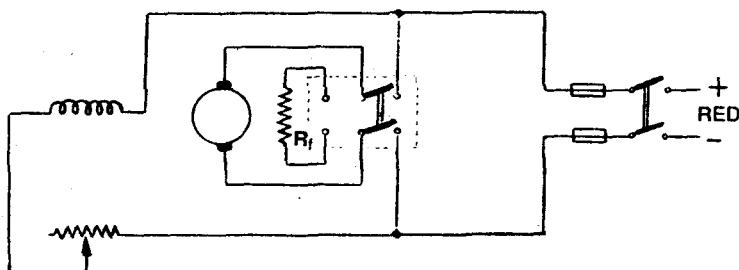


Fig. 5.36 Frenado dinámico de un motor shunt.

Puesto que en este caso, $V_t = 0$, entonces, la ecuación de la característica mecánica de la máquina tiene la forma:

$$\omega = \frac{T_{mi} (r_a + R_f)}{k_a \cdot \phi_p} \quad \text{y} \quad \omega = \frac{T_{mi} (r_a + R_f)}{k_a \cdot \phi_p}$$

Esta ecuación corresponde a una recta que pasa por el origen del sistema de coordenadas, del segundo cuadrante al cuarto.

El proceso de frenado sucede de la manera siguiente. Supóngase que la máquina funcionaba en el régimen de característica 1 (figura 5.34). En el primer instante, después de pasar la máquina al régimen de frenado dinámico, la velocidad de rotación de la máquina prácticamente no varía y, correspondientemente, no varía la f.e.m. E_a .

Pero la corriente I_a cambia su sentido, por cuanto en el régimen de motor $I_a = (V_t - E_a)/r_a$, y en el régimen de generador $I_a = -E_a/(r_a + R_f)$.

Por consiguiente, en el eje de la máquina surge un torque de frenado $-T_{mi}$, y el trabajo de la máquina se determina por el punto H (figura 5.34) que corresponde a este torque y a la velocidad inicial ω .

En lo sucesivo, la velocidad de rotación disminuye según la característica

4 , puede hacerse igual a cero y, luego, la máquina puede comenzar a girar en sentido contrario ($-\omega$) bajo la acción, por ejemplo, de la carga que desciende.

La velocidad estacionaria de bajada de la carga se determina por el punto K en el que la característica 4 se interseca con la recta del torque T_r creado por la carga, siendo $T_r = \text{constante}$.

El frenado dinámico de un motor serie puede realizarse del mismo modo que en el motor shunt, es decir, con excitación independiente. No obstante, este régimen no es económico debido al gran consumo de energía en la excitación.

5.6 DISTRIBUCION DE PERDIDAS Y POTENCIAS EN MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Las figuras 5.37 y 5.38 representan gráficamente el balance de potencia en generadores y motores de corriente continua respectivamente, ambos con excitación compuesta.

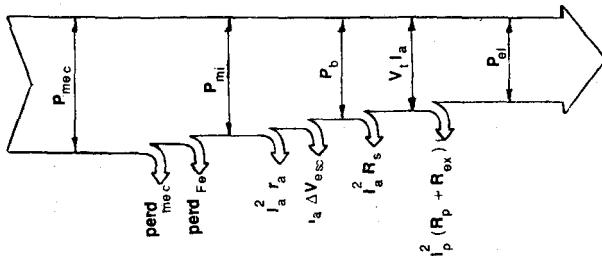


Fig. 5.37 Reparto de potencias en un generador de continua.

El diagrama de conexiones puede verse en la figura 5.39. Si la máquina carece de uno de los dos devanados, sea el serie o el shunt, deberá suprimirse de las figuras las referencias correspondientes.

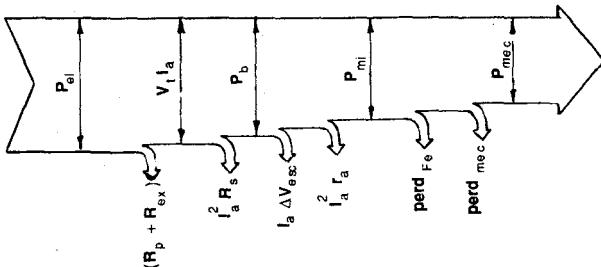


Fig. 5.28 Reparto de potencias en un motor de continua

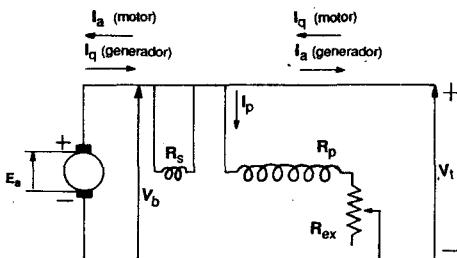


Fig. 5.39 Esquema de conexiones de un motor o de un generador de CC.

En forma simplificada, se puede resumir los siguientes tipos de pérdidas y potencias:

- P_{mec} – potencia mecánica recibida o entregada en el eje,
- P_{mi} – potencia electromagnética o potencia mecánica interna igual a $E_a \cdot I_a$,
- P_b – potencia en los bornes del inducido o potencia en el entrehierro igual a $V_b \cdot I_a$,
- P_{el} – potencia eléctrica entregada o recibida de la red igual $V_t \cdot I_q$.
- P_o – pérdidas rotacionales en vacío: incluye pérdidas mecánicas (por fricción, proporcionales a la velocidad del motor; y por ventilación, proporcionales al cubo de dicha velocidad) y pérdidas en el hierro de la armadura (por histéresis y por corrientes parásitas). (3 – 15%).
- P_a – pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento de la armadura y en las escobillas. (3 – 6%).
- P_{ex} – pérdidas en los arrollamientos de excitación. (1 – 5%)

Los porcentajes que se dan arriba son respecto a la potencia de entrada o recibida. Los valores de dichas pérdidas corresponden a máquinas de continua de uso general y de potencia comprendida entre 1 y 100 kW. Los menores porcentajes corresponden a las máquinas de mayor potencia.

La potencia mecánica interna difiere de la mecánica en el eje en las pérdidas mecánicas (incluyendo las pérdidas en el hierro).

La misma potencia mecánica interna difiere de la potencia eléctrica en bornes de la máquina en las pérdidas en el cobre.

5.7 EFICIENCIA

La eficiencia η de una máquina de continua, en general, se define como la relación entre las potencias entregada P_{entreg} y recibida P_{recib} por la máquina:

$$\eta = \frac{P_{entreg}}{P_{recib}}$$

Si la máquina trabaja como generador, la eficiencia η_G es igual a:

$$\eta_G = \frac{V_t \cdot I_q}{V_t \cdot I_q + \text{perd}_t}$$

Si la máquina trabaja como motor, la eficiencia η_M es igual a:

$$\eta_M = \frac{V_t \cdot I_q - \text{perd}_t}{V_t \cdot I_q}$$

En las expresiones de arriba, las pérdidas totales perd_t son iguales a:

$$\text{perd}_t = I_a^2 \cdot r_a + I_p^2 \cdot (R_p + R_{ex}) + p_o$$

5.8 DATOS DE PLACA

Se llama régimen nominal de funcionamiento de una máquina eléctrica al régimen de funcionamiento en condiciones, para las cuales fue destinada por la fábrica productora.

El régimen nominal de funcionamiento se caracteriza por las magnitudes indicadas en el tablero fabril o placa de la máquina y que se denominan nominales:

- potencia nominal
- tensión nominal
- corriente nominal (de excitación y de carga)
- velocidad nominal de rotación, etc.

No obstante, el término "nominal" puede ser aplicado, también, a las magnitudes no indicadas en la placa de la máquina, pero que están relacionadas con el régimen nominal de funcionamiento. Por ejemplo:

- torque nominal de rotación
- rendimiento nominal, etc.

Por potencia nominal de una máquina de corriente continua se entiende:

- 1) al funcionar la máquina como generador, la potencia eléctrica suministrada al circuito exterior (W o kW);
- 2) al funcionar la máquina como motor, la potencia mecánica útil en el eje (W, kW, hp o cv).

Las magnitudes nominales no se deben confundir con las normales. Si, por ejemplo, la tensión nominal de un motor es 220 V, en las condiciones de funcionamiento real la tensión puede oscilar y ser mayor o menor que la nominal.

Si se toma el valor medio de la tensión en un intervalo de tiempo suficientemente largo, entonces, a este valor se le puede llamar tensión normal o de funcionamiento de la máquina.

De lo dicho se deduce que las magnitudes normales, en el caso general, pueden diferenciarse de las nominales.

Las máquinas de corriente continua se construyen en otros países en una amplia gama de magnitudes nominales. Según sus potencias, se pueden dividir en los tipos siguientes:

Micromáquinas	menos de 100 W
Máquinas pequeñas	de 100 W a 2 kW
Máquinas de pequeña potencia	de 1 a 10 kW
Máquinas de potencia media	de 10 a 100 kW
Máquinas grandes	de 100 a 1000 kW
Máquinas de gran potencia	más de 1000 kW

Según los niveles de tensiones nominales, generalmente, se distinguen:

Máquinas de baja tensión	menos de 100 V
Máquinas de tensión media	de 100 a 1000 V
Máquinas de alta tensión	más de 1000 V

Según las velocidades de rotación las máquinas generalmente se dividen en:

Máquinas de bajas rpm	menos de 250 rpm
Máquinas de rpm medias	de 250 a 1000 rpm
Máquinas de rápidas rpm	de 1000 a 3000 rpm
Máquinas ultrarrápidas	más de 3000 rpm

En toda una serie de casos, cuando se exige una potencia bastante grande de la corriente continua, suele ser conveniente instalar en un mismo eje dos máquinas de corriente continua en vez de una, acoplando eléctricamente sus inducidos en serie o en paralelo.

Adicionalmente en las placas se coloca la clase de aislamiento con un código que indica la temperatura máxima con que pueden trabajar los conductores sin perjudicar el aislamiento de la máquina.

A veces, no se da la corriente de excitación como dato de placa en los motores shunt o compound. Para poderla determinar en forma aproximada se requiere medir la resistencia del bobinado de excitación shunt. La corriente no-

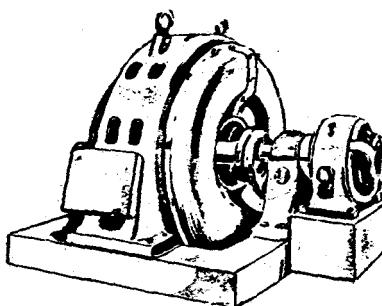
minal de excitación se obtiene dividiendo la tensión nominal, que siempre es dato de placa, entre el valor medido de resistencia.

Aunque, en la práctica, muchas veces no es posible por la diversidad de condiciones existentes, se debería, sin embargo, en lo posible, tratar de trabajar con valores menores o iguales que las cantidades indicadas en la placa si se quiere una máquina duradera y sin problemas durante su funcionamiento.

Capítulo 6

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA SINCRONA TRIFASICA

- 6.1 Aspectos físicos y constructivos
- 6.2 Campos magnéticos del rotor y del estator
- 6.3 El torque electromagnético
- 6.4 La f.e.m. inducida
- 6.5 Factores de distribución y de paso



ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA SINCRONA TRIFASICA

Las máquinas síncronas, en nuestro medio, son, en su mayoría, trifásicas y se usan más como generadores.

Los generadores síncronos de corriente alterna se llaman también alternadores.

En el país la firma ALGESA fabrica estas máquinas.

Los motores síncronos son de uso limitado en nuestro medio, aparte que no se construyen en el país.

6.1 ASPECTOS FISICOS Y CONSTRUCTIVOS

El funcionamiento de los generadores síncronos se basa en el principio de hacer girar una espira dentro de un campo magnético para que se induzca en aquélla una fuerza electromotriz.

También sucede lo mismo si se deja la espira fija y se hace girar el campo, es decir, los electroimanes que lo producen.

Este último sistema es el más conveniente puesto que en la espira se tendrá fuerte corriente, que es la misma que se utilizará en la red, mientras que en los electroimanes se tiene sólo una pequeña corriente continua auxiliar, encargada de producir el campo magnético necesario.

Por esta razón, la construcción de las máquinas síncronas se ha orientado en ese sentido. En la figura 6.1 se ilustra el principio constructivo aludido.

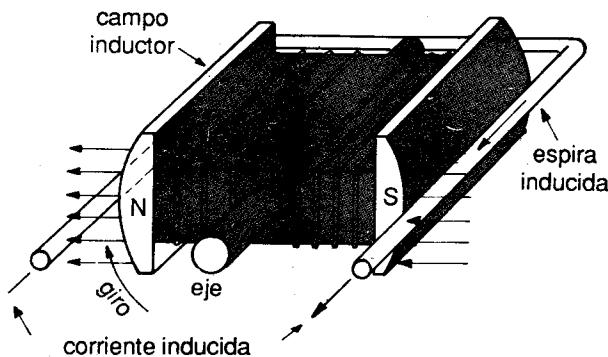


Fig. 6.1 Principio constructivo.

En la práctica, no se coloca una sola espira sino, un bobinado completo y, la mayoría de las veces, trifásico, para redes de este tipo.

Para el funcionamiento del generador se hace girar los electroimanes que producen el campo magnético mediante el auxilio de un motor primo (una turbina de vapor, de gas o hidráulica, un motor de combustión a petróleo o a gasolina, etc.). Este motor se acopla al eje del generador.

Los generadores tradicionales tienen un pequeño generador de corriente continua llamado **excitatrix** que alimenta los electroimanes inductores. Este generador suele estar acoplado al mismo eje principal del generador, directamente o por medio de un juego de poleas y correas.

La corriente proveniente de la excitatrix entra a los bobinados inductores mediante un contacto deslizante formado por dos escobillas que rozan contra dos anillos conductores aislados del eje. Estos anillos están unidos al principio y al fin del bobinado de los electroimanes ejecutado en la misma forma que en el bobinado inductor de las máquinas de continua.

La excitatrix es un generador de continua con excitación shunt, del modelo común, que tiene reóstatos en el circuito inductor y en el inducido para poder variar la corriente de excitación del generador.

Un generador síncrono está compuesto por varias partes perfectamente separadas, cada una de las cuales tiene una misión bien definida. Estas son: el estator, el rotor la carcasa y la excitatrix. En la figura 6.2 se muestra la ubicación relativa de todas estas partes entre sí, en una representación resumida y más bien simbólica.

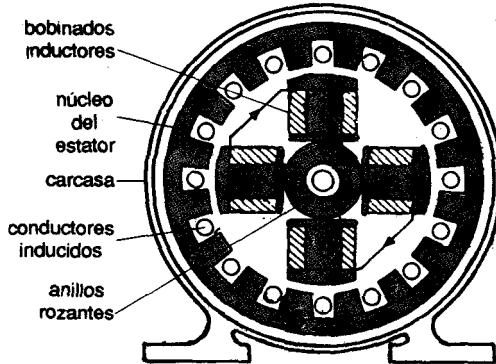


Fig. 6.2 Partes componentes de un generador.

6.1.1. El estator

Está compuesto por un núcleo de chapas de material ferromagnético, sujetas, formando un paquete, mediante una serie de pernos o de chavetas en forma de cola de milano.

Las chapas están aisladas entre sí, para evitar, en lo posible, las pérdidas producidas por las corrientes parásitas, que se traducen en un calentamiento de los núcleos de hierro sometidos a campos magnéticos alterños, calor que se produce a expensas de la energía eléctrica de la máquina.

El estator tiene ranuras en las que se alojan los conductores activos o inducidos que forman el bobinado del estator. Para aislar las bobinas del núcleo se colocan tubos de cartón aislante, abiertos, ocupando una longitud ligeramente mayor que la de la ranura del núcleo.

La figura 6.3 muestra el aspecto del estator de un generador en el que pueden verse las ranuras laterales para la corriente de aire de refrigeración, la que puede ser natural o forzada. Se ve, asimismo, las ranuras con las bobinas colocadas.

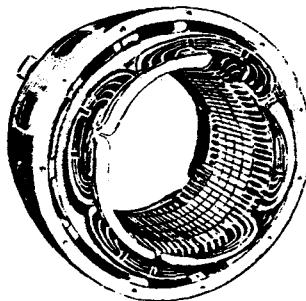


Fig. 6.3 Estator bobinado de un generador

6.1.2 El rotor

El inductor o rueda polar, se suele construir de una picza para las máquinas de reducido número de polos o de un núcleo central macizo, al que se fijan las masas polares, en las máquinas multipolares.

El número de polos p , está ligado a la frecuencia f (Hz) de la red y a la velocidad de giro n (rpm) del rotor, por la relación:

$$p = \frac{120 f}{n}$$

Como la frecuencia de la red es dato, generalmente se tiene $f = 60$ Hz en el Perú, y la velocidad de giro del rotor depende del motor primo que se elija, el número de polos resultará grande para los generadores movidos por turbinas hidráulicas o motores de combustión interna y pequeño para los accionados con turbinas de vapor.

En la tabla 6.1 se muestra las velocidades síncronas de generadores para $f = 60$ Hz y diferentes números de polos.

Tabla 6.1

Nº de polos	Velocidad (r.p.m.)	Nº de polos	Velocidad (r.p.m.)
2	3 600	18	400
4	1 800	20	360
6	1 200	22	327
8	900	24	300
10	720	26	277
12	600	28	257
14	514	30	240
16	450	60	120

En el mismo eje del rotor suele estar fijo el inducido de la excitatriz que suministra la corriente de excitación aunque, en modelos antiguos, la excitatriz puede ser independiente y movida por una transmisión a correas o engranajes.

La figura 6.4 muestra un rotor de cuatro polos en el que se puede ver las masas y expansiones polares, las aletas de ventilación, los anillos deslizantes por los que entrará la corriente a las bobinas de campo, y el rotor de la máquina excitatriz. Los anillos están aislados del eje por medio de micanita prensada.

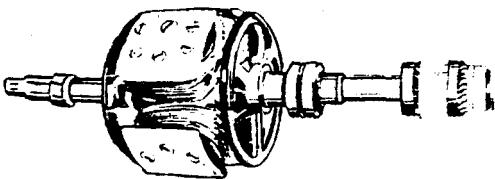


Fig. 6.4 Rotor de un generador mostrando el inducido de la excitatriz.

Como se ve, la excitatriz está montada del lado opuesto del eje que recibe el accionamiento del motor primo.

6.1.3 La carcasa

Es la parte externa de la máquina que envuelve al estator y comprende la cubierta, la base y los apoyos.

En la cubierta se encuentran los conductos y orificios para la ventilación.

En los apoyos se aseguran generalmente los portaescobillas para el induc-

La figura 6.5 muestra un generador completo en el que se puede ver la excitatriz acoplada al mismo eje principal de la máquina; los anillos con los portae escobillas colocados; los orificios para la ventilación; y la caja de bornes principales, en un costado.

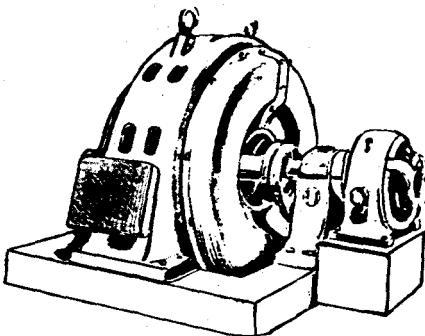


Fig. 6.5 Generador completo con su excitatriz.

La base está formada por un dado de hormigón, que debe tener dimensiones adecuadas para absorber las vibraciones que produce el movimiento de la máquina.

6.1.4 El bobinado del estator

Como la mayor parte de los generadores son trifásicos, sus devanados también lo serán.

Para diseñar un devanado, hay que tener en cuenta algunos factores importantes como son el número de polos y el número de ranuras del estator.

En la periferia se encuentra una determinada cantidad de ranuras longitudinales en las que se alojarán los conductores inducidos.

Se acostumbra, para diseñar un bobinado, repartir el número total N de ranuras en el número de polos y de fases, quedando así, un número de ranuras por polo y por fase q , que para bobinados trifásicos vale:

$$q = \frac{N}{3 \cdot p}$$

Para que se pueda realizar un devanado de paso completo ocupando todas las ranuras, q debe resultar un número entero.

Los devanados del estator se pueden realizar de dos formas: concentrados o distribuidos. En los primeros, se coloca un solo conductor o haz de conductores en una ranura por polo y por fase; así, para una máquina bipolar trifásica habría sólo seis ranuras con tres bobinas. Esta práctica se ha dejado por la de

efectuar los devanados distribuidos, en la que los conductores se reparten en varias ranuras por polo y por fase.

La razón es que en los concentrados se tenía un pésimo aprovechamiento de la periferia del estator, que resultaba de mayores dimensiones, para poder alojar en una ranura los conductores necesarios por polo y por fase. Además, la forma del campo magnético a lo largo del entrehierro no es sinusoidal y se generan armónicas que están presentes en la corriente de salida.

Como la ventaja del devanado concentrado es únicamente la de suministrar una f.e.m. inducida un poco mayor, no compensa el aumento de dimensiones de la máquina por las razones expuestas.

La proporciones de f.e.m. inducida en un devanado distribuido con respecto a uno concentrado se llama **factor de distribución**, y su valor revela que no se justifica la ejecución de los concentrados.

En la construcción de generadores se suele utilizar el bobinado distribuido denominado **bobinado en cadena**. Se le llama también **bobinado de cabezas distintas** porque las bobinas no son iguales entre sí, sino que las hay más cortas y más largas, para poder acomodar los cruces en las cabezas frontales.

El reparto de conductores en la periferia del estator es muy regular, con lo que el factor de potencia y el rendimiento de la máquina resultan ser los mejores. Las ranuras son de pequeñas dimensiones, pues alojan a un solo lado de bobina, con resultado de buen aprovechamiento del núcleo.

Las bobinas resultan de formas rectangulares, con sus cabezas con bombas hacia afuera o hacia adentro, según el caso.

Las bobinas resultan de formas rectangulares, con sus cabezas con bombas hacia afuera o hacia adentro, según el caso.

6.2 CAMPOS MAGNETICOS DEL ROTOR Y DEL ESTATOR

6.2.1 Campo magnético del rotor

En la figura 6.6 se puede ver un rotor cilíndrico de máquina síncrona cuya periferia está constituida por ranuras donde se aloja el devanado inductor en forma distribuida.

El devanado está dispuesto de tal modo, que el campo engendrado es de dos polos y cuyos valores se distribuyen en forma aproximadamente senoidal en el espacio.

Estos motores están formados por una o varias piezas de acero forjado. Se usan en turboalternadores accionados por motores rápidos tales como las turbinas de vapor o de gas, y se construyen de 2 y 4 polos para generar tensiones de 60 Hz.

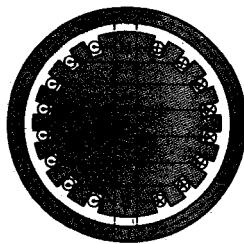


Fig. 6.6 Devanado inductor elemental de dos polos sobre rotor cilíndrico.

Los rotores de polos salientes se utilizan en equipos accionados por motores relativamente lentos, tales como las turbinas hidráulicas, por lo que para producir la misma frecuencia de 60 Hz se requiere un número de polos relativamente elevado. En la figura 6.7 se muestra , por ilustración, un rotor de dos polos salientes.



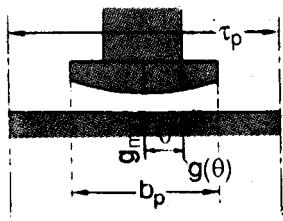
Fig. 6.7 Rotor de dos polos salientes.

El bobinado del rotor tiene un número N_p de espiras por polo y circula por el mismo una corriente continua constante de valor I_{ex} . La fuerza magnetomotriz por polo de la bobina inductora es igual a $F_p = N_p \cdot I_{ex}$. Esta f.m.m. es constante por serlo I_{ex} en condiciones permanentes.

En cambio la inducción B en cualquier punto del entrehierro dependerá de la reluctancia R correspondiente a todo el tubo respectivo (véase la figura 6.8) de área A donde se desprecia la reluctancia de los materiales ferromagnéticos del núcleo:

$$B = \frac{F_p}{R \cdot A} = \frac{F_p \cdot \mu}{g(\theta)}$$

donde $g(\theta)$ es la longitud del entrehierro la cual depende de la posición angular θ tal como se puede ver en la figura 6.8.



τ_p = paso polar

b_p = longitud cara polar

Fig. 6.8 Variación de la longitud del entrehierro.

Las máquinas síncronas de CA suelen ser de entrehierro variable, con el fin de obtener una distribución espacial de los valores de la inducción B en la periferia del inducido lo más próxima a la forma senoidal de modo que la f.e.m. generada sea también senoidal.

En la figura 6.9 se representa la distribución espacial de la densidad de flujo B en el entrehierro en función del ángulo θ . En las máquinas reales se puede conseguir que la onda de valores de la densidad de flujo B tenga una forma aproximadamente senoidal perfilando adecuadamente las expansiones polares.

Una fórmula muy usada para definir la longitud g del entrehierro en una máquina de p polos y longitud de entrehierro mínima g_{\min} es la siguiente:

$$g = \frac{g_{\min}}{\cos \frac{p}{2} \theta}$$

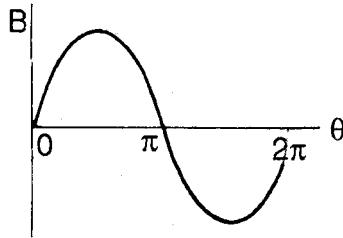


Fig. 6.9 Distribución espacial de la densidad de campo.

6.2.2 Campo magnético del estator

Todos los inducidos de las máquinas síncronas tienen el devanado distribuido, es decir, repartido sobre un número de ranuras alrededor de la periferia del entrehierro.

Las bobinas individuales se conectan entre si de modo que el campo magnético resultante tenga el mismo número de polos que el devanado inductor.

En la figura 6.10 se representa el bobinado de una fase del inducido de una máquina síncrona de dos polos por donde circula una corriente instantánea de valor $i(t)$. Se recuerda que esta corriente es alterna y, por lo tanto, variable con el tiempo.

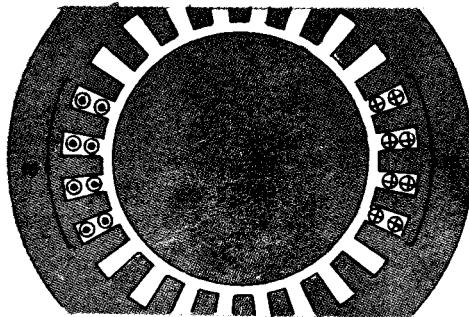


Fig. 6.10 Bobinado de una fase del inducido.

Cuando se proyecta máquinas de CA se pone especial cuidado en repartir o distribuir el devanado de tal modo, que la distribución espacial de la f.m.m. $F(\theta)$ sea lo más aproximadamente posible senoidal en cada instante.

En la figura 6.11 se representa la f.m.m. $F(\theta)$ distribuida a lo largo del devanado del estator para un instante t determinado.

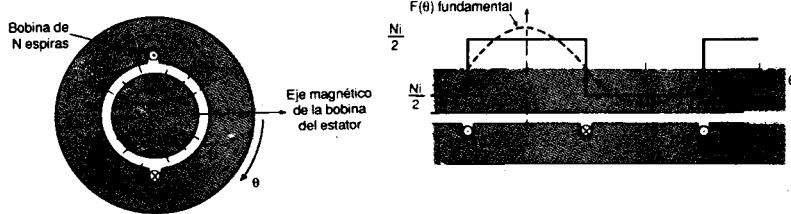


Fig. 6.11 Distribución espacial de la f.m.m. del estator por fase.

La distribución en el espacio puede expresarse por medio de la siguiente ecuación:

$$F(\theta) = F_{\max} \cos \theta$$

donde F_{\max} es proporcional a la corriente $i(t) = i_{\max} \operatorname{sen} \omega t$:

$$F_m = N \cdot i_{\max} \sin \omega t$$

De modo que la f.m.m queda expresada en función del espacio y del tiempo de la siguiente manera:

$$F(\theta, t) = F_{\max} \sin \omega t \cos \theta$$

Se observa que la f.m.m del bobinado de fase del estator tiene un valor máximo en el tiempo (el cual se encuentra siempre en el eje de la bobina) así como en el espacio.

Como se ve, los valores del campo magnético de una fase del inducido son pulsantes en cada punto del espacio del entrehierro. Algo similar sucede en los otros dos bobinados del estator con los respectivos desfasajes en el espacio y en el tiempo.

La interacción de estos tres campos pulsatorios da como resultado, afortunadamente, un campo magnético $f(\theta, t)$ de amplitud constante cuyos valores se distribuyen senoidalmente en el espacio y que parece estar girando a la velocidad de sincronismo n_s constante, por lo que se le llama también **el campo giratorio del estator**:

$$f(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$$

Cuando se trata de un generador, este campo giratorio persigue al campo del rotor o inductor. En el caso de los motores el campo giratorio haló o arrastra al campo del rotor.

En la figura 6.12 se representa la onda de valores del campo magnético resultante del estator desplazándose a la velocidad de sincronismo.

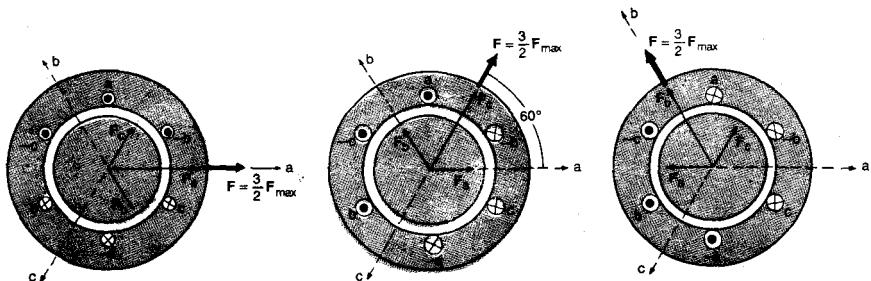


Fig. 6.12 El campo magnético giratorio del estator.

6.3 EL TORQUE ELECTROMAGNETICO

En la figura 6.13 se muestra una máquina síncrona de rotor cilíndrico para facilitar el análisis, donde se muestra los vectores representativos de los campos magnéticos del estator \mathbf{F}_e y del rotor \mathbf{F}_r , cuyas magnitudes son las amplitudes de las ondas del campo giratorio y del campo inductor respectivamente.

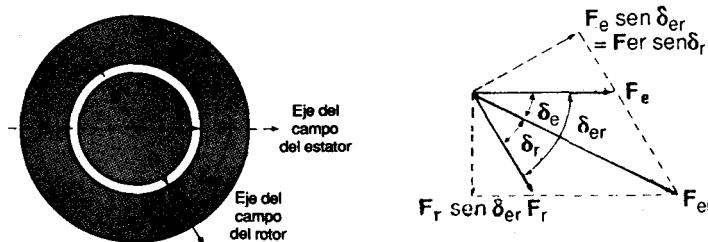


Fig. 6.13 Los campos magnéticos del estator y rotor de la máquina síncrona

En la misma figura se muestra los ángulos entre los campos del estator y del rotor y entre éstos y el campo resultante \mathbf{F}_{er} .

Se demuestra en el libro "Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas" de Fitzgerald, que el torque electromagnético de una máquina de rotor cilíndrico es proporcional a las f.m.m.s del estator y del rotor y al seno del ángulo que forman entre sí:

$$T = k \cdot F_e \cdot F_r \cdot \sin \delta_{er}$$

donde k es igual a:

$$k = \frac{p \cdot \mu \cdot \pi \cdot D \cdot 1}{4g}$$

El torque electromagnético también puede expresarse de la siguiente manera:

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{p}{2} \right)^2 \phi_{er} \cdot F_r \cdot \sin \delta_r$$

En el capítulo 6.5 se demuestra que el flujo resultante ϕ_{er} , despreciando la impedancia de dispersión del bobinado del estator, es igual a:

$$\phi_{er} = \frac{V_t}{4.44 k_w \cdot f \cdot N_{fase}}$$

Obsérvese que el flujo resultante permanece prácticamente constante aunque se varíe la carga con tal que la tensión en bornes V_t y la frecuencia f de la red permanezcan constantes.

En condiciones permanentes la f.m.m. del rotor F_r permanece constante por cuanto la corriente de excitación que la produce es constante:

$$F_r = N_p \cdot I_{ex}$$

En la figura 6.14 se muestra la curva característica de torque - ángulo δ_r para una máquina síncrona funcionando tanto como motor como generador. Se observa que el torque, en estas condiciones, depende sólo del seno del ángulo δ_r medido a partir de F_r .

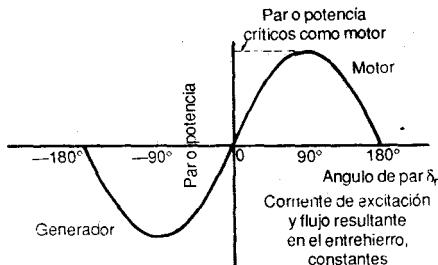


Fig. 6.14 Curva de torque - ángulo δ_r .

Se explicará el uso de esta curva haciendo funcionar la máquina síncrona como motor.

Con una ligera carga en el eje, se requiere un torque electromagnético relativamente pequeño, por lo que también será pequeño el ángulo δ_r . Véase la figura 6.15(a).

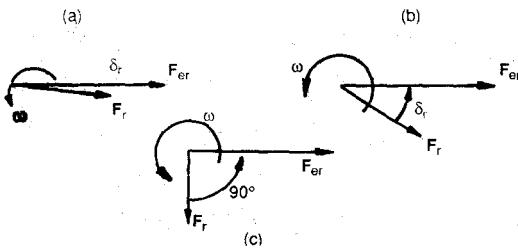


Fig. 6.15 Trabajo del motor síncrono con carga.

Al añadir carga al eje, el rotor debe retrasarse respecto al campo giratorio del estator hasta que δ_r adquiera el valor necesario para crear el nuevo par motor requerido. Véase la figura 6.15 (b).

El reajuste es un proceso dinámico que va acompañado de una disminución transitoria de la velocidad de giro del rotor y de una serie de oscilaciones mecánicas amortiguadas del mismo (rotor) alrededor de su nueva posición. Véase la figura 6.16. Este movimiento se denomina **penduleo** (oscilación pendular).

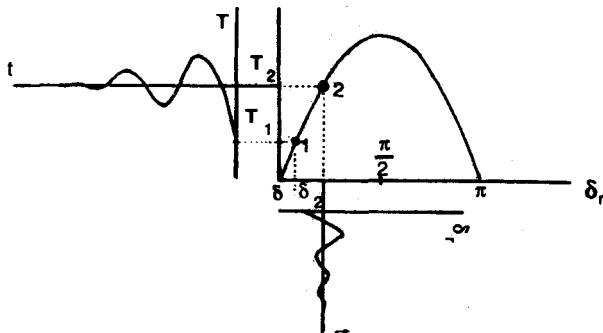


Fig. 6.16 Comportamiento transitorio de la máquina síncrona durante las variaciones de carga.

Una vez alcanzado el nuevo valor de δ_r se tiene un nuevo torque que permitirá que F_{er} , F_e y F_r giren a la misma velocidad, es decir, conjuntamente, manteniendo, así, el sincronismo.

En la práctica, puede variar, también, la densidad de flujo resultante debido a la saturación y pérdidas por dispersión del flujo.

Cuando δ_r vale 90° eléctricos (para una tensión y corriente de excitación dadas) se consigue el torque máximo posible, llamado torque motor crítico o límite. Véase la figura 6.15(c).

El torque crítico limita la sobrecarga instantánea máxima que se puede aplicar a un motor síncrono.

El valor del torque crítico se puede aumentar aumentando la corriente de excitación (y, por lo tanto, F_r) o la tensión en bornes (y, por lo tanto, ϕ_{er}). Véase la figura 6.17.

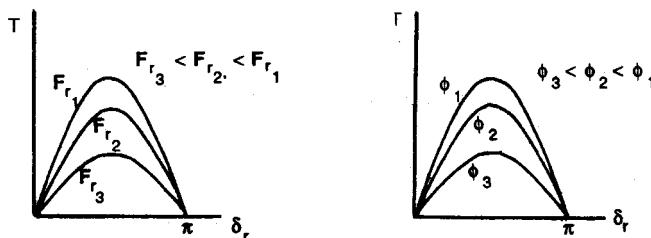


Fig. 6.17 Incremento de la capacidad de la máquina síncrona.

Si la demanda de potencia excede el punto crítico, el motor pierde velocidad debido al mayor torque requerido en el eje; desaparece, así, el sincronismo pues los campos del rotor y del estator ya no permanecen estacionarios el uno respecto al otro. Este fenómeno se conoce con el nombre de **pérdida de sincronismo**.

Si una máquina síncrona se conecta como generador a una red de CA de tensión y frecuencia constantes, suministrará energía a dicha red cuando su rotor sea movido mecánicamente de tal modo, que el campo magnético del mismo vaya adelantado respecto al campo del estator. Véase la figura 6.18.

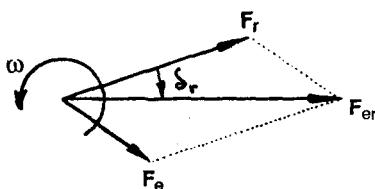


Fig. 6.18 Funcionamiento como generador.

Si el torque engendrado por la máquina motriz que arrastra el rotor fuere superior al torque crítico del generador, se perderá el sincronismo aumentando rápidamente la velocidad, por lo que se requiere en dichas máquinas un regulador de velocidad de respuesta rápida que actúe sobre el motor primo para evitar que se llegue a velocidades peligrosas.

6.4 LA F.E.M. INDUCIDA

Según la ley de Faraday, la f.e.m. inducida e en una bobina concentrada en un par de ranuras de N espiras en serie es la derivada del flujo concatenado con respecto al tiempo:

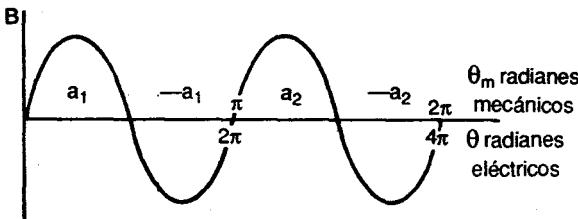
$$e = -\frac{d\lambda}{dt}$$

El signo menos ($-$) indica que, al decrecer el flujo abarcado por la bobina, se induce en ella una tensión de signo tal, que tiende a producir una corriente que se opone a la disminución del flujo abarcado.

El flujo concatenado λ , como se sabe, es el flujo ϕ de un campo magnético por el número N de espiras de la bobina que abraza. El flujo concatenado va a depender de la posición relativa del campo inductor con respecto a la bobina estatórica.

La densidad de campo inductor B se vio que se distribuye senoidalmente en el espacio según la expresión (véase también la figura 6.19):

$$B = B_{\max} \cos \theta$$



generador síncrono de 4 polos

Fig. 6.19 Distribución del campo inductor.

El flujo por polo en el entrehierro es la integral de la densidad de campo $B(\theta)$ a través del área que atraviesan las líneas de flujo, es decir, que, en una máquina de dos polos, se cumple lo siguiente:

$$\phi = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_{\max} \cos \theta \cdot 1 \cdot R \cdot d\theta = 2 \cdot 1 \cdot R \cdot B_{\max}$$

En una máquina de p polos el flujo por polo es igual a:

$$\begin{aligned}\phi &= 4 B_{\max} 1 \cdot R / p \\ &= 2 B_{\max} A / p\end{aligned}$$

donde: $A = 2 \cdot 1 \cdot R$.

Frente al polo considerado no siempre se va a tener flujo que abrace a las N espiras, en cuyo caso, el flujo concatenado con la bobina es máximo (véase la figura 6.20 (a)), sino que habrá posiciones para las cuales las líneas de flujo, en lugar de abrazar a las espiras, las atravesarán; el caso más crítico es cuando ninguna espira es abrazada por las líneas de flujo, es decir, cuando el flujo las atraviesa o las corta a todas, en cuyo caso el flujo concatenado con la bobina es cero (véase la figura 6.20 (b)).

Todo esto significa que si se toma el eje de la bobina del estator como eje de referencia, al girar el rotor (en sentido antihorario, por ejemplo) el eje magnético de la bobina inductora formará un ángulo $\alpha = \omega t$ con el eje de referencia. Véase la figura 6.20 (c).

Se observa, entonces, que el flujo concatenado dependerá del tiempo del siguiente modo:

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_{\max} \cos \alpha \\ &= \lambda_{\max} \cos \omega t \\ &= N \phi_{\max} \cos \omega t\end{aligned}$$

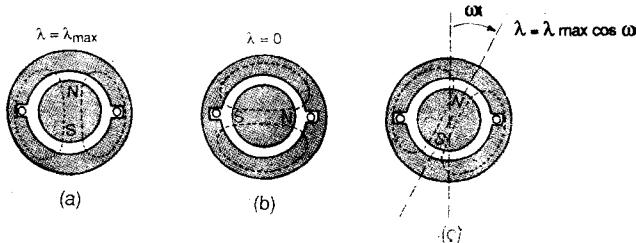


Figura 6.20 Variación del flujo concatenado.

Aplicando la expresión de la ley de Faraday al flujo concatenado se obtiene:

$$\begin{aligned}e &= -\frac{d}{dt} (N \phi_{\max} \cos \omega t) \\ &= N \left(-\frac{d}{dt} (\phi_{\max} \cos \omega t) \right) \\ &= N \left(-\phi_{\max} (-\omega \operatorname{sen} \omega t) - (\cos \omega t) \frac{d\phi_{\max}}{dt} \right) \\ &= N \left(\omega \phi_{\max} \operatorname{sen} \omega t - \frac{d\phi_{\max}}{dt} \cos \omega t \right) \\ &= \omega N \phi_{\max} \operatorname{sen} \omega t - N \frac{d\phi_{\max}}{dt} \cos \omega t\end{aligned}$$

El primer término del segundo miembro de esta ecuación es la tensión inducida debido al movimiento relativo entre la bobina y el campo; es la componente de estado permanente. El segundo término es la tensión inducida a manera de transformador, la cual existirá sólo si hay variación en la amplitud ϕ_{\max} de la onda de flujo en el entrehierro.

El flujo máximo ϕ_{\max} es constante cuando la máquina trabaja en condiciones estables normales; en este caso, la f.e.m. inducida se reduce simplemente a la debida al movimiento:

$$e = \omega N \phi_{\max} \operatorname{sen} \omega t$$

Tratándose de corrientes alternas, tiene más interés el valor eficaz de la tensión que los valores instantáneos.

Según la última ecuación, el valor máximo de la f.e.m. inducida es:

$$E_{\max} = \omega N \Phi_{\max} = 2\pi f N \Phi_{\max}$$

y, el valor eficaz:

$$E_{ef} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_{\max} = 4.44 f N \Phi_{\max}$$

siendo f la frecuencia en Hertz.

La f.e.m. inducida en una bobina concentrada pasa por un ciclo completo de valores por cada revolución de la máquina de dos polos. Su frecuencia en ciclos/segundo o en Hertz es igual a la velocidad angular del rotor en revoluciones/segundo, es decir, que la frecuencia eléctrica está sincronizada con la velocidad mecánica, razón por la cual estas máquinas se denominan **SÍNCRONAS**.

La mayor parte de las máquinas síncronas tiene más de dos polos.

En la figura 6.21 se representa una máquina síncrona elemental monofásica de 4 polos en la que las bobinas inductoras se conectan de modo que los polos sean alternativamente un norte y un sur.

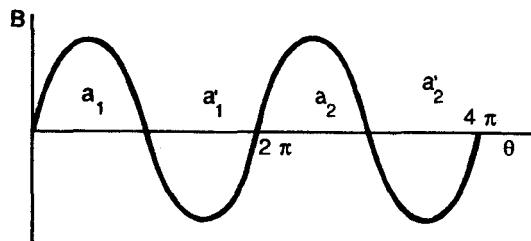
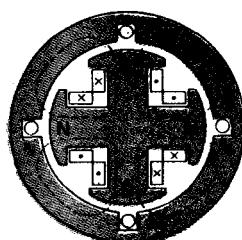


Fig. 6.21 Máquina síncrona de 4 polos.

A lo largo de la periferia, la distribución de densidad de flujo inductor abarca dos ondas o ciclos completos como puede verse en la misma figura a la derecha.

En este caso el devanado inducido consta de dos bobinas a_1 , a'_1 y a_2 , a'_2 unidas en serie por medio de sus conexiones extremas.

El espacio abarcado por cada bobina equivale a una semionda de flujo, y la tensión inducida recorre dos ciclos completos por cada revolución del rotor: la frecuencia f en Hz es el doble que la velocidad en rev/s.

Cuando en una máquina existe más de dos polos, se considera sólo dos de ellos teniendo en cuenta que las condiciones eléctricas, magnéticas y mecánicas relativas a cada uno de los restantes pares de polos no son más que una repetición de las existentes para el par considerado.

En general, el ángulo θ_e eléctrico es mayor que el ángulo θ_m mecánico en un número de $p/2$ veces:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$$

y de aquí:

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (\text{rad/s})$$

Como:

$$\omega_e = 2\pi f \quad \text{y} \quad \omega_m = \frac{2\pi n}{60}$$

donde n es la velocidad angular en rpm, entonces:

$$f = \frac{p}{2} \cdot \frac{n}{60}$$

y de aquí:

$$n = \frac{120f}{p} \quad (\text{rpm})$$

que se conoce con el nombre de velocidad de sincronismo.

Todos los generadores síncronos son trifásicos debido a las ventajas que tiene este sistema en la producción, transmisión y utilización de potencias fuertes.

Para obtener un sistema trifásico se requiere 3 bobinas desplazadas 120° magnéticos entre si, tal como se representa esquemáticamente en la figura 6.22. La figura representa una máquina trifásica elemental de 2 polos con una bobina por fase, señaladas éstas con las letras a, b y c respectivamente.

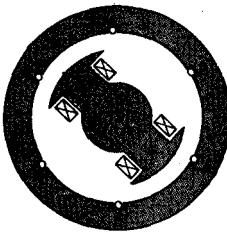


Fig. 6.22 Máquina trifásica elemental de 2 polos.

En una máquina elemental de 4 polos se requerirá, por lo menos, 2 grupos de 3 bobinas cada uno y, en general, una máquina de p polos requerirá $p/2$ grupos.

En la figura 6.23 se representa una máquina trifásica elemental de 4 polos.

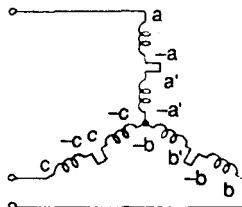
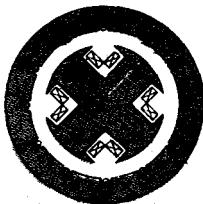


Fig. 6.23 Máquina elemental de 4 polos.

Las dos bobinas correspondientes a cada fase de esta figura se conectan en serie de forma que se sumen sus respectivas tensiones, y las tres fases así formadas pueden conectarse entre si en estrella o en triángulo. La figura de la derecha corresponde a la conexión estrella de los devanados.

6.5 FACTORES DE DISTRIBUCION Y DE PASO

En el subcapítulo anterior se encontró que la f.e.m. eficaz por fase es igual a:

$$E_{ef} = 4.44 f N \Phi_{max}$$

donde N es el número total de espiras en serie por fase.

Todos estos devanados elementales son concentrados y abarcan un paso polar, ya que los dos lados de cualquier bobina están separados 180° magnéticos, y todas sus espiras están concentradas en un par de ranuras.

En la práctica, las bobinas del devanado inducido correspondientes a cada fase se distribuyen en un cierto número de ranuras, como se ve en la figura 6.24.

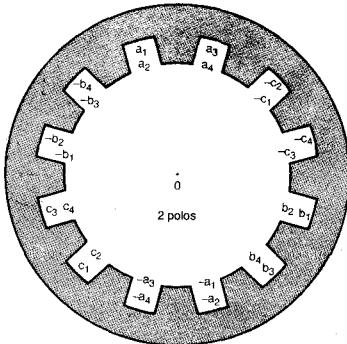


Fig. 6.24 Distribución del bobinado de una máquina síncrona trifásica.

Un devanado distribuido aprovecha más el hierro y el cobre y mejora la forma de onda.

En los devanados distribuidos es preciso aplicar un factor de corrección k_b ya que las f.e.m.s. inducidas en cada una de las bobinas que forman un grupo de fase están algo desfasadas entre si.

Al conectarlas en serie, su suma vectorial es menor que la suma aritmética:

$$0.85 < k_b < 0.95$$

para un devanado trifásico.

Tratándose de devanados distribuidos, la f.c.m. eficaz inducida por fase se convierte en:

$$E_{cf} = 4.44 \cdot f \cdot k_b \cdot N \cdot \Phi_{max}$$

Sin embargo, las ondas de f.e.m. y de campo inducidos de los devanados distribuidos de paso diametral o polar de 180° tienen el inconveniente de presentar armónicos aparte de producir longitudes grandes de las cabezas de bobina.

Estos dos inconvenientes se superan acortando el paso de las bobinas a un ángulo menor que 180° a costa de una mayor reducción en el valor de la f.e.m. inducida. Para obtener el valor final de la f.c.m. inducida se utiliza otro factor adicional, el factor de paso k_p .

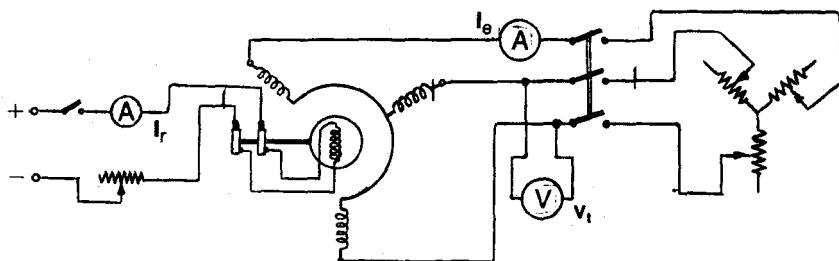
Estos dos efectos pueden englobarse en un factor de bobinado $k_w = k_b \cdot k_p$, de modo que la f.e.m. puede expresarse del siguiente modo:

$$E = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max}$$

Capítulo 7

LA MAQUINA SINCRONA EN REGIMEN ESTABLE

- 7.1 La máquina de rotor cilíndrico
- 7.2 Circuito equivalente
- 7.3 Reactancia sincrona
- 7.4 La regulación
- 7.5 Características internas: curvas de vacío y de cortocircuito
- 7.6 Las reactancias sincronas no saturada y saturada
- 7.7 Ecuación potencia-ángulo
- 7.8 La máquina de polos salientes
 - Reactancias de ejes directo y cuadratura
 - Ecuación potencia-ángulo
- 7.9 Potencia, pérdidas y eficiencia
- 7.10 Curvas de características exteriores, de carga y de regulación
- 7.11 El motor síncrono. Mejora del factor de potencia
- 7.12 Generadores en paralelo
- 7.13 Datos de placa



LA MAQUINA SINCRONA EN REGIMEN ESTABLE

7.1 LA MAQUINA DE ROTOR CILINDRICO

El entrehierro de la máquina sincrona de rotor cilíndrico es constante. Esto simplifica bastante su análisis por cuanto el circuito magnético será el mismo tanto en el eje directo (eje principal) como en el eje en cuadratura (eje neutro).

En la figura 7.1 se muestra el esquema eléctrico simple correspondiente a una máquina sincrona de rotor cilíndrico con el bobinado del estator conectado en estrella, por ejemplo, el de un generador conectado a una carga trifásica balanceada.

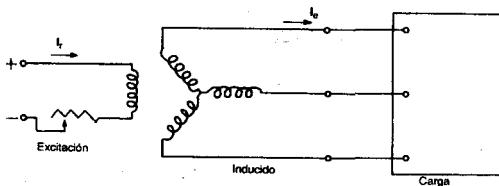


Fig. 7.1 Generador trifásico conectado a una carga

Las tres corrientes distribuidas simétricamente en el tiempo y circulando por las tres bobinas distribuidas simétricamente en el espacio dan lugar a la aparición de un campo magnético giratorio que se distribuye senoidalmente en la periferia. Este campo es de amplitud constante y velocidad también constante e igual a la velocidad de sincronismo.

En la figura 7.2 se representa el diagrama de vectores de campo de un generador donde se cumple:

$$\overline{F}_{er} = \overline{F}_e + \overline{F}_r$$

Estos tres diagramas son proporcionales debido a que el entrehierro es constante:

$$\phi = \frac{F}{R} = \left(\frac{1}{R} \right) F \quad \text{y} \quad \lambda = N \phi$$

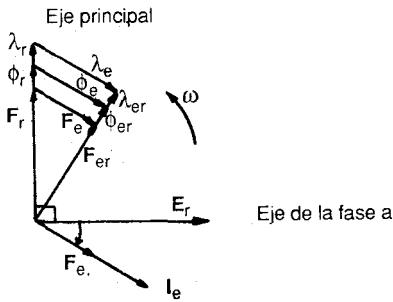


Fig. 7.2 Diagramas vectoriales de las f.m.m.s., flujos y flujos concatenados del estator, rotor y resultante.

Al mismo tiempo, los flujos concatenados con la armadura λ_e , λ_r y λ_{er} dan lugar a las f.e.m.s. E_e , E_r y E_{er} respectivamente cuyos fasores aparecen atrasados 90° de los flujos concatenados respectivos tal como se muestra en la figura 7.3.

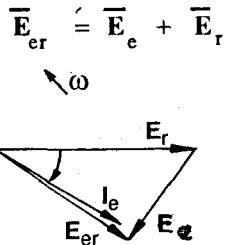


Fig. 7.3 Diagrama fasorial de f.e.m.s. en un generador.

7.2 CIRCUITO EQUIVALENTE

El diagrama fasorial de las f.e.m.s. inducidas en la armadura es equivalente al de la figura 7.4, donde se muestra también el diagrama circuitual equivalente donde se considera que en el componente serie del circuito se produce una caída de tensión igual a ($-E_e$).

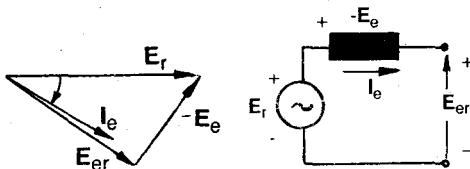


Fig. 7.4 Diagramas fasorial y circuitual equivalentes de las f.e.m.s. inducidas.

Partiendo del circuito equivalente de la figura 7.4, se cumple:

$$\overline{E}_r = \overline{E}_{er} + (-\overline{E}_e)$$

Como la corriente de armadura I_e está en fase con el flujo concatenado λ_e , la f.e.m. E_e está a 90° de I_e .

En el diagrama fasorial de la figura 7.4 se ve que la corriente de armadura I_e atrasa 90° a la tensión $-E_e$, lo cual se cumple en elementos inductivos por lo que dicho elemento en serie se considera como una reactancia que se conoce con el nombre de reactancia magnetizante o reactancia de reacción de armadura X_m . Véase la figura 7.5.

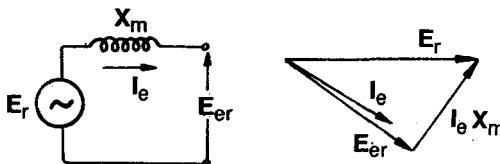


Fig. 7.5 Diagramas circuitual y fasorial equivalentes del generador.

Aquí se cumple lo siguiente:

$$\begin{aligned}\overline{E}_r &= \overline{E}_{er} + \overline{I}_e \times \overline{X}_m \\ &= \overline{E}_{er} + \overline{I}_e (X_m | 90^\circ)\end{aligned}$$

7.3 REACTANCIA SINCRONA

Aunque las configuraciones de los embobinados y de los circuitos magnéticos en máquinas rotativas son más complejos que aquéllos en transformadores convencionales, la naturaleza de los flujos de dispersión en ambos es similar.

La reactancia de dispersión en una máquina de rotor cilíndrico varía entre 0.09 y 0.2 veces la reactancia magnetizante y es prácticamente constante por cuanto su circuito magnético es de aire.

El flujo de dispersión equivalente Φ_d y el flujo Φ_e de la reacción de armadura están en fase con la corriente en una fase dada del embobinado de armadura.

La inductancia magnetizante L_m y la inductancia de dispersión L_d pueden, por lo tanto, ser sumadas, como también las respectivas reactancias X_m y X_d para dar lugar a la reactancia sincrona X_s :

$$\begin{aligned}L_s &= L_m + L_d \\ \omega L_s &= \omega L_m + \omega L_d \\ X_s &= X_m + X_d\end{aligned}$$

La reactancia magnetizante depende de la reluctancia R del circuito magnético compuesto por el rotor, el estator y el entrehierro ($L = N^2/R$). Debido al entrehierro esta ~~reluctancia~~^{resistencia} es relativamente alta y se mantiene constante mientras no se sature el circuito magnético, por lo que la reactancia síncrona no saturada X_s (NS) es prácticamente constante.

Cuando el circuito magnético se satura, la reluctancia aumenta por lo que la reactancia síncrona disminuye de valor conforme aumenta la saturación. Entonces, recibe el nombre de reactancia síncrona saturada X_s (S) y es variable.

Por su parte, cada fase de la máquina presenta una resistencia interna capaz de medirse con un ohmímetro y que se denomina resistencia de armadura r_a , cuyo valor es bastante pequeño y que en máquinas grandes es despreciable comparado con X_d . Esta resistencia produce pérdida de potencia y caída de tensión cuando circula la corriente de armadura.

7.4 LA REGULACION

Si la resistencia de armadura r_a y la reactancia de dispersión X_d fueran cero, entonces, la f.e.m. resultante E_{er} sería igual a la tensión en bornes V_t . Sin embargo, ya que éste no es el caso, véase la figura 7.6:

$$\overline{E}_{er} = \overline{V}_t + \overline{I}_e (r_a + j X_d)$$

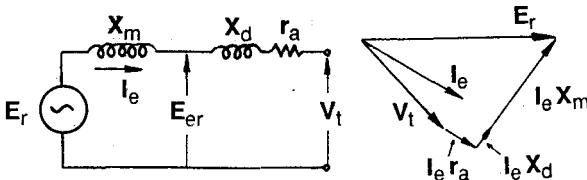


Fig. 7.6 Circuito equivalente completo.

Igual que en el caso de un transformador o de un generador de corriente continua, se define la **regulación de tensión** de un generador síncrono a una carga determinada, como:

$$\text{Reg}(\%) = \frac{V_o - V_t}{V_t} \times 100$$

donde:

V_t , tensión terminal por fase con carga,

V_o , tensión terminal por fase en vacío.

Conociendo X_s (para un generador de rotor cilíndrico) y V_t se puede encontrar E_r igual a V_o y, en consecuencia, determinar la regulación de tensión.

A diferencia de lo que ocurre con un generador de corriente continua, la re-

gulación de tensión de un generador síncrono puede llegar a ser negativa, dependiendo del factor de potencia y de la carga.

En la figura 7.7 se muestra el diagrama fasorial para factores de potencia en adelanto y en atraso.

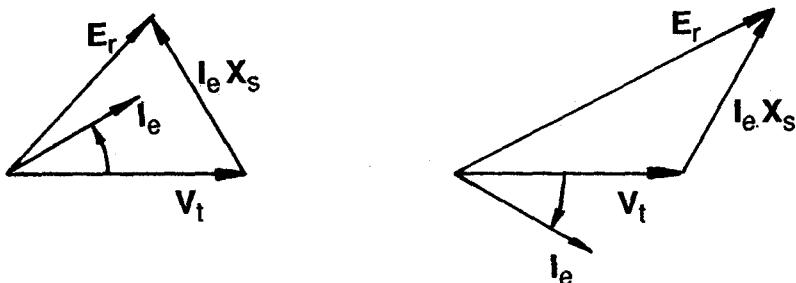


Fig. 7.7 Diagrama fasorial de un generador síncrono.

7.5 CARACTERISTICAS INTERNAS: CURVA DE VACIO Y DE CORTOCIRCUITO

Las pruebas se llevan a cabo principalmente por dos razones. La primera es para demostrar que las especificaciones del contrato se han llenado; y la segunda, para obtener los parámetros pertinentes para la evaluación del comportamiento. Cuando se prueba para llenar las especificaciones, se deberá seguir procedimientos normalizados, por ejemplo, los aprobados por la IEEE, y modificados por el contrato. Las pruebas, como se describe, son para obtener los parámetros necesarios en la evaluación del comportamiento.

Sometiendo la máquina a las pruebas de circuito abierto o vacío y de cortocircuito se obtienen las respectivas curvas, las cuales permitirán determinar, entre otras cosas, la reactancia síncrona saturada aproximada y la no saturada.

La reactancia síncrona no saturada es constante debido a que la reluctancia del hierro no saturada es despreciable.

7.5.1 Característica de vacío

Puesto que el circuito magnético en una máquina síncrona contiene materiales ferromagnéticos, la primera prueba es para determinar la característica en vacío o de circuito abierto (llamada también de excitación o de magnetización de la máquina).

El circuito equivalente monofásico de un generador síncrono trifásico para las condiciones de vacío se muestra en la figura 7.8. La ausencia de carga en los bornes del generador hace que la corriente de armadura I_a sea igual a cero.

Para obtener la característica de vacío, la máquina se hace girar sin carga a la velocidad de sincronismo por medio de un motor primo.

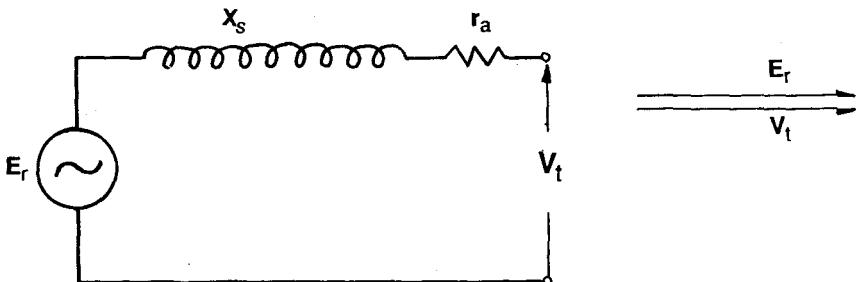


Fig. 7.8 Generador sincrónico en vacío.

Se toma lecturas de tensión en los bornes de la armadura para diversos valores de la corriente de excitación o de campo. La curva resultante se muestra en la figura 7.9, en la que se precise graficar usando los valores de la tensión en bornes del equivalente monofásico.

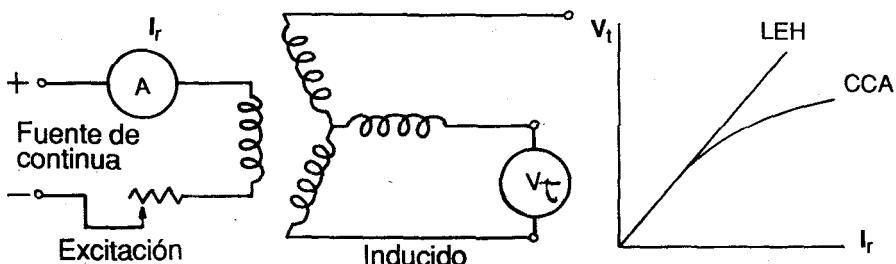


Fig. 7.9 Característica de vacío.

Si se registra la potencia mecánica de entrada se obtienen las pérdidas rotacionales en vacío. Estas son las pérdidas por fricción mecánica y por ventilación, que son constantes, y las pérdidas en el núcleo, de circuito abierto, que son proporcionales al flujo y, por tanto, a la tensión inducida.

Si la saturación no ocurriera en las partes del acero, la característica de vacío sería una línea recta denominada la línea de entrehierro LEH, puesto que queda determinada primordialmente por el entrehierro.

Se supone que la curva CCA de circuito abierto es la curva de magnetización bajo las condiciones de saturación.

→ Esta curva proporciona información de saturación que puede usarse para obtener los valores correctos de las reactancias afectadas por la saturación.

Esto se puede lograr por medio de un factor de saturación k que es la relación entre la corriente de campo requerida para una determinada tensión en la CCA y la corriente de campo que se requiere para la misma tensión en la LEH. Véase la figura 7.10. El uso del factor k se presentará después de que se haya explicado la prueba de cortocircuito.

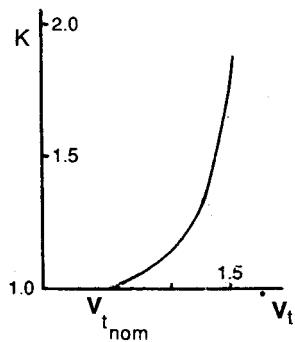


Fig. 7.10 El factor de saturación k.

7.5.2 Característica de cortocircuito

La prueba de cortocircuito, como su nombre lo indica, se lleva a cabo cortocircuitando los tres terminales del bobinado de la armadura tal como se ve en la figura 7.11. Durante el ensayo se miden la corriente de armadura I_e y la corriente de excitación I_r , mientras que la velocidad del generador se mantiene prácticamente constante.

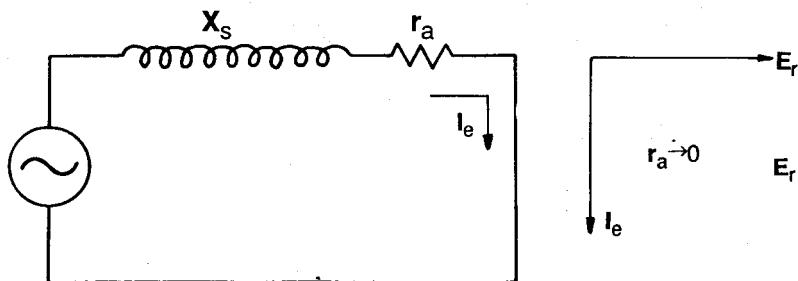


Fig. 7.11 Ensayo de cortocircuito del generador.

En la figura 7.12 se presenta la gráfica de la característica de cortocircuito CCC con la corriente de armadura I_e en función de la corriente de excitación I_r . Es interesante observar que esta gráfica es una línea recta. Esto se debe al

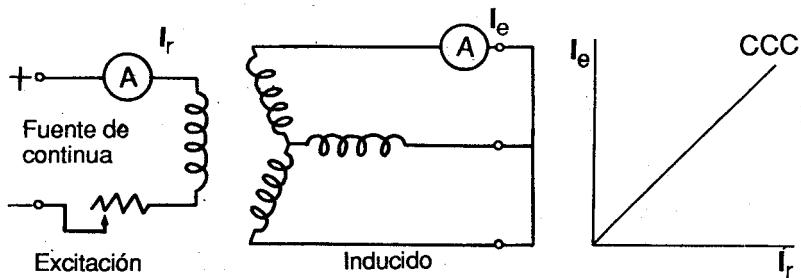


Fig. 7.12 Característica de cortocircuito.

efecto de la reacción de armadura el cual da lugar a un flujo resultante muy pequeño tal como puede observarse en el diagrama vectorial de la figura 7.13. Esto trae como consecuencia que la máquina no se sature y que su comportamiento sea lineal.

Durante la ejecución de la prueba de cortocircuito, el circuito equivalente de la figura 7.11 se aplica para V_t igual a cero. Esto indica explícitamente que la f.e.m. E_r debida al campo inductor debe ser igual a la caída de tensión en la impedancia sincrона Z_s :

$$\bar{E}_r = \bar{I}_e (r_a + j X_s)$$

El valor de la corriente de cortocircuito I_c se mide durante la prueba, mientras que el valor de E_r se puede determinar de la CCA para la correspondiente corriente de excitación I_r .

Durante la prueba de cortocircuito, la corriente de armadura I_e se atrasa de la f.e.m. E_r por un ángulo de cerca de 90° eléctricos como resultado de que X_s es mucho mayor que r_a .

En la figura 7.13 se observa la posición relativa de los vectores de campo y de los fasores de f.e.m. cuando el generador trabaja cortocircuitado.

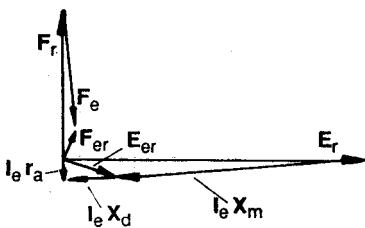


Fig. 7.13 Diagrama vectorial de campos y f.e.m.s.

Como se puede ver en el diagrama, el campo del rotor F_r es mucho menor que el campo del estator F_e y, en general, es aproximadamente el 15% de éste.

7.6 LAS REACTANCIAS SÍNCRONAS NO SATURADA Y SATURADA

Las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto permiten determinar las reactancias síncronas no saturada y saturada de la máquina.

Para esto se grafica las dos curvas CCA y CCC en un mismo plano cartesiano tal como se ve en la figura 7.14, en el que se ha tomado como abscisas la corriente de excitación I_r y como ordenadas, la tensión de circuito abierto V_t y la corriente de cortocircuito I_c , respectivamente.

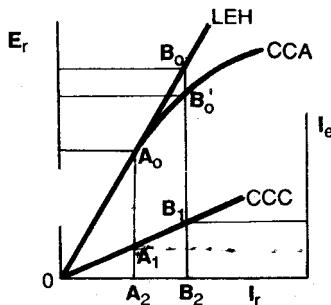


Fig. 7.14 Características de circuito abierto y de cortocircuito.

En cortocircuito, si se desprecia la resistencia de armadura r_a , la máquina puede representarse como se muestra en la figura 7.15.

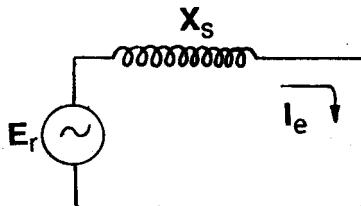


Fig. 7.15 Diagrama circuitual equivalente del generador cortocircuitado.

Se puede escribir, entonces, que la reactancia síncrona X_s , para una determinada corriente de excitación I_r , es igual a:

$$X_s = \frac{E_r (\text{CCA})}{I_e (\text{CCC})} \quad (7.1)$$

Entonces, el gráfico de la figura 7.14 proporciona los valores de E_r y de I_e , y bastará con aplicar la Ec. (7.1) para determinar la reactancia síncrona.

En el tramo recto de la CCA, desde 0 hasta A_0 , se obtendrá siempre el mismo valor para X_s , ya que ambas curvas son rectas en ese tramo.

La reactancia, así determinada, se denomina reactancia síncrona no saturada X_s (NS) y corresponde al funcionamiento de la máquina en régimen no saturado:

$$X_s (\text{NS}) = \frac{A_0 - A_2}{A_1 - A_2} = \frac{B_0 - B_2}{B_1 - B_2} \quad (7.2)$$

A partir del punto A_0 , la reactancia síncrona empieza a variar y tendrá un valor diferente en cada punto de la curva CCA. A este valor se le denomina el de la reactancia síncrona saturada X_s (S). Se acostumbra dar este valor para la tensión nominal del generador.

Así, por ejemplo, si el punto B'_o corresponde a la tensión nominal, la reactancia síncrona se determinaría del siguiente modo:

$$X_s(S) = \frac{B'_o - B_2}{B_1 - B_2} = \frac{V_t(n)}{B_1 - B_2} \quad (7.3)$$

Comparando las ecuaciones (7.2) y (7.3) se puede ver que la reactancia síncrona no saturada $X_s(N)$ es mayor que la saturada $X_s(S)$. En la figura 7.16 se ha graficado la curva de la reactancia síncrona X_s en función de la corriente de excitación I_r .

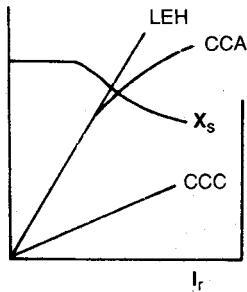


Fig. 7.16 Gráfica de la reactancia síncrona.

Este procedimiento hace lineal la CCA de la máquina a través del punto B'_o y los cálculos se efectúan como si ésta fuera la característica real de circuito abierto CCA. Esta nueva recta recibe el nombre de CCA linearizada y se usa para determinar la corriente de excitación requerida I_r para la condición de carga dada (V_t , I_e , f.p.). Véase la figura 7.17.

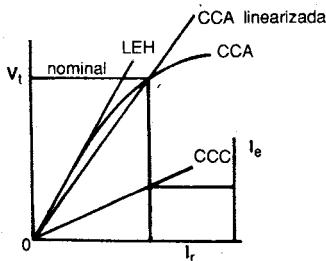


Fig. 7.17 Uso de la CCA linearizada.

La tensión terminal V_t sin carga, igual a la f.e.m. E_r , se determina posteriormente en la característica real de circuito abierto CCA para el mismo valor de la corriente de excitación I_r .

En la solución de problemas relacionados con la operación de los generadores síncronos trifásicos se toma como una primera aproximación del valor de la reactancia síncrona el de la X_s (NS) lo cual da resultados poco satisfactorios pues equivale a suponer que la CCA es la LEH, lo cual no es cierto.

En condiciones normales de operación, la máquina síncrona opera en condiciones de saturación y el uso de la X_s (NS) no es válido.

Como una segunda aproximación, se utiliza el método de la CCA linearizada, el cual, si se aplica con cuidado, da resultados de exactitud razonable.

Cuando se requiere una mayor exactitud que la que se obtiene por los métodos anteriores, el método siguiente, que usa el factor de saturación k y que se ilustra en la figura 7.18, da resultados satisfactorios:

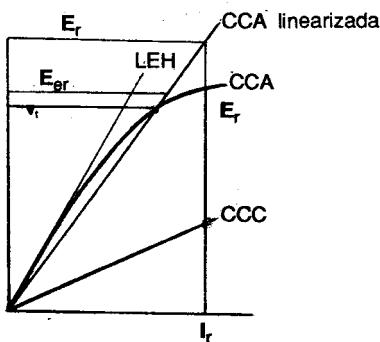


Fig. 7.18 Método del factor de saturación.

La reactancia síncrona X_s consta de dos componentes. Uno es la reactancia magnetizante de la reacción de la armadura X_m y el otro es la reactancia de dispersión X_d .

El flujo de dispersión tiene trayectorias en aire de longitud suficiente como para que la inductancia de dispersión sea independiente virtualmente de cualquier efecto de saturación.

La técnica de linearización usada en el segundo método, cambia implícitamente el valor de las reactancias de dispersión.

El factor de saturación k no debe aplicarse a la reactancia de dispersión, puesto que el flujo de la reacción de armadura se establece a través de la serie total del circuito magnético.

El valor de la X_s (NS) se puede encontrar por la expresión:

$$X_s \text{ (NS)} = \frac{E_r \text{ (LEH)}}{I_e \text{ (CCC)}}$$

Suponiendo, por ahora, que el valor de la reactancia de dispersión X_d es conocido, el valor de la reactancia magnetizante en condiciones de no saturación X_m (NS) se puede determinar:

$$X_m \text{ (NS)} = X_s \text{ (NS)} - X_d$$

La magnitud del factor de saturación k se determina para el valor de la f.e.m. resultante E_{cr} .

El valor de la reactancia magnetizante en condiciones de saturación $X_m(S)$ se determina por la expresión:

$$X_m(S) = \frac{X_m \text{ (NS)}}{k}$$

El valor de la $X_s(S)$ es, por tanto, la suma de X_m y X_d :

$$X_s(S) = X_m(S) + X_d$$

Este método, aunque relativamente sencillo, también da resultados satisfactorios cuando se aplica a la máquina síncrona de polos salientes.

7.7 ECUACION POTENCIA-ANGULO

Supóngase que una máquina síncrona está conectada a una red de **potencia infinita**, es decir, una red cuya tensión y frecuencia permanecen invariables sea cual fuere la carga conectada. Véase la figura 7.19.

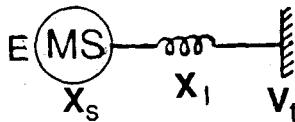


Fig. 7.19 Generador síncrono en una red de potencia infinita.

Despreciando la resistencia de armadura r_a y suponiendo que la línea de conexión tiene una reactancia X_1 , el circuito equivalente será el que se muestra en la figura 7.20

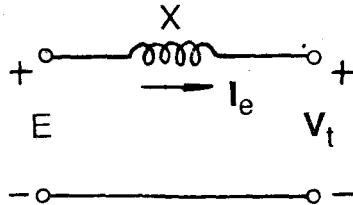


Fig. 7.20 Circuito equivalente simplificado.

Remplazando las reactancias X_1 y X_s por una sola reactancia X y suponiendo que la corriente I_e que entrega la máquina está atrasada un ángulo ϕ con respecto a V_t , o sea, que la máquina funciona como generador con f.p. inductivo, se puede construir el diagrama fasorial de la figura 7.21.

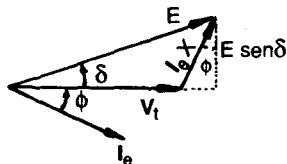


Fig. 7.21 Diagrama fasorial.

La potencia activa P trifásica es igual a:

$$P = 3 V_t \cdot I_e \cdot \cos \phi$$

Pero, de la figura 7.21, se deduce que:

$$E \cdot \sin \delta = X \cdot I_e \cdot \cos \phi$$

Por lo tanto:

$$\frac{E \cdot \sin \delta}{X \cdot \cos \phi} = I_e$$

Luego, remplazando el valor de I_e en la expresión de P , se tiene:

$$P = \frac{3 V_t \cdot E}{X} \sin \delta$$

Esta ecuación se llama **ecuación potencia-ángulo** de la máquina e indica que la potencia P depende del ángulo de potencia. Véase la figura 7.22.

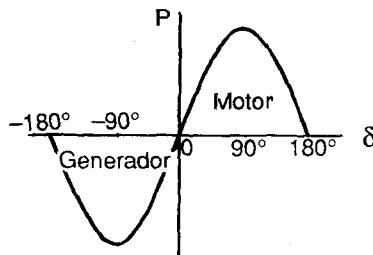


Fig. 7.22 Curva $P - \delta$ de una máquina síncrona.

Para la potencia reactiva Q también se puede encontrar una expresión interesante.

La potencia reactiva Q trifásica es igual a:

$$Q = 3 V_t \cdot I_e \cdot \sin \phi$$

De la figura 7.21 se deduce que:

$$E \cos \delta = V_t + X \cdot I_e \cdot \sin \phi$$

Despejando I_e en esta última expresión, se obtiene:

$$I_e = \frac{E \cos \delta - V_t}{X \sin \phi}$$

Reemplazando el valor de I_e en la expresión de Q se obtiene:

$$Q = \frac{V_t \cdot E \cdot \cos \delta - V_t^2}{X}$$

7.8 LA MAQUINA DE POLOS SALIENTES

El flujo engendrado por la onda de f.m.m. en una máquina de entrehierro uniforme (o de rotor cilíndrico) es independiente de la posición espacial de la onda respecto al campo inductor.

Pero, en las máquinas de polos salientes existe una dirección de magnetización preferente determinada por las expansiones polares.

La reluctancia es apreciablemente menor en el sentido del eje directo (o polar o principal) que en el del eje en cuadratura (o neutro).

En la figura 7.23 puede verse los flujos longitudinal y transversal en el entrehierro de una máquina síncrona.

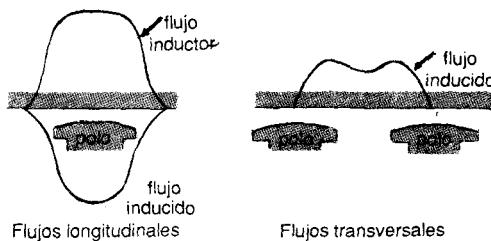


Fig. 7.23 Flujos longitudinal y transversal.

Para estudiar el efecto de los polos salientes se puede descomponer la corriente inducida I_e en dos componentes, una de ellas en cuadratura con la f.e.m. E_r y la otra en fase con la misma, tal como se representa en el diagra-

ma fasorial de la figura 7.24, que corresponde a un generador síncrono de polos salientes, no saturado, trabajando con f.p. en retraso.

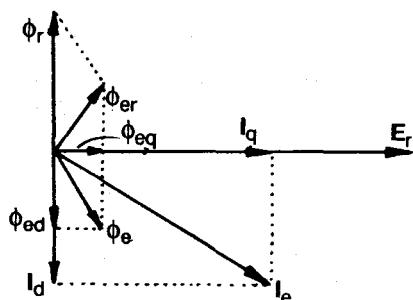


Fig. 7.24 Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes.

7.8.1 Reactancias de ejes directo y cuadratura

Cada una de las componentes I_d e I_q de la intensidad lleva aparejada una componente de la caída de tensión en la reactancia síncrona, de valor $jI_d \cdot x_d$ y $jI_q \cdot x_q$ respectivamente.

Las reactancias x_d y x_q son las reactancias síncronas directa o longitudinal y en cuadratura o transversal.

Como se puede ver en el diagrama fasorial de un generador en la figura 7.25, la f.e.m. E_f inducida por el campo de excitación es igual a la suma fasorial de la tensión en bornes V_t más la caída de tensión en la resistencia del devanado del inducido $I_e \cdot r_a$, más las componentes de la caída de tensión en la reactancia síncrona $jI_d \cdot x_d + jI_q \cdot x_q$.

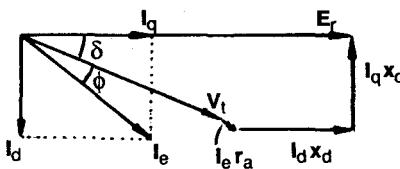
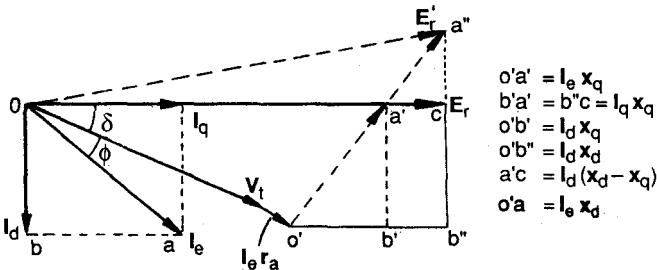


Fig. 7.25 Diagrama fasorial de un generador síncrono.

La reactancia x_q es menor que la x_d debido a la mayor reluctancia del entrehierro en la dirección del eje transversal: corrientemente, x_q está comprendido entre 0.6 y 0.7 x_d .

En la figura 7.26 se repite, con trazo lleno, el diagrama fasorial de la figura 7.25.



$$\begin{aligned} o'a' &= I_e x_q \\ b'a' &= b''c = I_q x_q \\ o'b' &= I_d x_q \\ o'b'' &= I_d x_d \\ a'c &= I_d(x_d - x_q) \\ o'a &= I_e x_d \end{aligned}$$

Fig. 7.26 Relaciones entre las componentes de tensión en el diagrama fasorial.

Se observa que:

$$\begin{aligned} \bar{E}' &= \bar{V}_t + \bar{I}_e \cdot \bar{x}_q \\ E_r &= E' + I_d (x_d - x_q) \end{aligned}$$

7.8.2 Ecuación potencia-ángulo

En la figura 7.26a se representa el esquema simple formado por una máquina síncrona de polos salientes conectada a una red de potencia infinita de tensión E_1 a través de una impedancia en serie de reactancia por fase igual a x_1 (se despreciará la resistencia por ser normalmente muy pequeña).

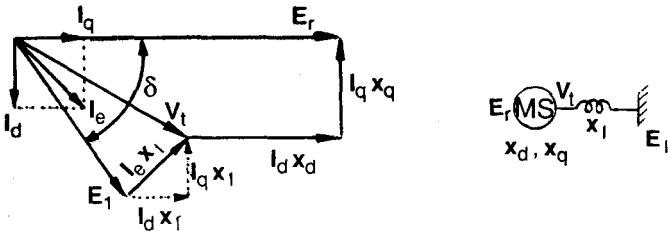


Fig. 7.26a Máquina síncrona de polos salientes e impedancia en serie.

Se considera que la máquina síncrona actúa de generador y el diagrama fasorial será el dibujado a la derecha en la figura 7.26a.

El efecto de la impedancia exterior es simplemente el de añadir su valor a las reactancias de la máquina, es decir, el valor total de la reactancia interpuso entre la tensión E_r inducida por el campo inductor y la tensión E_1 en la red es:

$$X_d = x_d + x_1$$

$$X_q = x_q + x_1$$

Si la tensión E_1 de la red se descompone en las dos componentes $E_1 \cdot \operatorname{sen} \delta$ y $E_1 \cdot \cos \delta$ en fase con I_d y con I_q respectivamente, la potencia P suministrada a la red será:

$$P = I_d \cdot E_1 \cdot \operatorname{sen} \delta + I_q \cdot E_1 \cdot \cos \delta$$

De la figura 7.26a se tiene también que:

$$I_d = \frac{E_r - E_1 \cos \delta}{X_d}$$

$$I_q = \frac{E_1 \operatorname{sen} \delta}{X_q}$$

Sustituyendo estas dos últimas ecuaciones en la ecuación anterior de P se tiene:

$$P = \frac{E_r \cdot E_1}{X_d} \operatorname{sen} \delta + E_1^2 \cdot \frac{X_d - X_q}{2 X_d \cdot X_q} \operatorname{sen} 2 \delta$$

En la figura 7.26b se representa la curva característica de potencia-ángulo.

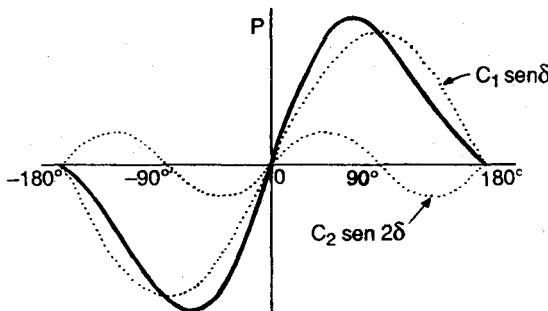


Fig. 7.26b Característica potencia-ángulo de una máquina síncrona de polos salientes.

En la figura 7.26b se muestra la componente fundamental debida al campo inductor y la segunda armónica debida al par de reluctancia.

El primer término es igual a lo obtenido para una máquina de rotor cilíndrico.

El segundo término es el que introduce el efecto de los polos salientes, y

representa el hecho de que la onda de flujo en el entrehierro crea un par (llamado par de reluctancia) que tiende a alinear los polos inductores en la posición de mínima reluctancia.

Obsérvese que el par de reluctancia es independiente del campo de excitación.

7.9 POTENCIA, PERDIDAS Y EFICIENCIA

La potencia mecánica entregada por el motor primo al eje del generador se convertirá finalmente en la potencia activa o potencia útil que el generador entregará a la red eléctrica trifásica.

Sin embargo, esta conversión no es ideal sino que se realiza a costa de una serie de pérdidas de potencia P_{perd} .

Todas las pérdidas que surgen en una máquina síncrona se pueden dividir en dos grupos:

a) Las pérdidas principales o pérdidas que surgen como resultado de los procesos electromagnéticos y mecánicos que ocurren en la máquina durante su funcionamiento.

A estas pérdidas pertenecen:

- las pérdidas en el cobre del devanado del estator
- las pérdidas en el cobre del devanado de excitación
- las pérdidas en el hierro activo del estator
- las pérdidas por rozamiento en los cojinetes y entre las escobillas y los anillos deslizantes
- las pérdidas por ventilación

b) Las pérdidas adicionales o pérdidas que surgen como resultado de los procesos secundarios de carácter electromagnético, algunas de las cuales se presentan en vacío y otras, en carga.

Las pérdidas adicionales son provocadas por los flujos de dispersión del estator, por los armónicos superiores de la f.m.m. del estator y del rotor, y por los dientes del estator y del rotor.

El rendimiento de un generador síncrono se determina como la relación entre la potencia útil P o potencia activa entregada por el generador a la red y la potencia mecánica P_{mec} recibida por el generador de parte del motor primo:

$$\eta = \frac{P}{P_{mec}} = \frac{P}{P + P_{perd}}$$

El rendimiento de los turboalternadores es aproximadamente igual que el de los alternadores hidráulicos.

El rendimiento de estos varía entre 0.92 y 0.98 a plena carga y con un f.p. de 0.8, por ejemplo.

7.10 CURVAS CARACTERISTICAS

Las propiedades de los generadores se analizan con ayuda de las características que establecen la dependencia entre las magnitudes principales que determinan el funcionamiento del generador.

Tales magnitudes son:

- la tensión en los terminales del generador V_t ,
- la corriente de excitación I_r ,
- la corriente de armadura I_e , y
- la velocidad de rotación ω .

Puesto que los generadores síncronos funcionan con velocidad de rotación constante, el grupo fundamental de características se obtiene para ω constante.

De las otras tres magnitudes, la que mayor importancia tiene es la tensión V_t , por cuanto determina las cualidades del generador respecto a la red para la cual éste funciona.

En la figura 7.27 puede verse un esquema para ensayar un generador síncrono.

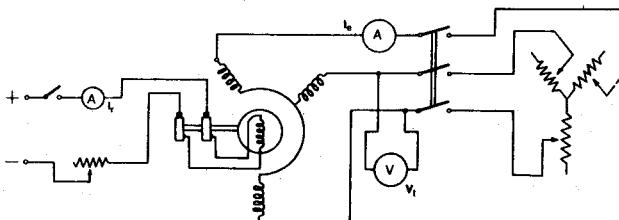


Fig. 7.27 Ensayo del generador síncrono.

Las características principales son:

1. La curva de carga $V_t - I_r$, para I_e constante y $\cos \phi$ constante. Véase la figura 7.28.

En el caso particular, cuando $I_e = 0$, la curva de carga pasa a ser la curva de vacío, que tiene gran importancia en la evaluación del generador.

Las características en carga para $\cos \phi = 0.8$ inductivo y $\cos \phi = 1$ pasan por encima de las características para $\cos \phi = 0$ y no son paralelas con respecto a la característica en vacío.

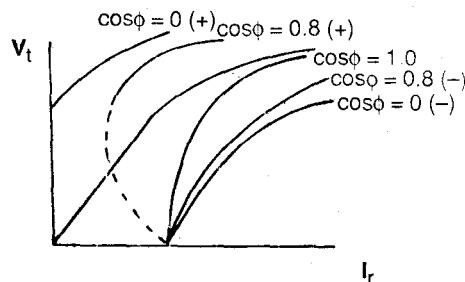


Fig. 7.28 Características en carga de un generador síncrono.

Las características si $\cos \phi = 0.8$ y $\cos \phi = 0$, capacitivos, pasan por encima de la característica en vacío.

2. La curva de características exteriores $V_t - I_e$, para I_r constante y $\cos \phi$ constante. Véase la figura 7.29.

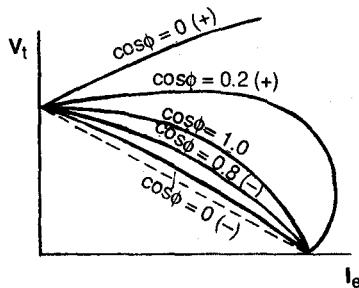


Fig. 7.29 Características exteriores de un generador síncrono.

Cuando $V_t = 0$ (cortocircuito) todas las características se cruzan en un mismo punto que corresponde al valor de la corriente de cortocircuito trifásico.

3. La curva de regulación $I_r - I_e$, para V_t constante y $\cos \phi$ constante. Véase la figura 7.30.

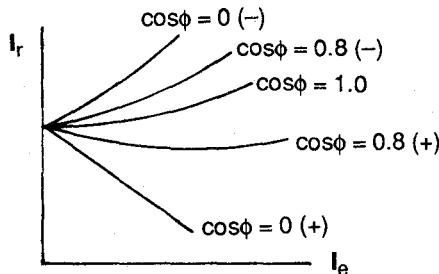


Fig. 7.30 Características de regulación de un generador síncrono.

En el caso particular, cuando $V_t = 0$, la curva de regulación pasa a ser la **curva de cortocircuito**.

Para mantener la tensión V_t constante cuando crece la carga inductiva, se necesita el aumento de la corriente de excitación I_r y cuando la carga es capacitativa, la reducción de la corriente de excitación, como se deduce del análisis de las características exteriores.

La reducción del $\cos \phi$ exige respectivamente una mayor variación de la corriente de excitación; por eso, las características de regulación para diferentes valores de $\cos \phi$ constante tienen el carácter representado en la figura 7.30.

7.11 EL MOTOR SÍNCRONO

Este motor es de poco uso en nuestro medio aparte que no se fabrica en el país por lo que su estudio se realizará de un modo muy general.

En la figura 7.31 se muestra el diagrama circuitual equivalente de un motor síncrono con su correspondiente diagrama fasorial.

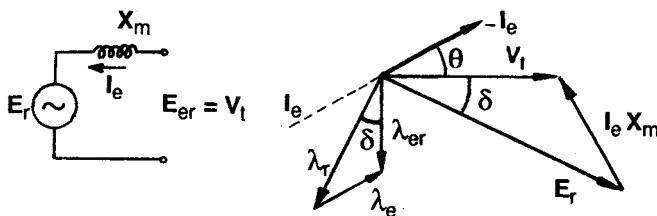


Fig. 7.31 Diagramas circuital y fasorial de un motor síncrono.

Un motor síncrono puede trabajar subexcitado si $E_r < V_t$ en cuyo caso se comporta como una carga inductiva, o sobreexcitado, si $E_r > V_t$ en cuyo caso actúa como si se tratase de una carga capacitativa. Véase la figura 7.32.

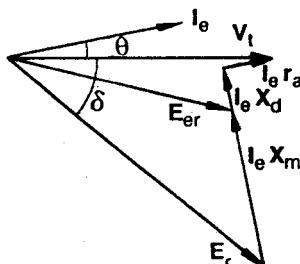


Fig. 7.32 Diagrama de tensiones de un motor síncrono.

El motor síncrono se caracteriza porque no posee par de arranque debiéndose poner en marcha por medio de algún motor auxiliar o valiéndose de un rotor especial con una jaula de ardilla adicional que sólo sirve para el arranque.

7.11.1 Mejora del factor de potencia

El motor síncrono funcionando sin carga y sobreexcitado se puede utilizar para mejorar el f.p. de una red o de una instalación.

En este caso el motor recibe el nombre de compensador síncrono.

Trabajando así, el motor síncrono "consume" de la red una corriente capacitiva que compensa la corriente retrasada de los motores asincrónicos y de los transformadores.

Esto permite descargar las líneas de alimentación de las corrientes inductivas retrasadas, lo cual disminuye las pérdidas en la red y mejora la utilización de los generadores síncronos de las centrales eléctricas.

En la figura 7.33 se muestra en forma esquemática el trabajo de un motor síncrono como mejorador del f.p.

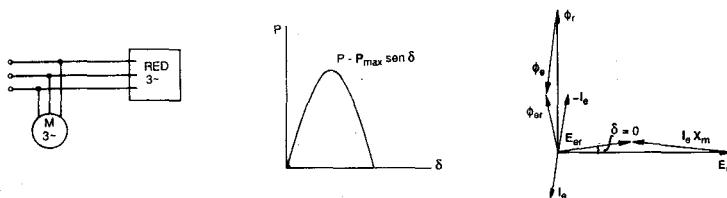


Fig. 7.33 El motor síncrono como mejorador del f.p.

En vacío la potencia $P = 0$ y, por lo tanto, el $\sin \delta = 0$.

La expresión de Q queda como sigue:

$$Q = \frac{V_t \cdot E - V_t^2}{X}$$

Obsérvese que con sólo variar E , lo cual se consigue variando la corriente de excitación I_t , se puede variar la potencia reactiva del motor pudiendo permitir una regulación continua de la misma.

7.12 GENERADORES EN PARALELO

Los generadores síncronos se pueden acoplar en paralelo, y de hecho los sistemas de suministro de energía eléctrica a los grandes centros industriales pueden tener decenas de generadores trabajando en paralelo interconectados en-

tre si a través de líneas de centenares de kilómetros, que alimentan cargas diseminadas sobre millares de kilómetros cuadrados.

Estos vastos sistemas se han ido desarrollando a pesar de los problemas que representa proyectarlos de forma que se mantenga el sincronismo incluso en el caso que se produzca disturbios y las complicaciones tanto técnicas como administrativas que hay que solventar para coordinar el trabajo de máquinas y de personal en un sistema tan complejo.

Las razones principales a favor de la interconexión de sistemas son las de asegurar la continuidad del servicio y las economías que se consiguen en los costes de instalación y de ejercicio.

El funcionamiento fiable de los generadores síncronos en paralelo exige el cumplimiento de una serie de requisitos.

Para el funcionamiento en paralelo de los generadores síncronos conectados a una red común, todos ellos deben tener rigurosamente una misma frecuencia, es decir, tienen que girar sincrónicamente.

Debido a que los motores mecánicos que ponen en rotación a los generadores síncronos no poseen la capacidad de mantener exactamente una misma velocidad de rotación, entonces el funcionamiento síncrono de varios alternadores sería imposible si en estas condiciones no se mantuvieran automáticamente por medio del así llamado momento de rotación sincronizador que surge durante el funcionamiento en paralelo.

Uno de los problemas esenciales para el funcionamiento en paralelo es la operación de acomplamiento de un nuevo generador a las barras de la central que alimentan la red, a las cuales ya estaban anteriormente conectados otros alternadores.

Para conectar en paralelo un alternador hay que observar ante todo las mismas condiciones que se exigen para conectar un nuevo generador de corriente continua a un sistema en funcionamiento, es decir, que en el instante de la conexión:

- 1) la f.e.m. del generador a conectar sea igual a la tensión de la red,
- 2) que la polaridad del generador a conectar corresponda a la polaridad de la red.

Puesto que en el caso de corriente alterna la polaridad varía con la frecuencia de la red, entonces es preciso elegir la polaridad correspondiente para el instante de conexión del generador.

- 3) las frecuencias de los sistemas que se conecta deben ser prácticamente iguales. Esto se consigue con el auxilio de sincronizadores especiales.
- 4) el orden de secuencia de las fases en los puntos que se conectan debe ser igual.

7.13 DATOS DE PLACA

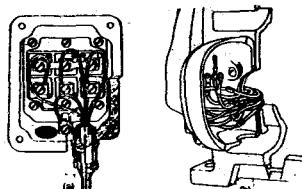
Los datos de placa de un generador síncrono trifásico son normalmente los siguientes:

- la potencia aparente en KVA o carga máxima
- la tensión de línea en KV
- la corriente de línea en A o en KA
- la forma de conexión: estrella o triángulo
- el f.p. (0.8, 0.85 ó 0.9)
- la frecuencia de la red
- la velocidad de sincronismo
- la tensión de excitación en V
- la corriente de excitación en A

Capítulo 8

LA MAQUINA ASINCRONA TRIFASICA

- 8.1 Principio de funcionamiento. El campo magnético giratorio
- 8.2 El deslizamiento
- 8.3 Aspectos constructivos del estator y del rotor
- 8.4 Circuito equivalente del motor de inducción trifásico
- 8.5 Ecuaciones
- 8.6 Potencias y pérdidas. Eficiencia
- 8.7 El circuito equivalente simplificado
- 8.8 Las curvas de torque y de corriente
- 8.9 Arranque, puesta en marcha, vacío y trabajo con carga
- 8.10 Ensayos de vacío y de rotor bloqueado
- 8.11 Determinación de parámetros del circuito equivalente
- 8.12 El diagrama circular
- 8.13 Motores de doble jaula o de barras profundas
- 8.14 Los motores de dos o más tensiones
- 8.15 Métodos de arranque
- 8.16 El frenado eléctrico
- 8.17 La inversión de marcha
- 8.18 Los motores de dos velocidades
- 8.19 Designación, conexión y marcado de terminales
- 8.20 Datos de placa



LA MAQUINA ASINCRONA

Se llaman máquinas asíncronas a las máquinas de corriente alterna cuya velocidad de giro N es diferente de la velocidad de sincronismo N_s .

Al igual que otras máquinas eléctricas, éstas pueden funcionar como motor o como generador aunque su aplicación más difundida es como motor, denominándosele también en este caso "motor de inducción".

En la actualidad, el motor de inducción trifásico es el más utilizado en la industria debido a su robustez, larga vida, facilidad de operación y bajo costo.

8.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

El motor asíncrono consta de dos partes que son el estator y el rotor.

8.1.1 El estator

Es la parte fija del motor. Está constituido por una carcasa en la que está fija una corona de chapas de acero de calidad especial provistas de ranuras. Desde el punto de vista constructivo, es también muy simple y semejante al de un generador síncrono trifásico, en el cual se alojan uno o más grupos de tres bobinas conectadas en estrella o en triángulo, tal como puede verse en la figura 8.1.

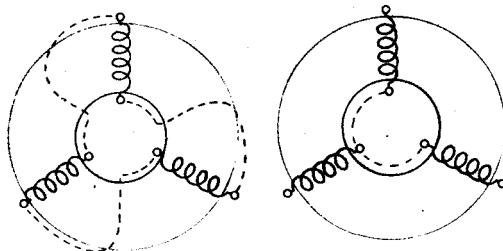


Fig. 8.1 Esquema del estator de un motor de inducción trifásico.

8.1.2 El rotor

Es la parte móvil del motor. Está situado en el interior del estator y constituido por un apilamiento de chapas de acero formando un cilindro sólido con el árbol del motor. Entre los tipos más utilizados se distinguen el rotor de jaula de ardilla y el rotor bobinado.

8.1.2.1. El rotor de jaula de ardilla (rotor en cortocircuito)

Este rotor consta de un cierto número de barras de cobre o aluminio ubicadas en ranuras previamente construidas en el rotor, paralelamente a su eje y puestas todas en cortocircuito en ambos extremos por medio de dos anillos metálicos, tal como se ve en la figura 8.2. El conjunto tiene el aspecto de una jaula de ardilla, de donde proviene el nombre de este tipo de rotor.

En determinados motores, la jaula de ardilla está enteramente moldeada. Se suele utilizar el aluminio inyectado a presión; las aletas de refrigeración hechas en la misma operación hacen masa con el rotor.

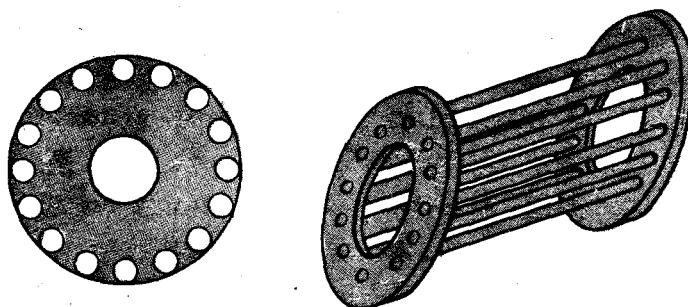


Fig. 8.2 El rotor de un motor de jaula de ardilla.

8.1.2.2 El rotor bobinado (rotor de anillos rozantes)

Existe también otro tipo de rotor que lleva un arrollamiento similar en construcción y en número de polos al del estator. Generalmente el rotor es trifásico. Un extremo de cada uno de los devanados está conectado a un punto común (acoplamiento estrella). Los extremos libres pueden estar conectados a un acoplador centrífugo o a tres anillos de cobre aislados y solidarios con el rotor. Encima de los anillos se colocan las escobillas de grafito conectadas al dispositivo de arranque. Por estas razones a este motor se le denomina de "rotor bobinado" o de "anillos rozantes". Este motor se emplea poco debido a su mayor costo.

El arrollamiento rotórico no recibe ninguna alimentación exterior como sucede con el resto de las máquinas eléctricas y las corrientes que por éste circulan, son simplemente inducidas por el estator, como si se tratara de un transformador.

8.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

EL CAMPO MAGNETICO GIRATORIO

El funcionamiento de estas máquinas se explica por la presencia de un cam-

po giratorio en el estator que gira a una velocidad constante, cuyos valores se distribuyen senoidalmente en el espacio y cuya amplitud se mantiene constante con el tiempo. Como se sabe, un campo de esta naturaleza sólo puede ser producido por un sistema trifásico constituido por uno o más grupos de tres bobinas distribuidas simétricamente en el espacio (es decir, a 120° una de la siguiente) y que están siendo alimentadas por un sistema trifásico equilibrado de corrientes (o sea, desfasadas entre sí 120° en el tiempo). Se sabe también que este campo giratorio se mueve a la velocidad de sincronismo N_s :

$$N_s = \frac{120 f}{p} \text{ (rpm)} \quad f (H_z)$$

$p = N^{\circ}$ de polos

El campo giratorio del estator corta a los conductores del rotor generando en ellos una f.e.m. como si se tratara de un transformador; estas f.e.m.s. hacen circular corrientes en el rotor que, a su vez, generan otro campo giratorio de la misma velocidad que aquél producido por el arrollamiento estatórico, ya que tienen el mismo número de polos.

Los dos campos girando a la misma velocidad interaccionan entre sí, produciendo un torque electromagnético que pone en movimiento al rotor. Cuando el rotor comienza a girar a la velocidad N , la velocidad relativa entre el campo giratorio y el rotor disminuirá a $N_s - N$. Como consecuencia de esto, las f.e.m.s. y las corrientes inducidas en el rotor tendrán una frecuencia f_r diferente de la frecuencia f del estator.

8.3 EL DESLIZAMIENTO

Como las frecuencias de las cantidades eléctricas son proporcionales a las velocidades relativas de los campos con respecto a sus respectivos devanados, se tendrá que:

$$\frac{f_r}{N_s - N} = \frac{f}{N_s} \quad f_r = \frac{N_s - N}{N_s} f = s f$$

El valor $s = (N_s - N)/N_s$ se conoce con el nombre de **deslizamiento** y es muy importante para el estudio de la máquina asincrónica; de esta relación se obtiene:

$$N_r = N_s (1 - s)$$

Para que haya producción de torque a cualquier velocidad del rotor es necesario que los campos giratorios del estator y del rotor se desplacen a la misma velocidad, excepto cuando el rotor alcanza la velocidad síncrona por cuanto, al

no haber movimiento relativo entre el campo giratorio del estator y el rotor no se inducen f.e.m.s. en el rotor.

Esta es la gran diferencia con respecto a las máquinas síncronas en las que sólo se produce torque a la velocidad de sincronismo.

8.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCION TRIFASICO

El motor de inducción es semejante a un transformador cuyo primario es el estator y cuyo secundario es el rotor. El estator y el rotor se pueden considerar como acoplados magnéticamente por un transformador ideal de relación de transformación a .

Suponiendo que esté parado, $s = 1$, su circuito equivalente monofásico será como el que se indica en la figura 8.3.

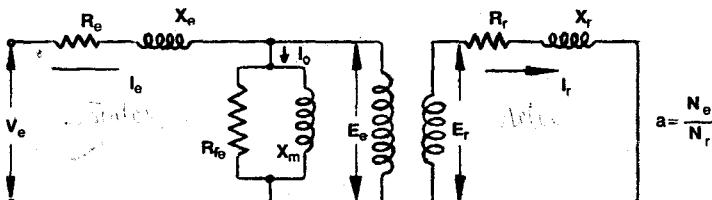


Fig. 8.3 Circuito equivalente monofásico de un motor de inducción.

En este diagrama:

- R_e : resistencia del bobinado del estator (ohm/fase).
- X_e : reactancia de dispersión del estator (ohm/fase).
- R_r : resistencia del bobinado del rotor (ohm/fase).
- X_r : reactancia de dispersión del rotor (ohm/fase).
- R_{fe} : resistencia de pérdidas en el hierro (ohm/fase).
- X_m : reactancia de magnetización (ohm/fase).
- V_e : tensión aplicada por fase (V).
- E_e : f.c.e.m. inducida en el estator por fase (V)
- E_r : f.c.e.m. inducida en el rotor por fase (V).
- I_e : corriente de fase del estator (A).
- I_r : corriente de fase de ~~rotor~~ (A).
- I_o : corriente de fase de vacío (A).
- a : relación de transformación.
- N_e : número efectivo de espiras en serie por fase del estator.
- N_r : número efectivo de espiras en serie por fase del rotor.

El campo giratorio resultante de magnetización Φ_{er} inducirá en el estator y en el rotor las f.e.m.s. E_e y E_r cuando el rotor está parado. La corriente I_r del rotor en cortocircuito tendrá la misma frecuencia que la I_e .

Sin embargo, cuando el rotor se pone en movimiento, la frecuencia del rotor se reduce a $f_r = s.f_e$ y la f.e.m. se reduce a $s.E_r$ ya que disminuye la velocidad relativa entre el campo giratorio y el rotor. Por otro lado, la reducción de frecuencia afecta a la reactancia de dispersión rotórica que disminuye a $s.X_r$. El rotor se representa entonces como se muestra en la figura 8.4 (a). Este circuito, por conveniencia de cálculo, se convierte en su equivalente de la figura 8.4 (b), sin variar I_r .

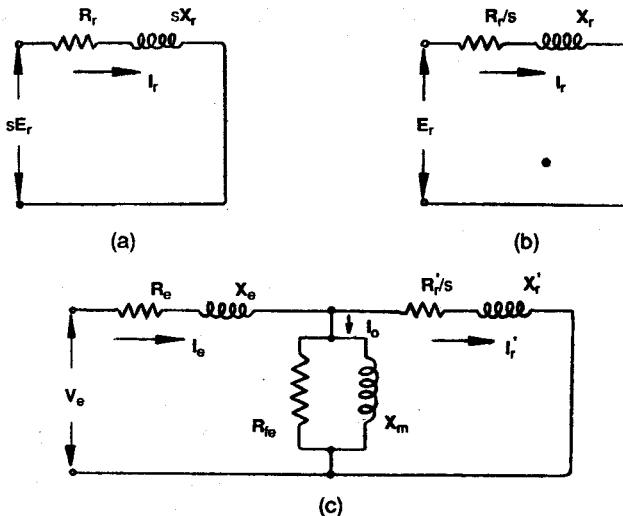


Fig. 8.4 Circuito equivalente del rotor de un motor de inducción.

El circuito equivalente total referido al estator se transforma entonces en el circuito de la figura 8.4 (c), donde:

$$\frac{R_r'}{s} = \frac{a^2 \cdot R_r}{s} ; \quad X_r' = a^2 \cdot X_r ; \quad I_r' = \frac{I_r}{a}$$

La resistencia rotórica R_r'/s incluye la resistencia del arrollamiento rotórico y la que representa la carga mecánica del motor; conviene entonces sustituirla por:

$$\frac{R_r}{s} = R_r' + \frac{(1 - \frac{s}{s})}{\frac{s}{s}} R_r'$$

De esta forma, el segundo término denominado resistencia dinámica representa sólo a la potencia mecánica que incluye a la potencia útil en el eje y a las pérdidas mecánicas.

8.5 ECUACIONES

La impedancia del estator:

$$\bar{Z}_e = R_e + jX_e$$

La impedancia del rotor referida al estator:

$$\bar{Z}'_r = R'_r + jX'_r$$

La corriente del estator:

$$\bar{I}_e = \bar{I}'_r + \bar{I}_o$$

La tensión en bornes: $V_e = V / \sqrt{3}$

$$\bar{V}_e = \bar{I}_e \cdot \bar{Z}_e + \bar{E}_e$$

$$\boxed{\bar{E}_e} = \bar{E}'_r = \bar{I}'_r \left(\bar{Z}'_r + \frac{(1 - \boxed{s})}{\boxed{s}} R'_r \right)$$

La corriente de vacío:

$$\bar{I}_o \approx \frac{\bar{E}_e}{\bar{Z}_o}$$

$$\frac{1}{\bar{Z}_o} = \frac{1}{R_{fe}} + \frac{1}{jX_m}$$

El torque útil:

$$T_{util} = \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (\text{N.m})$$

donde:

P_{mec} : potencia útil o potencia en el eje o potencia de salida (W)

ω : velocidad de giro del eje (rad/seg)

8.6 POTENCIAS Y PERDIDAS. EFICIENCIA

El motor de inducción trifásico recibe una potencia eléctrica P_{el} igual a:

$$P_{el} = \sqrt{3} V I \cos \phi \quad (\text{W})$$

donde:

- V : tensión de línea (V)
- I : corriente de línea (A)
- ϕ : es el ángulo de fase en atraso.

y entrega una potencia mecánica en el eje P_{mec} :

$$P_{mec} = P_{el} - P_{perd} \quad (W)$$

donde:

P_{perd} : potencia de pérdidas totales (W)

La potencia P_{perd} es la suma de las potencias de pérdidas mecánicas p_{mec} , de pérdidas en el hierro p_{fe} y pérdidas por efecto Joule en los bobinados del estator y del rotor p_{Je} y p_{Jr} , respectivamente.

Las pérdidas mecánicas se deben a la fricción en los rodamientos, a la tracción de las partes giratorias con el aire y a la potencia requerida por el rodamiento de ventilación. Estas pérdidas son difíciles de medir por separado, se presentan junto con las pérdidas en el hierro.

Las pérdidas en el hierro se deben a los fenómenos de histéresis magnética y a las corrientes parásitas. Estas pérdidas se suelen calcular con la siguiente expresión:

$$p_{fe} = \frac{3 E_o^2}{R_{fe}} \quad (W)$$

donde:

E_o : E_e en vacío (V)

Las pérdidas por efecto Joule se determinan del siguiente modo:

$$p_{Je} = 3 I_e^2 \cdot R_e \quad (W)$$

$$p_{Jr} = 3 I_r^2 \cdot R_r \quad (W)$$

La eficiencia η es la relación entre la potencia mecánica entregada por el motor en el eje P_{mec} y la potencia eléctrica recibida por el mismo entre sus terminales P_{el} :

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}}$$

La potencia generada o potencia total transferida del estator al rotor a través del entrehierro P_{eh} es igual a:

$$P_{eh} = 3 I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} = \frac{P_{Jr}}{s} \quad (W)$$

La potencia mecánica interna P_{mi} es igual a:

$$P_{mi} = P_{mec} + p_{mec} \quad (W)$$

8.7 EL CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO

Para motores grandes, de más de 25 hp, un análisis bastante aproximado resulta de asumir las pérdidas mecánicas combinadas con las pérdidas en el hierro en la parte resistiva del ramal shunt que se coloca al principio del circuito, tal como se observa en la Figura 8.5.

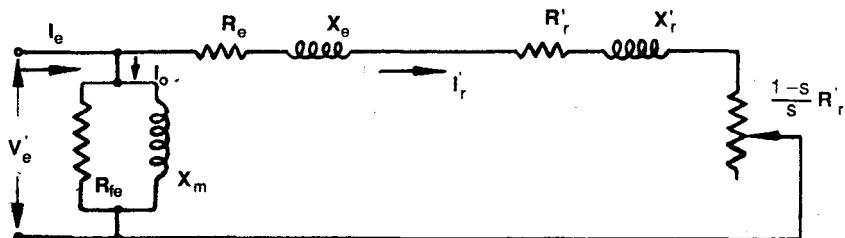


Fig. 8.5 Circuito equivalente aproximado de un motor de inducción trifásico.

De este modo se logra que la potencia mecánica interna y el torque mecánico interno sean valores útiles o efectivos en el eje sin necesidad de restarles las pérdidas mecánicas; por otra parte, la corriente en el ramal shunt es la corriente total de vacío I_o , fácil de medir.

En consecuencia, la tensión V_e deberá modificarse, restándole la caída de tensión producida por I_o en el estator (ya que en realidad Z_e es recorrida por I_o , mientras que en el último circuito no lo es):

$$\bar{V}_e = \bar{V}_e - \bar{I}_o \cdot \bar{Z}_e$$

8.8 LAS CURVAS CARACTERISTICAS

8.8.1 Las curvas de torque y corriente en función del deslizamiento o de la velocidad

Utilizando el circuito equivalente aproximado, se puede determinar la corriente del rotor I_r referida al estator en función del deslizamiento s :

$$I_r' = \frac{V_e'}{\sqrt{\left(R_e + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + (X_e + X_r')^2}}$$

La corriente del rotor puede expresarse también en función de la velocidad del rotor ω , remplazando el deslizamiento s por su equivalente:

$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_s}$$

donde:

ω_s : es la velocidad de sincronismo (rad/seg)

La gráfica de $I_r' - \omega$ es como se muestra en la Figura 8.6. Durante la puesta en marcha del motor la corriente I_r' cae continuamente desde un valor máximo en el arranque ($s = 1$) hasta hacerse igual a cero cuando el motor trabaja sin carga mecánica acoplada en el eje ($s \sim 0$).

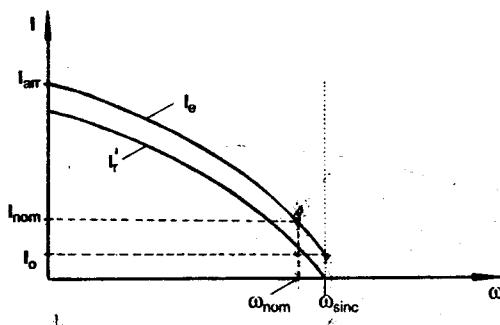


Fig. 8.6 Curva característica de $I - \omega$ para un motor asincrónico trifásico.

La corriente I_r' en el arranque se obtiene remplazando el valor de $s = 1$ en la ecuación de arriba:

$$I_r' (\text{arr}) = \frac{V_e'}{\sqrt{(R_e + R_r')^2 + (X_e + X_r')^2}}$$

Durante la puesta en marcha, la corriente de vacío I_0 permanece prácticamente constante mientras que la corriente total I_e varía fundamentalmente con I_r' según la siguiente expresión fasorial:

$$\bar{I}_e = \bar{I}_r' + \bar{I}_o$$

En la Figura 8.6 puede apreciarse cómo varía en forma aproximada I_e con ω durante todo el período de puesta en marcha. La corriente de arranque I_{arr} presenta un valor muy elevado, varias veces el valor de la corriente nominal I_{nom} debido a la baja impedancia del circuito del motor.

El torque útil T_{mec} igual al torque mecánico interno T_{mi} es igual a:

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega}$$

en donde P_{mec} es la potencia útil o potencia mecánica interna P_{mi} :

$$P_{mi} = P_{mec} = 3 I_r^2 \cdot R_r \cdot \frac{(1 - s)}{s}$$

y ω es la velocidad angular del rotor:

$$\omega = \omega_s (1 - s)$$

De modo que el T_{mec} puede quedar expresado de la siguiente manera:

$$T_{mec} = \frac{3 I_r^2 \cdot R_r}{s \cdot \omega_s}$$

Reemplazando finalmente I_r en función del deslizamiento, se llega a la siguiente expresión:

$$T_{mec} = \frac{3 V_e^2 \cdot R_r / s \cdot \omega_s}{\left(R_e + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_e + X_r)^2}$$

Este torque puede expresarse también en función de la velocidad del rotor ω . En la Figura 8.7 se muestra la forma típica de la curva de Torque-velocidad de un motor asincrónico trifásico.

En la curva de $T - \omega$ se distingue varios puntos importantes, a saber, el torque de arranque T_{arr} , el torque máximo T_{max} , el torque nominal T_{nom} y el torque de vacío T_0 .

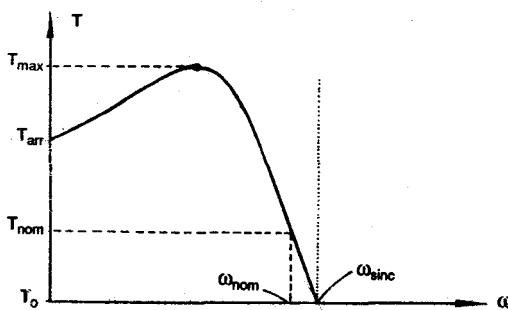


Fig. 8.7 Curva característica de $T - \omega$ para un motor asincrónico trifásico.

La expresión para el torque de arranque se obtiene haciendo $s = 1$ en la ecuación de arriba:

$$T_{\text{arr}} = \frac{3 V_e^2 \cdot R_r / \omega_s}{(R_e + R_r)^2 + (X_e + X_r)^2}$$

Como no es posible alcanzar el vacío total, el torque mecánico nunca será cero y por lo tanto, nunca se alcanzará la velocidad de sincronismo. La región de funcionamiento normal es la zona de la derecha donde la curva es aproximadamente lineal.

Conviene aclarar aquí lo siguiente: si los conductores del rotor fueran paralelos al eje del motor, la curva de $T - \omega$ presentaría a la velocidad de $\omega_s/7$ un torque mínimo ocasionado por la gran influencia que en ese momento tiene la séptima armónica componente del campo magnético giratorio que podría resultar perjudicial durante la puesta en marcha con carga por la tendencia del motor a ponerse a girar a esa velocidad tan baja. Por eso, con el fin de superar esta dificultad y aproximar la forma de la curva a la ideal, las ranuras se construyen con una cierta inclinación. Ver Figura 8.8.

8.8.2 El torque máximo

Derivando la expresión del torque e igualando a cero se encuentra la expresión del deslizamiento al cual se produce el torque máximo:

$$s(T_{\max}) = \frac{R_r'}{\sqrt{R_e^2 + (X_e + X_r')^2}}$$

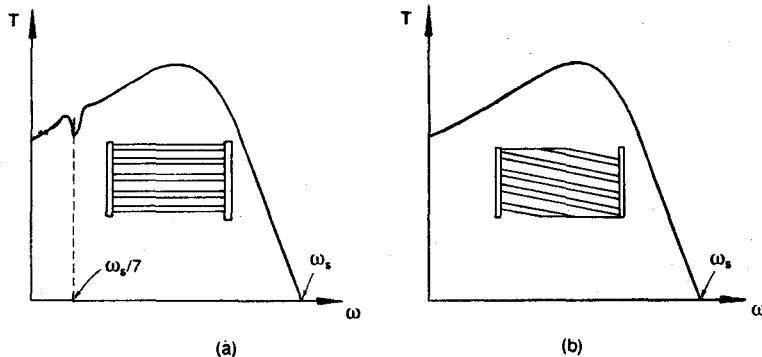


Fig. 8.8 Curvas de $T - \omega$ del motor asincrónico

(a) con ranuras paralelas al eje.

(b) con ranuras inclinadas del rotor.

Remplazando en la expresión del torque, se obtiene el valor del torque máximo, que demuestra que éste es independiente de la resistencia rotórica R_r ; este valor es el máximo torque de corta duración que puede soportar el motor:

$$T_{\max} = \frac{3 V_e^2 / 2 \omega_s}{R_e + \sqrt{R_e^2 + (X_e + X_r)^2}}$$

La resistencia del rotor, sin embargo, determina el deslizamiento al cual ocurre el máximo torque. El torque máximo en motores de inducción convencionales se produce generalmente a un valor de deslizamiento varias veces mayor que el deslizamiento nominal.

Cuando el motor se impulsa al revés, el deslizamiento es mayor que la unidad, y el circuito del rotor absorbe potencia no sólo del estator a través del entrehierro, sino también potencia mecánica que se convierte en potencia eléctrica. Esta segunda región de operación del motor de inducción se muestra más adelante en la Figura 8.42.

8.9 ARRANQUE, VACÍO Y TRABAJO CON CARGA

Cada vez que un motor es arrancado y puesto en marcha desarrolla siempre las mismas características naturales de torque y corriente en función de la velocidad de giro.

Sin embargo, debe distinguirse tres casos de arranque:

- Primero, cuando el motor **arranca en vacío**, es decir, sin carga mecánica acoplada en el eje. Evidentemente, éstas son las mejores condicio-

nes para la puesta en marcha del motor por cuanto esto se produce rápidamente en vista de la ausencia del torque resistente.

- b) Segundo, cuando el motor arranca con carga, la cual puede ser ligera, mediana, plena o incluso una sobrecarga, las condiciones para la puesta en marcha son tanto más difíciles. El motor se tardará cada vez más en accionar la respectiva carga. Debe quedar claro que sea cual fuere la carga que un motor deba poner en marcha, el torque ni la corriente de arranque cambiarán; asimismo, que el tiempo que dura la puesta en marcha aumenta con la carga y que los tiempos largos contribuyen al recalentamiento de la máquina poniendo en peligro la vida del aislamiento.
- c) Por último, los continuos arranques y paradas del motor en los accionamientos del tipo intermitente ocasionan que el motor trabaje en la región de las velocidades bajas, donde precisamente las corrientes son elevadas con el consiguiente recalentamiento de la máquina al no darle tiempo para que se enfrie.

En la región de trabajo normal, luego que el motor fue puesto en marcha y el torque del motor se equilibró con el torque resistente de la carga, ésta puede variar ampliamente desde vacío hasta la plena carga sin ocasionar problemas de sobrecalentamiento para trabajo continuado o permanente. Se sabe que en vacío el motor alcanza la mayor velocidad posible, que, con todo, no llega a ser la velocidad de sincronismo. Conforme se va aumentando la carga, el motor va disminuyendo en forma casi proporcional su velocidad hasta alcanzar la nominal con una carga plena.

El motor también puede trabajar sobrecargado, pero no por tiempo ilimitado, sino el máximo especificado por el fabricante para el tipo de motor. Las sobrecargas duraderas producen recalentamiento de la máquina. Los tiempos de sobrecarga son relativamente pequeños.

En el trabajo con cargas de tipo periódico o intermitente está permitido el trabajo con sobrecargas de corta duración, teniendo como límite de torque el torque máximo.

8.10 ENSAYOS DE VACÍO Y DE ROTOR BLOQUEADO

Las constantes del circuito equivalente del motor de inducción pueden obtenerse de una prueba hecha con el motor girando libre y de la prueba de rotor bloqueado. Estas pruebas son equivalentes a las pruebas de vacío y de cortocircuito del transformador.

8.10.1 Prueba de vacío

Se aplica una tensión nominal a frecuencia nominal al estator de tal modo,

que el motor gire sin carga. Se toman entonces las medidas de tensión, corriente y potencia de entrada al estator.

Debido al bajo valor del deslizamiento en vacío, la resistencia dinámica es tan alta, que la corriente del rotor en vacío es despreciable. Sin embargo, una pequeña corriente del rotor, que puede despreciarse, está presente en motores prácticos incluso a cero deslizamiento debido a las armónicas en la onda de densidad de campo y a una ligera no uniformidad en el entrehierro.

Para la prueba de vacío de un motor trifásico, los instrumentos de medición se colocan en la forma indicada en la Figura 8.9. Sea:

V_o : la tensión nominal de línea (V)

I_o : la corriente de línea (A)

W_o : la potencia total de entrada (W)

R_e : la resistencia del equivalente monofásico del estator (Ω).

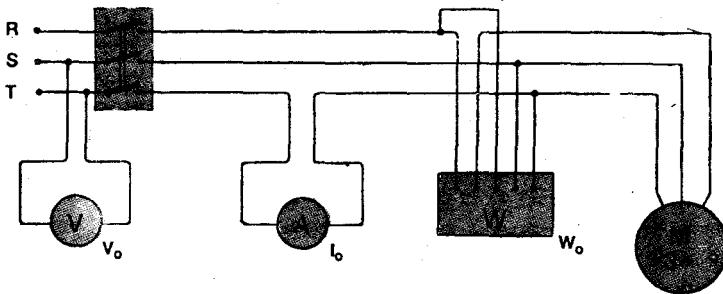


Fig. 8.9 El ensayo en vacío de un motor de inducción trifásico.

8.10.2 Prueba de rotor bloqueado

Este ensayo se hace con el rotor trabado, es decir, evitando que gire ($s=1$).

Para motores convencionales de jaula de ardilla simple, menores de 20 kW nominales, sin incluir las máquinas de doble jaula de ardilla o de barras profundas, se aplica al estator una tensión reducida a frecuencia nominal. La tensión se ajusta para producir aproximadamente una corriente nominal. Una tensión nominal daría como resultado una corriente excesiva que saturaría las trayectorias del flujo de dispersión a través de los dientes del estator y del rotor, dando lugar a menores valores que los normales de la reactancia de dispersión. Adicionalmente, a menos que se sostenga por un corto período, la corriente excesiva sobrecalentará los embobinados.

Para la prueba de rotor bloqueado de un motor trifásico, con los instrumentos de medición colocados en la forma que aparece en la Figura 8.10, sea:

V_{cc} : la tensión reducida de línea (V)

I_{cc} : la corriente nominal de línea (A)

P_{cc} : la potencia de entrada (W). (Potencia Total)

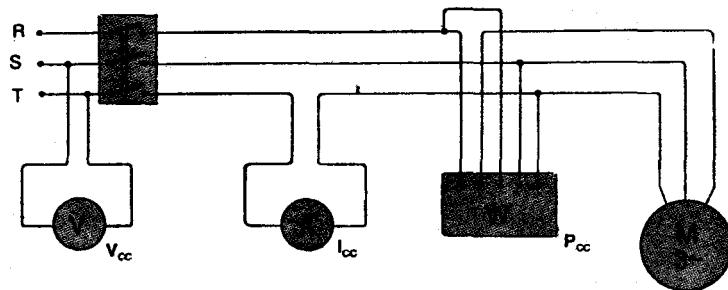


Fig. 8.10 El ensayo de rotor bloqueado de un motor de inducción trifásico.

8.11 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

8.11.1 Uso de los valores medidos en el ensayo de vacío

Debido a que la corriente de vacío del rotor es despreciable, el circuito del rotor en este ensayo puede omitirse del circuito equivalente en la Figura 8.11 (a), resultando el circuito de la Figura 8.11 (b), en donde z_M está representado por una impedancia equivalente serie para facilitar la evaluación de las reactivancias y resistencias del motor.

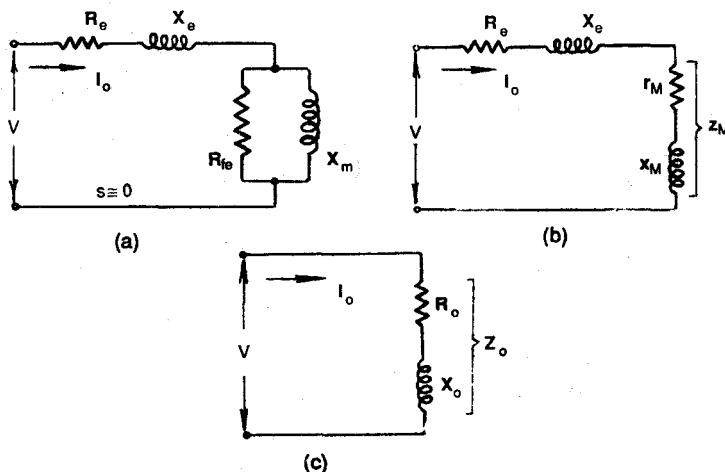


Fig. 8.11 Circuitos equivalentes para un motor de inducción trifásico.

(a) y (b) Prueba de vacío.

(c) Circuito equivalente simplificado para el motor en vacío.

La resistencia R_{fe} en la Figura 8.11 (a), toma en cuenta no sólo las pérdidas en el hierro, sino también las pérdidas mecánicas.

Con los valores medidos en este ensayo, se puede determinar el circuito equivalente monofásico, tal como aparece en la Figura 8.11 (c):

$$\begin{array}{ll} \textcircled{2} \quad V = V_o / \sqrt{3} & \text{voltios por fase} \\ Z_o = V / I_o & \text{ohmios por fase} \\ R_o = \frac{W_o}{3 I_o^2} & \text{ohmios por fase} \end{array}$$

donde:

$$R_o = R_e + r_M$$

y:

$$X_o = X_e + x_M$$

en donde R_e es la resistencia del estator tomada como el valor de corriente continua. La resistencia $R_{fe} \gg X_m$, de modo que la resistencia r_M es aproximadamente igual a:

$$r_M \approx \frac{X_m^2}{R_{fe}} \quad (0)$$

y por lo tanto:

$$x_M \approx X_m$$

por lo que:

$$X_o \approx X_e + X_m \quad (1)$$

La reactancia X_o se puede determinar a partir de R_o y Z_o ya calculados:

$$X_o = \sqrt{Z_o^2 - R_o^2}$$

Las pérdidas rotacionales, es decir, la suma de las pérdidas mecánicas más las pérdidas en el hierro, se encuentran restando las pérdidas por efecto Joule en el cobre del estator de la potencia de vacío medida a la entrada:

$$P_o = W_o - 3 I_o^2 R_e$$

8.11.2 Uso de los valores medidos en el ensayo de rotor bloqueado

Este ensayo permite encontrar directamente los valores de X_e , X'_r y R'_r .

El circuito equivalente se muestra en la Figura 8.12 (a), pudiendo reducirse al circuito equivalente serie de la Figura 8.12 (b) para facilitar la evaluación de los parámetros.

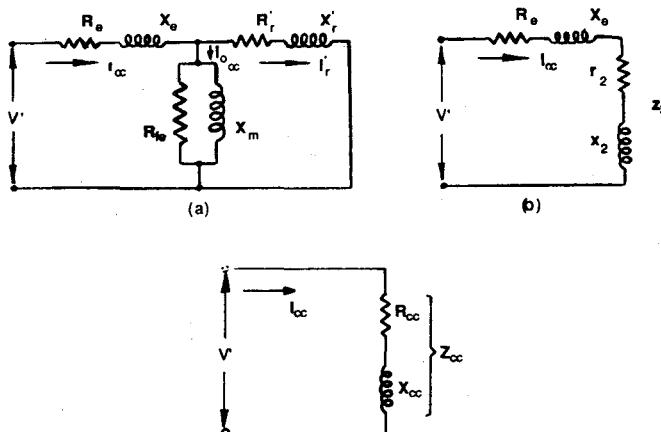


Fig. 8.12 Circuitos equivalentes para un motor asincrono trifásico con el rotor bloqueado.

Con los valores medidos en este ensayo se puede determinar el circuito equivalente monofásico, tal como se muestra en la Figura 8.12 (c):

$$V' = V_{cc} / \sqrt{3} \quad \text{voltios por fase}$$

$$Z_{cc} = \frac{V'}{I_{cc}} \quad \text{ohmios por fase}$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{\frac{V'^2}{3 I_{cc}}}$$

donde:

$$R_{cc} = R_e + r_2$$

y:

$$X_{cc} = X_e + X_2$$

La reactancia X_{cc} se puede determinar a partir de Z_{cc} y R_{cc} ya calculadas:

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

Cuando el rotor está trabado, la corriente de excitación es pequeña comparada con la corriente del estator I_{cc} , la reactancia de dispersión del rotor X'_r es sólo ligeramente mayor que x_2 , y

$$X_{cc} \approx X_e + X'_r$$

El Código de Pruebas de la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) lista las proporciones empíricas dadas en la Tabla 8.1 para reactancias de dispersión del estator X_e y del rotor X'_r en motores de inducción trifásicos en función de la reactancia equivalente X_{cc} con rotor bloqueado.

Tabla 8.1 Proporciones empíricas de las reactancias de dispersión del motor de inducción

Tipo de motor	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Rotor bobinado
X_e	$0.5 X_{cc}$	$0.4 X_{cc}$	$0.3 X_{cc}$	$0.5 X_{cc}$	$0.5 X_{cc}$
X'_r	$0.5 X_{cc}$	$0.6 X_{cc}$	$0.7 X_{cc}$	$0.5 X_{cc}$	$0.5 X_{cc}$

Conociendo X_e puede calcularse X_m a partir de la ecuación (1) obtenida del ensayo de vacío:

$$X_m = X_o \cdot X_e$$

Cuando la clasificación del motor no se conoce, se asume $X_e = X'_r = 0.5 X_{cc}$.
• El valor de R'_r requiere ser estimado con mayor precisión que X'_r debido a que r_2 es algunas veces mayor que R'_r y a que $R'_r \ll (X_e + X'_r)$ en el rango de marcha, razones por las cuales el efecto de R'_r durante la marcha normal es mayor.

Considerando que $R_{fe} \gg X_m$ y que, al mismo tiempo, X_m es muy grande comparado con los valores de las resistencias y reactancias de dispersión del estator y del rotor, entonces, se demuestra que r_2 es igual aproximadamente a:

$$r_2 \approx \frac{R'_r \cdot X_m^2}{(X'_r + X_m)^2} \quad (2)$$

de donde se obtiene:

$$R_r' \equiv \left(1 + \frac{X_r'}{X_m} \right)^2 (R_{cc} - R_e)$$

donde r_2 ha sido remplazada por su equivalente de la ecuación (2).

Sólo falta determinar R_{fe} . De la ecuación (0):

$$R_{fe} \equiv \frac{X_m^2}{r_M} = \frac{X_m^2}{R_o - R_e}$$

Si se quiere que R_{fe} represente sólo las pérdidas en el hierro, será necesario separarlas de las pérdidas mecánicas.

Para esto, manteniendo la frecuencia nominal, se hace variar la tensión de vacío desde $0.2 V_{nom}$ hasta $1.1 V_{nom}$ por medio de una fuente de tensión variable (en realidad debe procederse al revés: desde $1.1 V_{nom}$ hasta $0.2 V_{nom}$). Por debajo de $0.2 V_{nom}$ el motor puede llegar a bloquearse. Se observará que la velocidad del rotor cae ligeramente durante el ensayo, de modo que las pérdidas mecánicas permanecen prácticamente constantes.

En este ensayo se miden para las distintas tensiones V_o , las respectivas corrientes I_o y potencias W_o . Luego se determinan las pérdidas rotacionales P_o :

$$P_o = W_o - 3 I_o^2 \cdot R_e$$

Las pérdidas rotacionales P_o son iguales a la suma de las pérdidas mecánicas p_{mec} más las pérdidas en el hierro p_{fe} :

$$P_o = p_{mec} + p_{fe}$$

donde:

$$p_{fe} = \frac{3 E_o^2}{R_{fe}}$$

Considerando que p_{mec} es una constante y que P_{Fe} es función del cuadrado de la f.e.m. E_o , la gráfica de P_o vs. E_o es una parábola cuadrada, tal como se aprecia en la Figura 8.13. La amplitud E_o se obtiene a partir de la ecuación siguiente:

$$\bar{E}_o = \frac{V_o}{\sqrt{3}} [0^\circ] - \bar{I}_o \times \bar{Z}_e$$

La intersección de la curva de potencias con el eje P_o , una vez extrapolada, dará el valor de las pérdidas mecánicas.

Separadas las pérdidas mecánicas, para un punto cualquiera de la curva de potencias, se puede determinar el valor de las pérdidas en el hierro y, con éstas, el valor de R_{fe} :

$$R_{fe} = \frac{E_o^2}{P_o - p_{mec}}$$

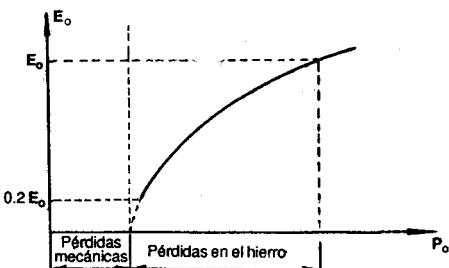


Fig. 8.13 Curva de vacío del motor de inducción.

8.12 EL DIAGRAMA CIRCULAR DEL MOTOR

A veces es muy sencillo y conveniente calcular las características de operación de un motor de inducción por medio de su diagrama circular.

En corriente alterna se demuestra que, si en un circuito serie R-L, la reactancia permanece constante y la resistencia varía, el lugar geométrico del vector corriente es una semicircunferencia, tal como puede verse en el libro "Circuitos Eléctricos" de J. Edminster.

En el circuito equivalente simplificado, todos los componentes son constantes excepto la resistencia dinámica que varía con la carga; por consiguiente, el lugar geométrico del vector I'_r es una circunferencia y como la corriente total I_s es la suma de la variable I'_r y la constante I_o , el lugar geométrico de I_s será también una circunferencia.

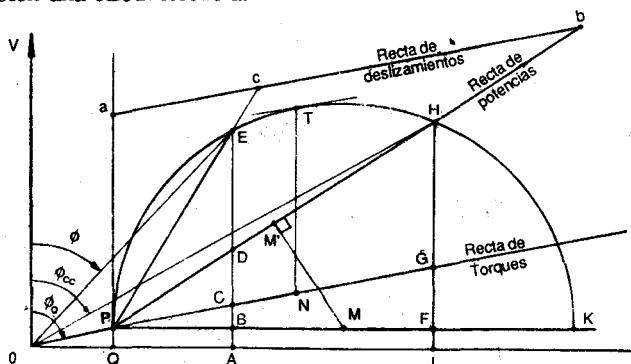


Fig. 8.14 El diagrama circular.

Los datos para trazar el diagrama se obtienen por medio de los ensayos de vacío y de rotor bloqueado, en la forma siguiente:

Punto P.: Se determina de la corriente y potencia en vacío.

$$OP = I_o \quad \boxed{\phi_o}$$

$$\phi_o = \arccos \frac{P_o}{\sqrt{3} V_o \cdot I_o}$$

$$P_o = W_o - 3 I_o^2 R_e$$

Punto H.: Se determina de la corriente y potencia de cortocircuito.

$$OH = I_{cc} \quad \boxed{\phi_{cc}}$$

$$I_{cc} = I_{cc} \frac{V}{V_{cc}}$$

$$\phi_{cc} = \arccos \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{cc} \cdot I_{cc}}$$

A continuación se muestra la tabla de ensayos de vacío y de rotor bloqueado:

	Potencia (W)	Tensión (V)	Corriente (A)
VACIO	W_o	$V_o = V_{nom}$	I_o
R.B.	P_{cc}	V_{cc}	$I_{cc} = I_{nom}$

PH – Rectas de potencias útiles.

PK – Paralela al eje de abcisas.

MM' – Mediatrix de PH.

M – Centro del círculo PHK.

Se observa entonces que con la ayuda de solamente los dos ensayos se ha logrado obtener el diagrama circular, a partir del cual se pueden calcular los valores de operación sin necesidad de otros ensayos, ni cálculos con circuitos equivalentes.

$HJ = I_{cc}^2 \cos \phi_{cc}$, multiplicado por V_e , nos daría la potencia absorbida con rotor parado (instante del arranque) íntegramente consumida en pérdidas por efecto Joule, en el hierro.

$PQ = I_o \cos \phi_o$, multiplicado por V_e , nos da la potencia total de vacío, que se asume consumida en pérdidas en el hierro y mecánicas.

HF representaría, por lo tanto, a la escala de potencias, únicamente las pérdidas por efecto Joule en el rotor y en el estator.

Punto G: Divide a HF proporcionalmente a R_r y R_e (resistencias del rotor reducida al estator y del estator respectivamente) de modo que:

HG : pérdidas por efecto Joule en el rotor.

GF : pérdidas por efecto Joule en el estator.

PG : recta de los apres.

La recta PH limita las pérdidas por efecto Joule (máximas en H y nulas en P), por lo tanto, las distancias desde esta recta hasta la circunferencia representan las potencias útiles o desarrolladas en el eje.

OE = I_e , corriente estatórica para una carga cualquiera con f.p. = $\cos \phi_e$.

PE = $\bar{I}_r = \bar{I}_e - \bar{I}_o$, corriente rotórica.

EA = $I_e \cos \phi_e$, componente activa de I_e .

Representa, a escala de potencias, la potencia total absorbida por fase.

BA : pérdidas en el núcleo y mecánicas por fase.

CB : pérdidas por efecto Joule en el estator por fase.

DC : pérdidas por efecto Joule en el rotor por fase.

DE : potencia útil en el eje por fase.

Deslizamiento: la recta ab de una longitud cualquiera se traza paralela a la recta de los pares. El punto a (proyección vertical de P) corresponde a deslizamiento 0 (marcha en vacío), y el punto b corresponde al deslizamiento 1 (rotor bloqueado). Dividiendo la recta ab en 100 partes iguales, se determina el deslizamiento para cualquier punto de operación:

$$s = \frac{ac}{ab} \times 100 = \frac{CD}{CE} \times 100$$

EC : torque.

TN : torque máximo.

HG : torque de arranque.

8.12.1 Demostraciones

1) PERDIDAS POR EFECTO JOULE

POSTULADOS : **HG** = pérdidas rotóricas por efecto Joule debido a I_{cc} .

GF = pérdidas estatóricas por efecto Joule debido a I_{cc} .

Se quiere demostrar que:

DC = pérdidas rotóricas por efecto Joule debido a I_e .

CB = pérdidas estatóricas por efecto Joule debido a I_e .

ED = potencia útil en el eje.

Es decir:

$$\frac{I_r^2}{I_r^2 \text{ (cc)}} = \frac{DC}{HG} = \frac{CB}{GF}$$

Demostración:

$$\Delta PEK \sim \Delta PEB \therefore \frac{PE}{PK} = \frac{PB}{PE} ; PE^2 = I_r^2 = PK \cdot PF$$

$$(PE = \bar{I}_e - \bar{I}_o = \bar{I}_r)$$

$$\Delta PHK \sim \Delta PHF \therefore \frac{PH}{PK} = \frac{PF}{PH} ; PH^2 = I_r^2 \text{ (cc)} = PK \cdot PF$$

Dividiendo ambas expresiones:

$$\frac{I_r^2}{I_r^2 \text{ (cc)}} = \frac{PB}{PF}$$

$$\Delta PDB \sim \Delta PHF \therefore \frac{PB}{PF} = \frac{BC}{FG} = \frac{DC}{HG}$$

por lo tanto:

$$\frac{\text{pérdidas por efecto Joule debido a } I_e}{\text{pérdidas por efecto Joule debido a } I_{cc}} =$$

$$\frac{I_r^2}{I_r^2 \text{ (cc)}} = \frac{PB}{PF} = \frac{CB}{GF} = \frac{DC}{HG}$$

2) RECTA DE POTENCIAS UTILES

Si se descuenta de la potencia total absorbida, proporcional a EA, las pérdidas en vacío BA, y las pérdidas por efecto Joule DB, resulta la potencia útil ED. Por esta razón, PH es llamada la recta de potencias útiles.

3) EFICIENCIA

Por definición:

$$\eta = \frac{\text{potencia útil entregada}}{\text{potencia total absorbida}}$$

por lo anteriormente demostrado:

$$\eta = \frac{ED}{EA}$$

4) DESLIZAMIENTO

Al final del capítulo 8.6 se demostró que $P_{Jr} = s \cdot P_{ch}$, donde P_{Jr} son las pérdidas por efecto Joule en el rotor y P_{ch} es la potencia transferida del estator al rotor a través del entrehierro.

Lucgo:

$$s = \frac{P_{Jr}}{P_{ch}} = \frac{DC}{EC}$$

Además:

$$\Delta PDC \sim \Delta Pab \therefore \frac{DC}{Pa} = \frac{PC}{ab} \longrightarrow DC \cdot ab = Pa \cdot PC$$

$$\Delta PEC \sim \Delta Pac \therefore \frac{Pa}{EC} = \frac{ac}{PC} \longrightarrow Pa \cdot PC = ac \cdot EC$$

$$\therefore \frac{DC}{EC} = \frac{ac}{ab} = \text{deslizamiento}$$

5) RECTA DE LOS TORQUES

El torque útil es:

$$T_u = \frac{P_u}{\omega}$$

donde $P_u = (1 - s) \cdot P_{ch}$ y $\omega = (1 - s) \cdot \omega_s$

Por lo tanto:

$$T_u = \frac{P_{ch}}{\omega_s}$$

de modo que el torque útil es proporcional a la potencia P_{ch} : $T_u = k' \cdot EC$.

Por lo tanto, las distancias entre la circunferencia y la recta PG representarán, a una cierta escala, los torques útiles del motor.

La tangente paralela a esta recta determinará el punto de torque máximo y HG representará el torque de arranque.

8.13 MOTORES DE DOBLE JAULA O DE BARRAS PROFUNDAS

8.13.1 Motores de doble jaula

El motor de jaula de ardilla simple es el más difundido de los motores de inducción, pero no permite insertar resistencias rotóricas para reducir la corriente y mejorar su torque de arranque; una variante de este motor que posee un rotor con doble jaula mejora, sin embargo, sus características de arranque.

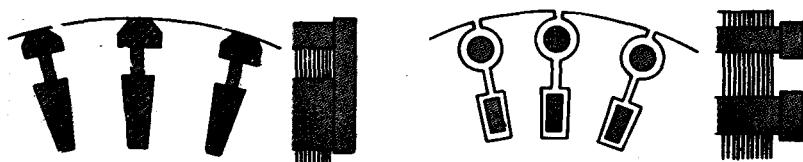


Fig. 8.15 Formas de la ranura y barras del rotor de doble jaula de ardilla.

La doble jaula consiste de dos juegos de barras situados uno fuera del otro tal como se aprecia en la Figura 8.15.

Las barras exteriores de pequeña sección tienen elevada resistencia y reducida inductancia de dispersión. Las barras interiores de mayor sección, tienen, por el contrario, reducida resistencia y elevada inductancia de dispersión.

En la Figura 8.16 puede verse un esquema aproximado de la distribución del flujo de dispersión por ranura, que muestra que la barra del rotor más grande encadena una mayor cantidad de flujo de dispersión y por lo tanto tiene una mayor inductancia de dispersión, que la barra superior.

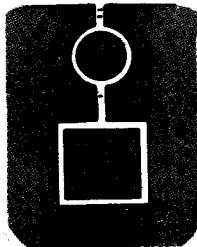


Fig. 8.16 Una gráfica del flujo de dispersión por ranura en un motor de doble jaula de ardilla.

En el arranque, la frecuencia de las corrientes del rotor es relativamente alta, igualando a la frecuencia del estator, y la reactancia de dispersión de la jaula interna es alta, tendiendo a suprimir la corriente en esa jaula.

Debido a su resistencia más alta y menor inductancia de dispersión, la jaula exterior predomina durante el arranque produciendo, por lo tanto, un alto torque de arranque.

Cuando el motor está operando a velocidad normal, la frecuencia del rotor es tan pequeña, que la reactancia de dispersión de la jaula interior es considerablemente menor que su resistencia, y las densidades de corriente en las dos jaulas son prácticamente iguales, aunque como la corriente de la jaula interna es varias veces mayor que la otra, el torque motor en esencia se crea en este caso por la jaula interior.

Debido a esto, la jaula interior se denomina jaula de trabajo. La resistencia efectiva del rotor es ahora baja, dando un deslizamiento bajo en el rango de rotación desde vacío hasta plena carga.

En la Figura 8.17 se representa en forma aproximada las curvas características de $T - \omega$ de las jaulas externa e interna y la curva resultante de ambas jaulas.

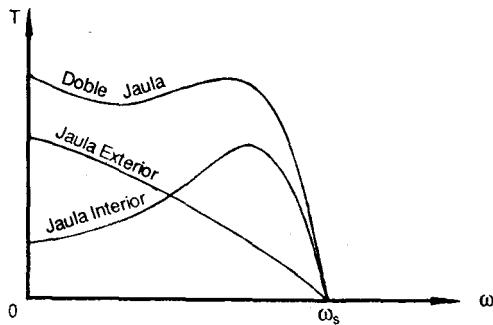


Fig. 8.17 Curvas de los torques motores de un motor de doble jaula de ardilla.

8.13.2 Motores de barras profundas

Los motores de barras profundas, lo mismo que los de doble jaula, tienen características de arranque mejoradas en comparación con los motores asíncronos simples.

En la Figura 8.18 se puede ver la forma de la ranura de un motor de éstos. Además de las barras de sección rectangular se usan también barras con sección de otras formas, por ejemplo, trapezoidal, en botella y otras, tal como puede verse en la Figura 8.18

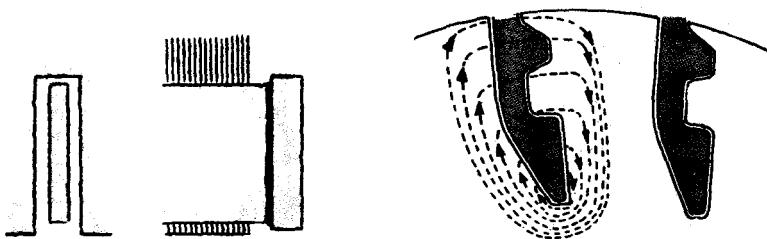


Fig. 8.18 Diversas formas de barras de rotores de motores de inducción de barras profundas.

En estos motores se emplea el fenómeno de desplazamiento de la corriente en las barras determinado por los flujos de dispersión de las ranuras.

En el arranque, la frecuencia del rotor es igual a la de la red.

En la Figura 8.18 se muestra el esquema del flujo de dispersión en una ranura del rotor. Se ve que los sectores internos de la barra son abrazados por un mayor número de líneas de flujo, por lo que en estos sectores se inducen mayores f.c.e.m. de dispersión.

Por consiguiente, en los sectores interiores circulan corrientes de menor intensidad, es decir, la corriente se desplaza hacia las partes exteriores del conductor, abarcando una menor área de conducción y aumentando por lo tanto la resistencia óhmica del rotor. Por esta razón, el motor de barras profundas tiene una corriente relativamente pequeña, siendo relativamente grande el torque de arranque.

A medida que el motor se acelera, la frecuencia de la corriente en el rotor disminuye. En este caso, el fenómeno de desplazamiento de la corriente se hace cada vez menos notable y la corriente se distribuye cada vez más uniformemente por la sección del conductor.

A velocidad normal, este motor tiene una resistencia óhmica normal, pero con una inductancia elevada del rotor, a causa de lo cual empeoran algo el f.p. y la capacidad de sobrecarga del motor.

8.13.3 Clases de diseño

Los motores de jaula de ardilla son clasificados por la NEMA como diseños A, B, C, D y F (Véase la Figura 8.19 (a) y (b)):

Los motores de diseño A, usualmente, tienen rotores de jaula simple de baja resistencia con buenas características de marcha a costa de una alta corriente de arranque y un torque de arranque moderado. Debido a la alta corriente de arranque, requiere un arranque a tensión reducida. Se aplica en el accionamiento de ventiladores, sopladores, máquinas-herramientas y bombas centrífugas.

Los motores de diseño B, son los más comunes y tienen el rotor en forma de doble jaula o de barras profundas. Se arrancan a tensión plena. Tienen aproximadamente el mismo torque de arranque que el diseño A con sólo un 75% de la corriente de arranque. Tiene las mismas aplicaciones que el diseño A.

Los motores de diseño C son de doble jaula o de barras profundas con una resistencia del rotor más alta que el diseño B, con un torque de arranque más alto pero con una menor eficiencia y un deslizamiento algo mayor que para el diseño B. Se aplica en cargas que demandan una velocidad casi constante y un torque de arranque regularmente alto. La corriente de arranque es relativamente baja. Se aplica en el accionamiento de compresores, transportadores, trituradoras y bombas reciprocas.

Los motores de diseño D tienen, generalmente, un rotor de jaula simple de alta resistencia que le confiere un alto torque de arranque pero con un alto deslizamiento y una baja eficiencia. Tienen el torque de arranque más alto entre todos los diseños. Se usan para cargas de alta inercia tales como estampadoras, punzonadoras y tijeras.

Los motores de diseño F son, usualmente, de alta velocidad conectados directamente a cargas tales como sopladores o bombas centrífugas que requieren sólo torques de arranque bajos. El rotor tiene una baja resistencia por lo que el motor presenta un bajo deslizamiento y una alta eficiencia pero un bajo torque de arranque.

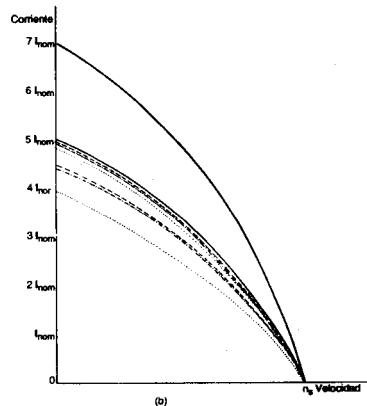
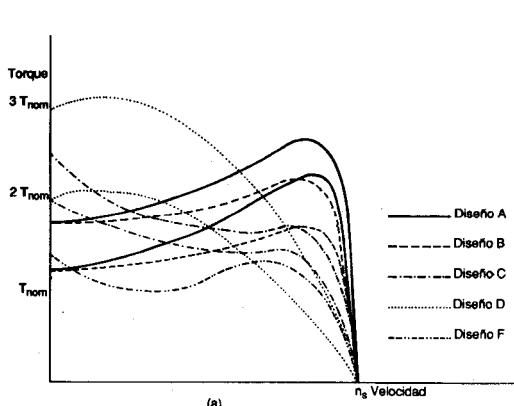


Fig. 8.19 Clases de diseño de motores de jaula de ardilla trifásicos
 (a) Curvas de torque
 (b) Curvas de intensidad de corriente

8.14 MOTORES DE DOS O MAS TENSIONES

El estator de los motores asíncronos trifásicos puede tener uno o dos grupos de bobinas con seis terminales por cada grupo, tal como puede verse en la Figura 8.20.

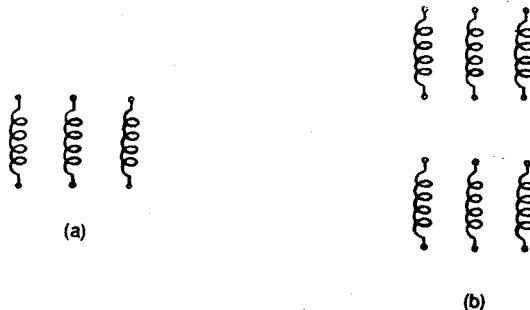


Fig. 8.20 (a) Estotor de un grupo de bobinas
(b) Estotor de dos grupos de bobinas

Como se sabe, las tres fases de una máquina con un solo grupo de bobinas se pueden conectar sólo de dos formas distintas, en estrella para la mayor tensión (por ejemplo 380 V), y en triángulo para la menor tensión (p.e. 220V). Esto es lo que se denomina un motor normal de dos tensiones. Para una mejor comprensión puede verse la Figura 8.20 (c)



Fig. 8.20 (c) Conexiones estrella y triángulo para las tensiones mayor y menor respectivamente.

Sin embargo, se construyen también motores de dos grupos de bobinas con cada uno de los cuales se pueden hacer las conexiones que se ven en la Figura 8.21.

Las designaciones que se suele dar a cada una de estas configuraciones son las siguientes:

- a) doble triángulo paralelo : V
- b) doble estrella paralelo : $\sqrt{3} V$

c) triángulo serie

$$: \quad 2 \text{ V}$$

d) estrella serie

$$: \quad 2\sqrt{3} \text{ V}$$

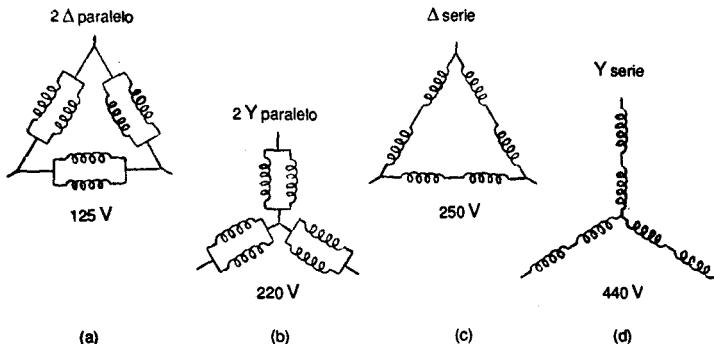


Fig. 8.21 Combinaciones usuales de las bobinas del estator en motores trifásicos, para lograr su funcionamiento a varias tensiones.

La importancia de conocer que estas máquinas pueden trabajar con varias tensiones es por el peligro que se corre de malograr el bobinado cuando se aplica equivocadamente una sobretensión lo cual producirá la sobresaturación del núcleo con la consiguiente sobrecorriente de magnetización que terminará quemando el aislamiento de la máquina.

De allí que deba seguirse estrictamente las indicaciones dadas por el fabricante en la placa y en la contratapa de la caja de bornes de cada motor.

En la Tabla 8.2 se da algunos ejemplos de bobinados diseñados para diferentes tensiones, combinaciones propias de motores trifásicos europeos.

Tabla 8.2

Tabla 8.2

Disposición Nº	Conexiones			
	2 D //	2 Y //	D serie	Y serie
1	110 V	190 V	220 V	380 V
2	125 V	220 V	250 V	440 V
3	150 V	250 V	300 V	500 V
4	220 V	380 V	440 V	-
5	250 V	440 V	500 V	-

Las tensiones de cada fila horizontal son válidas para la frecuencia de diseño.

8.15 METODOS DE ARRANQUE

8.15.1 Arranque de los motores de jaula de ardilla

Cuando se aplica tensión a un motor, éste absorbe una gran intensidad de la red y puede provocar una caída de tensión apreciable en la línea de alimentación pudiendo llegar a afectar el funcionamiento de otros receptores.

Esta caída de tensión es tan grande que, a veces, se percibe en la disminución del brillo de las lámparas de alumbrado.

Los motores de inducción absorben en el arranque una corriente de 5 á 7 veces su valor nominal.

Los motores pequeños pueden arrancarse directamente desde la red; los motores medianos suelen tener arranque manual; y, los motores grandes se arrancan en forma automática.

El objeto de los arrancadores es limitar la corriente de arranque. Como las características del rotor de un motor de jaula de ardilla han sido determinadas de una vez para siempre por el fabricante, los diversos métodos de arranque permiten hacer variar sólo la tensión en bornes del estator.

En estos motores, la reducción de la corriente de arranque está acompañada de una fuerte reducción del torque.

8.15.1.1 Arranque directo o a tensión plena

El arranque directo es un método obtenido en un solo tiempo; el estator del motor se acopla directamente a la red, tal como puede verse en la Figura 8.22. (t_{arr} es el tiempo típico de conexión del arrancador, en segundos)

$$I_{arr} : 4 \text{ á } 8 I_{nom}$$

$$T_{arr} : 0.6 \text{ á } 1.5 T_{nom}$$

$$t_{arr} : 2 \text{ á } 3 \text{ s}$$

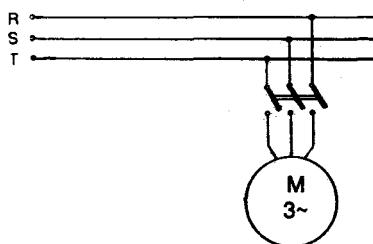


Fig. 8.22 Arranque directo de un motor de jaula de ardilla.

El motor es arrancado con sus características naturales con una fuerte corriente de arranque I_{arr} . Este método es ideal si la instalación permite esta punta de intensidad y si el torque de arranque T_{arr} del motor (fijado por el tipo de

construcción de su rotor en 1.5 torque nominal T_{nom} en promedio) es el conveniente para la puesta en marcha del equipo.

Este método permite arrancar las máquinas incluso a plena carga, si la red admite la I_{arr} . Es, pues, indicado para las máquinas de pequeña y mediana potencia.

Sin embargo, en vista que el T_{arr} es de 1.5 T_{nom} , este método no se recomienda si el arranque debe hacerse en forma lenta y progresiva (algunos montacargas y fajas transportadoras por ejemplo).

Para remediar los inconvenientes de la caída grande de tensión en la línea, se prohíbe, a veces, el arranque directo de motores de inducción por encima de una cierta potencia.

Otras veces se impone la relación entre la I_{arr} y la I_{nom} en función de la potencia de los motores.

El motor de jaula es el único que puede acoplarse directamente a la red con un equipo sencillo, debido a que sólo el bobinado del estator está en contacto con el exterior a través de la caja de bornes.

8.15.1.2 Arranque a tensión reducida

a) Arranque estatórico por resistencias

La alimentación a tensión reducida del motor, durante el primer tiempo se obtiene poniendo en serie con cada fase del estator una resistencia que es cortocircuitada luego en un solo tiempo. Ver la Figura 8.23.

- $I_{arr} : 4.5 I_{nom}$
- $T_{arr} : 0.6 \text{ á } 0.85 T_{nom}$
- $t_{arr} : 7 \text{ á } 12 \text{ s}$

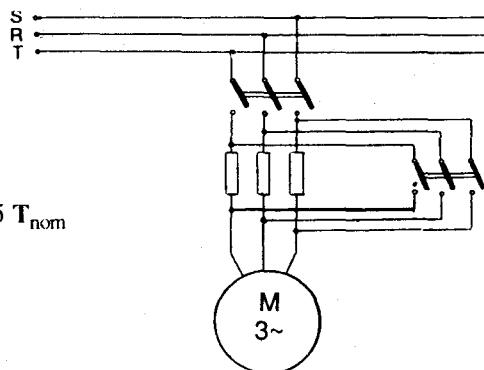


Fig. 8.23 Arranque estatórico por resistencias.

Los acoplamientos eléctricos de los devanados respecto a la red no se modifican durante el arranque. La I_{arr} que recorre la línea de alimentación se reduce proporcionalmente a la tensión aplicada al motor, mientras que el torque se reduce con el cuadrado de la tensión.

El T_{arr} es relativamente pequeño (valor típico: 0.75 T_{nom}) para una I_{arr} todavía importante (valor típico: 4.5 I_{nom}).

La tensión aplicada en los bornes del motor no es constante durante el período de aceleración.

La intensidad máxima, cuando se aplica tensión al motor disminuye a medida que el motor acelera; la caída de tensión en los bornes de la resistencia disminuye y la tensión en los bornes del motor aumenta progresivamente.

Como el torque es proporcional al cuadrado de la tensión, los valores obtenidos del torque son más elevados para un T_{arr} dado que con un sistema que suministra una tensión reducida de valor fijo.

En la Figura 8.24 puede verse las curvas características (en línea gruesa) de torque y de corriente en función de la velocidad para este método de arranque.

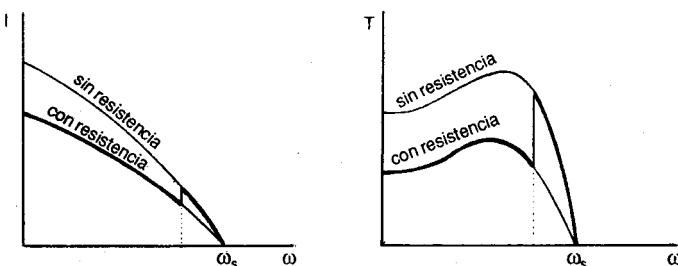


Fig. 8.24 Curvas características para el método de arranque por resistencias en serie con el estator.

El paso a tensión plena se realiza para una velocidad mayor que 0.8 veces la velocidad de sincronismo N_s , con puntas de torque y de corriente relativamente pequeñas. La velocidad va aumentando progresivamente y sin cambios bruscos. Por otra parte, es posible modificar los valores de la intensidad y del torque de arranque adaptando el valor de la resistencia.

El arranque estatórico por resistencias es conveniente para la puesta en marcha de las máquinas con torque resistente creciente a cerca de la mitad del torque nominal e incluso en las máquinas potentes y de gran inercia.

Sin embargo, este tipo de arranque presenta un inconveniente. Para una reducción de torque dado, por ejemplo, en la relación $k \cdot T_{arr}$, sólo reduce la corriente de arranque con una relación muy pequeña $\sqrt{k} \cdot T_{arr}$.

Por el contrario, la presencia de una importante resistencia prácticamente no inductiva, reduce considerablemente la amplitud de la I_{arr} , durante el régimen transitorio de puesta en tensión, lo que es, a menudo, una ventaja determinante.

b) Arranque por arrollamiento estatórico dividido

El esquema de este método de arranque puede verse en la Figura 8.25

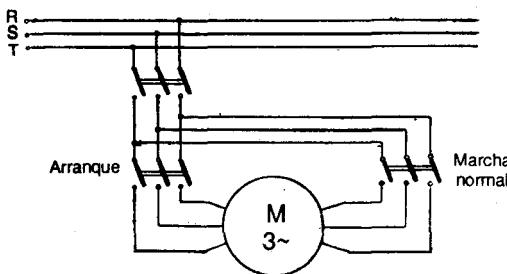


Fig. 8.25 Método de arranque por arrollamiento estatórico dividido.

Este método es conveniente en los motores fabricados para funcionar con dos tensiones diferentes (220 y 440 por ejemplo) ya que para esto requiere dos arrollamientos trifásicos que se conectan en serie para la tensión mayor (440 V) y, en paralelo, para la menor (220 V). El método es aplicable para cuando el motor debe funcionar con la tensión menor.

En el arranque, se conecta sólo uno de los arrollamientos, presentando de este modo mayor impedancia; la I_{arr} se reduce al 65%. Una vez arrancado, se conecta el segundo arrollamiento.

c) Arranque por autotransformador

El motor es alimentado a tensión reducida mediante un autotransformador, el cual se pone fuera de servicio cuando el arranque termina. En la Figura 8.26 puede verse un esquema del método.

$$I_{arr} : 1.7 \text{ a } 4 I_{nom}$$

$$T_{arr} : 0.4 \text{ a } 0.85 T_{nom}$$

$$t_{arr} : 7 \text{ a } 12 \text{ s}$$

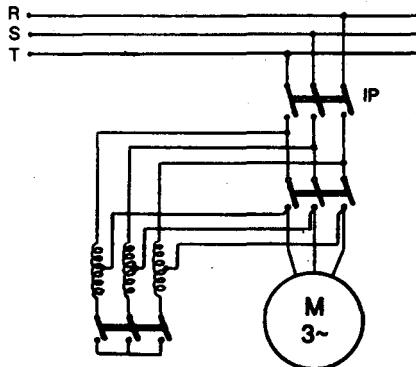


Fig. 8.26 Arranque por autotransformador.

El arranque se efectúa en tres tiempos:

- 1º Puesta en estrella del autotransformador; después, cerrar el interruptor principal IP. El motor arranca, ahora, a tensión reducida.
- 2º Apertura del punto neutro. Una fracción de devanado del autotransformador, insertado en serie con cada fase del estator, se comporta como una inductancia.
- 3º Un tercer interruptor acopla el motor a la tensión plena de la red.

En la Figura 8.27 puede verse las curvas características de torque y corriente en función de la velocidad para este método.

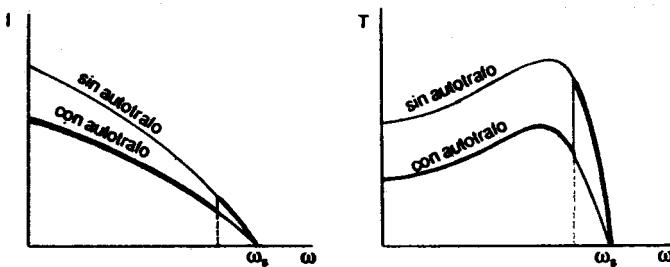


Fig. 8.27 Curvas características del motor en el método de arranque por autotransformador.

A lo largo del primer tiempo, el torque se reduce proporcionalmente al cuadrado de la tensión y la corriente de línea en una relación muy próxima, ligeramente más elevada que la corriente magnetizante del autotransformador.

Para determinar la relación de transformación r del autotransformador que permite reducir la corriente de la línea en el arranque en un factor k , nos podemos valer de la Figura 8.28.

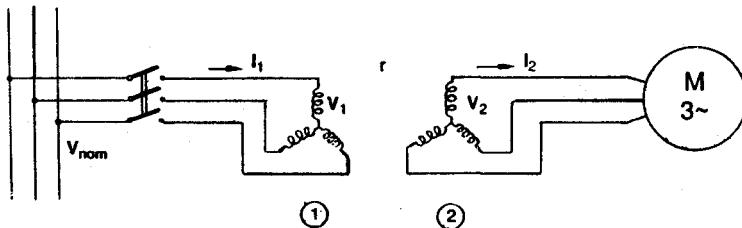


Fig. 8.28 Circuito para la solución del problema de cálculo de la relación de transformación.

En primer lugar, se cumple lo siguiente:

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

En segundo lugar, en el lado del motor, el cual es arrancado a la tensión reducida V_2 , se cumple:

$$\frac{V_{\text{nom}}}{I_{\text{arr}}} = \frac{V_{\text{red}}}{I_{\text{red}}} = \frac{V_2}{I_2}$$

Finalmente, como dato del problema, se sabe que la corriente de la línea I_1 es una fracción de la corriente I_{arr} del motor:

$$I_1 = \frac{I_{\text{arr}}}{k}$$

Haciendo los remplazos respectivos, se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} r &= \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_{\text{arr}} \cdot V_2}{I_1 \cdot V_{\text{nom}}} = \frac{I_{\text{arr}}}{I_1 \cdot r} \\ &= \frac{k \cdot I_1}{I_1 \cdot r} = \frac{k}{r} \end{aligned}$$

De donde se deduce que la relación de transformación es igual a:

$$r = \sqrt{k}$$

En vista que el autotransformador se usa sólo durante el breve período de puesta en marcha, se prefiere utilizar, por razones de espacio y de economía, dos autotransformadores monofásicos conectados en **V** (delta abierta).

Este método de arranque se usa sobre todo en los motores de gran potencia. Se prevén varias tomas (taps) en el autotransformador de modo que sea posible ajustar la tensión de arranque en función de la máquina arrastrada.

d) Arranque estrella-triángulo

Este método sólo puede aplicarse a los motores donde los dos extremos de los tres devanados del estator tengan salida sobre la caja de bornes y donde el acoplamiento en triángulo corresponda a la tensión de la red (por ejemplo, para una red de 380 V es preciso un motor de 380 V D / 660 V Y).

Este método consiste en arrancar el motor conectando sus devanados en

estrella. Estos se encuentran, entonces, alimentados con una tensión igual a la tensión de la red dividida por $\sqrt{3}$, o sea, a un 58% de la tensión nominal.

En la Figura 8.29 puede verse un esquema mostrando el método de arranque estrella-triángulo.

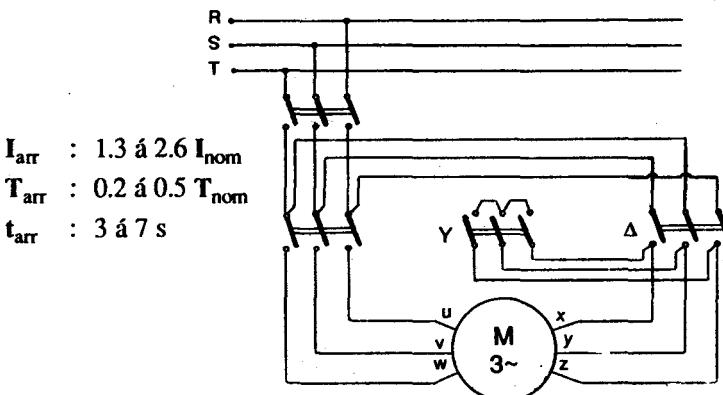


Fig. 8.29 Arrancador estrella-triángulo.

El torque se reduce con el cuadrado de la tensión de alimentación y es igual a un tercio del T_{arr} en un arranque directo.

La corriente en la línea de alimentación se reduce en la misma proporción. A continuación se demuestran estas afirmaciones.

En la Figura 8.30 (a) se muestra el circuito eléctrico equivalente del estator cuando está conectado en triángulo y en la Figura 8.30 (b), el circuito monofásico equivalente reducido a estrella, para lo cual la impedancia por fase se divide entre 3 (tres).

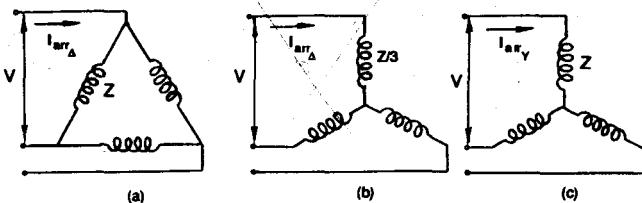


Fig. 8.30

Por otro lado, cuando el bobinado del estator está conectado en estrella, el circuito equivalente se muestra en la Figura 8.30 (c), circuito que coincide con el respectivo equivalente monofásico.

A partir de estas figuras, se deduce las siguientes afirmaciones:

$$I_{arrD} = \frac{3V}{\sqrt{3}z} \quad I_{arrY} = \frac{V}{\sqrt{3}z}$$

de donde se obtiene, por simple división, que:

$$I_{arrY} = I_{arrD} / 3$$

Para los torques útiles, se cumplen las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} T_{arrD} &= \frac{3}{\omega_s} I_{rD}^2 \left(\frac{R_r}{3} \right) \\ T_{arrY} &= \frac{3}{\omega_s} I_{rY}^2 \cdot R_r \\ &= \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{I_{rD}}{3} \right)^2 \cdot 3 \left(\frac{R_r}{3} \right) \\ &= T_{arrD} / 3 \end{aligned}$$

La intensidad en cada devanado decrece sólo en relación a 0.58, pero este valor no tiene porqué considerarlo el usuario.

Los valores típicos de arranque son para la corriente 2.0 I_{nom} y para el torque, 0.5 T_{nom} . Ver la Figura 8.31.

El arranque Y-D se indica para aquellos equipos que arranquen en vacío o que tengan un torque resistente pequeño.

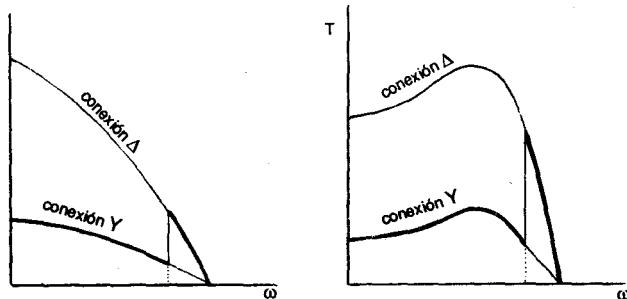


Fig. 8.31 Curvas características para el arranque estrella-triángulo.

En el segundo tiempo, se suprime el acoplamiento en estrella y se acoplan los devanados en triángulo. Cada devanado, entonces, está alimentado con la

tensión de la red; el motor recupera sus características naturales.

El torque motor es pequeño durante todo el acoplamiento en estrella, y la velocidad estabilizada al final de este tiempo, puede ser muy baja si el torque resistente es elevado (por ejemplo, el caso de una máquina centrífuga).

Aparecen, entonces, puntas importantes de corriente y de torque al pasar de estrella a triángulo. Estas condiciones pueden conducir a renunciar al arrancador Y-D para máquinas de características centrífugas, sobretodo, más allá de una determinada potencia (por ejemplo, 30 kW).

Por otra parte, es preciso señalar que la corriente que atraviesa los devanados del motor es discontinua; en efecto, es interrumpida en el momento de la apertura del contactor Y para establecerse de repente cuando cierra el contactor D (con plena tensión de la red).

Siendo las características de estos devanados muy inductivas, el paso al acoplamiento en D se acompaña de puntas de corriente transitorias muy altas.

A partir de una cierta potencia, es aconsejable renunciar al acoplamiento Y-D o bien utilizar una variante que permita limitar los fenómenos transitorios (temporizando el paso Y a D o intercalando una resistencia en serie con los devanados acoplados en triángulo).

8.15.2 Arranque de los motores de rotor bobinado

8.15.2.1 Arranque rotórico por resistencias

Un motor de rotor bobinado no puede arrancar directamente con los devanados del rotor cortocircuitados, sin provocar puntas de torque y de corriente inadmisibles.

Es necesario que, al mismo tiempo que se alimenta al estator a plena tensión de la red, se introduzcan resistencias rotóricas que serán progresivamente cortocircuitadas.

El cálculo de la resistencia insertada en cada fase permite determinar de forma rigurosa la curva torque-velocidad obtenida: para un torque dado, la velocidad es tanto más baja cuanto más alta sea la resistencia.

La resistencia debe ser insertada totalmente en el momento del arranque y, cuando esté totalmente cortocircuitada, se alcanzará la velocidad nominal.

La corriente absorbida es sensiblemente proporcional al torque proporcionado o, por lo menos, sensiblemente superior al valor teórico. Por ejemplo, para un torque de arranque igual a $2.0 T_{nom}$, la corriente de arranque será aproximadamente $2.0 I_{nom}$.

Esta punta es considerablemente más pequeña y el torque máximo de arranque, más elevado que el de un motor de jaula para el cual los valores típicos son del orden de $6.0 I_{nom}$ para $1.5 T_{nom}$. La forma de conexión se ve en la Figura 8.32.

$$\begin{aligned}I_{arr} &< 2.5 I_{nom} \\T_{arr} &< 2.5 T_{nom} \\t_{arr} &: 2.5 \text{ a } 5 \text{ s}\end{aligned}$$

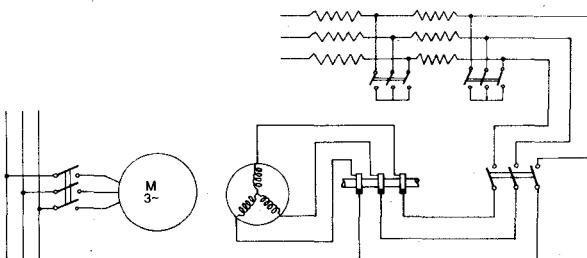


Fig. 8.32 Circuito de arranque de un motor de rotor bobinado.

En la Figura 8.33 se puede ver las curvas de torque y de corriente en función de la velocidad para este tipo de arranque.

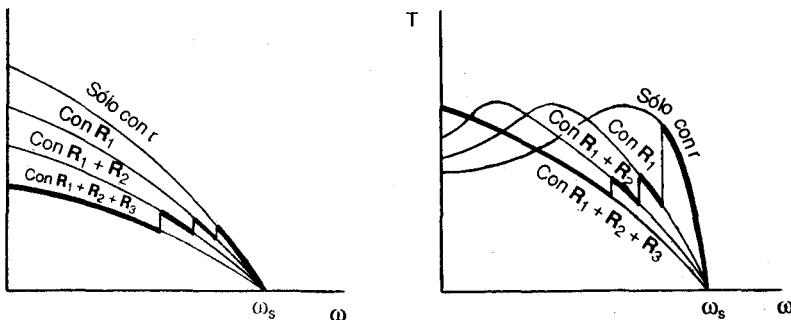


Fig. 8.33 Curvas características para el arranque por resistencias rotóricas.

El motor de anillos, con un arranque rotórico, se utiliza en todos los casos en que las puntas de corriente deben ser mínimas y en todas las máquinas que arranquen a plena carga.

Por otra parte, este tipo de arranque es extremadamente flexible, porque es fácil de ajustar el número y el aspecto de las curvas de torque y corriente en función de la velocidad de acuerdo a las características de la carga (torque resistente, valor de la aceleración, punta máxima de corriente, etc.)

8.16 LA INVERSION DE MARCHA

En muchos casos y aplicaciones el motor asincrónico trifásico, ya instalado, requiere que el sentido de giro sea invertido en forma definitiva o periódica, según el caso.

La única forma de invertir el sentido de giro del motor consiste en conmutar (intercambiar) dos conductores de línea cualesquiera de los que están conectados al estator. Véase la figura 8.34.

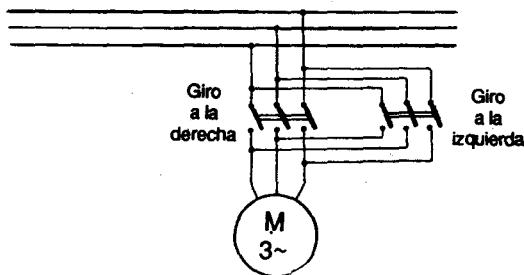
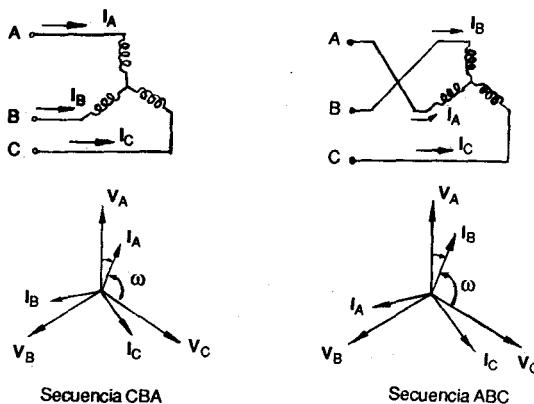


Fig. 8.34 Inversión del sentido de giro de un motor asíncrono trifásico.

Como se sabe, los motores asíncronos funcionan bajo el principio de la existencia de un campo magnético giratorio inductor en el estator que es el que en definitiva arrastra al rotor. Dicho campo gira de acuerdo a la secuencia de fases impuesta por las corrientes que circulan por sus devanados.

En la Figura 8.35 se explica en forma fasorial el principio de la inversión de la secuencia de fases de las corrientes al producirse el intercambio en sólo dos terminales de bobinas del estator.



Secuencia CBA

Secuencia ABC

Fig. 8.35 Explicación fasorial del cambio de giro.

Téngase en cuenta que de volverse a intercambiar otras dos líneas cualesquiera, el motor volverá a girar en el mismo sentido inicial.

8.17 LOS MOTORES DE DOS VELOCIDADES

El motor asíncrono con rotor de jaula es una máquina muy difundida en todas las aplicaciones industriales. Tal motor es constructivamente muy sim-

ple, robusto, de bajo costo, de fácil mantenimiento y con prestaciones eléctricas y mecánicas plenamente satisfactorias.

El motor de jaula presenta la característica de ser una máquina de velocidad prácticamente constante, ligada a la frecuencia de la red y al número de polos.

Sin embargo, en muchas aplicaciones industriales, se requiere una regulación a dos (en algunos casos, más) velocidades.

Afortunadamente, es posible obtener un motor de dos o varias velocidades creando en el estator combinaciones de bobinados que correspondan a números de polos diferentes.

Motores de jaula a dos velocidades, con un solo arrollamiento, son realizados desde hace tiempo pero limitados a la relación 1:2. Sin embargo, existen aplicaciones que requieren una relación de velocidades diferente de la relación 1:2.

Hasta ahora, dos velocidades en cualquier relación, podían ser obtenidas con dos arrollamientos estatóricos distintos, lo cual involucra un sobredimensionamiento del motor debido al hecho que, a cualquier velocidad, es utilizado uno solo de los dos arrollamientos, permaneciendo el otro desenergizado.

En el país se ha desarrollado la técnica para la realización de los motores llamados "de polos de amplitud modulada" (PAM). Estos motores pueden trabajar a dos velocidades, en cualquier relación, con un solo arrollamiento, que puede funcionar en una u otra velocidad, mediante el uso de un simple conmutador.

8.17.1 Motores de polos comutables

El cambio de velocidad por conmutación de polos se consigue mediante la conexión Dahlander (Figura 8.38), que consiste en agrupar las dos bobinas de cada fase mediante un conmutador.

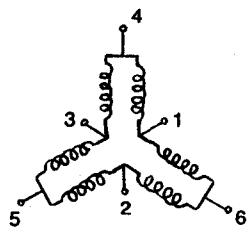
El devanado del estator puede disponerse de forma que, con un simple cambio en las conexiones de las bobinas, el número de polos varíe en la relación de 2 a 1 (4 y 2 polos, 8 y 4 polos, 12 y 6 polos), con lo que puede seleccionarse dos velocidades síncronas distintas.

Esta clase de motor contiene seis bornes.

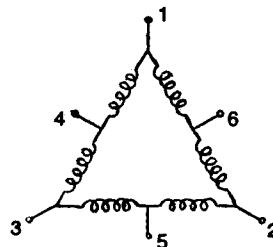
En función de sus características, estos motores pueden ser de torque constante, potencia constante o de torque y potencia variables.

Para una de las velocidades, la red está conectada a los tres bornes correspondientes; para la segunda, éstos están unidos entre sí mientras la red queda conectada con los otros tres bornes.

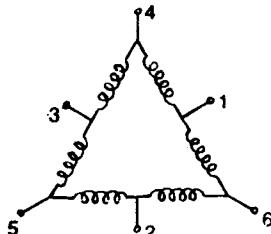
En la Figura 8.36 y en la Tabla 8.3 se muestra la disposición de los terminales y conexiones del estator en motores asíncronos trifásicos con bobinado simple comutable para dos velocidades.



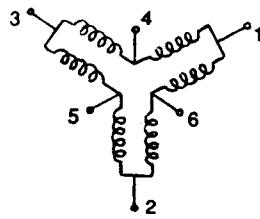
(a) 2Y//
velocidad alta



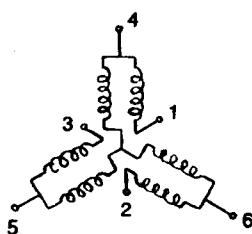
(b) Dserie
velocidad baja



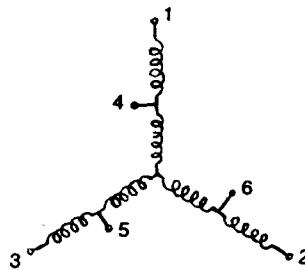
(c) Dserie
velocidad alta



(d) 2Y//
velocidad baja



(e) 2Y//
velocidad alta



(f) Yserie
velocidad baja

Fig. 8.36 Disposición de los terminales para motores de dos velocidades de polos comutables: (a) y (b) torque constante; (c) y (d), potencia constante; (e) y (f), torque y potencia variables.

En motores de par constante, la máxima potencia de salida, cuando opera a baja velocidad, se reduce a la mitad del valor correspondiente a la potencia desarrollada a la mitad de la velocidad de régimen. Véase la curva (a) de la Figura 8.37.

Estos motores se aplican en aquellos accionamientos que requieran el mismo torque en cualquiera de las dos velocidades, por ejemplo, con cargas en las que los rozamientos sean predominantes.

En motores de potencia constante, el torque máximo a baja veloci-

Tabla 8.3

Disposición de las conexiones del estator en motores con conexión Dahlander

(a) y (b) Conexiones de torque constante				
velocidad	hilos línea	unir juntos	polaridad bobinado	conexión bobinado
baja	1-2-3	-----	polos comutables	Dserie
alta	4-5-6	1-2-3	convencional	2Y//
(c) y (d) Conexiones de potencia constante				
velocidad	hilos línea	unir juntos	polaridad bobinado	conexión bobinado
baja	1-2-3	4-5-6	polos comutables	2Y//
alta	4-5-6	-----	convencional	D serie
(e) y (f) Conexiones de torque y potencia variables.				
velocidad	hilos línea	unir juntos	polaridad bobinado	conexión bobinado
baja	1-2-3	-----	polos comutables	Y serie
alta	4-5-6	1-2-3	convencional	2Y//

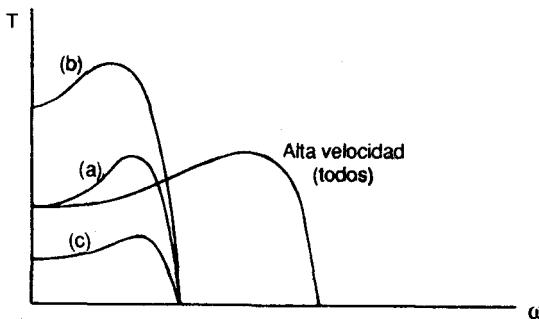
Tabla 8.3

Fig. 8.37 Curvas de torque-velocidad para motores de polos comutables.

(a) de torque constante, (b) de potencia constante, (c) de torque y potencia variables.

dad es el doble que el desarrollado a alta velocidad. Véase la curva (b) en la Figura 8.37.

Estos motores son los más costosos por ser físicamente los de mayor tamaño. Se aplican en cargas que requieren potencia constante como las máquinas-herramientas.

En motores de torque y potencia variables, la máxima potencia de salida a baja velocidad es la cuarta parte de la potencia desarrollada a alta velocidad. Véase la curva (c) en la Figura 8.37.

Estos motores se aplican en el accionamiento de cargas que, a menor velocidad, requieren menor torque, por ejemplo, los ventiladores y las bombas centrífugas.

El arranque de los motores de polos comutables se realiza, a menudo, directamente tanto en alta como en baja velocidad.

Generalmente, estos motores tienen un rendimiento y un factor de potencia bajos.

En la Figura 8.38 se muestra una explicación más detallada para una de las conexiones de cómo se realiza el cambio del número de polos para una de las fases.

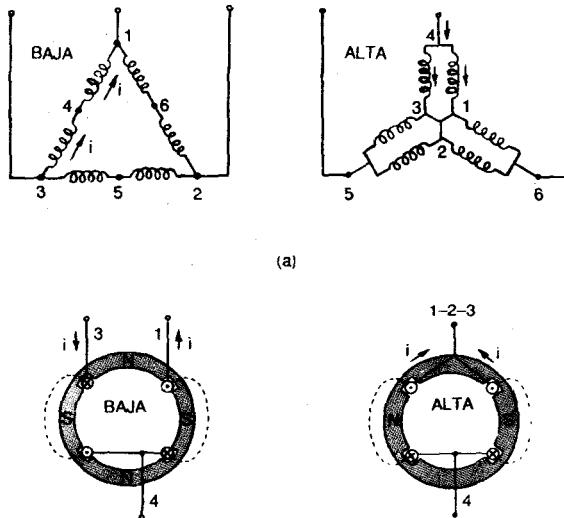


Fig. 8.38 Conexión Dahlander.

- Conexión del devanado del estator para 4 y 2 polos.
- Disposición de una fase (una espira por polo).

En triángulo se tiene, así, doble número de polos que en doble estrella. Con la disposición de las bobinas según la Figura 8.38 se producen cuatro o dos polos respectivamente.

8.17.2 Motores de devanados estatóricos independientes

Este tipo de motores contiene dos arrollamientos estatóricos eléctricamente independientes que permite obtener dos velocidades en una relación cualquiera.

Los devanados para la velocidad baja deben soportar los esfuerzos mecánicos y eléctricos que resultan del funcionamiento del motor en alta velocidad. A veces, tal motor, funcionando en baja velocidad, absorbe una intensidad mayor que en alta velocidad.

Es igualmente posible la realización de motores de tres o cuatro velocidades, acoplando los polos sobre uno de los devanados estatóricos o sobre los dos. Esta solución exige tomas suplementarias en los devanados.

En la Figura 8.39 puede verse un esquema de funcionamiento de estos motores.

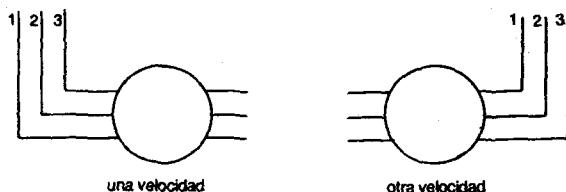


Fig. 8.39 Motor de jaula con dos arrollamientos estatóricos distintos.

8.17.3 Motores con polos de amplitud modulada

Delcrosa ha desarrollado la técnica para la realización de los arrollamientos llamados "de polos de amplitud modulada" (PAM).

Esta técnica permite realizar un motor de jaula de dos velocidades, en cualquier relación, con un solo arrollamiento que puede funcionar en una u otra velocidad mediante el uso de un simple conmutador.

La principal ventaja de un motor PAM, respecto a un motor tradicional de dos arrollamientos, es que todo el cobre del arrollamiento estatórico trabaja en ambas velocidades.

Por consiguiente, los motores PAM son más ligeros y menos costosos que los motores de dos arrollamientos de iguales potencias y poseen, además, un rendimiento y una capacidad térmica mayores.

El aumento de costo, respecto a un motor normal de una velocidad, es modesto pero sensiblemente inferior a aquel relativo a un motor de dos arrollamientos separados.

Otra ventaja es que el motor PAM requiere sólo seis terminales y el cambio de velocidad se realiza de un modo muy simple mediante un conmutador común.

Los motores PAM son particularmente adecuados para el accionamiento de ventiladores y bombas centrífugas, fajas transportadoras, compresoras, mezcladoras para industrias químicas, máquinas-herramientas y, en general, de cualquier máquina que requiera velocidad variable en su accionamiento.

Los motores PAM presentan la posibilidad de reducir el stock de motores de reposición, al disponer de dos velocidades que pueden usarse independientemente.

Los motores PAM pueden ser proyectados para funcionamiento con torque constante, potencia constante o con torque variable con el cuadrado de la velocidad (por ejemplo, para el accionamiento de bombas y ventiladores centrífugos).

8.18 EL FRENADO ELECTRICO

El cumplimiento correcto del proceso de producción requiere en toda una serie de instalaciones un frenado rápido y suave del motor.

El frenado se puede realizar por vía mecánica o eléctrica, pero el frenado eléctrico posee una serie de ventajas ante el frenado mecánico, en particular en aquellos casos cuando se exige una regulación precisa del momento de parada y suavidad de la operación.

Existen tres métodos principales de frenado eléctrico de los motores asincrónicos: el frenado por contracorriente, el frenado por generador y el frenado dinámico.

8.18.1 Frenado por contracorriente

El principio consiste en que después de haber desconectado el motor de la red y girando todavía, se le reconecta a la red pero en sentido inverso. Esta es una forma de frenado muy eficaz pero que exige desconectar el motor nuevamente, antes de que empiece a girar en sentido contrario.

Al frenar el motor por este método se cambia el sentido de giro del campo conmutando dos conductores de línea cualesquiera de los que están conectados al estator.

En este caso, el rotor gira en sentido contrario al campo con el deslizamiento $s > 1$.

8.18.1.1 Caso del motor de jaula

Antes de adoptar este sistema es absolutamente necesario asegurarse que el motor es capaz de soportar los frenados por contracorriente en el servicio deseado.

En efecto, además de los esfuerzos mecánicos, este método impone esfuer-

zos térmicos importantes en el rotor; la energía correspondiente a cada frenado (deslizamiento y energía cinética) es disipada en la jaula.

En el momento del frenado, las puntas de corriente y el torque son bastante superiores a las producidas durante el arranque.

Con el fin de obtener un frenado sin brusquedad, se conecta una resistencia en serie con cada fase del estator (el torque y la corriente son entonces reducidos como en el caso del arranque estatórico). Véase la Figura 8.40.

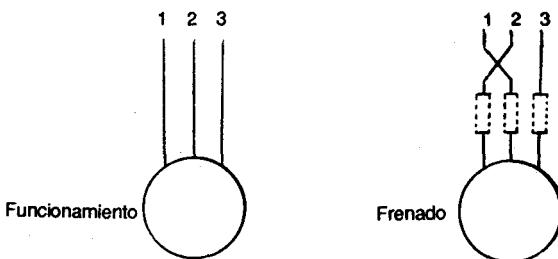


Fig. 8.40 Frenado por contracorriente de un motor asincrónico de jaula de ardilla.

Los inconvenientes del frenado por contracorriente de un motor de jaula son tales, que este procedimiento no está generalizado más que en determinadas aplicaciones típicas, principalmente de pequeña potencia.

8.18.1.2 Caso del motor de rotor bobinado

Con el fin de limitar la punta de corriente y de torque, es imprescindible, antes de acoplar el motor en contracorriente, volver a introducir las resistencias rotóricas utilizadas en el arranque. A menudo, es preciso añadir una sección suplementaria llamada "de frenado".

El torque de frenado puede ser fácilmente regulado al valor deseado eligiendo una resistencia rotórica conveniente.

En el momento de la inversión, la tensión rotórica es casi el doble de la tensión rotórica en la parada, lo que impone, a veces, precauciones particulares de aislamiento.

Una gran cantidad de energía se disipa en las resistencias: energía de deslizamiento tomada de la red y energía cinética restituida por la parada de las masas en movimiento. Con este sistema, es posible retener una carga movida a una velocidad moderada. La característica es muy inestable (fuertes variaciones de velocidad para pequeñas variaciones de torque).

Otro método de frenado por contracorriente, si el motor es de rotor bobinado, se muestra esquemáticamente en la Figura 8.41. Para limitar la sobre-corriente, en el circuito del rotor se intercala una resistencia óhmica.

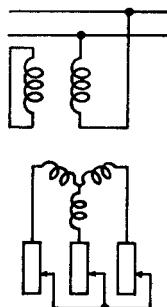


Fig. 8.41 Circuito de frenado de un motor asíncrono de rotor bobinado.

Este método se caracteriza porque, en primer lugar, durante el frenado, el estator del motor se conecta a la red como monofásico y, en segundo lugar, porque dos devanados de fase están cortocircuitados.

Es, sobre todo, de gran importancia esto último, puesto que sin el circuito cortocircuitado, no estaríamos frenando el motor y tendríamos un simple motor monofásico.

El análisis de este circuito demuestra que todo sucede como si tuviéramos en un mismo árbol dos motores trifásicos que desarrollan torque de sentidos opuestos.

Las características de frenado de este circuito son favorables.

Este método presenta las siguientes desventajas, aunque sin mayor importancia en la mayoría de los casos:

- Una peor utilización de la máquina monofásica en comparación con la trifásica.
- Una influencia desfavorable de la carga monofásica en la simetría de la tensión de la red trifásica.
- Un factor de potencia reducido de la máquina.

8.18.2 Frenado por generador

Este método se emplea principalmente en los motores de dos velocidades (de polos comutables).

Si el motor funciona con el menor número de polos, es decir, con la mayor velocidad, entonces, conmutándolo al mayor número de polos, realizaremos el frenado por generador entre la mayor y la menor velocidad.

Para continuar frenando hasta una velocidad inferior a la mayor, hay que frenar la máquina por contracorriente.

El régimen de frenado por generador se emplea también en los mecanismos de elevación y transporte al bajar cargas pesadas. En este caso, la máquina devuelve a la red la energía recibida debido a la carga que descende.

8.18.3 Frenado dinámico

En este caso el estator se desconecta de la red y se alimenta con corriente continua procedente de cualquier fuente de continua.

En la Figura 8.42 se representa uno de los circuitos posibles. Aquí, dos devanados de fase se alimentan durante el frenado con la fuente de continua.

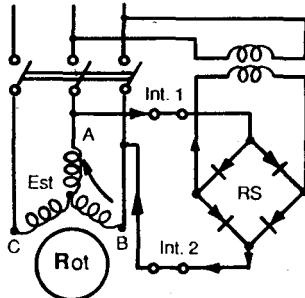


Fig. 8.42 Circuito de frenado dinámico de un motor de jaula de ardilla.

En la Figura 8.42 se observa que durante el frenado la máquina asincrónica representa un generador síncrono invertido en el que el estator crea un campo magnético inmóvil en el espacio, y el rotor es el inducido del generador. La energía de frenado se absorbe en el rotor.

En los motores de jaula de ardilla la variación del torque de frenado se logra variando la tensión de la fuente de continua.

En la Figura 8.42 (a) se ha trazado las curvas de torque y corriente en función de la velocidad para los motores de inducción trifásicos con el fin de explicar los diferentes métodos de frenado.

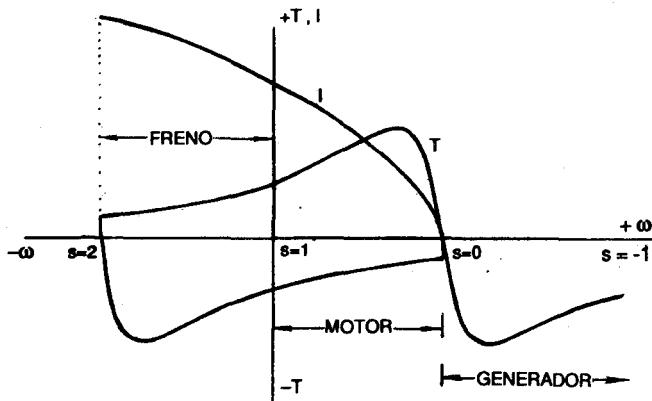


Fig. 8.42 (a) Curvas de comportamiento de los motores trifásicos de inducción

8.19 DESIGNACION, CONEXION Y MARCADO DE TERMINALES

Existen dos sistemas universales, el europeo y el americano, cuyas diferencias se hacen notar en nuestro medio por cuanto aquí se trabaja con motores tanto americanos como europeos.

En lo que respecta a la caja de bornes, en la Figura 8.43 se aprecia ya una diferencia de tipo constructivo.

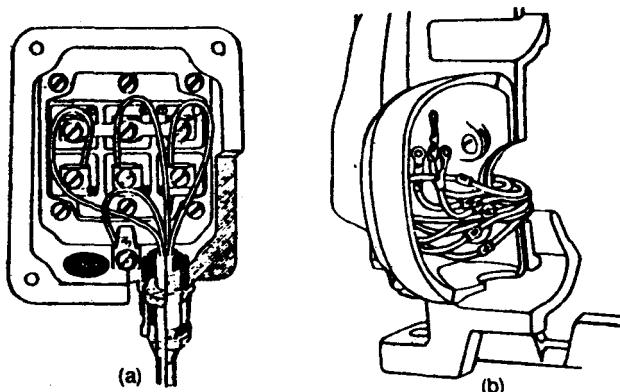


Fig. 8.43 Construcciones típicas de cajas de bornes:
(a) sistema europeo, (b) sistema americano.

Los fabricantes europeos tienen por norma utilizar cajas de bornes donde los terminales de los bobinados, conectados a pernos, están montados en forma permanente y fácil de identificar con letras marcadas en el tablero aislante de soporte.

Además, ubican éstos de modo que mediante puentes cortos, pueden conectarse fácilmente las bobinas en cualquiera de las dos conexiones Y ó D.

Los fabricantes americanos, en cambio, tiene por norma prolongar los terminales de las bobinas hasta la caja de bornes, utilizando chicotes independientes, flexibles y aislados, convenientemente identificados.

8.19.1 Designación de los terminales

Según los países de origen, la industria eléctrica ha venido usando números y letras para marcar los terminales.

Cada sistema utiliza sus propias designaciones. Así, por ejemplo, para designar las líneas de suministro en la Tabla 8.4 se da las letras que se suele utilizar en planos y en las instalaciones mismas.

Tabla 8.4 Designación normalizada de las líneas de suministro

Sistemas	Europeo	Inglés	Americano
Normas	DIN – VDE	BSS	NEMA
Líneas de suministro	R S T	L ₁ L ₂ L ₃	L ₁ L ₂ L ₃

En la Tabla 8.5 se muestra la designación normalizada que hacen los distintos sistemas de los terminales de bobinas de los motores.

Tabla 8.5 Designación normalizada de los terminales de bobinas de los motores

Sistemas	Europeo	Inglés	Americano
Terminales bobinas primer grupo	U V W X Y Z	A ₁ (A) B ₁ (B) C ₁ (C) A ₂ B ₂ C ₂	T ₁ T ₂ T ₃ T ₄ T ₅ T ₆
Terminales bobinas segundo grupo	U ₁ V ₁ W ₁ X ₁ Y ₁ Z ₁	A ₃ B ₃ C ₃ A ₄ B ₄ C ₄	T ₇ T ₈ T ₉ T ₁₀ T ₁₁ T ₁₂

Estos cuadros de equivalencias facilitan la identificación de los terminales, teniendo en cuenta que éstos son siempre los mismos.

8.19.2 Conexión de terminales

8.19.2.1 Motores trifásicos con un solo grupo de bobinas y seis bornes

Las bobinas de estos motores son conmutables por el sistema estrella-tríangulo, lo que permite alimentarlas directamente con una cualquiera de las dos tensiones cuya relación es $\sqrt{3}$. Las cajas de estos motores se caracterizan por tener seis bornes.

En la Figura 8.44 se explica gráficamente la disposición de los terminales en la caja de bornes para la correspondiente configuración.

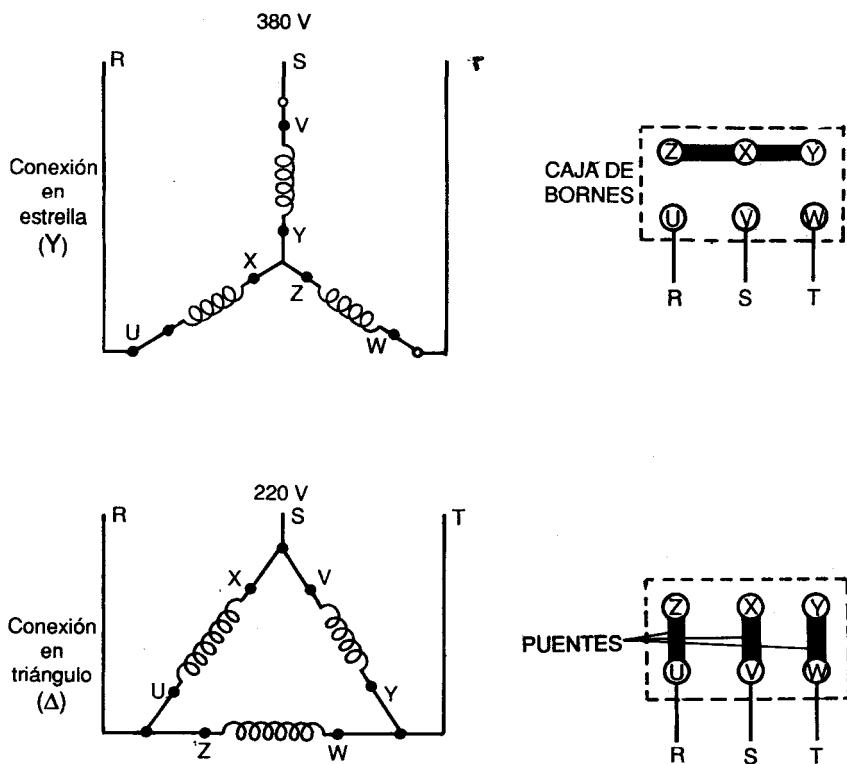


Fig. 8.44 Conexión de los terminales en motores trifásicos de un grupo de bobinas y seis bornes.

8.19.2.2 Motores trifásicos con dos grupos de bobinas y nueve bornes

Se trata de motores con nueve terminales libres y tres terminales ya unidos en un punto común, en principio, inaccesible.

Con esta conexión, las bobinas se pueden disponer en serie o en paralelo, aunque siempre dentro de la misma configuración estrella, lo que permite alimentarlas indistintamente con una cualquiera de las dos tensiones que guardan entre si la relación de 2.

En la Figura 8.45 puede verse en forma gráfica el modo en que se realizan las conexiones de los bornes de la caja del motor.

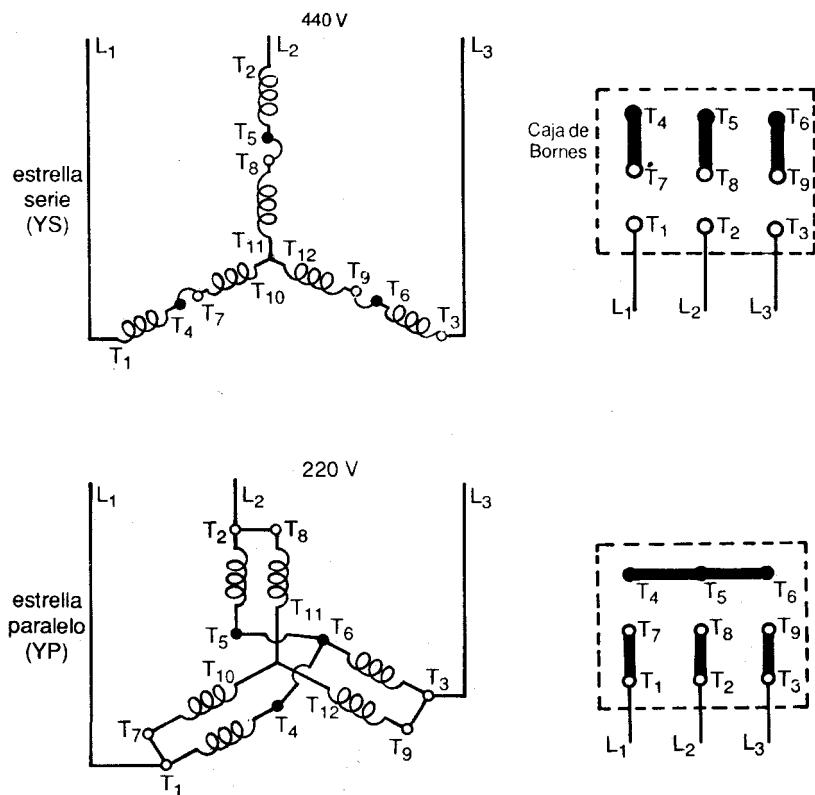


Fig. 8.45 Esquemas de las conexiones en la caja de bornes de motores de nueve terminales.

8.19.2.3. Motores trifásicos de dos grupos de bobinas y seis bornes

Estos motores tienen seis terminales fijos e inaccesibles y seis terminales permutables que son los que van a dar a los seis bornes de la caja.

En la Figura 8.46 puede verse de un modo más claro cómo se realizan las distintas conexiones para las respectivas configuraciones de las bobinas.

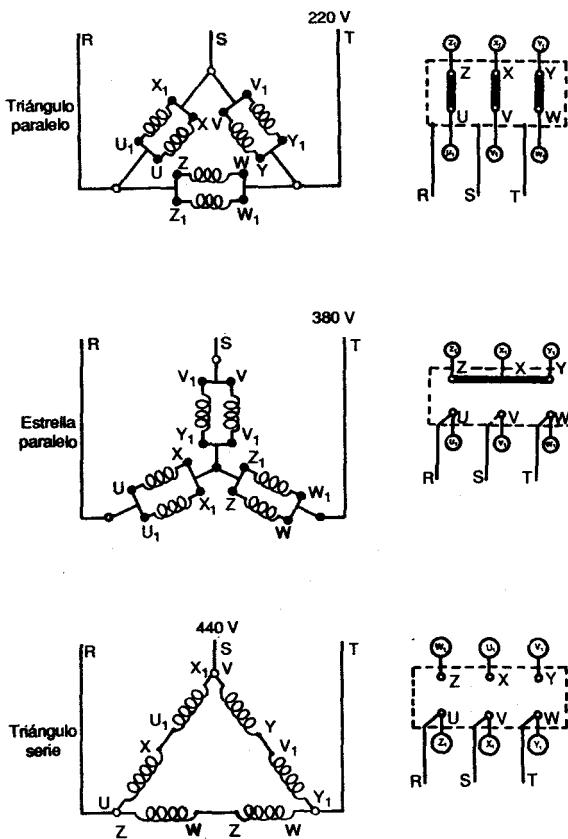


Fig. 8.46 Conexiones de los motores trifásicos de dos grupos de bobinas y seis bornes.

8.19.3 Marcado de terminales

El marcado de los terminales en las máquinas eléctricas cumplirá mejor su propósito si con ello se logra no sólo el poderlos identificar fácilmente, sino, a la vez, indicar la relación eléctrica y disposición que hay entre los distintos circuitos dentro de la máquina.

Cuando se trata de alternadores, motores síncronos y asíncronos trifásicos con una sola velocidad, se ha tomado por norma seguir el sentido de giro de las agujas del reloj para designar los terminales.

En la Figura 8.47 se muestra la forma de marcar los terminales en un motor trifásico de doble bobinado y doce terminales.

El método se puede resumir de la siguiente manera:

Primero se dibuja el diagrama respectivo de la máquina.

Luego se marca en cualquier punto de la periferia.

Finalmente, se continúa girando en espiral hacia adentro, hasta marcar sucesivamente todos los terminales según vayan apareciendo.

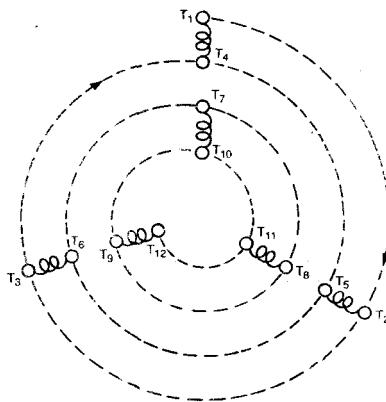


Fig. 8.47 Marcado de terminales según NEMA.

8.20 DATOS DE PLACA

La placa de características (Figura 8.48) indica, además del nombre comercial del fabricante, tipo de motor (aquí se suele indicar el tipo de ventilación, la altura del centro del eje del motor sobre la base del mismo, así como también el número de polos) y número de fabricación, todos los datos nominales de funcionamiento que sean importantes.

Como datos de placa vienen principalmente los siguientes:

- Potencia (s) mecánica (s) (kW) entregada (s) por el motor en el eje cuando trabaja a plena carga.
- Configuración (es) de las bobinas del estator (y del rotor en el caso del motor de anillos).
- Tensión (V) de la red de suministro o de la fuente de energía eléctrica que se debería aplicar en cada configuración.
- Intensidad (A) de la corriente absorbida por el motor a plena carga para la respectiva configuración de las bobinas (además, la corriente del rotor en el motor de anillos).
- El (los) factor (es) de potencia o $\cos \phi$, que expresa el desfase que se produce a potencia nominal entre la tensión y la corriente.
- La frecuencia (Hz) de la red de alimentación.
- La (s) velocidad (es) de giro (rpm) del rotor con el motor funcionando a plena carga.
- La clase de protección del motor. Se indica con una letra código.

- La clase de aislamiento. Este dato es una letra código y se indica sólo para devanados con aislamiento especial, es decir, en caso de mayores exigencias térmicas.

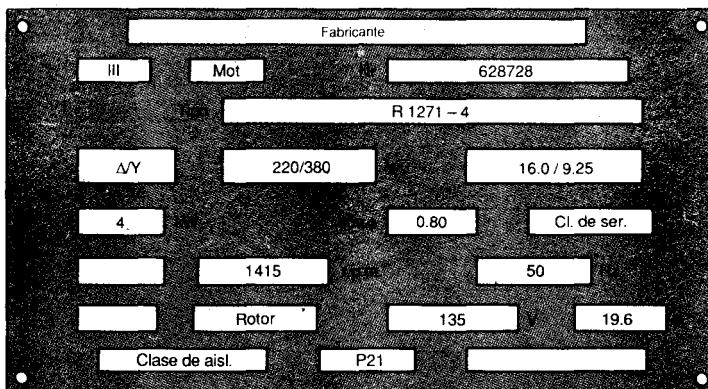


Fig. 8.48 Placa de características de un motor trifásico de rotor bobinado.

En la Figura 8.49 se muestran las curvas características de servicio de un motor asincrónico trifásico de 2.2 kW.

Estas curvas muestran las variaciones de la corriente absorbida I , de la velocidad de giro n , de la eficiencia η y del factor de potencia $f.p.$ entre la marcha en vacío y la plena carga. Obsérvese la escasa variación que experimenta la velocidad de un motor asincrónico entre vacío y plena carga.

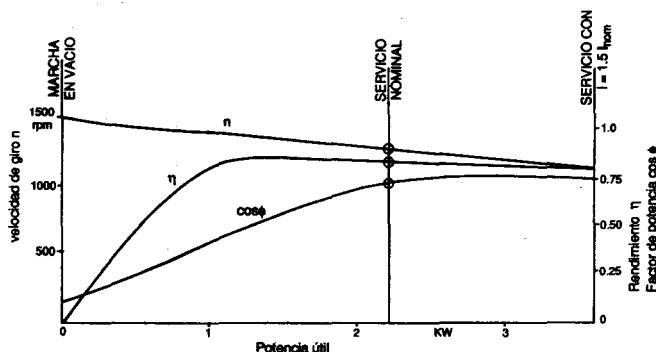
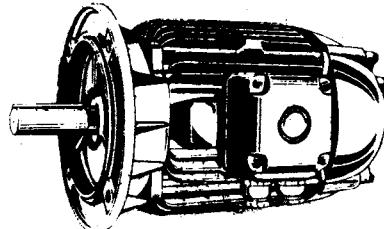


Fig. 8.49 Curvas características de servicio de un motor asincrónico trifásico de 2.2 kW.

Capítulo 9

SELECCION DE MOTORES ASINCRONOS TRIFASICOS

- 9.1 Factores que influyen en la elección del motor**
- 9.2 Características del ambiente**
- 9.3 Características de la carga**
- 9.4 Características del motor**
- 9.5 Criterios de selección**



NV 160-B5

SELECCION DE MOTORES ASINCRONOS TRIFASICOS

9.1 CRITERIOS DE SELECCION

Los factores que intervienen en la elección de un motor asíncrono de jaula de ardilla son los siguientes:

- Las características de la red de suministro, es decir, la tensión de servicio, la frecuencia, la clase de corriente y el número de fases disponibles, lo cual depende de la forma de suministro de la energía eléctrica: muchas veces proviene de un concesionario, otras, del propio usuario pudiendo ser éste una fábrica, un laboratorio, un taller, un edificio o una casa, por ejemplo.
- Las características del ambiente, o sea, el lugar y el modo de emplazamiento del motor (influyen, por ejemplo, la altura sobre el nivel del mar, el tipo de atmósfera, es decir, si es corrosiva, o explosiva, o polvorulenta, influye también la temperatura del local, etc.).
- Los gastos de explotación, o sea, los gastos de instalación, mantenimiento, reparación, control y operación de la máquina durante su vida de funcionamiento.
- Las características de la carga, es decir, la potencia nominal, la velocidad, el torque en función de la velocidad, la variación de la velocidad, el tiempo de aplicación de la carga, la forma de aplicación de la misma: con o sin golpes, el momento de inercia de las masas giratorias y de las que se trasladan y la máxima aceleración permitida durante los períodos transitorios de la puesta en marcha y el frenado de las cargas.
- Las características del motor, es decir, su clase de diseño, su (s) tensión (es) de trabajo, su frecuencia, su potencia mecánica nominal, su (s) velocidad (es), sus torques de arranque y mínimo, su corriente de arranque, su forma y ejecución constructiva, su clase de aislamiento, sus dimensiones y su peso.

9.2 CARACTERISTICAS DEL AMBIENTE

Las carcchas protegen al motor de los efectos dañinos del medio ambiente en que se colocan: humedad, álcalis, ácidos, aceites, polvos, etc. Los lugares pueden ser limpios, neutros, sumamente sucios (atmósfera con polvos abrasivos) o altamente explosivos (polvos explosivos o inflamables o vapores).

Ahora bien, los motores no son todos exteriormente iguales. Así, se construyen motores a prueba de goteo, salpicuelo, a prueba de intemperie, de ex-

plosión, etc., pudiendo ser su armadura del tipo abierto, cerrado o totalmente cerrado, según el caso.

El motor de armadura abierta es el más común y el más barato. Se puede usar en lugares donde el aire está relativamente libre de partículas extrañas o de líquidos. No debe usarse en lugares cercanos a chorros de agua o en atmósfera que contiene polvo. El aire circula libremente por el motor, produciendo el enfriamiento necesario y, naturalmente, si contiene partículas extrañas, a la larga, resulta dañado el aislamiento. Se recomienda este motor para uso general en la granja.

El motor de armadura a prueba de salpicos ofrece mayor protección contra el polvo y el aire, pero, naturalmente, es más caro. Se recomienda para usar en lugares donde se requiere constantes lavados de los equipos. El motor de armadura totalmente cerrada no permite que entre aire ni agua. La refrigeración se realiza sólo por convección y radiación y, para mejorarlala, el motor está provisto de una serie de aletas exteriores. Es bastante caro y sólo debe usarse en casos especiales.

El ambiente, o sea, el lugar y el modo de emplazamiento del motor determinan la clase de protección, el tipo constructivo y el aislamiento de los motores eléctricos:

9.2.1 Clases de protección

Según el lugar de emplazamiento del motor se precisan diferentes medidas de protección, en primer lugar, contra la penetración de suciedad y agua y, en segundo lugar, contra el peligro de tocar involuntariamente partes conductoras de corriente o rotativas.

Las clases normalizadas de protección, según NEMA, se indican en la placa de características por la letra **P** y dos cifras.

Las cifras tienen el significado siguiente:

Primera cifra: protección contra contacto y penetración de cuerpos extraños.

- 0 Sin protección.
- 1 Protección contra introducción de la mano y contra la penetración de cuerpos extraños voluminosos.
- 2 Protección contra la introducción de los dedos y contra la penetración de cuerpos extraños medianos de más de 8 mm de diámetro.
- 3 Protección contra la introducción de herramientas (p.e. un destornillador) y la penetración de cuerpos extraños pequeños de más de 1 mm de diámetro.
- 4 Protección contra el acceso al interior, incluso voluntario, recurriendo a medios auxiliares de toda índole, y contra la formación de depósitos de polvo en el interior.
- 5 Protección contra el acceso al interior, incluso voluntario, recurriendo a medios auxiliares de toda índole, y hermeticidad total al polvo.

Segunda cifra: Protección contra el agua.

- 0 Sin protección.
- 1 Protección contra agua de goteo vertical.
- 2 Protección contra salpicaduras de agua con inclinación hasta de 30° como máximo por encima de la horizontal.
- 3 Protección contra salpicaduras de agua procedente de cualquier dirección.
- 4 Protección contra chorros de agua procedentes de cualquier dirección.
- 5 Protección contra agua a presión.

9.2.2 Tipos constructivos

Las formas constructivas de los motores eléctricos se distinguen en su aspecto exterior según tres puntos de vista:

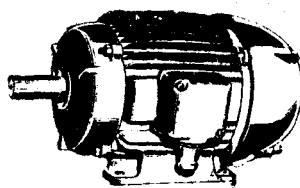
1. Disposición del árbol: horizontal, vertical o inclinado.
2. Forma de la carcasa: con patas o con brida de sujeción.
3. Clase de apoyo del árbol: escudos portacojinetes o cojinetes de pedestal.

Los motores se caracterizan por un símbolo compuesto de dos índices: B3, B5, B8, V1, V5, por ejemplo, donde:

B : eje horizontal
V : eje vertical

Para los símbolos mencionados corresponden las siguientes características:

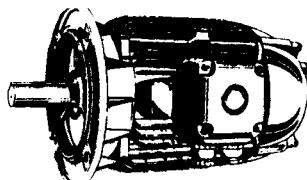
- *Motor con la forma B3:*
tiene dos escudos, extremo de eje libre, y carcasa con patas. Véase la Figura 9.1.



NV71-B3

Fig. 9.1 Motor con la forma B3.

- *Motor con la forma B5:*
tiene dos escudos, extremo de eje libre, brida de sujeción, y carcasa sin patas. Véase la Figura 9.2.



NV 160-B5

Fig. 9.2 Motor con la forma B5.

- *Motor con la forma B6:*
tiene dos escudos, girados 90°, para sujeción en la pared, y carcasa con patas.
- *Motor con la forma B8:*
tiene dos escudos, girados 180°, para sujeción en el techo, y carcasa con patas.
- *Motor con la forma VI:*
tiene dos cojinetes, brida de sujeción, extremo de eje inferior libre.
- *Motor con la forma V5:*
tiene dos cojinetes, extremo de eje inferior libre, y carcasa con patas, y sujeción a la pared.

Las dimensiones esenciales para colocar físicamente un motor con respecto al acoplamiento que lo conecta a su carga mecánica están normalizados por la NEMA y figuran en el catálogo del fabricante.

9.2.3 Tipos de aislamiento

El aislamiento de los devanados juega un papel importante en la vida de un motor. Los aislamientos pueden ser de diferentes tipos y se caracterizan fundamentalmente por la temperatura que pueden soportar como máximo, lo cual determina, en definitiva, su costo. El costo de remplazar los embobinados de un motor malogrado equivale aproximadamente a la mitad del costo del motor.

La placa que indica las características de un motor, contiene la información necesaria concerniente al aumento de la temperatura de la máquina sobre la del ambiente normal o del aire entrante (unos 40°C como máximo).

A continuación se designan las diferentes clases de materiales aislantes según la norma IEC y sus correspondientes temperaturas permanentes máximas admisibles de operación:

Clase de aislamiento	Temperatura máxima (°C)
O ó Y	90
A (general)	105
E	120
B (laboratorios)	130
F	155
H	180
C (especial)	> 180

Las máquinas con aislamientos F y H son mucho más caras que las de clase A, por ejemplo.

9.2.4 Bases de motores

Las bases de los motores empleados pueden ser de dos tipos: rígidas o elásticas (resilientes).

La base rígida es la más usada y la más barata. Tiene unos huecos para los pernos de anclaje del motor, con los cuales se le fija sólidamente en lugares donde debe instalarse.

La base elástica, en cambio, tiene la propiedad de absorber las vibraciones producidas por el motor. Es, naturalmente, más cara y se emplea menos que la anterior. Se recomienda su uso para clasificadoras de granos y lavadoras. El efecto de amortiguamiento se obtiene mediante unos anillos colocados a cada lado del eje del motor. Esta base se fija también mediante pernos y, para eso, tiene unos huecos ya preparados.

9.3 CARACTERISTICAS DE LA CARGA

Las cargas que pueden aplicarse a los motores de jaula de ardilla pueden ser de lo más diversas.

Interesa en primer lugar conocer la potencia requerida por la carga que se ha de accionar, la cual deberá ser menor que la potencia nominal del motor en trabajo continuo. Si se elige un motor demasiado grande, éste estaría siendo subutilizado, el rendimiento sería más bajo que el nominal y su elección resultaría antieconómica.

En segundo lugar, interesa la velocidad o las velocidades a las cuales se desplazará o girará la carga con el fin de determinar la necesidad o no de un sistema de transmisión así como el número de velocidades requerido del motor. Para una misma potencia, los motores de gran torque y baja velocidad de giro soportan mayores esfuerzos mecánicos y son más robustos y de mayor peso que los motores rápidos de igual potencia. Por lo tanto, siempre que sea

possible, se emplearán motores de gran velocidad, la cual, en caso necesario, se reduce por transmisión de correa o de engranajes.

Interesa, en tercer lugar, conocer la característica dinámica (curva de torque-velocidad) de la carga para poder confrontarla con la del motor eléctrico escogido. De esta curva, es de especial importancia, para la elección del motor, el torque de arranque el cual varía de una carga a otra.

Entre los diferentes tipos de cargas se puede establecer ciertas analogías en lo que respecta a la forma de sus características de torque-velocidad, tal como puede apreciarse en la Figura 9.1, donde:

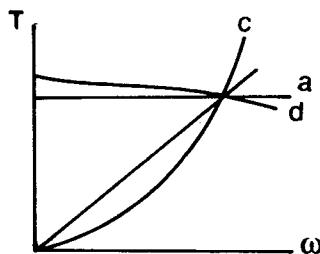


Fig. 9.3 Curvas características de torque-velocidad para diversas cargas típicas.

La curva (a) es una de par constante con la velocidad. Estos accionamientos arrancan a plena carga y son arrastrados a torque constante y se caracterizan porque, en reposo, los rozamientos son grandes así como las masas a acelerar.

Como se ve, el motor debe desarrollar en el arranque un torque mayor que el nominal. Como ejemplos típicos de estas cargas se tiene los siguientes: montacargas, grúas, ascensores y otras máquinas de elevación, las fajas transportadoras y otros transportadores, compresores y bombas de pistón, laminadoras, las cizallas y otras máquinas-herramientas de corte, las máquinas de papel, las máquinas de imprimir, las mezcladoras, etc.

El arranque a plena carga es posible con muchos tipos de motores; cuando se utiliza el arrancador estrella-tríangulo con motores asincrónicos de jaula de ardilla requiere que éstos tengan un par de arranque especialmente alto como lo tienen los de doble jaula de ardilla o de barras profundas.

La curva (b) es una de torque proporcional a la velocidad. Esta característica la presentan las cargas a base de rozamientos viscosos o lubricados, así como también los generadores eléctricos de excitación independiente.

La curva (c) es una de torque proporcional al cuadrado de la velocidad. Este es el caso de la mayoría de las máquinas-herramientas (taladradoras, tornos, etc.), siempre que al ponerlas en marcha no estén ya cargadas; asimismo, los ventiladores y las bombas centrífugas con la válvula de descarga abierta.

Para realizar el arranque de las cargas tipo (b) y (c), basta con aplicar un torque igual a la mitad del nominal. Este arranque a media carga puede ser su-

perado por casi todos los motores de jaula de ardilla, incluso con arrancador estrella-triángulo. Cuando, para un accionamiento dado, fuera necesario un arranque lo más suave posible, habrá que reducir el torque del motor en la puesta en marcha mediante un reóstato de arranque en serie con el estator.

La curva (d) representa la característica de las cargas a base de rozamientos no lubricados (el rozamiento entre sólidos disminuye algo a medida que la velocidad aumenta). Estas cargas requieren un torque motor en el arranque considerablemente mayor que el torque nominal, como, por ejemplo, al acelerar grandes masas (laminadoras, molinos para cereales, centrífugas, etc.) y en los casos de resistencias por rozamiento especialmente grandes durante el arranque (vehículos de tracción eléctricos, molinos trituradores de piedra, etc.). El arranque con carga pesada sólo es posible con motores de rotor bobinado o con motores de doble jaula con arranque directo.

En cuarto lugar, interesa saber si la carga que se ha de accionar es de velocidad constante o casi constante, como es el caso de la mayoría de éstas, o si requiere una amplia gama de velocidades en forma discreta, como es el caso de la mayoría de las máquinas-herramientas, o si requiere una variación continua de la velocidad.

Para el primer caso se aplican mayormente los motores asincrónicos trifásicos de jaula de ardilla normales o de uso general.

Para el segundo caso, se aplican los motores asincrónicos trifásicos de jaula de ardilla de dos o cuatro velocidades denominados también motores de amplitud modulada o de polos comutables.

Para el tercer caso, se debe proveer a los motores normales de dispositivos y equipos de regulación especiales.

En principio, cualquier motor puede regularse para adaptar su velocidad a las necesidades de su carga mecánica.

En quinto lugar, interesan la aceleración recomendada en el arranque y la deceleración, en el frenado para cada carga en particular. Esto se hace con el fin de limitar los esfuerzos considerables que se presentan durante estos períodos transitorios de funcionamiento y que afectan tanto al mecanismo como a la carga misma.

En sexto lugar, interesa la forma de aplicación de la carga, es decir, si ésta se produce de alguna de las siguientes formas:

- (I) Casi sin golpes, como es el caso de los generadores eléctricos, las fajas transportadoras, los gusanos transportadores, los ascensores livianos, los winches, el avance de las máquinas-herramientas, los ventiladores, los compresores centrífugos, las mezcladoras de artículos de igual granulación.
- (II) Con golpes medianos, como es el caso del movimiento principal de las máquinas-herramientas, los ascensores pesados, los movimientos para desplazar y girar la grúa, los ventiladores para minas, las mezcla-

doras para artículos de granulación diferente, las bombas de expulsión, las bombas auxiliares.

- (III) Con golpes fuertes, como es el caso de las máquinas cortadoras de metales, las punzonadoras, las máquinas para mezclar jabón, las laminadoras, las dragas de cuchara, las bombas centrífugas pesadas, las bombas auxiliares pesadas, las máquinas perforadoras, las prensas compactadoras, las chancadoras, los molinos de bolas.

Es evidente que el servicio que presta el motor en el primer caso es un servicio suave y descansado a diferencia del tercer caso en el cual el motor deberá prestar un servicio severo por lo que para la misma potencia de la carga sería recomendable un motor de mayor tamaño para el caso III.

El tiempo de aplicación de la carga es también un factor preponderante en la selección de un motor e influye en la determinación del factor de servicio el cual se verá aumentado con la mayor duración de la conexión de la carga. La aplicación de la carga puede realizarse de diferentes formas: continua, intermitente, intermitente continua, temporal, temporal continua, maniobra intermitente y maniobra continua, tal como lo prevén las normas.

Finalmente, interesa saber el momento de inercia del conjunto de todas las masas giratorias, así como el de las que se trasladan, con respecto al eje del motor, para lo cual se debe tener ya ideado el mecanismo total comprendido entre el motor por escoger y la carga conocida. Un momento de inercia muy elevado puede ocasionar tiempos de puesta en marcha mayores que los permitidos por los motores, mientras que un momento demasiado pequeño puede ocasionar aceleraciones muy grandes en el arranque, por encima de los valores recomendados para una carga en particular.

9.4 CARACTERISTICAS DEL MOTOR

En su punto de operación, véase la Figura 9.2, el motor acciona a la máquina movida o carga con un cierto torque T y una velocidad de giro ω .

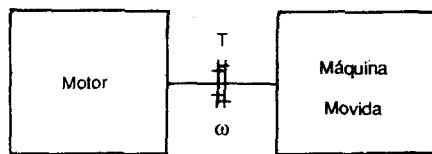


Fig. 9.2 Acoplamiento directo de un motor a su carga.

T y ω en el eje son comunes al motor y a la carga y constituyen los factores básicos de la potencia transmitida.

Los motores eléctricos tienen sus propias curvas **torque-velocidad**, llamadas también **características dinámicas**.

La curva torque-velocidad constituye una propiedad de cada motor eléctrico llegando a ser decisiva para la elección del motor adecuado.

En la mayor parte de las aplicaciones, los motores se alimentan a tensión y frecuencia constantes directamente de una red, y trabajan según su propia característica de torque-velocidad de acuerdo con las condiciones determinadas por la carga mecánica que accionan, cuyo par resistente depende de la velocidad a la que es arrastrada.

Sin embargo, existen aplicaciones en las cuales se debe proveer a los motores de dispositivos y equipos de regulación que pueden modificar las características del motor adaptándolas a las condiciones operativas exigidas en cada caso particular. En principio, cualquier motor puede regularse para adaptar su velocidad y torque a las necesidades de su carga mecánica.

Existen diversos tipos de motores de jaula de ardilla, siendo los más comunes los de barras profundas o de doble jaula de ardilla debido a su buen comportamiento durante el arranque y durante el funcionamiento con carga.

Las características nominales más usuales para los motores eléctricos son las de servicio continuo que definen la potencia de salida en kW, hp ó CV y las cuales pueden mantenerse indefinidamente sin exceder los límites establecidos. En caso de sobrecarga del motor por la máquina accionada, o sea, al rebasar el torque nominal, debe tenerse en cuenta que los motores sólo están obligados a soportar como máximo, durante dos minutos, 1.5 veces la corriente nominal, en caso contrario se calentarán indebidamente.

Para un servicio intermitente, periódico o diverso, puede darse una característica nominal de corta duración, que define la carga que puede soportar la máquina durante un tiempo determinado. Los períodos normales para características nominales de corta duración son 5, 15, 30 y 60 minutos.

Las velocidades, tensiones y frecuencias se especifican, asimismo, en las características nominales del motor debiéndose tomar las debidas precauciones para las posibles variaciones de tensión y frecuencia. Los motores deben funcionar satisfactoriamente con tensiones del 10% por encima y por debajo de la tensión nominal (a la frecuencia nominal) y a frecuencias del 5% por encima o por debajo de la frecuencia nominal (a la tensión nominal); la variación combinada de la frecuencia y la tensión no debe exceder del 10%.

Los motores de dos o cuatro velocidades pueden ser de varios tipos: de torque constante, de potencia constante o de torque variable, para cada uno de los cuales los bornes se deben conectar según se indica en la parte posterior de la placa.

Los motores de dos tensiones son de potencia constante y se debe tener especial cuidado en aquellos motores en los que el embobinado del estator está formado por dos grupos de bobinas. La forma de conectarlas para cada tensión viene indicada también en la parte posterior de la placa.

Los torques de arranque, mínimo y máximo, vienen dados en el catálogo del fabricante con respecto al torque nominal por medio de unos coeficientes.

Con estos valores del torque se puede construir aproximadamente la curva de torque-velocidad o, en su defecto, calcular el valor del torque motor medio. Véase en la Tabla 9.0 tomada del catálogo de la firma nacional DELCROSA para sus motores trifásicos asíncronos de 4 polos, las columnas centrales.

Si el arranque del motor se realiza en forma directa, el motor desarrollará siempre estos valores de torque, pero si se utiliza algún método para efectuar el arranque del motor con la idea de reducir la elevada corriente de arranque, aquellos valores de torque se verán reducidos en todos los casos a valores que dependen del tipo de arrancador utilizado.

La corriente de arranque también viene especificada en el catálogo del fabricante como una relación con respecto a la corriente nominal. El valor de esta corriente corresponde a un arranque directo a tensión plena e influye en la elección del método de arranque del motor.

Los motores se diseñan para trabajar con el eje en una posición determinada, así se cuenta con motores que trabajan con el eje horizontal, o con el eje vertical y hasta con el eje inclinado. Por otro lado, se diseñan también para trabajar sobre el suelo o bajo techo y hasta apoyados en la pared.

Los motores se diseñan también para soportar las condiciones del tiempo y del ambiente dependiendo de cada aplicación en particular, siendo más caros cuando mayores son las exigencias.

Se establecen otras condiciones de funcionamiento de modo que el motor pueda soportar sobrecargas razonables de corta duración. Así, el usuario de un motor puede confiar en poder aplicar durante un espacio de tiempo de corta duración, una sobrecarga del 25 al 90%, por ejemplo, a la tensión normal, dentro de un amplio margen de seguridad. Esto va a depender fundamentalmente del tipo de aislamiento utilizado en el motor. Cuanto más sobrecarga pueda soportar un motor, mejor es el aislamiento utilizado y más cara es también la máquina.

Las dimensiones del motor y el peso del mismo vienen especificadas en el catálogo del fabricante y sirven para ayudar a dimensionar el equipo o la instalación completa.

Los motores se clasifican en motores para fines generales (normalmente ventilados) y motores para fines especiales.

Un **motor para fines generales** es cualquier motor de 200 hp ó menos y 450 RPM ó más, de servicio continuo, diseñado, clasificado y presentado con características normales para ser utilizado sin restricción en una aplicación particular.

Se emplea aislamiento **clase A** y, de acuerdo con las especificaciones de la NEMA, la elevación de temperatura se limita a 40°C por encima de una temperatura ambiente no superior a 40°C. También se emplea aislamiento **clase B**.

La potencia necesaria de un motor para una aplicación determinada se halla fácilmente cuando el motor funciona continuamente con carga sustancialmente

Tabla 9.0

DEL CROSA S.A.		MOTOR ASINCRONO TRIFASICO CON ROTOR A JAUJA SERIE NV TENSION DE CONSTRUCCION MAXIMA - GOOV										50 HZ 4 POLOS 60 HZ					
POTENCIA	RPM a 114 CARGA	TIPO			η%	Cos φ	Cn Cn	Cm Cn	CM Cn	Ia In	CORRIENTE A 114 CARGA		P.D. ROTOR kgd	PESO MOTOR FORMA B3 Kg			
HP	KW										220V	380V					
1/3	0.25	1385		NV	71	a	4	66.5	0.70	2.6	2.6	2.8	3.8	1.4 1.7	0.8 1.0	3.5 x104	9.4
0.4	0.30	1560															
0.5	0.37	1390		NV	71	b	4	71.0	0.72	2.4	2.4	2.6	3.8	1.9 2.3	1.1 1.3	4.1 x104	10.3
0.6	0.45	1670															
3/4	0.56	1410		NV	80	a	4	73.0	0.73	2.5	2.5	2.7	4.4	2.8 3.3	1.6 1.9	7.8 x104	13.6
0.9	0.67	1690															
1.0	0.75	1415		NV	80	b	4	75.0	0.75	2.5	2.5	2.7	4.8	3.5 4.2	2.0 2.4	9.4 x104	15.4
1.2	0.90	1700															
1.5	1.1	1425		NV	90	La	4	77.0	0.78	2.2	1.9	2.7	5.0	4.9 6.0	2.8 3.4	1.8 x104	21.7
1.8	1.3	1710															
2.0	1.5	1430		NV	90	L	4	79.0	0.78	2.2	2.0	2.5	5.3	6.4 7.6	3.7 4.4	2.2 x104	24.0
2.4	1.8	1720															
* 3.0	2.2	1435		NV	100	La	4	80.0	0.80	2.3	2.0	2.7	6.8	9.2 11.0	5.4 6.4	2.4 x104	30.0
3.6	2.7	1730															
4.0	3.0	1440		NV	100	L	4	81.0	0.81	2.5	2.0	2.7	6.0	12.0 14.4	7.0 8.4	3.0 x104	33.3
4.8	3.6	1740															
5.5	4.1	1440		NV	112	M	4	83.0	0.82	2.5	2.2	2.8	6.6	15.8 19.0	9.2 11.0	8.0 x104	43.0
6.6	4.9	1740															
7.5	5.6	1440		NV	132	S	4	84.0	0.83	2.3	2.1	2.9	6.6	21.0 25.0	12.2 14.6	0.131	61.5
9.0	6.7	1740															
10	7.5	1445		NV	132	M	4	85.0	0.84	2.4	2.3	3.0	6.5	27.5 33.0	15.8 19.0	0.168	72.0
12	9.0	1745															
15	11.2	1445		NV	160	M	4	87.0	0.84	2.2	1.9	3.0	6.5	40.0 48.0	23.5 28.0	0.31	111
18	13.4	1745															
20	14.9	1450		NV	160	L	4	88.5	0.85	2.3	2.0	3.0	6.5	52 62	30.0 36.0	0.39	129
24	17.9	1745															
25	18.7	1460		NV	180	M	4	89.0	0.86	2.0	1.5	2.8	8.0	64 77	37.0 44.5	0.56	172
30	22.4	1750															
36	22.4	1460		NV	180	L	4	89.0	0.86	2.0	1.5	2.8	8.0	77 92	44.5 53	0.66	194
36	26.9	1750															
40	29.8	1465		NV	200	L	4	90.0	0.86	2.7	2.0	2.6	8.0	102 122	59 70	1.3	270
48	35.8	1760															
50	37.3	1465		NV	225	cS	4	90.5	0.86	2.7	2.0	2.5	8.0	126 151	73 87	2.0	330
60	44.8	1760															
70	52.2	1465		NV	225	cM	4	91.0	0.86	2.7	2.0	2.5	8.0	150 175	87 102	2.2	350
75	56.0	1470		NV	250	M	4	91.5	0.86	2.5	2.0	2.4	7.0	186 225	108 130	3.4	487
90	67.1	1765															
100	74.6	1470		NV	280	S	4	92.0	0.86	2.6	2.1	2.5	8.0	245 310	144 180	6.7	696
125	93.3	1765															
150	93.3	1470		NV	280	M	4	92.0	0.86	2.6	2.1	2.5	8.0	310 370	188 215	7.7	775
150	112	1765															
180	112	1470		NV	315	Mra	4	92.5	0.86	2.6	2.0	2.5	8.0	370 445	215 256	12.0	1047
180	134	1765															
180	164	1470		NV	315	Mr	4	93.0	0.86	2.6	2.0	2.5	8.0	440 540	255 310	14.0	1074
220	164	1480		NV	315	Lr	4	93.5	0.86	2.6	2.0	2.5	8.0	520 620	305 360	14.1	1160
250	194	1775															
270	201	1480		NV	315	L	4	94.0	0.86	2.6	2.0	2.5	8.0	640 730	370 425	15.7	1090
310	231	1775															

NOMENCLATURA:

η% = eficiencia en porcentaje
 Cos φ = factor de potencia

Cn = par nominal
 Ca = par de arranque
 Cm = par mínimo

CM = par máximo
 Ia = corriente de arranque
 In = corriente nominal

constante, ya que únicamente hay que contar con las necesidades de potencia del equipo impulsado.

Un **motor para fines especiales** se diseña específicamente y está destinado a una aplicación determinada, donde las necesidades de la carga y el ciclo de servicio son perfectamente conocidos.

La elevación de temperatura permisible con aislamiento **clase A** es, generalmente, de 50°C, sin que exista concesión alguna por factor de servicio.

Los motores de características nominales de corta duración se encuentran, por regla general, en la categoría de motores para fines especiales.

Cuando el motor funciona dentro de un ciclo de servicio más o menos repetido, el calentamiento medio debe hallarse por las pérdidas del motor durante las diversas fases del ciclo, incluyendo la variación de la ventilación con la velocidad del motor.

Se debe conceder especial atención a los motores que se arrancan y se frenan o invierten su sentido de giro frecuentemente, ya que tal clase de servicio es equivalente a fuertes sobrecargas, especialmente si se encuentra implicada una carga de inercia muy elevada.

También se debe prestar atención a aquellos ciclos de servicio con puntas de torque tan elevadas, que motores de servicio continuo elegidos sobre bases puramente térmicas, no serían capaces de suministrar. Es a dichos ciclos de servicio a los que se aplican generalmente **motores para fines especiales**, con características nominales de corta duración, los cuales, en general, poseen mejor capacidad para producir el torque que otros motores destinados a producir continuamente la misma potencia de salida, aunque tengan una capacidad térmica inferior.

9.5 ELECCION DEL MOTOR ELECTRICO

La elección del motor eléctrico de un mecanismo o de un equipo se efectúa en el orden siguiente:

1 – Se determina la potencia estática P_{est} durante el accionamiento de una carga nominal a velocidad constante, es decir, en condiciones permanentes:

$$P_{est} = \frac{P_{carga}}{\eta} \quad (W)$$

P_{carga} : potencia de la carga nominal (W).

η : es el rendimiento de todo el mecanismo, el cual en muchos casos puede considerarse igual a uno.

La expresión de la potencia de la carga va a depender del tipo de carga. Así, por ejemplo, cuando la carga es un generador eléctrico trifásico, cuya tensión en bornes es $V(V)$ y entrega una corriente $I(A)$ a una carga cuyo factor de

potencia es $\cos \phi$, la potencia de la carga se calcula con la expresión:

$$P_{\text{carga}} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi \quad (\text{W})$$

Si la carga está constituida por un ascensor que eleva una carga de peso $F(\text{Nt})$ a una velocidad $v(\text{m/s})$, entonces:

$$P_{\text{carga}} = F \cdot v \quad (\text{W})$$

Si la carga está constituida por una bomba centrífuga que eleva un caudal $Q(\text{m}^3/\text{s})$ de un fluido cuyo peso específico es $\gamma (\text{kg/m}^3)$ a una altura manométrica $h(\text{m})$, entonces:

$$P_{\text{carga}} = Q \cdot \gamma \cdot h \quad (\text{W})$$

Y si la carga es, por ejemplo, un compresor alternativo cuyo cigüeñal exige un torque medio $T(\text{N.m})$ a una velocidad angular $\omega(\text{rad/s})$, entonces:

$$P_{\text{carga}} = T \cdot \omega \quad (\text{W})$$

2 – Se determina la potencia mecánica real P_{real} afectando el valor de la potencia estática de un factor de carga o de servicio C_s , el cual depende del tipo de carga y del tiempo de funcionamiento:

$$P_{\text{real}} = C_s \cdot P_{\text{est}} \quad (\text{W})$$

Los valores del factor de servicio C_s son tomados de la experiencia. Esta recomendación puede usarse en aquellas aplicaciones en las que las necesidades de carga y el ciclo de servicio no son bien conocidos o varían grandemente, teniendo en cuenta que en caso de sobrecarga, es decir, con factores de servicio menores que uno, los motores están obligados a soportar como máximo, durante dos minutos, 1.5 veces la corriente nominal si no, se calentarán indebidamente.

3 – Usando el catálogo del fabricante de los motores se escoge el motor cuya potencia nominal sea igual o mayor que la potencia real P_{real} .

La elección del motor depende ahora de la velocidad requerida, por cuanto las velocidades de los motores son casi fijas, normalmente cuatro: alrededor de 900, 1200, 1800 y 3600 RPM, para motores de 60 Hz. Se tiene, entonces, cuatro alternativas de solución para la combinación motor-transmisión.

Se escoge la alternativa que ofrezca menor costo, menor peso, menor tamaño, menor corriente de arranque o una buena combinación de todas estas características y algunas otras como eficiencia y factor de potencia, por ejemplo.

Se recuerda que en el catálogo del fabricante se encuentra toda la información concerniente a las características del motor.

4 – Verificar si el motor elegido puede arrancar, para lo cual es preciso que el torque motor durante el arranque y la puesta en marcha sea siempre mayor que el torque resistente de la carga.

Se debe tener especial cuidado con aquellas cargas cuyo torque de arranque es alto y que probablemente requieran un **arranque directo** o con aquellos motores que tienen que ponerse en marcha utilizando algún arrancador para reducir la elevada corriente de arranque.

Debe recordarse que los motores de doble jaula de ardilla o de barras profundas se caracterizan por tener un torque mínimo menor que el torque de arranque.

Los valores de torque de arranque T_a o de torque mínimo T_{min} pueden encontrarse a partir de los datos que aparecen en el catálogo para cada motor en función del torque nominal T_n , a manera de coeficientes (Véase la tabla 9.0):

$$\frac{T_a}{T_n} ; \quad \frac{T_{min}}{T_n}$$

donde T_n se determina dividiendo la potencia nominal P_n del motor entre la velocidad nominal $\omega(n)$ del mismo, las cuales aparecen como datos en el catálogo.

5 – Verificar que el tiempo de puesta en marcha tpm , sea como máximo el indicado en la **Tabla 9.1**, de acuerdo a la IEEE.

Tabla 9.1

máximo tiempo de ta en marcha tpm (s)	motores de potencia hasta (kW)
6	5
10	10
16	16
21	70
24	100

Los valores indicados en la Tabla 9.1 se aplican sobre todo cuando las masas a acelerar en el arranque, en condiciones normales de instalación, no son considerables. En el caso que deban acelerarse masas rotativas considerables (compresores de aire, compresores para hielo, máquinas provistas de volantes importantes) la duración de la puesta en marcha es mayor.

Estos pequeños tiempos permitidos tienen la finalidad de proteger al motor contra el sobrecalentamiento de la máquina debido a las elevadas corrientes que se presentan durante el arranque y la puesta en marcha del motor. Por esta razón no debe permitirse una duración prolongada de este período de puesta en marcha.

Como se sabe el sobrecalentamiento origina una reducción de la vida útil del aislamiento tanto de las bobinas del estator como de las placas de los núcleos del estator y del rotor.

El deterioro del aislamiento de las bobinas del estator puede terminar produciendo un cortocircuito que malogre el motor "quemándolo" o electrizando la carcasa de la máquina (al reducir severamente la resistencia del aislamiento) con el consiguiente peligro para el (los) operador (es).

El cálculo exacto del tiempo de puesta en marcha cuando se quiere seleccionar un motor carece de sentido considerando que el método de selección utiliza una serie de aproximaciones, aunque tolerables, tanto para el motor como para la carga. De modo que este tiempo se determinará considerando valores promediados de los torques y de la aceleración.

Suponiendo que el motor se arranca con carga nominal, y que el torque del motor T_{mot} sea mayor que el torque resistente de la carga T_{carg} en el momento del arranque, esto significa que sobre las masas giratorias del sistema estará aplicado un torque acelerador T_{ac} que las sacará del reposo aumentando su velocidad angular ω con una aceleración angular α , hasta que el conjunto motor-carga alcance una velocidad constante de equilibrio $\omega(n)$, la velocidad nominal.

La aceleración angular promedio α (rad/s^2) es igual, por un lado, a la velocidad angular $\omega(n)$ (rad/s) alcanzada entre el tiempo de puesta en marcha t_{pm} (s):

$$\alpha = \frac{\omega(n)}{t_{pm}} \quad (\text{rad/s}^2)$$

por otro lado, la aceleración angular promedio es también igual al torque acelerador promedio \bar{T}_{ac} (N.m) dividido entre el momento de inercia I (kg.m^2) del conjunto de todas las masas giratorias, incluyendo el rotor del motor:

$$\alpha = \frac{\bar{T}_{ac}}{I} \quad (\text{rad/s}^2)$$

donde el torque acelerador promedio \bar{T}_{ac} (N.m) es igual al torque motor promedio \bar{T}_{mot} (N.m) menos el torque de carga promedio \bar{T}_{carg} (N.m):

$$\bar{T}_{ac} = \bar{T}_{mot} - \bar{T}_{carg} \quad (\text{N.m})$$

El torque motor promedio \bar{T}_{mot} es constante para cada motor; se determina a partir de las características del motor torque mínimo T_{\min} (N.m) y torque máximo T_{\max} (N.m):

$$\bar{T}_{\text{mot}} = (0.85)^2 (1/2) (T_{\min} + T_{\max}) \quad (\text{N. m})$$

El factor 0.85 permite garantizar un funcionamiento fiable del equipo en caso que la tensión de la red caiga hasta un 85% de la tensión nominal. El mismo factor está elevado al cuadrado por cuanto se sabe que el torque depende del cuadrado de la tensión aplicada.

El **torque motor promedio** no depende de la carga. Al variar la carga y el carácter del trabajo, la constancia de la magnitud del **torque motor promedio** conduce al cambio del **torque acelerador**.

El **torque de carga promedio** se determinará como la media de los valores mínimo y de operación del torque resistente, lo cual, como es de suponer, depende exclusivamente de cada carga en particular.

Igualando las dos expresiones obtenidas para la aceleración angular promedio se logra una expresión muy útil del tiempo de puesta en marcha tpm:

$$tpm = \frac{I \cdot \omega(n)}{\bar{T}_{ac}} \quad (\text{s})$$

Se observa que una forma de reducir el tiempo de puesta en marcha es disminuyendo, si fuera posible, el momento de inercia de las masas giratorias.

A continuación se menciona algunos datos que pueden ser de interés en el cálculo del tiempo de puesta en marcha:

El momento de inercia I (kg.m^2) de una masa volante con respecto a su eje es:

$$I = 12.25 \cdot 10^{-17} \cdot r^4 \cdot b \quad (\text{kg.m}^2)$$

donde:

r : es el radio (m); y

b : es el ancho (m).

El momento de inercia I (kg.m^2) de una masa volante girando a una velocidad ω (rad/s) puede quedar referido al eje del motor cuya velocidad es ω' (rad/s) como el momento de inercia I' (kg.m^2) aplicando la siguiente relación:

$$I' = I \cdot \left(\frac{\omega}{\omega'} \right)^2$$

Y el momento de inercia I' (kg.m^2) con respecto al eje del motor de una masa M (kg) que se traslada a una velocidad v (m/s) se puede encontrar aplicando la siguiente expresión:

$$I' = M \cdot \left(\frac{v}{\omega} \right)^2$$

El momento volante PD^2 (kg.f.m^2) se utiliza mucho en los catálogos de los motores para designar el momento de inercia del rotor. Cuando se requiera utilizar el momento de inercia del rotor del motor, en kg.m^2 , en los cálculos, bastará con dividir el PD^2 entre 4 (cuatro).

6 - Verificar la magnitud recomendada de la aceleración en el arranque (y la deceleración en el frenado) para la carga considerada, lo cual significa, en realidad, un tiempo mínimo de puesta en marcha (y de parada) que se debe exigir al motor también.

Esta aceleración depende de la naturaleza y forma de la carga así como del tipo de máquina.

Como se sabe, el tiempo de puesta en marcha es inversamente proporcional al torque acelerador, de modo que un tiempo muy breve de puesta en marcha puede llegar a significar un brusco torque de arranque, lo cual puede producir esfuerzos peligrosos no sólo en los mecanismos, sino en las cargas mismas.

Así, por ejemplo, en el carro de un puente-grúa, un brusco torque de arranque puede hacer resbalar las ruedas por los rieles; en un ascensor para personas, un elevado torque de arranque produce efectos indeseables en la respiración y la circulación, etc.

A manera de ejemplo, se dan las Tablas 9.2 y 9.3 conteniendo información sobre aceleraciones máximas permitidas para los mecanismos de elevación y transporte.

En caso que no hubiera forma de reducir la aceleración durante la puesta en marcha del sistema se procederá a incrementar el momento de inercia de las masas giratorias agregando una masa volante.

La selección de un motor eléctrico en aquellas aplicaciones en las que las necesidades de la carga son perfectamente conocidas y el ciclo de servicio es más o menos repetido, se efectúa de un modo distinto que para el caso general:

1º Un primer acercamiento al cálculo del motor es la elección de la potencia requerida por las diferentes cargas a una velocidad constante (la recomendada) después de la puesta en marcha.

2º Se calcula la potencia de régimen permanente para cada carga teniendo en cuenta el rendimiento total del mecanismo, el cual, por ser menor que uno, tenderá a elevar el valor de la potencia necesaria.

Tabla 9.2

Valores aconsejados de aceleración a (m/s^2) en la puesta en marcha de los mecanismos que efectúan la ascensión de una carga nominal.

Grúas de montaje, grúas que trabajan con metal fundido	0.1
Grúas para talleres mecánicos de montaje, varaderos o hangares y almacenes	0.2
Grúas para talleres metalúrgicos (excepto las grúas que trabajan con metal fundido)	0.5
Mecanismo de elevación de la grúa apiladora	0.5
Grúas de mandíbulas	0.8
Cabina de un ascensor con velocidad nominal hasta 1 m/s	1.5 max
Cabina de un ascensor con velocidad nominal mayor de 1 m/s	2.0 max

3º Se verifica el motor por el calentamiento. El motor, debido al tipo de aislamiento que posee, no debe sobrepasar un cierto límite de calentamiento.

El calentamiento, como se sabe, es provocado por los continuos arranques o por la operación con cargas muy grandes o sobrecargas.

Este cálculo se basa en la **potencia térmicamente equivalente** o potencia equivalente por el calentamiento según la cual un motor, que en marcha continua, puede suministrar dicha potencia térmica media, es suficiente, desde el punto de vista térmico, para el ciclo examinado. Esto se ha suponiendo que el motor alcanza la misma temperatura en marcha intermitente que en marcha continua.

Para estimar la potencia necesaria de un motor de velocidad constante, se puede suponer que el calentamiento del inducido queda determinado por las pérdidas del motor variables durante las diversas fases del ciclo, incluyendo la variación de la ventilación con la velocidad del motor.

Las pérdidas variables dependen de la potencia mecánica de salida. Al igual que las corrientes que variaban periódicamente, el calentamiento medio puede ahora determinarse hallando el valor eficaz de la curva potencia útil-tiempo, es decir, teniendo en cuenta las potencias desarrolladas por el motor en distintos

Tabla 9.3

Magnitud recomendada de aceleración (m/s^2) durante la puesta en marcha (así como la magnitud de deceleración en el frenado), al trabajar sin carga, de los mecanismos de avance o de traslación en plano horizontal.

Grúas y carros que transportan metal líquido, cargas explosivas e inflamables y productos químicos	0.10
Grúas de puente de destino general	0.15
Carros de las grúas de puente	0.12
Puentes transbordadores	0.05
Carros de los puentes transbordadores	0.80
Grúas de pórtico y de torre	0.15
Grúas apiladoras, altura de elevación hasta 6 m	0.4 – 0.8
Grúas apiladoras, altura de elevación de 8 m y más	0.2 – 0.4

períodos de trabajo del mecanismo con cargas de distinta magnitud, y seleccionando un motor de uso general que tenga, por lo menos, tales características nominales:

$$P_{\text{eficaz}} = \sqrt{\frac{\sum P_{\text{útil}}^2 \cdot t}{t_{\text{operación}} + t_{\text{reposo}} / k}}$$

donde k tiene en cuenta la menor ventilación en reposo y depende del tipo de ventilación del motor; es un factor que interviene sólo cuando existe período de reposo.

4º Por esta potencia se efectúa la elección del motor según el catálogo.

5º Verificar que el motor escogido pueda arrancar. En caso contrario tendrá que probarse el motor de potencia inmediata superior.

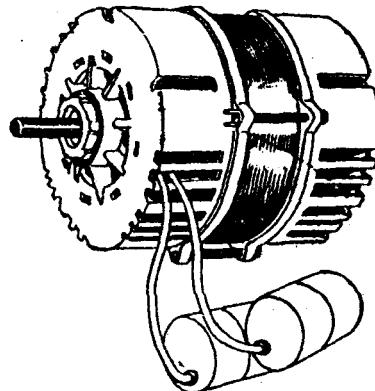
6º Verificar el tiempo máximo de puesta en marcha. Si este tiempo supera el máximo recomendado, se procede a escoger un motor más grande, en su defecto, podría reducirse el momento de inercia de las masas giratorias, si fuera posible.

7º Verificar el tiempo mínimo de puesto en marcha. En caso que el motor elegido fuese tan grande, que estuviera produciendo una aceleración excesiva para los mecanismos y la carga, entonces la mejor solución sería aumentar la inercia del conjunto giratorio agregando una volante.

Capítulo 10

MOTORES MONOFASICOS

- 10.1 Generalidades**
- 10.2 El motor monofásico de inducción**
- 10.3 Tipos de motores monofásicos de inducción**
- 10.4 El motor universal**
- 10.5 Otros tipos de motores**



MOTORES MONOFASICOS

10.1 GENERALIDADES

Los motores monofásicos son motores de pequeña potencia fraccionaria mayormente: 1/4 hp, 1/2 hp, 3/4 hp, 1 hp, de uso más bien doméstico o en pequeños talleres o negocios donde se alimentan con corriente alterna monofásica para accionar refrigeradoras, bombas, instrumentos registradores, relojes, aparatos de cocina, máquinas-herramientas portátiles, tocadiscos, ventiladores, compresores, etc.

Los motores monofásicos se construyen de diversos tipos cada cual con sus propias características constructivas y de operación. En el presente libro se estudiará sólo tres tipos importantes de motores monofásicos, a saber, los de inducción, los de conmutador y los síncronos, desde un punto de vista básico.

En el país la firma nacional DELCROSA, por ejemplo, fabrica motores monofásicos de uso general de 1/2 hp a 1 1/2 hp de potencia nominal y otros tipos de motores monofásicos de pequeña potencia, también, para usos específicos.

10.2 EL MOTOR MONOFASICO DE INDUCCION

Es el motor que presenta las mejores características, por lo que es el de mayor difusión en el país.

Presenta un rotor de jaula de ardilla. El estator está compuesto por un embobinado de trabajo o principal, el cual se distribuye en las ranuras del estator del mismo modo que en los motores trifásicos.

Como se sabe, al aplicar una tensión monofásica alterna al embobinado principal, se generan dos campos magnéticos giratorios de igual amplitud y constantes, que giran a la misma velocidad pero en sentidos contrarios. Como resultado se produce un campo magnético pulsatorio, el cual no es capaz de poner en marcha el motor por cuanto produce un torque de arranque nulo.

En la Figura 10.1 se muestra las curvas de torque-velocidad correspondientes a cada uno de los campos magnéticos giratorios (en línea de trazos), así como la curva resultante (en línea continua), diferencia de las curvas de los torques 1 y 2, que es la que corresponde propiamente al motor de inducción monofásico.

El campo que gira a la derecha da origen, por ejemplo, al torque giratorio 1 y el que gira a la izquierda, al torque giratorio 2, de sentido contrario.

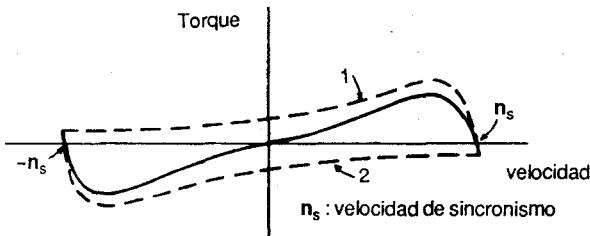


Fig. 10.1 Curvas de torque-velocidad de un motor de inducción monofásico.

Se observa en la Figura 10.1 que este motor no tiene torque de arranque debido a que ambos torques se equilibran. Sin embargo, si se utilizara algún medio manual, mecánico auxiliar, u otro, para ponerlo en marcha, el motor empezará a girar en el sentido en el que es impulsado y aumentará su velocidad hasta acercarse a la de sincronismo quedando así en condiciones de desarrollar trabajo mecánico.

El método más común utilizado es el de un embobinado auxiliar o de arranque, generalmente de menor calibre y menor número de vueltas, distribuido también en el estator pero formando 90° magnéticos con el embobinado principal, creando así una diferencia de fase ϕ entre la corriente que circula por el embobinado principal y la que circula por el embobinado auxiliar.

Con esta medida se consigue que el motor pueda funcionar como bifásico durante la puesta en marcha. De allí el nombre de motores de fase partida o de fase dividida con el que se les conoce.

El circuito de la fase partida se conecta en paralelo con el circuito principal y se puede utilizar sólo durante la puesta en marcha o también durante el funcionamiento. En el primer caso, cuando el motor alcanza un 75% de su velocidad nominal, un interruptor centrífugo montado en el rotor, desconecta el embobinado auxiliar, quedando únicamente en servicio el embobinado principal.

El ángulo ϕ de desfasaje entre las corrientes mencionadas es relativamente grande debido a que las impedancias de los embobinados principal y auxiliar son bastante diferentes. El ángulo de impedancia del embobinado principal es mayor que el del auxiliar por lo que la corriente de este último adelanta a la del embobinado principal.

En algunos casos, se agrega condensadores en el circuito del embobinado auxiliar que adelantan aún más la corriente de éste.

El campo magnético resultante de ambos embobinados resulta ser también, en tales condiciones, un campo magnético giratorio que induce tensiones en el en el rotor cortocircuitado y que produce un torque que hace girar el rotor a una velocidad muy cercana a la de sincronismo, la cual dependerá, como se sabe, del número de polos y de la frecuencia de la red.

10.3 TIPOS DE MOTORES MONOFASICOS DE INDUCCION

Existen los siguientes tipos de motores monofásicos de inducción: el de fase partida normal, el de fase partida de arranque por resistencia, el de fase partida de arranque por condensador, el de arranque por condensador más condensador permanente y el motor con condensador de dos valores.

En la Figura 10.2 (a) se muestra el esquema de conexiones de un **motor de fase partida normal**. El estator posee dos embobinados, el principal y el auxiliar. Este último se energiza sólo durante el período de puesta en marcha: cuando el motor alcanza una velocidad de 75 a 80% de la de sincronismo, un interruptor centrífugo se abre desconectando el embobinado auxiliar. En la Figura 10.2 (b) puede verse la característica típica de torque-velocidad de estos motores, funcionando con embobinado auxiliar y sin éste.

El deslizamiento a carga nominal es de un 5% ó menos.

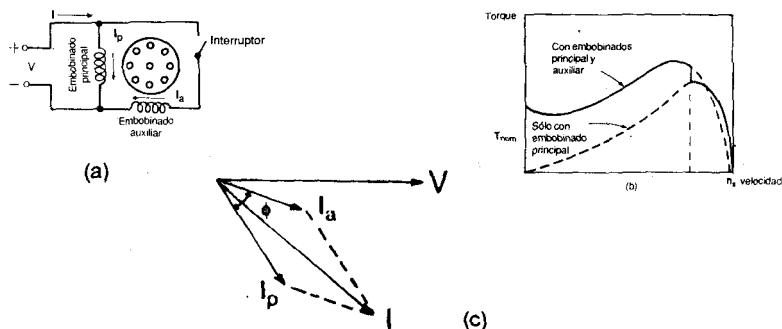


Fig. 10.2 El motor de fase partida normal.

- (a) Esquema de conexiones.
- (b) Característica torque-velocidad.
- (c) Diagrama fasorial en el arranque.

Como el embobinado principal permanece energizado durante el funcionamiento, se construye con alambre de mayor calibre; con el fin de lograr un torque grande, puesto que el torque es proporcional al flujo concatenado, el embobinado se construye con un número de vueltas grande.

En los motores de fase partida normales el desfasaje ϕ entre las corrientes del embobinado principal I_p y auxiliar I_a es de unos 25° . Véase el diagrama fasorial en el arranque de la Figura 10.2 (c).

En la Figura 10.3 (a) se muestra el esquema de conexiones de un **motor de fase partida de arranque por resistencia**. Este motor utiliza una resistencia R externa adicional en serie con el embobinado auxiliar con el fin de aumentar aún más el desfasaje durante la puesta en marcha.

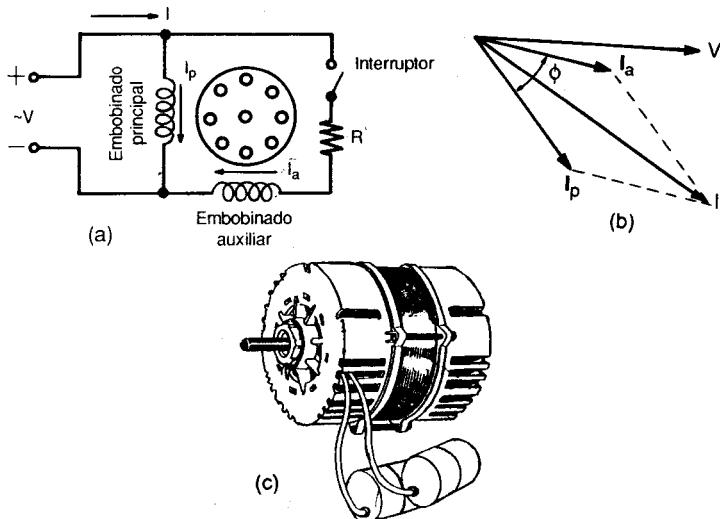


Fig. 10.3 El motor de fase partida con arranque por resistencia.

- (a) Esquema de conexiones.
- (b) Diagrama fasorial en el arranque.
- (c) Motor de fabricación nacional.

El desfasaje puede conseguirse también aumentando la resistencia del embobinado auxiliar con relación al principal, construyendo el embobinado auxiliar con alambre de menor calibre todavía. La reactancia del embobinado auxiliar se reduce bobinando un tercio de sus espiras en sentido contrario al del resto de las espiras.

Estos motores se conectan directamente a la red, pues a pesar de presentar corrientes de arranque altas, de 4 á 7 veces la nominal, éstas no afectan mayormente la tensión de la red como ocurre en las instalaciones con motores trifásicos.

Estos motores usan un interruptor electromagnético con una bobina sensora en serie con el embobinado principal para controlar contactos normalmente abiertos en el embobinado auxiliar.

La corriente de arranque alta provoca el cierre de dichos contactos, pero, a medida que aumenta la velocidad del rotor y la corriente decrece, los contactos se abren de nuevo a una velocidad prefijada.

El sentido de giro de un motor de fase partida se puede cambiar invirtiendo las conexiones del embobinado auxiliar en la caja de bornes de la máquina.

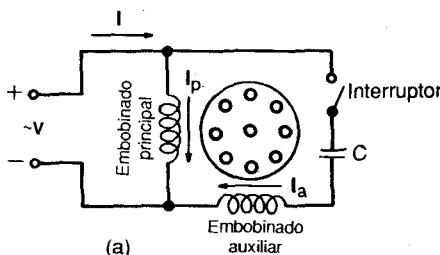
Los torques de arranque están comprendidos entre 100 y 200% del torque nominal.

Los embobinados auxiliares no se construyen para soportar una operación prolongada. Si el interruptor no se abre cuando el motor se ha puesto en mar-

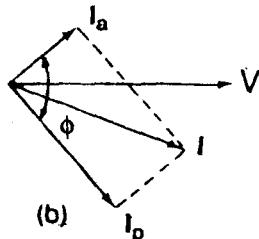
cha, la acumulación de calor resultante puede ocasionar que se quemen ambos embobinados.

La firma nacional DELCROSA fabrica este tipo de motores para el accionamiento de lavadoras domésticas. Véase la Figura 10.3 (c).

En la Figura 10.4 (a) se muestra el esquema de conexiones del **motor de fase partida con arranque por condensador**. Este motor es semejante al anterior con la diferencia que tiene un condensador C electrolítico de corriente alterna tipo seco de gran capacitancia, entre 75 y 350 μF , en serie con el embobinado auxiliar, y que se desconecta una vez que se pone en marcha el motor. El condensador está diseñado para trabajo intermitente de corta duración.



(a)



(b)

Fig. 10.4 El motor de fase partida con arranque por condensador.

(a) Esquema de conexiones.

(b) Diagrama fasorial en el arranque.

El torque de arranque es proporcional al producto $I_p \cdot I_a \cdot \sin \phi$, en donde ϕ es el ángulo entre las corrientes I_p é I_a que circulan por los embobinados principal y auxiliar respectivamente. El condensador permite que dichas corrientes se desfaseen entre si alrededor de 90° durante la puesta en marcha, tal como se observa en el diagrama fasorial de la Figura 10.4 (b).

Ya que todos estos motores de fase partida funcionan sólo con el embobinado principal, sus características de funcionamiento son las mismas. Sin embargo, en el motor de arranque por condensador existe un flujo mayor y un mayor desfasaje ϕ , lo cual produce torques de arranque mayores. Véase la Figura 10.5.

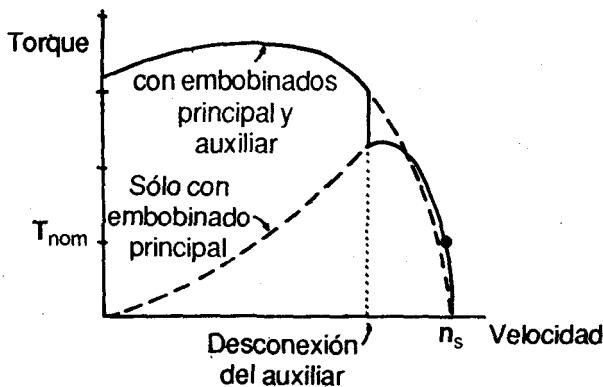


Fig. 10.5 Características torque-velocidad de motores de fase partida de arranque por condensador.

El deslizamiento en condiciones normales es menor que 5%.

Estos motores se usan mucho en aplicaciones domésticas, por ejemplo, para el accionamiento de los compresores de las refrigeradoras.

La firma nacional DELCROSA fabrica estos motores para acoplarse a bombas.

En la Figura 10.6 (a) se muestra el esquema de conexiones del motor con condensador C permanente. Este motor funciona con ambos devanados. Cuando funciona con un solo devanado, las pulsaciones de potencia al doble de la frecuencia aplicada ocasionan un motor ruidoso.

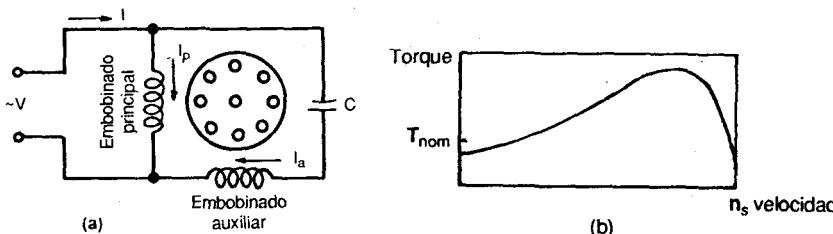


Fig. 10.6 El motor monofásico de inducción con condensador permanente.
(a) Esquema de conexiones. (b) Característica torque-velocidad.

Con dos devanados desfasados 90°, la potencia es pareja y el motor es silencioso. Se consigue aumentar el factor de potencia y la eficiencia. En este motor, la capacitancia durante la puesta en marcha y en la marcha normal tienen el mismo valor.

Estos motores tienen buenas características de marcha, debido a su baja capacitancia. La baja capacitancia produce un torque de arranque bajo (el 50% del

torque nominal). Véase la Figura 10.6 (b). El condensador electrolítico más barato no está especificado para trabajo continuo por lo que se debe usar un condensador del tipo de papel impregnado en aceite, de mayor costo.

Estos motores se usan sobretodo en el accionamiento de ventiladores.

En la Figura 10.7 (a) se muestra el esquema de conexiones de un **motor de inducción con condensador de dos valores**.

En este motor, sólo durante la puesta en marcha, se conecta un segundo condensador C_2 de mayor valor en paralelo con un condensador permanente C_1 . Esto se hace con el fin de que el motor desarrolle un buen torque de arranque, pero conservando sus características de marcha normal.

La capacitancia durante el período de puesta en marcha puede ser 10 ó más veces la capacitancia de marcha. El condensador de arranque C_2 es uno electrolítico de unos $250 \mu\text{F}$, mientras que el condensador permanente es uno de papel impregnado en aceite de unos $15 \mu\text{F}$.

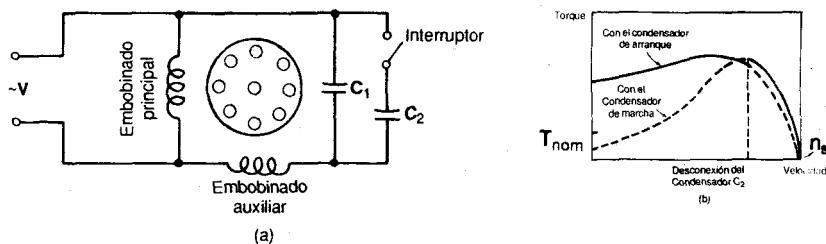


Fig. 10.7 Motor de inducción monofásico con condensador de dos valores.

- (a) Esquema de conexiones.
- (b) Características torque-velocidad.

Las curvas de la Figura 10.7 (b) muestran la velocidad de marcha con ambos condensadores en el circuito como inferior a la velocidad con sólo el condensador de marcha. El deslizamiento a carga nominal en los motores permanentemente partidos es de un 10%.

10.4 EL MOTOR UNIVERSAL

El motor universal o motor serie monofásico es semejante a un motor serie de corriente continua en el que se ha hecho pequeñas modificaciones para mejorar su funcionamiento en corriente alterna: los polos salientes del estator están hechos de placas con el fin de reducir las corrientes parásitas. Véase la Figura 10.8; el embobinado inductor es de pocas espiras de alambre grueso; no hay polos de conmutación ni embobinado de compensación.

El motor universal tiene el mismo principio de funcionamiento que un motor de corriente continua. Con ayuda de la Figura 10.8 (b) y (c) se explica la razón por la cual este motor puede funcionar en corriente alterna.

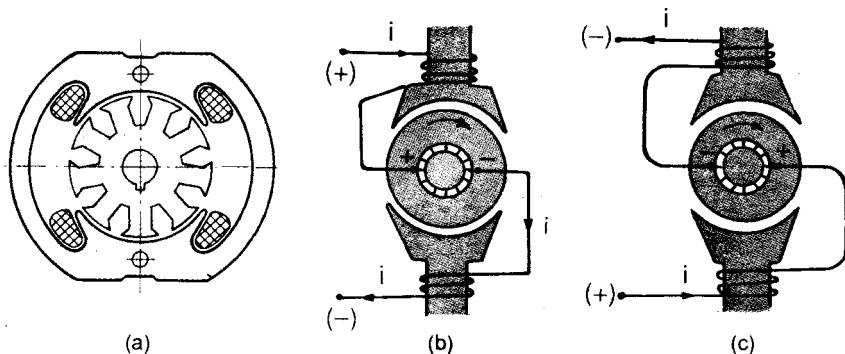


Fig. 10.8 El motor universal.

Cuando se invierte la polaridad de la red, se invierten, a la vez, las corrientes de excitación y la de armadura, pues éstas se encuentran en serie. Como resultado de esto, el sentido de giro del motor sigue siendo el mismo.

Las características de operación son similares a las del motor serie de corriente continua. Tiene un amplio rango de velocidad con carga, tal como se puede observar en la Figura 10.9, pudiendo alcanzar valores muy altos entre 3,000 y 11,000 rpm.

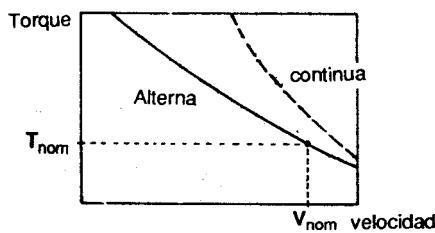


Fig. 10.9 Variación de la velocidad del motor universal con la carga.

La velocidad de vacío puede llegar a ser cinco veces la velocidad a plena carga.

La velocidad de un motor universal es algo menor cuando trabaja con corriente alterna debido a la caída de tensión en la reactancia del campo, especialmente con cargas grandes.

El motor universal se construye para pequeñas potencias (hasta 0.5 hp de capacidad). Se utiliza cuando se necesita que pueda funcionar con corriente continua y cuando se necesita obtener velocidades muy altas que se regulan con la carga, o sea, que disminuye al incrementarse la carga.

Se usa generalmente para accionar pequeños aparatos tales como máquinas de calcular, máquinas de vacío, mezcladoras de comida, equipo de ventilación, herramientas portátiles, aspiradoras y otros aparatos electrodomésticos.

10.5 OTROS TIPOS DE MOTORES MONOFASICOS

10.5.1 El motor de polos sombreados o divididos

Es un motor asincrónico de jaula de ardilla, cuyo estator tiene un embobinado concentrado de dos o cuatro polos, incapaz de producir por si sólo un campo magnético giratorio.

Con el fin de lograr el campo magnético giratorio se hace una pequeña ranura en los polos y se coloca en la misma una espira de cobre cortocircuitada, que abarca de un medio a un tercio del polo. Véase la Figura 10.10 (a), (b) y (c).

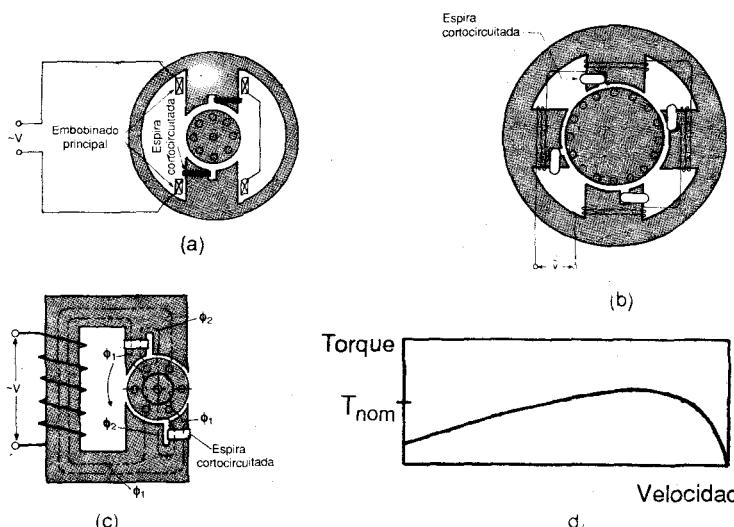


Fig. 10.10 Esquema de motores de polos sombreados con una espira cortocircuitada.

- (a) Motor de dos polos.
- (b) Motor de cuatro polos.
- (c) Motor de dos polos.

En esta espira se induce una f.e.m. que hace circular una corriente por la espira produciéndose un campo magnético atrasado Φ_2 respecto al campo principal. Véase la Figura 10.10 (c). Como consecuencia se produce un pequeño campo resultante que oscila de un extremo a otro del polo, desde la porción no sombreada hasta la porción sombreada igual que un campo magnético giratorio. Por lo tanto, las espiras de cortocircuito actúan de un modo similar al bobinado auxiliar de los motores de fase partida: sus campos magnéticos forman, junto con el campo magnético principal Φ_1 , un campo magnético giratorio. Esto es suficiente para poner en movimiento el rotor que luego funciona como cualquier motor de inducción.

El motor de polos sombreados es de construcción especialmente sencilla y barata, y no requiere de dispositivos auxiliares (condensador, interruptor centrífugo), pero las pérdidas en las espiras de sombra a velocidad nominal son grandes presentando poca capacidad de sobrecarga y una eficiencia muy baja de alrededor del 20%. Véase la Figura 10.10 (d). Tiene un torque de arranque bajo.

Su empleo no está muy difundido y se le utiliza en pequeñas aplicaciones de 100 W ó menos, en las que no interesa el torque de arranque ni la eficiencia, como por ejemplo, en el accionamiento de pequeños ventiladores, tocadiscos, aparatos de cinta magnetofónica, máquinas electrodomésticas, etc.

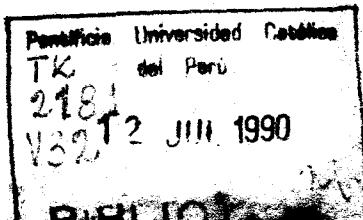
10.5.2 El motor síncrono monofásico

Los motores síncronos monofásicos se parecen, en su modo de funcionar, a los motores síncronos trifásicos; se emplean, pues, cuando se exige un número de revoluciones exactamente constante y se desea mejorar el factor de potencia, en lugar de usar condensadores.

En nuestro medio se usan los motores síncronos monofásicos en relojes y mesas giratorias.

BIBLIOGRAFIA

1. ALEXANDROV, M. "Aparatos y máquinas de elevación y transporte" Editorial Mir-Moscú 1976.
2. BIELLA-BIANCHI, Dario. "Máquinas Eléctricas" Tomo II.
3. CORRALES MARTIN, Juan. "La máquina eléctrica" Tomo II. Teoría General de funcionamiento. Editorial Labor S.A. 1970. Barcelona.
4. FITZGERALD, A.G. "Teoría y análisis de las máquinas eléctricas".
5. FLORES Sintas, F. y WILHELM Ayza, J.R. "Fundamentos de circuitos eléctricos, transformadores y motores", 1971, Madrid.
6. GINGRICH, M. "Máquinas eléctricas".
7. HILLE, Wilhelm y SCHNEIDER, Otto. "Máquinas y aparatos eléctricos" Editorial Labor S.A., Barcelona, 1968.
8. HINDMARSH J. "Electrical machines and their applications" Pergamon Press, 1977.
9. KOSTENKO, M. P. "Máquinas eléctricas" Tomos I y II.
10. MATSCH, Leander W. "Máquinas eléctricas y electromecánicas" Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. México, 1972.
11. NASSAR, Syed A. "Máquinas eléctricas y electromecánicas" Mc Graw-Hill España, 1982.
12. REBORA, Gino. "La construcción de máquinas eléctricas" Editorial científico médica HOEPLI, Barcelona, 1969
13. SINGER, Francisco L. "Electromecánica práctica" Editorial hispano americana, S.A. (H.A.S.A.) Buenos Aires, Argentina.
14. THALER GEORGE, J. y WILCOX L. Milton "Máquinas eléctricas estado dinámico y permanente" Editorial LIMUSA S.A. 1969.
15. DELCROSA, Catálogo de motores eléctricos.
16. TELEMECANICA ELECTRICA ESPAÑOLA, S.A., Concepción de un automatismo.



VARGA

Maquinas Electricas Rotativas

PUC