

Aislamientos

Los aislantes que se utilizan en la construcción de las bobinas generalmente cuentan con un recubrimiento de resina termofraguante (clase térmica para 120°C) que permiten que al someter nuestras bobinas al horno proporcione una alta resistencia eléctrica y mecánica, existen otros tipos de aislamientos como son cartón presspan, papel crepe, nomex mylard, estermat, rag-mylard, copaco etc. (se utilizan de acuerdo al equipo que se requiera).

Núcleo

El corte de nuestros núcleos es elaborado con lamina de acero al silicio grano orientado calidad M-3 O M-4 de alta permeabilidad magnética y además tienen un recubrimiento en la superficie, que llega a soportar hasta 800° C de temperatura.

Debido a todas estas ventajas obtenemos muy bajas pérdidas eléctricas y un nivel de ruido muy por debajo de lo que marcan las normas oficiales.

Tanques

Elaborados con lamina rolada engrío de diferentes calibres y después de un proceso de limpieza se aplica un primario y después un acabado alquidalcio color gris claro según normas.

Líquido Aislante

El aceite utilizado en nuestros equipos en fabricación por PEMEX, es clasificado como no inhibido Núm. 1 para uso eléctrico con las tensiones nominales.

4.19 Tipos Comerciales De Transformadores

Tipo Poste

Los transformadores Tipo Poste, están diseñados específicamente para aplicaciones donde la distribución de energía eléctrica sea aérea. La aplicación convencional de este tipo de transformadores es la distribución eléctrica ciudadana, rural o industrial. En unidades monofásicas desde 10 KVA hasta 100 KVA, en clase 15KVA, en clase 15,25, y 34.5 KV.

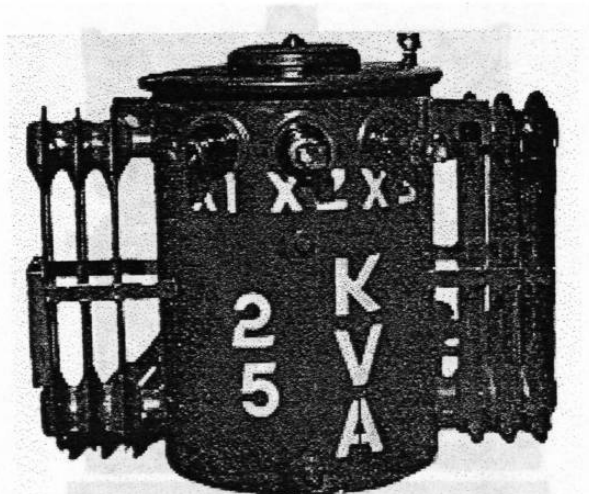


Figura 31 Transformador tipo poste

Tipo Estación

Este tipo de unidades tienen su aplicación principal en edificios comerciales, hoteles, hospitales, industrias y aquellos lugares donde la instalación del transformador sea en una subestación interior o intemperie, sobre piso. Estos transformadores se fabrican desde 225 KVA a 500 KVA, en clases 15,25 y 34.5 KV.

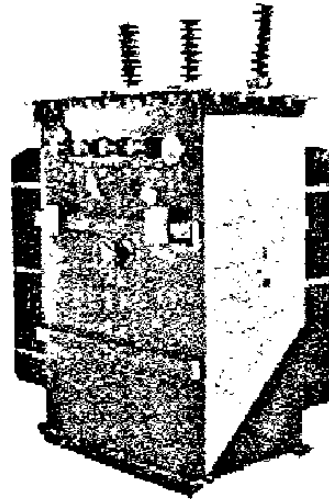


Figura 32 Transformador tipo estación

Tipo Pedestal

Los transformadores Tipo Pedestal, son unidades diseñadas para la distribución subterránea comercial o residencial de energía eléctrica, que por su aspecto armonizan plenamente con la arquitectura moderna en fraccionamientos residenciales, centros comerciales, condominios, industrias, etc. Se fabrican en unidades monofásicas desde 15 KVA hasta 75 KVA, en clases 15 y 25 KV y en unidades trifásicas desde 45 KVA hasta 500 KVA, en clases 15 y 25 KV.

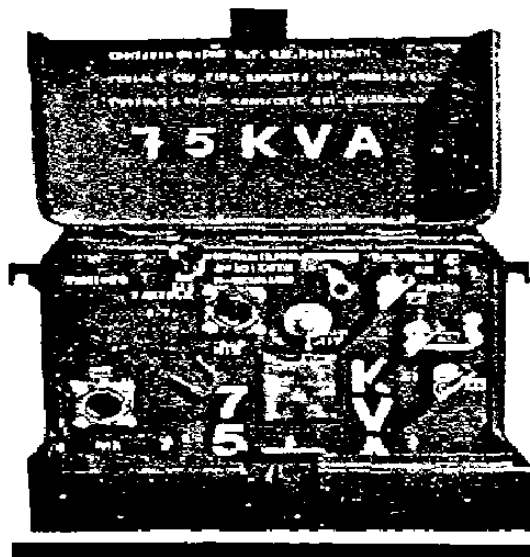


Figura 33 Transformador tipo pedestal

4.20 Transformadores De Potencia

Los transformadores de potencia están diseñados para llenar los requerimientos de energía eléctrica para la alimentación de edificios comerciales, hoteles, hospitales, plantas industriales, etc. donde la instalación de la subestacion sea interior o intemperie y sobre

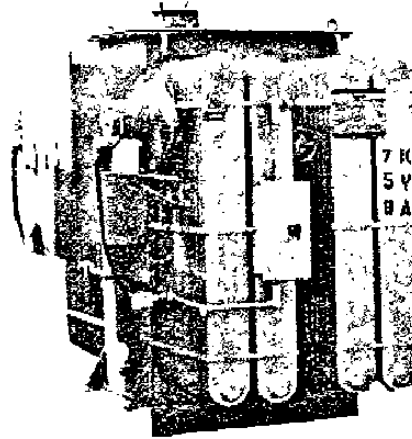


Figura 34 Transformador de potencia

4.21 Transformadores Para Control y Alumbrado

Los transformadores para control y alumbrado Tipo Seco, tienen su aplicación en centros de estación de alumbrado o circuitos de control. Se fabrican en unidades monofasicas desde 10 KVA a 167 KVA, en clases 1.2,2.4 y 5 KV; y en unidades trifasicas, de 15 KVA a 500 KVA, en clases 1.2, 2.4 y 5 KV.

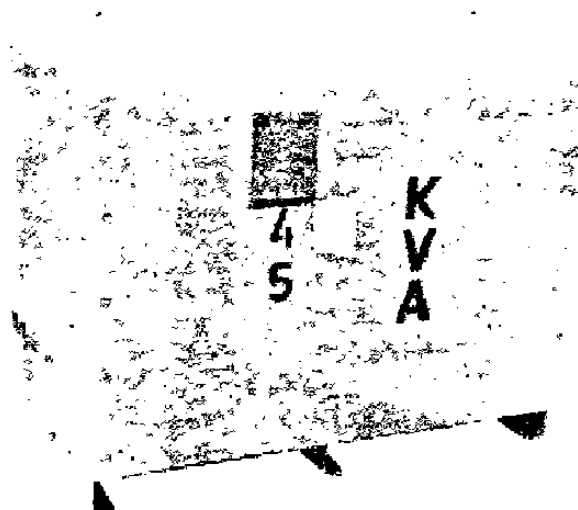


Figura 35 Transformador de para control y alumbrado

4.22 Programa Recomendado Para Pruebas De Mantenimiento.

No. Prueba de Mantenimiento	Programa
1. Liquido aislante.	<i>Anual</i>
a) Resistencia dialéctica.	
b) Numero de neutralización.	
c) Color.	Anual
2. Resistencia de aislamiento.	Anual
3. Indice de polarización.	Anual
4. Factor de potencia.	Anual
5. Alto potencial de CA (Hi-Pot)	Cada 5 años
6. Prueba de voltaje inducido.	Cada 5 años

Tabla 6 Programa recomendado para pruebas de mantenimiento en transformadores

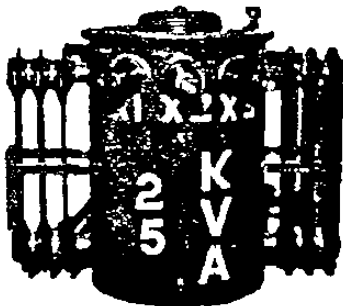
Limites De Prueba Para Aceite Tipo Mineral

Prueba	Satisfactorio	Debe ser Filtrado	Descártese y Reemplácese
Resistencia dialéctica (ASTM D-877)	23 KV	Menos de 22 KV	-
Numero de neutralización	0.4 Más.	0.4 a 1.0	Mayor de 1.0
Color	3 ½ Máx,	Arriba de 3 ½	-

Tabla 7 Limite de prueba para aceite tipo mineral en transformadores

Especificaciones

Tensión Primaria: 440 Volts Tensión Secundaria: 120/240 Volts Frecuencia: 60 Hertz
 Sobre-elevacion de Temperatura: 65°C sobre la del ambiente, con un media de 30°C y una máxima de 40°C Derivaciones a Plena Capacidad: Sin Altura de operación: 2000 m.s.n.m.
 Tipo de Enfriamiento: Autoenfriado-OA Normas de Fabricación: NOM-J-116



Transformador Tipo Poste de 25 KVA, 440 120/240 Volts, una Fase

KVA	MODELO
10	RMPO-10
15	RMPO-15
25	RMPO-25
37.5	RMPO-37

Figura 36 Transformador comercial tipo poste monofasico de 25 KVA y tabla de modelos hasta 37.5 KVA

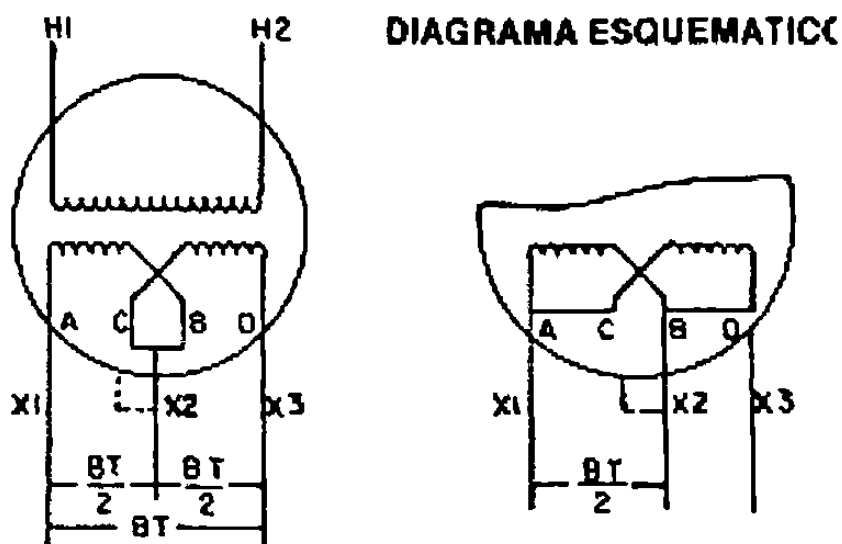
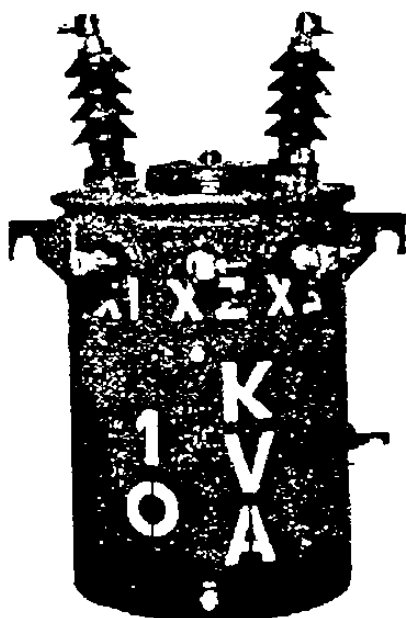


Figura 37 Diagrama esquemático del transformador comercial tipo poste monofasico de 25 KVA.

Especificaciones

Tensión primaria: 13,200 Volts Tensión secundaria: 120/240 Volts Frecuencia: 60 Hertz Sobre elevación de temperatura: 65°C sobre la del ambiente, con una media de 30°C y una máxima de 40°C Derivación a plena capacidad 2 arriba, 2 abajo de 2.5% c/u Altura de operación: 2000 m.s.n.m. Tipo de enfriamiento: Autoenfriamiento-OA Normas de fabricación: OM-J-116 y de acuerdo a las especificaciones de C.F.E. K-0000-01.



Transformador Monofásico, Clase 15 KV.
de 13200-120/240 de 10 KVA

KVA	MODELO	KVA	MODELO
10	RMP1-10	37.5	RMP1-37.5
15	RMP1-15	50	RMP1-50
25	RMP1-25	75	RMP1-75
37.5	RMP1-37.5	100	RMP1-100

Figura 38 Transformador comercial tipo poste monofasico de 10 KVA y tabla de modelos hasta 100 KVA

Diagrama Esquemático

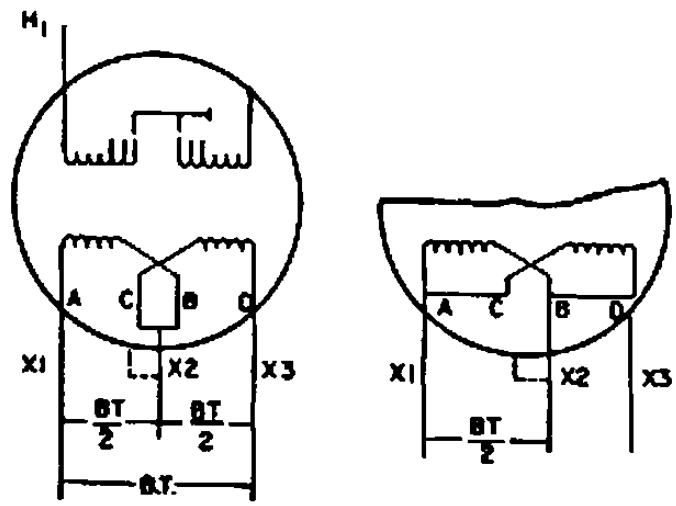
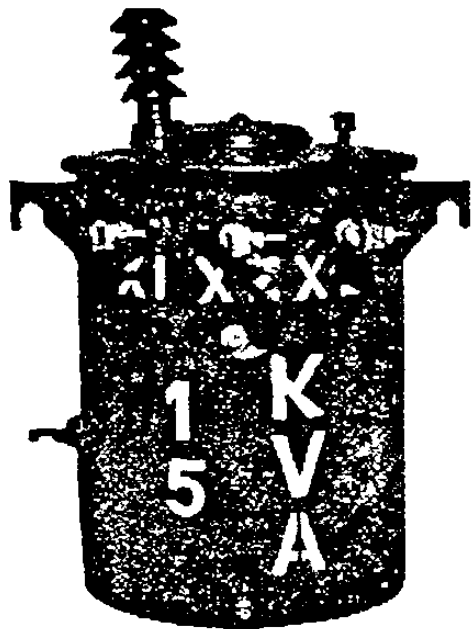


Figura 39 Diagrama esquemático del transformador comercial tipo poste monofasico de 10 KVA 13200/440-220 V

Especificaciones

Tensión primaria: 13,200YT/7620 Tensión Secundaria: 120/240 volts Frecuencia: 60 Hertz sobre-elevacion de temperatura: 65°C sobre la del ambiente, con una media de 30°C y una máxima de 40°C Derivaciones a plena capacidad 2 arriba, 2 abajo de 2.5% c/u Altura de Operación: 2000 m.s.n.m. Tipo de Enfriamiento: Autoenfriado-OA Normas de Fabricación: NOM-J-116 y de acuerdo a las especificaciones de C.F.E. K-0000-01



KVA	MODELO
15	RMPI-YT-15
25	RMPI-YT-25
37.5	RMPI-YT-37.5
50	RMPI-YT-50

Transformador Monofásico, Clase 15 KV. de 13200YT/7620-120/240. 15 KVA

Figura 40 Transformador comercial tipo poste monofasico de 15 KVA y tabla de modelos hasta 50 KVA

Diagrama Esquemático

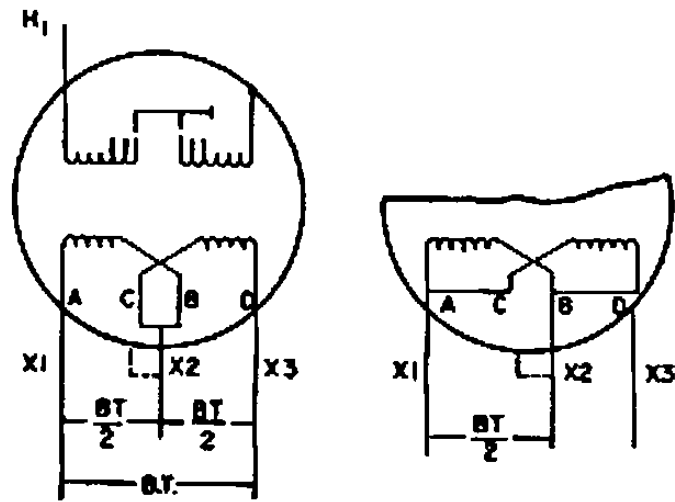


Figura 41 Diagrama esquemático del transformador comercial tipo poste monofasico de 15 KVA 13200YT/7620-120/240 V

5. MOTORES DE INDUCCION MONOFASICOS

5.1 Introducción

En el hogar y talleres pequeños, la mayoría de los aparatos que usamos diariamente se encuentran contruidos con motores de inducción monofásicos de c.a. como por ejemplo las lavadoras, refrigeradores, aires lavados, abanicos de pedestal, bombas, relojes etc. Es por esto la gran importancia que tienen estos motores en nuestra vida diaria.

5.2 El Principio de Funcionamiento

Toman el nombre de motores de inducción, las maquinas de corriente alterna que verifican su movimiento de rotación por la influencia de la corriente y voltaje que se induce en el rotor.

Un motor de inducción monofásico, como su nombre lo indica, tiene un embobinado monofásico en el estator.

El principio en que se funda el motor monofásico de inducción es el de proveer al estator de dos devanados, que en la practica se denominan devanado principal y devanado auxiliar de arranque. En donde el devanado auxiliar solo se emplea para el arranque del motor y debe de ser desconectado cuando el motor alcance aproximadamente el 70% de la velocidad nominal.

5.3. Elementos Mecánicos del Motor de Inducción Monofásico

Los motores de caballos de potencia fraccionarios son usualmente monofásicos, y hay muchos tipos de dichos motores monofásicos. No obstante, los elementos mecánicos del motor de inducción monofásico son los mismos que los de inducción trifásico, excepto que se usa un interruptor centrífugo en ciertos tipos de motores monofásicos, para desconectar el arrollamiento que se usa para el arranque., el rotor del motor monofásico de inducción es usualmente del tipo de jaula de ardilla

5.4. Partes Principales del Motor de Inducción

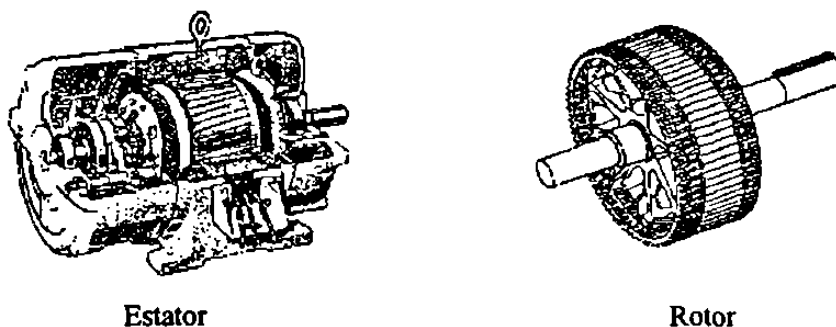


Figura 42 Partes principales del motor de inducción

Estator.- Es la parte fija del motor y sirve de sustento, además de proporcionar el camino para el flujo magnético. Aquí se encuentran alojados los devanados de arranque y principal.

Rotor Jaula de Ardilla.- Es la parte móvil del motor y esta compuesto una serie de barras conductoras colocadas dentro unas ranuras hechas en la superficie del rotor con los extremos puesto en corto circuito por medio de anillos. Toma este nombre ya que se asemeja a las jaulas para ardillas o ratas domesticas.

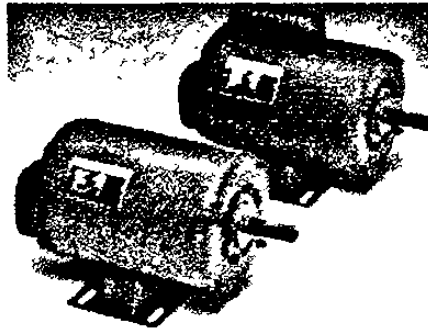


Figura 43 Tipos de motores monofásicos (motor monofásico de inducción y con condensador de arranque)

5.5 El Concepto de Deslizamiento del Rotor

El voltaje inducido en la barra de un motor de inducción depende de la velocidad del rotor con respecto al campo magnético el cual motor depende del voltaje y las corrientes del rotor, para definirlo mas comúnmente “velocidad de deslizamiento” el cual se define como diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor.

$$n_{des} = n_s - n_R$$

n_{des} = Velocidad de desplazamiento de la maquina

n_s = Velocidad del campo magnético (sincronica)

n_R = Velocidad mecánica del rotor

Deslizamiento relativo expresado en porcentaje

$$s = \frac{n_{des}}{n_s} (x100\%)$$

$$s = \left(\frac{n_s - n_R}{n_s} \right) (x100\%)$$

En donde la velocidad sincrónica se calcula como:

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

5.6 Los Devanados de Trabajo y de Arranque Auxiliar

Los cuales se encuentran dentro del estator defasados entre sí un ángulo de 90 grados con el objeto de que la corriente se desplace los mismo 90 grados con la relación de uno a otro devanado.

5.7 Arranque de Los Motores Monofasicos de Inducción

Con el rotor estacionario, si se aplica un voltaje monofásico al estator, se encuentra que el rotor no gira. Sin embargo, si recibe de algún modo un par inicial y se hace girar, empieza a caminar y continúa su giro. También se encuentra que el rotor puede girar en cualquier dirección tan solo cambiando la dirección del par inicial. De estas observaciones parecerá que el motor de inducción monofásico no desarrolla ningún par estando parado y consecuentemente no tiene un arranque propio, sin embargo, una vez que la rotación se ha iniciado desarrolla un par que lo mantiene girando.

Se tiene entendido que los motores monofasicos no cuentan con arranque intrínseco, los motores se califican según el arranque que tengan, los tipos de arranque son los siguientes:

1. -Devanado de fase partida
2. -Devanado con condensador
3. -Estator con polos sombreados

5.8 El Motor De Fase Partida

El devanado de arranque cuenta con dos tipos de devanados el de trabajo y el de arranque auxiliar, los cuales están colocados a 90 grados eléctricos entre sí, el devanado de arranque auxiliar que se desconecta por medio de un interruptor centrifugo, el cual se desconectara a la velocidad especificada a que a sido diseñado el dispositivo ver el circuito en la figura 44.

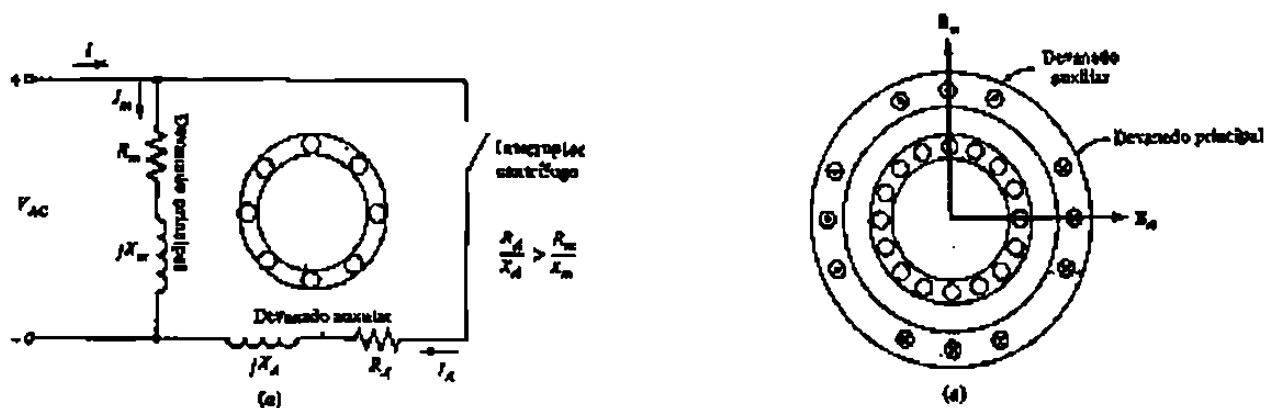


Figura 44 Diagrama de un motor de inducción fase partida

el devanado auxiliar de arranque se debe de diseñar con mas resistencia que el de devanado de trabajo con él propósito de que la corriente del devanado auxiliar de arranque deba de estar adelantada con respecto al del devanado de trabajo, esto se logra usando un alambre de menos sección y de menor calibre el cual se usa solo, para el arranque, el capacitor usado es electrolítico, que es relativamente barato.

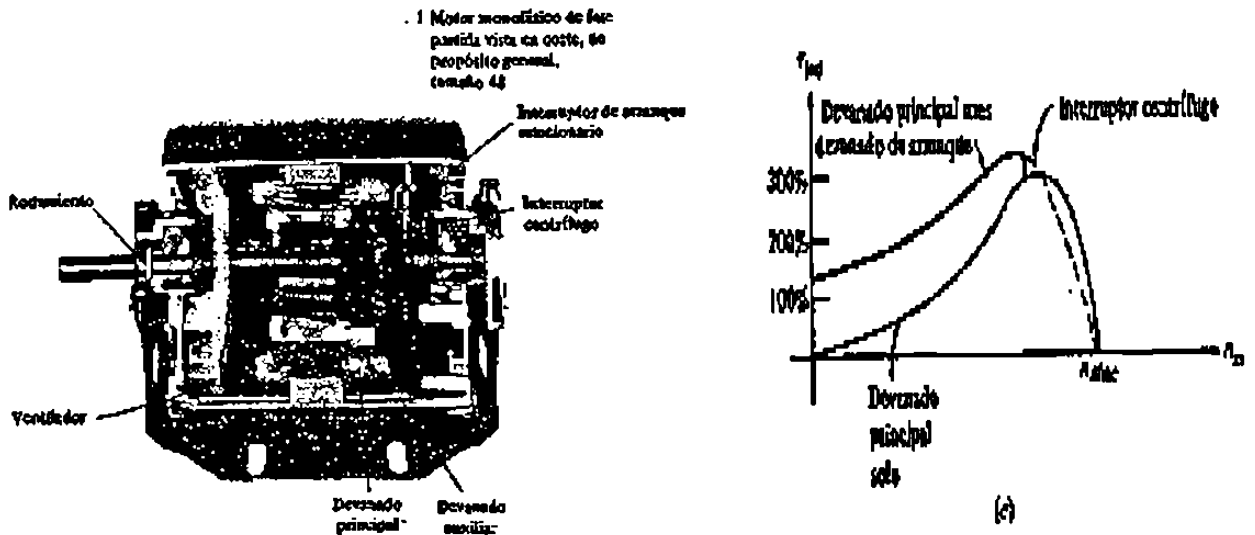


Figura 45 Curva par-velocidad de un motor de inducción fase partida

La rotación del motor se puede determinar según como este colocado los campos magnéticos del devanado auxiliar si esta adelantado 90 grados adelante o atrás del devanado del trabajo el cual este se realiza intercambiando las conexiones en el devanado auxiliar de arranque y el devanado de trabajo permanezca sin cambio.

5.9 Motores con Condesadores de Arranque

El arranque con condensador se refiere a que se le coloca un condensador en el devanado auxiliar en serie con este ver la figura 9, el cual puede igualar el desarrollo de las fuerzas magnetomotriz de la corrientes en ambos devanados y con esto se puede adelantar al devanado auxiliar de arranque 90 grados del devanado de trabajo en sus corrientes el cual se genera un campo magnético simple uniforme y giratorio que se tendrá un comportamiento similar al de un motor que estuviera alimentado de una fuente trifásica, en el cual los pares de arranque son muy altos ver figura 10 y por lo mismo son muy costosos.

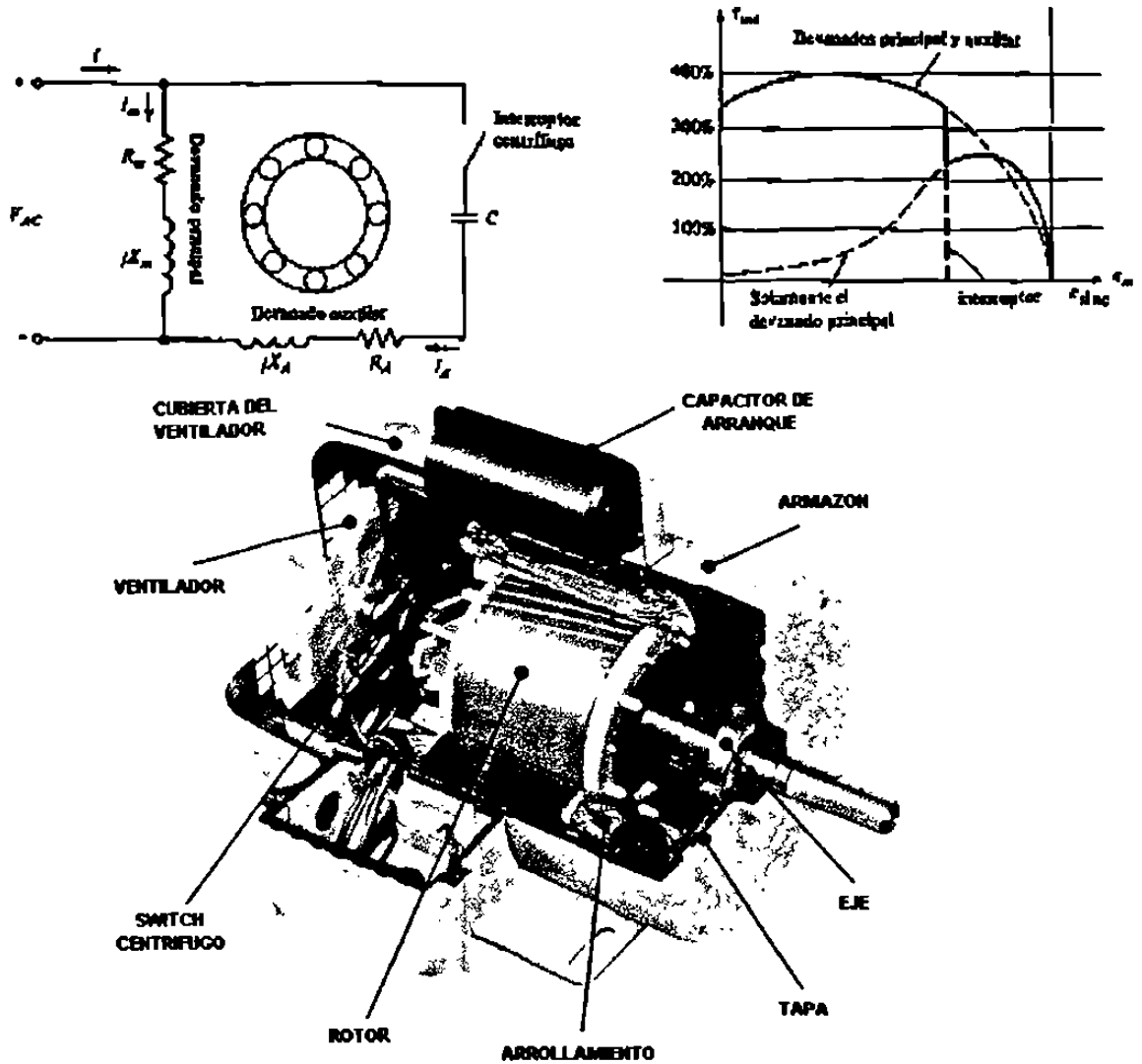


Figura 46 Diagrama Electrico, curva par-velocidad y fotografia de un motor de inducción con capacitor de arranque

110 volts.			
Potencia	Capacitor	Par de Arranque en función del par nominal	Velocidad del motor
1/8 de HP.	70-90 μF.	350 a 400%	n = 3 450 rpm.
1/4 de HP.	120-150 μF.	400 a 475%	n = 1 725 rpm.
1/2 de HP.	230-280 μF.	285 a 390%	n = 1 140 rpm.
1 HP.	340-410 μF.		

Tabla 8 Relación de potencia contra el capacitor usado

5.10 Motores con Condensador Permante

En este tipo de motores el arrollamiento de arranque y el condensador están diseñados para funcionamiento permanente, proporcionando un motor bifásico desequilibrado. Para un funcionamiento satisfactorio en marcha se necesita únicamente una pequeña capacidad. Por ejemplo, para 110 volts el condensador de un motor de $\frac{1}{20}$ de HP es $3 \mu\text{f.}$, de un motor de $\frac{1}{8}$ de HP $8 \mu\text{f.}$, de un motor de $\frac{1}{2}$ HP $15 \mu\text{f.}$ Esta es mucho menor que la capacidad necesaria para alto par motor de arranque (véase "Motor de condensador de arranque"). No obstante, el motor de fase auxiliar con condensador permanente utiliza el mismo condensador para el arranque y la marcha y, por lo tanto, tiene un par motor de arranque pequeño de alrededor de 35 a 50% del par motor nominal, ya que el condensador electrolítico no puede utilizarse para funcionamiento continuo, debe utilizarse para este tipo de motor el condensador de papel de plomo aislado con aceite o pyranol más caro.

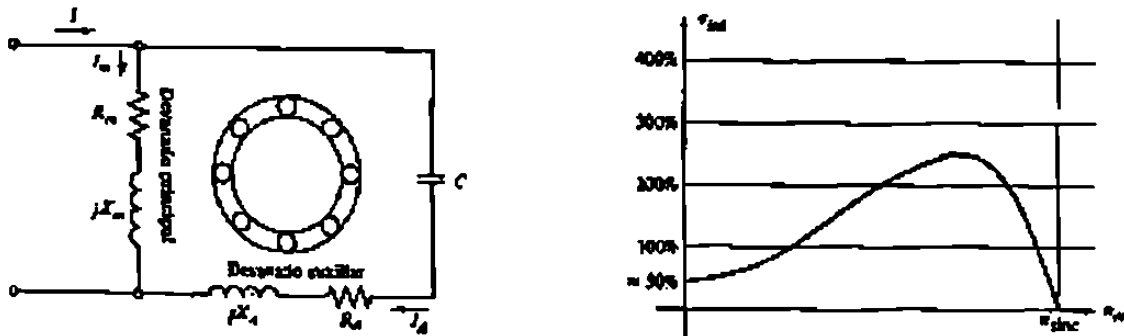


Figura 47 Diagrama eléctrico y curva par-velocidad de un motor de inducción con capacitor permanente

5.11 Motor con Condensador de Arranque y Permanente.

Para que el motor bifásico sea capaz de desarrollar un alto par de arranque y que al mismo tiempo tenga un funcionamiento satisfactorio en marcha, es necesario utilizar valores diferentes de capacidad para el arranque y la marcha. Esto puede llevarse a cabo ya sea utilizando dos condensadores, un condensador electrolítico para el arranque y un condensador de aceite para la marcha, o bien utilizando un simple condensador de aceite en conexión con un autotransformador.

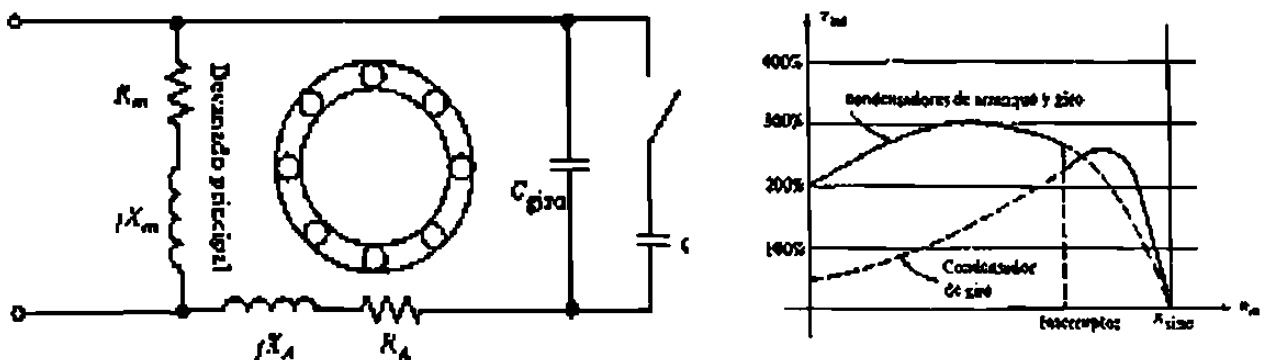


Figura 48 Diagrama eléctrico y curva par-velocidad de un motor de inducción con capacitor de arranque y permanente

El motor de fase auxiliar con condensador permanente y el motor con condensador de arranque y permanente ofrecen ventajas en comparación con el motor de fase auxiliar y el motor con condensador de arranque, que son motores monofásicos puros. Los últimos motores producen un par motor pulsante en vibración y ruido. Los motores de fase auxiliar con condensador permanente y el motor con condensador de arranque y permanente desarrollan un par motor más uniforme y son, por lo tanto, más silenciosos que los motores monofásicos puros.

5.12 Motores de Polos Sombreados

Los motores de los polos sombreados son muy diferentes a los motores que tienen un devanado auxiliar de arranque con condensador, este motor tiene un devanado principal que tiene dos polos salientes lo cual los rodea una bobina en cortocircuitada llamada bobina sombreada.

El cual el devanado principal con su bobina sombreada cortocircuitada ver figura 13a, producen un flujo en los polos variante con el tiempo y cuando esto sucede induce en la bobina sombreada, un voltaje y una corriente que se opone al cambio del flujo original, el cual produce un ligero desbalance entre los dos campos magnéticos del estator que gira en dirección opuesta la cual la dirección va a lado del polo a que no esta sombreada a la que esta sombreada, en cambio en par velocidad se muestra en la gráfica de polo sombreado en la figura 13b.

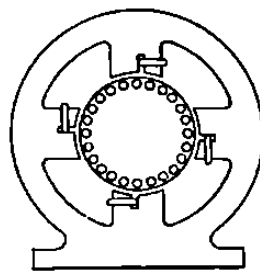


Fig. 28-7. Motor

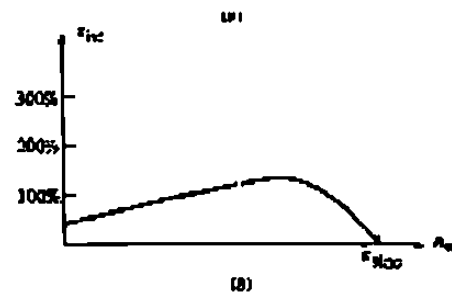
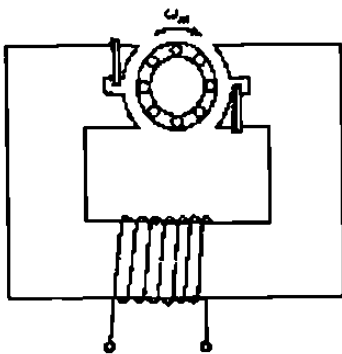


Figura 49 Diagrama esquemático y curva par-velocidad de un motor de inducción polos sombreados

Estos motores desarrollan muy poco caballaje y su sistema de arranque es muy bajo y en el intercambio de dirección del rotor al momento de girar es difícil solo poniendo dos bobinas sombreadas en cada cara polar.

Clasificación de los motores monofásicos de inducción del mejor al peor en arranque.

1. Motor de condensador de arranque, condensador de giro (permanente)
2. Motor de condensador de arranque
3. Motor de condensador permanente
4. Motor de fase partida
5. Motor de polos sombreados

5.13 Control de Velocidad en Los Motores Monofásicos de Inducción

En el control de velocidad de los motores monofásicos de inducción se dispone de las siguientes técnicas para jaula de ardilla.

1. -Variar la frecuencia de la corriente en el estator
 2. -Aumentar o disminuir el número de polos
 3. -Cambiar de voltaje aplicado en las terminales v_t
- En la variación de la frecuencia del voltaje se pueden implementar circuitos con $scrs$ o triacs para reducir el control de la fase de la cual este método corta la onda de la corriente alterna. Los controles de estado sólido son más baratos que un autotransformador.
 - La inserción de resistencia en el estator del motor es de los métodos más baratos de control de voltaje, pero la desventaja es que pierde potencia considerable en la resistencia
 - El control de velocidad por medio del voltaje por medio de autotransformadores que ajustan el voltaje continuamente.

6. MOTORES DE INDUCCION TRIFASICOS

6.1 Introducción

La relación entre el magnetismo y la electricidad fue descubierta en 1819 cuando, en la demostración de una clase, el científico danés Hans Oersted encontró que la corriente eléctrica que circula por un alambre desvía la aguja de una brújula cercana. Poco tiempo después, André Ampere obtuvo las leyes cuantitativas de la fuerza magnética entre conductores que llevan corrientes eléctricas.

En la década de 1820, se demostraron varias conexiones entre la electricidad y el magnetismo por Faraday e independientemente por Joseph Henry. Ellos comprobaron que se podía producir una corriente eléctrica en un circuito al mover un imán cercano al circuito o bien variando la corriente de un circuito cercano al primero, estas observaciones demuestran que un cambio en el campo magnético produce un campo eléctrico. Años después, el trabajo teórico realizado por Maxwell mostró que un campo eléctrico variable da lugar a un campo magnético.

Como la mayor parte de la corriente eléctrica producida hoy en día es alterna, los motores que se diseñan para c.a. son muchos. Los motores de c.a. son ideales para trabajar a velocidad constante, porque en ellos la velocidad está determinada por la frecuencia de la c.a. aplicada a las terminales de los mismos. También se hacen motores de c.a. de velocidad variable pero dentro de ciertos límites.

El motor de inducción es el más comúnmente empleado en corriente alterna debido a su sencillez, a su construcción sólida y a su bajo costo de mantenimiento. Estas características del motor de inducción se deben al hecho de que el rotor es independiente y no está conectado con la fuente externa de tensión. El motor de inducción se llama así por el hecho de que el campo magnético giratorio del estator induce corrientes alternas en el circuito del rotor. Un motor de inducción se distingue porque no necesita corriente de excitación de c.c. en el rotor para funcionar.

6.2 Leyes Fundamentales.

Ley de Ampere.

La ley de Ampere establece que la integral de línea de $B \cdot ds$ alrededor de cualquier trayectoria cerrada es igual a $\mu_0 I$, donde I es la corriente estable total que pasa a través de cualquier superficie limitada por la trayectoria cerrada.

$$\int B \cdot ds = \mu_0 I$$

donde μ_0 es la permeabilidad del espacio libre y tiene un valor igual a $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A·m

Ley de Inducción de Faraday.

La fem inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez de cambio del flujo magnético a través del circuito.

$$E = -N \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

6.3 Construcción del Motor de Inducción

Un motor de inducción tiene un estator igual al de una máquina síncrona pero su rotor tiene una construcción diferente. En la figura 50 se muestra el estator de una máquina de dos polos. Hay dos tipos diferentes de rotores para motores de inducción. Uno se conoce como *rotor de jaula de ardilla* o simplemente *rotor de jaula* y el otro como *rotor devanado*.

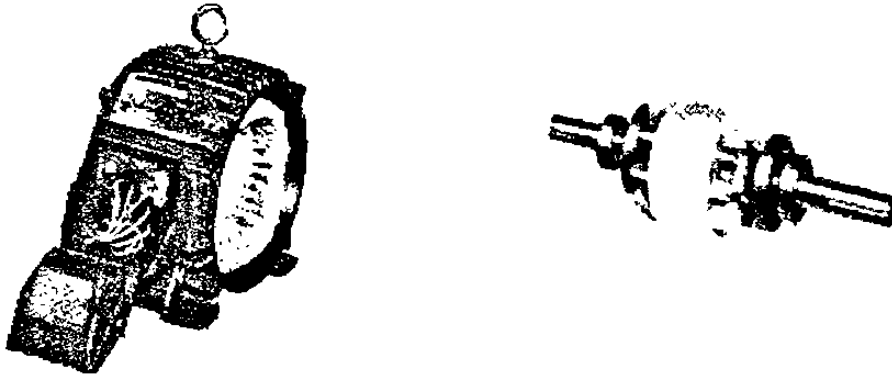


Figura 50 Estator de un motor de inducción con sus devanados y rotor jaula de ardilla

Un rotor de jaula de ardilla consiste en una serie de barras conductoras colocadas dentro de unas ranuras hechas en la superficie del rotor con sus extremos puestos en cortocircuito por medio de anillos. Este diseño se le conoce como rotor de jaula de ardilla porque sus conductores tienen la apariencia de las jaulas en donde juegan las ardillas o las marmotas.

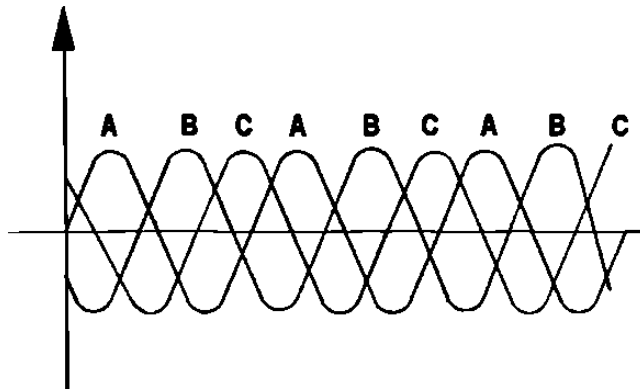
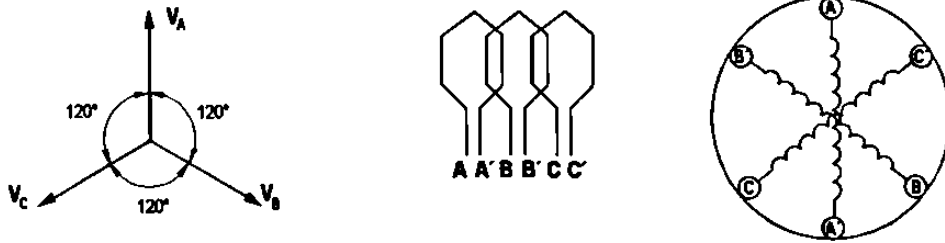
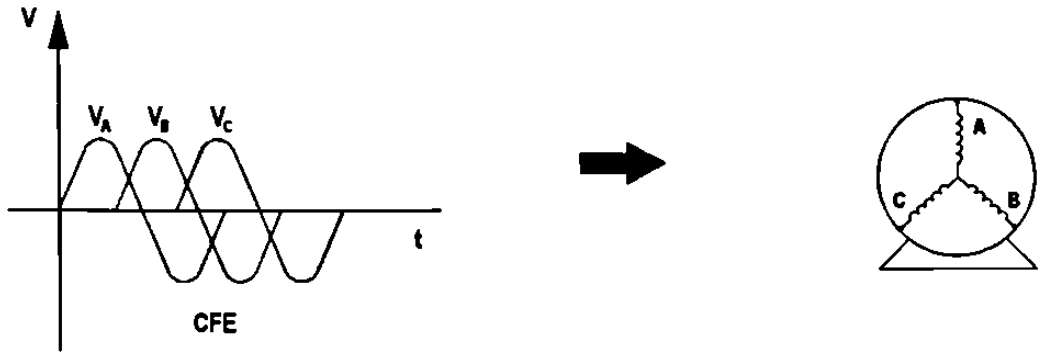
El otro tipo de rotor es el denominado de rotor devanado, que tiene un arrollamiento trifásico completo que es una imagen reflejada del devanado del estator. Las tres fases del arrollamiento de este rotor usualmente se conectan en Y y sus extremos se conectan a unos anillos rozantes montados en el eje. Los devanados del rotor se pueden poner en cortocircuito a través de un conjunto de escobillas que están en contacto con los anillos rozantes. También se pueden insertar resistencias exteriores en el circuito del rotor, ya que los motores de inducción de rotor devanado se tiene acceso a las corrientes del rotor a través de las escobillas, este tipo de motor es muy utilizado donde se requiere control de velocidad.

6.4 El Campo Magnético Giratorio.

Antes de aprender como el campo magnético rotatorio hace que el motor gire, primero se debe saber como se produce este campo. En el esquema aparece un estator trifásico al cual se le aplica una corriente alterna proveniente de una fuente trifásica.

Los dos bobinados de cada fase están devanados en el mismo sentido. En todo instante el campo magnético producido por una de las fases en particular depende de la intensidad de corriente en esa fase. Si la intensidad es cero, el campo magnético también será cero. Si la intensidad es máxima, el campo magnético tendrá una fuerza máxima. Como las intensidades

de los tres bobinados tienen una diferencia de fase de 120° . los tres campos magnéticos existentes en un instante dado se combinan para producir un solo campo que acciona sobre el rotor. En la figura que se muestra a continuación se verá que de un instante al siguiente, los campos magnéticos se combinan para producir un campo magnético resultante cuya posición varía un cierto ángulo. Al completarse un ciclo de c.a. el campo magnético se habrá desplazado 360° , o sea una revolución.



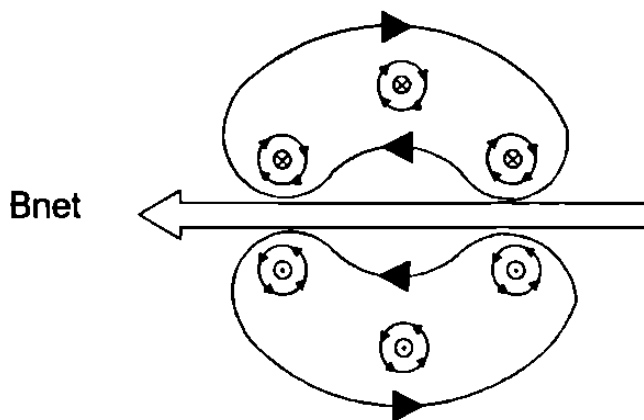


Figura 51 Sistema de voltajes trifásicos producido por C.F.E., devanado de motor trifásico y campo magnético B_{net} producido por los conductores

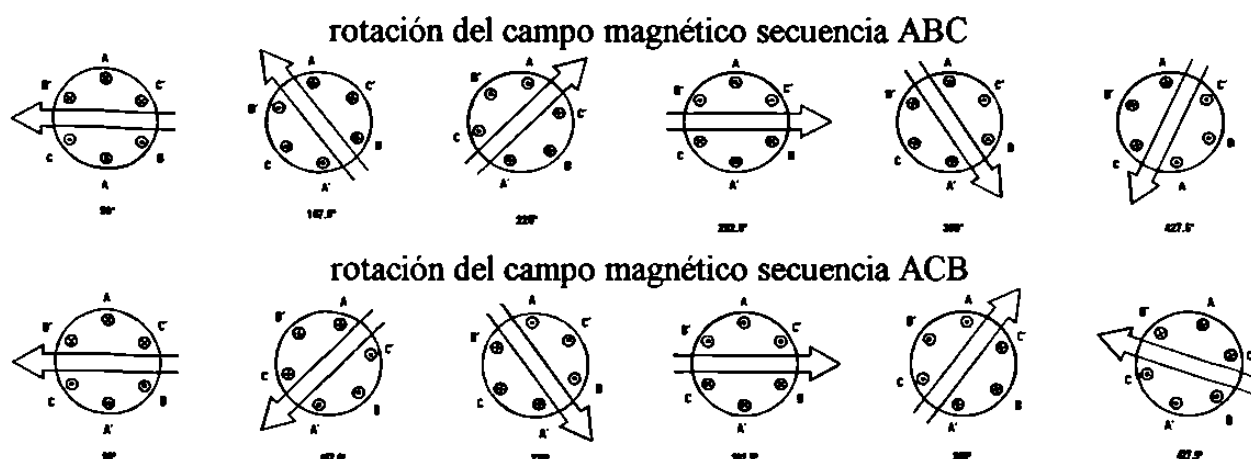


Figura 52 Dirección de rotación del campo B_{net} para secuencia de fase ABC y ACB

Con esto se llega a la conclusión de que, aplicando CA trifásica a tres bobinas distribuidas simétricamente en torno al estator, se produce un campo magnético giratorio.

6.5 El Concepto de Deslizamiento del Rotor

El voltaje inducido en una barra del rotor de un motor de inducción depende de la velocidad relativa del rotor con respecto al campo magnético. Puesto que el comportamiento del motor de inducción depende de los voltajes y las corrientes del rotor, resulta más lógico hablar de esta velocidad relativa. Para definirla se utilizan comúnmente dos términos. Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_s - n_R$$

n_{des} = Velocidad de desplazamiento de la maquina
 n_s = Velocidad del campo magnético (sincrónica)
 n_R = Velocidad mecánica del rotor

El otro término que se utiliza para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, que corresponde a la velocidad relativa expresada en por unidad o en porcentaje. Es decir, el deslizamiento se define como:

$$s = \frac{n_{des}}{n_s} (x100\%) \qquad s = \left(\frac{n_s - n_R}{n_s} \right) (x100\%)$$

Esta ecuación también se puede expresar en términos de velocidad angular (radianes por segundo) como:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_R}{\omega_s} (x100\%)$$

Se puede ver que, si el rotor gira a velocidad sincrónica, $s=0$; y si el rotor esta quieto, $s=1$. Todas las velocidades normales del motor están comprendidas entre estos dos límites. Es posible expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en función de la velocidad sincrónica y el deslizamiento.

$$n_R = (1 - s)n_s$$

6.6 Frecuencia Eléctrica del Motor

Un motor de inducción trabaja con base en voltajes inducidos en el rotor y por esta razón en algunas oportunidades se le ha llamado transformador giratorio. Lo mismo que un transformador, el primario (estator) induce un voltaje en el secundario (rotor), pero a diferencia del transformador, la frecuencia en el secundario no es necesariamente la misma frecuencia que hay en el primario.

Si se bloquea el rotor del motor de tal manera que no se pueda mover, entonces su frecuencia será igual a la del estator, en otro caso, si el rotor gira a velocidad sincrónica, su frecuencia será cero.

A $n_R = 0$ rpm, la frecuencia del rotor es $f_R = f_e$, y el deslizamiento es $s = 1$.

A $n_R = n_s$, la frecuencia es $f_R = 0$ y el deslizamiento es $s = 0$.

Para una velocidad intermedia entre estas dos.

$$f_R = sf_e$$

Existen diferentes formas de esta expresión, todas ellas utilizables.

$$f_R = \frac{n_s - n_R}{n_s} (f_e) \qquad f_R = \frac{P}{120} (n_s - n_R)$$

6.7 Circuito Equivalente del Motor Trifásico

El motor de inducción necesita para su operación que el circuito del estator induzca voltajes en el circuito del rotor (acción transformadora) para que en éste haya corrientes, puesto que la inducción de voltajes en el circuito del rotor de un motor de inducción es, esencialmente, una operación de transformación, el circuito equivalente de un motor de inducción deberá ser muy similar al circuito equivalente de un transformador. Se dice que un motor de inducción es una máquina sencillamente excitada (en oposición a los motores sincrónicos que son máquinas doblemente excitadas), ya que se le suministra potencia solamente por un punto. Debido a que el motor de inducción no tiene un circuito de excitación independiente, su modelo no tiene fuentes de voltaje interno como el voltaje generado E_A de las máquinas sincrónicas.

Con base en el conocimiento de los transformadores y teniendo en cuenta que ya se sabe que la frecuencia del rotor varía con la velocidad del motor, es posible deducir el circuito equivalente de un motor de inducción. Se desarrollará el modelo del motor de inducción partiendo del modelo del transformador, y luego buscando la manera de tener en cuenta la frecuencia variable del rotor y otros efectos similares del motor de inducción.

6.8 El Motor de Inducción como Transformador

En la figura se muestra el circuito equivalente por fase de un transformador que representa la operación de un motor de inducción.

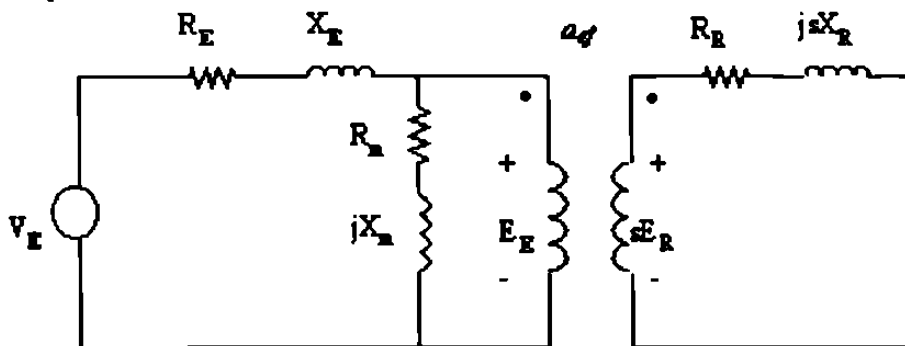


Figura 53 Modelo del motor como transformador giratorio

Como en cualquier transformador, existe una resistencia y una autoinductancia en el devanado primario (estator) que deben representarse en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llamará R_E y su reactancia se denominará X_E . Estas dos componentes aparecen a la derecha de la entrada en el modelo de la máquina.

Nuevamente, como en cualquier transformador con un núcleo de hierro, el flujo en la máquina está relacionado con la integral del voltaje aplicado E_m . La curva del flujo en función

(curva de magnetización) de la máquina, se presenta en la figura 54., comparada con la curva similar de un transformador de potencia. Se observa que la pendiente de la curva correspondiente al motor de inducción es mucho menos inclinada que la de un buen transformador. Esto se debe a la existencia del entrehierro en el motor de inducción que hace aumentar demasiado la reluctancia de la trayectoria del flujo con lo cual se debilita el acoplamiento en los devanados primario y secundario.

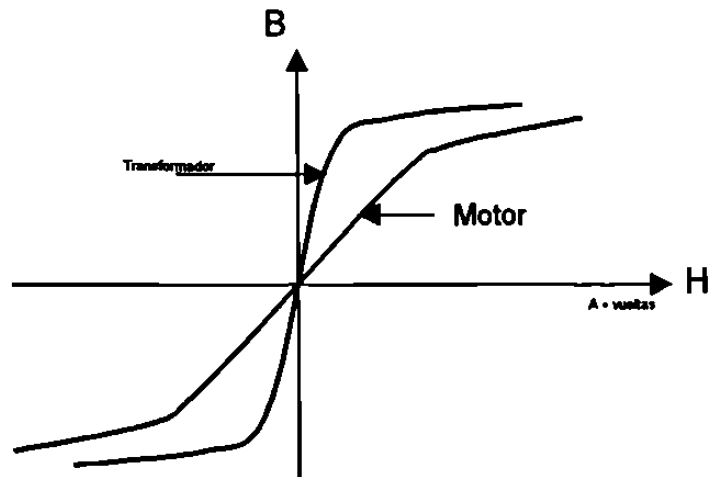


Figura 54 Curva B-H comparativa entre un motor y un transformador

Con el aumento de la reluctancia a causa del entrehierro se necesita una mayor corriente de magnetización para obtener un determinado nivel de flujo. Entonces, en el circuito equivalente, la reactancia de magnetización X_m tendrá un valor mucho menor que el correspondiente valor ordinario.

El voltaje interno E_m del primario (estator) está acoplado con el voltaje interno E_R del secundario (rotor), por un transformador ideal con una relación a_{ef} entre espiras efectivas. Es claro que esta relación se puede determinar fácilmente para un motor de rotor devanado, pues básicamente es la relación entre el número de conductores por fase en el estator y el número de conductores por fase en el rotor modificados ambos por sus correspondientes factores de paso y de distribución. Es mucho más difícil definir con exactitud a_{ef} en el caso de un motor con rotor de jaula de ardilla, ya que en él no hay devanados tan perfectamente definidos. De todas maneras, existe una relación de transformación para el motor.

El voltaje E_R inducido en el rotor produce un flujo de corriente en el circuito del rotor (secundario) de la máquina, el cual se encuentra en corto circuito, la impedancia del primario y la corriente de magnetización del circuito equivalente de un motor de inducción son muy similares a los valores correspondientes del modelo de circuito equivalente de un transformador. La diferencia fundamental entre los circuitos equivalentes de un motor de inducción y de un transformador se debe a los efectos que la frecuencia variable del rotor produce en el voltaje inducido E_R y en la impedancia R_R y jX_R del rotor.

6.9 Modelo del Circuito del Rotor.

Cuando se aplica un voltaje a los devanados del estator de un motor de inducción, se induce un voltaje en los devanados del rotor de la máquina. En general a mayor velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético del estator, mayor será el voltaje resultante en el rotor. La mayor velocidad relativa ocurre cuando el rotor está quieto, condición conocida como rotor frenado o rotor bloqueado. Si el voltaje inducido en el rotor en esa condición se le llama E_{RO} , entonces el voltaje inducido a un deslizamiento cualquiera estará dado por la ecuación

$$E_R = sE_{RO}$$

De lo esta fórmula podemos deducir lo siguiente

Condición	N_R	s	E_R
Rotor bloqueado	0	1	E_{RO}
Rotor gira en vacío	$\approx n_s$	≈ 0	0

Tabla 9 Deslizamiento del motor en función de la velocidad

La reactancia de un motor de inducción depende de la inductancia propia del rotor y de la frecuencia del voltaje y la corriente que existan en el. Con una inductancia del rotor igual a L_R , la reactancia estará dada por

$$X_R = \omega L_R = 2\pi f L_R = sX_{RO}$$

En la figura 55 se muestra el circuito equivalente resultante para el rotor. La corriente en el mismo se puede encontrar así.

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$

$$I_R = \frac{sE_{RO}}{R_R + jsX_{RO}}$$

Si el numerador y el denominador se multiplican por $(1/s)$

$$I_R = \frac{E_R}{\frac{R_R}{s} + jX_{RO}}$$

Para representar la carga aplicada en la flecha del rotor el circuito equivalente se expresa de la siguiente manera:

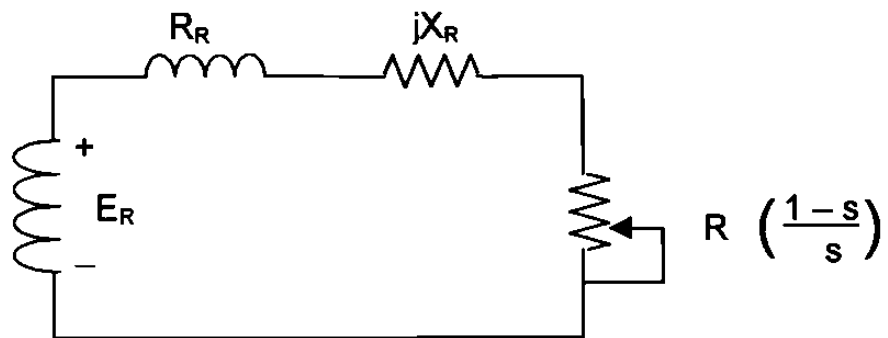


Figura 55 Modelo de parámetros del rotor

6.10 Circuito Equivalente de Parámetros

En el circuito del motor de inducción se puede hacer algo similar a lo efectuado en el transformador: los voltajes corrientes e impedancias del lado del secundario se pueden referir al lado del primario por medio de la relación de espiras. De esta manera el modelo equivalente de un motor de inducción trifásico quedaría de la manera siguiente:

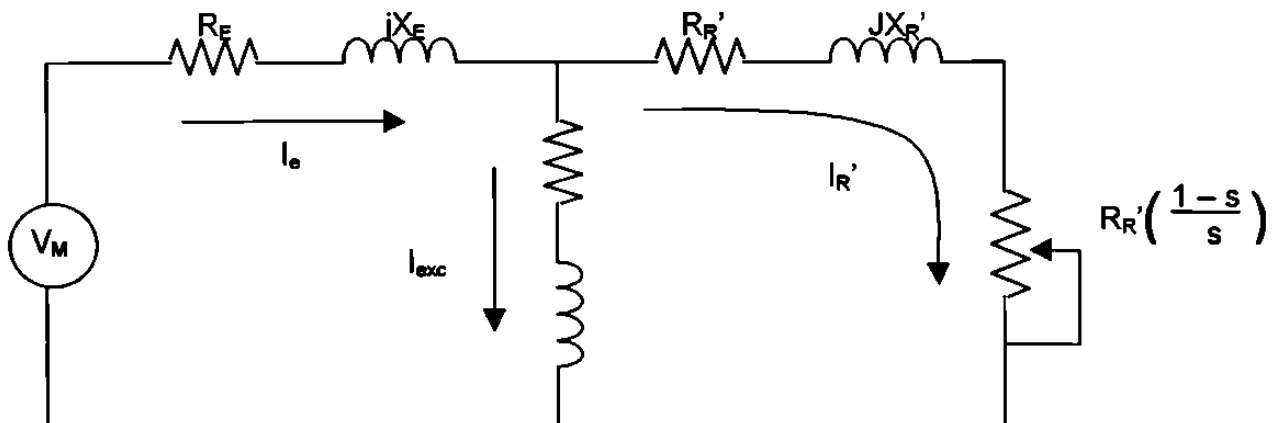


Figura 56 Modelo equivalente de parámetros

6.11 Determinación de Parámetros del Motor de Inducción.

Para calcular todos los parámetros del modelo del motor de inducción que se vio en la sección anterior se realizan dos tipos de pruebas:

- a) La prueba de vacío.
- b) La prueba de rotor bloqueado.

Prueba de vacío.

Con esta prueba se obtienen los valores de R_M y X_M (rama de excitación), la prueba se realiza aplicando el voltaje nominal al rotor y estando en vacío (la flecha deberá estar liberada de toda carga mecánica).

Se miden los valores de corriente en vacío y de potencia en vacío.

Prueba de rotor bloqueado.

Para esta prueba existen dos modalidades. Una es la prueba de rotor bloqueado a tensión plena y la otra es la prueba de rotor bloqueado a tensión reducida.

Prueba de rotor bloqueado a tensión plena.

Esta prueba sirve para determinar las reactancias saturadas, es decir, el modelo de arranque del motor. Los datos a obtener son: la corriente y la potencia del motor cuando este está frenado y con la tensión de línea nominal.

Prueba de rotor bloqueado a tensión reducida.

Esta prueba sirve para determinar las reactancias no saturadas, es decir, el modelo de marcha del motor. Las condiciones para esta prueba son:

- 1.- El rotor debe estar bloqueado.
- 2.- Hay que obligar al motor a que tome su corriente nominal.

En ambas pruebas se determinan R_E , R_R' , X_E y X_R' , de cada uno de los modelos (arranque y marcha).

6.12 Potencia en Motores de Inducción.

Un motor de inducción se puede describir, tal como se mencionó anteriormente, como un transformador giratorio. Su entrada es un sistema trifásico de voltajes y corrientes. Para un transformador ordinario la salida es potencia eléctrica a través del devanado secundario. El devanado secundario de un motor de inducción (el rotor) está en corto circuito, de manera que no existe potencia eléctrica a la salida de un motor de inducción. Su salida, en cambio, es mecánica. La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida se ilustra en el diagrama de la figura 57.

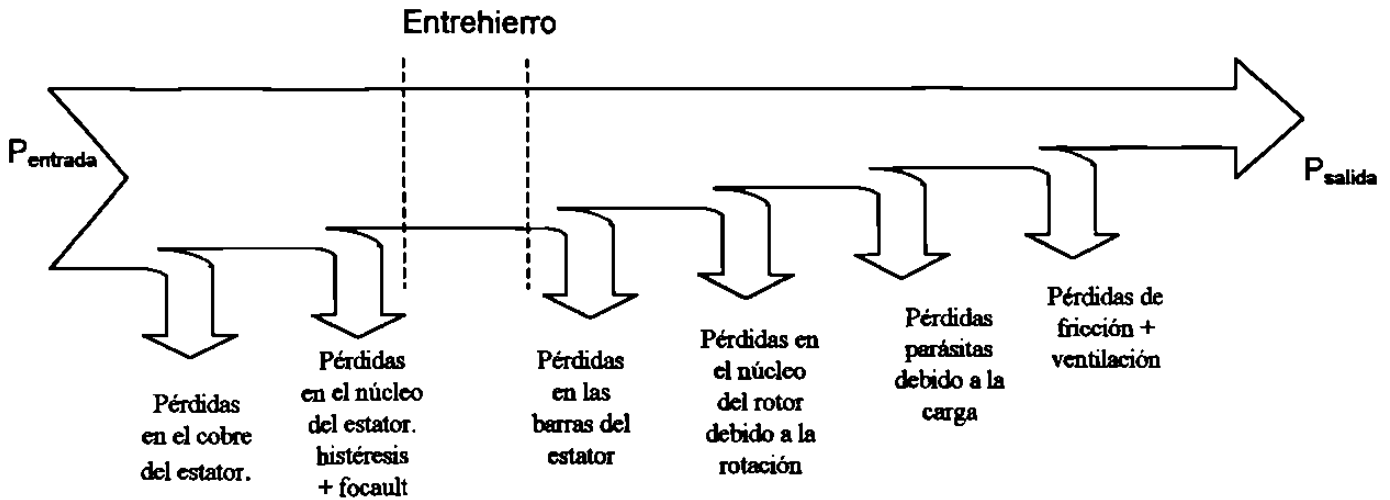


Figura 57 Diagrama de potencias en un motor de inducción

Lo anterior lo podemos expresar mediante la siguiente fórmula:

$$P_{\text{salida}} = P_{\text{entrada}} - P_{\text{perdidas}}$$

$$P_{\text{salida}} = P_{\text{entrada}} - P_{\text{cobre}} - P_{\text{h+f}} - P_{\text{rotor}} - P_{\text{par}} - P_{\text{f+v}}$$

Donde:

$$P_{\text{cobre}} = m I_c^2 R_c \quad (\text{Pérdidas por efecto Joule})$$

$$P_{\text{rotor}} = m I_R^2 R_R$$

La potencia que se convierte en mecánica en un motor de inducción es igual a:

$$P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}} \omega$$

6.13 Producción de Par en un Motor de Inducción

Si a un motor de inducción de jaula de ardilla, se le aplica al estator un sistema trifásico de voltajes, por sus devanados circula un sistema trifásico de corrientes. Estas corrientes producen un campo magnético B_{net} . La velocidad de rotación de este campo magnético está

$$n_s = \frac{120 f}{p}$$

dada por

donde f es la frecuencia del sistema de alimentación en hertz, y P es el numero de polos de la máquina, este campo magnético alcanza las barras del rotor e induce voltaje en ellas.

El voltaje inducido en las barras de un rotor determinado, esta dado por la ecuación:

$$e_{ind} = (v \times B)L$$

En donde: v = velocidad relativa de las barras del rotor con respecto al campo magnético.

B = densidad de flujo magnético en el estator

L = longitud de una barra del rotor

El par producido desde un punto de vista físico, que mantiene el rotor en movimiento, esta dado por la ecuación:

$$\tau_{ind} = k B_r \times B_{net}$$

Su magnitud está dada por:

$$\tau_{ind} = k B_r B_{net} \text{ sen } \delta$$

En donde:

B_r . El campo magnético del rotor es directamente proporcional a la corriente del rotor, mientras que éste no esté saturado. La corriente del rotor aumenta si crece el deslizamiento, (desciende la velocidad).

B_{net} . El campo magnético neto en el motor es proporcional a el voltaje aplicado al motor y por lo tanto es aproximadamente constante.

$\text{Sen } \delta$. el ángulo δ entre el campo magnético neto y el del rotor, se puede expresar de manera que resulte útil, es decir, el ángulo δ es justamente igual al ángulo del factor de potencia del rotor más 90°

$$\delta = \theta_R + 90^\circ$$

por lo tanto, $\text{sen } \delta = \text{sen}(\theta + 90) = \cos \theta_R$, Este término es el factor de potencia del rotor. El ángulo del factor de potencia del rotor se puede calcular a partir de la ecuación.

$$\theta_R = \tan^{-1} \left[\frac{X_R}{R_R} \right]$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \left[\frac{sX_{RO}}{R_R} \right]$$

Y el factor de potencia del rotor queda dado por

$$fp_R = \cos \theta_R$$

$$fp_R = \cos \left[\tan^{-1} \left[\frac{sX_{RO}}{R_R} \right] \right]$$

suponga que el motor de inducción se carga, a medida que aumenta la carga, aumenta el deslizamiento y disminuye la velocidad del rotor. Como ahora la velocidad es menor, aumenta la velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético del estator de la máquina. Esta mayor velocidad produce un mayor voltaje en el rotor, el cual a su vez, produce una mayor corriente en el rotor. Con una mayor corriente, el campo magnético del rotor también crece. Sin embargo el ángulo de la corriente y el campo magnético del rotor también cambia. Como ahora el deslizamiento es grande, la frecuencia del rotor crece y la reactancia del rotor aumenta. Entonces, la corriente del rotor está ahora más atrasada con respecto al voltaje y el campo magnético del rotor se desplaza con la corriente. El incremento de B_r tiende a incrementar el par, mientras que el aumento del ángulo δ tiende a disminuirlo (τ_{ind} es directamente proporcional a $\sin \delta$, y $\delta > 90^\circ$). Como el primer efecto es mayor que el segundo, el par total producido aumenta para atender la carga del motor que ha aumentado.

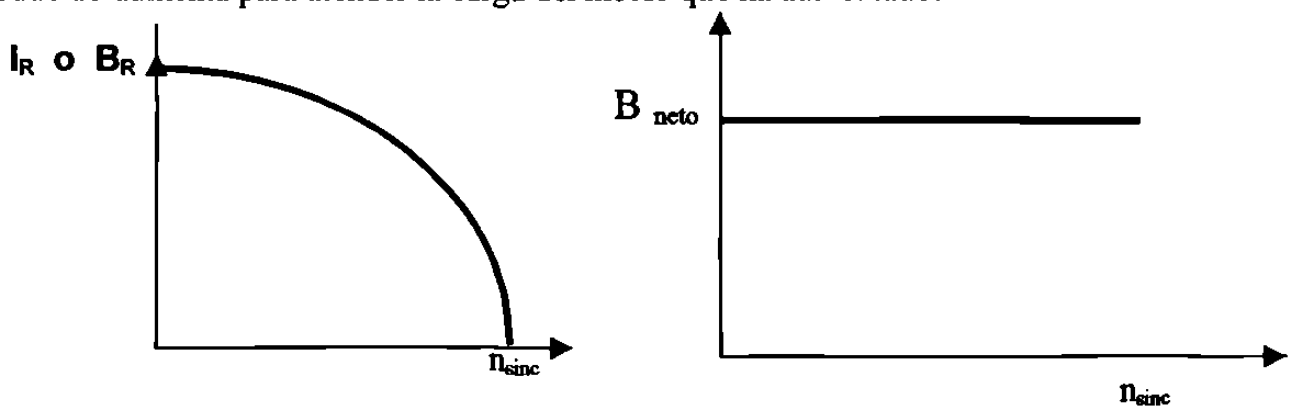


Figura 58 Campo magnético del rotor y campo magnético del estator en función de la velocidad

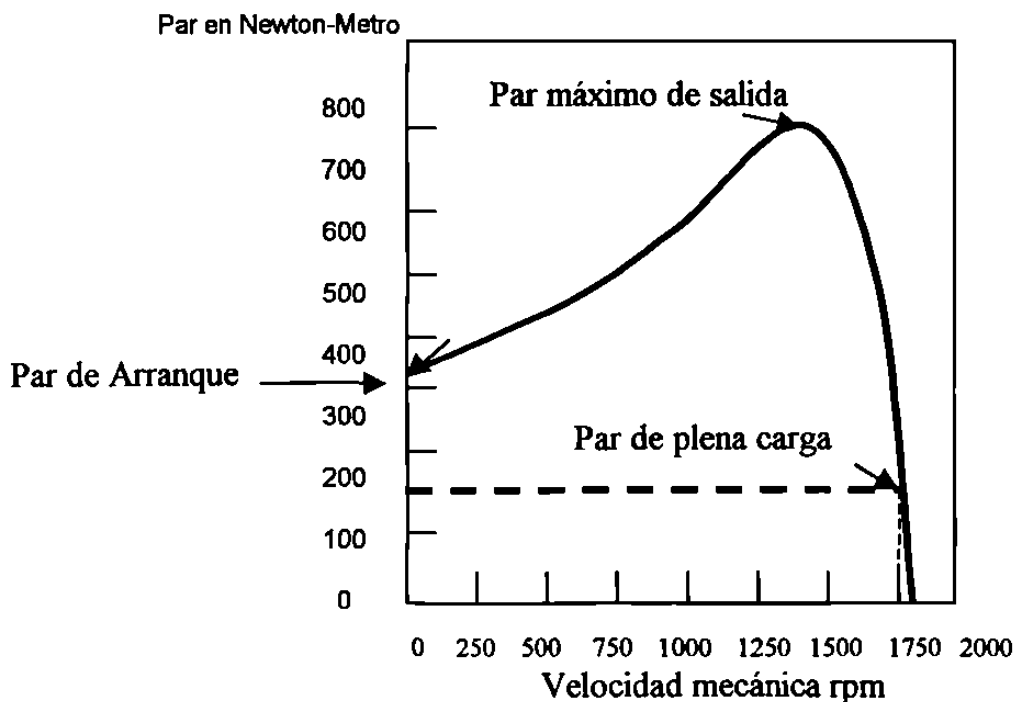


Figura 59 Curva característica par-velocidad de un motor de inducción

Comentarios sobre la curva par velocidad del motor de inducción.

- El par es producido por un motor de inducción a velocidad sincrónica es cero.
- La curva par-velocidad es prácticamente lineal entre vacío y plena carga. En este rango, la resistencia del motor es mucho mayor que su reactancia, y por lo tanto, la corriente del rotor y el par producido crecen linealmente al aumentar el deslizamiento.
- Existe un par máximo posible que el motor no puede sobrepasar. Este par se denomina par máximo desarrollado o par de desenganche y es de dos a tres veces el par nominal del motor.
- El par de arranque del motor es ligeramente mayor que su par de plena carga, así el motor debe poder arrancar arrastrando cualquier carga, hasta la nominal.
- Para un deslizamiento dado, el par del motor varía con el cuadrado del voltaje aplicado. Este hecho es utilizado para controlar la velocidad del motor.
- Si el rotor de un motor de inducción se hace girar a una velocidad superior a la velocidad sincrónica, se invierte la dirección del par desarrollado y la máquina funciona como generador, convirtiendo potencia mecánica en potencia eléctrica.
- Si el rotor gira en dirección contraria a la del campo magnético, el par producido hará que la máquina se detenga rápidamente y comience luego a girar en dirección contraria. Puesto que para invertir el sentido de rotación del campo magnético basta intercambiar dos de las fases del estator, este hecho se utiliza como una forma de frenado rápido de motor de inducción. Al proceso de intercambiar dos fases con el fin de frenar rápidamente el motor, se le llama intercambio de fase.

6.14 Terminales y Devanados de Los Motores Trifásicos.

Los motores trifásicos se pueden diferenciar por el número de terminales que tienen; obviamente este número debe ser una potencia de 3 y los más usuales son los de 3, 6, 9 y 12 terminales.

Motor de 3 terminales.

Este tipo de motores tiene como característica principal que sólo funcionan a una tensión de servicio. A continuación se presentan los dos tipos de conexiones que pueden tener los motores trifásicos de tres terminales:

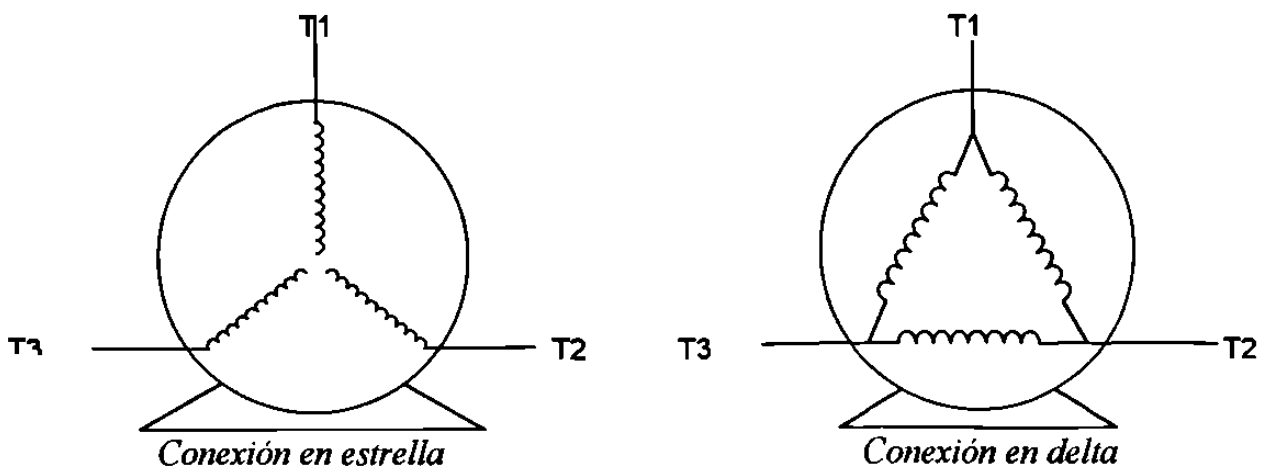


Figura 60 Conexión de un motor de 3 terminales

Motor de 6 terminales.

Este tipo de motores también opera con una sola tensión de servicio, pero ahora la ventaja es que se puede conectar ya sea en delta o en estrella, según las necesidades. La identificación de terminales es la siguiente:

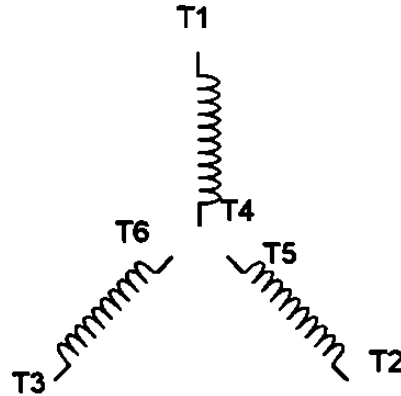
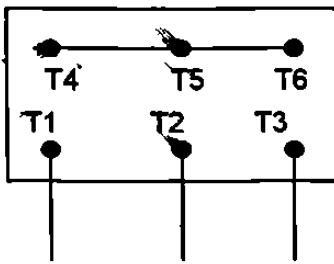
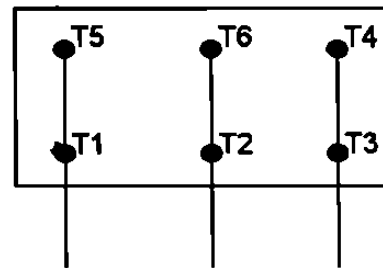


Figura 61 Devanados del motor con 6 terminales.

Como se pudo observar en la figura, la numeración para las terminales se hace a favor de las manecillas del reloj, y partiendo de las terminales que están por la parte exterior hasta las que están en la parte interior; esta es una norma que se utiliza para estandarizar la identificación de terminales de los devanados. Las conexiones en la caja de terminales de cada una de las configuraciones (delta o estrella) quedarían de la siguiente manera:



Conexión estrella



Conexión delta

Figura 62 Conexiones en la caja de terminales de un motor de 6 puntas

Motor de 9 terminales.

Este tipo de motor se puede conectar ya sea como una estrella gigante o como dos estrellas en paralelo; la conexión en delta no se utiliza. Puede trabajar con dos tensiones de servicio:

- Para 220 V se conecta como 2 Y en paralelo.
- Para 440 V se conecta como una estrella gigante.

La identificación de las terminales de sus devanados quedaría así:

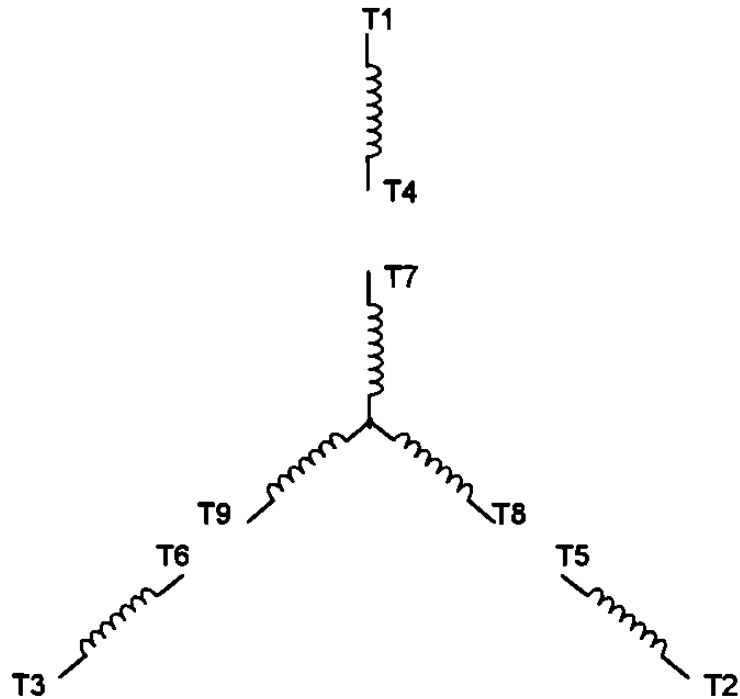


Figura 63 Motor de 9 terminales

Las conexiones en la caja de terminales para trabajar con las distintas tensiones de servicio se presentan en la siguiente figura.



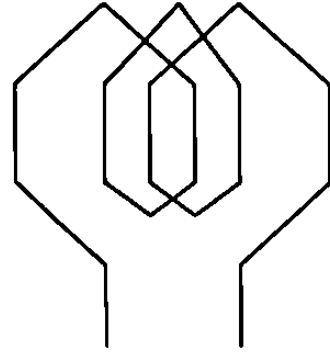
Figura 64 Conexiones en la caja de terminales de un motor de 9 puntas

Existen también los motores de 12 terminales, los cuales se pueden conectar ya sea en delta o en estrella, y pueden trabajar también con dos voltajes de servicio; queda como práctica realizar los diagramas para este tipo de motores, y hacer la conexión de sus terminales para sus cuatro modos de operación (estrella a 220 V, delta a 220 V, estrella a 440 V y delta a 440 V).

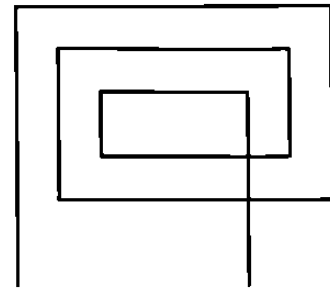
Devanados trifásicos.

En el enbobinado tanto de motores como de generadores se pueden encontrar diversas formas de colocar las bobinas en las ranuras del estator; dichas formas son:

Embobinado imbricado:
Se utiliza en motores trifásicos.



Embobinado concéntrico:
Se usa en motores monofásicos (principalmente) y trifásicos.



Ondulado:
Se utiliza en generadores.

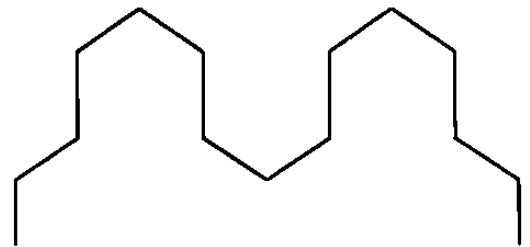


Figura 65 Tipos de devanados trifásicos

Cuando en una ranura del estator se localizan dos lados de la bobina al devanado se le llama devanado en doble capa.

Existen ciertos parámetros que se consideran al embobinar un motor trifásico. Dichos parámetros se refieren al número de polos, número de ranuras por polo, número de bobinas por grupo y grados por ranura, a continuación explicamos cada uno de ellos.

Ancho de la bobina (AB).

Se refiere al número de ranuras que cubren los polos magnéticos de cada una de las fases del sistema de alimentación trifásico. la ecuación para determinarlo es:

$$AB = \frac{Q}{P}$$

Donde: Q = número de ranuras
P = número de polos

Grados eléctricos por ranura ($^{\circ}$ /Ranura)

Primeramente se debe especificar que estos grados eléctricos son los del sistema trifásico, así un ciclo completo de cualquiera de las fases A, B o C representa los 360° eléctricos. De esta manera, a cada ranura se le asigna una cierta cantidad de grados eléctricos y dependiendo del número de ranuras y del número de polos, pudiera ser que estos grados eléctricos no tengan una relación 1:1 con los grados mecánicos que estamos acostumbrados a manejar, es decir, que quizá para los 360° mecánicos que forman el estator, la sumatoria de todos los grados eléctricos de las ranuras, pudiera ser igual a 720. La manera de calcular los grados eléctricos por ranura es:

$$^{\circ}E / \text{Ranura} = \frac{180^{\circ} \times P}{Q}$$

Numero de grupos polo-fase (g)

A cada fase del sistema de alimentación le corresponden uno o mas polos magneticos norte y sur. El número de grupos polo-fase es el total de polos magnéticos de las tres fases con las que se alimenta el motor y esta dado por:

$$g = m \times P$$

Donde: m = Numero de fases

Numero de bobinas por grupo.

Como se puede deducir, esto se refiere a la cantidad de bobinas que componen cada uno de los grupos que acabamos de mencionar.

$$\# \text{bobinas grupo} = \frac{Q}{g}$$

Ejemplo:

Desarrollar un devanado trifásico imbricado doble capa para un motor de 4 polos y 12 ranuras, conectarlo como un motor de 9 terminales.

m = 3 fases
P = 4 polos
Q = 12 ranuras
9 Terminales

$$\begin{aligned} AB &= Q/P = 12 / 4 = 3 \text{ ranuras} \\ g &= m \times P = 3 \times 4 = 12 \text{ grupos} \\ ^{\circ}/\text{Ranura} &= (180 \times P)/12 = (180 \times 4) / 12 \\ &= 60^{\circ} \\ \# \text{ bobinas/gpo} &= Q / g = 12 / 12 = 1 \text{ bobina} \end{aligned}$$

El devanado quedaría de la siguiente forma:

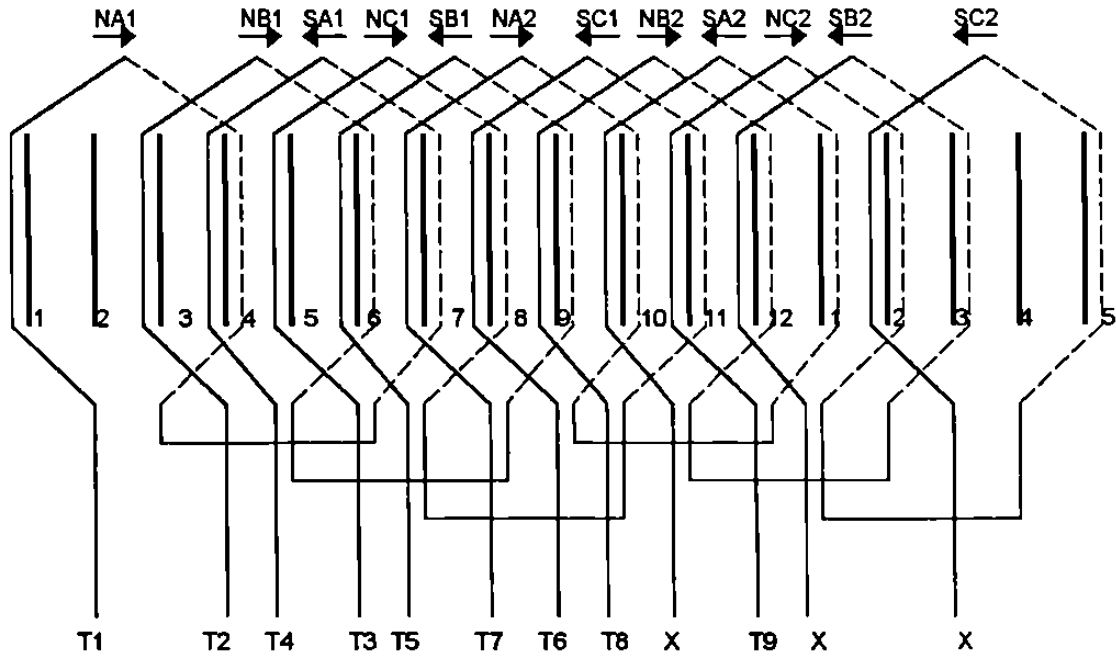


Figura 66 Devanado trifásico imbricado doble capa de 4 polos y 12 ranuras

En el ejemplo anterior, para cada una de las fases existen 4 polos magnéticos (2 norte y 2 sur), por lo tanto el campo magnético en el estator tendría una forma más o menos así:

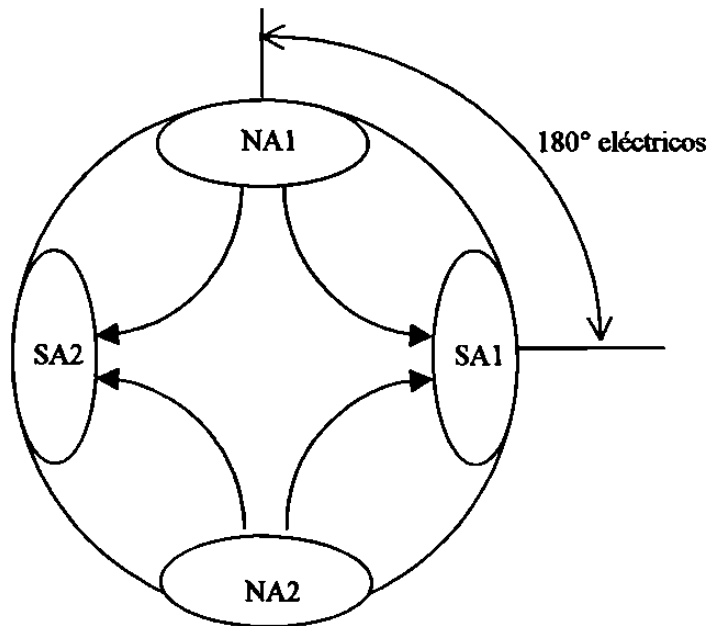


Figura 67 Diagrama esquemático de un motor de 4 polos

6.15 Clases de Diseño de Motores de Inducción

Modificando las características físicas de los rotores de los motores de inducción puede obtenerse una gran variedad de curvas par-velocidad, con el fin de ayudar a la industria en la selección apropiada de los motores para las variadas aplicaciones y para cualquier potencia. NEMA en los Estados Unidos y la Internacional Electrical Commission (IEC) en Europa han definido una serie de diseños de normalizados con diferentes curvas par-velocidad.

Diseño clase A.- Los motores de clase A son los motores de diseño común, con un par de arranque normal, una corriente de arranque normal y un deslizamiento bajo. Las corrientes de arranque típicas de este motor pueden ser de aproximadamente 500 a 800 por ciento de la corriente nominal.

Algunas aplicaciones típicas de estos motores son: impulso de ventiladores, bombas, tornos y otras maquinas herramientas.

Diseño clase B.- Los motores de clase B tienen un par de arranque normal, corriente de arranque pequeña y deslizamiento bajo. Estos motores producen el mismo par de arranque que los motores de clase A, con una corriente alrededor de 25 por ciento menor. El par máximo de salida es mayor o igual al 200 por ciento del par a carga nominal.

Diseño clase C.- Los motores de clase C tienen un alto par de arranque con corriente de arranque pequeña y operan con un deslizamiento bajo (menor que 5 por ciento) a plena carga.

Diseño clase D.- Los motores de clase D tienen un par de arranque muy alto (275 por ciento o mas que el nominal) y una corriente de arranque pequeña, pero a plena carga tienen un deslizamiento alto. Esencialmente son motores de clase A pero con las barras del rotor mas pequeñas y hechas con material de mayor resistencia.

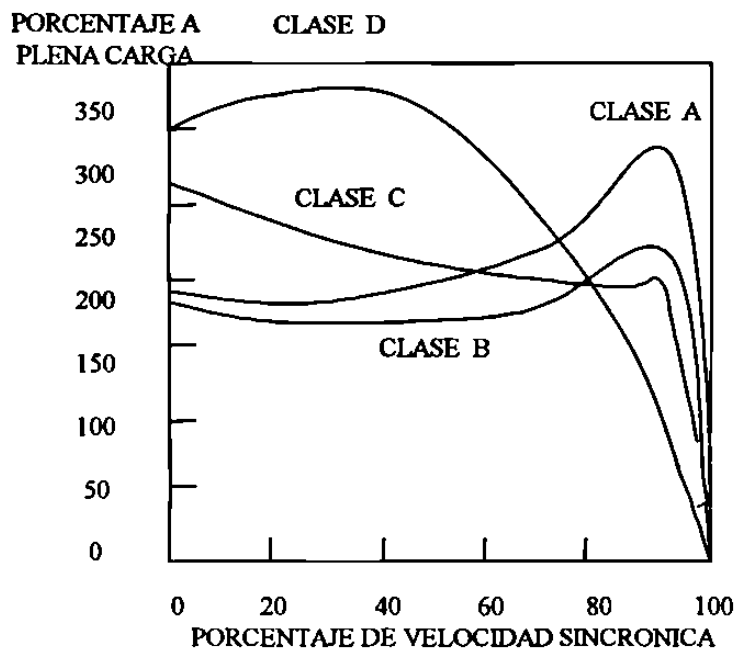


Figura 68 Curvas características típicas par-velocidad para motores con rotores de diferentes diseños.

6.16 Tendencias de Los Motores de Inducción

El motor de inducción trifásico, ya completamente desarrollado estaba disponible comercialmente desde 1896, desde entonces y hasta la fecha se han logrado continuos progresos en la calidad de los aceros, las técnicas de fundición, los aislamientos y las características empleadas en la construcción de motores de inducción.

Ahora, casi todos los grandes fabricantes están produciendo motores de inducción de alta eficiencia, cuya participación en el mercado de los motores de inducción aumenta continuamente. Se han utilizado varias técnicas para mejorar la eficiencia de estos motores comparada con la eficiencia de los motores de diseño tradicional. Entre estas técnicas están:

- Utilizar más cobre en los devanados del estator para reducir las pérdidas en el cobre.
- Aumentar la longitud de los núcleos del estator y del rotor para reducir la densidad de flujo magnético en el entrehierro de la máquina.
- Utilizar más acero en el estator de la máquina, permitiendo una mayor cantidad de transferencia de calor hacia el exterior de la misma, con lo que se reduce su temperatura de operación.
- El acero utilizado en el estator es un acero especial con alta graduación eléctrica, con muy pocas pérdidas por histéresis.
- Se utiliza acero de calibres especialmente delgados, es decir, las laminaciones son muy compactas y de una resistividad interna muy alta.
- Los rotores se maquinan cuidadosamente para reducir un entrehierro uniforme, con lo cual se logran reducir las pérdidas adicionales en el motor.

7. MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

7.1 Introducción

Todas las maquinas eléctricas funcionan según los mismos principios básicos y su comportamiento esta gobernado solamente por unas pocas leyes fundamentales. Estas leyes son las que relacionan la corriente, el campo magnético y el par; y la velocidad, el campo magnético y el voltaje desarrollado.

Los dos elementos indispensables de la maquina eléctrica son el flujo magnético y los conductores por los que circulan corrientes.

Los motores de corriente directa, generalmente se prefieren sobre cualquier otro tipo, en aquellas aplicaciones en donde se requiere una velocidad de operación variable. La razón primordial, proviene del hecho de que la velocidad en estos motores, pueden controlarse relativamente fácil, ajustando ya sea el voltaje de su armadura, de su campo o de ambas, dependiendo de las características de funcionamiento que se deseen.

7.2 Constitución de Las Maquinas de Corriente Continua

Conceptos Generales.

La energía en forma de corriente continua y las máquinas para utilizarla se usan mucho para la tracción y en ciertas clases de transmisiones industriales.

Las principales ventajas de los motores de c.c. son su excelente par de arranque y la facilidad para controlar su velocidad entre límites muy apartados.

Los motores de c.c. son ideales para impulsar ciertas clases de máquinas que son difíciles de poner en marcha en carga y que tienen que ser impulsadas a velocidades variables o tal vez invertirse con frecuencia el sentido de marcha. Su velocidad puede variarse entre límites muy amplios, por encima y por debajo de la normal.

Muchos miles de fábricas y plantas industriales utilizan exclusivamente motores eléctricos para impulsar diversas máquinas y, en ciertas clases de trabajo, se emplean muchísimo los motores de c.c. Estos motores se construyen en tamaños que van desde 1/10 HP hasta varios miles de caballos, y se emplean tanto para mover un grupo de máquinas como para máquinas individuales.

Para mover tranvías y trenes elevados en las ciudades, y también los trenes eléctricos que cruzan el país, se emplean muchísimo los motores serie de c.c., porque su elevado par de arranque les permite arrancar fácilmente un coche o un tren cargado desde la posición de reposo y llevarlo rápidamente a adquirir velocidades muy grandes.

Los motores de c.c. se construyen por lo general para funcionar con voltajes de 110, 220 y 440 voltios, para los servicios industriales.

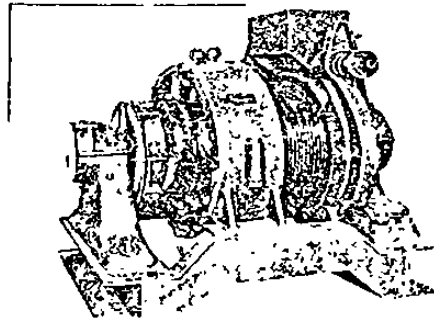


figura 69 Motor de c.c. con su cable de acero utilizado en ascensores

En el funcionamiento de las dinamos la velocidad a que deben moverse no es tan crítica como en el caso de los generadores de corriente alterna o alternadores.

Las dinamos se construyen en tamaños que varían entre 60 Watts, para usos automotrices, hasta los de varios miles de kilowatts para las centrales eléctricas industriales y de ferrocarriles. Sus voltajes varían entre 6 volts, en los generadores para automóviles, hasta 440 voltios para los usos industriales, y hasta 600 y 750 voltios para las aplicaciones ferroviarias, tales como las centrales de ferrocarriles eléctricos, los tranvías y los trolebuses.

Las de tamaños más pequeños impulsadas por correa funcionan a velocidades de 300 a 1800 r.p.m., en tanto que las de tamaños mayores que están directamente conectadas a máquinas de vapor o motores de gas o de aceites pesados marchan a velocidades que oscilan entre 60 y 250 r.p.m.

La corriente continua no se emplea mucho cuando la energía tiene que transmitirse a distancias superiores a 800 ó 1600 m, ya que para transmitir grandes cantidades de energía a distancias considerables es necesario emplear un voltaje elevado y, por lo general, no es práctico que funcionen las grandes dinamos a voltajes superiores a 750 voltios.

7.3 Partes y Principio de Funcionamiento de Las Maquinas de Corriente Continua.

Partes de una maquina de corriente continua.

- Carcasa o Estator que es la que sustenta a la maquina y aquí se encuentra alojado el devanado de campo
- Rotor que es la parte móvil y aquí se encuentra alojado el devanado de armadura.
- Conmutador que cambia la c.c. a c.a en un motor y de c.a. a c.c. en un generador.
- Escobillas que recogen o entregan la corriente al devanado de armadura.

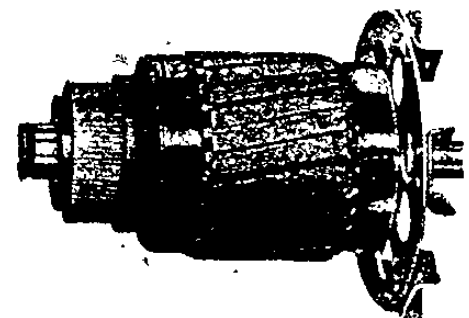
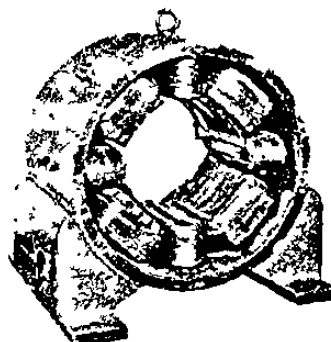
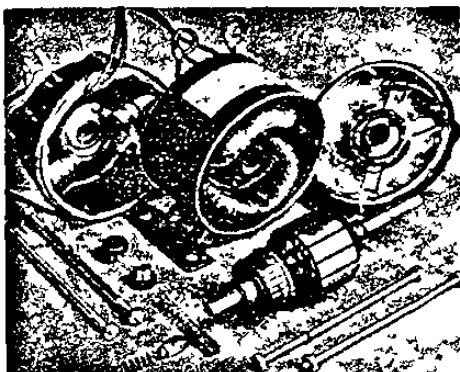


Figura 70 Partes de la maquina de c.c.

El flujo magnético y los conductores por los que circulan corrientes constituyen los dos elementos indispensables de la máquina eléctrica. La parte de la máquina sobre la cual se hallan situados los conductores que producen las fuerzas tangenciales se denomina inducido aquí se encuentra alojado el devanado de armadura. En las máquinas de c.c. este constituye la parte interior giratoria (rotor) de la máquina. Los electroimanes (polos) son estacionarios y están conectados con la carcasa o parte exterior de la máquina a este devanado se le llama devanado de campo.

El inductor (Devanado de Campo) en las máquinas de corriente continua es también el estator o parte fija de la máquina. El sistema inductor produce el campo magnético necesario para crear las corrientes inducidas. Este campo magnético puede ser producido por imanes permanentes o por electroimanes. Las bobinas que constituyen los arrollamientos de excitación de los diferentes polos, están conectadas entre sí de manera que formen, alternativamente, un polo norte y un polo sur.

La finalidad del conmutador es cambiar la forma del voltaje de c.a. a c.d. y viceversa, la corriente se conduce de la escobilla al portaescobillas mediante una trenza flexible de cobre. A fin de producir la presión necesaria para el deslizamiento suave de la escobilla sobre el colector, un muelle ajustable actúa sobre la parte superior de la escobilla. Las escobillas son unos contactos a presión. Estas generalmente son de carbón y se fabrican en gran número de grados, que van desde el carbón duro de retorta, que tiene propiedades abrasivas, hasta el grafito muy blando, que posee cualidades lubricantes.

Los elementos constructivos de las máquinas de corriente continua, son idénticos para el motor que para el generador. De forma, que una misma máquina puede producir corriente continua si se aplica a su inducido un movimiento giratorio (caso del generador) o, por el contrario, se producirá un movimiento giratorio en la máquina si alimentamos su inducido con la corriente continua procedente de la red (caso del motor).

El colector consiste en segmentos de cobre duro en forma de cuña, llamados delgas o laminas, completamente aislados unos de otros, así como del eje de apoyo, por medio de piezas de mica moldeada, constituyendo, de esta forma, un arco circular.

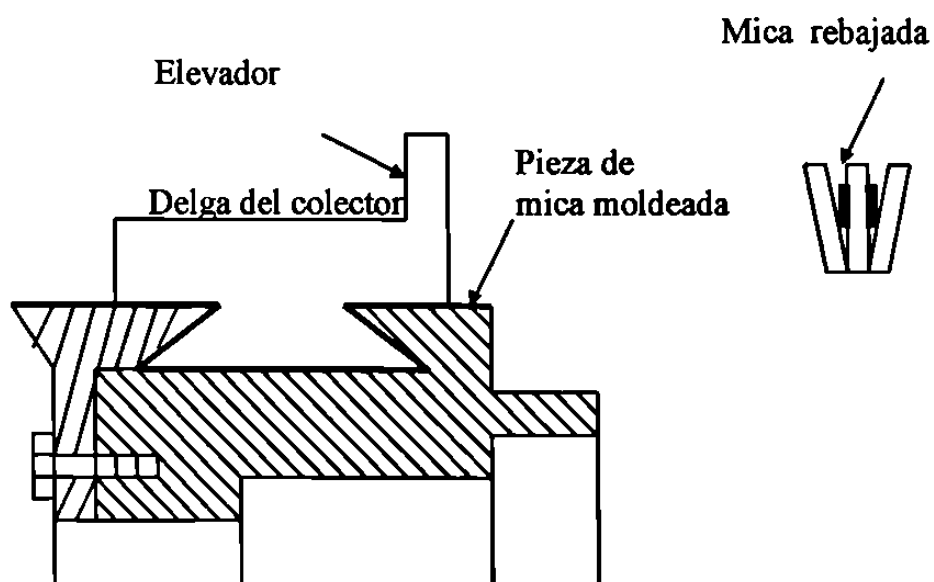


Figura 71 Construcción de un conmutador

7.4 Potencia y Elevaciones de Temperatura en Las Maquinas De Corriente Continua

Las dinamos y los motores de c.c. son casi exactamente idénticos en su construcción mecánica y que, en muchos casos, puede usarse la misma máquina como motor o generador, con sólo ligeros cambios en las conexiones del inductor, un ajuste de las escobillas, etc. Este es un detalle que deberá tenerse presente, ya que muchos de los puntos cubiertos sobre la construcción, el funcionamiento, las cargas, las temperaturas, etc., son aplicables a los motores y las dinamos.

La potencia nominal de las maquinas se indica siempre en kilowatts, que es una unidad de energía eléctrica. Será conveniente, sin embargo, recordar aquí que 1 kilowatts es igual a 1000 watts y aproximadamente a 1,36 HP (caballos de potencia) o 1,34 hp (caballos ingleses). los watts consumidos en un circuito cualquiera son iguales al producto del voltaje por la corriente

La potencia nominal en Kw de una dínamo, es la carga que podrá soportar continuamente sin un calentamiento excesivo, sin que se produzcan demasiadas chispas en el conmutador o sin que la caída de voltaje interno sea excesiva.

Casi todas los maquinas se construyen para poder soportar alguna sobrecarga durante periodos cortos sin que se perjudique la máquina. Esta sobrecarga suele ser del 15 al 25 por ciento durante periodos no mayores de una hora poco más o menos.

Las elevaciones de temperatura que no ofrecen riesgo en la maquinaria eléctrica dependen de las temperaturas que pueden soportar sin estropearse sus materiales aislantes. Todos los demás materiales de la máquina son metales que pueden someterse a temperaturas bastante elevadas sin sufrir mucho daño.

Claro está que cuanto más elevada sea la temperatura de los arrollamientos de cobre tanto mayor será su resistencia; y tanto más elevadas han de ser también las pérdidas debidas a la caída de voltaje en la máquina.

Los aislamientos combustibles ordinarios como la seda, el algodón y el papel no deben someterse nunca a temperaturas superiores a 100°C (212°F.). La mica, el asbesto (o amianto) y otros materiales aislantes no combustibles pueden someterse a temperaturas de hasta 125°C (257°F.).

Al fijar las elevaciones de temperatura que puede soportar la maquinaria eléctrica, se parte del supuesto de que la temperatura en las habitaciones en las que se instalan las máquinas no excederá nunca de 40°C. (104°F.). Esto da, para los materiales aislantes ordinarios, una elevación admisible de 100°C - 40°C, o sea, 60°C. (108° F.). Para los materiales aislantes no combustibles, la elevación de temperatura admisible es 125°C - 40°C, o sea, 85° C. (153° F.).

Los generadores y los motores ordinarios suelen estar garantizados por los fabricantes para funcionar continuamente a plena carga, sin sobrepasar una elevación de temperatura de 35° C., 40° C. o 50° C., según sea el caso.

Las temperaturas de las máquinas pueden comprobarse poniendo pequeños termómetros entre los extremos de su arrollamientos o muy cerca de ellos. Una regla general que conviene recordar es que si puede mantenerse la mano sobre la armazón o culata de la máquina cerca de los devanados sin que el calor moleste mucho, éstos no se han calentado peligrosamente.

7.5 Clasificación de Las Maquinas de Corriente Continua

Según su excitación las maquinas de c.c. se clasifican en:

- Excitadas por separado
- Autoexcitadas

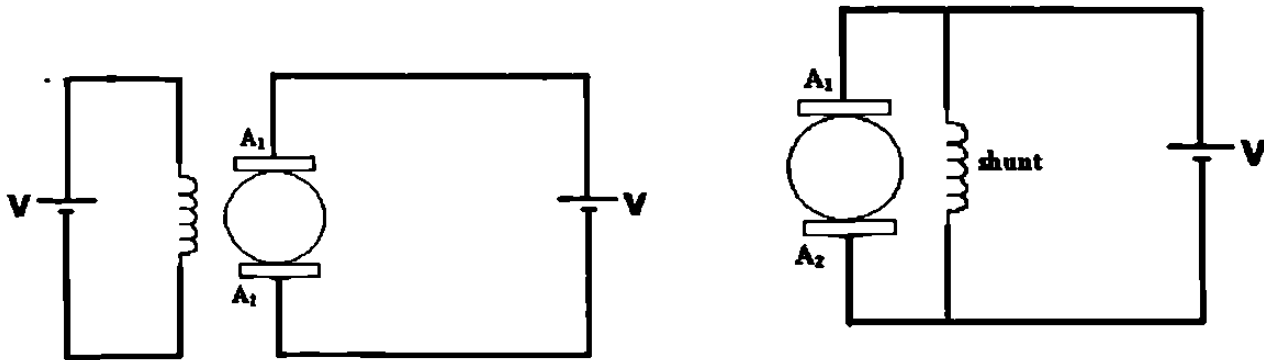


Figura 72 Máquina excitada por separado y shunt autoexcitada

Las maquinas de c.c. pueden dividirse en varias clases, según la construcción de su inductor y sus conexiones. Estos tipos se llaman respectivamente:

- maquinas shunt o excitadas en paralelo
- maquinas serie o excitadas en serie
- maquinas compound o de excitación compuesta.

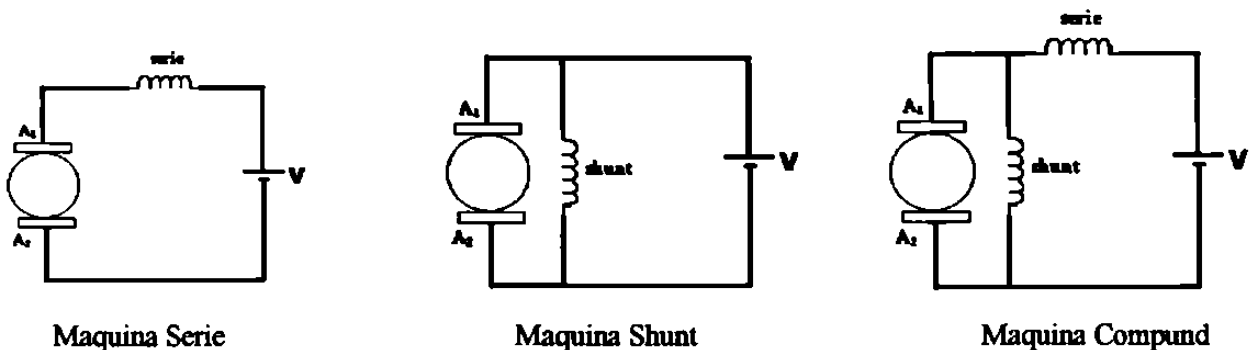


Figura 73 Diagramas eléctricos de las maquinas serie, shunt y compound

La maquina shunt tiene sus bobinas inductoras conectadas en paralelo con el inducido. Las bobinas inductoras shunt se componen de un gran número de vueltas de alambre de pequeño diámetro y con una resistencia suficiente para que puedan estar permanentemente conectadas a través de las escobillas y soportar todo el voltaje del inducido constantemente

durante el funcionamiento. Por consiguiente, la corriente que circula por esas bobinas depende de su resistencia y del voltaje del inducido y es pequeña.

Las maquinas serie tienen sus bobinas inductoras conectadas en serie con el inducido, de modo que circula por ellas toda la corriente de la carga. Esas bobinas tienen que hacerse, naturalmente, con alambre grueso para que puedan soportar la corriente de la línea y se componen, por lo general, de sólo muy pocas vueltas.

Las maquinas compound son las que tienen a la vez arrollamientos inductores en serie y en derivación.

7.6 Dinamos Shunt

Siendo la dinamo shunt una máquina autoexcitada, empezará a desarrollar su voltaje partiendo del magnetismo residual tan pronto como el inducido empiece a girar. Después, a medida que el inducido va desarrollando voltaje, éste envía corriente a través del inductor, aumentando el número de líneas de fuerza y desarrollando el voltaje hasta hasta su valor normal. Puesto que el circuito inductor y el circuito de la carga están ambos conectados a través de los terminales de la dinamo, cualquier corriente engendrada en el inducido tiene que dividirse entre esas dos trayectorias en proporción inversa a sus resistencias y puesto que la resistencia del circuito inductor es relativamente elevada, la mayor parte de la corriente pasa por el circuito de la carga, impidiendo así el aumento en la intensidad del campo magnético esencial para producir el voltaje normal entre las terminales.

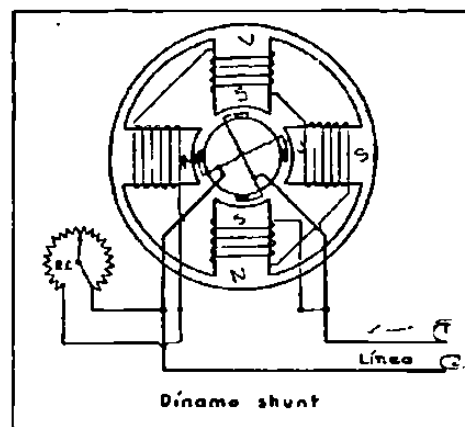


Figura 74 Diagrama esquemático de un generador "Shunt"

Características de voltaje de las dinamos shunt

El voltaje de una dinamo shunt variará en razón inversa de la carga, el aumento de la carga hace que aumente la caída de voltaje en el circuito de inducido, reduciendo así el voltaje aplicado al inductor. Esto reduce la intensidad del campo magnético y, por consiguiente, el voltaje del generador.

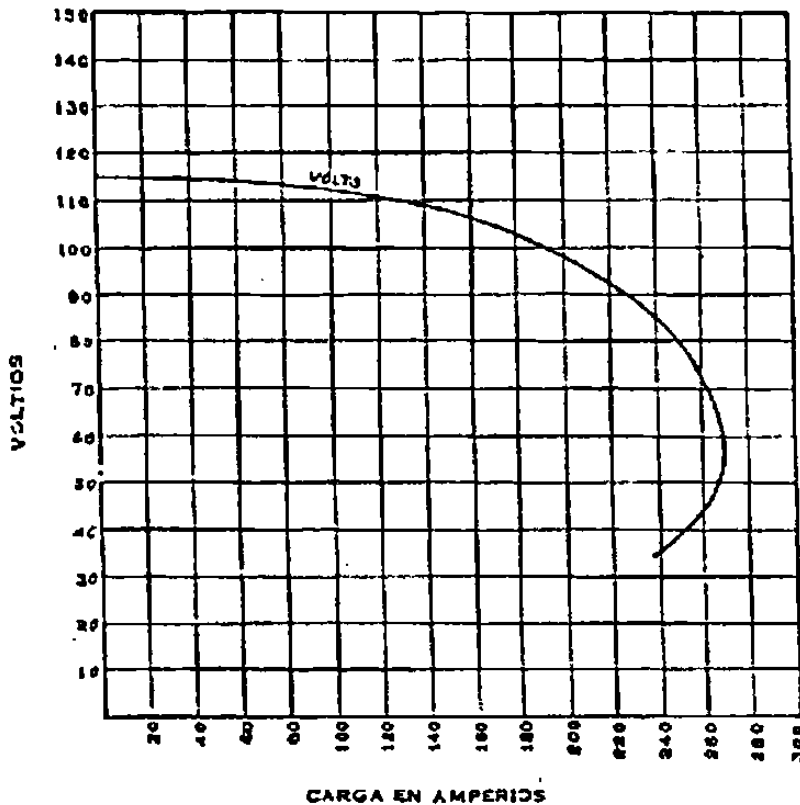


Figura 75 característica de carga de un generador "Shunt"

Si se aumenta bruscamente la carga aplicada a una dinamo shunt la caída de voltaje puede ser bastante apreciable, mientras que si se suprime casi por entero la carga, la regulación de voltaje de una dinamo shunt es muy defectuosa debido a que su regulación no es inherente ni mantiene su voltaje en un valor constante.

Por consiguiente, las dinamos shunt no se adaptan bien a los trabajos fuertes, pero pueden emplearse para el alumbrado por medio de lámparas incandescentes o para alimentar otros aparatos de potencial constante en los que las variaciones de carga no sean demasiado pronunciadas.

7.7 Dinamos Serie

Estas máquinas tienen bobinas inductoras conectadas en serie con el inducido y la carga, El bobinado inductor suele componerse de alambre o cinta de cobre gruesa, de modo que pueda soportar sin recalentarse la corriente de plena carga. Si no hay ninguna carga conectada a la línea, será imposible que pase ninguna corriente por el arrollamiento inductor en serie y que, por consiguiente, la dinamo serie no desarrolle voltaje cuando arranca, es preciso que haya alguna carga conectada al circuito de línea. Característica de voltaje de las dinamos serie Cuando mayor sea la carga conectada a una dinamo serie, tanto más intensa será la corriente que pase por el arrollamiento inductor y tanto más intenso será su campo magnético. Esto hace que el voltaje de una dinamo serie varíe en proporción directa con la

carga; esto es, que el voltaje aumente a medida que aumenta la carga y disminuya a medida que baje la carga. Se observará que esto es exactamente lo opuesto a lo que sucede en el caso de una dinamo shunt.

Puesto que la mayoría de las máquinas eléctricas tienen que funcionar con un voltaje constante y están conectadas a la línea en paralelo, las dinamos serie no se emplean para los fines ordinarios ni para el alumbrado por medio de lámparas incandescentes. Su principal empleo ha sido en relación con las lámparas de arco en serie para el alumbrado público.

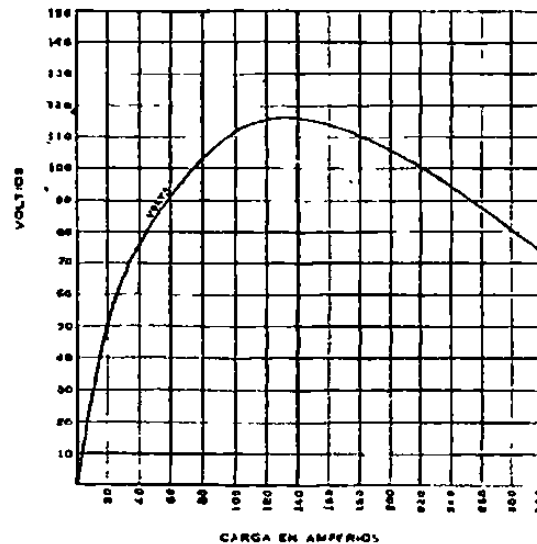


Figura 76 Característica de carga de un generador serie

7.8 Dinamos Compound

Las bobinas inductoras de un dinamo compound se componen de arrollamientos en serie y en paralelo, estando colocados dos bobinados distintos sobre cada polo. La bobina inductora shunt esta conectada en paralelo con el inducido y, por consiguiente, mantiene su intensidad bastante constante. La bobina inductora en serie estando en serie con el inducido y la carga, tendrá su intensidad variable según la carga por consiguiente, estas maquinas tendrán algunas de las características de los dinamos shunt y de las series, ya que el voltaje de la shunt tiende a bajar cuando aumenta la carga. Por consiguiente, diseñando un dinamo compound con las proporciones adecuadas entre los inductores en derivación y en serie, podemos construir una maquina que mantenga un voltaje casi constante con cualesquiera variaciones razonables de la carga.

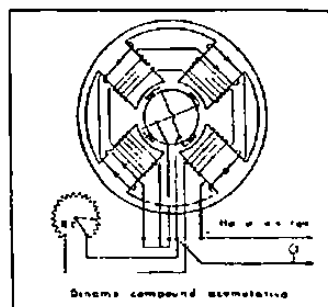


Figura 77 Diagrama esquemático de un generador compound

Características de voltaje Dinamos "compound" de voltaje constante.

En el tipo de dinamo que acabamos de describir, las bobinas inductoras en derivación y en serie están dispuestas de modo que las corrientes que pasan por ambos arrollamientos circulan alrededor de los polos en la misma dirección, por consiguiente, los bobinados se ayudan mutuamente para crear el flujo inductor. Puesto que la acción de los campos magnéticos es acumulativa, esta dinamo se dice de tipo compound acumulativo. La compound acumulativa es el tipo de c.c. mas empleado.

Algunos dinamos compound tienen las bobinas inductoras en serie arrolladas en sentido opuesto, de modo que su flujo se opone al de las bobinas en derivación. Se llaman dinamos compound diferenciales.

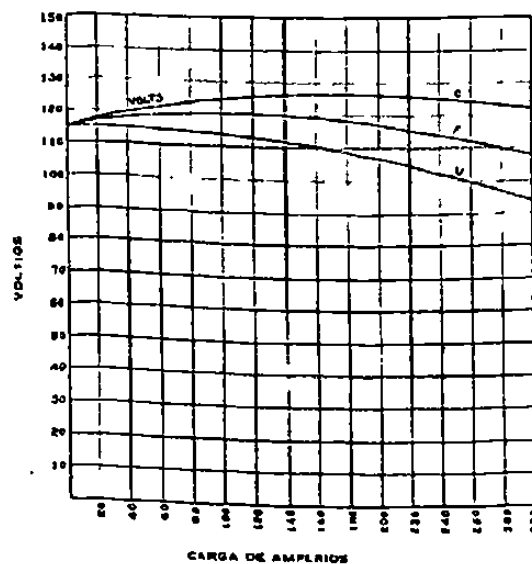


Figura 78 Característica de carga de un generador "Compound"

7.9 Funcionamiento de Los Motores de Corriente Continua

El motor de C.C. funciona basándose en la primera ley del magnetismo que dice que los polos del mismo nombre se repelen y los de nombre contrario se atraen, la corriente que circula por las bobinas del inductor produce los polos inductores y la corriente que circula por las bobinas del inducido desarrolla polos en él a media distancia entre los polos inductores. La atracción y la repulsión entre esas dos serie de produce la rotación.

Para que las fuerzas atractivas y repulsivas entre los polos del inducido y los polos inductores se mantengan, a medida que avancen los polos del inducido, tienen que renovarse, reproduciéndolos en el mismo punto del espacio, lo que puede expresarse, algo incorrectamente, pero más gráficamente, diciendo que deben permanecer estacionarios en el espacio. Esta condición es posible por la acción del conmutador y de las escobillas, pues a medida que el inducido avanza caen debajo de las escobillas un grupo diferente de delgas del conmutador y, en consecuencia, se vuelve el suministro de corriente al inducido al mismo punto de este, con relación al espacio en todos los momentos, por consiguiente, los polos del inducido puede decirse que permanecen estacionarios en el espacio, aunque el inducido propiamente dicho gire.

Es esta acción magnética entre los polos del inducido y los inductores la que desarrolla las fuerzas de rotación en el eje del motor que le permiten hacer girar las cargas

mecánicamente conectadas a él. Este esfuerzo rotativo se denomina par de fuerzas o par motor, de un motor que puede ejercer un esfuerzo rotativo relativamente elevado por amper cuando se pone en marcha, se dice que tiene un par de arranque relativamente elevado, y de otro que produce un esfuerzo de rotación relativamente pequeño por amper al arrancar, se dice que tiene un par de arranque relativamente bajo.

El par motor por amper como cualquier motor dado depende del tipo de motor: en serie, shunt o compound, y del diseño de la maquina. En general, el par de arranque por amperio sera mayor en el motor en serie, algo menor para el motor compound y menor aun para el motor shunt.

7.10 Motores Shunt.

El arrollamiento inductor de un motor shunt está conectado directamente a la línea o la fuente que suministra la corriente, en paralelo con su inducido. Este arrollamiento inductor shunt se compone de muchas vueltas de alambre fino y tiene una resistencia suficiente en ohms para limitar la corriente que pasa por las bobinas a la capacidad sin riesgo de los conductores que las forman. Como la resistencia del arrollamiento inductor shunt de un motor resulta prácticamente constante, esta corriente y la intensidad del campo inductor que crea dependerán indudablemente del voltaje de línea aplicado al motor.

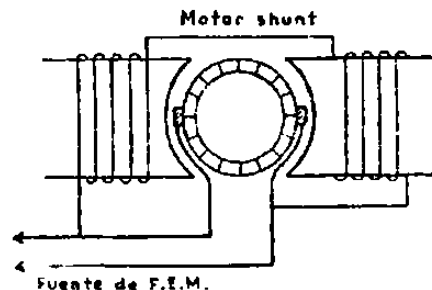


Figura 79 Diagrama de conexiones de un motor "shunt"

Cuando el motor arranca, el par desarrollado debe ser mayor que el par resistente de la carga para obtener un par de aceleración. Mientras el par desarrollado sea mayor que el par de carga mas que el par de pérdidas, el inducido se acelerara. La aceleración continuara hasta que el par desarrollado y el par de carga mas el par de pérdidas sean iguales. En el arranque de un motor derivación es importante aplicar la tensión nominal al arrollamiento de excitación para producir el valor normal de ϕ . En la ecuación de la velocidad del motor, la velocidad varia inversamente con el flujo ϕ (intensidad de excitación baja), el motor podría acelerarse hasta velocidades muy elevadas y los elevados esfuerzos mecánicos producidos podrían hacer que el motor volara en pedazos. Cuando un motor derivación arranca, no puede, por tanto, conectarse en primer lugar al circuito del inducido y luego el circuito de excitación. Primero debe conectarse al circuito de excitación y luego dar tensión al inducido, o debe cerrarse simultáneamente ambos circuitos. Para que la intensidad del inducido en el arranque no pueda llegar a ser demasiado elevada, antes de aplicar la tensión de líneas se conecta una resistencia de arranque en el circuito del inducido.

7.11 Motores Serie.

Los motores serie tienen sus bobinas inductoras conectadas en serie con el inducido y la línea, como se indica en la Figura 79, Los devanados de los inductores de los motores serie se hacen con alambres gruesos o llantas de cobre y pueden consistir en unas cuantas docenas o en varios cientos de vueltas.

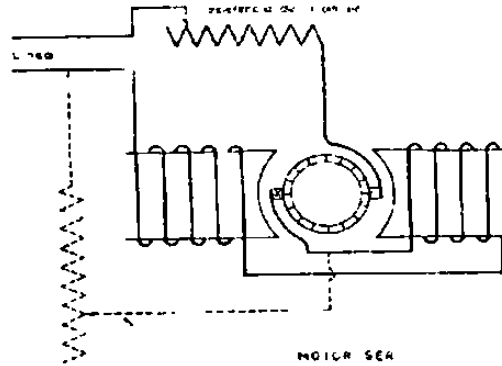


Figura 80 Diagrama de conexiones de un motor serie

La intensidad del campo magnético inductor del motor serie depende de la intensidad de la corriente que pasa por el inducido y por las bobinas inductoras en serie.

Puesto que la corriente que circula por el inducido depende de la carga y la velocidad del motor, la intensidad del campo magnético inductor de un motor serie será mucho mayor con fuertes cargas y velocidades bajas que con cargas ligeras y velocidades mayores, ya que entonces el inducido desarrolla una mayor fuerza contraelectromotriz (F.C.E.M.).

Un motor serie nunca debe conectarse a una línea sin la certeza de que existe carga (excepto en el caso de motores menores de un caballo). Incluso durante el arranque del motor serie, debe vigilarse que exista un cierto par resistente.

Las propiedades sobresalientes del motor serie son: disminución de la velocidad al aumentar el par, un par de arranque elevado que varía casi con el cuadrado de la intensidad para saturación baja, y una potencia de salida comparativamente independiente de las caídas de tensión en los conductores de la línea.

7.12 Motor Compound.

El motor compound puede tener características parecidas a las del motor serie o a las del motor derivación. Si el motor serie se provee de un arrollamiento en derivación, se evita la posibilidad de sobrevelocidad en vacío. Si un motor en derivación se provee de un arrollamiento serie, es posible obtener una velocidad casi independiente de la carga y por lo tanto casi constante.

La velocidad puede ser mayor en carga que en vacío. La velocidad puede aumentar rápidamente al aumentar la carga, de manera que la acción del motor será inestable y la velocidad llegará a ser excesiva.

La regulación de velocidad de los motores compound acumulativos puede considerarse como bastante buena. Su velocidad variará en razón inversa de la carga aplicada, porque cualquier aumento en la carga aumenta también el flujo inductor debido a la acción del arrollamiento en serie; y cuando aumenta el flujo inductor, tiene que disminuir

la velocidad del inducido para reducir la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) lo bastante para permitir que pase suficiente intensidad de corriente para poder soportar la carga. Cuanto más intenso sea el campo magnético inductor de un motor cualquiera, tanto más baja será la velocidad a la cual puede engendrar la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) normal.

Los motores compound se usan mucho para impulsar cizallas mecánicas, los laminadores de acero, y en las fábricas y las plantas industriales para impulsar máquinas que necesitan unos buenos pares de arranque y de agarrotamiento y no requieren una regulación de velocidad muy minuciosa.

Motores compound diferenciales

Cuando se conectan los motores compound para que funcionen como motores diferenciales, sus características difieren mucho de las de las máquinas acumulativas.

Un motor compound diferencial tiene su inductor en serie conectado de modo que la corriente pasará por él en la dirección opuesta a la de la corriente de los arrollamientos inductores shunt. Esta corriente de sentido contrario tiende a debilitar el flujo magnético inductor total siempre que el motor soporte alguna carga.

El devanado inductor shunt es el arrollamiento principal y en las condiciones ordinarias determina la polaridad de los polos inductores. Sin embargo, alguna que otra vez, cuando se ponen en marcha esos motores bruscamente y con fuerte carga, la corriente que circula por el arrollamiento en serie diferencial es muy intensa; y debido a su potente flujo y al efecto inductivo que ejerce sobre las bobinas inductoras shunt, durante el tiempo que este flujo se está creando alrededor del arrollamiento en serie, puede vencer al flujo del inductor shunt e invertir la polaridad de los polos inductores. Esto hará que el motor no arranque en su sentido normal, sino que en vez de hacerlo así empezará a marchar en sentido contrario.

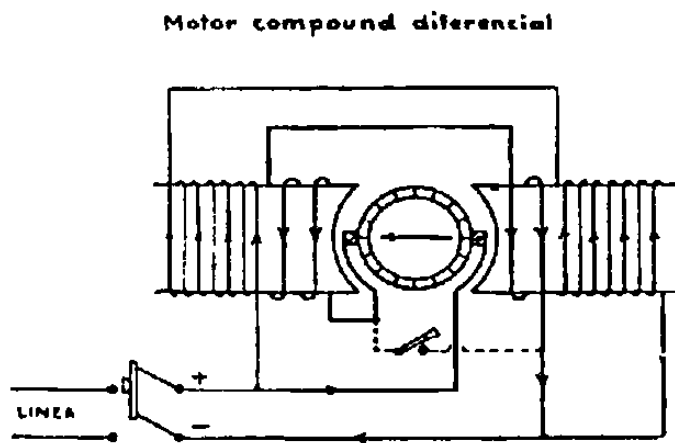


Figura 81 Diagrama de conexiones de un motor compound diferencial

Para evitar esto, el inductor en serie de un motor diferencial debe ponerse en corto circuito al arrancar. Esto puede hacerse empleando un interruptor unipolar de cuchilla del tamaño

apropiado, conectado en derivación a los terminales del arrollamiento en serie, como puede verse en la Figura 80.

7.13 Par Motor

Para que un cuerpo que puede girar, como el inducido de un motor, se ponga en movimiento, es esencial que el par motor magnético desarrollado por el sea mayor que el par mecánico resistente-aplicado al eje. Una vez que el inducido está en movimiento se acelera hasta que el par motor y el par resistente sean iguales, cuando se establezca esta situación, la velocidad será constante.

Si se supone que el par motor es constante y que el par resistente aumenta, la velocidad del motor disminuirá constantemente hasta que se pare este. Si las condiciones de funcionamiento son tales que el par resistente no puede ser nunca igual al par motor, el motor se acelerará hasta destruirse.

El motor eléctrico tiende a ser autorregulador en lo que respecta al ajuste del par motor, al par resistente. Siempre que el par resistente resultante de la carga aplicada al motor, varía, se producirá una variación en la velocidad del motor y esta variación en la velocidad será en un sentido tal que hará que los pares motor y resistente sean iguales de nuevo.

El par ejercido por un motor de c.c. dependerá por supuesto, de la intensidad del flujo magnético producido por los polos inductores y de la intensidad del flujo de inducido. Por consiguiente, el par ejercido por un motor puede incrementarse aumentando la intensidad de su campo inductor o aumentando la corriente del inducido, o haciendo ambas cosas a la vez.

La potencia mecánica producida por un motor de C.C. en HP, es proporcional al producto de su par motor por su velocidad. Cuando mayor sea la velocidad a que funcione el motor, mientras conserve el mismo par, tanto mayor será su potencia en HP. Los motores de C.C. en velocidades nominales elevadas producirán la misma potencia en HP con inducidos y armazones más pequeños que los de los motores de velocidades reducidas. Por consiguiente, el costo de los motores de gran velocidad por HP es mucho menor. Una armazón de un motor de 5HP a 900 r.p.m. podría servir para un motor de 10HP a 1800 r.p.m.

$$P = \tau \omega$$

En donde:

P es potencia

T es par

ω es velocidad angular en rad/s

$$\tau = \frac{7.04P}{n} \quad \text{En Lb-pie}$$

En donde:

n es la velocidad del motor en r.p.m.

p es la potencia del motor en Watts

7.14 Regulación y Control de La Velocidad de Los Motores de Corriente Continua

Al referirse a las características y al funcionamiento de los motores eléctricos, se emplean frecuentemente los términos regulación de la velocidad y control de la velocidad. Estos términos tienen significados completamente distintos y es muy importante distinguirlos.

La regulación de la velocidad se refiere a los cambios en la velocidad hechos automáticamente por el mismo motor, cuando varía la carga aplicada a la máquina. La regulación de la velocidad depende en gran parte de la construcción del motor y sus devanados, y es un factor muy importante en la elección de los motores para diferentes clases de trabajo. La regulación de la velocidad de un motor suele expresarse en forma de porcentaje o tanto por uno, y se refiere a la diferencia entre las velocidades de la máquina en vacío y en plena carga. En tanto por uno puede determinarse por medio de la fórmula siguiente:

$$\text{Regulación de la velocidad} = \frac{\text{R.P.M. sin carga} - \text{R.P.M. a plena carga}}{\text{R.P.M. a plena carga}}$$

Por ejemplo, si tenemos un motor que funcione a 1800 r.p.m. cuando no tiene conectada ninguna carga y su velocidad desciende a 1720 r.p.m. cuando marcha a plena carga su regulación de velocidad sería:

$$\text{Regulación de la velocidad} = \frac{1800 - 1720}{1720} = 0.046 = 4.6\%$$

La regulación de la velocidad del motor es enteramente automática y la realiza el mismo motor cuando varía la carga.

La regulación de velocidad de los motores shunt es excelente, ya que la intensidad de su campo magnético inductor permanece prácticamente constante y mientras se les aplique el voltaje de línea correcto mantendrán una velocidad prácticamente constante con amplia variación de la carga.

La velocidad de los motores shunt disminuirá algo, por supuesto, cuando aumente la carga; pero tan pronto como se reduce la velocidad del inducido, aunque sea ligeramente, se reduce el contravoltaje engendrado e inmediatamente admite el paso de más corriente por el inducido, aumentando así el par motor y manteniendo aproximadamente la misma velocidad.

La velocidad de los motores shunt no debe variar de ordinario más del 3 al 5 por ciento entre la marca en vacío y la marca a plena carga. las curvas que ilustran la regulación de velocidad de los motores shunt, serie y compound. se observará que la velocidad del motor shunt sólo disminuye muy suavemente cuando aumenta la carga.

La regulación de la velocidad del motor serie es muy defectuosa, porque su velocidad varía en razón inversa de la carga aplicada. Cualquier aumento en la carga refuerza el flujo magnético inductor del motor serie. Este da lugar a un contravoltaje más elevado y momentáneamente reduce la corriente de inducido, hasta que la velocidad del motor baje lo suficiente para que el contravoltaje vuelva a su valor normal, o aun valor inferior al normal, para permitir el paso de la corriente más intensa requerida por la carga adicional.

Si se suprime una parte de la carga aplicada a un motor serie, disminuye la intensidad de la corriente que pasa por el motor y se debilita su campo magnético. Este campo magnético más débil desarrolla menos contravoltaje momentáneamente permite pasar más corriente, hasta que la velocidad aumenta lo suficiente para elevar de nuevo el contravoltaje algo por encima del valor normal, disminuyendo la intensidad de la corriente.

Por consiguiente, el motor serie funcionara a velocidades muy elevadas cuando la carga es ligera y si la carga se desconecta por completo adquirirá una velocidad

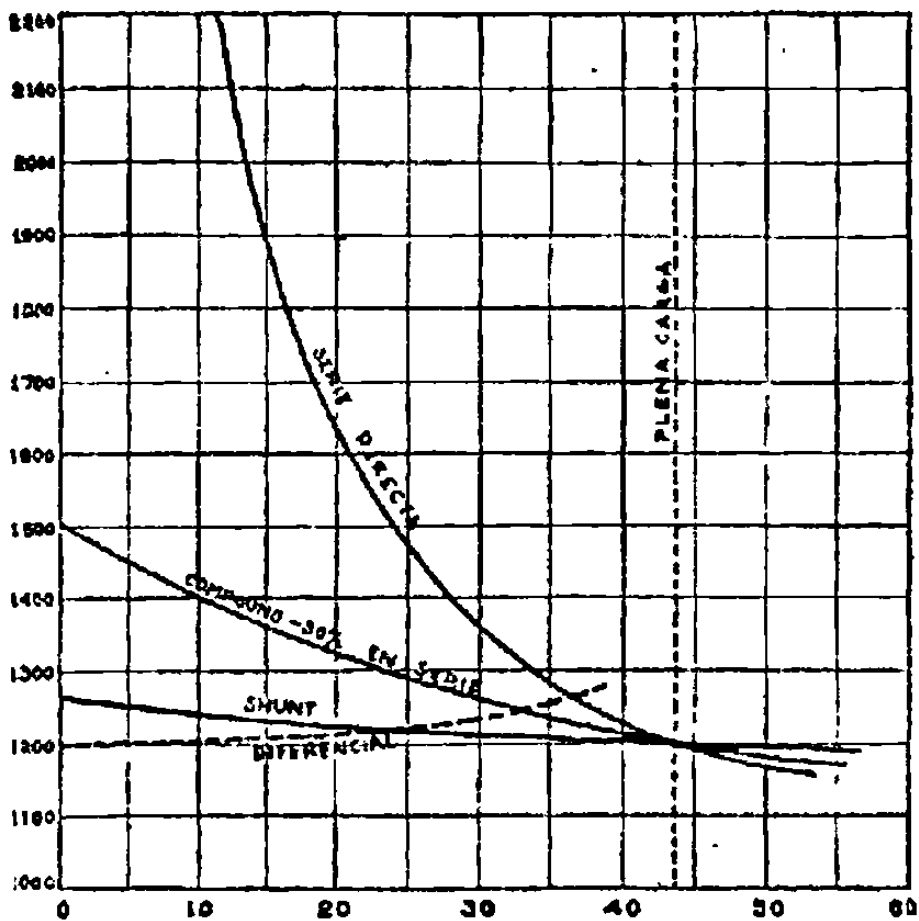


Figura 82 Curvas de velocidad de motores

excesiva. Por esta razón, no deben funcionar nunca los motores en serie sin carga, pues la velocidad podría aumentar hasta el punto de que la fuerza centrífuga destruyera el inducido, lanzándolo fuera.

El término control de velocidad se refiere a los cambios que se hace en la velocidad de un motor empleando aparatos de control manuales o automáticos. Estos aparatos para controlar la velocidad suelen ser exteriores al motor y consisten en una resistencia variable o en un driver electrónico.

$$n = \frac{V_T - I_a R_a}{I_F}$$

En donde:

N = velocidad del motor

V_T = voltaje en terminales

I_a = Corriente de armadura

R_a = Resistencia de armadura

I_F = corriente de campo

7.15 Arranque de Los Motores de Corriente Continua

Todos los motores electricos, cuando están en marcha, desarrollan una f.c.e.m. de rotación. Esta f.c.e.m., junto con la caída por impedancia debida a la corriente, equilibra continuamente la tensión aplicada. Puesto que la f.c.e.m. no existe en reposo, la tensión aplicada es equilibrada solo por la caída de la impedancia. Si se aplica la tensión nominal en reposo, pueden circular corrientes excesivas que dañen el motor. Esta corriente excesiva puede causar además una gran fluctuación de tensión en las líneas. Un par excesivo o una aceleración demasiado rápida también pueden dañar la carga. Para limitar el valor, y a veces la intensidad de arranque, muchas instalaciones de motores necesitan un dispositivo de arranque. Generalmente, este dispositivo reduce la tensión aplicada a los bornes del motor durante el periodo de arranque y controla el tiempo empleado en la aceleración, ya sea manual o automáticamente. La N.E.M.A. define un dispositivo de arranque como un controlador diseñado para controlar un motor hasta su velocidad normal en un sentido de rotación. Y un controlador Electrico como un dispositivo o conjunto de dispositivos que sirven para gobernar, en una forma predeterminada, la potencia eléctrica suministrada al aparato al cual esta conectado. Todos los motores de c.c. por encima de 2 H.P. requieren un dispositivo de arranque para reducir la tension del inducido. Los motores de potencia fraccionaria no requieren generalmente ningún dispositivo para regular la tensión.

En donde:

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

I_a = Corriente de armadura

V_T = Voltaje en terminales

E_c = Voltaje contraelectromotriz

R_a = Resistencia de armadura

$$E_c = K\phi\eta$$

Aquí se puede ver que el voltaje contraelectromotriz depende del flujo del devanado de campo y de la velocidad del motor, es por eso que a velocidad cero (arranque) el $E_c = 0$

Por esta razón, cuando se ponen en marcha los motores de c.c. salvo los de potencia muy pequeña, es necesario poner alguna resistencia en serie con el inducido para limitar la corriente hasta que la máquina adquiere su plena velocidad. A medida que el motor va aumentando su velocidad, el contravoltaje va siendo cada vez mayor, hasta que limita la corriente de modo que la velocidad del motor no puede seguir aumentando. En este punto, es decir, cuando se alcanza este límite de la velocidad, la diferencia entre el contravoltaje y el voltaje de línea puede ser solamente de unos cuantos volts incluso en los motores de voltaje muy elevado.

7.16 Pruebas de Motores al Freno

De cuando en cuando, puede ser conveniente comprobar el freno la potencia de un motor con el fin de averiguar su rendimiento o el estado en que se encuentra. Esto puede hacerse reglando un freno para que aplique la carga a la polea del motor y medir así el par ejercido por éste. Tal procedimiento para medir la carga de los motores se llama ensayo al freno de Prony.

La Figura 83 muestra la instalación y el método para realizar la prueba. El freno puede hacerse con dos bloques de madera cortados en forma que se adapten a la polea y provistos de dos pernos con tuercas de mariposa que permiten ajustar la tensión aplicada a los bloques puestos sobre la polea. Puede unirse a los bloques un brazo o una barra, de metal o madera, a la que se adapta un perno o tornillo de ojo para enganchar el extremo de la barra a una báscula o un dinamómetro. Puede emplearse un dinamómetro con escala, o bien puede hacerse que el perno del extremo del brazo descansa sobre la plataforma de una báscula.

El brazo o la palanca del freno debe tener una longitud como de 50 cm o un metro, esto es, una cifra redonda, que permita simplificar los cálculos. La longitud del brazo se mide desde el centro del eje hasta el punto en que se une el dinamómetro o el punto en que se hace el contacto con la báscula.

Con un dispositivo de esta clase puede aplicarse gradualmente carga al motor apretando los tornillos de las zapatas del freno hasta que el motor funcione a plena carga.

Puede ponerse un amperímetro en serie con uno de los conductores de línea del motor para determinar cuándo la máquina está cargada a su capacidad nominal de corriente. En el caso de que se emplee un amperímetro, debe usarse también un voltímetro, para ver si se aplica el voltaje de línea correcto al motor en el momento de la prueba. Puede emplearse un wattmetro, en lugar del voltímetro y el amperímetro, si se desea.

Una vez que se ha ajustado el freno de modo que el motor esté soportando su plena carga nominal en vatios, debe leerse la tensión en kilogramos que marca el dinamómetro y anotarse minuciosamente la velocidad del motor en revoluciones por minuto.

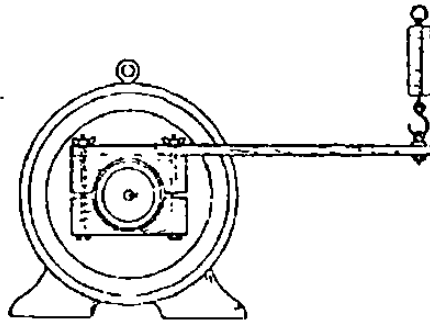


Figura 83 Freno Prony

El ajuste del freno debe mantenerse de modo que el motor ejerza la misma tracción sobre el dinamómetro y absorba la misma carga en vatios durante todo el tiempo que se esté verificando la velocidad.

La velocidad del motor puede medirse fácilmente por medio de un cuentarrevoluciones aplicado al extremo de su eje mientras está en marcha. Para medir el tiempo con exactitud debe emplearse un reloj con segundero.

7.17 Cálculo de La Potencia en H.P.

La potencia de un motor es proporcional al producto de su par motor por su velocidad. Por consiguiente, si conocemos la longitud del brazo de palanca en metros, la tensión o tracción en kilogramos sobre el dinamómetro, y la velocidad del motor en r.p.m., podemos determinar fácilmente la potencia producida en HP aplicando la sencilla fórmula siguiente:

$$HP = \frac{2 \times \pi \times r.p.m. \times P \times L}{4500}$$

en la cual:

HP = potencia en caballos desarrollada por el motor

$\pi = 3.1416$, o sea, la razón de la circunferencia al diámetro de un círculo.

($2 \times \pi = 6.28$)

P = velocidad del motor en revoluciones por minuto

r.p.m. = tensión que marca el dinamómetro, en kilogramos

L = longitud del brazo, en metro

4500 = número de kilogramos necesarios por minuto para un HP

Como ejemplo, supongamos que hemos hecho una prueba en un motor usando un brazo de palanca en el freno de 0,50 m de largo y hemos visto que cuando el motor está completamente cargado, según los instrumentos eléctricos, aplica un tensión de 5 Kg en el extremo del brazo y gira a la velocidad de 1500 r.p.m. Por consiguiente, según nuestra fórmula, se tendrá:

$$\frac{6.28 \times 1500 \times 5 \times 0.50}{4500} = 5.23\text{HP}$$

7.18 Pruebas de Rendimiento

El rendimiento de un motor es, por supuesto, un detalle importante, sobre todo cuando se trata de elegir una gran número de motores para impulsar en marcha continua cierta maquinaria. Cuanto más elevado sea el rendimiento de un motor, tanto mayor será la potencia en HP que producirá con una cantidad dada de energía eléctrica en watts, y tanto menor será la potencia desperdiciada en la forma de pérdidas dentro de la máquina.

Esas pérdidas son en parte mecánicas, como el rozamiento en los cojinetes y el rozamiento del inducido con el aire que le rodea cuando gira a gran velocidad. Son también en parte eléctricas, como las pérdidas en el devanado del inducido, y en los arrollamientos inductores debidas a su resistencia y al hecho de que una cierta cantidad de energía se transforma en calor y también las ligeras pérdidas magnéticas producidas por la histéresis y las corrientes parásitas.

El rendimiento de un motor cualquier puede hallarse dividiendo su potencia de salida entre la potencia de entrada en watts.

potencia en HP	a ½ carga	a ¾ carga	a plena carga
5	73%	78%	80%
10	79%	82.5%	85%
25	84%	87%	87.5%
50	85%	87.5%	88.5%
200	87%	89%	91.5%

Tabla 9 Rendimiento De Motores "Compound" De C.C., De 230 Volts

7.19 Devanados de Armadura

Arrollamientos de Inducido.

El inducido típico de corriente continua consiste en un núcleo cilíndrico, formado por chapas de acero, ranurado a lo largo de su periferia externa para la recepción del devanado de dos capas que sirve de asiento a la fuerza electromotriz inducida, y que conduce la corriente productora del par. Consta de un conjunto de conductores conectados entre si de tal manera que este inducido gira por reacción contra el campo inductor.

Devanado Bipolar.

Es el sistema mas sencillo para conectar los conductores o bobinas del inducido. Cada bobina consta de dos lados y dos cabezas, llamandose lado de bobina a la parte de la bobina que queda bajo el polo inductor y cabeza de bobina a la parte de la bobina que une entre si dos lados de bobina.

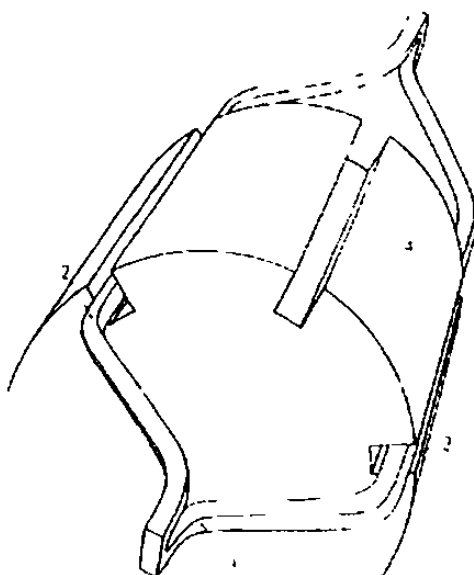


Figura 84 Devanado de armadura

Devanado Multipolar.

En estos devanados deben adaptarse a sus características constructivas de tal forma que cada bobina (es decir, las dos cabezas de bobina y los dos lados de bobina) han de envolver el flujo de un par de polos o sea, que ambos lados de bobina han de ocupar la misma posición respecto a dos polos contiguos.

Devanado Imbricado.

Las conexiones de las bobinas que constituyen un devanado de corriente continua, pueden realizarse de dos maneras. En una de ellas, las bobinas están conectadas hacia atrás, o sea, recogiendo todos los conductores que corresponden a un par de polos. Estos devanados se llaman imbricados y en ellos, las bobinas tienen forma de lazos. Este devanado es muy usado en motores ya que tiene la propiedad de producir mas corriente que voltaje.

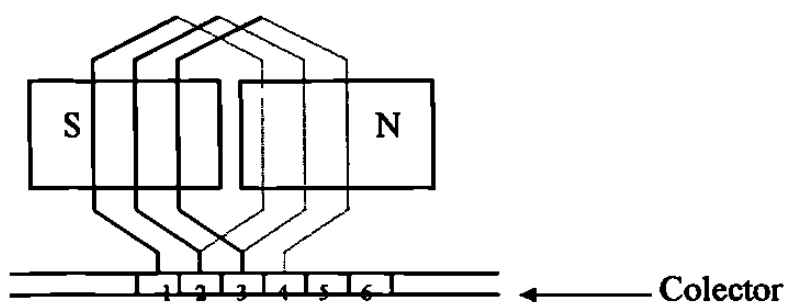
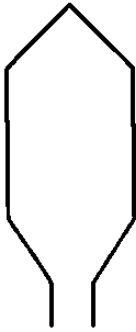


Figura 85 Ejemplo de Devanado Imbricado.

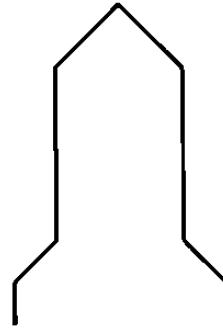
Devanado Ondulado.

Otra forma de conexión de las bobinas es hacia adelante, o sea que cada bobina pasa sucesivamente, por todos los polos. En ellos las bobinas tienen la forma de ondas.

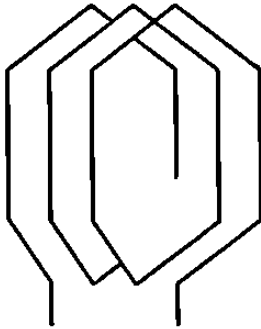
El paso de colector de un devanado ondulado difiere de un paso polar en m segmentos, porque, de otra forma, el devanado se cerraría sobre si mismo después de atravesar solamente $p/2$ bobinas.



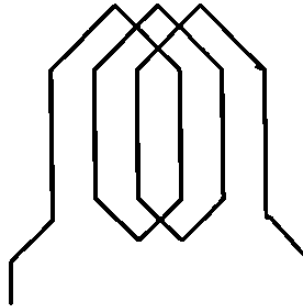
Forma de las bobinas en un devanado imbricado



Forma de las bobinas en un devanado ondulado



Bobina de 3 espiras para devanado imbricado.



Bobina de 3 espiras para devanado ondulado.

Figura 86 Formas de los devanados de armadura

8. MAQUINAS SINCRONICAS

8.1 Introducción

Ahora toca el turno a las maquinas de corriente alterna llamadas sincrónicas y toman ese nombre porque su velocidad esta asociada directamente con la frecuencia del voltaje de la línea de c.a.

$$\omega_s = \frac{\omega_e}{P/2} = \frac{2\pi f}{p/2} \text{ rad / s}$$

$$n_s = \frac{120 f}{p} \text{ r. p. m}$$

En donde:

ω_s es la velocidad angular sincrónica

ω_e es la velocidad angular del voltaje de la línea de c.a.

f es la frecuencia del voltaje de la línea de c.a.

n_s es la velocidad sincrónica en r.p.m.

Como otras maquinas eléctricas las maquinas sincrónicas operan ya sea como motores o como generadores. A una maquina sincrónica polifasica que actúa como generador se le llama alternador, las maquinas eléctricas más grandes del mundo son alternadores sincrónicos como por ejemplo las usadas por la C.F.E. para generar la electricidad en el país.

Algunas tienen potencias específicas de tanto como 1700 millones de watts (1700 Mwatts), aunque están diseñadas para trabajar como generadores algunas veces las hacen de motores si se presentan condiciones anormales en el sistema.

Muchas maquinas sincrónicas polifasicas se diseñan para trabajar como motores. Una armadura de motor sincrónico no solo necesita y recibe corriente alterna de la barra de distribución, sino también, como cualquier dinamo de c.c. necesita una excitación de c.c. para su campo. Debido a la posibilidad de variación de excitación de campo, el motor sincrónico de c.a. posee una característica que ningún otro motor de c.a. tiene, que el factor de potencia al cual funciona se puede variar a voluntad.

Los motores sincrónicos son muy usados como capacitores para la corrección del factor de potencia en las grandes industrias.

Una segunda característica de los motores polifásicos y monofásicos sincrónicos es que no tienen arranque propio inherente. Como el alternador de c.a. se los debe

acelerar hasta su velocidad mediante algún método auxiliar y conectar entonces a la línea.

Otra peculiaridad de los motores sincrónicos es su susceptibilidad a la fluctuación de penduleo u oscilación, en especial cuando las cargas están sujetas a troquelados, cizallas, compresoras o bombas recíprocas. El empleo de devanados amortiguadores en la fabricación de los rotores ha puesto término a este problema, ha hecho posible que el motor síncrono tenga arranque propio, durante el periodo del arranque.

En la actualidad se emplea ampliamente el motor síncrono y su popularidad nunca ha sido mayor, los motores polifásicos sincrónicos tienen las siguientes ventajas específicas sobre los polifásicos de inducción:

- Los motores síncrónicos se pueden emplear para la corrección del factor de potencia. Además de suministrar el par necesario para impulsar sus cargas.
- Son más eficientes, cuando se trabajan a factor de potencia unidad, que los motores de Inducción de potencia y voltaje nominales correspondientes.
- Los rotores de polos de campo de los motores síncrónicos pueden permitir el empleo de entrehierro más anchos que los diseños de jaulas de ardillas que usan en los motores de inducción.
- Pueden ser más baratos para la misma potencia, velocidad y voltaje nominales.

8.2 Construcción de la Máquina Síncrona.

La construcción de una máquina síncrona de c.a. es la misma para el motor que para el generador. El estator tiene un devanado monofásico o polifásico. El rotor se puede construir de polos salientes o de rotor cilíndrico. La mayor parte de los rotores son de polos salientes con es de polos salientes, excepto en los motores de muy alta velocidad, que emplean el rotor cilíndrico.

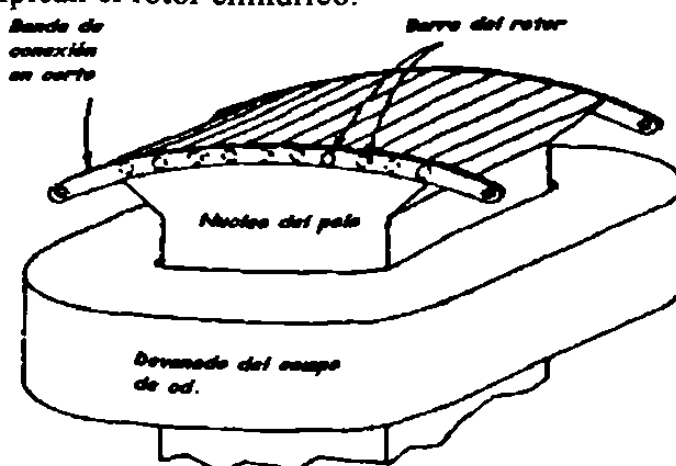


figura 87 Polo de una dinamo síncrona

Para eliminar la oscilación y desarrollar el par necesario de arranque, los polos del rotor contienen conductores de caras polares que se conectan en cortocircuito en sus extremos, como se muestra en la figura. Este devanado amortiguador consiste en barras macizas de cobre embebidas en la superficie de la cara polar y conectadas en cortocircuito mediante una banda, asemejando el devanado jaula de ardilla que se utiliza en los motores de inducción.

8.3 Funcionamiento del Generador Sincrónico

En un generador sincrónico debe de alimentarse el devanado del rotor con corriente continua, la cual produce un campo magnético giratorio dentro del generador, el cual a su vez induce un sistema de voltajes trifásicos en los arrollamientos del estator.

Esencialmente el rotor de un generador es un gran electroimán, los polos como se dijo anteriormente pueden ser salientes o no salientes (rotor cilíndrico), el termino saliente significa protuberante y significa que sobresale de la superficie del rotor. Por otra parte el polo no saliente es uno construido al ras de la superficie del rotor. Los rotores cilíndricos se emplean para dos o cuatro polos, mientras que los de polos salientes se emplean para mas de cuatro polos. Como el rotor esta sujeto a campos magnéticos variables deberá de construirse con laminaciones para reducir las perdidas por corrientes parásitas.

Debe de suministrarse alimentación de c.c. al circuito de campo del rotor. Como el rotor esta en movimiento, es necesario adoptar construcciones especiales, con el fin de suministrar la energía al campo.

Las dos soluciones más comunes son:

- Suministrar la energía de c.c. al rotor desde la fuente externa, por medio de anillos rozantes y escobillas.
- Proveer la energía de c.c. por medio de una fuente especial llamada excitatriz, que es un generador de c.c. montado sobre el mismo eje de la maquina sincrónica y que aprovecha el movimiento de esta para generar la energía de c.c.

Los anillos rozantes son aros metálicos que rodean al eje de la maquina, pero aislados del mismo eje. Cada extremo del arrollamiento del motor esta conectado a un anillo y sobre cada anillo hace contacto una escobilla. Si alas escobillas se conectan las terminales positiva y negativa de la fuente, en todo momento quedara aplicado el mismo voltaje al arrollamiento del campo, sin importar la velocidad angular ni la posición del rotor.

La combinación de anillos rozantes y escobillas causa algún problema en las maquinas sincrónicas debido a que aumentan las exigencias de mantenimiento de la maquina por la periodicidad con que debe de revisarse el estado de desgaste de las escobillas. Adicionalmente, la caída de voltaje en las escobillas puede ser causa de considerables perdidas de potencia en maquinas con altas corrientes de campo. A pesar

de esto se emplean los anillos rozantes con escobillas debido a que es el método funcional menos costoso de suministrar corriente de campo.

El voltaje generado interno en esta maquina depende de la velocidad de rotación de su eje y de la magnitud del flujo de campo. El voltaje de fase de la maquina difiere del voltaje generado debido a los efectos de resistencia de armadura y a las resistencia y reactancia interna del devanado de armadura, el voltaje terminal del generador podrá ser igual al voltaje de fase o podrá estar relacionado con este dependiendo como este conectada la maquina en delta o en estrella.

8.4 Funcionamiento del Motor Sincronico.

El motor sincrónico no tiene arranque propio inherente, no arranca por si mismo sino que necesita de un devanado amortiguador para el arranque, este devanado se desconecta automáticamente cuando el motor gira a la velocidad sincrónica.

El devanado de armadura consiste en muchas bobinas en serie, en cada fase de una dinamo sincrónica polifásica de c.a. La corriente trifásica en los conductores de armadura del estator produce un campo magnético uniforme giratorio, cuya velocidad de rotación es de $n_s = 120 f / P$.

Si se coloca una carga en el eje de un motor sincrónico, el par de resistencia creado por dicha carga hará que el rotor se desacelere o "se siente" momentáneamente, pero continuara girando a la misma velocidad con respecto al campo rotatorio del estator.

La velocidad del rotor, sigue siendo la velocidad sincrónica con respecto al campo rotatorio, pero el flujo del rotor o el flujo mutuo del entrehierro se reduce un poco, debido a la mayor reluctancia del entrehierro. Si el par contrario es tan grande que es mayor que el par máximo que se puede desarrollar y si el rotor "se desliza" fuera de sincronismo, se detendrá el motor. Por la anterior, un motor sincrónico trabaja a la velocidad sincrónica o no trabaja.

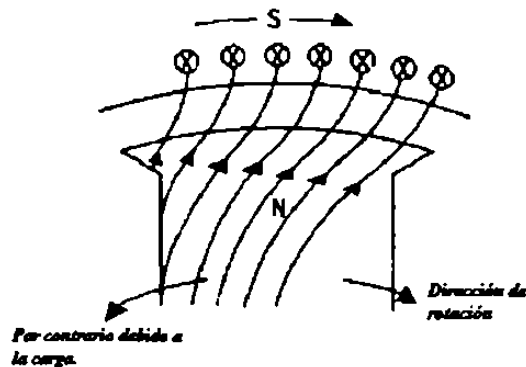


Figura 88. Efecto de carga sobre la obstrucción del flujo.

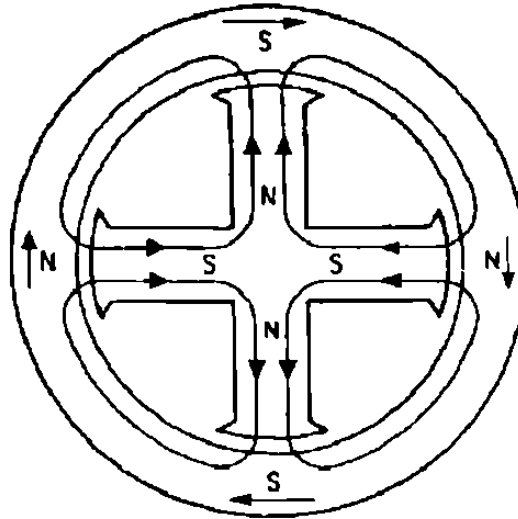


Figura 89 Campo rotatorio del estator con respecto al rotor

8.5 Arranque de Motores Síncronicos.

El motor síncronico se debe acelerar a una velocidad suficiente cercana a la síncronica para asegurar su sincronismo con el campo rotatorio. Los medios por los cuales se aceleran a la velocidad necesaria son:

- Un motor de c.c acoplado al eje del motor síncronico.
- Mediante el generador de excitación del campo como motor de c.c.
- Con un motor pequeño de inducción que tenga al menos un par de los polos menos que el motor síncronico.
- Por medio de devanados de amortiguación, como los del motor de inducción de jaula de ardilla.

El primero de los métodos se usa a veces en los laboratorios con motores síncronicos que no estén equipados con devanados amortiguadores. Pero para llevar a sincronismo el motor, se hace trabajar el generador de c.c. como motor y la dínamo síncronica de c.a. se sincroniza con el suministro de ca como alternador una vez en paralelo con el suministro, la dínamo síncronica trabaja como motor.

El segundo método, empleado es igual que el primero excepto que el motor excitado síncronico, que es un generador derivación c.c. se hace trabajar como un motor y la dínamo síncronica de c.a. se sincroniza con el suministro de c.a.

El tercer método, empleando un motor auxiliar de inducción con menos polos implica menos procedimiento de sincronización para el motor síncronico de c.a. para un alternador. Se necesita que el motor de inducción tenga como mínimo un par de polos menos para compensar la pérdida de velocidad que tiene ese motor debido al deslizamiento.

En los tres métodos que acabamos de describir, es necesario que haya poca o ninguna carga en el motor sincrónico y que la capacidad del motor de arranque, de c.a. o c.c. sea de entre 5 y el 10 por ciento de la capacidad nominal del motor sincrónico acoplado en él.

Sin embargo, el método que con mucho se emplea mas para arrancar un motor sincrónico como un motor de inducción usando los devanados amortiguadores. Este método es el más sencillo y no se requiere maquinas auxiliares especiales.

8.6 Arranque de un Motor Sincronico como Motor de Inducción mediante sus Devanados Amortiguadores.

En la figura de abajo se puede observar que la banda que se conecta en corto circuito a las barras del rotor tiene agujeros. De esta modo, se forma un motor complejo de jaula de ardilla y aunque las barras no tienen la capacidad para conducir continuamente la carga nominal del motor sincrónico como motor de inducción basta poner poca carga.

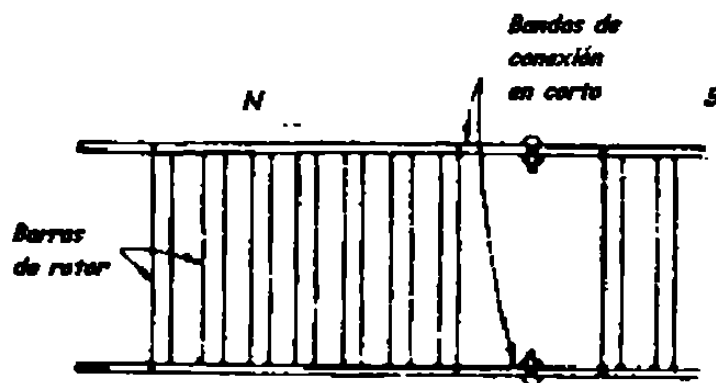


Figura 90 Devanado amortiguador de jaula de ardilla o arranque.

Cuando se arranca los motores sincrónicos extremadamente grandes, como motores de inducción, se emplean varios métodos para reducir la corriente de arranque que se toma de la barra de distribución.

Se acostumbra a conectar en corto circuito el devanado del campo de c.c. durante el periodo de arranque entonces, cualquier voltaje y corriente que se induzcan en el, pueden ayudar a que el devanado amortiguador produzca acción de motor. En los motores sincrónicos extremadamente grandes se usan interruptores de seccionalización de campo, o de división de campo, para conectar en cc los devanados individuales de campo y evitar la suma acumulativa de los voltajes inducidos de polo a polo.

Entre las ventajas que tiene los motores sincrónicos sobre los de inducción esta el hecho de que el entrehierro de un motor sincrónico es mejor. Por esta razón, el devanado de inducción del rotor crea en el arranque una relación bastante alta de la reactancia con la

resistencia del rotor. Aunque esto pueden ocasionar que se desarrollen mayores corrientes de arranque y menores factores de potencia para alcanzar el mismo par, o aun un par menor se mejora la velocidad de deslizamiento sin carga del motor síncronico. Así, cuando se quita el corto circuito del devanado de campo y se aplica c.c. al devanado de campo en el rotor, a velocidad igual o cercana a la síncrona, el rotor entra fácilmente en sincronismo con el campo rotatorio del estator.

En resumen cuando se arranca un motor síncronico sin carga, con sus devanados amortiguadores sé:

- pone en corto el devanado de campo de c.c. , y se aplica al estator, con lo cual el motor alcanza la velocidad sin carga o en vacío como motor de inducción.
- aplica corriente directa al devanado de campo y la corriente de campo se ajusta para dar una corriente mínima alterna de línea.
- acopla la carga con el eje del motor.

8.7 Arranque de un Motor Síncronico con Carga.

El motor síncronico arranca y trabaja a la velocidad síncrona, mediante sus devanados amortiguadores tipo inducción. Para desarrollar una velocidad cercana a la síncrona, el devanado de jaula de ardilla del motor de inducción necesita tener baja resistencia y alta reactancia .

Estas últimas características producen un bajo par de arranque en un motor de inducción para la misma corriente de armadura, esos pares son aproximadamente del 30 al 50 por ciento del par de plena carga, por ejemplo en ventiladores o compresores de aire, cuyas cargas están en función de su velocidad, se pueden tolerar esos pares aplicados.

Se puede mejorar el par de arranque de las barras de jaulas de ardillas del rotor síncronico mediante el empleo de aleaciones de alta resistividad en las barras. Esto no lleva al rotor a una velocidad tan cercana a la síncrona como con rotores de baja resistividad, debido a que aumentan el deslizamiento a causa de la alta resistencias. Si se abre el campo durante un instante y se le pone en corto inmediatamente antes de conectar la corriente directa para asegurar el sincronismo.

El amortiguador devanado de fase se reconoce inmediatamente debido a que emplea cinco anillos rozantes, dos para el devanado de campo con c.c. y tres para el devanado de c.a. conecta en estrella. El rendimiento de arranque del devanado, se emplea una resistencia externa de arranque para mejorar el par de arranque.

El motor se pone en marcha con toda la resistencia externa por fase, como y se pone en corto circuito en el campo. El motor se acerca a la velocidad síncrona a medida que se reduce la resistencia de arranque y cuando se aplica el voltaje de c.c. del campo, el motor se asegura en sincronismo.

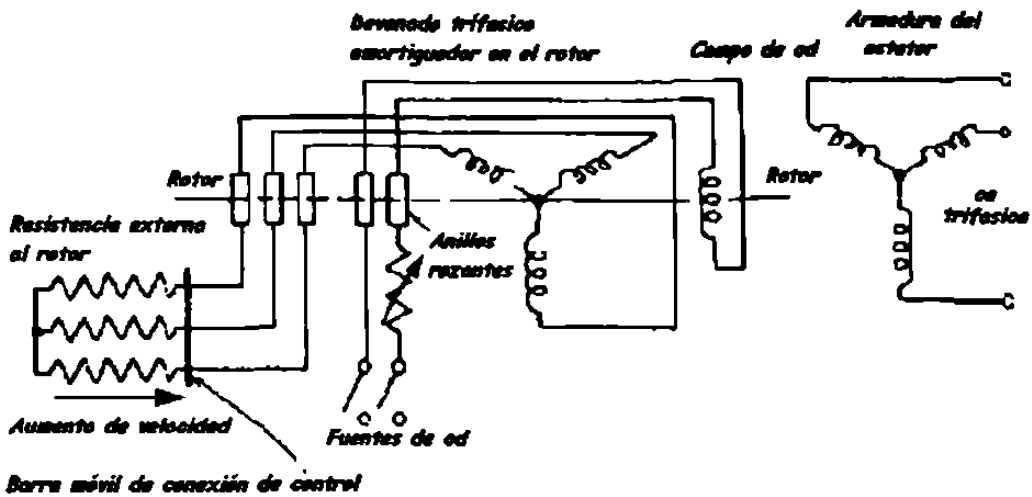


Figura 91 Conexión de resistencias para el arranque de un motor sincrónico

8.8 Curvas “V” para un Motor Sincronico.

Las relaciones fasoriales se pueden resumir en forma gráfica en la figura 92 , en forma experimental en el laboratorio, con el dispositivo que se muestra en la figura 94. Cuando la corriente de campo de un motor se reduce, se produce una corriente de armadura I_a en retraso, cuando el motor esta sobreexcitado, la corriente de armadura también aumenta y supera la corriente necesaria de excitación normal para desarrollar el par requerido de cualquier carga dada.

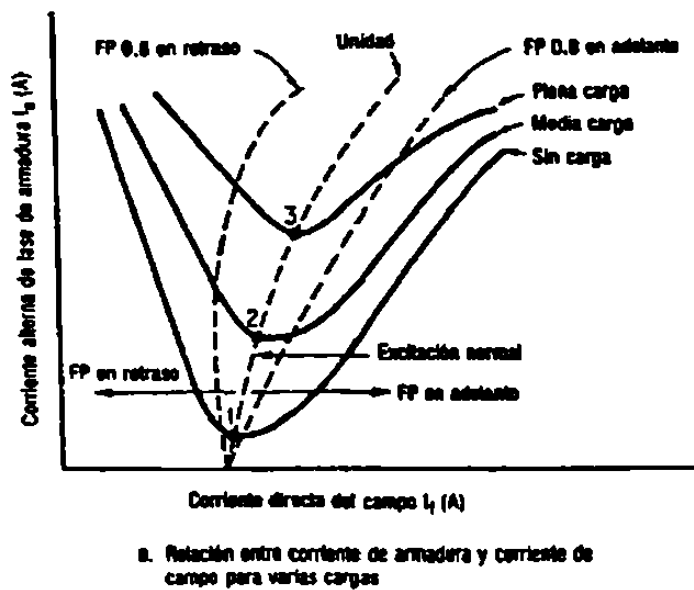
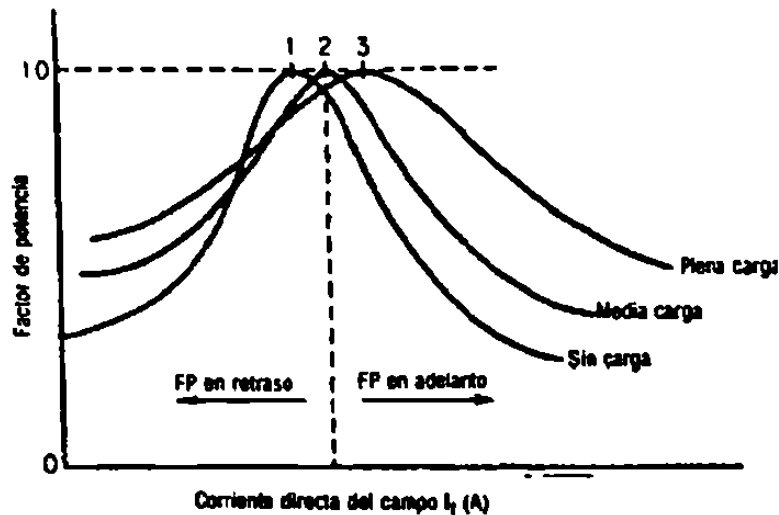


Figura 92 Curvas “V” del motor sincrónico



b. Relación entre el factor de potencia y la corriente de campo para varias cargas

Figura 93 Familia de curvas de factor de potencia contra corriente de campo para un motor síncronico

Aplicando una carga constante determinada al eje de un motor síncronico haciendo variar la corriente de campo de sobreexcitación y registrando a cada etapa la corriente de armadura se obtienen las curvas de la figura 93.

Las conexiones de los wattmetros que se muestran en la figura 94 también darán el factor de potencia de cada armadura y de campo en cualquier condición dada de carga.

Cada una de las curvas de la familia tendrán un desplazamiento a la derecha a medida que se aumente la carga a una carga mayor. Así las curvas V muestran los diagramas fasoriales y viceversa para distintas condiciones de carga y factor de potencia.

Las curvas "V" también verifican un punto básico, en el cual se demostró que, si se hace variar la excitación de cualquier valor determinado de la carga mecánica aplicada, se debe cambiar el ángulo del par de tal modo que $V_f I_a \cos\theta$, la potencia desarrollada por fase, permanezca igual. Si disminuye la excitación desde el punto 2 de la figura 93, la carga disminuye y desarrolla menos potencia. El ejemplo siguiente que, si se supone constante el ángulo del par, el aumento en la excitación ocasiona una potencia desarrollada mayor, a un factor de potencia más adelantado.

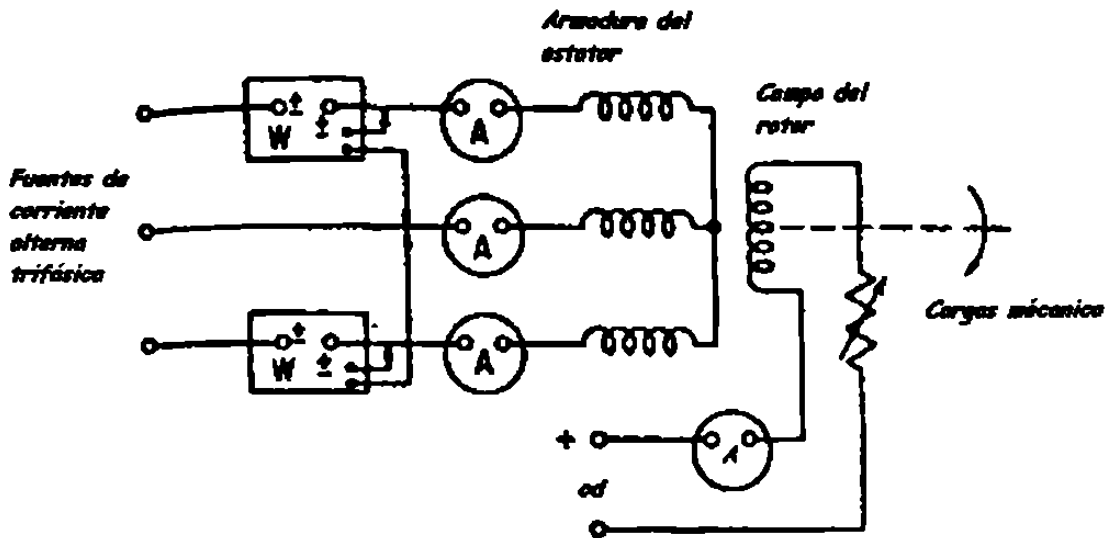


Figura 94 Conexiones para obtener las curvas "V" en el laboratorio

8.9 Capacidad de Motores Síncronos contra Especificaciones de Factor De Potencia

Los motores síncronos comerciales pueden comprarse en tres especificaciones normales de factor de potencia: FP uno, FP 90 por ciento en adelanto y FP 80 por ciento en adelanto.

Al comparar los tamaños de armazón de la misma potencia, voltaje, y velocidad, se podría decir que el tamaño de armazón de un motor síncrono de 100 hp, FP 1.0, es menor que uno de FP 0.8 en adelanto, de a que el FP unidad tiene especificada una corriente de plena carga igual al 80 por ciento de la de un motor con FP 0.8 en adelanto. Ambos motores son capaces de entregar 100 hp en sus ejes de salida. Pero el motor con menor factor de potencia entregara 100 hp y al mismo tiempo se puede ajustar para tomar una corriente nominal a un FP igual al 80 por ciento en adelanto. Si se aumenta la corriente de excitación a plena carga de uno hasta FP 80 por ciento en adelanto, se debe aumentar la corriente de armadura.

En resumen los motores síncronos con FP en adelanto, de la misma capacidad de potencia que los que tiene FP unidad, deben tener una mayor capacidad de potencia a plena carga, por lo cual necesitan una armazón de mayor tamaño.

8.10 Capacitores Síncronos

Se fabrican deliberadamente varios motores síncronos especializados sin ejes de salida. Se utilizan únicamente para corrección de factor de potencia. No son capaces de impulsar carga mecánica alguna. Pero se debe hacer notar que cualquier motor

sincronico sobreexcitado que no se usa para impulsar carga alguna se puede clasificar como capacitor sincronico o condensador sincronico.

Aunque no haya carga mecánica en un motor sincrónico que contribuya a la corriente de armadura, las curvas V muestran que cuando se sobreexcitan, aun en vacío, la corriente de armadura del estator es alta.

Se prefieren los capacitores sincrónicos para corregir el factor de potencia en vez de los capacitores comerciales. Los primeros pueden fabricarse a un costo mucho menor para capacidades de KVA (aun de MVA) extremadamente altas, así como para altos voltajes de 100 a 800 kV., en comparación con los capacitores comerciales fijos de la misma capacidad de voltaje y KVA.

8.11 Ventajas y Limites Económicos de La Corrección del Factor de Potencia.

Las cargas que tienen factores de potencia de moderados a bajos en adelanto y en retraso menores de 0.9, ocasiona una perdida de energía eléctrica de la compañía de servicio. Se mantienen al mínimo los costos de esta capacidad mayor adicional mediante la corrección del factor de potencia.

También hay otras ventajas que se deben a esta corrección:

- Puesto que la capacidad de potencia y de la corriente de las líneas son menores ambas, se reducen las perdidas de potencia en las líneas de transmisión (I^2R)
- Igualmente, se reduce la caída del voltaje en la línea debida a la impedancia entre sus conductores, facilitando la tarea de mantener constante el voltaje nominal que suministra la compañía a los consumidores.
- Aumenta la eficiencia de transmisión desde la fuente hasta la carga.
- Disminuyen los costos de la compañía de servicio, lo cual se refleja en ahorro para el consumidor.
- La corrección del factor de potencia consiste en arreglar cargas capacitivas en paralelo o las cargas inductivas existentes. Lo anterior tiene el efecto de reducir todo lo siguiente:
 - Potencia total en cuadratura; inductiva y reactiva ($+j Q_t$)
 - Potencia total compleja aparente (S_t)
 - Corriente total suministrada al sistema completo (I_t)

8.12 Métodos de Corrección o Mejoramiento del Factor de Potencia

La corrección o mejora del factor de potencia implica diferentes maneras de elevarlo. Los métodos consisten en conectar dispositivo entre los conductores, en

paralelo con las cargas inductivas existentes, $+jQ$, potencia negativa reactiva en cuadratura $-jQ$. Se usan en forma comercial tres tipos de dispositivos:

- **Capacitores de corrección.** Son capacitores comerciales grandes de alto voltaje y alta capacitancia, que se conectan entre las líneas de sistemas monofásicos y trifásicos. Los capacitores de corrección se especifican tanto en kVA, kilovars, como en voltaje, kV. Los capacitores comerciales de corrección se limitan a las capacidades menores de kVA y kv, en comparación de los dos tipos siguientes de dispositivos
- **Capacitores sincrónicos.** Son motores sincrónicos sobreexcitados diseñados sin ejes que sobresalgan, de modo que no se puedan acoplar a cargas mecánicas, y tienen por objeto “flotar” en las líneas trifásicas o monofásicas para tomar solo corriente en adelanto del suministro y corregir el factor de potencia. Sus capacidades se indican tanto en kVA como en kV.
- **Motores Sincrónicos.** Son motores de velocidad constante que cuando se sobreexcitan, son capaces de impulsar cargas mecánicas, simultáneamente, de tomar corriente del suministro que están en adelanto. Casi toda su capacidad en kVA se representa como $-jQ$ kilovars de corrección.

8.13 Límites Económicos de Mejoramiento del Factor de Potencia.

Se acostumbra no tratar de corregir completamente el factor de potencia de un sistema hasta llegar al factor unidad. El hecho de que haya disponibles capacitores grandes de alta capacidad y de que, para la misma capacidad en kVA, sean menos costosos que los motores sincrónicos. Esto se debe a que se arranca y se hacen funcionar sin carga, con lo cual no se necesitan devanados toscos de jaulas y necesitan diámetros menores de ejes y rodamientos menos robustos.

El motivo económico que establece un límite de corrección máxima del factor de potencia se puede inferir con los datos de la tabla 11 para un sistema de 10,000 kVA

FP del sistema	Salida en kW	Kilovars disponibles	Kilovars por corregir del FP	Kilovars acumulados en la corrección
0.6	6000	8000	—	—
0.65	6500	7600	400	400
0.7	7000	7140	460	860
0.75	7500	6610	530	1390
0.8	8000	6000	610	2000
0.85	8500	5270	730	2730
0.9	9000	4360	910	2640
0.95	9500	3120	1240	4880
1	1000	0	3120	8000

Tabla 11 Límites económicos para la corrección del factor de potencia

8.14 Motores Supersincronicos

El termino supersincronico no se refiere a que el motor gire a una velocidad arriba de la sincrónica. Este motor fue creado por General Electric para proveer un motor sincrónico que tuviera un arranque propio bajo altas cargas. El motor sincrónico de rotor simplex puede desarrollar pares entre 250 y 300 por ciento del par en plena carga.

El motor supersincrono es capaz de desarrollar un par motor sincrónico al arranque. Sin embargo, necesita una construcción especial y probablemente el motor más costoso de su tipo para determinar potencia.

El rotor es uno normal de jaula de ardilla con un devanado de c.c. que sale a anillos rozantes en el eje del rotor. El estator completo puede girar libremente en muñones del mismo modo que un dinamometro de c.a. El estator del motor supersincrono puede girar libremente sobre cojinetes a su velocidad sincrónica. El devanado de armadura en el estator se excita a través de anillos rozantes en general se arranca en voltaje reducido mediante un regulador trifásico o de inducción. Se tiene un freno grande alrededor del lado externo del armazón del estator para detener el movimiento.

Cuando se aplica un voltaje de c.a. polifásico al estator sin estar aplicado el freno, el par de motor de inducción que producen los polos del rotor reacciona contra los conductores del "estator" esta reacción imparte al estator un par que tiene la dirección contraria de giro de la carga. El estator se acelera a medida que se acelera a medida que aumenta el voltaje de c.a. en el estator.

8.15 Motores Especiales Sincrónicos que no emplean excitación de campo con c.c.

Hay tipos de motores sincrónicos que no emplean excitación de c.c. en el devanado de campo y se agrupan en dos categorías:

- Los motores sincrónicos no excitados, en los que no se tiene ninguna excitación del campo.
- Los motores de excitación de campo c.a. o "sincromotores".

8.16 Motores Sincrónicos de Inducción.

Este motor se creó debido a la demanda de un motor sincrónico polifásico con arranque propio en tamaños, menores, de menos de 50 hp, que no necesitaran de excitación del campo de c.c. y que poseyeran de las características de velocidad constante del motor sincrónico. El rotor consiste en un devanado de jaula de ardilla, embobinado o vaciado distribuido uniformemente en las ranuras.

8.17 Motor Sincronico Sin Escobillas

La eliminación del excitador en el eje del motor sincrónico suprimió los problemas relacionados con la conmutación de un generador de c.c. y el chisporroteo de las escobillas conectadas al conmutador. Pero todavía es necesario suministrar la c.c. a través de las escobillas y anillos rozantes, y para eliminar el mantenimiento de estos últimos se creó el motor sincrónico sin escobillas.

En la figura 95 se muestra un diagrama de bloques de un tipo de motor sincrónico sin escobillas. De hecho, el sistema incorpora la rectificación, con las siguientes modificaciones:

- Los rectificadores de silicio están sustituidos por tiristores o por rectificadores controlados de silicio (SCR).
- Los rectificadores controlados de silicio se disparan mediante transistores, los que controlan la salida de c.c. del transistor.
- El transformador se sustituye por un alternador de c.a. que tiene un campo de c.c. estacionario y una armadura polifásica giratoria en la cual se generan voltajes de corriente alterna. La excitación de c.c. del motor sincrónico se controla mediante un variac monofásico que hay en el campo estacionario de c.c. del alternador polifásico, que esta en el mismo eje del rotor que el campo del rotor del motor sincrónico.
- El rotor del motor sincrónico, lleva la armadura del alternador, el control de c.c. estático y el sistema de rectificación, que consta de transistores y tiristores, que se acaba de describir, así como del campo del rotor del motor sincrónico.

Estas cuatro modificaciones, como se muestra en la figura 95, proporcionan una forma de controlar la excitación de c.c. del campo de un motor sincrónico sin necesidad de excitador ni de ningún tipo de anillos rozantes o escobillas.

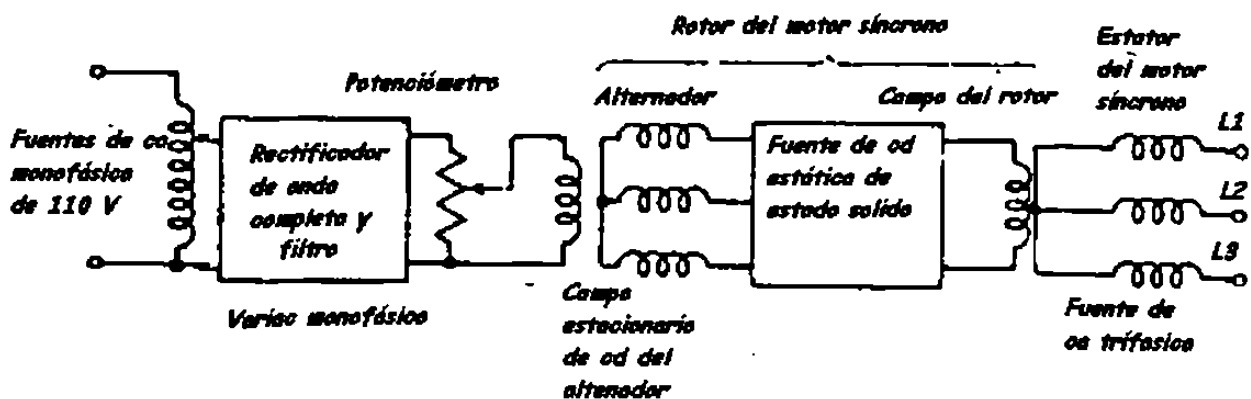


Figura 95 Diagrama de bloques de un motor sincrónico sin escobilla

9. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS

9.1 Introducción

La expresión de motor de c.c. sin escobillas no puede ser usada para definir un tipo determinado de motor de c.c.

Durante la pasada década han aparecido distintos tipos a los que puede aplicarse esta expresión. En la actualidad los distintos tipos pueden agruparse en tres clases

- Motores de c.c. de conmutación electrónica (Sin escobillas)
- Motores de c.a. alimentados con c.c. a través de un inversor c.c. /c.a.(Sin escobillas)
- Motores de c.c. de rotación limitada (Sin escobillas)

Cada una de estas clases comprende motores de proyecto y concepción distinta, hasta ahora en ninguna de las distintas clases se ha impuesto claramente un proyecto determinado.

9.2 Ventajas de los Motores de C.C. Sin Escobillas

Los motores de c.c. sin escobillas, aun cuando son mas caros que los tradicionales a igualdad de potencia poseen las siguientes ventajas.

- Requieren muy poco o ningún mantenimiento
- Tienen una vida más larga
- No presentan chispas eliminándose el peligro de las explosiones y las radiaciones de R.F.
- Como consecuencia de su funcionamiento, no se forman gases ni partículas de colector o escobillas.
- Pueden funcionar sumergidos en líquidos, con gases combustibles e incluso pueden estar herméticamente sellados
- Son generalmente de mayor rendimiento que los servomotores de c.c. con escobillas o que los motores convencionales de c.c.

- Proporcionan una respuesta más rápida (Constante de tiempo menor del servosistema) y una característica bastante constante de salida – corriente de entrada los que los hace particularmente adecuados en aplicaciones de servomotores
- Se les llama motores “Fríos” ya que no producen tanto calor como los convencionales

Las desventajas de estos motores son pocas pero las explicaremos a continuación.

- Tamaño total mayor debido al volumen adicional requerido por el equipo electrónico asociado, (aun cuando los propios motores sin escobillas son más pequeños que los motores convencionales de c.c. de igual potencia)
- Mayor costo inicial (pero menor costo de mantenimiento)
- Poca capacidad de potencia (hasta 24 HP) por el momento y necesidad de pedidos especiales para aplicaciones determinadas.

9.3 Motor de Corriente Continua de Conmutación Electrónica Sin escobillas

Todos los motores de c.c. sin escobillas del tipo indicado tienen un estator bobinado y un rotor de imán permanentes, unido al eje del rotor existe algún tipo de sensor-transductor de la posición del rotor que actúa como entrada del sistema de conmutación a semiconductores que evita la necesidad del colector y de las escobillas.

El motor conmutado electrónicamente lleva incorporado 3 interruptores a semiconductores (transistores) en serie con sus tres devanados en el estator, equivalente a un motor con escobillas que tuviera tres delgas.(Algunos tipos utilizan de 6 a 12 y hasta 100 o más devanados estatoricos e interruptores a transistores del tipo de SCR.)

Unido al eje del motor se encuentra una pantalla que “detecta” la posición del rotor y activa el interruptor-conmutador a transistor de su condición de corte a la de saturación, con lo que se pone en tensión el devanado estatorico productor de par requerido.

El procedimiento indicado en la figura xxx es un procedimiento de detección fotoeléctrico utilizado frecuentemente. Los motores prácticos de conmutación electrónica utilizan otros procedimientos tales como transductores magnéticos, transductores de efecto Hall, sensores electrostáticos, bobinas de inducción electromagnética etc.

La función del transductor o sensor es la de proporcionar la señal para activar un determinado interruptor o transistor desde su condición de corte a la de saturación. El transistor cierra así el circuito de su respectiva bobina estatorica de par.

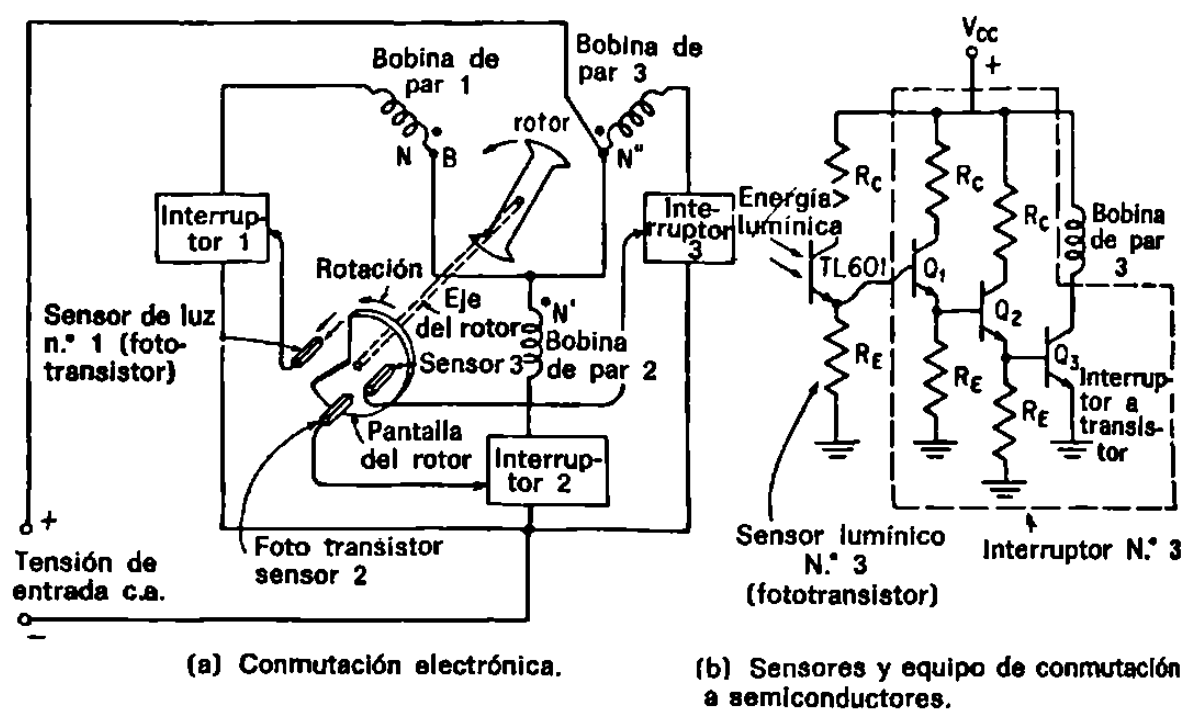


Figura 96 conmutación electrónica en motores de c.c. sin escobillas

El motor de la figura de arriba funciona de la siguiente manera:

- El fototransistor 1 activa el transistor-interruptor de la posición A indicada. Los fototransistores 2 y 3 no están activados porque la fuente de luz (no indicada) está bloqueada por la pantalla.
- El transistor-interruptor 1 activa la bobina 1 que está devanada en sentido tal que produzca un polo de polaridad opuesta a la del imán permanente (PM) del rotor. El rotor se atrae de la posición A a la B.
- En la posición B el fototransistor 1 y la bobina 1 correspondiente se desactivan y se activa el fototransistor 2. Este a su vez activa el transistor 2 y energiza la bobina 2 lo que a su vez atrae al rotor de la posición B a la C.
- El efecto del sensor y del interruptor es el de energizar secuencialmente cada uno de los devanados estatoricos productores de par sucesivamente a fin de conseguir una rotación continua del eje del rotor con un mismo sentido de giro (contrario al de las agujas del reloj en este caso como se indica en la figura de arriba).