

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

CARRERA INGENIERÍA EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Máquinas Eléctricas II

(Máquinas de C.A.)

CONTENIDO

OBJETIVO

UNIDAD I PRINCIPIOS GENERALES DE MÁQUINA ELÉCTRICAS

- 1.1.- Las máquinas eléctricas y los transformadores
- 1.2.- Los sistemas rotacionales
- 1.3.- El campo magnético
- 1.4.- Pérdidas de energía en núcleos
- 1.5.- Ley de Faraday

UNIDAD II FUNDAMENTOS DE LAS MAQUINAS DE C.A.

- 2.1.- El campo magnético giratorio
- 2.2.- Tensión inducida en una máquina de c.a.
- 2.3.- Efectos del paso de bobina en estatores de máquinas de c.a.
- 2.4.- Devanado distribuido en máquinas de c.a.
- 2.5.- Par producido en una máquina de c.a.
- 2.6.- Flujos de potencia y pérdidas en las máquinas de c.a.

UNIDAD III GENERADORES SÍNCRONOS (G.S.)

- 3.1.- Estructura del generador síncrono
- 3.2.- velocidad de rotación del generador síncrono
- 3.3.- Circuito equivalente del generador síncrono
- 3.4.- Diagrama fasorial del generador síncrono
- 3.5.- Par y potencia en el generador síncrono
- 3.6.- parámetros del generador síncrono
- 3.7.- El generador síncrono funcionado en forma aislada
- 3.8.- Operación en paralelo del generador síncrono

- 3.9.- Fenómenos transitorios en los generadores síncronos
- 3.10.- Especificaciones nominales de los generadores síncronos

UNIDAD IV MOTORES SÍNCRONOS

- 4.1.- Principios básicos de operación
- 4.2.- Operación del motor síncrono en régimen permanente
- 4.3.- Arranque de motores síncronos
- 4.4.- Resumen de los generadores y motores síncronos
- 4.5.- Condensador síncrono

UNIDAD V MOTORES DE INDUCCIÓN

- 5.1.- Construcción del motor de inducción
- 5.2.- Conceptos básicos de motor de inducción
- 5.3.- Circuito equivalente del motor de inducción
- 5.4.- Par y potencia del motor de inducción
- 5.5.- Característica par-velocidad del motor de inducción
- 5.6.- Diseño de los motores de inducción
- 5.7.- Arranque de los motores de inducción
- 5.8.- Control de velocidad de motor de inducción
- 5.9.- Determinación de la impedancia del modelo equivalente.
(prueba de vacío)
- 5.10.- El generador de inducción
- 5.11.- Convertidores de frecuencia por inducción
- 5.12.- Especificaciones nominales de los motores de inducción

DESCRIPCIÓN

UNIDAD 6 MOTORES MONOFÁSICOS Y DE PROPÓSITO GENERAL

- 6.1.- El motor universal
- 6.2.- Introducción a los motores monofásicos de inducción
- 6.3.- Arranque de los motores monofásicos de inducción
- 6.4.- Control de la velocidad de los motores monofásicos de inducción

- 6.5.- Otros tipos de motores
- 6.6.- Circuito equivalente del motor monofásico de inducción

UNIDAD VII TRANSFORMADORES

- 7.1.- Tipos de transformadores
- 7.2.- Teoría de operación de los transformadores monofásicos
- 7.3.- Circuito equivalente del transformador
- 7.4.- Sistemas por unidad
- 7.5.- Regulación de tensión y rendimiento del transformador
- 7.6.- Transformadores con derivación y reguladores de tensión
- 7.7.- Autotransformador
- 7.8.- Transformadores trifásicos
- 7.9.- Especificaciones nominales de los transformadores

OBJETIVO

Proporcionar a los alumnos que cursan la carrera de Ingeniería en Control y Automatización, los conocimientos necesarios relacionados con el diseño, operación, mantenimiento y aplicación de las máquinas eléctricas giratorias, así como los principios de uso, construcción y aplicación del transformador.

UNIDAD I PRINCIPIOS GENERALES DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

1.1 LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y LOS TRANSFORMADORES

Las máquinas eléctricas que se instalan en los sectores residencial, comercial, industrial, agropecuario y servicios, son de muy variadas características, sin embargo conforme a la función que deben realizar, pueden reducirse a cuatro clasificaciones que son:

- 1.- Generadores, los cuales transforman la energía mecánica en eléctrica.
- 2.- Motores, los que transforman la energía eléctrica en mecánica.
- 3.- Onduladores, los que transforman la corriente continua en alterna; o rectificadores, los que transforman la corriente alterna en continua.
- 4.- Los que transforman la corriente alterna de ciertas características en otra corriente alterna de características diferentes; entre las cuales se tienen a:
 - a) Transformadores, los cuales transforman un sistema de corriente alterna, con la misma frecuencia pero con valores diferentes en tensión y corriente.
 - b) Convertidores de frecuencia, los cuales transforman la corriente alterna con una frecuencia determinada, en otra corriente alterna con distinto valor de frecuencia.
 - c) Convertidores de fase, los cuales transforman una corriente alterna con un número determinado de fases a otro sistema con un número diferente de fases, pero con la misma frecuencia.

1.2 LOS SISTEMAS ROTACIONALES

Las máquinas eléctricas pueden ser giratorias o estáticas. Del punto de vista mecánico, se considera que una máquina debe tener partes en movimiento, con lo cual solamente podemos hacer referencia a las máquinas giratorias, tales como: Los generadores, los motores, algunos tipos de rectificadores y onduladores, los convertidores de frecuencia y de fase.

Las máquinas estáticas son los transformadores, para que en ellos se lleve la inducción de una tensión y corriente de un devanado a otro, éste se debe alimentar con una tensión alterna la cual origina un campo magnético alterno que enlaza magnéticamente los dos devanados a través de un núcleo común, por lo tanto existe un movimiento relativo entre bobinas (parte fija) y flujo magnético (parte giratoria) induciendo conforme a la ley de inducción de Faraday una fuerza electromotriz de un devanado con respecto al otro. Motivo por el cual al transformador se le conoce como MÁQUINA ESTÁTICA.

En todas las máquinas giratorias siempre se tendrá una parte fija que le llamamos ESTATOR, y una parte móvil denominada ROTOR. Todas las máquinas eléctricas se basan en los fenómenos que se originan entre corriente eléctrica y campo magnético; es decir, todas las máquinas eléctricas son electromagnéticas.

En la máquina eléctrica se tendrá una corriente de excitación, la cual origina un campo magnético inductor, el cual a su vez origina una nueva corriente eléctrica inducida. Esta corriente será cedida por la máquina al circuito exterior cuando está funcionando como generador o, será absorbida de la red eléctrica, para su posterior transformación en energía mecánica cuando funciona como motor.

En resumen, desde el punto de vista mecánico la máquina eléctrica consta de:

ESTATOR	parte fija de la máquina
ROTOR	parte giratoria de la máquina

Desde el punto de vista eléctrico, la máquina eléctrica consta de:

INDUCTOR	Se origina el campo magnético inductor
INDUCIDO	En el cual se origina una corriente eléctrica inducida, o la parte de la máquina en la cual se efectúa la conversión de energía eléctrica a mecánica ó de mecánica a eléctrica

En una máquina de corriente continua el inductor es fijo y el inducido es giratorio, y la tensión se extrae o se aplica a la máquina a través del conmutador dependiendo si ella opera como generador o motor.

En las máquinas de corriente alterna generalmente el inducido es fijo y el inductor es giratorio, pero se pueden tener maquinas de C.A. con inducido giratorio e

inductor fijo, en este caso para extraer o introducir la tensión, la máquina esta provista de un colector de anillos rosantes.

1.3 EL CAMPO MAGNÉTICO

El estudio de los fenómenos magnéticos se inicio con el descubrimiento de un mineral de hierro al que se le llamo MAGNETITA; este mineral también se conoce con los nombres de óxido ferroso ferrico ($\text{Fe}_3 \text{O}_4$), pirita o imán natural. La propiedad de este material es la de atraer el hierro y en ciertas regiones del imán el efecto es más intenso, por lo que a estas regiones se les llamo POLOS del imán.

Si el imán se suspende en el aire con un hilo, este siempre adquiere una dirección definida, aproximadamente la del norte-sur; con lo cual a la región del imán que apunta al norte terrestre se le llama POLO NORTE y al otro extremo POLO SUR.

Además de la propiedad anterior se tiene que los polos de un imán ejercen fuerzas de atracción o repulsión sobre los polos de otros imanes, rigiéndose esa fuerza por la siguiente ley: “polos magnéticos iguales se repelen y polos diferentes se atraen”. El espectro magnético de un imán o de un polo, se representa por líneas magnéticas y su sentido lo determina el polo norte de una brújula, lo cual equivale a decir, que las líneas magnéticas salen del polo norte del imán y entran en el polo sur de él; estableciéndose con ello líneas cerradas.

El Físico Hans Christian Oesterd descubre que alrededor de un conductor rectilíneo por el que circula una corriente eléctrica, en su entorno se producen fenómenos de origen magnético estableciéndose un espectro de líneas magnéticas concéntricas circulares. Las investigaciones efectuadas por este descubrimiento originan que mediante el uso del electromagnetismo el hombre ha desarrollado métodos que le permiten transformar y transportar grandes cantidades de energía con una gran eficiencia.

Con relación a lo expuesto anteriormente el campo magnético se define como: “La porción del espacio en donde se producen fenómenos de origen magnético. Al campo magnético se le atribuyen las propiedades necesarias para que se originen los fenómenos magnéticos.

Para el estudio cuantitativo del campo magnético, a cada uno de sus puntos se le asocia una cantidad vectorial llamada “inducción magnética”, o “densidad de flujomagnético”. La ecuación matemática con la cual se puede determinar su

magnitud en un solenoide, o electroimán por el cual circula una corriente eléctrica es:

$$\beta = \mu (NI / L) \quad 1.1$$

de donde:

β = Densidad de flujo magnético

N = Número de espiras del solenoide

I = Corriente eléctrica que circula por el solenoide en Amper

L = Longitud del solenoide en metros

μ = Coeficiente de proporcionalidad el cual que recibe el nombre de permeabilidad magnética y se determina por:

$$\mu = \mu_o \mu_r \quad 1.2$$

μ_o = Es un valor constante y representa la permeabilidad magnética del vacío o aire.

μ_r = Es la permeabilidad magnética relativa y es una cantidad abstracta y sus características dependen del medio. Es decir si el medio es el vacío (o aire), su magnitud es de 1; si el medio es un material magnético su magnitud depende de las características del material.

La densidad de flujo magnético o inducción magnética se define como: “El número de líneas magnéticas que atraviesan la unidad de área. Algebraicamente se puede determinar por la ecuación:

$$\beta = (\phi / A) \quad 1.3$$

de donde:

β = Densidad de flujo magnético expresado en Gauss, o Teslas

ϕ = Flujo magnético expresado en Maxwell (líneas magnéticas) o Weber.

A = Sección transversal del núcleo expresado en cm^2 , o m^2

El uso de las unidades anteriores depende del sistema de unidades que se utilice. En nuestro caso siempre utilizaremos el sistema de unidades internacional (mks). Otro concepto que se usa en el campo magnético es el llamado “intensidad

de campo magnético” (excitación magnética), la cual queda determinada por la siguiente igualdad:

$$H = (NI / L) \quad 1.4$$

de donde:

H = Intensidad de campo magnético (excitación magnética)

N = Número de espiras que tenga la bobina o solenoide

I = Corriente eléctrica que circula por la bobina o solenoide

L = Longitud de la bobina o solenoide

Con respecto a lo anterior, la densidad de flujo magnético también se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$\beta = \mu H \quad 1.5$$

Al producto de NI se conoce como fuerza magnetomotriz (fmm) y sus unidades son el Amper – vuelta (AV), o Amper – espiras (AE) y se representa por medio de la siguiente igualdad:

$$\mathfrak{F} = NI \quad 1.6$$

de la ecuación 1.3 se despeja el flujo magnético y al sustituir en ella la ecuación 1.1, se obtiene:

$$\phi = \mu A(NI / L) = (NI) / \mathfrak{R}$$

de donde $\mathfrak{R}$ nos representa la reluctancia, cuyas unidades son el Mho y algebraicamente se representa por:

$$\mathfrak{R} = L / (\mu A) \quad 1.7$$

finalmente también se puede representar por:

$$\phi = \mathfrak{F} / \mathfrak{R} \quad 1.8$$

La ecuación 1.8 nos representa la ley de Ohm para el circuito magnético.

En la tabla No. 1, se representan las unidades magnéticas más utilizadas en los sistemas de unidades C.G.S. y M.K.S.

TABLA No. 1

DESCRIPCIÓN	SISTEMA DE UNIDADES (CGS)	SISTEMA DE UNIDADES (MKS)	RELACIÓN
FLUJO MAGNÉTICO (ϕ)	MAXWELL (Mx), O LÍNEAS	WEBER (Wb)	$1\text{Wb} = 10^8 \text{ Mx}$
DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO (β)	GAUSS (Mx / cm ²)	TESLA (Wb / m ²)	$1\text{Tesla} = 10^4 \text{ Gauss}$
FUERZAMAGNETO MOTRIZ ($\mathfrak{F}$)	GILGER	AMPER – ESPIRA (A-E)	$1\text{GILBER} = 0.79577 \text{ A-E}$
INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO (H)	OERTED (GILBER / cm ²)	(A-E) / m	$1\text{OERTED} = 79.577 \text{ A-E}$
PERMEABILIDAD MAGNÉTICA (μ)	GAUSS / OERSTED	Wb / (A-E) m	$\mu = \mu_0 \mu_r$
RELUCTANCIA ($\mathfrak{R}$)	GILBER / MAXWELL (OHMS MAGNÉTICOS)	(A-E) / Wb	NO HAY RELACIÓN

1.4 PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN NÚCLEOS FERROMAGNÉTICOS

Conforme a las propiedades magnéticas podemos clasificar a los materiales en tres grupos:

- 1) MATERIALES FERROMAGNÉTICOS, son aquellos que tienen una permeabilidad magnética mayor que la del vacío ($\mu > 1$) y de magnitud variable la cual esta en función de la densidad de flujo magnético; Tales como el hierro, níquel, cobalto y algunas aleaciones.
- 2) MATERIALES DIAMAGNÉTICOS, tiene una permeabilidad magnética ligeramente menor que la del vacío. En estos materiales la intensidad de la magnetización es negativa.
- 3) MATERIALES PARAMAGNÉTICOS, tienen una permeabilidad magnética constante y ligeramente mayor que la del vacío. En estos materiales la intensidad de magnetización es positiva.

Para cada material ferromagnético existe una temperatura, a la cual se le llama “Punto de Curie”, con la cual el material pierde sus propiedades y se comporta como un material paramagnético.

Otra característica muy particular de los materiales ferromagnéticos es la de HISTÉRESIS, esta propiedad se caracteriza por que los materiales presentan oposición al cambio de la densidad de flujo magnético. Las curvas de la Figura No. 1.2 se conocen como LAZOS DE HISTÉRESIS y nos representan el comportamiento de un material ferromagnético originalmente desmagnetizado y el cual se excita con corriente directa y corriente alterna a las frecuencias de 50 y 60 Hertz.

Todos los materiales ferromagnéticos al aplicarles una excitación magnética (H) adquieren una inducción magnética (β) y al desaparecer la excitación, el material conserva una cierta inducción magnética (β_r), a la cual se le llama “MAGNETISMO REMANENTE”.

El fenómeno Histéresis representa una desventaja, ya que producen pérdidas de energía a las que se conocen como PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS; la energía de estas pérdidas se transforman en calor el cual se debe eliminar de la máquina para reducir el deterioro de los materiales aislantes que contenga. Conforme al lazo de Histéresis el área dentro de la curva es proporcional a las pérdidas de energía por ciclo.

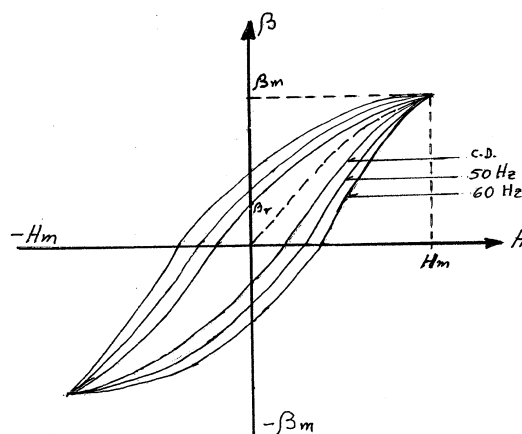


FIGURA No. 1.2 LAZOS DE HISTÉRESIS

Otras pérdidas de energía son las que se presentan en el material del cual esta hecho el núcleo y son las originadas por las corrientes secundarias que se establecen en los componentes del circuito magnético que están sometidos a un flujo magnético alterno. A estas pérdidas de energía se les llama como, PERDIDAS POR CORRIENTE DE EDDY, o Pérdidas por corrientes parásitas, o Pérdidas por corrientes de Foucault.

Para reducir considerablemente las pérdidas por corrientes Eddy, el núcleo de las máquinas se fabrican de láminas delgadas aisladas una de otra con una capa de material aislante. Estas pérdidas son aproximadamente proporcionales al cuadrado del espesor de las láminas el cual varía desde 0,0127 hasta 0,36 mm en la mayoría de las máquinas eléctricas. La proporción del volumen real ocupado por el material magnético, con respecto al volumen total del núcleo se conoce como “FACTOR DE APILAMIENTO”.

1.5 LEY DE FARADAY

Faraday realizó un importante experimento, que sirvió como base para el desarrollo actual de las máquinas eléctricas. El experimento consiste en colocar en las puntas terminales de un solenoide (bobina) de “N” espiras un galvanómetro con cero al centro y se introduce un imán en el interior de la bobina observándose una desviación en el galvanómetro de su posición de equilibrio y en sentido contrario cuando el imán se saca con la misma rapidez.

Si observamos los movimientos de la aguja del galvanómetro cuando el imán permanece inmóvil en el interior o en el exterior de la bobina, la aguja también permanece inmóvil. Con relación al fenómeno presentado anteriormente Faraday dedujo lo siguiente:

- a) Cuando el imán se desplaza en el interior de la bobina se induce en ella una corriente eléctrica.
- b) La corriente eléctrica que se establece tiene una dirección contraria cuando el imán se retira del interior de la bobina.

La causa del establecimiento de la corriente inducida en la bobina, es que esta ha sido sometida a la acción de un campo magnético variable. En resumen de las observaciones anteriores podemos decir que, cuando varía la intensidad del campo magnético en cuyo interior se tiene un circuito cerrado, circulará en éste una

corriente inducida cuyo sentido variará según sea la variación del campo magnético inductor.

Cuando se produce el fenómeno anterior se dice que entre el circuito inductor e inducido existe un acoplamiento magnético. Finalmente con el experimento de Faraday se establece una ecuación con la cual se determina la fuerza electromotriz inducida (fem) en una bobina o conductor rectilíneo

$$\mathbf{e} = -N \frac{d\phi}{d\tau}$$

Por lo tanto la tensión inducida (fem) depende de la rapidez con la cual se verifica la variación de la intensidad de corriente e inductancia de la bobina (L), esta última se determina por la siguiente igualdad:

$$L = N \frac{\phi}{I} \qquad 1.13$$

UNIDAD II FUNDAMENTOS DE LAS MAQUINAS DE C.A.

2.1 EL CAMPO MAGNÉTICO GIRATORIO.

Uno de los fundamentos de operación de las máquinas de c.a., es que si por los devanados de la armadura circula una corriente trifásica de igual magnitud y desfasadas 120° , se producirá un campo magnético giratorio de magnitud constante. Las tres fases del devanado de la armadura deben estar separadas 120 grados eléctricos.

Se puede generar un campo magnético resultante giratorio y constante que gire a velocidad síncrona mediante cualquier grupo polifásico de devanados que estén desplazados en el espacio sobre una armadura, si la corriente que pasa por los devanados también está desplazada en el espacio.

Por ejemplo, si un devanado bifásico esta desplazado físicamente 90° en un estator, se producirá un campo magnético rotatorio constante porque las corrientes de fase también están desplazadas en el tiempo. Por lo tanto todos los generadores trifásicos para producir un campo magnético rotatorio constante, necesitan tres devanados idénticos e individuales, desplazados 120° en la armadura y que conduzcan corrientes también desplazadas 120° en su fase o en el tiempo.

La figura 3.1a muestra el diagrama fasorial de las corrientes que pasan por la armadura del rotor trifásico en secuencia de fases ABC. En la figura 3.1b se muestra la relación grafica y variación senoidal de cada corriente para un ciclo. La figura 3.1c muestra el desplazamiento en el espacio de un devanado trifásico concentrado típico conectado en estrella. Cada grupo de costados de bobina por fase indicadas en la figura 3.1c consta de 12 costados o 6 bobinas por fase, cuyas puntas terminales con las marcas F_A , F_B , y F_C , se conectan a un punto común. La punta terminal marcadas con las letras S_A , S_B y S_C , están conectadas a la fuente de tensión trifásica. En el tiempo t_1 que se indica en la figura 3.1b, se muestra la corriente en cada bobina de cada devanado por fase en el tiempo t_1 la fase A esta en su valor máximo en una dirección, mientras que la corriente de los devanados de las fases B y C su valor es igual a 0.707 de su valor máximo en su dirección opuesta.

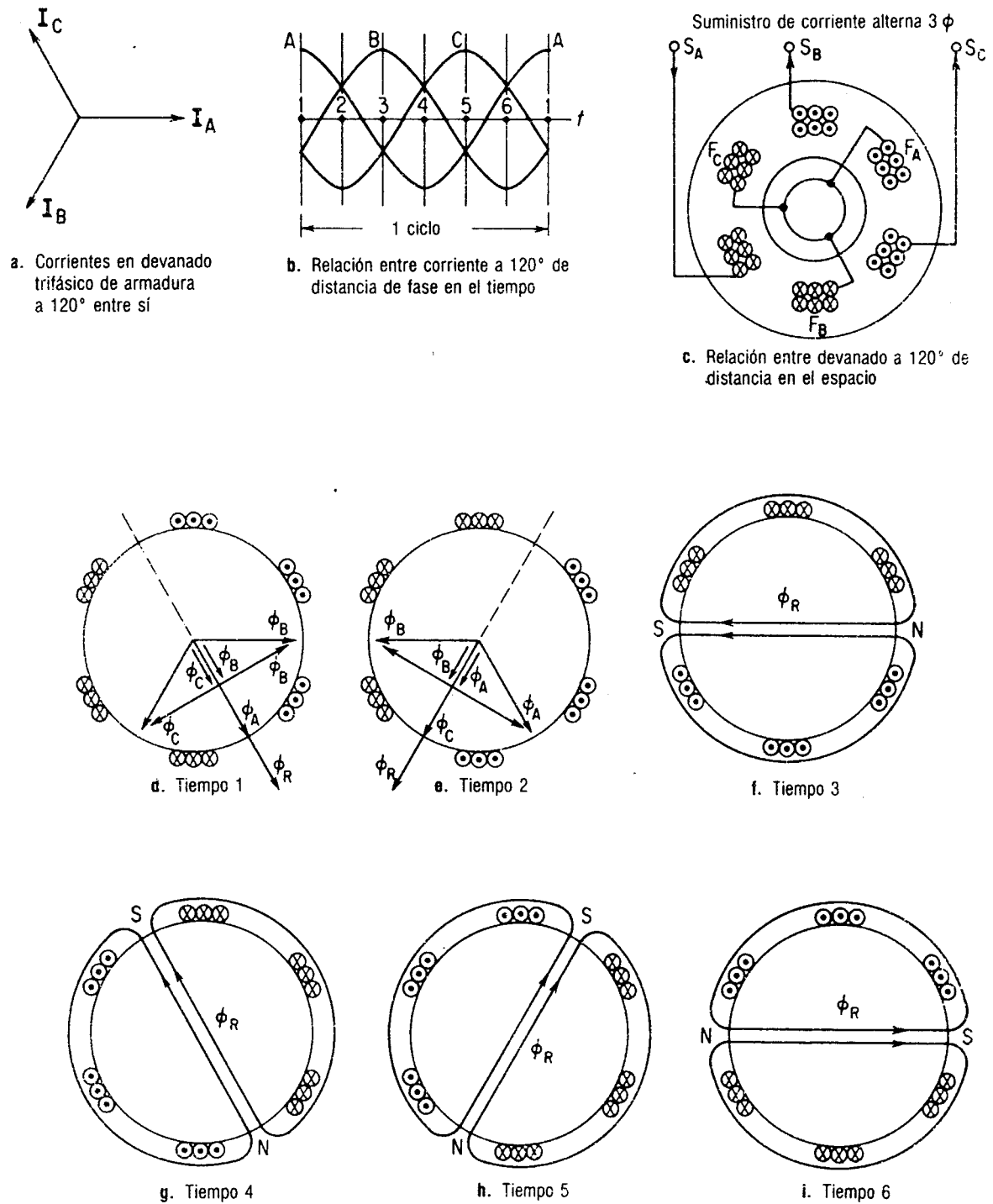


FIGURA 2.1 GENERACIÓN DE UN CAMPO MAGNETICO GIRATORIO CONSTANTE A VELOCIDAD SÍNCRONA PRODUCIDA MEDIANTE UNA TENSIÓN TRIFÁSICA.

la corriente en B y C son opuestas a la de A. Los flujos que producen esos devanados se muestran en la figura 2.1d, usando la regla de la mano derecha, los flujos de ϕ_B y ϕ_C sobre ϕ_A producen un flujo resultante ϕ_R . Si se sigue el mismo procedimiento en el tiempo t_2 , en el que la corriente de la fase B se ha invertido y es ahora igual a la fase A además tiene la misma dirección que ella, y ha disminuido en una magnitud de 0,707 de su valor máximo, con lo cual la fase C en el mismo tiempo adquiere su valor máximo. El flujo resultante se grafica nuevamente para cada fase y en este tiempo los flujos ϕ_A y ϕ_B producen componentes de cuadratura que se anulan entre sí y componentes en fase con el flujo ϕ_C para producir una resultante ϕ_R de la misma magnitud que había en el tiempo t_1 . Así en el tiempo t_2 , se tendrá que 60°E después del tiempo t_1 , el flujo resultante a girado 60° pero su magnitud es constante.

Si consideramos el eje del flujo ϕ_R en los instantes de tiempo t_1 y t_2 , se puede considerar a la armadura como un solenoide en el que todos los costados de bobina que se encuentran a los costados del flujo ϕ_R conducen corrientes en sentidos contrarios, tal como se muestra en las figuras 2.1g, 2.1h y 2.1i, concluyendo lo siguiente:

1. Se produce un campo magnético único, constante y giratorio mediante un devanado monofásico, bifásico o trifásico en el estator.
2. El desplazamiento del campo magnético resultante en el espacio corresponde exactamente al desplazamiento en el tiempo de la frecuencia de suministro.

El campo magnético rotatorio que se produce y se muestra en la figura 2.1 ocasiona una rotación en el sentido de las manecillas de un reloj cuando la secuencia de fases de un sistema trifásico sea ABC. Si se intercambian dos fases cualquiera en los extremos de las líneas a las bobinas de la armadura se invierte la secuencia de fases a CBA produciéndose una inversión de la dirección de giro del campo magnético. En consecuencia, la dirección de giro de cualquier motor de inducción se puede invertir simplemente invirtiendo la secuencia de fases. Intercambiando dos de las tres fase de la línea de alimentación trifásica.

2.2 TENSION INDUCIDA EN UNA MÁQUINA DE C.A.

En estas máquinas conforme a los campos magnéticos giratorios y a la ley de inducción de Faraday va a existir un movimiento relativo entre campos magnéticos y conductores induciéndose en estos últimos una fem.

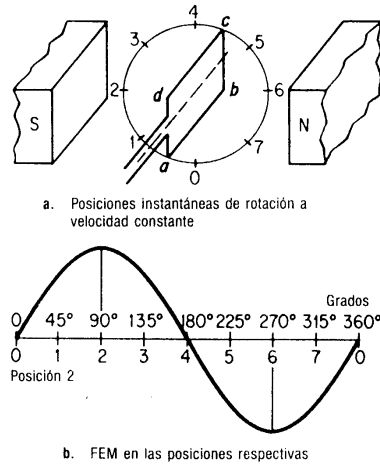


FIGURA 2.2 F.E.M. GENERADA EN UNA ESPIRA QUE SE MUEVE DENTRO DE UN CAMPO MAGNETICO UNIFORME.

Con lo cual si consideramos una espira del devanado de la máquina la cual se mueve dentro de un campo magnético uniforme cuya magnitud es “ ϕ ”, al girar la espira un ángulo “ α ” sus costados activos cortaran líneas de flujo magnético y en ese instante el flujo variara a una magnitud “ ϕ_x ” determinada por la siguiente ecuación:

$$\phi_x = \phi \cos \alpha$$

Como la velocidad de giro de la espira es uniforme se tiene que:

$$\alpha = \omega t$$

con lo cual el flujo cortado por la espira en cualquier instante de su giro queda determinado por:

$$\phi_x = \phi \cos \omega t \quad 2.1$$

Conforme a la ley de inducción de Faraday y para una espira la fem instantánea en ella queda determinada por.

$$e = -\frac{d\phi_x}{dt}$$

$$e = -\frac{d(\phi \cos \omega t)}{dt} = -\phi(-\omega \sin \omega t)$$

$$e = \omega \phi \sin \omega t$$

de donde ω nos representa la velocidad angular y queda determinada por:

$$\omega = 2\pi f$$

con lo cual la f.e.m. inducida instantánea en una espira queda determinada por:

$$e_{\text{instantánea}} = 2\pi f \phi \sin \omega t \quad 2.2$$

De la ecuación anterior se observa que la fem inducida tiene una forma senoidal y esta en cada medio ciclo adquiere 4 valores que son el valor instantáneo, el valor máximo, el valor medio y el valor eficaz. El valor máximo se obtiene cuando el ángulo $\omega t = 90^\circ$ y se determina con la siguiente ecuación.

$$\mathcal{E}_{\text{Máxima}} = 2\pi f \phi.$$

El valor medio el cual esta en función del valor máximo y de la magnitud que nos registra un instrumento de c.c. se determina con la siguiente ecuación.

$$\mathcal{E}_{\text{medio}} = \frac{2}{\pi} \mathcal{E}_{\text{max}}$$

El Valor eficaz el cual esta también en función del valor máximo, es la magnitud que registra un instrumento de c.a. y se determina por la siguiente ecuación.

$$\mathcal{E}_{\text{eficaz}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathcal{E}_{\text{max}}$$

Por lo tanto en las máquinas de c.a. la fem inducida en una espira queda determinada por.

$$\mathcal{E}_{\text{espira}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (2\pi f \phi)$$

$$\mathcal{E}_{\text{espira}} = 4,44 f \phi \dots\dots\dots 2.3$$

Por lo tanto la fem inducida en un conductor y dado que una espira tiene 2 conductores activos se determina por la siguiente ecuación.

$$\mathcal{E}_{conductor} = \frac{\mathcal{E}_{espira}}{2}$$

$$\mathcal{E} = \frac{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \phi}{2} = 2 \left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}} f \phi \right)$$

De donde la relación que hay entre $\pi/2\sqrt{2}$ se conoce como factor de forma de una onda senoidal y tiene por valor 1.11, con lo cual la f.e.m. inducida en conductor queda determinada por:

$$\mathcal{E}_{conductor} = 2,22\phi f. \quad 2.4$$

Las maquinas de c.a. están formadas por bobinas y cada bobina tiene “N” espiras y cada espira tiene “Z” conductores y en máquinas trifásicas los cálculos se tienen que efectuar por fase, las espiras y conductores también debe ser por fase y la f.e.m. por fase que se inducen inducida en vacío (Eof) en las puntas terminales de la máquina se determina por las siguientes ecuaciones:

En el sistema de unidades MKS el flujo magnético ϕ se expresa en Weber.

$$E_{of} = 4,44N_f \phi f \quad 2.5$$

$$E_{of} = 2,22Z_f \phi f \quad 2.6$$

En el sistema de unidades CGS el flujo magnético – ϕ se expresa en Maxwell, o líneas de fuerza magnética.

$$E_{of} = 4,44N_f \phi f \times 10^{-8} \quad 2.7$$

$$E_{of} = 2,22Z_f \phi f \times 10^{-8} \quad 2.8$$

De donde:

N_f = Espira por fase.

Z_f = Conductores por fase.

N = Espiras totales en el devanado de la máquina

Z = Conductores totales en el devanado de la máquina.

El número de espiras por fase y conductores por fase se determinan mediante las siguientes igualdades:

$$N_f = \frac{N}{\text{No. de fases}}$$

$$Z_f = \frac{Z}{\text{No. de fases}}$$

En una máquina ya construidas las espiras y los conductores así como la velocidad de giro de ella debe ser constante por lo tanto la f.e.m. inducida queda determinada por la siguiente ecuación.

$$E_0 = 4,44 N_f \left[\frac{p}{2} \left(\frac{rpm}{60} \right) \right] \phi$$

$$K = \frac{4,44 N_f p}{2 \times 60}$$

$$E_0 = K \phi (rpm) \dots\dots\dots 2.9$$

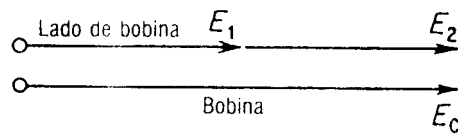
Las ecuaciones anteriores no son del todo completas ya que en ellas intervienen otros factores los cuales varían la magnitud de la tensión y la calidad de la forma de onda generada. Los factores que afectan la magnitud de dichas ecuaciones son los siguientes:

- 1 Distribución de flujo en el entrehierro.
- 2 Factor de forma de la onda.
- 3 Efecto de las armónicas.
- 4 Factor de paso del devanado.
- 5 Factor de distribución del devanado.

2.3 EFECTO DEL PASO DE BOBINA EN ESTADORES DE MÁQUINAS DE C.A.

Las ecuaciones anteriores se ven afectadas por 5 factores cuya magnitud depende del tipo de devanado que se tenga en la maquina ya que los devanados pueden ser de paso completo (paso entero) o de paso fraccionario. El paso fraccionario puede ser acortado o alargado y como en ambos casos el efecto es el mismo se utilizan siempre devanados de paso acortado debido a que se utiliza menor cantidad de cobre.

En el caso de la máquina de c.a. que usa una bobina de paso completo, los dos costados de bobina abarcan una distancia exactamente igual al paso polar de 180 grados eléctricos ($180^\circ E$). Como consecuencia la f.e.m. inducida en una bobina de paso completo son tales que la f.e.m. de los costados de bobina están en fase, como se muestra en la figura 2.3.



a. Bobina de paso completo

FIGURA 2.3 F.E.M. TOTAL EN UNA BOBINA DE PASO ENTERO

El factor de paso del devanado independientemente que sea entero o fraccionario se representa por la letra k_p , con lo cual en una bobina de paso completo tiene por valor la unidad ($k_p = 1$) y la tensión total de la bobina es la suma de la f.e.m. inducida en cada costado de ella, es decir

$$E_1 = E_2 = \text{f.e.m. inducida en cada costado de bobina}$$

$$E_C = 2E_1$$

En el caso del devanado fraccionario el paso de bobina es menor al paso polar de $180^\circ E$, con lo cual la f.e.m. inducida en cada costado de bobina no está en fase, tal

como se muestra en la figura 2.4, y la tensión resultante E_c sería menor que la suma aritmética de las tensiones inducidas en cada costado de bobina. Con relación a lo anterior la tensión total resultante debe ser la suma fasorial de las tensiones de cada costado de bobina; con lo cual el factor de paso del devanado toma un valor menor que uno ($k_p < 1$) con lo cual el factor de paso se queda determinado por:

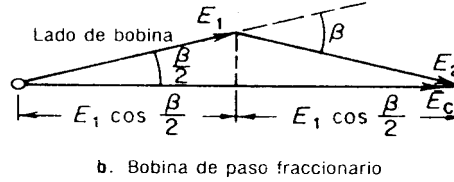


FIGURA 2.4 F.E.M. TOTAL EN UNA BOBINA DE PASO FRACIONARIO

$$k_p = \frac{E_c}{2E_1} = \frac{\text{Suma fasorial de los costados de bobina}}{\text{Suma aritmética de los dos costados de bobina}}$$

$$k_p = \cos \frac{\beta}{2} \quad 2.10$$

Otra forma de obtener el valor del factor de forma es considerando la siguiente ecuación:

$$k_p = \sin \frac{\rho^\circ}{2} \quad 2.11$$

de donde ρ° representa los grados eléctricos que abarca la bobina y β es el ángulo suplementario de, por lo que:

$$\beta = 180^\circ - \rho^\circ$$

$$\rho^\circ = \frac{\text{Paso de bobina en ranuras}}{\text{Ranuras/Polo}} 180^\circ$$

Generalmente el paso de bobina se expresa como fracción, con lo cual el factor de paso del devanado se puede determinar con:

$$k_p = \cos \frac{180^\circ E(1 - \ell)}{2} \quad 2.12$$

de donde ℓ es el paso de bobina expresado como fracción.

En general en las máquinas eléctricas se utilizan grados eléctricos en vez de los grados geométricos que se tienen cuando la espira da un giro completo de 360° ; por lo tanto, los grados geométricos ($^\circ G$) se pueden transformar en grados eléctricos ($^\circ E$) mediante la siguiente igualdad:

$$^\circ E = \frac{p}{2} ^\circ G$$

donde

p Es el número total de polos que tenga la máquina, siempre es par y entero.

$^\circ G$ es el número de grados geométricos de rotación de la espira

La magnitud que se determina con las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12, será siempre el mismo valor independientemente de cualquier ecuación que se use.

2.4 DEVANADO DISTRIBUIDO EN MÁQUINAS DE C.A.

Los devanados que puede tener una máquina eléctrica con relación a las ranuras que utiliza son:

a) **Devanado concentrado**, se llama así debido a que todos los costados de bobina de una fase dada están concentrados en una sola ranura bajo la influencia de un polo determinado. Para determinar la f.e.m. inducida por cada fase, se obtiene multiplicando la tensión inducida en cualquier bobina por el número de bobinas conectadas en serie por fase; porque los conductores activos de cada

costado de bobina situados en la misma ranura quedan en la misma posición con respecto a los polos N y S. Estos devanados no se usan comercialmente debido a que tienen las siguientes desventajas:

- 1 No usan completamente la periferia interior de hierro del estator en forma eficiente.
- 2 Se requiere usar ranuras extremadamente profundas en los cuales se concentra el devanado, aumentándose con ello la reluctancia.
- 3 Con las ranuras profundas se aumenta también el flujo de dispersión.
- 4 Originan bajas relaciones de cobre a hierro debido a que no se usa completamente el hierro de la armadura.
- 5 No se puede reducir las armónicas en forma efectiva, como sucede en los devanados distribuidos.

Con relación a lo anterior conviene más distribuir las ranuras de la armadura y espaciamiento uniforme entre ellas, que concentrar los devanados en pocas ranuras profundas.

b) Devanado distribuido, en estos devanados las ranuras se reparten alrededor de la armadura en forma uniforme y se tienen más de una ranura por polo y fase las cuales se encuentran una a continuación de la otra, con lo cual la tensión inducida de cada una de las bobinas por fase será desplazadas en el mismo grado según sea la distribución de las ranuras, y la tensión total inducida en cualquier fase será la suma fasorial de las tensiones inducidas en cada bobina individualmente.

Si consideramos un devanado distribuido con cuatro ranuras por polo y fase, las cuatro tensiones de los costados individuales de las bobinas que se muestran en forma vectorial de la figura 2.5, desplazadas un ángulo α , el cual nos representa el número de grados eléctricos entre las ranuras adyacentes. Las tensiones inducidas en cada costado de bobina se representan por E_{c1} , E_{c2} , etc., S_{pf} nos representa el número de ranuras por polos y fase, y E_{ϕ} es la f.e.m. inducida total en vacío por fase.

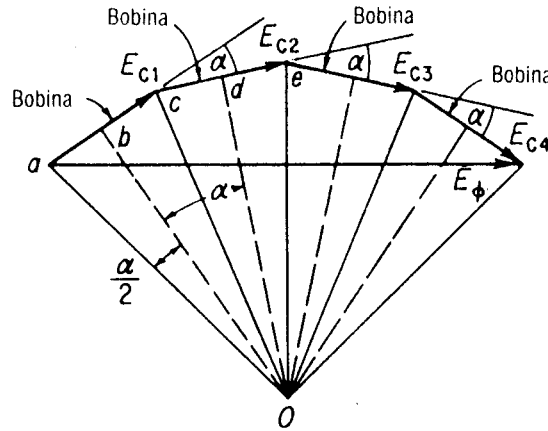


FIGURA 2.5 DIAGRAMA FASORIAL PARA DETERMINAR EL FACTOR DE DISTRIBUCIÓN.

El factor de distribución llamado también como factor de arrollamiento, se representa por la letra k_d y es el número por el cual se debe multiplicar la suma aritmética de las tensiones individuales de cada bobina para obtener la suma fasorial, es decir:

$$E_{\phi} = S_{pf} E_c (k_d)$$

$$k_d = \frac{E_{\phi}}{S_{pf} E_c} = \frac{\text{Suma fasorial de la fem de bobina por fase}}{\text{Suma aritmética de la fem de bobina por fase}}$$

Con relación a la figura 2.4 en la cual se han trazado perpendiculares al centro de cada uno de los fasores de las tensiones de cada costado de bobina a un centro común "0" a partir del cual nos representa el radio, empleando líneas discontinuas, sirve para indicar que $\alpha/2$ es el ángulo $b0a$, de donde se obtiene:

$$ab = 0a \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$E_{c1} = 2(0a \sin \frac{\alpha}{2})$$

Para las cuatro bobinas se tiene que:

$$E_{\phi} = 2 \left(0.866 \frac{S_{pf} \alpha}{2} \right)$$

con respecto a lo anterior, el factor de distribución del devanado k_d se determina por:

$$k_d = \frac{E_{\phi}}{S_{pf} E_c} = \frac{20.866 \frac{S_{pf} \alpha}{2}}{S_{pf} 20.866 \frac{\alpha}{2}} = \frac{\text{sen} \left(\frac{S_{pf} \alpha}{2} \right)}{S_{pf} \text{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \quad 3.13$$

de donde

$$S_{pf} = \frac{\text{Ranuras totales}}{\text{Polos} \times \text{No. de fases}}$$

$$\alpha = \frac{180^\circ E}{\text{Ranuras/Polo}}$$

El factor de distribución para cualquier número de fases es función única del número de ranuras distribuidas bajo un polo dado. A medida que aumenta la distribución de bobinas o ranuras por polo, disminuye el valor del factor de distribución. Este no se afecta a causa del tipo de devanado, ya que este puede ser imbricado u ondulado, o por el número de espiras por bobina, etc.

Conforme al factor de paso del devanado y al factor de distribución las ecuaciones definitivas con las cuales se determina la f.e.m. inducida en vacío por fase en las puntas terminales de la máquina, quedan como:

En el sistema de unidades MKS el flujo magnético ϕ se expresa en Weber.

$$E_{\phi} = 4.44 N_f \phi f k_p k_d \quad 2.14$$

$$E_{\phi} = 2.22 Z_f \phi f k_p k_d \quad 2.15$$

En el sistema de unidades CGS el flujo magnético – ϕ se expresa en Maxwell, o líneas de fuerza magnética.

$$E_{\phi} = 4,44 N_f \phi f k_p k_d \times 10^{-8} \quad 2.16$$

$$E_{\phi} = 2,22 Z_f \phi f k_p k_d \times 10^{-8} \quad 2.17$$

2.4 PAR PRODUCIDO EN UNA MÁQUINA DE CORRIENTE ALTERNA

En una máquina de c.a. bajo condiciones de operación normal, tiene dos campos magnéticos, uno de los cuales es producido por el circuito del rotor y el otro es producido por el circuito del estator. La interacción de estos dos campos magnéticos produce un par interno de la máquina.

En la figura 2.6, se tiene que el rotor produce una densidad de flujo magnético B_R , y la corriente del estator produce una densidad de flujo magnético B_s , con lo cual el par producido en una máquina síncrona que contiene estos dos campos magnéticos, se puede expresar por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{int} = k B_R B_s \quad 2.18$$

$$\tau_{int} = k B_R B_s \sin \gamma \quad 2.19$$

De donde

τ_{int} = par producido en la máquina

B_R = densidad de flujo en el rotor

B_s = densidad de flujo en el estator

γ = ángulo entre B_R y B_s

El término “k” es una constante que depende del sistema de unidades que se utilice para expresar la magnitud de B_R y B_s . Estas ecuaciones se usan únicamente para un análisis cualitativo del par de una máquina de c.a., por lo tanto, el valor de “k” carece de importancia para nuestro propósito.

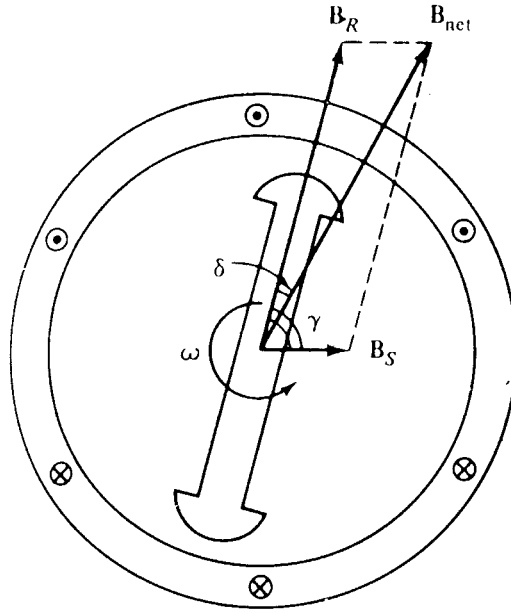


FIGURA 2.6 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS DEL ESTATOR Y ROTOR DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA

Conforme al diagrama vectorial que se indica en la figura 2.6, el campo magnético neto en la máquina es la suma vectorial de los campos del estator y rotor; es decir:

$$B_{net} = B_R + B_S$$

y

$$B_S = B_{net} - B_R$$

Al sustituir esta última igualdad en la ecuación 2.18 se obtiene una expresión equivalente y a veces más útil para determinar el par producido en la máquina, quedando representado por:

$$\begin{aligned}\tau_{int} &= k B_R (B_{net} - B_R) \\ \tau_{int} &= k B_R B_{net} - k B_R B_R\end{aligned}$$

como el producto vectorial de un vector por sí mismo es igual a cero, ésta expresión se reduce a:

$$\tau_{int} = k B_R B_{net} \quad 2.20$$

De tal manera que el par producido en la máquina se puede expresar como el producto vectorial entre B_R y B_{net} , y considerando la misma constante k el par también se puede expresar como:

$$\tau_{int} = k B_R B_{net} \sin \delta \quad 2.21$$

Donde δ es el ángulo que hay entre B_R y B_{net} .

2.4 FLUJOS DE POTENCIA Y PÉRDIDAS EN LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA.

El diagrama de flujos de potencia es una herramienta útil para el análisis de las máquinas de c.a., en las siguientes figuras se muestran los diagramas combinados del flujo de potencia de una máquina trifásica trabajando como generador o motor. En la figura 2.7, se muestra en el lado izquierdo del diagrama la potencia mecánica y en el lado derecho la potencia eléctrica cuando la máquina funciona como generador; y en la figura 2.8, se muestra en el lado izquierdo la potencia eléctrica y en el lado derecho la potencia mecánica cuando funciona como motor

a) Flujo de potencia en un generador

Si se aplica potencia mecánica al eje de un generador (P_{ent}) para impulsarlo en forma mecánica, mantiene ciertas pérdidas rotacionales. La diferencia entre dichas pérdidas rotacionales y la potencia mecánica de entrada representa la potencia mecánica neta que se convierte en potencia eléctrica (P_{sal}) mediante la conversión electromecánica. Pero el generador también tiene pérdidas eléctricas internas, que se restan de la potencia eléctrica que se desarrolla. Por lo tanto, la potencia eléctrica neta es la potencia de salida más las pérdidas eléctricas.

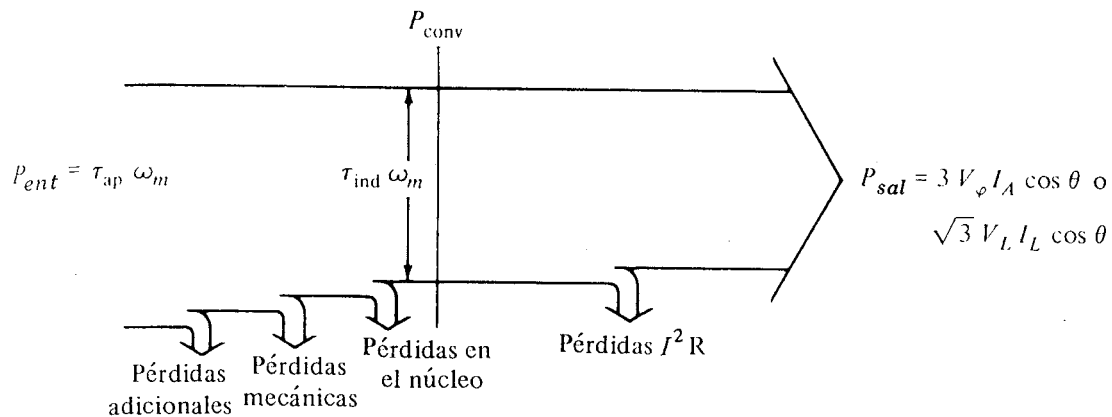


FIGURA 2.7 DIAGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA DE UN GENERADOR DE C.A.

En resumen, tal como se muestra en la figura 2.7, para un generador o como alternador se tiene que:

$$\text{Salida de potencia eléctrica} = \text{Entrada de potencia mecánica} - (\text{Pérdidas rotacionales} + \text{Pérdidas eléctricas})$$

$$\text{Potencia eléctrica desarrollada} = \text{Entrada de potencia mecánica} - \text{Pérdidas rotacionales}$$

$$\text{Potencia eléctrica desarrollada} = \text{Potencia eléctrica de salida} + \text{perdidas eléctricas}$$

b) Flujo de potencia en un motor

La potencia eléctrica que se aplica a las terminales de un motor se reduce inmediatamente debido a determinadas pérdidas eléctricas dentro del motor. La diferencia aparece como potencia eléctrica interna ($E_c I_a$), que se convierte en potencia mecánica por conversión electromecánica. La potencia mecánica disponible que ha producido el par motor interno contiene algunas pérdidas mecánicas internas. La diferencia entre pérdidas mecánicas y la potencia mecánica que se produce como resultado de la conversión electromagnética es la potencia mecánica de salida.

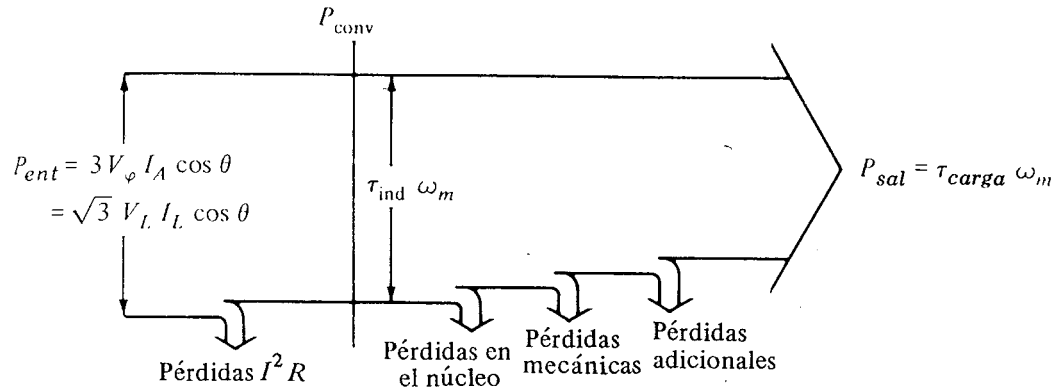


FIGURA 2.8 DIAGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA DE UN MOTOR DE C.A.

En resumen, tal como se muestra en la figura 2.8, para una máquina trabajando como motor se tiene que:

$$\text{Salida de potencia mecánica} = \text{Salida de potencia eléctrica} - (\text{Pérdidas eléctricas} + \text{Perdidas rotacionales})$$

$$\text{Potencia mecánica desarrollada} = \text{Entrada de potencia eléctrica} - \text{Pérdidas eléctricas}$$

$$\text{Potencia mecánica desarrollada} = \text{Salida de potencia mecánica} + \text{pérdidas rotacionales}$$

Con relación a lo expuesto anteriormente las pérdidas en las máquinas de c.a. de clasifican como:

1. Pérdidas en el cobre del rotor y del estator
2. pérdidas en el núcleo
3. pérdidas mecánicas
4. pérdidas adicionales

las pérdidas en el cobre de una máquina de c-a- son las pérdidas por calentamiento debidas a la resistencia de los conductores que forman el devanado del rotor y estator. Las pérdidas en el cobre del estator (W_{cu}) de una maquina trifásica de c.a. están dadas por la ecuación:

$$W_{cu} = 3R_a I_a^2$$

de donde

3 es el número de fase de la máquina

R_a es la resistencia por fase del estator

I_a es la corriente que circula por fase del estator

Las pérdidas en el cobre del rotor (W_f) de una máquina síncrona de c.a. están dadas por:

$$W_f = R_f I_f^2$$

de donde

R_f es la resistencia del devanado inductor de la máquina

I_f es la corriente que circula por el devanado inductor de la máquina

las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el núcleo de una máquina de c.a. son similares a las de una máquina de c.c.

Las pérdidas mecánicas se deben a la fricción en los rodamientos y con el aire, y las pérdidas del núcleo se deben a la Histéresis y a las corrientes parásitas. Con frecuencia estas pérdidas se toman en grupo y se llaman pérdidas de vacío o pérdidas rotacionales de la máquina. En vacío, toda la potencia que entra a la máquina se convierte en estas perdidas.

Las pérdidas adicionales son todas aquellas pérdidas que no se pueden clasificar en ninguna de las categorías descritas. Por convención, se considera que son iguales al 1% de la potencia de salida de la máquina.

La eficiencia de una máquina de c.a. es la relación que hay entre su potencia útil de salida y su potencia total de entrada.

$$\% \eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} 100$$

UNIDAD III GENERADORES SÍNCRONOS (G.S.)

3.1 ESTRUCTURA DEL GENERADOR SÍNCRONO

Las máquinas síncronas están entre los tipos más comunes de las máquinas eléctricas; se llaman así porque trabajan a velocidad constante y frecuencia constante en condiciones de operación estacionaria. Las máquinas síncronas pueden trabajar como motor o como generador.

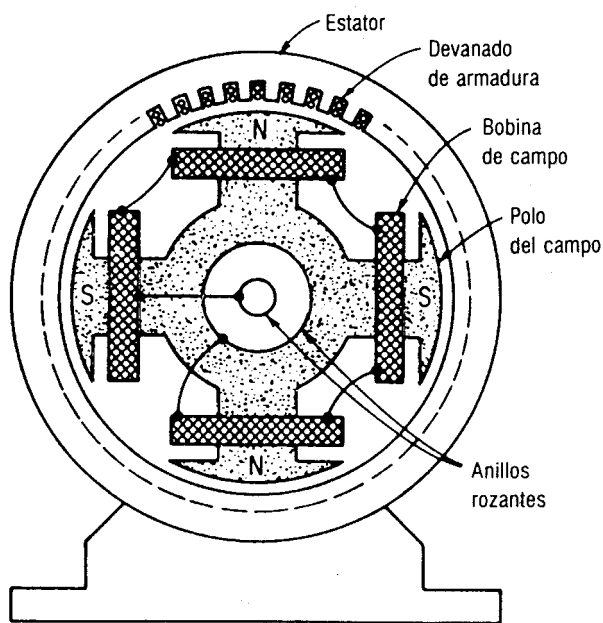
La operación de un generador síncrono se basa en la ley de Faraday de inducción electromagnética y trabaja de manera semejante a un generador de corriente continua, en el que la generación de f.e.m. se basa por medio del movimiento relativo entre conductores y un flujo magnético, además en vez de conmutador tiene un colector de anillos rozantes.

Las dos componentes básicas de un generador síncrono son la estructura del campo magnético (Inductor), que lleva un devanado excitado por una corriente continua y la armadura (Inducido) en la cual se efectúa el fenómeno de la transformación de la energía de mecánica a eléctrica induciéndose en su devanado la f.e.m. alterna. Casi todos los generadores síncronos modernos tienen armadura fija y el inductor giratorio. El devanado del inductor instalado sobre la estructura giratoria se conecta a una fuente externa llamada excitatriz la cual le proporciona la tensión y corriente continua por medio de anillos deslizantes y escobillas. Algunas estructuras del campo no tienen escobillas, sino que tienen excitación sin escobillas por medio de diodos giratorios.

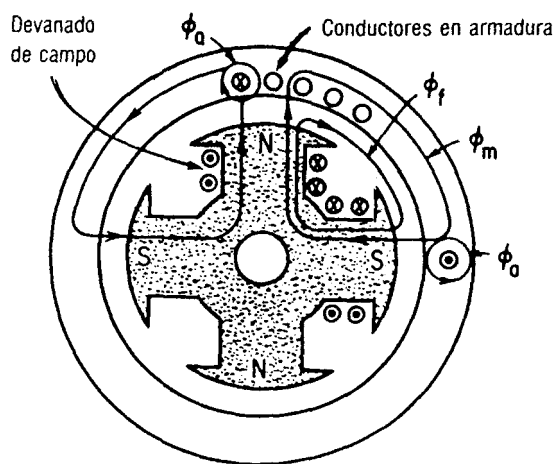
Además del devanado de armadura y del campo, una máquina síncrona tiene barras amortiguadoras en el rotor; las cuales operan durante los transitorios y en el arranque.

Esencialmente, el rotor del generador síncrono es un gran electroimán, cuyos polos magnéticos pueden ser salientes o lisos. En un rotor de polos salientes estos sobresalen de la superficie del rotor tal como se representa en la figura 3.1, el tipo de polos lisos, este es construido a ras con la superficie del rotor tal como se representa en la figura 3.2 Los rotores de polos salientes se utilizan para cuatro o más polos, para bajas velocidades y generalmente para operar verticalmente y en

plantas generadoras hidráulicas. Los rotores de polos lisos se utilizan para dos y cuatro polos, para altas velocidades y para operar horizontalmente.



(a)



(b)

FIGURA 3.1 (a) CONSTRUCCIÓN DE UN ALTERNADOR DE POLOS SALIENTES
(b) DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO EN UN ALTERNADOR DE POLOS SALIENTES

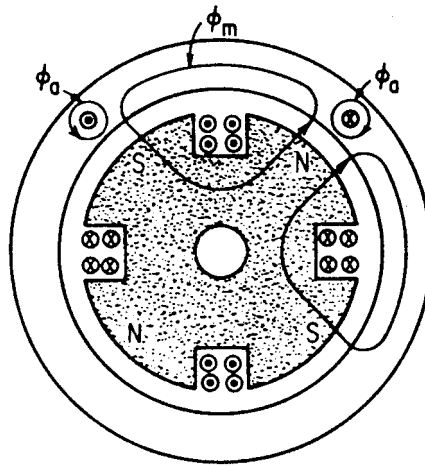


FIGURA 3.2 CONSTRUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO EN UN ALTERNADOR DE POLOS LISOS

Como el rotor está sujeto a campos magnéticos variables e independientemente de que sea de polos salientes o lisos, estos deben construirse con laminaciones para reducir las pérdidas por corriente parásitas.

Con respecto a la armadura del generador y a los devanados que tenga, estos se pueden conectar en serie o en paralelo según sean las necesidades de tensión y corriente que se deseen obtener; por lo cual, los alternadores pueden ser monofásicos o polifásicos y cada fase puede estar formada por una o más bobinas conectadas en serie o paralelo. En los alternadores trifásicos con sus devanados se puede hacer la conexión Delta o Estrella.

3.1 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO

Los alternadores síncrono comerciales de c.a. tienen muchos polos en su rotor y pueden girar a varias velocidades, ya sea como alternadores o como motores síncronos o de inducción. La ecuación con la cual se determina la f.e.m. inducida en el devanado de la armadura se deduce a partir de un dispositivo de dos polos la cual cambia de dirección cada media revolución del rotor de dos polos. Una revolución completa produce un pulso completo positivo y uno negativo por ciclo,

con lo cual la frecuencia en ciclos por segundo (Hertz) dependerá del número de revoluciones por segundo ($rpm/60$) del campo rotatorio.

Si el generador síncrono es multipolar, es decir, que tenga dos, cuatro, seis u ocho polos, entonces, para una velocidad de una revolución por segundo ($1 rpm/60$), la frecuencia por revolución es igual al número de pares de polos. Como la frecuencia depende directamente de la velocidad ($rpm/60$) y también del número de pares de polos ($p/2$), los podemos combinar en una sola ecuación la cual queda definida en la siguiente forma:

Como las máquinas síncronas tienen una velocidad de rotación que esta en rigurosa y constante rotación con la frecuencia, en ella se debe cumplir estrictamente la siguiente ecuación.

$$f = \frac{p}{2} \left(\frac{rpm}{60} \right) = \frac{p\omega}{4\pi} \quad 3.1$$

de donde:

f = frecuencia en Hertz o cps

p = Número total de polos de la máquina.

rpm = revoluciones por minuto.

ω = es la velocidad en radiales por segundo (rsd/s)

Las maquinas asíncronas también se conocen como máquinas de inducción y en ellas la velocidad de rotación a una frecuencia de la red de alimentación determinada, su velocidad únicamente depende de la carga que se le conecte al eje de la máquina; por lo tanto en estas máquinas se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$f \neq \frac{p}{2} \left(\frac{rpm}{60} \right) \quad 3.2$$

3.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR SÍNCRONO

La f.e.m. generada por fase en vacío internamente en el alternador se determina con las ecuaciones que se determinaron en el capítulo II, sin embargo esta tensión no es la que aparece en las puntas terminales del alternador cuando este opera con carga; debido a que hay varios factores que dan lugar a la diferencia entre la tensión inducida en vacío y la tensión nominal a plena carga, los cuales son:

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro causado por la corriente de la armadura, llamada reacción de armadura.
2. La autoinductancia de las bobinas que forman el devanado de la armadura.
3. La resistencia de las bobinas de la armadura.
4. El efecto de la configuración del rotor de polos salientes.

Para establecer el circuito equivalente de un alternador no se tomara en cuenta el efecto que originan los polos salientes sobre la operación de la máquina y se considerara que ella es de polos lisos. Esta consideración dará lugar a una cierta inexactitud en los resultados cuando la máquina sea de polos salientes, pero los errores son relativamente pequeños.

El primer efecto mencionado y normalmente el de mayor duración, es la reacción de inducido. Cuando gira el rotor (inductor) del alternador, se induce la tensión en vacío E_g en los devanados de la armadura, el cual da lugar a la circulación de corriente I_a cuando se le conecta una carga a las puntas terminales de la máquina, (Figura 3.3 (a) y (b)); esta corriente origina un campo magnético en la armadura el cual distorsiona el campo magnético unidireccional original del inductor, modificando la tensión por fase inducida resultante. Este efecto se conoce como reacción de armadura, debido a que la corriente de armadura afecta el campo magnético que la origina cuando la máquina opera en vacío.

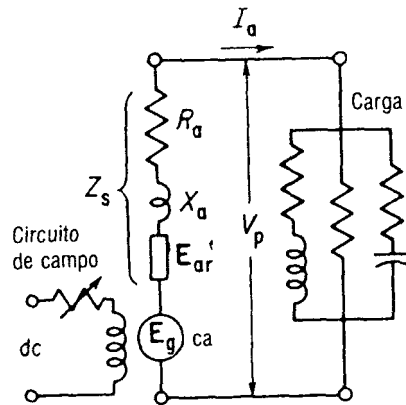
Como están presentes dos tensiones en el devanado de la armadura, la tensión resultante de una fase será la suma de la tensión E_g y la tensión de reacción de armadura E_{ar} , es decir:

$$V_p = E_g + E_{ar}$$

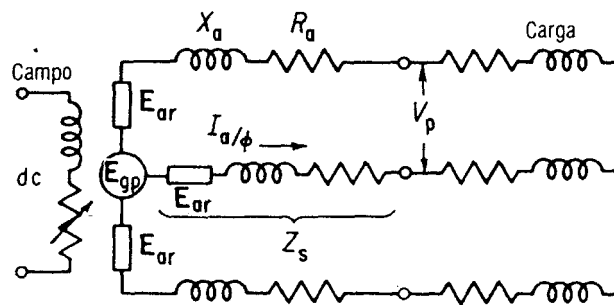
La tensión de la reacción de armadura es directamente proporcional a la corriente que circula por la armadura I_a , y además para una carga inductiva atrasa 90° con respecto a dicha corriente, entonces la tensión de la reacción de armadura puede expresarse como:

$$E_{ar} = -jXI_a$$

Por consiguiente la tensión de la reacción de armadura puede considerarse como una inductancia en serie con la tensión generada interna en el alternador.



(a) Circuito monofásico equivalente



(b) Circuito trifásico equivalente conectado en estrella

FIGURA 3.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Al aplicar la ley de tensiones de Kirchhoff al circuito de la figura 4.3 resulta

$$V_p = E_g - jXI_a$$

Además del efecto de la reacción de armadura, la bobina de la armadura también presenta autoinductancia y resistencia. Si denominamos por L_a su autoinductancia de la armadura, por X_a su correspondiente reactancia y por R_a su resistencia, entonces la diferencia total entre E_a y V_p está dada por la expresión:

$$V_p = E_a - jXI_a - jX_aI_a - R_aI_a$$

Pero como, tanto los efectos de la reacción de armadura como la autoinductancia se presentan por reactancia, se acostumbra combinar las dos magnitudes en una sola reactancia conocida como “reactancia síncrona” de la máquina, la cual representaremos por X_s .

$$X_s = X - X_a$$

$$V_p = E_a - jX_sI_a - R_aI_a \quad 3.3$$

Con relación a lo anterior, es posible establecer el circuito equivalente de un generador síncrono monofásico y trifásico, tal como se muestra en la figura 3.3; en el cual se tiene una fuente de corriente continua o directa alimenta al circuito del campo inductor (rotor), el cual se ha representado por una inductancia de resistencia (R_F), esta resistencia también esta en serie con una resistencia variable que sirve para regular la corriente del campo inductor. Lo que resta del circuito equivalente corresponde a los componentes por fase de la reactancia, resistencia de la armadura y de la carga que se le conecte a las puntas terminales del alternador. En los alternadores trifásicos la diferencia con el circuito monofásico lo constituye el ángulo de 120° de desplazamiento de tensión y corriente que hay entre las fases. Con lo cual las tres fases se pueden conecta en Estrella o Delta.

3.4 DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR SÍNCRONO

Como la tensión del generador síncrono, es alterno generalmente se representan por fasores, y como estos tienen magnitud y ángulo, la relación entre ellos debe expresarse en dos dimensiones. La tensión V_A y corriente I_A presente en una fase se grafican de manera que sea evidente la relación entre ellos, con lo cual se obtiene el diagrama fasorial del generador síncrono, los cuales dependen del factor de potencia (FP) de la carga que se le conecten a la máquina.

Cuando el generador alimenta una carga con factor de potencia unitario ($FP = 1$), es decir una carga puramente resistiva, la tensión (E_A) difiere de la tensión nominal a plena carga por fase (V_ϕ) en las caídas de tensión por resistencia y reactancia. La corriente en el inducido y la tensión están en fase y su diagrama fasorial quedan representados por:

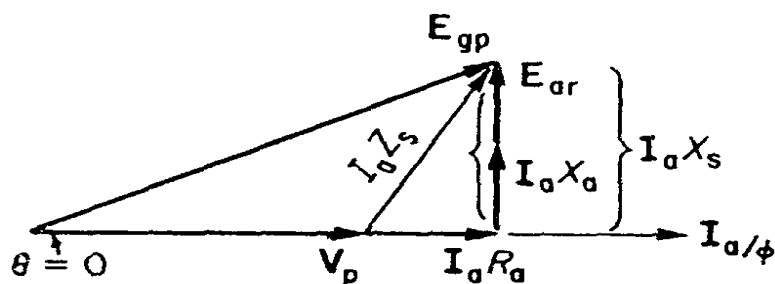


FIGURA 3.4 DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR SÍNCRONO CON $FP = 1$

La magnitud de la f.e.m. genera en vacío para este caso se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$E_A = \sqrt{(V_\phi + R_A I_A)^2 + X_S I_A^2} \quad 3.4$$

De la ecuación anterior y del diagrama fasorial de la figura 3.4, se tiene que:

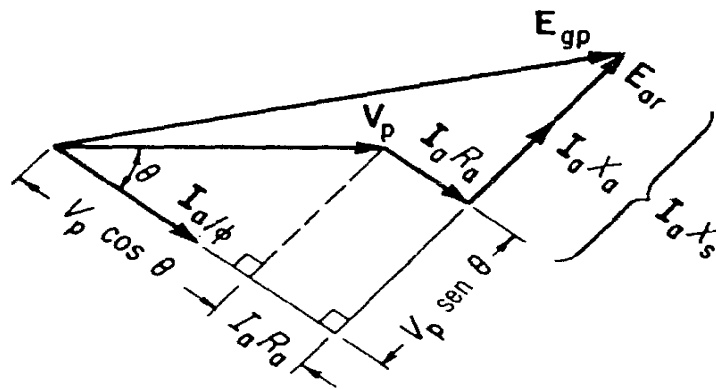
$E_A = E_{gp}$	Es la f.e.m. generada en vacío por fase.
$V_\phi = V_p$	Es la tensión nominal a plena carga por fase.
$I_A = I_a$	Es la corriente nominal a plena carga por fase.
$R_A = R_a$	Es la resistencia efectiva por fase de la armadura.
X_S	Es la reactancia síncrona por fase.
θ	Es el ángulo del factor de potencia de la carga.

Hasta donde sea posible la resistencia efectiva se debe corregir a la temperatura de 75°C

El anterior diagrama fasorial puede compararse con los diagramas fasoriales del generador síncrono funcionando con cargas de factor de potencia atrasado y

adelantado, los cuales se representan en la figura 3.5, en las cuales se observa que para una tensión por fase y corriente por fase de la armadura dados, se requiere generar una mayor tensión E_A para cargas con factor de potencia atrasado que para cargas con factor de potencia adelantado; por consiguiente con cargas inductivas se necesita una mayor corriente de excitación en los polos inductores para aumentar el campo magnético y obtener la misma tensión con carga en las puntas terminales del generador síncrono.

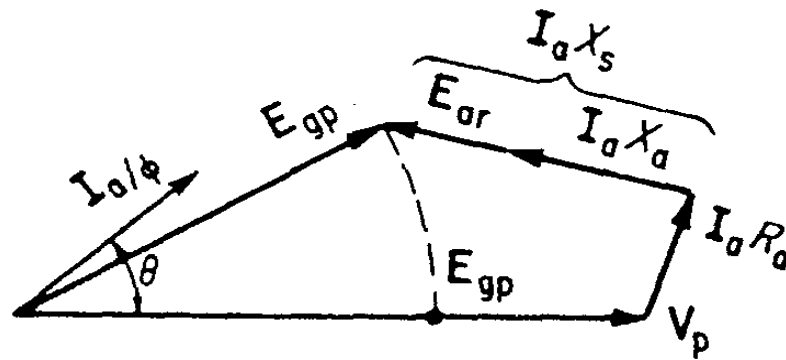
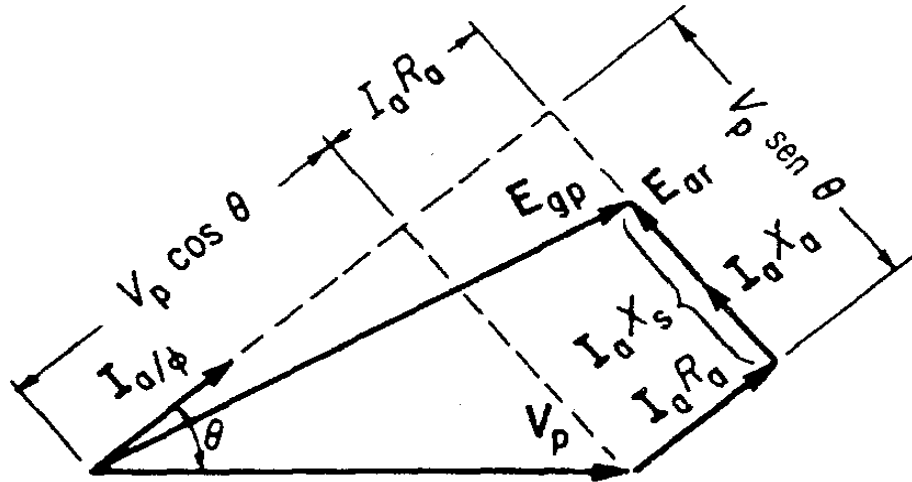
Alternativamente para una carga capacitiva concierta magnitud de corriente de excitación y de carga, la tensión generada en vacío para mantener constante la tensión con carga en las puntas terminales debe ser menor al que se obtiene con carga atrasada.



$$E_A = \sqrt{(V_\phi \cos \theta + R_A I_A)^2 + (V_\phi \sin \theta + X_S I_A)^2} \quad 3.5$$

$\cos \theta$ = Factor de potencia de la carga

FIGURA 3.5 DIAGRAMA FASORIAL PARA UNA CARGA CON FACTOR DE POTENCIA ATRASADO (FP = ATRASADO)



$$E_A = \sqrt{(V_p \cos \theta + R_A I_A)^2 + (V_p \sin \theta - X_S I_A)^2} \quad 3.6$$

FIGURA 3.6 DIAGRAMA FASORIAL PARA UNA CARGA CON FACTOR DE POTENCIA ADELANTADO (FP = ADELANTADO)

3.5 PAR Y POTENCIA DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Un generador síncrono transforma la potencia mecánica en potencia eléctrica monofásica o trifásica. La fuente de potencia mecánica a la cual comúnmente se le llama “primotor”, puede ser un motor diesel, una turbina de vapor, una turbina hidráulica, o cualquier otro dispositivo que le proporcione el movimiento al generador síncrono. Independientemente de la fuente de potencia mecánica que se utilice, debe tener las propiedades de mantener la velocidad constante a cualquier valor de carga que se le conecte a las puntas terminales del generador síncrono, ya

que de lo contrario la frecuencia de la red de alimentación a la carga tendría valores diferentes con cualquier valor de velocidad.

Conforme al flujo de potencia de la máquina que se muestra en la figura 2.7, se tiene que, no toda la potencia mecánica que entra al generador síncrono sale de ella misma como potencia eléctrica debido a las pérdidas de energía que se tienen presentes en la máquina. Conforme a la misma figura se observa que la potencia mecánica en la entrada es la potencia en el eje del generador síncrono, es decir:

$$P_{ent} = \tau_{ap} \omega_m$$

Mientras que la potencia mecánica convertida a potencia eléctrica se expresa por:

$$P_{conv} = 3E_A I_A \cos \gamma$$

siendo

E_A la f.e.m. por fase generada en vacío

I_A La corriente nominal por fase en la armadura

γ el ángulo que forma E_A e I_A

La potencia eléctrica trifásica real que entrega el generador síncrono puede representarse en magnitudes de línea como:

$$P_{sal} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

y en magnitudes de fase por

$$P_{sal} = 3V_{\phi} I_A \cos \theta \quad 3.7$$

Como la reactancia síncrona es mucho mayor a la resistencia efectiva por fase de la armadura, sin cometer un error apreciable y para nuestro análisis podemos despreciar el valor de la resistencia, para determinar una ecuación más útil para evaluar la potencia que sale del generador; por lo cual, utilizaremos el diagrama fasorial simplificado que se muestra en la figura 3.7, en el cual se desprecia el efecto que nos origina la resistencia de la armadura.

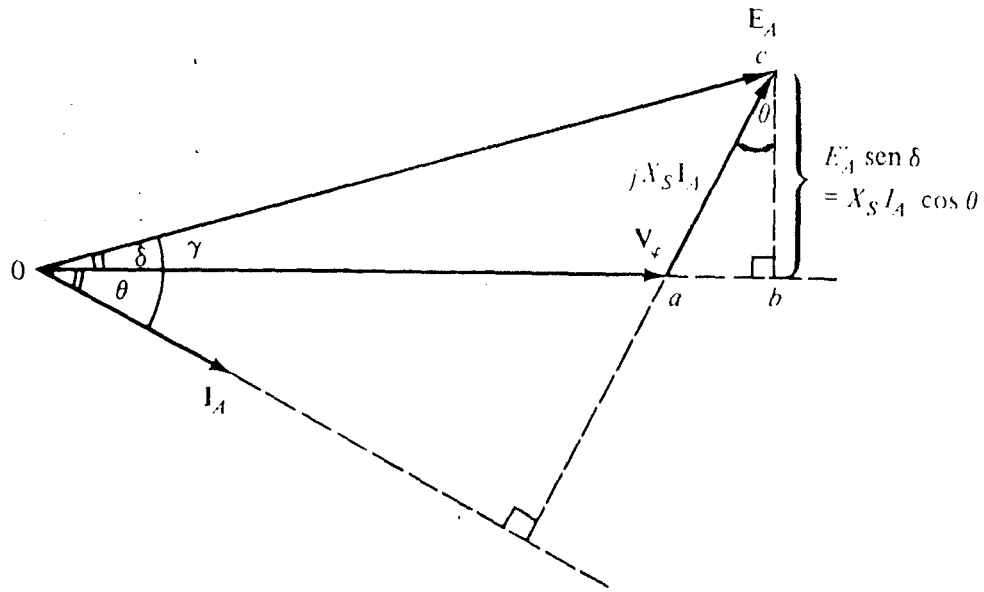


FIGURA 3.7 DIAGRAMA FASORIAL SIMPLICADO DEL GENERADOR SÍNCRONO

Conforme al triángulo rectángulo obc se obtiene que:

$$bc = E_A \sin \delta$$

del triángulo rectángulo abc se obtiene:

$$bc = X_S I_A \cos \theta$$

al igualar las dos ecuaciones anteriores se obtiene la expresión algebraica con la cual se puede determinar la potencia de salida de la máquina.

$$X_S I_A \cos \theta = E_A \sin \delta$$

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_S}$$

al sustituir esta última igualdad en la ecuación 4.7 se obtiene:

$$P = \frac{3V_{\phi} E_A \sin \delta}{X_s} \quad 3.8$$

de la ecuación 3.8 se observa que la potencia del generador síncrono depende del ángulo δ que hay entre V_{ϕ} y E_A . El ángulo se conoce como “ángulo de par de la máquina”. La potencia máxima que puede suministrar el generador síncrono se obtiene cuando $\delta = 90^\circ$, con lo cual $\sin 90^\circ = 1$

$$P_{\max} = \frac{3V_{\phi} E_A}{X_s} \quad 3.9$$

Puede encontrarse una ecuación alterna para el par inducido (τ_{ind}) en el generador síncrono a partir de la ecuación:

$$P_{con} = \tau_{ind} \omega_m$$

con lo cual el par se puede expresar como

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{\phi} E_A \sin \delta}{\omega_m X_s} \quad 3.10$$

Esta ecuación expresa el par en términos de las magnitudes eléctricas, en tanto que la ecuación 2.19 nos representa el par en función de las magnitudes magnéticas.

3.6 PARÁMETROS DEL GENERADOR SÍNCRONO

Los generadores síncronos tienen cinco parámetros principales que se deben tomar en cuenta para el análisis del comportamiento de él, los cuales son:

a) Resistencia Ohmica y efectiva, la resistencia Ohmica es la resistencia eléctrica que se presenta en un conductor al paso de la corriente continua. En este caso las cargas eléctricas circulan en el conductor en una misma dirección y se distribuyen uniformemente en toda la sección transversal del conductor. Esta resistencia se representa por “ R_o ” y es la resistencia que se mide en corriente continua o directa; su magnitud se determina por la ley de Ohms.

$$R_o = \frac{V}{I}$$

el otro valor de la resistencia, es la resistencia efectiva (resistencia eficaz) la cual es la que se obtiene en la corriente alterna y se define como la resistencia eléctrica aparente que se obtiene en la corriente alterna. Esta resistencia la representamos por “ R_A ” y su valor es mayor al de la resistencia Ohmica debido a ciertos efectos que origina la c.a., tales como:

- Efecto Kelvin o pelicular
- Efecto de las corrientes parásitas
- Efecto de las pérdidas por histéresis
- Efecto de las perdidas dieléctricas

En las máquinas eléctricas la resistencia efectiva es difícil de medir ya que ella varía en función de que la bobina tenga núcleo de aire o de fierro, por lo tanto se ha encontrado experimentalmente que la resistencia efectiva varía en función de una constante la cual relaciona la resistencia efectiva y la Ohmica de la bobina; es decir:

$$K = \frac{R_A}{R_O}$$

de donde

$$R_A = KR_O \quad 3.11$$

el valor de la constante K depende del tipo de inductor que tenga el generador síncrono y de la frecuencia de la c-a; por lo que , para un generador síncrono de polos salientes, varia de 1,2 a 2,0 pero para ciertos cálculos se puede considerar el promedio el cual es de 1,6.

Para máquinas de polos lisos el valor de la constante K varia entre 2,5 a 4 y también se puede considerar el promedio de 3,25.

En una forma aproximada la resistencia efectiva se puede determinar mediante la medición de la potencia que absorbe la bobina (pérdidas en el cobre), de la tensión y la corriente cuando esta se alimenta con una tensión reducida en c.a. y mediante el uso de la siguiente ecuación se determina su valor:

$$W_{cu} = R_A I_A^2$$

$$R_A = \frac{W_{cu}}{I_A^2} \quad 3.12$$

b) Reactancia de dispersión, el conjunto de líneas de fuerza magnética que forman el campo magnético alterno que tiene una máquina o cualquier dispositivo eléctrico normalmente nunca se aprovecha totalmente, ya que hay una pequeña cantidad de flujo que se dispersa y se cierra a través del aire y se le denomina flujo de dispersión.

El flujo magnético de dispersión relacionado con la corriente, genera una autoinducción en la bobina del inducido, la cual junto con la velocidad angular nos origina la reactancia de dispersión. Con forme a lo anterior la c.a. que circula por la bobinas de la máquina debe vencer tanto a la resistencia efectiva y a la reactancia.

La magnitud de la reactancia de la máquina no depende de la temperatura ni de la longitud del conductor con el cual esta hecha la bobina, sino que depende de la frecuencia de la c.a. y su magnitud depende de la autoinducción la cual se termina con la ecuación 1.13, además la representaremos por la letra X_a , sus unidades son el Ohm y para determinarla se puede usar la siguiente ecuación:

$$X_a = \omega L = 2\pi f L = \frac{2\pi f N \phi}{I_A} \quad 3.13$$

c) Impedancia, la impedancia de la máquina la representaremos por la letra Z , también se expresa en Ohms y es una combinación de una parte real que la representa la resistencia y una imaginaria que nos la representa la reactancia de la máquina, con lo cual su ecuación algebraica es:

$$Z = R_A + jX_a = \sqrt{(R_A)^2 + (X_a)^2} \quad 3.14$$

para corregir la impedancia por temperatura, se logra únicamente corrigiendo la resistencia a la temperatura deseada, generalmente a 75°C, ya que el valor de la reactancia no depende de la temperatura. Para lograr lo anterior es necesario medir la temperatura ambiente a la cual se hace la medición de la resistencia Ohmica.

Con relación al circuito equivalente del generador síncrono el cual contiene tres magnitudes que deben conocerse para poder analizar el comportamiento del

generador síncrono cuando funciona sin carga y con carga, el generador síncrono se debe someter a pruebas de laboratorio y obtener graficas que relacionen la corriente de excitación (I_f) y la f.e.m. generada en vacío (E_o) y que relacione la corriente que circula por el inducido ($I_{cc} = I_A$) cuando opera con carga y la corriente de excitación y con ellas determinar los parámetros de la máquina síncrona. Para lograr lo anterior se requiere someter al generador síncrono a las siguientes pruebas y además utilizar un método sencillo para determinar sus parámetros, el cual se conoce como “método de la impedancia síncrona”.

El primer paso del proceso consiste en realizar la prueba de vacío del generador; para lo cual, se hace girar el generador a la velocidad nominal, con sus puntas terminales sin carga y se reduce la corriente de excitación a cero ($I_f = 0$). Posteriormente se va aumentando la corriente de excitación por etapas hasta llegar aproximadamente al 125% de la tensión nominal por fase del generador síncrono y se toman lecturas de la tensión en vacío por fase (E_A) y de corriente de excitación (I_f) que circula por el inductor del generador. Con las lecturas obtenidas se traza una grafica la cual debe ser aproximada a la que se muestra en la figura 3.8.

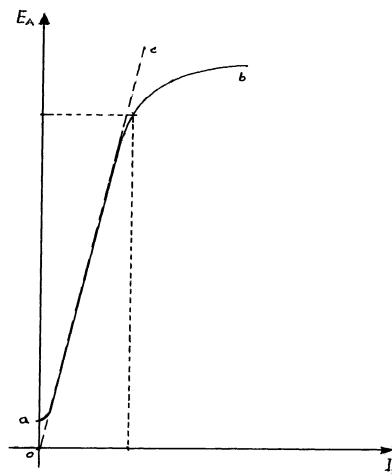


FIGURA 3.8 CARACTERÍSTICA DE VACÍO DEL GENERADOR SÍNCRONO

De la figura anterior se observa que no empieza desde cero cuando la corriente de excitación es nula debido a que existe un magnetismo remanente que origina una pequeña tensión (E_{oa}) llamada tensión remanente. A partir de ese punto la curva empieza a aumentar linealmente hasta un punto donde la curva empieza a

inclinarse debido a que empieza el fenómeno de saturación magnética del entrehierro, llegado a un punto a partir del cual con un aumento grande en la corriente de excitación se obtiene un aumento en pequeño en la tensión generada en vacío. Con esta grafica es posible obtener la tensión generada en vacío para cualquier valor de corriente de excitación. La región lineal “oc” de la grafica se le denomina línea del entrehierro de la característica de vacío.

La segunda etapa consiste en efectuar la prueba de cortocircuito, para lo cual la corriente de excitación “ I_f ” se reduce a cero y se pone en cortocircuito las puntas terminales del devanado del inducido del generador síncrono a través de unos ampérmetros de c.a. posteriormente se aumenta gradualmente la corriente de excitación hasta obtener en los ampérmetros del inducido aproximadamente el 125% de la corriente nominal de él, tomado lecturas simultáneas de corriente de excitación y de cortocircuito en el inducido del generador ($I_{cc} = I_A$). Con las lecturas obtenidas se traza una curva, la cual debe ser una línea recta semejante a la que se muestra en la figura 4.9.

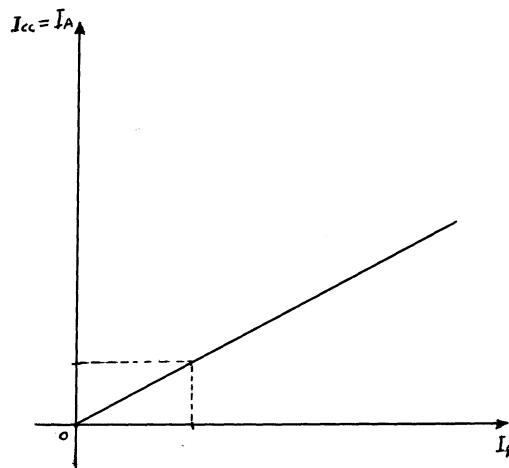


FIGURA 3.9 CARACTERÍSTICA DE CORTOCIRCUITO DEL GENERADOR SÍNCRONO

La tensión que se obtiene en las puntas terminales del generador estando estas en cortocircuito se le llama “tensión de impedancia”, y su magnitud debe ser pequeña pero suficiente para hacer circular por el inducido su corriente nominal.

Con los datos que se pueden obtener con las dos características anteriores, se determina la impedancia interna de la máquina a la cual se le denomina “Impedancia Síncrona”, que se representa por la letra Z_s y su magnitud se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Z_s = \frac{E_A}{I_A} \quad 4.15$$

de donde

E_A es la tensión en vacío por fase, que se obtiene de la característica en vacío a un determinado valor de corriente de excitación durante la prueba de vacío.

I_A es la corriente de cortocircuito por fase, que se obtiene de la característica de cortocircuito a la misma corriente de excitación con la cual se determina la tensión en vacío E_A .

Con la resistencia efectiva que se determina con las ecuaciones 3.11 o 3.12 y la impedancia síncrona, se puede determinar la reactancia síncrona (X_s) del generador síncrono mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$X_s = \sqrt{(Z_s)^2 - (R_A)^2} \quad 3.16$$

3.7 EL GENERADOR SÍNCRONO FUNCIONADO EN FORMA AISLADA

El comportamiento del generador síncrono bajo carga, varía con forme al valor del factor de potencia de la carga que se le conecte cuando este funciona solo o en paralelo con otros generadores síncronos. El primer caso es el estudio del generador síncrono funcionando de manera aislada, y posteriormente se estudiará la operación en paralelo.

En un generador síncrono la f.e.m. inducida E_A es la tensión que se debe generar en vacío para que el generador funcione a su tensión nominal y carga nominal. En la practica es una cantidad difícil de medir con un instrumento de medición y solo puede determinarse con aproximación mediante el uso de las ecuaciones 3.4, 3.5 y

3.6, debido a la dificultad que se tiene para cuantificar la reacción de inducido en el generador síncrono originada por la carga que se le conecta a sus puntas terminales, ya que los factores que afectan a la magnitud de la tensión con carga son:

- 1) Caída de tensión en el circuito del inducido ($R_A I_a$)
- 2) Caída de tensión por reactancia del inducido ($jX_s I_a$)
- 3) Caída de tensión por reacción de armadura (E_{ar})

Generalmente se conoce la tensión nominal a plena carga y debido a las caídas de tensión antes mencionadas, se hace necesario regular la tensión generada en vacío a un valor más alto, o más bajo para que cuando se le conecte la carga al generador síncrono, esta funcione a su tensión nominal. A este fenómeno se le conoce como REGULACIÓN DE TENSIÓN y nos representa la capacidad de la máquina para mantener constante la tensión nominal con cualquier variación de la carga. La regulación de tensión se puede determinar por medio de la siguiente ecuación; la cual sus unidades pueden ser en por unidad, o por ciento.

$$R_{reg} = \frac{E_A - V_\phi}{V_\phi} \quad 3.17$$

$$\%R_{reg} = \frac{E_A - V_\phi}{V_\phi} 100 \quad 3.18$$

En un generador síncrono monofásico o polifásico debe cumplirse lo siguiente, conforme a los diagramas vectoriales y factor de potencia para una carga resistiva, inductiva y capacitiva.

$$E_A = (V_\phi + I_a R_A) + (jX_s I_a \pm E_{ar}) = V_\phi + I_a Z_s \quad 3.19$$

En donde

E_A	Tensión generada en vacío por fase
V_ϕ	Tensión nominal por fase
$I_a R_A$	Caída de tensión por resistencia efectiva en el inducido y por fase
$jX_s I_a$	Caída de tensión por reactancia del inducido y por fase
E_{ar}	Caída de tensión por fase de la reacción de inducido la cual puede ser de magnetización, magnetización cruzada o desmagnetización.
$I_a Z_s$	Caída de tensión por impedancia síncrona

En el generador síncrono con factor de potencia unidad, en el cual la corriente de fase en el inducido esta en fase con la tensión por fase en el inducido; la reacción de inducido es de magnetización cruzada, y la caída de tensión por reacción de inducido esta atrasado 90° con respecto a la tensión generada.

En el generador síncronos con factor de potencia atrasado, en el cual la corriente por fase del inducido está atrasada 90° con respecto a la tensión nominal por fase, la reacción de armadura es de desmagnetización y la caída de tensión que produce esta atrasada 180° con respecto a la tensión generada.

En el generador síncrono con factor de potencia adelantado, en el cual la corriente de fase en el inducido se adelanta 90° con respecto a la tensión nominal por fase, la reacción de inducido es de magnetización y la caída de tensión por reacción de inducido está en fase con la tensión generada debido al flujo magnético del entrehierro.

Incrementar la carga es aumentar la potencia útil y/o reactiva tomada del generador síncrono, con lo cual se aumenta también la corriente del inducido. Como se ha variado la resistencia del devanado inductor a una magnitud determinada, la corriente de excitación y el flujo magnético son constantes debido a que la máquina motriz mantiene constante la velocidad angular con lo cual la magnitud de la tensión generada internamente en el generador (E_A) es constante.

Si el generador síncrono funciona con factor de potencia atrasado, al aumentarle la carga con el mismo factor de potencia aumenta la corriente en el inducido (I_a) conservándose el ángulo inicial θ con respecto a V_ϕ . Por consiguiente la caída de tensión por reacción de inducido es mayor al valor que se obtiene antes de aumentar la carga con el mismo ángulo, lo cual origina una disminución marcada de la tensión nominal con carga V_ϕ .

Si al generador síncrono está funcionado con carga resistiva ($FP = 1$), se presenta el mismo fenómeno anterior con la variante de que, la tensión nominal con carga V_ϕ disminuye ligeramente.

Por último supongamos, que el generador síncrono funciona con carga de factor de potencia adelantado, cuando se incrementa la carga la caída de tensión por reacción de armadura es de magnetización y tiende a disminuir la tensión generada

internamente en el generador, con lo cual la tensión nominal V_ϕ aumenta con respecto a la tensión que se tenía antes de aumentar la carga.

Normalmente es deseable que la tensión aplicada a la carga permanezca constante, independientemente de que la carga este variando; con lo cual se tiene que variar la magnitud de la tensión interna generada E_A sin modificar el valor de la frecuencia, lo cual se logra variando el flujo magnético de la siguiente forma:

- 1) Al disminuir la resistencia del campo magnético del devanado inductor (R_f), aumenta la corriente de excitación del inductor del generador.
- 2) Al incrementar la corriente de excitación aumenta el flujo magnético de la máquina.
- 3) El aumento del flujo eleva la tensión interna generada en la máquina síncrona.
- 4) Al aumentar E_A se incrementa la tensión nominal V_ϕ en las puntas terminales del generador.

El procedimiento anterior se conoce como “regulación de tensión” del generador sometido a cargas variables, con lo cual para compensar los efectos de la reacción de inducido se instalan reguladores de tensión en la excitatriz para aumentar o disminuir en forma automática la corriente de excitación en el devanado inductor del generador síncrono con los diferentes cambios en la carga y el factor de potencia. La magnitud de la regulación de tensión algebraicamente se determina por medio del uso de la ecuación 4.17 o 4.18, en las cuales únicamente se determina la magnitud de la tensión generada internamente (E_A) con los diferentes valores del factor de potencia de la carga, ya que; la tensión nominal V_ϕ se da como dato en la resolución de problemas, o se obtiene de la placa de datos de la máquina.

3.8 OPERACIÓN EN PARALELO DEL GENERADOR SÍNCRONO

En las redes eléctricas constantemente se obtienen variaciones continuas de cargas y en ocasiones cuando la demanda de energía eléctrica es muy elevada, se requiere conectar uno o más generadores síncronos en paralelo con los que están alimentados la carga existente y así poder satisfacer la demanda de energía. Con el procedimiento anterior se logra aumentar la capacidad en el sistema de generación y poder satisfacer la demanda de energía que se requieran los usuarios de ella.

Para sincronizar en paralelo (acoplar en paralelo) un generador síncrono a una red de alimentación ya existente, la cual tiene una tensión a una frecuencia determinada se debe hacer en forma tal que no se presenten corrientes transitorias al momento de efectuar el acoplamiento, para lo cual se deben cumplir estrictamente como mínimo las siguientes condiciones:

1 IGUAL FRECUENCIA, para verificar la frecuencia de los generadores síncronos por acoplar en paralelo, se hace por medio del instrumento de medición llamado “frecuencímetro” el cual debe conectarse en ambos extremos de los sistemas eléctricos por acoplar en paralelo. Si la frecuencia del generador síncrono por acoplar en paralelo es diferente a la del sistema eléctrico principal, esta se le debe igualar mediante la variación de la velocidad de giro de la maquina motriz que impulse al generador síncrono.

2 IGUAL TENSIÓN, para igualar la tensión en los sistemas eléctricos por acoplar, la tensión del generador síncrono se debe ajustar mediante la variación de la corriente de excitación que le proporciona la excitatriz al inductor del generador síncrono, hasta un valor tal que las tensiones de los sistemas por acoplar en paralelo sean iguales.

3 IGUAL SECUENCIA DE FASES, esto significa que la posición y orden de cada una de las fases en ambos sistemas eléctricos sea la misma, ya que en la corriente alterna las secuencias de fases que se puede presentar son: “ABC” (123) o “CBA” (321). Es decir, si tenemos 2 generadores síncronos los cuales se acoplaran en paralelo y llamamos por A_1 , B_1 y C_1 a cada una de las fases del primer generador síncrono y por A_2 , B_2 y C_2 a las fases del segundo generador síncrono; Para la sincronización en paralelo se deben acoplar respectivamente las fases A_1A_2 , B_1B_2 y C_1C_2 . La anterior identificación de las fases se logra mediante el uso de un indicador de secuencias llamado secuencímetro o mediante un motor trifásico de corriente alterna, con los cuales se iguala la secuencia de fases en los sistemas eléctricos por acoplar en paralelo.

4 PONER EN SINCRONISMO, esto significa poner en concordancia de fases por medio de un método que indique el momento preciso en el que se debe cerrar el interruptor de sincronización sin que se tenga la presencia de la corriente transitoria de conexión, después de haberse cumplido al 100% las 3 condiciones anteriormente mencionadas. La sincronización por medio de indicadores ópticos se puede efectuar mediante las indicaciones de lámparas, vóltmetros, Sincronoscopio,

osciloscopios o combinaciones entre ellos. La sincronización en paralelo mediante el uso de lámparas se puede efectuar mediante los siguientes métodos:

- a) **MÉTODO DE LÁMPARAS APAGADAS;** en este método mínimo se pueden usar 2 lámparas cuyas puntas terminales se deben conectar en cada fase del mismo nombre entre los sistemas eléctricos por acoplar en paralelo, tal como se muestra en la figura 3.10. Cuando se han igualado las fases de ambos sistemas la diferencia de potencial en las puntas terminales de las lámparas en teoría es cero y deben estar completamente apagadas, lo cual nos indican el instante en el que se debe cerrar el interruptor de acoplamiento de los generadores síncronos y estos queden conectados en paralelo.

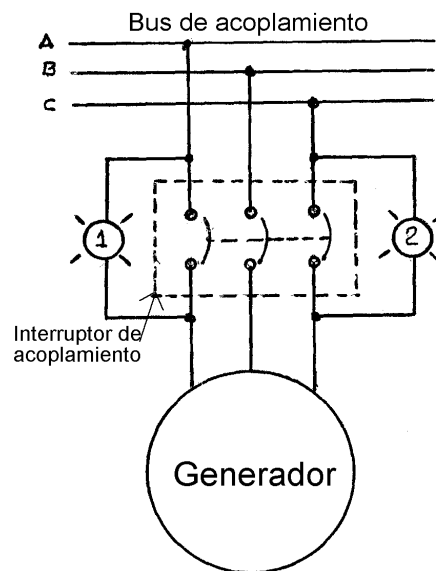


FIGURA 3.10 CONEXIÓN DE LAS LÁMPARAS EN EL MÉTODO DE LÁMPARAS APAGADAS

- b) **METODO DE LÁMPARAS BRILLANTES;** en este método las puntas terminales de cada lámpara se conectan a fases diferentes, tal como se muestra en la figura 3.11; en este método las lámparas se apagan y encienden periódicamente y alcanzan su máximo brillo cuando en los sistemas por conectar en paralelo coinciden las fases. En este instante se debe cerrar el interruptor de acoplamiento para sincronizar en paralelo los generadores síncronos.

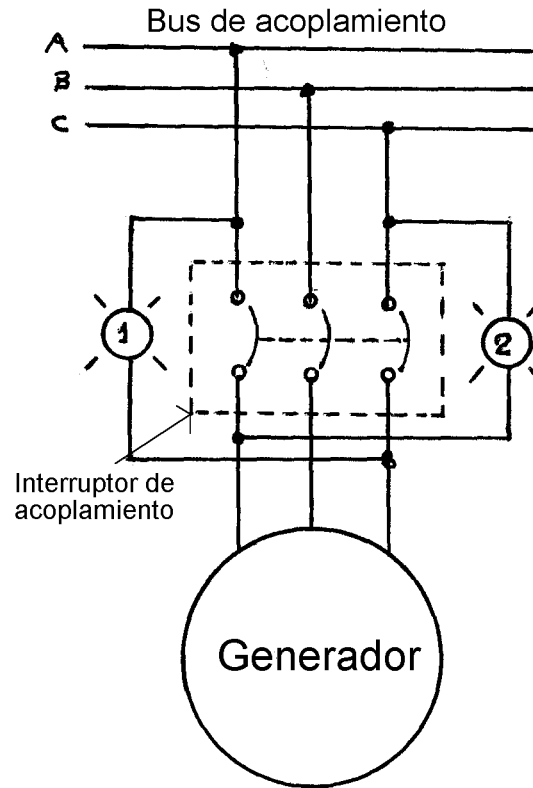


FIGURA 3.11 CONEXIÓN DE LAS LÁMPARAS EN EL MÉTODO DE LÁMPARAS BRILLANTES

- c) **METODO SIEMENS HALSKEN**; este método es una combinación del método de lámparas apagadas y brillantes, con lo cual los inconvenientes que se presentan con cada uno de ellos se pueden reducir en parte si la conexión de dos lámparas se conectan como en el método de lámparas brillantes (Fig. 3.11) y la tercer lámpara se conecta en las puntas terminales de las fases que quedan libres; tal como se muestra en la figura 3.12. en este método se cierra el interruptor de acoplamiento cuando las lámparas 1 y 2 tienen su máxima brillantes y la lámpara 3 esta completamente apagada.

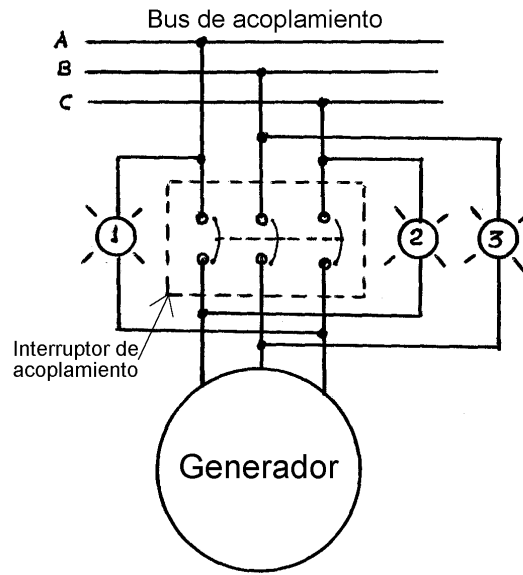


FIGURA 3.12 CONEXIÓN DE LAS LÁMPARAS EN EL MÉTODO DE SIEMENS HALSKEN

Para el acoplamiento en paralelo de generadores síncronos también se pueden utilizar instrumentos tales como: vóltmetros, osciloscopios, sincronoscopios o combinación de ellos con el método de lámparas apagadas o brillantes, reduciéndose los posibles inconvenientes que se puedan presentar con el uso de ellos por separado.

Las cuatro condiciones anteriores son críticas para el buen acoplamiento en paralelo, pero se deben considerar otras las cuales pueden o no cumplirse al 100% tales como: Que la potencia de los generadores sea la misma, que la impedancia de ellos sean iguales, etc.

Si se conectan en paralelo dos generadores síncronos de idénticas características con uno de ellos funcionando con la carga, si se cierra el interruptor de acoplamiento en el instante que se satisfacen al 100% las 4 condiciones anteriores, la carga no se repartirá uniformemente a la capacidad de las máquinas y el generador que no tenía conectada la carga funciona sin absorber parte de ella y se dice que queda en flotación y preparado para absorber carga cuando se requiera o se hagan las maniobras para transferir carga de un generador a otro. En estas condiciones las tensiones de ambos generadores son iguales y en sus terminales de conexión no se tendrá la presencia de la corriente transitoria de conexión al cerrar el interruptor de acoplamiento.

Cuando las tensiones de ambos generadores por acoplar en paralelo difieren un poco, en el instante de cerrar el interruptor de acoplamiento se establece una corriente transitoria de compensación que iguala las tensiones de ambos generadores a un valor diferente al que tenían inicialmente. Si la diferencia de tensiones es muy grande, también lo será la magnitud de la corriente de compensación lo cual origina daños muy severos a las máquinas y no lograr el acoplamiento en paralelo satisfactoriamente. Cuando se presenta este caso hay una transferencia de energía del punto de mayor potencial a de menor potencial lo cual origina la corriente antes mencionada cuya magnitud se puede determinar por las siguientes ecuaciones:

Cuando E_2 es mayor a E_1

$$I_C = \frac{E_2 - E_1}{Z_1 + Z_2} \quad 3.20$$

Cuando E_1 es mayor que E_2

$$I_C = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 + Z_2} \quad 3.21$$

con relación a lo anterior y para evitar la corriente de compensación el interruptor de acoplamiento se debe cerrar cuando se cumplan al 100% las 4 condiciones antes mencionadas y para repartir equitativamente la carga entre los generadores, se hacen maniobras de aumento o disminución momentáneo de la velocidad de uno y otro generador con lo cual un generador cederá energía y el otro la absorberá transfiriendo carga de una a otra máquina. El fenómeno anterior también se presenta cuando se aumenta o disminuye la corriente de excitación en ellos.

4.9 FENÓMENOS TRANSITORIOS EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS

Cuando el par aplicado en el eje, o la carga entregada por el generador síncrono varían bruscamente, se presenta un estado transitorio durante cierto tiempo antes de que el generador vuelva al régimen permanente. Ejemplo cuando un generador

síncrono es conectado en paralelo con un sistema de operación, inicialmente gira más rápido y a mayor frecuencia que el sistema de potencia. Después de conectado en paralelo, hay un período transitorio antes de que el generador se acople a la línea y marche a la frecuencia de la red, mientras entrega una pequeña potencia a la carga.

Exactamente en el tiempo $t = 0$ que se obtiene cuando se cierra el interruptor de acoplamiento, se origina la circulación de corriente el estator. Como el rotor del generador gira más rápido que el sistema, sigue desplazándose hacia delante con relación a la tensión V_ϕ del sistema. Con lo anterior el par producido sobre el eje del generador corresponde a la ecuación:

$$\tau_{ind} = k\beta_R \times \beta_{net}$$

este par tiene dirección contraria a la dirección del movimiento y aumenta a medida que el ángulo de fase entre E_A y V_ϕ aumenta. Este par es opuesto a la dirección del movimiento y frena al generador hasta que éste girara en sincronismo con el resto del sistema de potencia.

El mismo fenómeno se presenta, si el generador estuviera girando a una velocidad menor que la síncrona al ser conectado en paralelo con el sistema de potencia, con lo cual el rotor que atrás del campo magnético resultante y sobre el eje de la máquina se producirá un par en la dirección del movimiento. Este par lleva al rotor hasta la velocidad de sincronismo del sistema al cual se conecta el generador.

La condición transitoria más severa que puede presentarse en un generador síncrono es el cortocircuito trifásico. En los sistemas de potencia lo anterior es conocido como “falla”. En el generador cortocircuitado se presentan diferentes componentes de corriente, las cuales serán analizadas a continuación.

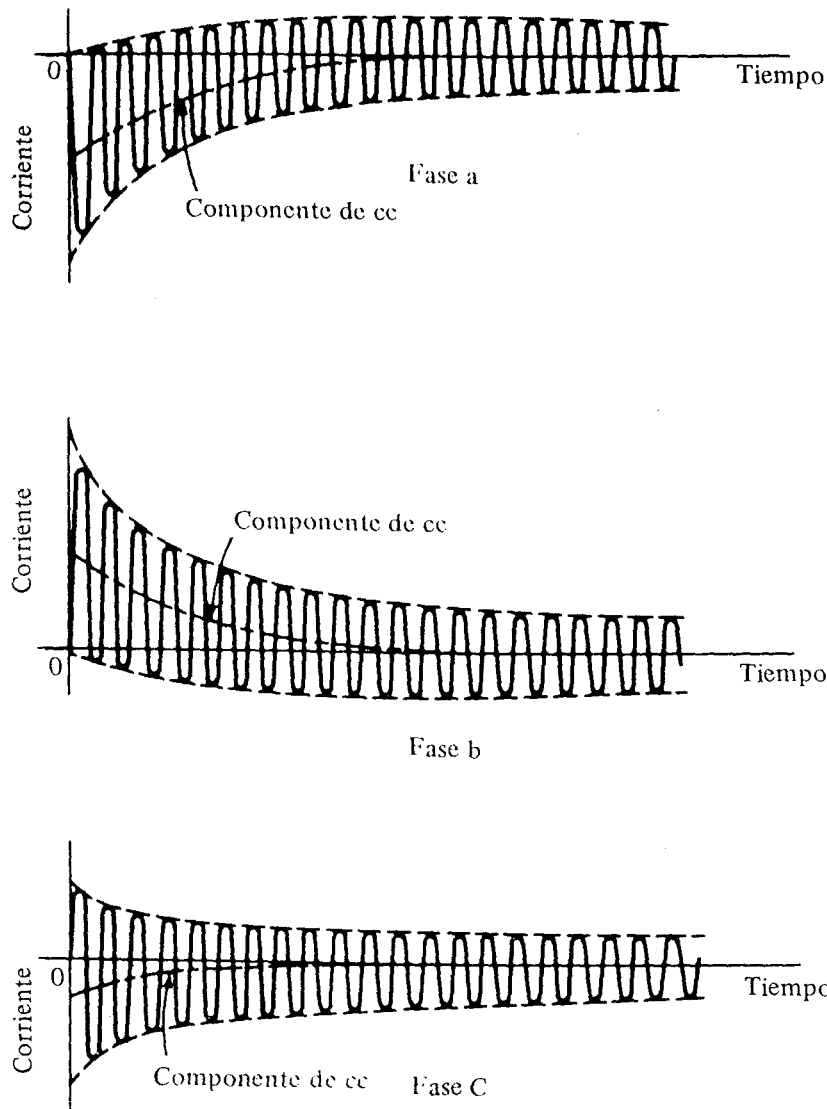
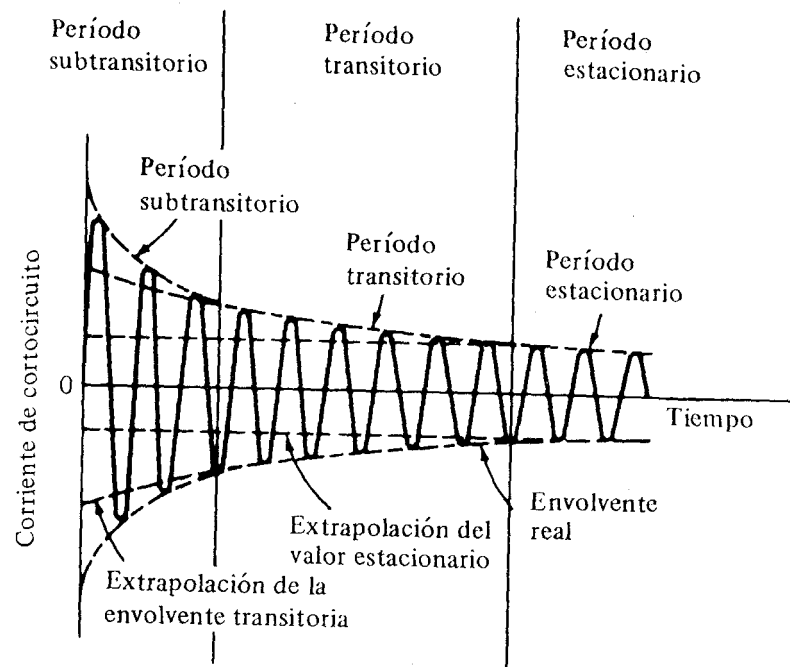


FIGURA 3-13 CORRIENTES DE FALLA TRIFÁSICA EN LAS TERMINALES DEL GENERADOR SÍNCRONO

En la figura 3.14 se representa la componente simétrica alterna de la corriente, la cual puede dividirse en tres períodos: Aproximadamente en el primer ciclo después de la falla, la componente de c.a. es muy grande y disminuye rápidamente, lo cual le corresponde al lo que es llamado como “período subtransitorio”. Después de concluido éste, la corriente sigue disminuyendo más lentamente hasta alcanzar un estado estacionario, lo cual corresponde al “período transitorio”. Finalmente, el tiempo que transcurre desde que la corriente alcanza el estado permanente se conoce como “período de estado estacionario”.



UNIDAD IV MOTORES SÍNCRONOS

4.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE OPERACIÓN

La construcción de los motores síncronos es similar a la del generador síncrono, con la diferencia de que aparte del devanado del inducido y del inductor tiene un tercer devanado que se conecta en cortocircuito sin conectarse a ninguna fuente de alimentación y recibe el nombre de devanado amortiguador. Los motores síncronos se pueden fabricar con inducido fijo e inductor móvil, o también con inducido móvil e inductor fijo. El más utilizado es el primero.

Con relación a lo anteriormente expuesto, el motor síncrono es una máquina producto del acoplamiento físico de dos campos magnéticos; uno de los cuales es el campo magnético unidireccional giratorio del devanado inductor y el otro es el campo magnético alterno del inducido el cual también es giratorio. Este último campo magnético generalmente se obtiene de un sistema trifásico de corriente alterna y gira a una velocidad de sincronismo además tiene una magnitud constante. El campo magnético del inductor también tiene una magnitud constante y es originado por la corriente de excitación que circula por el devanado inductor. De esta forma combinando la acción de los dos campos magnéticos, es posible efectuar la conversión de la energía eléctrica a mecánica.

4.2 OPERACIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO EN RÉGIMEN PERMANENTE

En esta sección se analizará el comportamiento de los motores síncronos bajo diversas condiciones de carga y corriente de campo, así como lo relacionado a la corrección del factor de potencia.

Los motores síncronos usualmente se conectan a sistemas de potencia mucho más grande que la que tiene un solo motor, esto significa que la tensión en terminales y la frecuencia del sistema permanecerán constantes, independientemente de la potencia tomada por el motor. La velocidad de giro está determinada por la frecuencia que tenga el sistema eléctrico al cual este conectado, lo cual mantendrá la velocidad constante en el motor e independiente de la carga. La velocidad de estado estacionario es constante desde vacío hasta el par máximo que el motor pueda suministrar, el cual se conoce como par de desenganche y se determina por la siguiente ecuación:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{\phi} E_A \sin \delta}{\omega_m X_S} \quad 4.1$$

El par máximo de desenganche se obtiene cuando $\delta = 90^\circ$, sin embargo los pares normales de plena carga son mucho menores ya que el par de desenganche puede ser de tres veces el par de plena carga de la máquina. El par máximo de desenganche del motor se determina por:

$$\tau_{max} = \frac{3V_{\phi} E_A}{\omega_m X_S} \quad 4.2$$

Esta ecuación indica que a mayor corriente de excitación y por lo tanto de E_A , mayor será el par máximo del motor. Por consiguiente, se tiene una estabilidad mayor en la operación del motor con corriente de excitación grande o tensión E_A grande.

Si se conecta una carga al eje del motor síncrono, este desarrollara un par suficiente para mantenerse él y la carga a la velocidad síncrona. Esto hace que el ángulo del par llegue a ser más grande, lo cual incrementa dicho par acelerando el rotor y el motor gira nuevamente a la velocidad síncrona, pero con un ángulo del par más grande.

La tensión generada E_A es igual a $K\phi\omega$ y solamente depende de la corriente de excitación y de la velocidad de la máquina, la cual esta restringida a ser constante por la frecuencia de la red de alimentación y dado que no se ha tocado el circuito del inductor, la corriente de excitación es constante y por lo tanto lo será la tensión E_A .

Al incrementar la corriente de excitación en el devanado inductor incrementa la magnitud de la tensión E_A , lo cual no afecta la potencia real suministrada por el motor, la cual solo cambia cuando el par de carga en el eje de la máquina se modifica. También la tensión V_{ϕ} es constante, debido a que la mantiene así la fuente de potencia que alimenta al motor síncrono.

Cuando la corriente de excitación aumenta la magnitud de la corriente del inducido en primera instancia decrece, pero después se incrementa. Con una corriente de excitación pequeña, la corriente en el inducido está atrasada y el motor se comporta como una carga inductiva, en estas condiciones está actuando como una

combinación de carga inductiva-resistiva, consumiendo potencia reactiva (Q). Con el aumento de la corriente de excitación, la corriente en el inducido del motor síncrono, eventualmente se alinea con la tensión V_ϕ y en ese instante el motor se comporta como carga resistiva. En estas condiciones al incrementar adicionalmente la corriente de excitación, la corriente del inducido puede llegar a estar adelantada a V_ϕ y el motor se comporta como una carga capacitiva y actúa como una carga capacitiva-resistiva, consumiendo potencia reactiva negativa ($-Q$); es decir, suministrando potencia reactiva al sistema.

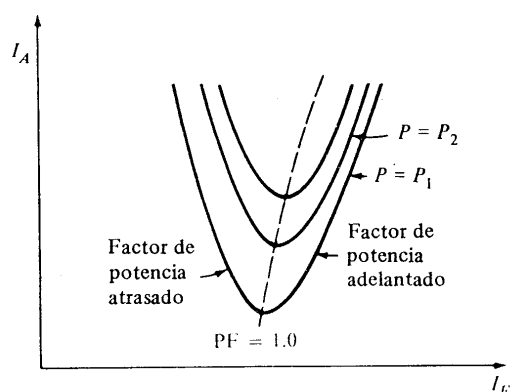


FIGURA 4.1 GRAFICA DE LAS CURVAS “V” DEL MOTOR SÍNCRONO

En la figura 4.1 se muestra una grafica que relaciona la corriente en el inducido I_A del motor síncrono y la corriente de excitación I_F en el devanado inductor para diferentes valores de corriente de carga y diferentes niveles de potencia útil. Dicha gráfica se conoce como curvas “V” del motor síncrono, debido a que su forma es como la letra “V”. Para cada curva, con la mínima corriente del inducido se obtiene el factor de potencia unitario (cargar resistiva), es decir cuando al motor solo se le suministra potencia útil. En cualquier otro punto de las curvas, al motor se le suministra o cede potencia reactiva

Con relación a lo anteriormente expuesto, mediante el control de la corriente de excitación en el devanado inductor del motor síncrono, puede controlarse la potencia reactiva consumida o suministrada desde el sistema de potencia, originado que el motor se comporte como carga inductiva o capacitiva. Con respecto a lo anterior, cuando el motor síncrono funciona sin carga y al controlar la

corriente de excitación, se puede corregir el factor de potencia del sistema eléctrico en el cual se encuentre conectado.

4.3 ARRANQUE DEL MOTOR SÍNCRONO

El arranque del motor síncrono puede efectuarse en tres formas distintas las cuales son:

ARRANQUE CON UN MOTOR AUXILIAR EXTERNO

Este método se acopla mecánicamente el motor síncrono a un motor externo con lo cual el primer paso a seguir consiste en, poner a funcionar el motor síncrono como si fuera un generador síncrono y con el motor auxiliar se lleva a la velocidad síncrona, después como segundo paso se excita poco a poca el devanado inductor del generador hasta obtener en el inducido una tensión, frecuencia y secuencia de fases igual a la que se tiene en la red de c.a. donde se va a conectar. Es decir la máquina se lleva a las condiciones de sincronismo considerando que funciona como generador síncrono, para que se conecte en paralelo a la red de alimentación. Estando conectado en paralelo con la red de alimentación, se desconecta el motor auxiliar de la fuente de alimentación al cual esta conectado y en ese momento la máquina invierte su funcionamiento de generador a motor síncrono.

ARRANQUE DEL MOTOR SÍNCRONO COMO SI FUERA DE INDUCCIÓN.

La forma más práctica de arranque del motor síncrono, es empleando un devanado amortiguador, el cual esta formado por barras especiales colocadas en ranuras de las caras polares del inductor y cortocircuitadas en los extremos de dos polos con polaridad diferente. En la figura 4.2 se muestra un devanado amortiguador con las barras cortocircuitadas sobre los extremos de las caras polares, conectadas con alambres.

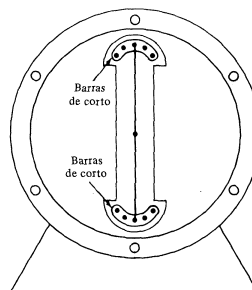


FIGURA 4.2 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UNA MÁQUINA BIPOLAR DE POLOS SALIENTES, MOSTRANDO EL DEVANADO AMORTIGUADOR.

El arranque del motor síncrono como si fuera de inducción, tiene una serie de pasos los cuales son: primero el inducido se energiza con una corriente alterna induciendo una corriente en el devanado amortiguador, originado en este un campo magnético de polaridad contraria al creado en el inducido. El resulta de la combinación de ambos campos, es un par que hace que el motor síncrono arranque poco a poco hasta llegar casi a la velocidad de sincronismo. Se excita el devanado inductor con corriente continua formándose con ello los polos magnéticos del inductor que tienden a situarse frente a los polos magnéticos giratorios del inducido de polaridad contraria, lográndose en esta forma se incrementar la velocidad hasta que el motor síncrono llega a la velocidad de sincronismo entre la velocidad del inductor y la velocidad del flujo unidireccional que presenta el giro del inductor del motor. Si se pierde la atracción, desaparece el par, el rotor deja de girar y la máquina llega a su estado estacionario.

ARRANQUE DEL MOTOR A FRECUENCIA REDUCIDA

Si el campo magnético alterno del inducido del motor síncrono gira a una velocidad muy baja, no se tendrá el problema para que el inductor (rotor) se acelere y se enganche con el campo magnético del inducido. En estas condiciones, la velocidad del campo magnético del inducido se incrementa hasta obtener la velocidad nominal síncrona, mediante el incremento de la frecuencia hasta obtener su valor nominal de 50 ó 60Hz.

En la actualidad se han desarrollado nuevas tecnologías a través de rectificadores inversores y el cicloconvertidor, los cuales se utilizan para convertir una frecuencia constante de entrada en otra frecuencia de salida con una magnitud deseada. Con el desarrollo de tales dispositivos de estado sólido manejadores de frecuencias variables es posible el control continuo de la frecuencia eléctrica aplicada al motor, desde una fracción de Hertz hasta valores mayores a la frecuencia nominal del sistema. Si el dispositivo de manejo de frecuencia variable se incluye en el circuito de control del motor síncrono, entonces para arrancar la máquina, primero se ajusta la frecuencia a un valor muy bajo y después se eleva gradualmente hasta obtener la velocidad nominal del motor. La tensión en cualquier manejador de frecuencia variable o circuito de arranque a frecuencia variable debe variar aproximadamente en forma lineal con la frecuencia aplicada para mantener la corriente en el inducido del motor en niveles seguros para no originarle daños a la máquina.

4.4 RESUMEN DE LOS GENERADORES Y MOTORES SÍNCRONOS

Del misma forma que, un generador de corriente continua puede funcionar como motor, un generador síncrono también puede trabajar como motor síncrono; por lo que si se tienen dos generadores síncronos trabajando acoplados en paralelo se puede invertir el funcionamiento de uno de ellos como motor, lo cual se logra cuando la máquina motriz de uno de ellos se desconecta de la fuente de energía que lo alimenta, con lo cual el generador acoplado a ella no detiene su marcha por estar acoplado eléctricamente al otro generador síncrono, o fuente de tensión alterna, con lo cual en vez de suministrar energía a la red de alimentación como lo hacia inicialmente, ahora la absorbe invirtiendo así su funcionamiento y en estas condiciones al generador síncrono se le denomina “motor síncrono”.

Conforme a lo anterior, podemos decir que un motor síncrono es una máquina la cual transforma la energía eléctrica en mecánica y para su operación requiere de la alimentación requiere de dos corrientes eléctricas; ya que su devanado inductor se alimenta con corriente continua y el devanado del inducido con corriente alterna.

4.5 CONDENSADOR SÍNCRONO

Un condensador síncrono es un motor síncrono que funciona sin carga mecánica, cuyo propósito principal es elevar el factor de potencia a la unidad o cercano a la unidad; con lo cual en el sistema eléctrico en que se encuentre conectado y mediante ciertos ajusten en su corriente de excitación, se reducen las pérdidas eléctricas, se eleva el rendimiento, se mejora la regulación de tensión y el sistema eléctrico opera con buena estabilidad. Regulando la corriente de excitación del motor síncrono este puede producir y consumir potencia reactiva.

Cuando se conecta a un circuito en el que la corriente esta atrasada respecto a la tensión, es decir en donde la carga es inductiva, el condensador síncrono se hace que funcione sobreexcitado con lo cual suministra potencia reactiva al circuito que lo alimenta. Si la carga del circuito es capacitiva la cual origina que la corriente adelante con respecto a la tensión, el condensador síncrono funciona subexcitado, lo cual origina que absorba de la red de alimentación potencia reactiva y se logre ajustar el factor de potencia a la unidad. Generalmente el condensador síncrono funcione como productor de potencia reactiva, se proyectan normalmente de forma

que su potencia de sobreexcitación sea aproximadamente el doble que su potencia de subexcitación.

La construcción del condensador síncrono es similar a la de los grandes motores de alta velocidad, excepto que el devanado de excitación es más robusto, con el propósito de soportar una mayor corriente de excitación requerida para el funcionamiento sobreexcitado y además el eje y los cojinetes pueden ser ligeros, debido a que no existe carga mecánica acoplada a ellos. En general son máquinas de polos salientes con ocho polos o más.

UNIDAD V MOTORES DE INDUCCIÓN

5.1 CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Los motores eléctricos son los medios dinámicos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica que se obtiene en la fecha de los mismos el cual al ser acoplado a un dispositivo desarrollan un trabajo.

La construcción del motor es relativamente sencilla, tiene dos partes fundamentales que se denominan estator y rotor. Ambas partes llevan un devanado que al ser excitado con energía eléctrica crean dos campos magnéticos, los cuales al acoplarse desarrollan un par de fuerzas que dan origen a la rotación y se crea así un movimiento en el rotor.

Existe un amplio rango de tipos y tamaños de motores, los cuales no todos están hechos de la misma forma. Las partes principales que intervienen en la fabricación de un motor y particularmente de un motor de inducción son:

Núcleo del estator, está formado por un conjunto de laminaciones troqueladas de un rollo de acero eléctrico que puede ser al silicio o de bajo carbono con pérdidas controladas. Con estas láminas se forma un paquete de ciertas dimensiones dependiendo del tamaño del núcleo; este paquete puede ser remachado o soldado, ya sea individualmente o a la carcasa, dependiendo del tamaño y tipo del motor. En la figura 5.1 se muestra el conjunto de laminaciones que forman el núcleo del estator de un motor de inducción pequeño.

Devanado del estator, es la parte más importante del motor desde el punto de vista eléctrico. Se compone de bobinas formadas por uno o más conductores de cobre aislado. Actualmente se utiliza barniz como aislamiento, cuya calidad depende del tipo de motor. En el devanado del estator se origina el campo magnético necesario para el funcionamiento del motor, el cual se debe alimentar con corriente alterna. Hay una gran variedad de devanados, sin embargo, los más usados son: el **concéntrico**, se fabrica por medido de máquinas automáticas y se usa en los motores pequeños; El otro devanado es el de **canasta** el cual es hecho manualmente y es el que tiene un mayor uso en los motores.

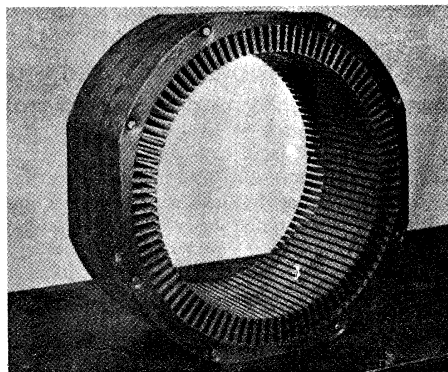


FIGURA 5.1 NÚCLEO DEL ESTATOR CON RANURAS SEMIABIERTAS

Carcasa, es la parte que le da forma al motor y en donde es ensamblado el estator y su devanado; puede se de lámina de acero rolada y soldada o de fundición de hierro gris. Esta última se usa para motores cerrados con ventilación exterior y debido a ello lleva en toda la superficie aletas, lo que permitirá una mejor disipación del calor.

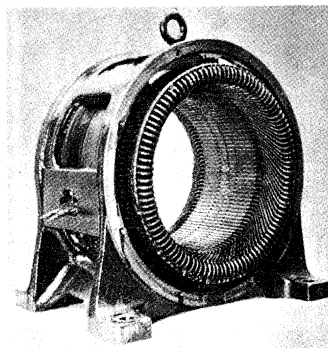


FIGURA 5.2 CARCASA CON EL NÚCLEO DEL ESTATOR Y SU DEVANADO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Núcleo del rotor, se forma igual que el núcleo del estator, pero con la diferencia que el paquete de laminaciones es prensado en unos moldes. En la figura 5.3 se muestra una lámina del paquete de ellas que forman el núcleo del rotor, en la cual se muestran los taladros de él para un rotor de doble jaula de ardilla, la cual tiene el doble de ranuras en la jaula superior que en la inferior.

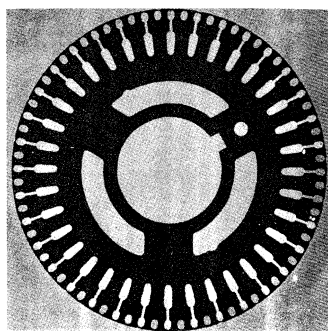


FIGURA 5.3 TROQUEL DE UNA LÁMINACION DEL NÚCLEO DEL ROTOR DE DOBLE JAULA

Devanados del rotor, el devanado secundario del motor es el devanado de armadura y se coloca en las ranuras del núcleo del rotor. El devanado de armadura no está conectado a una fuente de potencial sino que toma su tensión por inducción magnética del flujo originado por el devanado del estator, motivo por el cual se deriva el nombre de motor de inducción. Hay dos clases generales de devanados del rotor, llamados devanado jaula de ardilla y devanado de fase aislado.

En el devanado tipo jaula de ardilla, al paquete de laminaciones se le inyecta aluminio fundido a presión, creándose dentro del paquete lo que es el devanado jaula de ardilla con sus anillos que componen el cortocircuito ya integrado. Los anillos de corto circuito llevan en la parte exterior unas aletas o aspas, las cuales al girar el rotor remueven el aire mejorando el enfriamiento del motor. En la figura 5.4 se muestra un rotor con devanado jaula de ardilla con barras, anillos finales y aspas de ventilación de aluminio fundido, así como la flecha y rodamientos.

En la figura 5.5 se muestra un núcleo del rotor con las ranuras para instalar un devanado de fase aislada. Estos rotores usualmente son trifásicos. Para el arranque y control se conectan los principios de las fases a los anillos rosantes que se instalan en la flecha en los cuales hacen contacto unas escobillas a través de las

cuales se conecta un reóstato externo de arranque con el cual se efectúa el cortocircuito del devanado para conectar. Al rotor de fase devanada se le conoce simplemente por rotor devanado o rotor de anillos rozantes.

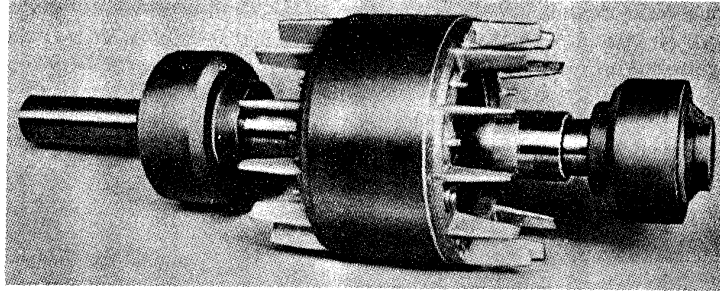


FIGURA 5.4 ROTOR COMPLETO TIPO JAULA DE ARDILLA

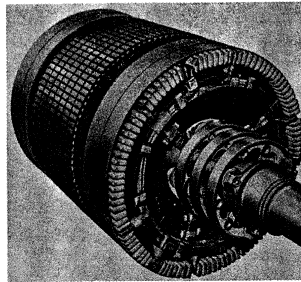


FIGURA 5.5 ROTOR COMPLETO DE FASE AISLADA
(ROTOR DEVANADO)

Flecha, es la parte más resistente del motor porque trasmite la energía mecánica obtenida hacia la carga aplicada al motor. Está hecha de acero con ligeros contenidos de manganeso, azufre y fósforo para darle alta resistencia al esfuerzo torsional que se presenta al estar funcionando el motor.

Rodamientos, generalmente son las únicas partes del motor que sufren desgaste, por recibir el mayor trabajo en el motor y bajo condiciones normales de operación son las únicas partes que se remplazan.

Aislamientos, la función básica del sistema aislante en los motores es la de aislar con seguridad los componentes que conducen la corriente eléctrica entre sí, y proteger contra agentes ambientales nocivos como el polvo, productos químicos y otros, además del calor y vibraciones. Los aislamientos requeridos dependen del lugar en el que trabajará el motor y de las características de los materiales aislantes

Los aislamientos para los motores suelen clasificarse con letras tales como A, B, F y H; a cada una le corresponde un límite de temperatura máxima de funcionamiento expresada en grados centígrados, las cuales son:

CLASE DE AISLAMIENTO	LÍMITE DE TEMPERATURA °C
A	105
B	130
F	155
H	180

En la figura 5.6 se muestra una vista descubierta de un motor de inducción con rotor jaula de ardilla, del tipo totalmente cerrado, con ventilación. En la figura 6.7 se muestra un motor de tamaño medio con rotor devanado.

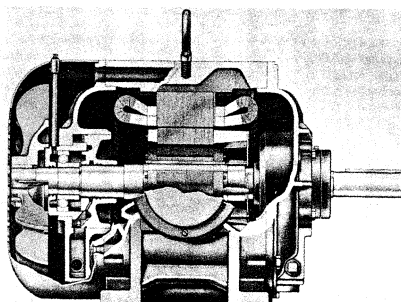


FIGURA 5.6 CORTE TRANSVERSAL DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA

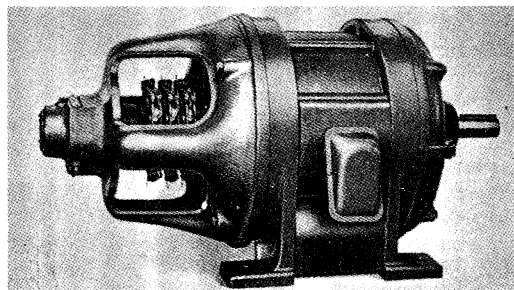


FIGURA 5.7 MOTOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO

5.2 CONCEPTOS BÁSICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

El funcionamiento del motor de inducción es, básicamente el mismo que tienen los motores síncronos con devanado amortiguador. A continuación se darán unos conceptos básicos y se definirán algunos términos importantes de los motores de inducción.

Velocidad de sincronismo

Este término se refiere a la velocidad en revoluciones por minuto (rpm) del campo magnético giratorio que origina la corriente suministrada por la red de alimentación alrededor del estator. Esta velocidad de sincronismo (N_s) se determina con la siguiente ecuación:

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

Deslizamiento

Los motores de inducción nunca operan a la velocidad de sincronismo (N_s), ya que su rotor tiene que girar siempre a una velocidad ligeramente menor a la del campo magnético giratorio del estator, para que las líneas de fuerza magnética corten a los conductores del rotor e induzcan en ellos una fem y corriente necesaria para que se origine el movimiento del rotor.

Esta diferencia entre la velocidad real de operación del motor de inducción (motor asíncrono) y la velocidad de rotación del campo magnético del estator se llama deslizamiento del motor. El deslizamiento se representa por la letra “S” y

generalmente se expresa en % de la velocidad de sincronismo N_s . El porcentaje de deslizamiento se determina por medio del uso de la siguiente ecuación:

$$S = \left(\frac{N_s - N_r}{N_s} \right) 100 \quad 6.1$$

S es el deslizamiento en %

N_s es la velocidad síncrona en rpm

N_r es la velocidad del rotor en rpm

El deslizamiento de un motor variará conforme a la carga que se le conecte al eje del motor. Si se aumenta la carga se reduce la velocidad del rotor y esto hace que el campo magnético corte los conductores del rotor, por lo tanto se puede producir en el rotor la corriente inducida más intensa y necesaria para mantener el par motor que ha aumentado con la carga mayor.

La velocidad del motor tiene un límite finito. Si el rotor del motor llega a girar a la velocidad síncrona, sus barras estarían estacionarias con respecto al campo magnético y entonces no se induciría tensión; por lo que si la tensión inducida fuera igual a cero, no habría corriente en el rotor y ni campo magnético, con lo cual el par sería cero y por la fricción, el rotor se frenaría. Por lo tanto, un motor de inducción puede girar a la velocidad cercana a la síncrona pero nunca alcanzará exactamente la velocidad síncrona.

La tensión inducida en una barra del rotor del 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 la tensión y la corriente del rotor, con lo cual es más conveniente considerar la velocidad relativa. Para definirla se utiliza comúnmente dos términos; uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, la cual se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$N_{desliz} = N_s - N_r \quad 5.2$$

de donde

N_{desliz} velocidad de deslizamiento del motor

N_s velocidad del campo magnético (síncrona)

N_r velocidad mecánica del eje 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 por ciento, la cual se puede determinar por medio de la ecuación 6.3, o 6.1.

$$S = \left(\frac{N_{desliz}}{N_s} \right) 100 \quad 5.3$$

si el deslizamiento es de 100%, entonces la tensión E_r inducida en cada barra del rotor es igual a la fuerza contraelectromotriz por conductor en el estator. Con lo cual se tendrá que:

$$E_r = SE_1$$

con relación a la igualdad anterior, se observa que un motor funcionando en reposo se comporta con un transformador.

la frecuencia en el rotor a cualquier deslizamiento a cualquier frecuencia de alimentación es:

$$f_r = Sf_1$$

$$f_r = \frac{p}{120}(N_s - N_r)$$

en cuanto a la corriente en el rotor (I_r), su valor esta dado por:

$$I_r = \frac{\text{Tensión inducida}}{\text{Impedancia}}$$

el deslizamiento necesario para producir la fuerza que impulsa la carga nominal del motor depende de las características de éste. Según el tipo de motor, el deslizamiento a plena carga puede variar entre el 2 y 20%.

Par de plena carga, par de arranque y par máximo

El término par - motor se refiere al esfuerzo giratorio desarrollado por un motor, por lo cual los periodos del par – motor que se deben tomar en cuenta al seleccionar los motores con características apropiadas son:

Par de plena carga (T), este par sirve de base para la comparación entre el par de arranque y el máximo, por lo tanto se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{(716,5)CP}{rpm} \quad 5.4$$

de donde:

T = Par de plena carga

CP = Potencia nominal del motor en caballos de potencia

Par de arranque, es el esfuerzo de giro ejercido por un motor al arrancar, el cual es determinante y siempre se debe considerar al seleccionar lo que tiene que arrancar con fuertes cargas. Este par de arranque varía de 2 a 5 veces respecto al par de plena carga, dependiendo del tipo de construcción del motor y la tensión entre fases aplicada durante el arranque. El par de arranque de un motor de inducción varía en proporción directa al cuadrado de la tensión durante el arranque.

Par máximo, es el valor más alto de par que puede desarrollar el motor sin que tienda a frenarse; suele llamarse también “par de desenganche”, debido a que es el valor del par que hace que el motor disminuya su velocidad súbitamente y tienda a “desengancharse” de la carga. El par máximo de los motores comunes de c.a. varía entre 1,5 y 3 veces el par de plena carga.

Además de los pares antes mencionados, se tienen otros pares como son el par mínimo, debido a que después de que el motor se ha puesto en movimiento, comúnmente el par tiende a un valor más bajo, y el par de aceleración, que es la diferencia entre el par desarrollado por el motor y el par requerido para la carga a una velocidad determinada.

5.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Un motor de inducción necesita para su operación que el circuito del estator induzca tensión en el circuito del rotor (efecto transformador) para que en éste se origine una corriente. Con relación a lo anterior, el circuito equivalente de un motor de inducción será muy similar al circuito equivalente de un transformador. Debido a que el motor de inducción no tiene un circuito de excitación independiente, su modelo no tiene una fuente de tensión interna como la tensión E_A existente en las máquinas síncronas. Con base a los transformadores y considerando que la frecuencia del rotor varía con la velocidad del motor y otros efectos similares del motor de inducción, es posible determinar su circuito equivalente.

La diferencia fundamental entre el circuito equivalente de un motor de inducción y de un transformador, se debe a los efectos que la frecuencia variable del rotor produce en la tensión inducida en el rotor E_R y en la impedancia del rotor es decir, en la resistencia R_R y reactancia X_R del rotor.

Modelo del circuito del rotor. Cuando se aplica tensión al devanado del estator de un motor de inducción, se induce una tensión en el devanado del rotor de la máquina. Generalmente se tiene que a mayor velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético del estator, será mayor la tensión resultante en el rotor. La mayor velocidad relativa se presenta cuando el rotor está en reposo, condición conocida como motor a “rotor boqueado” o “rotor frenado”. Conforme a la figura 6.8 la tensión inducida en el rotor en condiciones de reposo se denomina E_{RO} entonces la tensión inducida en el rotor a un deslizamiento cualquiera estará dada por:

$$E_R = SE_{RO}$$

la resistencia del rotor es de magnitud constante e independiente del deslizamiento, mientras que la reactancia se ve afectada por el deslizamiento.

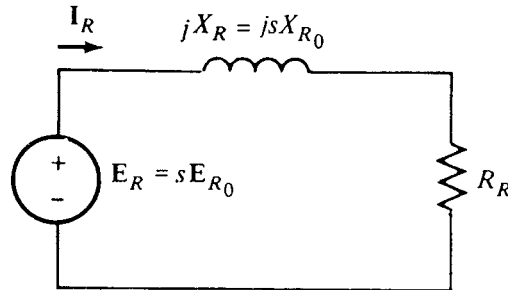


FIGURA 5.8 CIRCUITO ELÉCTRICO DEL ROTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN EN REPOSO.

La reactancia en un motor de inducción depende de la inductancia propia del rotor, de la frecuencia y corriente que exista en él. Con una inductancia del rotor L_R la reactancia se determina por:

$$X_R = \omega_r L_r = 2\pi f_r L_R$$

Conforme a la ecuación $f_r = Sf_e$, se tiene

$$X_R = 2\pi Sf_e L_R = S(2\pi f_e L_R)$$

de donde

$$X_{RO} = 2\pi f_e L_R$$

con lo cual, la reactancia en el rotor queda determinada por:

$$X_R = SX_{RO} \quad 5.5$$

de donde X_{RO} es la reactancia del motor a rotor bloqueado.

La corriente en el rotor se puede determinar por:

$$I_R = \frac{SE_{RO}}{R_R + jSX_{RO}} = \frac{E_{RO}}{\frac{R}{S} + jX_{RO}} \quad 5.6$$

la ecuación anterior nos indica que todos los efectos debidos a la velocidad variable del rotor se pueden simular mediante una impedancia variable alimentada con una fuente de tensión constante E_{RO} , con lo cual la impedancia equivalente del motor se determina por:

$$Z_{Req} = \frac{R_R}{S} + jX_{RO} \quad 5.7$$

el circuito eléctrico equivalente del rotor considerando esta convención se muestra en la figura 5.9, en la cual la impedancia equivalente contiene todos los efectos del deslizamiento variable del rotor.

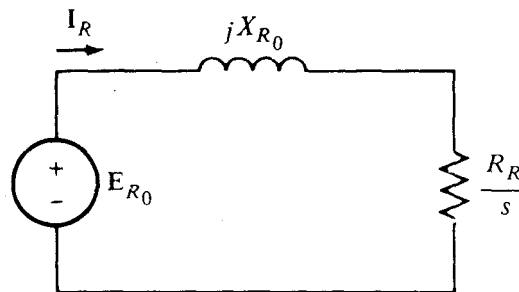
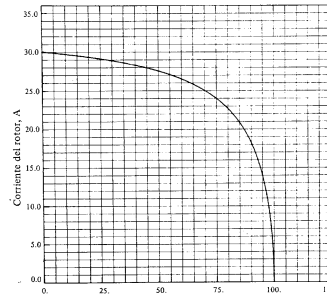


FIGURA 5.9 CIRCUITO ELÉCTRICO DEL ROTOR CON EL EFECTO DEL DESLIZAMIENTO VARIABLE

Del circuito eléctrico anterior se puede observar que a deslizamientos muy bajos el valor de la resistencia es mayor a de la reactancia ($R_R/S > X_{RO}$), de tal manera que al predominar la componente resistiva la corriente varía linealmente con el

deslizamiento. A deslizamientos altos, X_{RO} es mucho mayor que R/s y la corriente del rotor tiende a un valor de estado estacionario a medida que el deslizamiento aumenta.



N_r en porciento de la velocidad síncrona

FIGURA 5.10 CORRIENTE DEL ROTOR EN FUNCIÓN DE SU VELOCIDAD

Circuito equivalente completo del motor de inducción. Para establecer el circuito equivalente definitivo, por fase de un motor de inducción es necesario referir la parte del rotor al nivel de tensión del circuito del estator; con lo cual el circuito eléctrico del motor quedará completo y queda representado tal como se muestra en la figura 5.11.

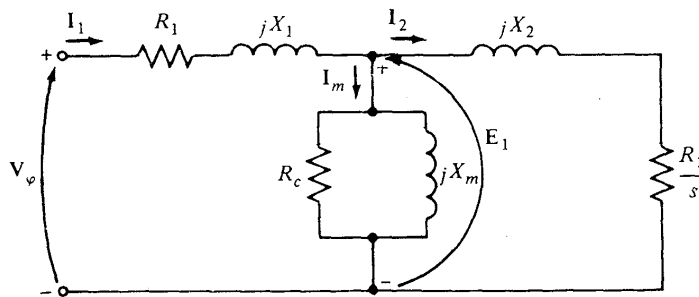


FIGURA 5.11 CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

En un transformador la tensión, corriente e impedancia del secundario se puede referir al lado primario por medio de la relación de espiras del transformador (relación de transformación). Para el circuito del motor de inducción se puede hacer exactamente lo mismo que con los transformadores. Si la relación de espiras

efectivas en un motor la representamos por a_{ef} entonces la tensión referida del rotor es:

$$E_2 = E'_R = a_{ef} E_{RO} \quad 5.8$$

la corriente del rotor es

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}} \quad 5.9$$

y la impedancia del rotor se convierte en

$$Z_2 = a_{ef} \left(\frac{R_R}{S} + jX_{RO} \right) \quad 5.10$$

si se consideran las siguientes definiciones:

$$R_2 = a_{ef}^2 R_R \quad 5.11$$

$$X_2 = a_{ef}^2 X_{RO} \quad 5.12$$

para un motor con rotor jaula de ardilla es muy difícil, determinar directamente la resistencia del rotor, la reactancia del rotor con rotor bloqueado y la relación de espiras efectivas entre el estator y rotor (a_{ef}). Sin embargo, es posible efectuar mediciones que den directamente valores de resistencia R_2 y reactancia X_2 , aunque no se conozcan las magnitudes de R_R , X_{RO} y a_{ef} . La medición de los parámetros de un motor de inducción se pueden determinar mediante pruebas al motor.

5.3 PAR Y POTENCIA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

En la figura 5.11 se indica el circuito equivalente por fase de un motor de inducción, el cual se puede utilizar para deducir las ecuación de par y potencia que rigen el comportamiento del motor.

La corriente de entrada por fase del motor, se puede determinar dividiendo la tensión por fase V_ϕ aplicada al motor entre la impedancia equivalente total de él, es decir:

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad 5.13$$

donde

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_c - jB_m + \left(\frac{1}{R_2 + jX_2} \right)} \quad 5.14$$

G_c es la conductancia del motor

B_m es la suceptancia del motor

las pérdidas en el cobre de las tres fases del estator de determinan por:

$$W_{est} = 3I_1^2 R_1 \quad 5.15$$

las pérdidas en el núcleo están dadas por

$$W_{núcleo} = 3E_1^2 G_c = \frac{3E_1^2}{R_c} \quad 5.16$$

la potencia en el entrehierro es

$$P_{sh} = P - W_{est} - W_{núcleo} \quad 5.17$$

del circuito equivalente del motor se observa que, el único elemento de él donde se puede disipar la potencia del entrehierro es la resistencia R_2/S , por lo que, también se puede expresar como:

$$P_{eh} = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad 5.18$$

el valor real de las pérdidas en el rotor del motor, están dadas por:

$$W_R = 3I_R^2 R_R \quad 5.19$$

al igual que en un transformador ideal, la potencia en un motor de inducción también se mantiene invariable, con lo cual las pérdidas en el cobre del rotor se representan por:

$$W_R = 3I_2^2 R_2 \quad 5.20$$

finalmente la potencia mecánica desarrollada por el motor, se puede determinar por:

$$P_m = P_{sh} - W_R = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} - 3I_2^2 R_2$$

$$P_m = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1}{S} - S \right) = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad 5.21$$

Al relacionar las ecuaciones 5.18 y 5.20 se tiene que las pérdidas en el cobre del rotor son iguales a la potencia del entrehierro multiplicada por el deslizamiento.

$$W_R = SP_{eh} \quad 5.22$$

para deslizamientos bajos del motor, las pérdidas en el rotor de la máquina son menores. También si el rotor está en reposo ($S=1$), toda la potencia del entrehierro se disipa en el rotor; por lo tanto la relación entre la potencia del entrehierro y la potencia eléctrica convertida en mecánica también se puede expresar como:

$$P_m = P_{eh} - W_R = P_{eh} - SP_{eh}$$

$$P_m = (1 - S)P_{eh} \quad 5.23$$

si se conocen las pérdidas por fricción (W_{fric}) y ventilación (W_{vent}), se puede conocer la potencia de salida del motor.

$$P_{sal} = P_m - W_{fric} - W_{vent} \quad 5.24$$

El par producido en el motor de inducción se define como el valor del par generado por la potencia eléctrica que se convierte en potencia mecánica. Este par es distinto del par disponible en el eje del motor y la diferencia es igual al par al par que origina la ventilación y la fricción de la máquina; con lo cual el par producido τ_{ind} se puede determinar por:

$$\tau_{ind} = \frac{P_m}{\omega_m} \quad 5.25$$

este par también es conocido como par desarrollado por la máquina, el cual en función del deslizamiento, de la velocidad síncrona. la potencia convertidas en función del deslizamiento y la potencia del entrehierro, se obtiene:

$$\tau_{ind} = \frac{(1 - S)P_{eh}}{(1 - S)\omega_{sin c}}$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{eh}}{\omega_{sin c}} \quad 5.26$$

con lo cual si se conoce la potencia del entrehierro, se puede conocer se puede conocer el par producido en la máquina.

5.3 CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

El par producido en los motores es proporcional al producto de tres términos que son:

- El campo magnético del rotor el cual es directamente proporcional a la corriente del rotor, mientras que este no éste saturado. La corriente del rotor aumenta si crece el deslizamiento con lo cual decrece la velocidad.
- El campo magnético neto en el motor es proporcional a la tensión del estator (E_1) y por lo tanto es aproximadamente constante.
- El ángulo existente entre el campo magnético neto y el rotor. En la figura 5.12, se muestra que el ángulo δ es igual al ángulo del factor de potencia del rotor más 90° ; por lo tanto:

$$\text{sen}\delta = \text{sen}(\theta_R + 90^\circ) = \cos\theta_R$$

donde, $\cos\theta_R$ es el factor de potencia del rotor

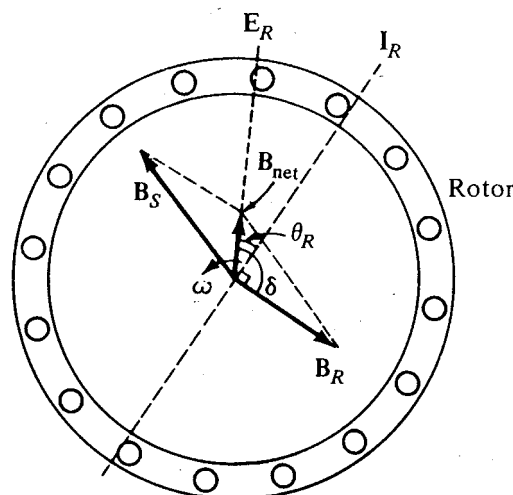


FIGURA 5.12 CAMPO MAGNÉTICO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN
CON CARGA PESADA

El ángulo del factor de potencia del rotor se puede calcular a partir de la ecuación.

$$\theta_R = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{X_R}{R_R}\right) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{SX_{RO}}{R_R}\right) \quad 5.27$$

Finalmente el factor de potencia del rotor puede expresarse con la siguiente ecuación:

$$FP_R = \cos\theta_R$$
$$FP_R = \cos\left[\operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{SX_{RO}}{R_R}\right)\right] \quad 5.28$$

Con relación a lo anterior, se puede construir la característica par-velocidad de un motor de inducción la cual se representa en la figura 5.13. Esta curva característica se puede dividir en tres regiones que son:

Región de deslizamiento bajo. En esta región el deslizamiento del motor crece casi linealmente con el aumento de la carga, y la velocidad mecánica del rotor disminuye en la misma proporción. En esta región de funcionamiento de la máquina, la reactancia del rotor es despreciable, el factor de potencia del rotor es casi la unidad y la corriente aumenta linealmente con el deslizamiento. Por lo tanto, en operación normal el motor de inducción tiene una disminución de su velocidad linealmente.

Región de deslizamiento moderado. En esta región, la frecuencia del rotor es mayor que en el caso anterior y la reactancia del rotor es igual a la magnitud de su resistencia. En esta región, la corriente del rotor no aumente tan rápidamente como en el caso anterior pero el factor de potencia empieza a disminuir. El par máximo de salida se presenta en un punto en el que, con un pequeño incremento de la

carga, el aumento en la corriente del rotor es exactamente contrarrestado por una disminución en el factor de potencia del rotor.

Región de deslizamiento alto. En esta región el par producido disminuye con el aumento de la carga, de forma tal que el descenso del factor de potencia del rotor predomina sobre el aumento de la corriente en el rotor.

En la figura 5.14, se muestra la curva característica par-velocidad de una maquina de inducción incluyendo la región de funcionamiento como freno y la región de funcionamiento como generador.

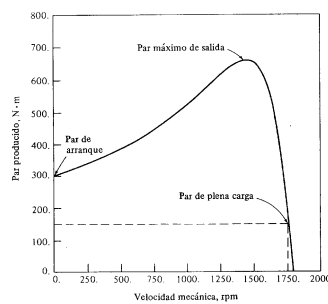


FIGURA 5.13 CURVA CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN.

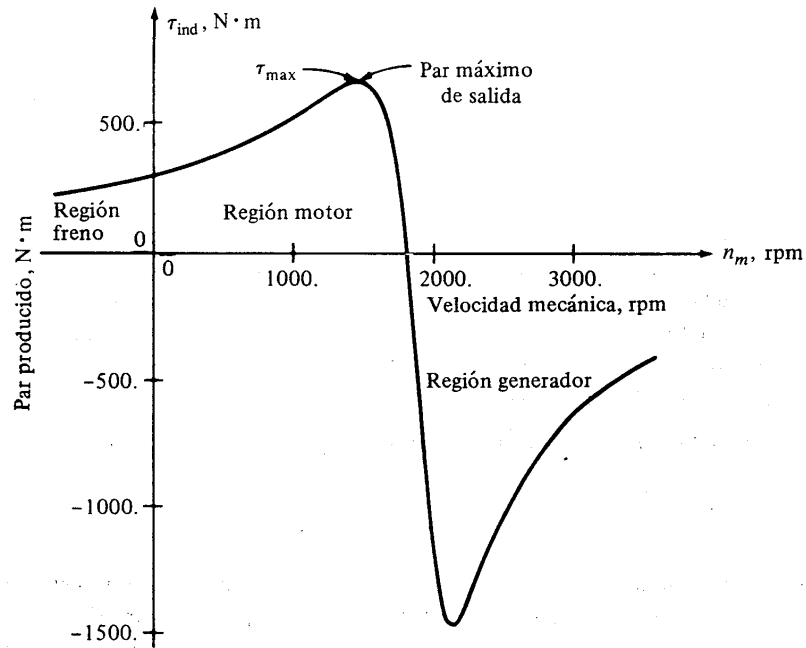


FIGURA 5.14 CURVA CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN INCLUYENDO LOS RANGOS DE OPERACIÓN.

En la figura 5.15 se muestra la curva característica de par-velocidad del motor de inducción tipo jaula de ardilla, conforme a los tipos básicos considerados en la norma NEMA MG1-1.16.

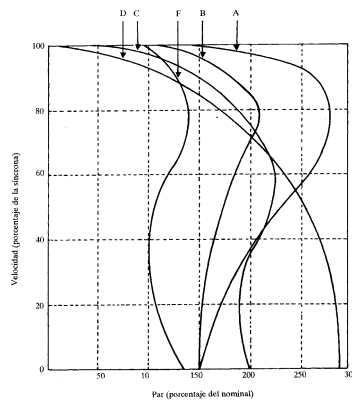


FIGURA 5.15 CURVA PAR-VELOCIDAD CONFORME AL DISEÑO NEMA.

En la figura 5.16 se muestra la curva característica de la variación de la potencia con la velocidad del motor de inducción jaula de ardilla.

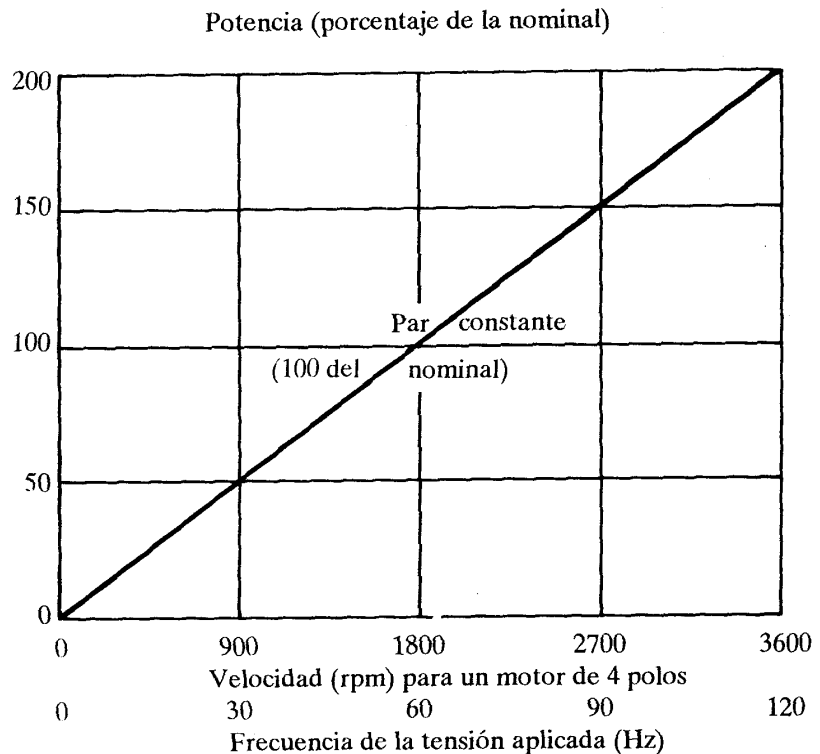


FIGURA 5.16 CURVA DE LA VARIACIÓN DE LA POTENCIA CON LA VELOCIDAD

En lo que se refiere a los motores de inducción de rotor devanado, se puede tener un mayor control en cuanto a su velocidad y corriente de arranque. Con forme a lo anterior, las ventajas que tiene un motor de rotor devanado con respecto al de jaula de ardilla son:

- 1) Posibilidad de obtener un par de arranque adaptado a la máquina o equipo impulsado.
- 2) Reducción máxima de la demanda de corriente de arranque.
- 3) Permite arranques de larga duración o frecuentes con la ayuda de resistencias apropiadas.
- 4) Posibilidad de controlar dentro de ciertos límites la velocidad para diferentes cargas.

Es posible obtener diferentes curvas de operación cuando al motor de rotor devanado se le varía la resistencia del circuito secundario (circuito del rotor), las cuales se muestran en la figura 5.17. la adición de resistencia permite variar el par de arranque del motor, pero no modifica el par máximo cuyo valor queda fijo por la reactancia del devanado primario y secundario. Lo que si puede variar es el deslizamiento en el que ocurre el par máximo.

La adición de la resistencia externa al devanado del rotor permite reducir la corriente inicial, incrementar el par de arranque hasta el valor del par máximo y ajustar la operación de él dentro de ciertos límites.

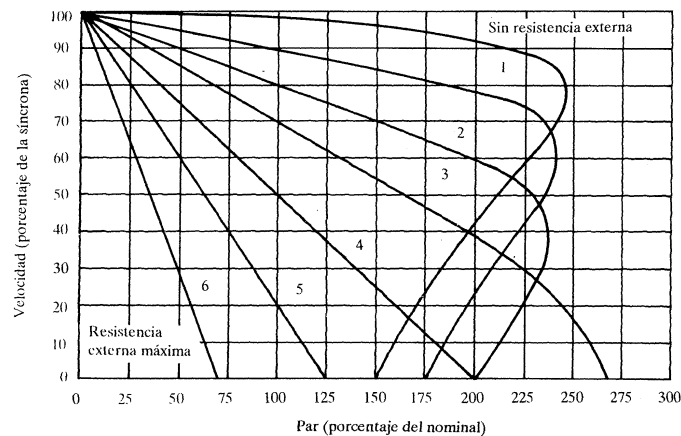


FIGURA 6.17 EFECTO DEL CAMBIO DE RESISTENCIA EN EL DEVANADO DEL ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO

6.6 DISEÑO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Modificando las características del rotor de los motores de inducción puede obtenerse una variedad de curvas par-velocidad. Para seleccionar apropiadamente los motores para las variadas aplicaciones y cualquier potencia, Los tipos básicos de motores de inducción se derivan de la norma NEMA MGI-1.16 en los Estados Unidos y la IEC (International Electrical comisión) en Europa han definido una serie de diseños normalizados con diferentes curvas par-velocidad. Estos diseños se conocen como “clases de diseño”, las cuales se describen a continuación.

Diseño clase A. Estos motores tienen un diseño común, con un par de arranque normal, una corriente de arranque normal y deslizamiento bajo. A plena carga estos motores deben tener un deslizamiento menor de 5% y debe ser menor que el de un motor de potencia equivalente de clase B. El par máximo de salida es de 200 a 300 % del par de plena carga y se presenta a un deslizamiento bajo. El par de arranque es cercano al 150% del par normal, además su eficiencia y factor de potencia es aceptable. El principal problema de esta clase de diseño es que su corriente de arranque puede ser 6 a 10 veces la corriente nominal. Algunas aplicaciones típicas de estos motores son en impulso de ventiladores, bombas, tornos y otras máquinas herramientas.

Diseño clase B. Estos motores tienen un par de arranque normal, corriente de arranque pequeña y deslizamiento bajo. Estos motores producen aproximadamente el mismo par de arranque que los motores clase A, con una corriente alrededor de 25% menor. Estos motores tienen mayor reactancia que uno de diseño A, lo cual se logra mediante el uso de barras delgadas y profundas en el rotor lo cual permite reducir la corriente de arranque a un valor del orden de 5 veces la nominal. Las aplicaciones de estos motores son similares a los de la clase A, pero se prefieren los de la clase B por su menor corriente de arranque.

Diseño clase C. Estos motores tienen un alto par de arranque con corriente de arranque pequeña y funciona con un bajo deslizamiento (menor que el 5%) a plena carga. El par máximo de salida es ligeramente menor que el de los motores de la clase A y B, aproximadamente 180% del nominal, pero su par de arranque es superior a 250% del par de plena carga. Estos motores se fabrican con rotor de doble jaula de ardilla, lo cual los hace más costosos que los de la clase A y B. Se utiliza con cargas que requieren alto par en el arranque, tales como bombas cargadas, compresores y bandas transportadoras.

Diseño clase D. Estos motores tienen un par de arranque muy alto (aproximadamente 275% del nominal) y una corriente de arranque pequeña, pero a plena carga tiene un deslizamiento alto (entre el 7 y 11% pero puede llegar a ser hasta 17% o más) y baja eficiencia. Tienen una alta resistencia en el rotor lo cual origina que el valor máximo del par se presente a velocidades muy bajas; incluso es factible que el mayor par ocurra a velocidad cero (deslizamiento 100%). Estos motores se utilizan en aplicaciones en las que se necesita acelerar cargas con inercias extremadamente altas, especialmente volantes grandes, taladros, prensas, cizallas.

Además de estas cuatro clases de diseño, NEMA admite los **diseños clase E y clase F**, los cuales se conocen como “motores de inducción de arranque suave”. Estos diseños se distinguen porque tienen muy baja corriente de arranque y se utilizan con cargas de pequeño par de arranque y en situaciones en las cuales la corriente de arranque constituye todo un problema. En la actualidad estos diseños se consideran obsoletos.

La corriente que toma un motor de inducción consta de dos componentes: una reactiva o magnetizante y otra activa o de trabajo. La corriente que produce el par (trabajo útil) está prácticamente en fase con la tensión, es decir, su factor de potencia es casi 100%. La componente magnetizante se puede considerar puramente inductiva, salvo por la pequeña resistencia del devanado y porque tal corriente está atrasada 90° respecto a la tensión, por lo cual su factor de potencia es prácticamente cero.

La potencia de un motor aumenta con la velocidad, sin embargo, el par permanece constante y es esencial que no varíe la relación tensión – frecuencia. Lo anterior se refiere a los motores tipo jaula de ardilla. Para los motores de inducción de rotor devanado existen ligeras variantes y para los motores síncronos las características se pueden obtener a partir de las curvas “V”.

El uso de los motores de rotor devanado es mucho menor de lo que era antes que las clases NEMA C, D, E Y F, se desarrollaron para producir el par motor de arranque elevado y la baja corriente de arranque necesario. El motor de rotor devanado con reóstato secundario proporciona las condiciones más eficientes de arranque, es decir, máximo par motor de arranque y mínima corriente de arranque cuando se aplica apropiadamente. Ofrece también la posibilidad del control de la velocidad, aunque a velocidades reducidas el rendimiento es de casi la mitad de su valor con el rotor en cortocircuito. Las principales aplicaciones son donde se requiere un par motor de arranque elevado, baja corriente de arranque y aceleración suave, especialmente cuando se desea alguna regulación de la velocidad.. En cualquier caso debe diseñarse cuidadosamente el reóstato en el rotor para el tipo de servicio requerido. Sus aplicaciones típicas son en: transportadores, quebradoras, máquinas de refrigeración, compresores de aire, maquinaria laminadora de acero, locomotoras. En las aplicaciones de velocidad variable se incluyen montacargas, grúas, ascensores, palas, descargadores de carbón y mineral en bruto, ventiladores, aspiradoras.

5.7 ARRANQUE DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Muchos motores de c.a. pueden arrancarse a tensión plena, con la condición de que la línea de alimentación sea de la potencia adecuada para soportar la corriente de arranque. No obstante, cuando los motores de inducción jaula de ardilla requieren tensión reducida, puede utilizarse ya sea una resistencia o reactancia de arranque o un arrancador del tipo autotransformador. Los arrancadores se aplican simplemente a tensión plena, pero por lo general se incorporan en esta protección de Sobrecorriente.

Arrancadores. Prácticamente todos los motores de inducción jaula de ardilla se diseñan para que puedan arrancarse a plena tensión. Para motores trifásicos que no tengan arranques y paros frecuentes, en potencias y tensiones hasta de 3 cp, 120 Volts, 5 cp, 220Volts y 7.5 cp, 440 Volts, puede utilizarse un arrancador. La protección de sobrecarga está proporcionada por elementos bimetálicos que disparan el interruptor en sobrecarga sostenida. El diagrama esquemático de alambrado de un arrancador manual y los elementos térmicos bimetálicos se indican en las figuras 5. 18 y 5.19, respectivamente.

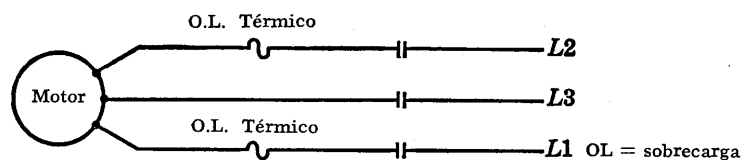


FIGURA 5.18 DIAGRAMA DE ALAMBRADO PARA UN ARRANCADOR MANUAL TRIFÁSICO

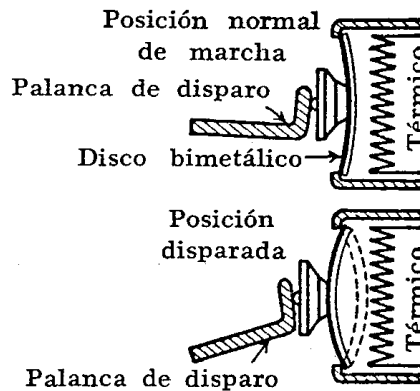


FIGURA 5.19 ELEMENTOS TÉRMICOS BIMETÁLICOS PARA INTERRUPTOR DE ARRANQUE.

La tendencia general es hacia el uso de arrancadores magnéticos, en los cuales la interrupción principal se hace a través de contactores que funcionan magnéticamente. Se usan interruptores de botón de arranque y paro y otros dispositivos de control piloto relativamente pequeños para hacer funcionar las bobinas de los contactores. En la figura 5.20 se muestra el diagrama de conexión para un arrancador magnético trifásico no reversible para motores hasta de 750 cp. Una presión momentánea del botón de arranque alimenta la bobina “M” del contactor principal; ésta cierra los contactos principales M y el contacto de control Ma poniendo en derivación el interruptor de arranque y manteniendo la corriente por la bobina “M”. Los dispositivos bimetálicos de sobrecarga abren el circuito por la bobina “M” en sobrecarga sostenida.

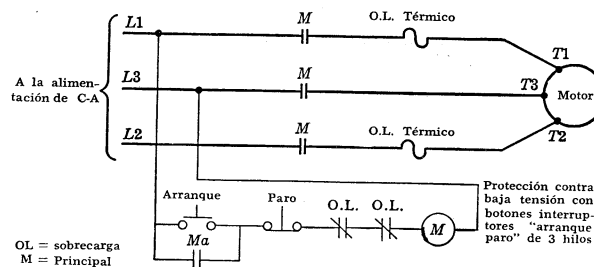


FIGURA 6.20 DIAGRAMA DE ALAMBRADO DE UN ARRANCADOR MAGNÉTICO TRIFÁSICO NO REVERSIBLE.

Cuando se requiere que el motor funcione en cualquier sentido de rotación se requiere de un “arrancador reversible”, cuya construcción es similar a la del tipo no reversible pero mucho más elaborado, ya que requiere de dos grupos de contactores, uno para la marcha hacia delante y otro para reversa. En la figura 6.21 se muestra el diagrama esquemático de alambrado para un arrancador magnético trifásico reversible, con protección de sobrecarga y baja tensión.

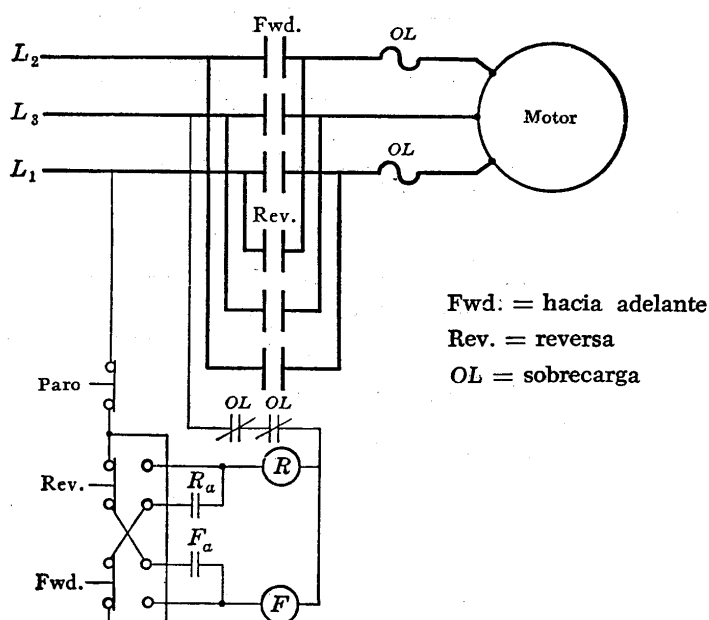


FIGURA 5.21 DIAGRAMA PARA UN ARRANCADOR TRIFÁSICO REVERSIBLE.

Arrancadores de tensión reducida. Cuando es necesario proporcionar tensión reducida para limitar la corriente y el par motor de arranque, se puede llevar a cabo utilizando un autotransformador, o bien insertando resistencia o reactancia en serie con la línea hacia el motor. Cada tipo de arrancador tiene ciertas ventajas y limitaciones. Con el autotransformador, la corriente de línea y el par motor de arranque se reducen con el cuadrado de la tensión en las terminales del motor, mientras que con la resistencia y reactancia en serie con el motor, se reduce la corriente de línea en proporción directa a la tensión y el par motor con el cuadrado de la tensión en las terminales del motor. La figura 5.22 muestra el diagrama esquemático para un arrancador automático manual no reversible

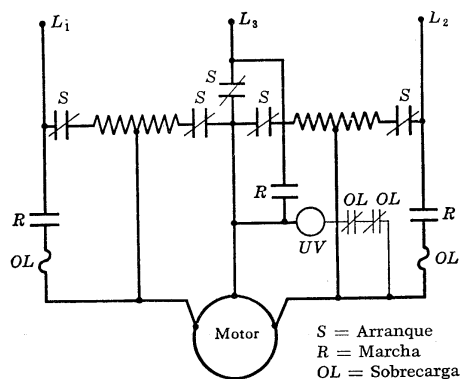


FIGURA 5.22 DIAGRAMA ELÉCTRICO DE UN ARRANCADOR AUTOMÁTICO PARA MOTOR JAULA DE ARDILLA.

Para arrancar el motor se lleva la manija hacia delante a la posición de “arranque”. Esta cierra todos los contactos marcados con “S”, y abren todos los contactos “R”, de la figura 5.22; en estas condiciones se conecta a la línea el autotransformador conectado en delta abierta o V, y el motor se conecta a los puntos de derivación en el transformador para dar tensión reducida. Después de que el motor ha cesado de acelerarse, se lleva la manija a la posición “marcha”, en la cual abre primero los contactos de arranque “S” y cierra después los contactos de marcha “R” para aplicar tensión plena al motor.

Combinadores para motores de rotor devanado. Donde se desea baja corriente de arranque o baja aceleración, o donde se necesita la posibilidad de control de la velocidad del rotor devanado, se requiere un combinador para proporcionar resistencia ajustable del rotor. El combinador es una resistencia conectada en estrella y arreglada con derivaciones, y su brazo está accionado manualmente y permanece en cualquier posición cuando se utiliza el control de la velocidad, o bien se retrocede a abierto, cuando se requiere el servicio de arranque. En la figura 5.23 se muestra el diagrama esquemático de alambrado para un combinador, en el cual el Brazo “a” representa los 3 brazos del arrancador, deslizándose sobre los contactos en las resistencias, y “b” representa un contacto deslizante para propósitos de control, el cual está aislado del brazo. El control está abierto, en tanto el circuito a través de la bobina del contactor principal “M” esté abierto y sus contactos M estén abiertos. Moviendo el brazo del control en el sentido de las manecillas del reloj, los contactos deslizantes “a” y “b” se mueven a la izquierda, y en el primer contacto se establece un circuito traves de la bobina “M” y el contacto principal se cierra.

Los contactos de control M_a se cierran también, así que a medida que “b” se mueve hacia la izquierda se mantiene el circuito a través de la bobina “M”. Si falla la tensión de línea, se abre el contacto M y el brazo regresa a la posición de abierto antes de que el motor pueda arrancarse.

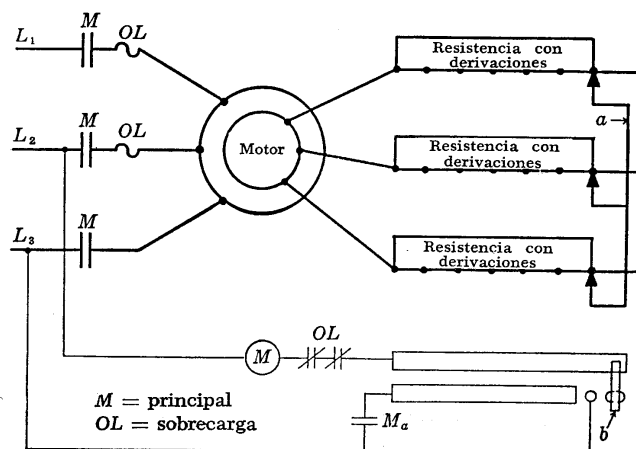


FIGURA 5.23 DIAGRAMA DE CONEXIONES DE UN COMBINADOR PARA MOTOR DE ROTOR DEVANADO PARA EL ARRANQUE Y CONTROL DE VELOCIDAD

Arranque para motores monofásicos. Estos motores se arrancan siempre a tensión plena, por medio de un arrancador o interruptor, que tiene protección térmica de sobrecarga incorporada dentro del mecanismo del interruptor; el cual puede ser manual o magnético con control de botón interruptor. En la figura 5.24 se muestra un interruptor monofásico de resorte para el arranque y protección del motor monofásico.

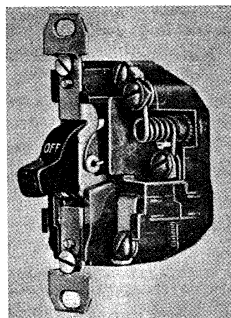


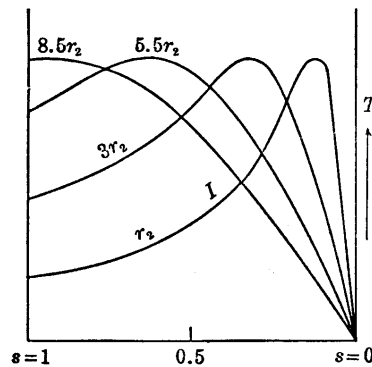
FIGURA 5.24 INTERRUPTOR, CON PROTECCIÓN TÉRMICA PARA MOTORES MONOFÁSICOS.

5.8 CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

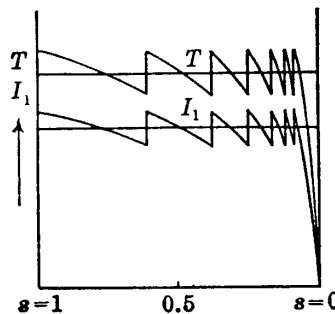
En general los motores de inducción no son máquinas adecuadas para aplicaciones en las cuales se requiere un amplio control de la velocidad; el rango de operación normal de un motor de inducción clase A, B, o C está limitado a menos del 5% de deslizamiento y en este rango la variación de la velocidad es aproximadamente proporcional a la carga conectada al eje del motor. Si se tuvieran un alto deslizamiento, la eficiencia del motor sería baja, ya que las pérdidas en el cobre del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento.

La regulación de velocidad de 1 motor de inducción puede llevarse a cabo en diversas formas, algunas de las cuales se describen en seguida:

a) Regulación de la velocidad por medio de una resistencia en el circuito del rotor. Considérese las figuras 5.25(a) y 5.25(b), así como un motor de rotor devanado.



(a) Característica par motor-velocidad de un motor rotor devanado



(b) Arranque de un motor de inducción de rotor devanado

FIGURA 5.25 CURVAS DE UN MOTOR ROTOR DEVANADO

Considerando las figuras anteriores se tiene que, a la velocidad más elevada el motor funciona en su curva natural par motor-velocidad (Curva I, $r_{est} = 0$) y un punto fijo sobre esta curva corresponde el par motor requerido. Si el deslizamiento en este punto es S_1 , la relación r_t/S para este punto es igual a r_2/S_1 . Si en estas condiciones se cambia la resistencia del rotor a $(r_2 + r_{ext})$, el motor adquiere automáticamente un deslizamiento de S_2 de tal magnitud que se cumple la siguiente relación:

$$\frac{(r_2 + r_{ext})}{S_2} = \frac{r_2}{S_1}$$

debido a que el valor fijo del par motor corresponde a una relación fija de r_t/S . En esta forma puede obtenerse la velocidad variable por medio de una resistencia en el circuito del rotor. Este tipo de control de velocidad no es económico, debido a que el porcentaje de disminución en el rendimiento es casi igual al porcentaje de disminución en la velocidad.

b) Control de la velocidad cambiando el número de polos. Suponiendo una frecuencia de la línea constante, puede obtenerse la variación de la velocidad en pocos pasos variando el número de polos del motor, conforme a la ecuación:

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

Con devanados especiales es posible obtenerse diferentes números de polos por medio de un agrupamiento de bobinas,. El devanado más común de esta clase es el que proporciona la relación 1:2; es decir, para un devanado par 4 y 8 polos con frecuencia $f_1 = 60$ Hertz origina dos velocidades síncronas de 1800 y 900 rpm, respectivamente, las cuales se determinan con la igualdad indicada anteriormente. Si se desea más de dos velocidades, pueden instalarse dos devanados separados en las ranuras del estator. Generalmente se usa un rotor jaula de ardilla para esta clase de variación de la velocidad.

c) Control de velocidad por doble alimentación. En este caso la máquina se comporta completamente diferente cuando la frecuencia secundaria (rotor) no está determinada por el motor de inducción y su grupo regulador, sino por otra fuente de potencia independiente que fija la frecuencia f_2 , tal como se muestra en la figura 5.26. En este caso a la máquina se le conoce como “motor de inducción con doble alimentación”. La frecuencia de ambas fuentes son f_1 y f_2 , de este modo la doble alimentación del motor de inducción tiene dos velocidades fijas a las cuales existe un par motor uniforme. Estas dos velocidades son:

$$n = \frac{120(f_1 \pm f)}{p}$$

en cada una de estas dos velocidades la máquina es capaz de desarrollar pares motores uniformes de magnitudes diferentes, con lo cual el control de la velocidad se lleva a cabo si una de las dos frecuencias se varía continuamente.

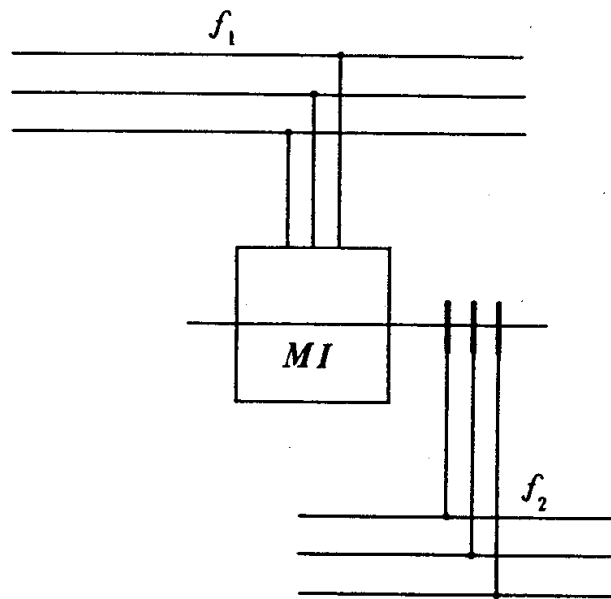


FIGURA 6.26 MOTOR DE INDUCCIÓN CON DOBLE ALIMENTACIÓN

d) Control de velocidad por cambio en la frecuencia de la línea. Si se cambia la frecuencia de la línea que alimenta al estator del motor de inducción, cambiara la velocidad de rotación del campo magnético y el punto de vacío de la curva par motor-velocidad, se desplazará. Para que la corriente de magnetización no varíe demasiado, la tensión aplicada al motor debe reducirse en la misma proporción en la que se reduce la frecuencia; ya que de lo contrario el hierro del motor tendería a saturarse y la corriente de magnetización sería muy elevada. Si la tensión se reduce linealmente con la frecuencia aplicada, las características resultantes par motor-velocidad cambiarán conforme a las curvas mostradas en la figura 5.27

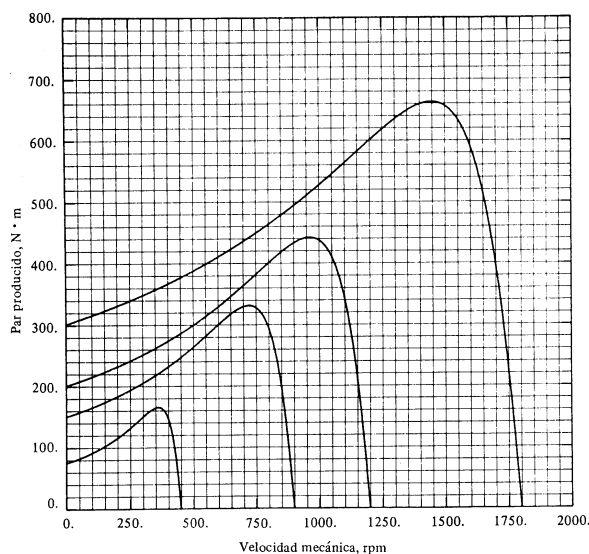


FIGURA 5.27 CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN CON CONTROL DE VELOCIDAD POR CAMBIO DE FRECUENCIA Y TENSIÓN EN LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN.

Anteriormente la principal desventaja del control de frecuencia como método de control de la velocidad, era que para poder operarla se requería de un generador cambiador de frecuencia. En la actualidad este problema ha desaparecido con el uso del variador de frecuencia de estado sólido para controlar la velocidad de los motores.

e) Control de velocidad por variación de la tensión de alimentación. El par desarrollado por un motor es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada. Si la

curva característica par-velocidad de una carga es como la que se indica en la figura 5.28, entonces se puede variar la tensión para controlar la velocidad, pero sólo dentro de un rango limitado. Este método de control de velocidad es utilizado en motores pequeños que accionan ventiladores.

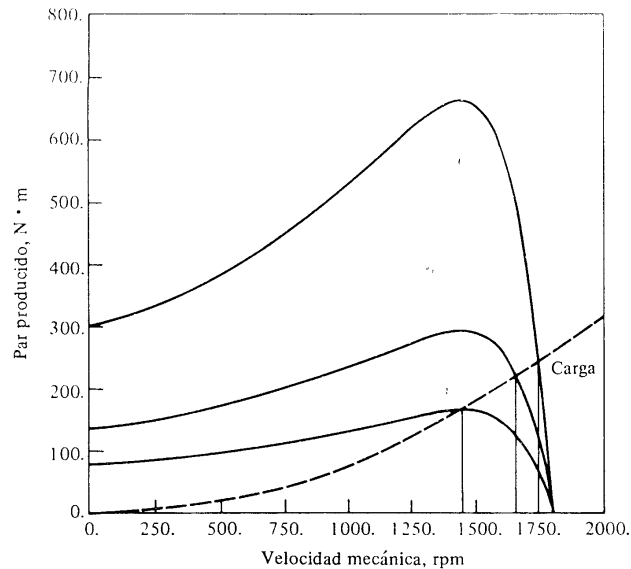


FIGURA 5.28 CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN VARIANDO LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

5.9 DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA DEL MODELO EQUIVALENTE (PRUEBA DE VACÍO)

El circuito equivalente de un motor de inducción es una herramienta muy útil para determinar las respuestas del motor con las variaciones de la carga. Para establecer el modelo de la máquina es necesario determinar los valores de los distintos elementos del modelo de la máquina. Lo anterior se puede determinar, sometiendo al motor de inducción a una serie de pruebas las cuales son análogas a las pruebas de corto circuito y de circuito abierto que se le aplican a los transformadores. Las pruebas a las que se someten los motores se deben realizar bajo condiciones controladas, ya que la resistencia varía con la temperatura y frecuencia del rotor; además los detalles de cómo se deben efectuar las pruebas de los motores de inducción están normalizados y son complicados, pero los conceptos en los cuales se basan son relativamente sencillos.

Prueba de vacío. La prueba de vacío del motor de inducción mide las pérdidas rotacionales del motor y proporciona información de la corriente de magnetización. En la figura 5.29 se muestra el montaje de la fuente de alimentación alterna trifásica de tensión regulada, 3 amperímetros, 1 voltímetro y 2 wáttmetros en el circuito de entrada y el motor se deja girar libremente. La única carga del motor son sus pérdidas por fricción y ventilación, las cuales nos representan las pérdidas mecánicas y el deslizamiento es muy pequeño (aproximadamente de 0,001 o menor).

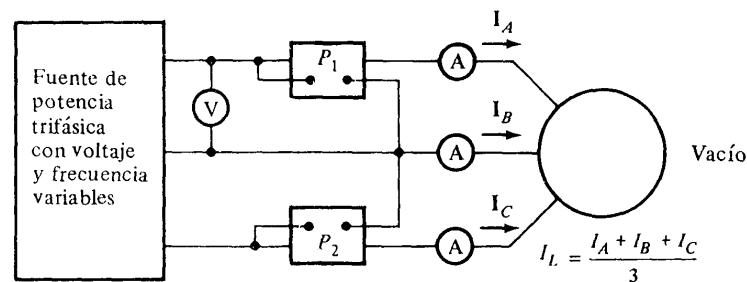


FIGURA 5.29 CIRCUITO ELÉCTRICO PARA LA PRUEBA DE VACÍO

Durante la prueba la carga en la flecha del motor es cero y se toman las lecturas de las siguientes magnitudes:

- La tensión primaria V_1 , la cual se varía desde un valor pequeño hasta la tensión nominal.
- La corriente primaria I_o .
- La potencia de entrada P_o , la cual para este caso debe ser la suma de las potencias medidas en cada Wáttmetro.

La potencia P_o representa las pérdidas de energía del motor en vacío, las cuales incluye a las pérdidas en el cobre del devanado del estator ($P_{cu} = m_1 I_o^2 r_1$), las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault originadas por el flujo magnético principal ($P_{(h+e)}$), las pérdidas por fricción y ventilación del rotor ($P_{(f+v)}$) y las pérdidas en el hierro debidas a la rotación y abertura de las ranuras (P_{rot}), es decir:

$$P_o = P_{cu} + P_{(h+e)} + P_{(f+v)} + P_{rot}$$

$$P_o = m_1 I_o^2 r_1 + P_{(h+e)} + P_{(f+v)} + P_{rot} \quad 5.29$$

de donde, m_1 es en número de fases del motor, I_o es la corriente primaria en vacío y r_1 es la resistencia por fase del devanado del estator.

La componente activa de I_o es pequeña en comparación con la corriente reactiva I_ϕ , por lo tanto el factor de potencia en vacío también es pequeño, cuya magnitud anda aproximadamente entre 0,05 a 0,15.

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{m_1 V_1 I_o} \quad 5.30$$

Conforme a lo anterior, el circuito equivalente del motor de inducción funcionando en vacío se representa en la figura 5.30

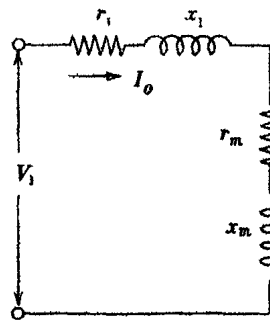


FIGURA 5.30 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN EN VACÍO.

Para determinar el valor de r_m es necesario conocer las pérdidas de energía por histéresis y corrientes de Foucault ($P_{(h+e)}$), la cual puede separarse de las otras pérdidas en vacío por dos pruebas. Una de las pruebas requiere que el rotor sea movido por otra máquina acoplada a su eje la cual lo lleve a la velocidad síncrona, a la cual el deslizamiento es igual con cero ($s = 0$). En este momento la corriente del rotor es exactamente igual a cero y las pérdidas de energía $P_{(f+v)}$ y P_{rot} son

proporcionadas por la máquina que le aplica el movimiento al rotor del motor de inducción. En estas condiciones la potencia de entrada del estator del motor de inducción es igual a:

$$P_o' = m_1 I_o'^2 r_1 + P_{(h+e)} \quad 5.31$$

donde P_o' e I_o' son la potencia de entrada y la corriente del estator cuando $s = 0$

la otra prueba consiste en medir el valor de la resistencia r_1 con lo cual se esta en condiciones de poder determinar las pérdidas $P_{(h+e)}$ despejando de la ecuación 5.31

$$P_{(h+e)} = P_o' - m_1 I_o'^2 r_1 \quad 5.32$$

La fuerza electromotriz inducida por el flujo giratorio en el devanado del estator cuando el motor funciona en vacío es:

$$E_1 = V_1 - I_o x_1 \quad 5.32$$

Al igual que en el transformador la conductancia de la trayectoria del flujo principal se determina por:

$$g_m = \frac{P_{(h+e)}}{m_1 E_1^2} \quad 5.33$$

del circuito equivalente del motor se tiene que

$$x_m = \frac{E_1}{I_o} \quad 5.34$$

de donde

$$b_m = \frac{1}{x_m} = \frac{I_0}{E_1} \quad 5.35$$

La resistencia del flujo principal r_m se puede determinar por medio de

$$r_m = \frac{g_m}{g_m^2 + b_m^2} = \frac{g_m}{b_m^2} = g_m x_m \quad 5.36$$

la prueba en vacío del motor de inducción sirve para determinar los parámetros de la trayectoria del flujo principal r_m y x_m o bien g_m y b_m con la condición de que la reactancia de dispersión primaria (x_1) del motor sea conocida. Esta reactancia y los parámetros de resistencia y reactancia del rotor se determinan con la prueba de cortocircuito.

Prueba de cortocircuito. Otra de las pruebas que se le puede hacer a un motor de inducción para determinar los parámetros de su circuito equivalente es la llamada **prueba de rotor bloqueado** (Prueba de rotor frenado). En esta prueba se frena o se bloquea de tal manera que no pueda moverse, posteriormente se le aplica gradualmente la tensión hasta un valor tal que por el devanado del estator circule su corriente nominal. En la figura 5.31 se indica las conexiones de tres amperímetros, un voltmetro y dos wáttmetros (P), para realizar la prueba de rotor bloqueado.

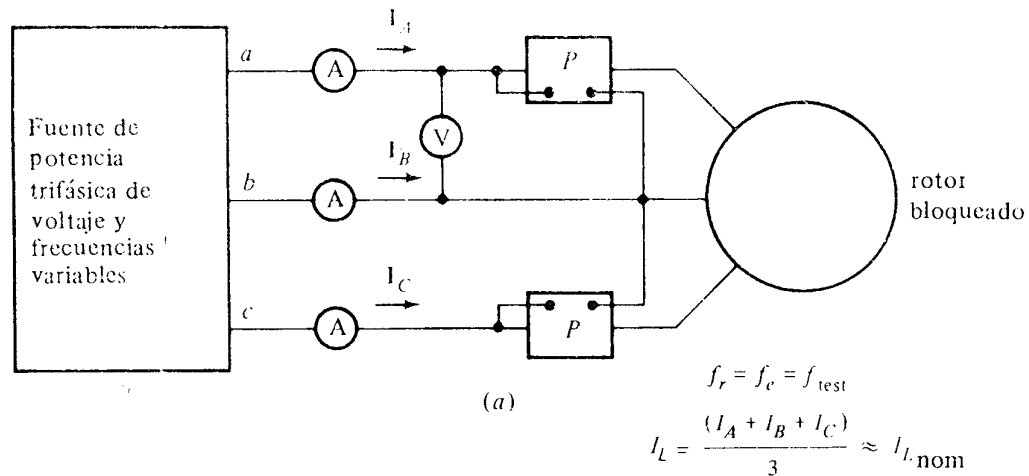


FIGURA 5.31 CIRCUITO ELÉCTRICO DE PRUEBA A ROTOR BLOQUEADO

Esta prueba se debe efectuar a tensión reducida de alrededor del 30% a 50% de la tensión nominal, y durante la prueba se toman las siguientes lecturas en los instrumentos de medición:

- a) la tensión primaria V_1 la cual debe ser menor a la tensión nominal.
- b) La corriente primaria I_A , I_B y I_C
- c) La potencia de entrada P_{cc}

En reposo el deslizamiento es igual a la unidad y el circuito equivalente del motor está determinado por la figura 5.32

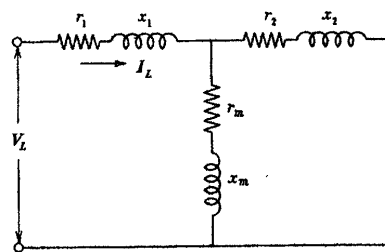


FIGURA 5.32 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN CON ROTOR BLOQUEADO

La impedancia secundaria $z_2 = r_2 + x_2$ es menor en comparación con x_m y la caída de tensión primaria es grande, solo fluye una pequeña corriente por el circuito del flujo principal y también las pérdidas en el hierro debidas a dicho flujo son pequeñas. En reposo el motor no tiene pérdidas mecánicas; por lo tanto, la potencia de entrada en reposo P_{cc} se consume principalmente por las pérdidas en el cobre en ambos devanados. Con los datos obtenidos durante la prueba se pueden determinar los siguientes parámetros:

El factor de potencia en reposo

$$\cos\phi_L = \frac{P_{cc}}{m_1 V_L I_L} \quad 5.37$$

este factor de potencia es mayor que el de vacío pero permanece pequeño debido a la alta magnitud de la componente reactiva de la corriente necesaria para originar los flujos de dispersión del estator y rotor.

Con los valores medidos de tensión de corto circuito V_L corriente de cortocircuito I_L y potencia de cortocircuito obtenidos durante la prueba de rotor bloqueado se determina la impedancia de cortocircuito Z_L , la resistencia de cortocircuito R_L y la reactancia de cortocircuito X_L , mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} \quad 5.38$$

$$R_L = \frac{P_{cc}}{m_1 I_L^2} \quad 5.39$$

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2} \quad 5.40$$

Conforme al circuito equivalente de la figura 6.32 se tiene que

$$R_L = r_1 + r_2$$

$$X_L = \frac{x_1}{1 + \tau_2} + x_2 - \frac{r_1 r_2}{x_m} \quad 5.41$$

de donde el par máximo $\tau_2 = \frac{x_2}{x_m}$, es pequeño, aproximadamente de 0,03 a 0,06 y también es pequeña la relación $\frac{r_1 r_2}{x_m}$ con lo cual se puede considerar que:

$$X_L = x_1 + x_2$$

$$x_1 = x_2 = \frac{X_L}{2} \quad 5.42$$

con este valor de x_1 puede determinarse los parámetros del flujo principal x_m y r_m

5.10 EL GENERADOR DE INDUCCIÓN

Conforme a la ecuación 5.1, es posible obtener un deslizamiento negativo cuando $n_r > n_s$ lo cual ocurre cuando se utiliza otra máquina (Primo-motor) que lleve al rotor a una velocidad superior a la síncrona, con lo cual la potencia mecánica desarrollada viene a ser negativa. Lo anterior significa que a velocidades superiores a la síncrona el rotor no proporciona potencia mecánica sino que consume potencia mecánica, es decir, la maquina funciona como “generador de inducción”. Las siguientes consideraciones indican que el par motor cambia de signo cuando la velocidad de giro del rotor es mayor que la velocidad síncrona.

- 1) A una velocidad menor a la síncrona se induce una f.e.m. en el devanado del rotor que corresponde a la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor, $(n_s - n_r)$.
- 2) A la velocidad síncrona ($n_s = n_r$) la f.e.m. inducida viene a ser cero debido a que la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor es cero.
- 3) A velocidades superiores a la síncrona ($n_r > n_s$) la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor cambia su signo comparada con que se obtiene a las velocidades menores a la síncrona, con lo cual E_2 e I_2 cambian sus signos.

Como el par motor está determinado por el producto del flujo y la corriente de armadura el par motor cambia de signo a velocidades inferiores a la síncrona con lo cual el deslizamiento es negativo para el funcionamiento como generador.

Cuando funciona como generador, una maquina de inducción presenta ciertas limitaciones debido a que no tiene un circuito independiente para su excitación no puede producir potencia reactiva y únicamente puede proporcionar una carga con corriente adelantada. El generador de inducción consume potencia reactiva y para mantener el campo magnético del estator este se conecta permanentemente a una fuente de tensión exterior de potencia reactiva. Esta fuente también debe controlar la tensión en las terminales del generador.

Las ventajas del generador de inducción son:

- La simplicidad de su uso facilita su manejo
- No requiere de un circuito independiente para el campo y no tiene que girar continuamente a una velocidad fija.
- A velocidades ligeramente mayores a la síncrona funciona como generador con respecto al sistema de potencia al que se encuentre conectado
- Hasta cierto punto, en la medida que el par aplicado a su eje sea mayor, la potencia de salida resultante será mayor.

El hecho de que generador de inducción no necesite regulación lo ser una buena alternativa para molinos de viento, sistemas de recuperación de calor y fuentes similares de potencia suplementaria conectadas a un sistema de potencia existente. En estas aplicaciones, el factor de potencia se puede corregirse por medio de condensadores y la tensión en sus terminales se puede controlar mediante el sistema de potencia externo.

5.11 CONVERTIDORES DE FRECUENCIA POR INDUCCIÓN

Otra aplicación de las máquinas de inducción que fue generalizada antes de la aparición de los convertidores de frecuencia de estado sólido, es la de servir como convertidores de frecuencia. Un convertidor de frecuencia por inducción es un motor de inducción con rotor devanado en el que la tensión del rotor se utiliza para alimentar una carga.

Las ecuaciones bajo las cuales se rige el funcionamiento del convertidor de frecuencia por inducción son:

La frecuencia del rotor de un motor de inducción esta dada por

$$f_r = sf_e \quad 5.43$$

donde f_e es la frecuencia eléctrica del estator

El deslizamiento del motor de inducción esta definido por

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

al sustituir el deslizamiento en la ecuación 6.43, se obtienen las ecuaciones con las cuales se puede determinar la frecuencia del rotor en la máquina.

$$f_r = \left(\frac{n_s - n_r}{n_s} \right) f_e \quad 5.44$$

considerando la ecuación con la cual se determina la velocidad síncrona, la ecuación anterior se reduce a

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

$$f_r = f_e - \frac{n_r p}{120} \quad 5.45$$

Con relación a la ecuación 5.45, para una frecuencia dada en el estator, la frecuencia del rotor se puede modificar variando la velocidad mecánica de rotación n_r . Si al eje de la máquina de inducción se le acopla un motor de velocidad variable, la frecuencia de salida resultará variable.

Si la frecuencia eléctrica aplicada al estator del convertidor de frecuencia por inducción es menor a la frecuencia de salida que se desea, la velocidad de giro del rotor será negativa lo cual significa que el eje del motor de inducción debe girar en dirección contraria a la forma en que lo haría normalmente.

5.12 ESPECIFICACIONES NOMINALES DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

En la placa de datos de las máquinas se muestran las características típicas de ellas, a los cuales se les denomina como valores nominales a plena carga. Los valores nominales más importantes que se encuentran en la placa son:

1) Potencia nominal. La potencia máxima que puede producir los motores depende del calor desarrollado en ellos. Los motores de ca se calientan debido a las pérdidas en el cobre y en el núcleo, así como en los rodamientos. Con relación a lo anterior la potencia nominal de un motor cualquiera de ca es la carga que puede soportar continuamente sin calentarse en exceso. Generalmente esta potencia se expresa en Caballos de Potencia (CP), la cual se puede convertir a Watts mediante la siguiente relación:

$$1CP = 746 \text{ Watts} = 0,746 \text{ kiloWatts}$$

la potencia nominal de los motores eléctricos suele referirse a plena carga con una elevación de temperatura de 40°C. La mayoría de los motores se construyen para soportar sobrecargas no mayores de 25% durante un periodo de dos horas con una elevación de temperatura no superior a 55°C.

2) Tensión nominal. La tensión indicada en la placa de datos de un motor es la máxima tensión a la que debe funcionar en condiciones normales y a plena carga. Casi todos los motores de construyen para proporcionar una potencia nominal determinada a plena carga mientras la tensión no varíe en más de un 10% por encima o por debajo de la tensión nominal, siempre que las demás condiciones sean normales. La tensión nominal se expresa en Volts o kilo Volts.

La mayoría de los motores trifásicos son para 220, 440 550 Volts, pero para los motores que tienen varios cientos de CP, se diseñan para tensiones de 1100, 2300 y hasta 13200 Volts.

3) Frecuencia nominal. Los motores de inducción pueden desarrollar toda su potencia nominal a cierta frecuencia la cual no debe variar en más de un 5% por exceso o por defecto, con respecto a la frecuencia normal para la cual se construyeron y siempre que la tensión y demás condiciones sean normales.

4) Corriente nominal. La corriente nominal indicada en la placa del motor se refiere a la corriente absorbida por el motor cuando está funcionando a plena carga. La intensidad de corriente se expresa en Amper y para un motor trifásico puede calcularse fácilmente aplicando la siguiente ecuación:

$$I = \frac{CP(746)}{\sqrt{3}V\eta\cos\theta} \quad 5.46$$

de donde

I = la intensidad de corriente en Amper
 η = la eficiencia del motor (Rendimiento)
V = tensión nominal de línea en Volts
 $\cos\theta$ = el factor de potencia (FP) expresado en por unidad

5) Velocidad nominal. Los motores de ca de tamaño mediano se fabrican comúnmente para operar a velocidades comprendidas entre 900 y 3600 rpm y los motores de elevada potencia funcionan a velocidades menores, que varían de 200 a 600 rpm. Se fabrican motores monofásicos muy pequeños del tipo de repulsión o del tipo universal en serie para funcionar a velocidades de 4000 a 12000 rpm.

6) Factor de potencia (FP = $\cos\theta$). El factor de potencia es una característica importante que se debe tomar en cuenta al seleccionar los motores de inducción grandes o un gran número de motores pequeños, ya que puede economizarse en la facturación de energía manteniendo el factor de potencia del sistema lo más alto posible. Los motores de inducción funcionan con un factor de potencia bajo cuando tienen carga pequeña, razón por la cual estos deben funcionar la mayor parte del tiempo a plena carga o cercana a ella.

El factor de potencia de los motores inducción trifásicos puede variar: En el caso de los motores pequeños de poca velocidad varía entre 60 y 70%, en los motores de tamaño mediano de 75 a 90%, y en los motores de varios cientos de CP el factor de potencia puede elevarse hasta el 90% o 96%.

7) Factor de servicio. Cuando en la placa de datos de un motor se señala un factor de servicio mayor de 1,0, este factor indica la capacidad de sobrecarga del motor a la tensión y frecuencia nominal. Cuando la carga del motor es igual a su

potencia nominal multiplicada por el factor de servicio, la eficiencia, el factor de potencia y la velocidad serán diferentes a los valores especificados al 100% de carga.

Además de las características anteriores en la placa de datos aparecen otras magnitudes tales como: Clase de diseño según MEMA, código de arranque, clase de aislamiento, tipos de conexión de los devanados, modelo, número de serie, etc.

UNIDAD 6 MOTORES MONOFÁSICOS Y DE PROPÓSITO GENERAL

7.1 EL MOTOR UNIVERSAL

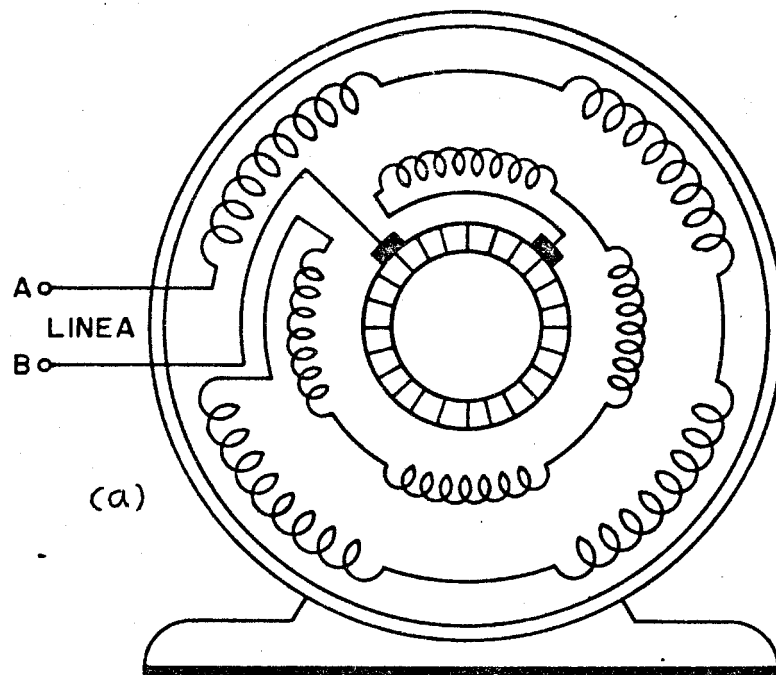
Un motor de este tipo funciona por interacción magnética entre los polos del inducido e inductor y gira en el mismo sentido si la corriente de línea circula de la terminal A a B, o de B a A indicadas en la figura 7.1(a), se cambia simultáneamente la polaridad de los polos inductores y del inducido, tal como se indica en las figuras 7.1(b) y (c). Si el motor se alimenta con c.a., el par desarrollado tendrá siempre el mismo sentido

El motor universal puede funcionar tanto con c.a. como con c.c. y para que trabaje satisfactoriamente con c.a., todas piezas del circuito magnético deben ser laminadas para impedir un calentamiento indebido por circulación de corrientes parásitas. Asimismo, es conveniente que el inducido tenga devanado

complementarios para asegurar una conmutación aceptable. En grandes motores se utilizan devanados compensadores para mejorar el funcionamiento y reducir el chispeo en el conmutador del inducido.

Características. Este motor produce aproximadamente 4 veces el par normal con una intensidad de corriente de 2 veces la de plena carga. El par producido crece muy rápidamente al aumentar la intensidad de corriente. La variación de la velocidad desde carga cero hasta plena carga es tan grande que la supresión completa de la carga es peligrosa en todos los motores de este tipo excepto en los de potencia fraccionaria.

Aplicaciones. Estos motores se utilizan en potencias menores de 1 cp para mover ventiladores, aspiradoras, licuadoras, batidoras de leche, etc. Y en equipos eléctricos portátiles de todas clases, como taladros, lijadoras, sierras, etc. En motores de gran potencia se utilizan en maquinaria de extracción o elevación tal como grúas, montacargas, etc. En general, son adecuados para aplicaciones donde se desea un alto par de arranque o trabajo de naturaleza universal.



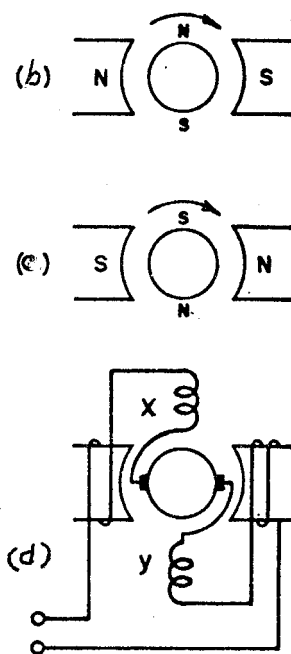


FIGURA 7.1 (a) conexión de los devanados de un motor universal, (b) y (c) polaridad de los polos cuando se invierte el sentido de la corriente en las puntas terminales del motor, (d) circuito eléctrico de un motor universal.

Averías principales. En conmutador, escobillas, porta escobillas, cojinetes, circuito abiertos, cortos circuitos a tierra en el inducido, o el inductor, o dispositivos

auxiliares y aflojamiento de conexiones. Para cambiar su rotación inviertase las conexiones del inducido o bien las del inductor, pero no ambas.

7.2 INTRODUCCIÓN A LOS MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

en la figura 7.2 se muestra la construcción de un motor monofásico de inducción con un rotor jaula de ardilla y un estator monofásico.

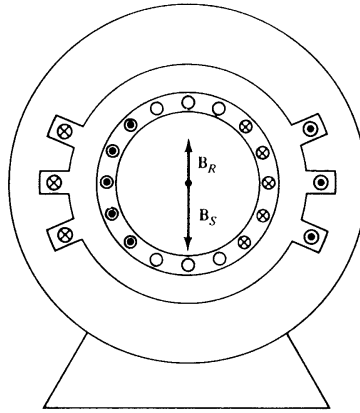
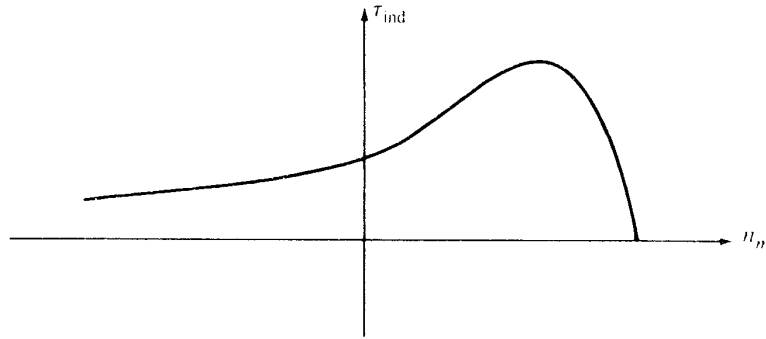


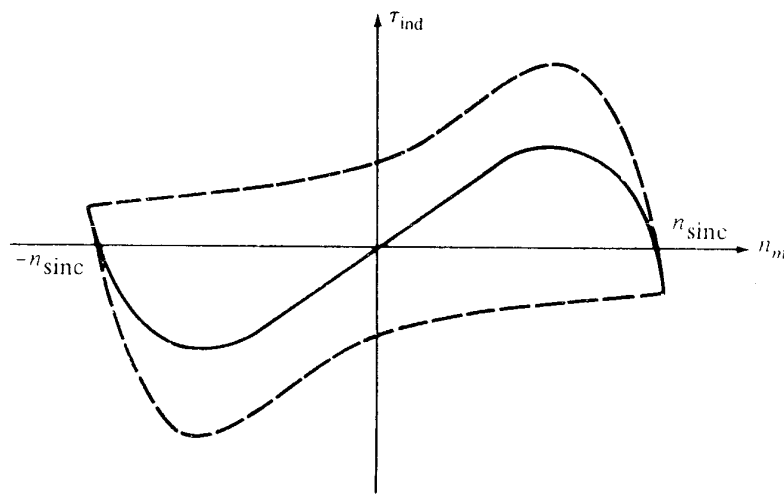
FIGURA 7.2 Motor monofásico de inducción rotor jaula de ardilla y estator monofásico

El monofásico de inducción tiene una gran desventaja, debido a que sólo tiene una sola fase en el devanado del estator, el campo magnético no gira; en lugar de esto pulsa, haciéndose primero más grande y luego más pequeño, pero permaneciendo siempre en la misma dirección. Debido a que no hay campo magnético giratorio en el estator, un motor de inducción no tiene par de arranque, sin embargo una vez que el rotor comienza a girar, se produce par, debido a dos teorías, una de las cuales se conoce como la teoría del doble campo giratorio del motor monofásico de inducción y la otra se conoce como teoría de los campos cruzados.

La teoría del doble campo giratorio de los motores monofásicos de inducción, establece básicamente que un campo magnético giratorio estacionario y pulsante puede descomponerse en dos campos magnéticos giratorios, de igual magnitud, pero que giran en direcciones opuestas, tal como se muestra en la figura 7.2; El motor responde separadamente a cada uno de estos campos magnéticos, y el par neto en el será la suma de los pares debidos a cada uno de los dos campos magnéticos.



(a) Característica par-velocidad de un motor de inducción trifásico.



(b) Característica par –velocidad de dos campos magnéticos del estator giratorio en direcciones opuestas.

FIGURA 7.3 CARACTERISTICAS PAR VELOCIDAD DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

En la figura 7.3(a) se muestra la característica par-velocidad del motor trifásico de inducción en respuesta a su campo magnético giratorio simple. Un motor monofásico de inducción responde a cada uno de los dos campos magnéticos presentes dentro de él, con lo cual el par producido neto producido en el motor es la diferencia entre las dos curvas par-velocidad. Este par neto se muestra en la figura 7.3(b); en la cual se observa que no hay par neto en velocidad cero, motivo por el cual este motor no tiene par de arranque.

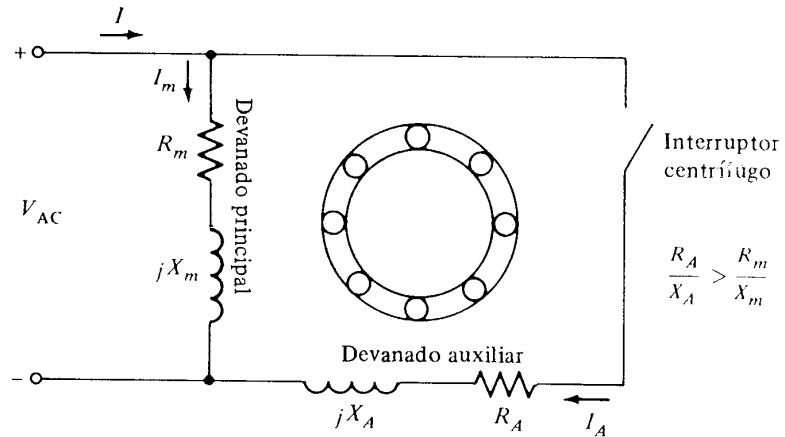
La teoría de los campos cruzados del motor de inducción monofásico, visualiza al motor de inducción desde un punto de vista totalmente diferente. Esta teoría considera la tensión y corriente que el campo magnético estacionario del estator induce en las barras del rotor cuando éste se está moviendo. El valor máximo de la tensión inducida en las barras del rotor, se produce cuando estas pasan debajo de los conductores del devanado del estator; esta tensión origina la circulación de una corriente en el rotor creando en él un campo magnético resultante. Este campo magnético es un poco más pequeño que el campo magnético del estator, debido a las pérdidas en el rotor. Si estos dos campos magnéticos se suman en diferentes momentos, se desarrollará un par neto en la dirección del movimiento y este par mantendrá el motor girando.

7.3 ARRANQUE DE LOS MOTORES MONOFASICOS DE INDUCCIÓN

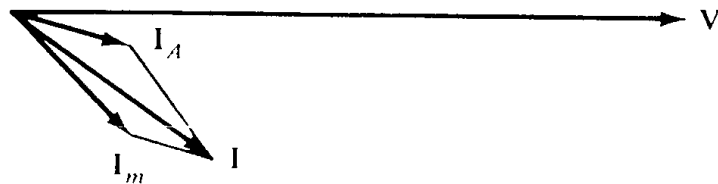
existen tres técnicas de uso común para arrancar los motores monofásicos de inducción, además estos se clasifican conforme a los métodos utilizados para producir su par de arranque. Estas técnicas de arranque difieren en costo y en la cantidad de par de arranque producido; por consiguiente, generalmente se usa la técnica menos costosa que satisfaga los requerimientos de par en una aplicación determinada. Las tres mejores técnicas de arranque son:

a) **Devanados de fases partidas.** Un motor de fase partida es un motor monofásico de inducción con dos devanados en el estator; un devanado principal (M) y un devanado auxiliar de arranque (A). Estos devanados están colocados a 90° a lo largo del estator del motor, y el devanado auxiliar se diseña para desconectarlo del circuito mediante un interruptor centrífugo, a una velocidad específica. El devanado auxiliar se diseña para que tenga una relación entre la resistencia/reactancia más alta que el devanado principal, de modo que la corriente en el devanado auxiliar adelante la corriente en el devanado principal. La relación R/X se logra obtener usando alambre de menor sección transversal en el devanado auxiliar, porque éste se usa sólo para arrancar y por lo tanto no toma continuamente la corriente nominal.

Los motores de fase partida tienen un par de arranque moderado con una corriente de arranque relativamente baja. Se usan en donde no se requieren pares de arranque muy altos tales como ventiladores, sopladores y bombas centrífugas. En la figura 7.4 se muestra el circuito eléctrico del motor de fase partida.



(a) circuito eléctrico de un motor de inducción de fase partida



(b) diagrama vectorial de las corrientes del motor en las condiciones de arranque

FIGURA 7.4 MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO DE FASE PARTIDA

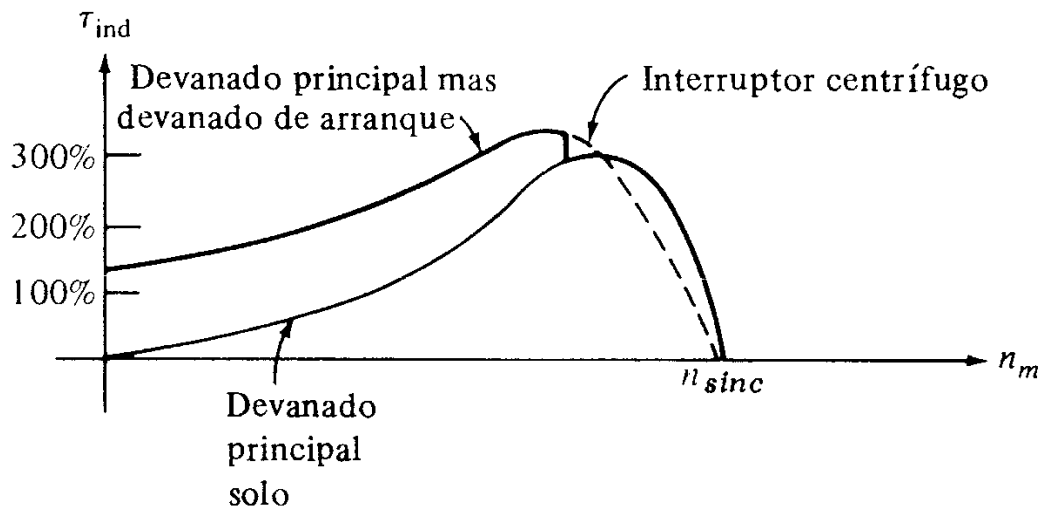


FIGURA 7.5 CARACTERÍSTICA RESULTANTE PAR-VELOCIDAD

La rotación del motor puede invertirse intercambiando la conexión del devanado auxiliar mientras la conexión del devanado principal permanezca sin cambios. En la figura 7.5 se muestra la característica par-velocidad del motor de fase partida.

b) Motores con condensador de arranque. En algunas aplicaciones, no es suficiente el par de arranque desarrollado por el motor de fase partida, para impulsar la carga sobre el eje del motor; en estos casos se puede utilizar un motor con condensador de arranque, el cual se coloca en serie con el devanado auxiliar con lo cual se puede lograr, que la fmm en el devanado de arranque sea igual a la fmm que se presente en el devanado principal con lo cual el ángulo de la corriente que circula por el devanado auxiliar adelante a la corriente del devanado principal 90° . En este caso, el par de arranque del motor puede ser de más de 300% de su valor nominal. En las figuras 7.6, 7.7, 7.8 se muestra el circuito eléctrico del motor con condensador de arranque, el diagrama de las corrientes en el devanado auxiliar y principal, así como la curva característica de par-velocidad, respectivamente.

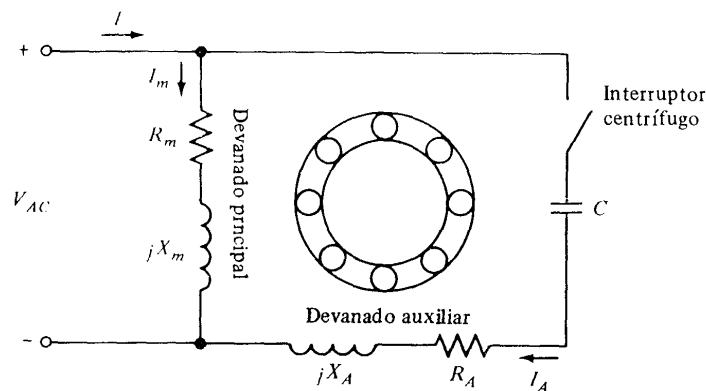


FIGURA 7.6 CIRCUITO ELÉCTRICO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN CON CONDENSADOR DE ARRANQUE

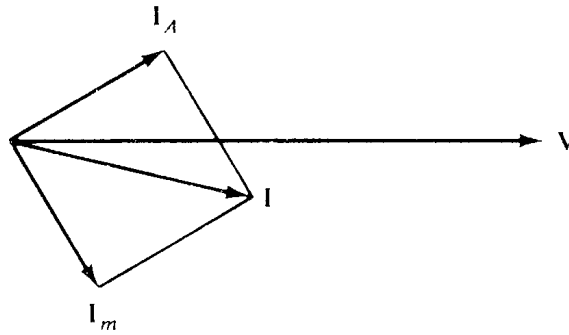


FIGURA 7.7 ÁNGULO DE LAS CORRIENTES EN EL ARRANQUE DEL MOTOR CON CONDENSADOR DE ARRANQUE

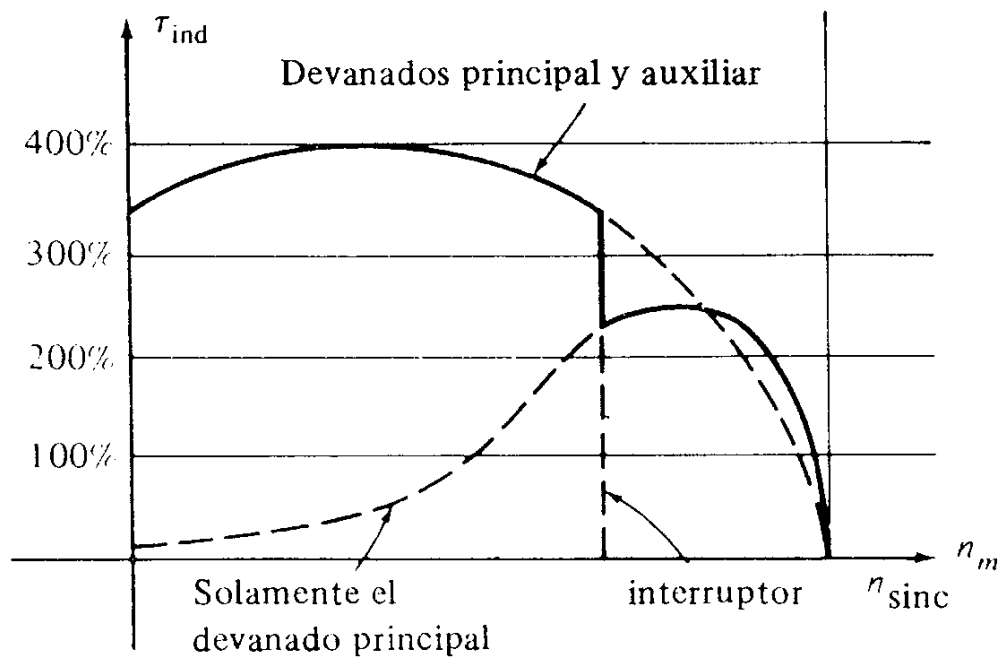


FIGURA 7.8 CURVA CARACTERÍSTICA DE PAR-VELOCIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO CON CONDENSADOR DE ARRANQUE

Los motores con condensador de arranque son más costosos comparado con los motores de fase partida y se utilizan en donde se requieren par de arranque alto, tales como compresores, bombas y aire acondicionado. El condensador de arranque mejora la característica de par-velocidad del motor.

Si al motor se le instala un condensador permanente lo hace ser más simple que el motor con condensador de arranque, puesto que no se requiere del interruptor de arranque, con el cual lo hace ser más eficiente a carga nominal, tiene factor de potencia más alto, sin embargo, tienen un par de arranque más bajo comparado con el motor con condensador de arranque, debido a que el condensador debe dimensionarse para balancear las corrientes en el devanado principal y auxiliar para la carga nominal, ya que al arranca las fases las deja desbalanceadas.

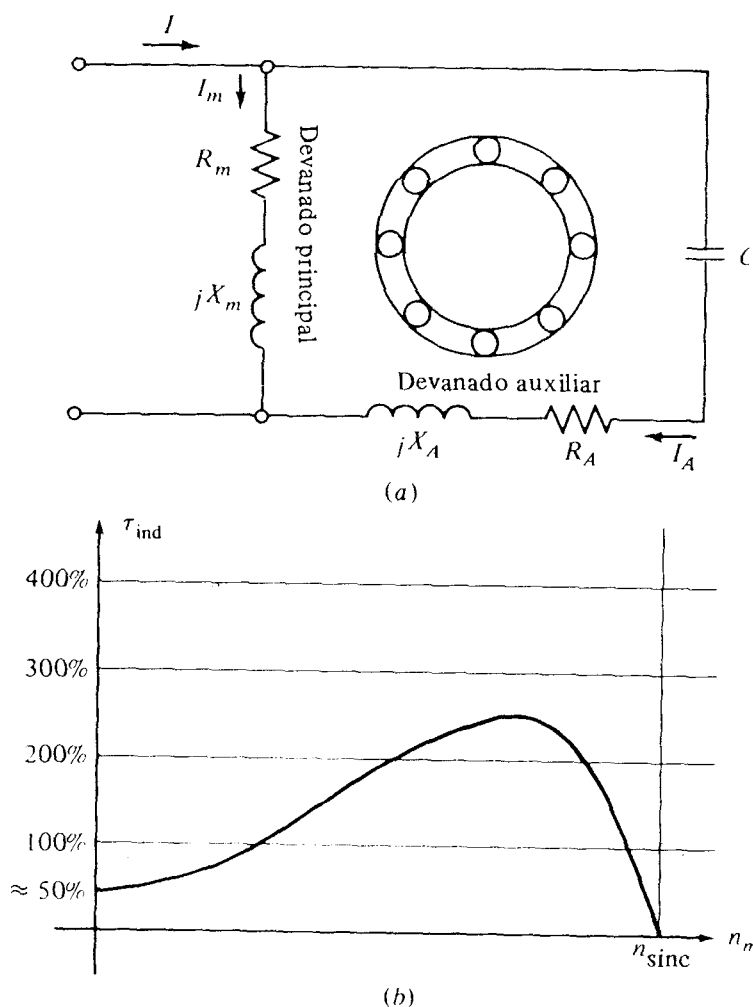


FIGURA 7.9 (a) Circuito eléctrico de un motor de inducción con condensador permanente (b) Característica par-velocidad del motor con condensador permanente

Si se requiere simultáneamente el mayor par de arranque posible y las mejores condiciones de funcionamiento nominal, se debe utilizar dos condensadores con el devanado auxiliar, con lo cual a estas máquinas se les conoce como “motor con condensador de arranque, condensador de giro” o “motor con condensador de dos valores”. En estos motores el condensador permanente tiene un tamaño que particularmente está alrededor del 10% al 20% del condensador de arranque. En la figura 7.10 se muestra el circuito eléctrico y característica de par-velocidad de este tipo de motor.

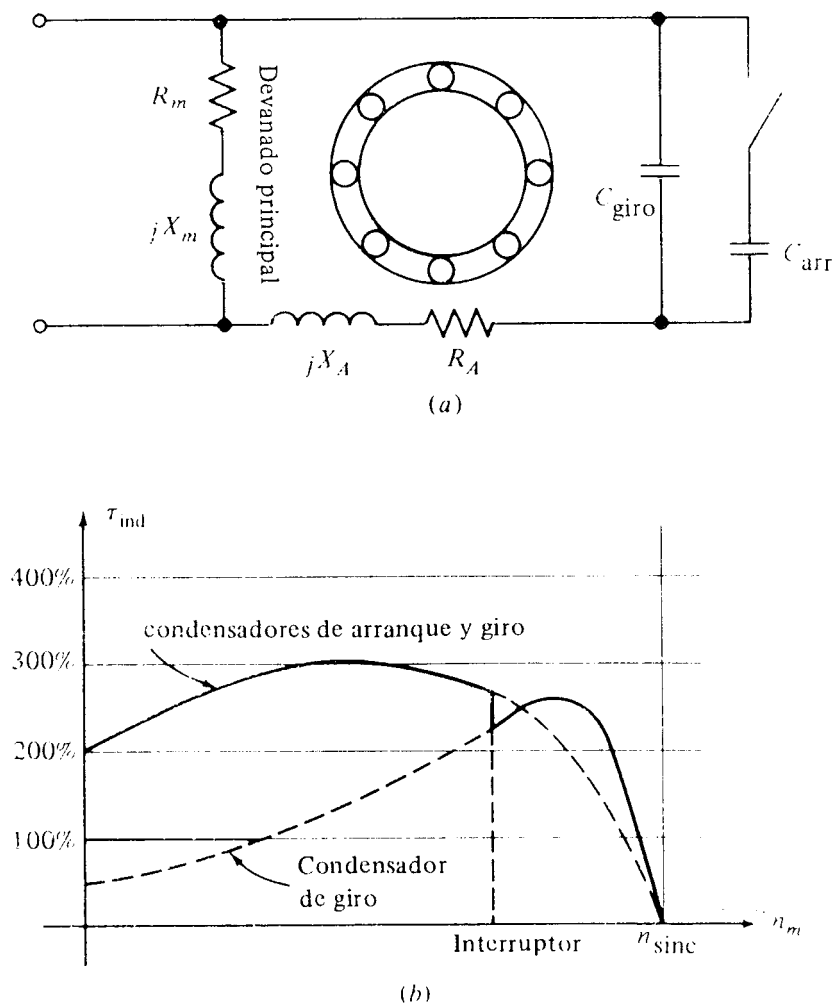


FIGURA 7.10 (a) Circuito eléctrico de un motor de inducción con condensador de arranque y condensador permanente, (b) Curva característica de par-velocidad

c) motor de polos sombreados. Un motor de inducción de polos sombreados es un motor de inducción que tiene únicamente un devanado principal. En lugar de tener un devanado auxiliar, tiene polos salientes y en una pequeña porción de cada polo está rodeada por una bobina en cortocircuito, llamada “bobina de sombreado”. El devanado principal produce en los polos un flujo magnético variable en el tiempo, lo cual induce en la bobina de sombra una tensión y una corriente que se opone al cambio del flujo original. Lo anterior atrasa los cambios del flujo bajo la porción sombreada de la bobina lo cual origina un ligero desbalance entre los dos campos magnéticos del estator que giran en direcciones opuestas. La rotación neta se establece en la dirección que va de la porción no sombreada a la sombreada de las caras polares. En la figura 7.11 se muestra la característica par-velocidad de un motor de polos sombreados.

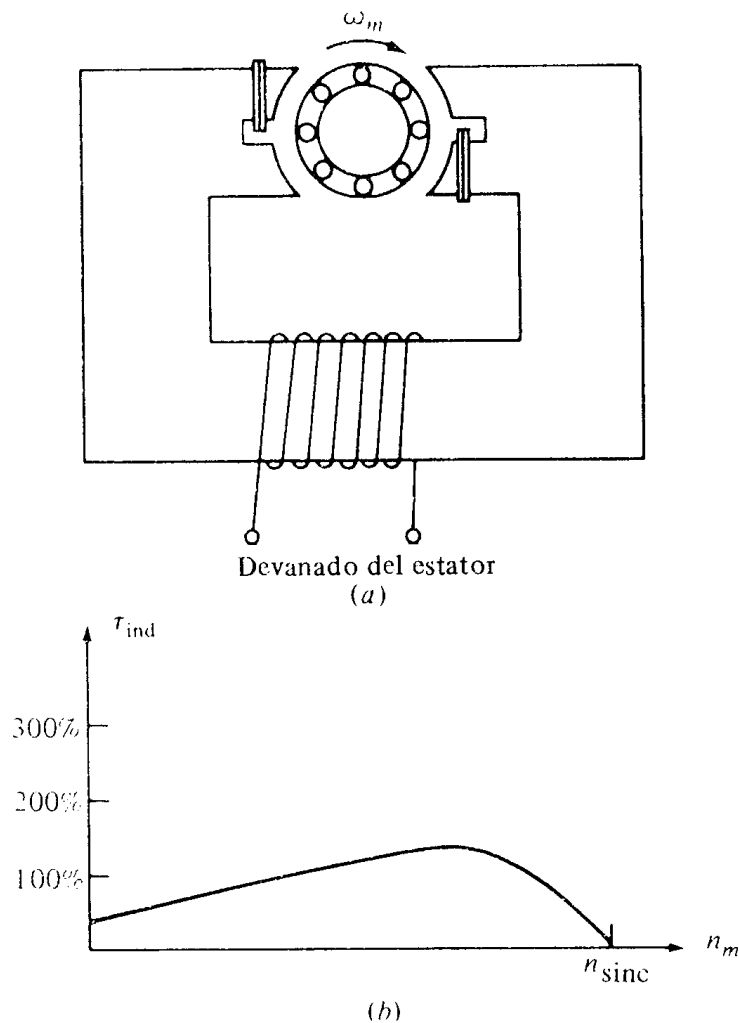


FIGURA 7.11 (a) Motor de inducción de polos sombreados, (b) Curva característica de par-velocidad

Como los motores de polos sombreados cuenta con una bobina de sombra para su par de arranque, no hay una forma fácil de invertir la dirección de giro del motor. Para lograr invertirlo, se requiere instalar dos bobinas de sombra sobre cada cara polar y selectivamente cortocircuitar una de ellas.

7.4 CONTROL DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

La velocidad de los motores monofásicos de inducción se puede controlar de la misma forma que se hace en los motores polifásicos de inducción. Se dispone de las siguientes técnicas para los motores con rotor jaula de ardilla.

- a) Variando la frecuencia del estator
- b) Cambiando el número de polos
- c) Variando la tensión aplicada en las puntas terminales

La forma más común de controlar la velocidad de motores con deslizamiento alto es variando la tensión en sus puntas terminales. La tensión aplicada al motor puede variarse considerándose una de las tres formas siguientes:

- 1) Mediante el uso de un autotransformador para ajustar continuamente la tensión de la línea. Este método es muy costoso y se usa cuando se desea un control de velocidad suave.
- 2) Mediante la utilización de circuitos SCR o TRIAC, para reducir por control de fase la tensión rms aplicada al motor. Los circuitos de control de estado sólido son más baratos que los autotransformadores, lo cual los hace ser de mayor uso.
- 3) Insertando una resistencia en serie con el circuito del estator del motor, este es el método más barato de control de velocidad, pero tiene la desventaja de que se pierde una potencia considerable en la resistencia reduciéndose la eficiencia total de la conversión de potencia.

También se usa otra técnica en los motores con deslizamiento muy alto, con los es el de polos sombreados; en el cual en vez de usar un autotransformador separado para variar la tensión aplicada al motor, el mismo devanado del estator puede usarse como transformador. Esta es una configuración estándar usada para para controlar la velocidad de motores monofásicos en muchas aplicaciones de ventiladores y sopladores.

Este control de velocidad es menos costoso debido a que los únicos componentes requeridos son la toma del devanado principal del motor y un interruptor común que tenga varias posiciones. También tiene la ventaja de que el efecto del autotransformador no consume potencia, como lo haría una resistencia en serie.

7.5 OTROS TIPOS DE MOTORES.

En ciertas aplicaciones especiales se usan otros dos tipos de motores, los cuales difieren de los demás en la construcción de sus rotores, independientemente de que se usa el mismo diseño del estator y pueden ser monofásicos o trifásicos.

Motor de reluctancia

Este motor para su operación depende de un par de reluctancia producido en el hierro del rotor en presencia de un campo magnético externo, el cual hace que el rotor tienda a alinearse con el campo magnético externo. Este par ocurre porque el campo magnético externo induce en el hierro un campo magnético interno y aparece un par entre los dos campos magnéticos, girando el rotor para alinearlos con el campo externo. Para que se origine el par de reluctancia, el rotor debe ser estirado a lo largo de los ejes con ángulos que correspondan entre los polos adyacentes del campo magnético externo. El motor de reluctancia prácticamente es un motor síncrono, por lo tanto no tiene par de arranque y no puede arrancar por si mismo, pero se pueden fabricar con un rotor de polos salientes para la operación en estado estacionario, como motor de reluctancia y también tienen devanado jaula de ardilla o amortiguadores, para el arranque

Motor de Histéresis

Este motor emplea el fenómeno de la histéresis para producir un par mecánico y cuenta con un cilindro liso de material magnético, sin dientes, protuberancias o devanados. El estator del motor puede ser monofásico o trifásico, pero si es monofásico debe usar un condensador permanente en el devanado auxiliar, para suministrar un campo magnético suave, lo cual reduce las pérdidas del rotor.

La cantidad de histéresis dentro de un rotor esta en función de la cantidad de flujo en el estator y del material del cual está hecho, el par de Histéresis es aproximadamente constante para cualquier velocidad desde cero hasta la velocidad síncrona. El par de las corrientes parásitas es proporcional al deslizamiento del motor. Se pueden construir motores de Histéresis con polos sombreados, con el fin de elaborar motores síncronos muy pequeños de baja potencia y con auto arranque. Estos motores se usan en los relojes eléctricos.

7.6 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR MONOFÁSICO DE INDUCCIÓN

Las teorías del doble campo magnético giratorio o la teoría de los campos cruzados, pueden conducir a establecer un circuito equivalente del motor y las características par-velocidad. La forma de comenzar el análisis del motor monofásico de inducción es considerarlo cuando está frenado. En este instante, el motor se comporta como un transformador monofásico con su circuito secundario en cortocircuito, con lo cual su circuito equivalente es el de un transformador, el cual se indica en la figura 7.12. En este circuito equivalente R_1 y X_1 son la resistencia y reactancia del devanado del estator, X_M es la reactancia de magnetización, R_2 y X_2 son los valores reflejados de la resistencia y la reactancia del rotor. Las pérdidas en el núcleo no se muestran y se agrupan con las pérdidas mecánicas y adicionales, como una parte de las pérdidas rotacionales.

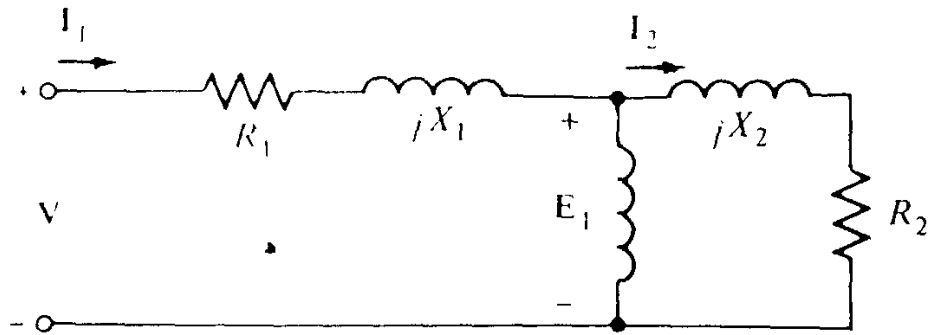


FIGURA 7.12 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

El flujo pulsante del entrehierro puede descomponerse en dos campos magnéticos iguales y opuestos dentro del motor, dado que estos dos campos magnético son iguales en magnitud y cada uno contribuye en la caída de tensión resistiva y reactiva en el circuito del rotor. Con forme a lo anterior, es posible dividir el circuito equivalente del rotor en dos secciones, cada una correspondiendo al efecto de uno de los campos magnéticos indicados anteriormente. En la figura 7.13 se muestra el circuito equivalente con el efecto separado de los dos campos magnéticos directo e inverso.

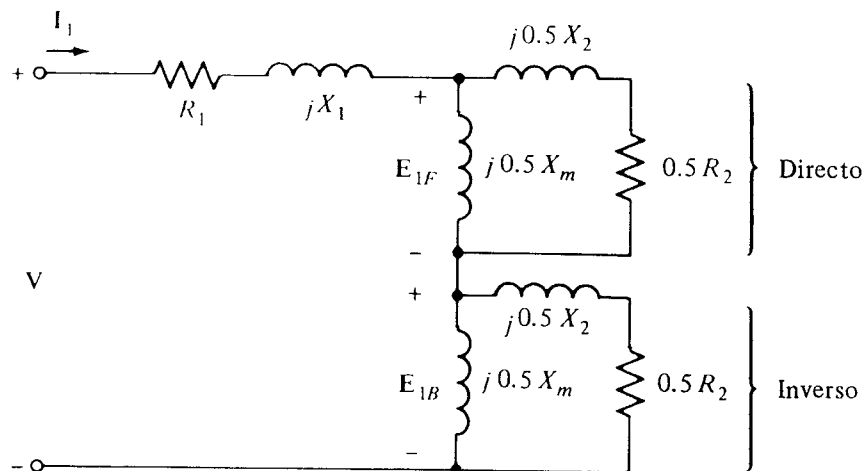


FIGURA 7.13 CIRCUITO EQUIVALENTE CON LOS EFECTOS SEPARADOS DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS

Para el campo magnético directo, la diferencia es por unidad entre la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético es el deslizamiento, el cual está definido en la misma forma como se hizo para los motores trifásicos de inducción. La resistencia del rotor en la parte del circuito asociado con el campo magnético es $0,5R_2/s$

El campo magnético directo gira a la velocidad síncrona ($n_{\text{síncrona}}$), y el campo magnético inverso gira a la velocidad inversa síncrona ($-n_{\text{síncrona}}$). Por lo tanto, la diferencia total en velocidad en por unidad entre los campos magnéticos directo e inverso es 2. dado que el rotor gira una velocidad s más baja que el campo magnético directo, la diferencia total en por unidad que hay entre la velocidad del rotor y el campo magnético inverso es de $2-s$. Por lo tanto, la resistencia efectiva del rotor en la parte del circuito asociado con el campo magnético inverso es $0,5R_2/(2-s)$. En la figura 7.14 se muestra el circuito equivalente real del motor de inducción monofásico.

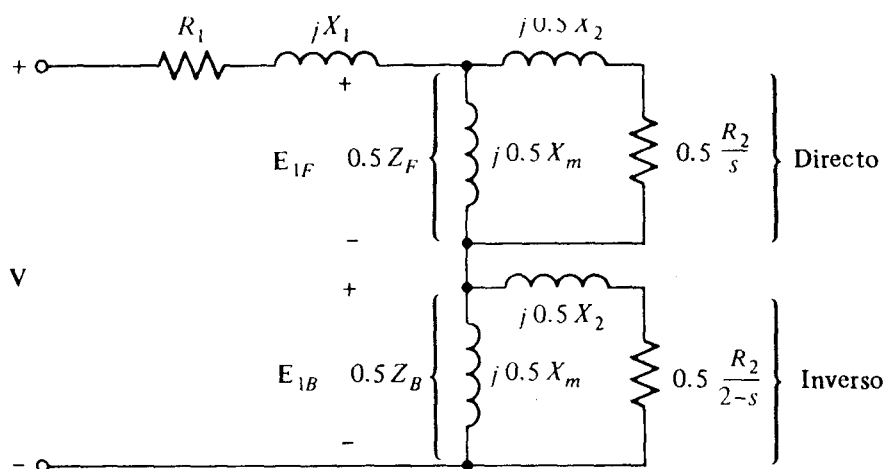


FIGURA 7.14 CIRCUITO EQUIVALENTE REAL DEL MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

Para hacer más simple el cálculo de la corriente de entrada al motor se definen las impedancias Z_F y Z_B , en donde Z_F es una impedancia única equivalente de todas las impedancias de los elementos del campo magnético directo y Z_B es una impedancia equivalente de todas las impedancias de los elementos del campo

magnético inverso. Estas impedancias se pueden determinar por las siguientes ecuaciones:

$$Z_F = R_F + jX_F = \frac{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right)(jX_M)}{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right) + jX_M} \quad 7.1$$

$$Z_B = R_B + jX_B = \frac{\left(\frac{R_2}{(2-s)} + jX_2\right)(jX_m)}{\left(\frac{R_2}{(2-s)} + jX_2\right)(jX_M)} \quad 7.2$$

La corriente que circula en el devanado del estator del motor, se determina por:

$$I_1 = \frac{V}{R_1 + jX_1 + 0,5Z_F + 0,5Z_B} \quad 7.3$$

La potencia en el entrehierro para el campo magnético directo se determina por:

$$P_{AG,F} = I_1^2(0,5R_F) \quad 7.4$$

la potencia en el entrehierro para el campo magnético inverso se determina por:

$$P_{AG,B} = I_1^2(0,5R_B) \quad 7.5$$

La potencia total en el entrehierro de un motor de inducción se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P_{AG} = P_{AG,F} - P_{AG,B} \quad 7.6$$

el par producido en el motor monofásico de inducción se determina por:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{\sin c}} \quad 7.7$$

$$\omega_{\sin c} = \frac{2\pi(rpm)}{60}$$

Las pérdidas en el cobre del rotor directas e inversas se determinan por:

$$W_{CUR,F} = sP_{AG,F} \quad 7.8$$

$$W_{CUR,B} = (2-s)P_{AG,B} \quad 7.9$$

Con lo cual las perdidas totales en el rotor del motor de inducción son la suma de las dos pérdidas en el cobre anteriores, es decir:

$$W_{CUR} = W_{CUR,F} + W_{CUR,B} \quad 7.10$$

La potencia convertida de eléctrica a mecánica en un motor monofásico de inducción se determina por:

$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m \quad 7.11$$

$$\omega_m = (1-s)\omega_{\sin c}$$

o también se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$P_{conv} = (1-s)P_{AG} \quad 7.12$$

En el modelo utilizado para el motor monofásico de inducción, las pérdidas en el núcleo, las mecánicas y las adicionales deben sustraerse de la potencia convertida de eléctrica a mecánica (P_{conv}) para obtener la potencia de salida (P_{SAL}).

TEMA VII TRANSFORMADORES

2.1 TIPO DE TRANSFORMADORES

2.1.1 Conceptos generales sobre transformadores

El transformador es un dispositivo estático destinado a transformar energía eléctrica de un circuito a otro siendo el enlace común entre ambos circuitos un núcleo ferromagnético por donde circula un flujo magnético variable. Mecánicamente no tiene partes en movimiento continuo, como la que tienen los motores eléctricos giratorios; pero internamente, en el núcleo lo que se mueve es el flujo magnético alterno, por lo cual se considera dentro de la categoría de las máquinas estáticas.

Para que en el transformador se presente el fenómeno de la transformación de energía de un circuito a otro, se requiere que uno de sus devanados se excite con una tensión alterna, la cual origina el flujo magnético variable y con el se modifica la energía eléctrica de unas características determinadas a otra energía eléctrica alterna con características diferentes en tensión y corriente manteniéndose constante la frecuencia.

Con relación a lo anterior podemos definir al transformador como: “Un dispositivo eléctrico sin partes en movimiento continuo y que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica alterna de un circuito eléctrico a otro a la misma frecuencia pero con valores cambiados en tensión y corriente”.

2.1.2 Partes componentes de un transformador

Un transformador básicamente esta constituido por las siguientes partes:

- a) **Núcleo:** es la parte que enlaza magnéticamente al devanado de alta y baja tensión y proporciona el camino del flujo magnético alterno. Se construye de acero al silicio con laminaciones para reducir las pérdidas de energía por corrientes parásitas.
- b) **Devanados:** son las bobinas de alta y baja tensión las cuales se fabrican de cobre o aluminio y se usan conductores redondos en bobinas de pequeña corriente, o de sección rectangular en bobinas de alta corriente. Las bobinas se pueden fabricar de forma circular, rectangular, cuadrada o escalonada.
- c) **Aislamientos:** En los transformadores se utilizan diferentes tipos de aislamiento, tales como: barniz aislante, cinta de algodón, cinta amarilla, cinta de fibra de vidrio, papel craft, madera desflepada, etc.
- d) **Tanque:** Esta parte del transformador que protege a los devanados y sirve como deposito del medio refrigerante. El tanque contiene una cubierta, base, radiadores, registros, placa de datos, conectadores a tierra, estructura para manejo del tanque, etc.
- e) **Medio refrigerante:** Es el deposito o sustancia que sirve para disipar el calor que se genera en el transformador. Generalmente se utiliza al aceite general o sintético, serpentines de cobre para refrigeración por agua, ventiladores, etc.
- f) **Accesorios:** Dentro de los accesorios tenemos a la válvula de escape, de muestreo, de drene para el cambio de aceite, indicador de temperatura y de presión, indicador de nivel de aceite, boquilla de alta y baja tensión, cambiador de derivaciones, gabinete de protección, etc.

Los transformadores conforme a su utilización los podemos clasificar en la siguiente forma:

1.- Por el número de fases: conforme al número de fases que se pueda tener en el transformador estos se clasifican en transformadores bifásicos y polifásicos. La teoría de funcionamiento de un transformador siempre se hace en función de un transformador monofásico y con relación a él se hace referencia a los transformadores polifásicos.

2.- Por la forma del núcleo: Según sea la forma del núcleo que se tenga en el transformador estos se clasifican en:

A) Transformador de columnas: En estos transformadores los devanados de alta y baja tensión están divididos entre las columnas es decir los devanados envuelven a las columnas del núcleo. A estos transformadores también se les llama tipo núcleo, y se representan en la figura 1.

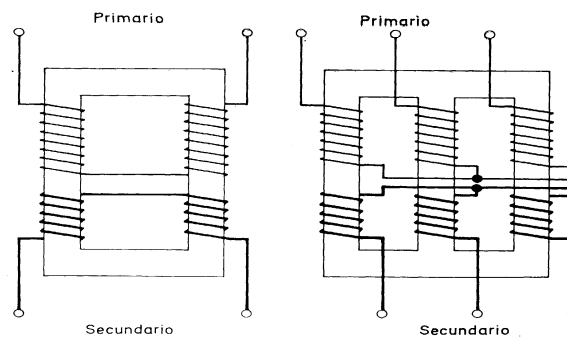


FIGURA 1 Transformador monofásico y trifásico de columnas

B) Transformador acorazado: En estos transformadores los devanados son abarcados particularmente por el núcleo y en comparación de los transformadores de tipo columna estos requieren una mayor cantidad de cobre y una menor cantidad de hierro. Este tipo de transformadores se muestran en la figura 2.

3.- Por la disposición de los devanados: Conforme a la colocación de los devanados de alta y baja tensión en el núcleo del transformador estos se pueden clasificar tal como se muestra en las figuras 3 a, b, c y d:

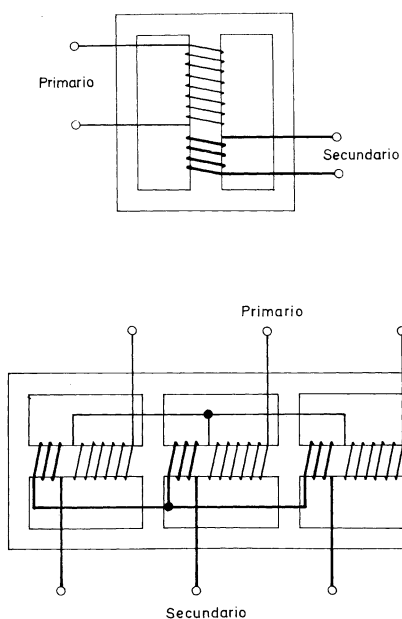
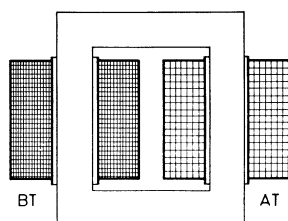
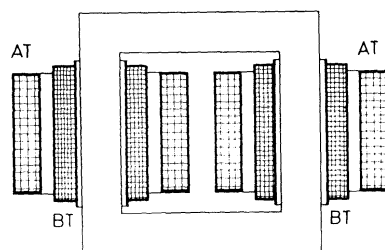


FIGURA 2 Transformador monofásico y trifásico acorazado

a) transformador de devanados separados



b) transformador de devanados concéntricos



c) transformador de devanados superpuestos

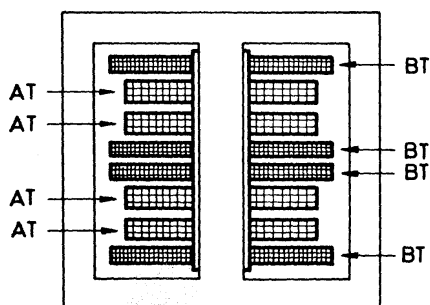


FIGURA 3, a, b y c Disposición de los devanados en el núcleo

d) Transformador de devanados doblemente concéntricos.

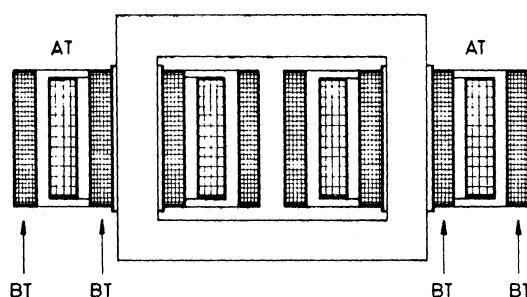


FIGURA 3d Disposición de los devanados en un transformador

En los transformadores tipo columna se utilizan devanados separados, concéntricos y doblemente concéntricos mientras que en los transformadores acorazados se usan devanados superpuestos.

4.- Por el medio ambiente en el que deben funcionar: Según sea el medio ambiente en el que se instalaran o funcionaran los transformadores estos pueden ser para interior o intemperie.

5.- Por su operación: Los transformadores pueden ser transformadores de potencia, de distribución, horno eléctrico, y transformador de medición (instrumento), dentro de este ultimo tipo de transformadores se tiene a los transformadores de potencial y corriente (TP y TC) en los cuales en su devanado secundario se conecta un vólmetro o bobina de potencial de un Wáttmetro o cualquier instrumento de medición según sea la necesidad de la medición eléctrica.

6.- Por su utilización: Conforme a la función que realice el transformador y al devanado que se alimente con corriente alterna, el transformador puede ser elevador o reductor de la tensión.

7.- Por el sistema de enfriamiento: Conforme al tipo de enfriamiento que tenga el transformador estos quedan normalizados de la siguiente forma:

- a) Sumergidos en aceite con refrigeración natural (OA).
- b) Sumergidos en aceite con refrigeración con agua con serpentín (OW).
- c) Sumergido en aceite con refrigeración con agua, refrigeración natural (OW/A).
- d) Sumergido en aceite con refrigeración natural y por refrigeración de aceite (OA/FA)
- e) Sumergido en aceite por refrigeración forzada en aceite y con refrigeración por aire forzado (FOA).
- f) Sumergido en aceite con refrigeración forzada en aceite y refrigeración por agua (FOW).
- g) Sumergido en aceite con refrigeración natural refrigeración forzada por aire y refrigeración forzada por aceite (OA/FA/FO).
- h) Tipo seco con refrigeración forzada por aire (AFA).
- i) Tipo seco con refrigeración natural (AA).
- j) Tipo seco con refrigeración natural y refrigeración forzada con aire (AA/FA).

2.2.- TEORÍA DE OPERACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.

Para el estudio o funcionamiento de un transformador monofásico se hace en relación de un transformador real el cual lo podemos definir como un dispositivo eléctrico en donde dos o más bobinas reales se acoplan magnéticamente cuando estas se encuentran devanadas sobre un mismo núcleo ferromagnético.

Una bobina real es aquella en la cual se considera su resistencia y su reactancia de dispersión la cual es originada por el flujo magnético que se cierra a través del aire y que es propio de cada bobina y además recibe el nombre de flujo de dispersión.

Cuando el devanado primario de un transformador se le aplica una función V_1 estando el devanado secundario en el circuito abierto por el devanado primario se establece una corriente de excitación I_0 la cual origina un flujo magnético Φ_0 que enlaza las dos bobinas y conforme a la ley de Faraday se induce una fuerza

electromotriz en cada devanado la cual se opone a la fuerza que le produce por lo tanto se tiene que:

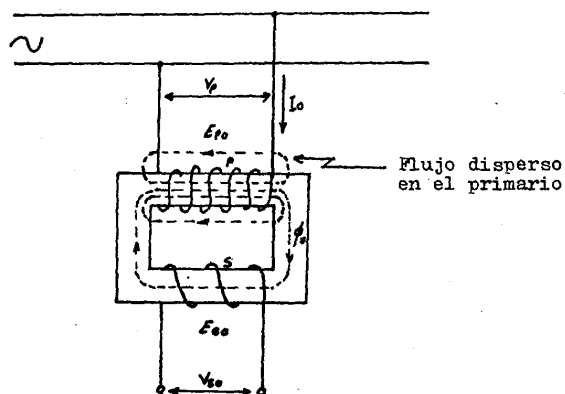
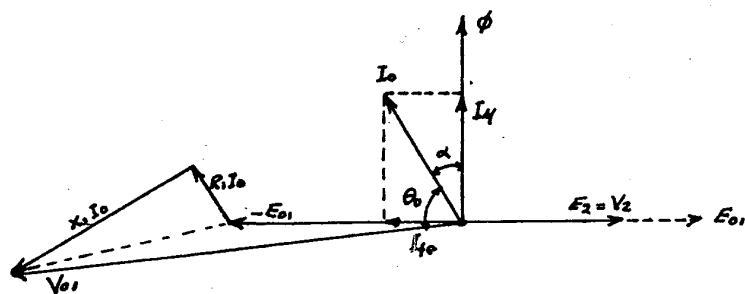


FIGURA 1.2 DIAGRAMA VECTORIAL SIMPLIFICADO EN VACÍO DEL TRANSFORMADOR



$$\vec{V}_{o1} = -\vec{E}_{o1} + \vec{R}_1 \vec{I}_0 + \vec{X}_1 \vec{I}_0$$

FIGURA 2.2 DIAGRAMA VECTORIAL COMPLETO DEL TRANSFORMADOR EN VACÍO

De las figuras anteriores se tiene que:

I_0 = Corriente de excitación.

I_{fe} = Corriente de perdidas en el fierro
 I_{μ} = Corriente de magnetización.
 $I_0 R_1$ = Caída de tensión por resistencia.
 $I_0 X_1$ = Caída de tensión por reactancia.
 $I_0 Z_1$ = Caída de tensión por impedancia.

Cuando al devanado secundario del transformador se le conecta una carga esta origina la circulación de una corriente en dicho devanado la cual origina un segundo campo magnético que produce una fuerza electromotriz en los devanados por lo cual la corriente de excitación del devanado primario pasa de un valor I_0 a un valor de corriente con carga I_1 la cual a su vez origina otro campo magnético que restablece casi instantáneamente el flujo inicial de ambas bobinas (mientras no se tenga una variación de la corriente de carga) y en esta forma se tiene la transferencia de energía de un circuito a otro manteniéndose constante la potencia de la máquina.

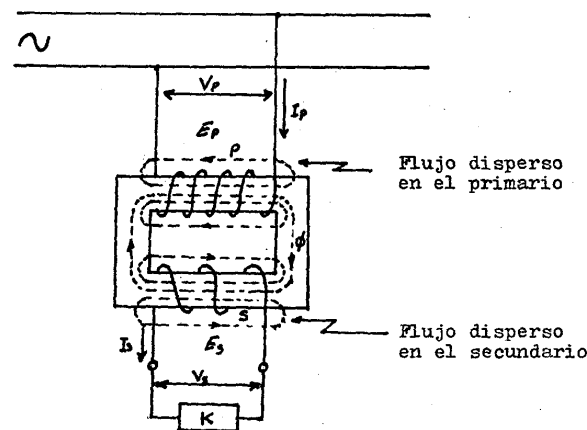


FIGURA 2.3 TRANSFORMADOR REAL MONOFÁSICO CON CARGA

Potencia de entrada = Potencia de salida.

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

De la cual se tiene que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \dots\dots\dots 2.5$$

De donde:

a = Nos representa la relación de transformación del transformador.

V_1 = Es la tensión nominal a plena carga del primario.

V_2 = Es la tensión nominal secundaria a plena carga.

I_1 e I_2 = Son las corrientes nominales del primario y secundario a plena carga.

Para cálculos de la relación de transformación los valores de tensión y corriente deben ser por fase por lo cual en circuitos trifásicos se debe considerar la conexión que se tenga en el devanado primario y secundario para poder determinar la relación de transformación.

El diagrama fasorial completo de un transformador con carga en función del devanado secundario depende del factor de potencia que tenga la carga y esta se presenta en tres casos.

- a) **Cuando el factor de potencia es unitario**, este caso se presenta cuando la tensión y la corriente están en fase por lo cual el ángulo de desfaseamiento es igual con cero; lo anterior es originado por una carga puramente resistiva. El diagrama fasorial queda representado por la siguiente figura:

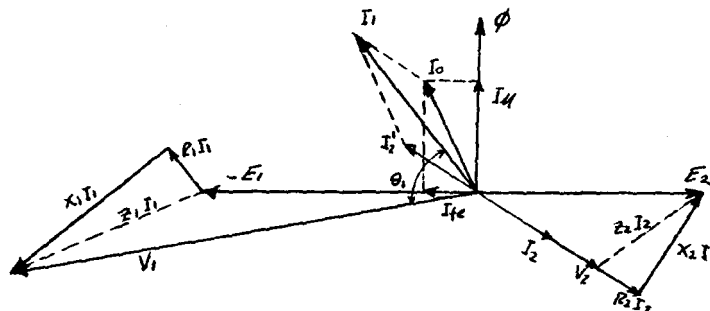


FIGURA 2.4 DIAGRAMA VECTORIAL COMPLETO DE UN TRANSFORMADOR REAL CON UNA CARGA RESISTIVA.

$$F P = 1$$

$$V_1 = E_1 + I_1 Z_1$$

$$V_2 = E_2 + I_2 Z_2$$

- b) **Carga con factor de potencia atrasada (FP = negativo):** Este caso se presenta cuando la carga es puramente inductiva lo cual origina que la corriente secundaria de carga atrase un ángulo “ θ ” con respecto a la tensión nominal de dicha carga. El diagrama vectorial queda determinado por la siguiente figura:

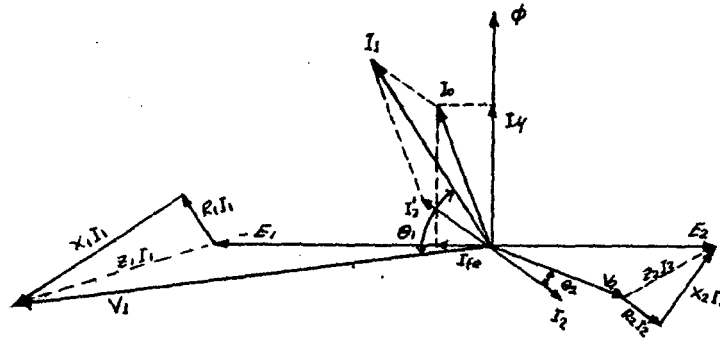


FIGURA 2.5 DIAGRAMA VECTORIAL CON CARGA INDUCTIVA
(FP = -)

- c) **Carga con factor de potencia adelantada (FP = positivo):** Este caso se presenta cuando la carga es puramente capacitiva y se presenta cuando avanza un ángulo θ_2 con respecto a la tensión secundaria nominal con lo cual en este caso la tensión nominal a plena carga V_2 tiende a ser mayor a la fuerza electromotriz secundaria E_2 en dicho devanado tal como se muestra en la siguiente figura.

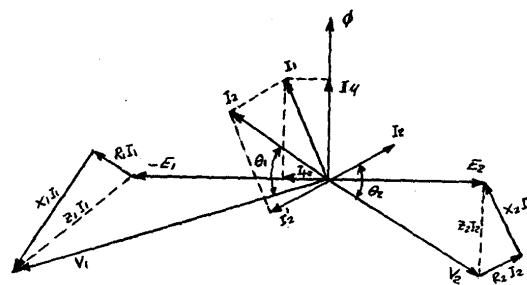


FIGURA 2.6 DIAGRAMA VECTORIAL CON CARGA CAPACITIVA
(FP = +)

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR.

Todas las maquinas de C.A. van a presentar una resistencia eléctrica y una reactancia y ambos nos originan una impedancia por lo tanto al paso de la corriente se va a presentar una caída de tensión por resistencia, reactancia e impedancia las cuales deben considerarse para el análisis algebraico de dichas maquinas.

En el transformador se tendrá una resistencia, reactancia e impedancia tanto en el devanado primario como en el secundario y con la relación a su principio en régimen con carga y sin carga se puede establecer un circuito equivalente del transformador el cual debe estar con relación a función de cambio de carga y sin carga y con ello se establece el siguiente circuito.

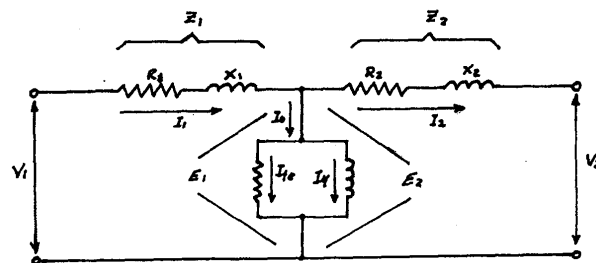


FIGURA 2.7 CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Conforme a la regla de los nodos la cual nos indica que la corriente que entra en un punto es igual a la suma de las corrientes que salen de ese punto. Con relación a esta regla y conforme al circuito eléctrico equivalente del transformador (Figura 2.7), la corriente primaria entra al nodo y la corriente en el secundario y la de excitación salen de él.

$$I_1 = I_2 + I_0 \quad 2.6$$

de donde:

I_1 = Corriente primaria.

I_2 = Corriente secundaria.

I_0 = Corriente de excitación.

En la misma figura se observa que, la corriente de excitación entra al nodo y de él sale la corriente de pérdidas en el hierro y la corriente magnetizante por lo tanto se tendrá:

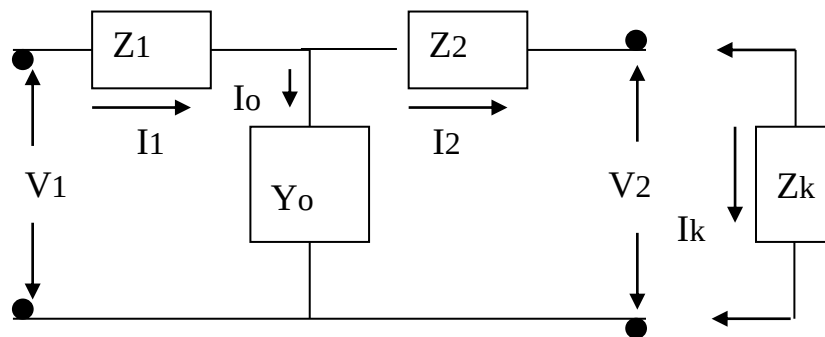
$$I_0 = I_{fe} + I_{\mu} \dots\dots\dots 2.7$$

de donde:

I_{fe} = Corriente de perdidas en el fierro.

I_{μ} = Corriente magnetizada.

El circuito equivalente G_0 nos representa la conductancia y B_0 la suceptancia las cuales se combinan en un parámetro que se denomina admitancia la cual se representa por la letra Y_0 . De la misma forma la combinación de R_1 X_1 y R_2 X_2 nos representan los parámetros de la impedancia primaria y secundaria con lo cual el circuito simplificado de un transformador puede reducirse en la siguiente forma:



Z_k es la impedancia de la carga que se le conecte al transformador

FIGURA 2.8 CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO DEL TRANSFORMADOR

El circuito equivalente del transformador resulta ser de gran utilidad como elemento de calculo cuando en un circuito eléctrico aparece el transformador el cual se puede sustituir por su equivalente reduciendo y con ello se facilitan los cálculos.

Los parámetros de la admitancia, conductancia y suceptancia se determinan cuando el transformador se somete a la prueba de vacío (E_0) corriente de excitación (I_0) y perdidas de vacío (W_0) y mediante el uso de las siguientes igualdades se puede determinar su magnitud.

$$Y_0 = \frac{I_0}{E_0} \dots\dots\dots 2.8$$

$$G_0 = \frac{W_0}{(E_0)^2} = \frac{I_{fe}}{E_0} \dots\dots\dots 2.9$$

$$B_0 = \sqrt{(Y_0)^2 - (G_0)^2} \dots\dots\dots 2.10$$

$$B_0 = \frac{I_\mu}{E_0} \dots\dots\dots 2.11$$

de donde:

Y_0 = Admitancia (MHO).

G_0 = Conductancia (MHO).

B_0 = Suceptancia (MHO).

W_0 = Perdidas de energía en vacío (Watts)

La prueba de vacío consiste en alimentar al transformador por su devanado de B.T. aumentándole gradualmente la tensión desde cero hasta llegar a la tensión nominal de dicho devanado con lo cual se tiene la magnitud de E_0 , la corriente de excitación del devanado y las perdidas de vacío (W_0). Durante la prueba el devanado secundario debe estar en circuito abierto.

La resistencia, reactancia e impedancia primaria del transformador se determina mediante la prueba de corto circuito la cual consiste en alimentar al transformador por el devanado de alta tensión y se pone en corto circuito el devanado de baja tensión. Esta prueba se debe efectuar a una tensión reducida por lo tanto la tensión que se aplique al devanado primario al de alta tensión debe empezar desde cero y se aumenta gradualmente hasta que los amperímetros instalados en dicho devanado marquen la corriente nominal del devanado de alta tensión y con ello se toman lecturas de la tensión de corto circuito, corriente de corto circuito y perdidas de corto circuito con lo cual se esta en condiciones para determinar las magnitudes de la resistencia, reactancia, impedancia del devanado. Las perdidas de corto circuito también se conocen como perdidas en el cobre y estas son constantes por lo tanto para efectuar los cálculos en transformadores trifásicos se deben usar valores por fase y se dice que los valores están referidos al primario del transformador.

2.5 REGULACIÓN DE TENSIÓN Y RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR

2.5.1 Regulación de tensión: Por definición la regulación de tensión de un transformador de tensión constante, es la variación de la tensión en el secundario del transformador expresada en tanto por ciento de la tensión nominal a plena carga del mismo devanado, que se produce cuando con determinado factor de potencia se anula la potencia útil, manteniéndose constante la tensión aplicada al devanado primario.

$$\%Reg = \frac{V_{O2} - V_2}{V_2} 100 \quad 2.12$$

de donde:

V_{O2} es la tensión en vacío por fase en el secundario del transformador

V_2 es la tensión nominal a plena carga por fase del secundario del transformador

La regulación de tensión es diferente para cualquier tipo de carga que se conecte al secundario del transformador; por lo tanto el porcentaje de regulación para un transformador referido al secundario se determina por la siguiente ecuación:

$$\%Reg = \frac{\frac{V_{O1} - V_2}{a}}{V_2} 100 \quad 2.13$$

2.5.2 Rendimiento del transformador,

Se entiende por rendimiento de un transformador, así como de cualquier otra máquina eléctrica; a la relación existente entre la potencia entregada por el transformador a la potencia aplicada a él, ambas expresadas en unidades de potencia activa, es decir:

$$\text{Rendimiento } (\eta) = \frac{\text{Potencia de salida } (P_s)}{\text{potencia de entrada } (P_e)}$$

Generalmente el rendimiento se representa en “%”, con lo cual la igualdad anterior también se puede representar como:

$$\% \eta = \frac{P_s}{P_e} 100 \quad 2.17$$

2.6 TRANSFORMADORES CON DERIVACIONES Y REGULADORES DE TENSIÓN

6.1 Transformadores con derivaciones: Un mismo transformador puede tener, sobre el núcleo magnético dos o más primarios y secundarios para la misma o diferente tensión y distintas potencias. La aplicación de estos transformadores son muy variadas y se fabrican de muy pequeña potencia o muy alta potencia.

Entre los de muy pequeña potencia cabe destacar los transformadores de alimentación de radio receptores cuya función es triple, es decir:

- a) Separar eléctricamente el equipo de la red.
- b) Reducir la tensión de la red a valores requeridos en los circuitos de baja tensión.
- c) Elevar la tensión de la red a las tensiones necesarias para los circuitos de alta tensión.

Un transformador con derivaciones de alimentación típica puede tener, los siguientes devanados tal como se muestra en la figura 2.14:

1. Devanado primario para 220 V.
2. Devanado secundario para 600V con toma central, para alimentación de los ánodos del rectificador.
3. Devanado secundario para 5V y 2A, para calefacción del filamento del rectificador.
4. Devanado secundario para 6.3V y 3A, para la calefacción de las válvulas restantes.

Las variantes de los transformadores con derivaciones respecto al modelo básico son muy numerosas y depende de las tensiones y corriente que se necesiten y uso que se les dé. Pueden requerirse devanados secundarios adicionales para lámparas de señalización, relés, motores de control, etc.

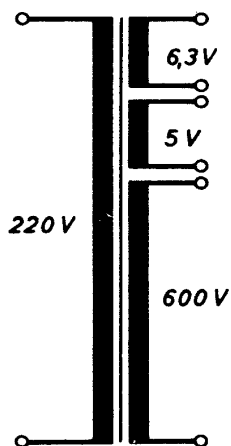


FIGURA 2.14 TRANSFORMADOR CON DERIVACIONES

Otro empleo de aplicación se tiene en los rectificadores de vapor de mercurio, cuyos transformadores de alimentación llevan varios secundarios para la alimentación de los ánodos, para el circuito local de encendido del arco, etc.

En los últimos años, se han construido transformadores de gran potencia y altas tensiones con 2 o más circuitos primarios y secundarios independientes. Se usan para la alimentación de 2 o más líneas de transporte, en vez de utilizarse transformadores independientes, y para la subdivisión de la energía entre distintos juegos de barras, reduciendo en esta forma las capacidades necesarias de los disyuntores y aparatos de maniobra. La construcción de estas unidades de gran potencia disminuye su costo y además con la subdivisión de circuitos se evita el encarecimiento de los elementos de protección. En estos casos, debe considerarse la reactancia de dispersión entre los distintos devanados para evitar la transmisión de perturbaciones de uno a otro sistema y mantener las intensidades de corriente de cortocircuito a límites admisibles.

6.2 Regulador de inducción: Su funcionamiento esta basado en la teoría del motor de inducción y estos regulador pueden ser monofásico o trifásicos, en ambos casos se trata de un transformador cuyos secundarios se conectan en serie y los primarios en derivación, con los conductores de una red para variar la tensión de la línea, compensando de esta forma la caída de tensión que origina la carga en los circuitos de alimentación.

Su ventaja principal sobre otros procedimientos de regulación es que la variación de tensión es continua y sin interrupciones de los circuitos eléctricos, no se producen arcos o chispas y sin contactos expuestos al desgaste o deterioro.

Tienen el inconveniente de ser muy caros y de factor de potencia inferior a los transformadores de tomas regulables

El regulador de inducción monofásico está constituido por dos devanados, uno primario y otro secundario, cuyos ejes magnéticos pueden formar entre sí un ángulo variable. Si se modifica la posición angular relativa aumenta o disminuye el flujo magnético entre la bobina primaria y secundaria, lo que origina el correspondiente aumento o disminución de la fuerza electromotriz inducida en el secundario. Como se trata de corriente monofásica, la f.e.m. primaria y secundaria están en fase o en oposición; es decir, que la tensión secundaria irá aproximadamente en fase o en oposición con la tensión de línea, según el sentido de las conexiones o el ángulo, mayor o menor a 180° , que formen entre sí las polaridades positivas de los ejes magnéticos de ambos devanados. De esta forma, la tensión de línea a la salida del regulador puede variarse entre dos límites cuya diferencia equivale al doble de la tensión eficaz máxima que puede inducirse en el devanado secundario.

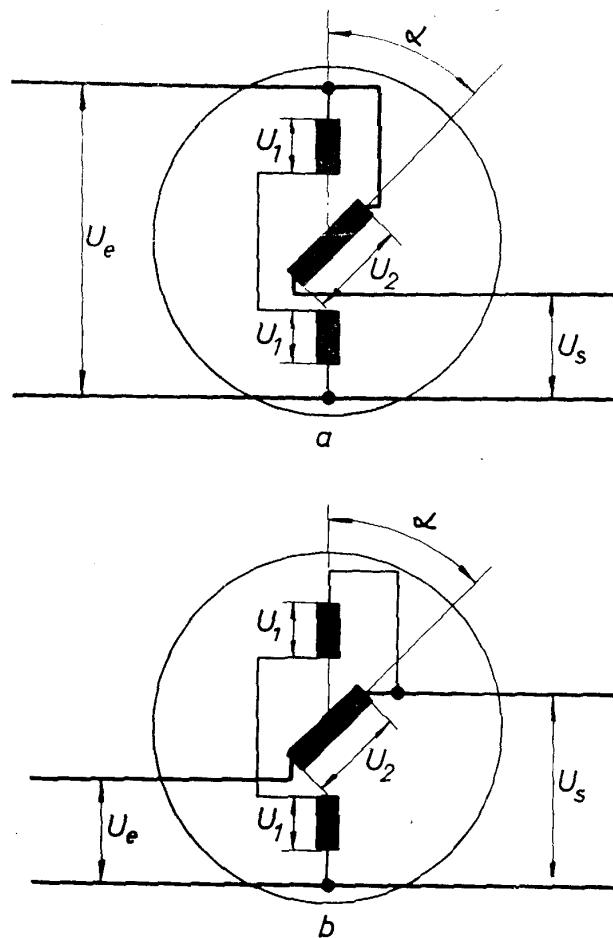


FIGURA 2.15 REGULADOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO: (a).- Conexión del primario a la entrada del regulador, (b).- Conexión del primario a la salida del regulador.

El regulador de inducción trifásico esta constituido por un motor trifásico de inducción al cual se impide que gire por bloqueo mecánico. Con relación a la figura 2.13 se tiene que los devanados A, B, C del primario del regulador de inducción (Estator) se conectan en estrella y a las terminales de la línea de alimentación A, B, C. Los devanados a, b, c, del secundario del regulador (Rotor) se conectan en serie con las terminales secundarias de la línea que conecta a la carga.

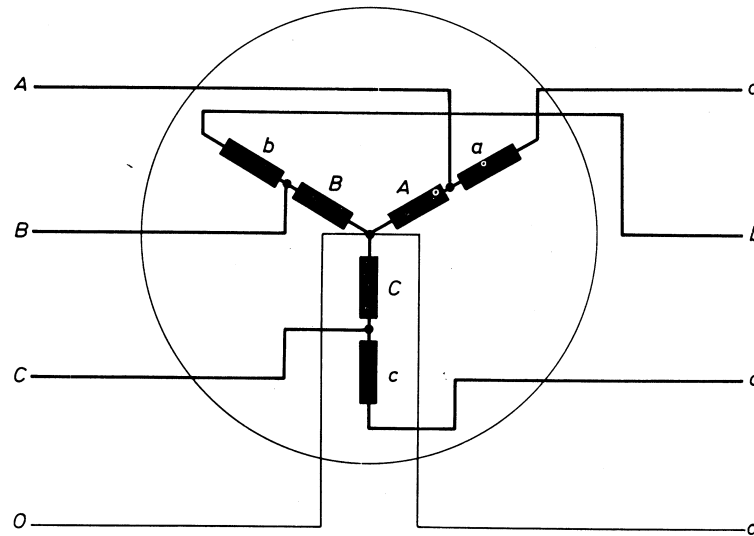


FIGURA 2.16 CONEXIÓN DE UN REGULADOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO

La corriente que circula por los devanados primarios crea un campo magnético giratorio de amplitud constante en el entrehierro, él induce en los devanados secundarios tensiones de valor eficaz constante cuyos desfases respecto a las tensiones del primario varían cuando se hace girar el rotor adquiriendo diferentes posiciones respecto al estator. La tensión de salida V_s en la terminal “a” del secundario, es igual a la suma vectorial de la tensión de entrada V_e , más la tensión secundaria V_2 inducida en la fase “a” por el campo magnético giratorio. Es decir:

$$V_s = V_e + V_2$$

El rotor del regulador de inducción debe estar bien bloqueado para compensar el esfuerzo que tiende a hacerlo girar. La posición del estator respecto al rotor se modifica de la misma forma que para el caso de un regulador monofásico, mediante un volante accionado a mano o por medio de un motor controlado por pulsadores o por contactos de un relé de tensión derivado entre los puntos donde se requiere mantener constante la tensión.

2.7 AUTOTRANSFORMADOR

Un autotransformador es un transformador con un solo devanado; resulta ser un dispositivo muy útil para algunas aplicaciones debido a que es muy simple en su construcción y de costo relativamente bajo comparado con un transformador de devanados múltiples. Sin embargo no proporciona aislamiento eléctrico y en consecuencia no puede aplicarse en donde se requiere tal característica. El circuito de un autotransformador monofásico puede efectuarse a partir de un transformador de dos devanados conectados eléctricamente en serie los dos devanados de modo que las polaridades sean aditivas. Supóngase que esto es lo que se ha hecho en el circuito de la figura 2.20, en donde el primario del transformador de dos devanados es el devanado AB y el secundario es el devanado BC, con lo cual el primario del autotransformador es ahora la suma de estos dos devanados, es decir AC y el secundario es el devanado BC, con lo cual la relación de transformación del autotransformador es:

$$a_{at} = \frac{V_{AB} + V_{BC}}{V_{BC}} = \frac{N_{AB} + N_{BC}}{N_{BC}} = a + 1$$

Donde

“a” es la relación de transformación de un transformador de dos devanados.

$N_{AB} = n_s$ es el devanado serie

$N_{BC} = n_2$, es el devanado secundario (devanado común)

$N_{AC} = n_1$, es el devanado primario

Con relación a lo anterior las ecuaciones con las cuales se determina la relación de transformación del autotransformador se determinan por:

$$a_{at} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{n_2 + n_s}{n_2}$$

$$n_s = n_1 - n_2$$

El autotransformador además de proporcionar una relación de transformación mayor, también puede proporcionar una mayor potencia aparente, con relación a la que puede proporcionar un transformador de dos devanados. La razón es que la transferencia de potencia del primario al secundario de un autotransformador, no es solamente por inducción magnética como sucede en un transformador, sino también por conducción.

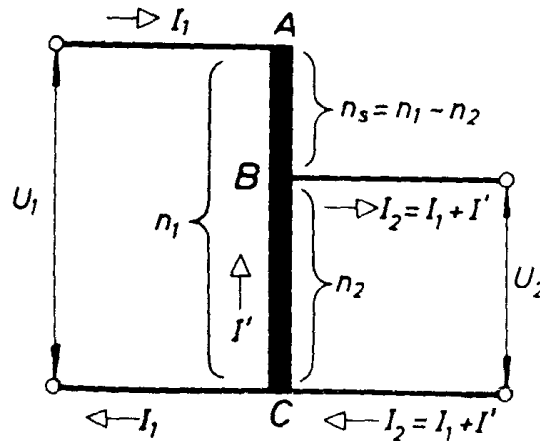


FIGURA 2.17 AUTOTRANSFORMADOR MONOFÁSICO

El autotransformador puede utilizarse como reductor o elevador de tensión y en semejanza con un transformador de dos devanados monofásico de las mismas características, presenta las siguientes ventajas y desventajas:

a) Ventajas:

1. Menor tamaño
2. Menor costo
3. Mejor rendimiento
4. Menor corriente magnetizante
5. Mejor factor de potencia
6. Mejor regulación de tensión

b) Desventajas:

1. conexión eléctrica entre los circuitos de alta y baja tensión
2. Mayor elevada corriente de corto circuito

Los auto-transformadores también se pueden montar en conexión trifásica; sin embargo, existe el inconveniente de que por la propia construcción del autotransformador es necesario considerar la misma conexión en el devanado primario y secundario, excepto si un devanado se conecta en estrella el otro devanado puede tener la conexión estrella o zigzag. A consecuencia de esta limitación no existen tantas variedades de conexiones trifásicas, como en el caso de los transformadores.

Entre las aplicaciones de los autotransformadores se pueden citar las siguientes:

1. Cuando sea necesario aislar el circuito de baja tensión del circuito de alta tensión, es decir cuando la diferencia entre una y otra tensión sea inferior a 25%.
2. Como distribuidores de carga entre varios transformadores, cuyas impedancias sean inadecuadas para este servicio, o que trabajen con tensiones de servicio ligeramente diferentes.
3. Como arrancadores para motores trifásicos asíncronos. Generalmente se utilizan autotransformadores trifásicos en conexión estrella, o preferiblemente en conexión V con la cual se disminuye el número de contactos requeridos.
4. Para obtener un sistema trifilar a partir de un sistema bifilar; sacando una derivación del punto medio del devanado y conectando esta derivación a tierra, se obtiene el tercer conductor del sistema.

2.8 TRANSFORMADORES TRIFASICOS

Para facilitar la conexión de los devanados que pueda tener un transformador, se fijan ciertas normas para establecer las marcas terminales de cada devanado y la polaridad del transformador, con lo cual en el caso de un transformador monofásico con dos devanados al devanado de mayor tensión se le llama alta tensión y en general sus terminales se marcan con las letras H_1 y H_2 y el devanado de menos tensión se le llama baja tensión y sus terminales se marcan con X_1 y X_2 independientemente de que el devanado de baja o alta tensión sea primario o secundario.

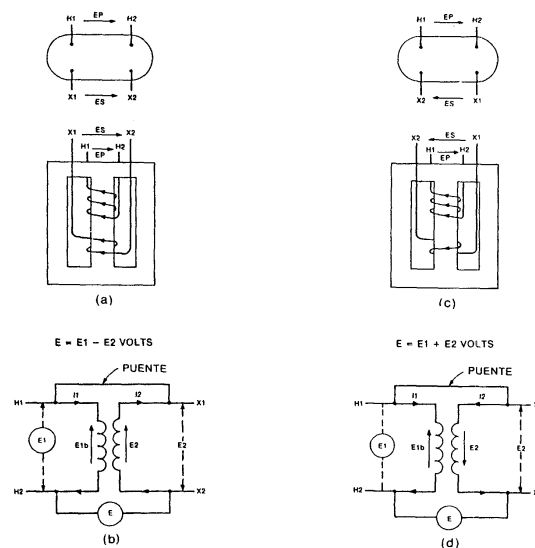
Si el transformador tiene 3 o 4 devanados para diferentes tensiones, las terminales de mayor tensión se deben marcar con H_1 y H_2 al siguiente devanado que tenga mayor tensión que el primario se le asigna las letras X_1 y X_2 y al siguiente devanado de mayor tensión se marca con Y_1 e Y_2 . En forma general para un transformador trifásico las terminales de alta tensión se marcan con letras minúsculas es decir si las terminales (3) de la conexión del primario se marcan N A B y C y el secundario con n a b y c.

Las marcas terminales del transformador se colocan de forma tal que la tensión inducida entre H_1 y H_2 X_1 y X_2 tengan la misma dirección, es decir que estén en fase por lo tanto para asignarle al transformador las letras X_1 y H_1 se debe seguir la siguiente convención.

Se coloca la persona de frente y de lado de alta tensión y la terminal que se encuentra en el lado derecho esa debe ser la terminal H_1 y la terminal siguiente debe ser H_2 . Del lado de baja tensión la terminal adyacente a H_1 le corresponde X_1 y ala siguiente X_2 .

La polaridad de un transformador nos indica el sentido relativo instantáneo del flujo de corriente en las terminales del devanado de alta tensión con respecto al devanado de baja tensión, para un transformador monofásico la polaridad queda determinada en función de considerar un par de terminales adyacentes de los dos devanados conectados entre sí aplicando a uno de ellos una tensión de modo que si la tensión inducida entre las dos terminales de ambos devanados con respecto a la tensión aplicada es mayor entonces se dice que la polaridad es aditiva. Si la tensión inducida entre las terminales es menor a la tensión aplicada la polaridad es sustractiva.

En general los transformadores se diseñan y fabrican con polaridad sustractiva y sobre la base de ella se establece la teoría de operación del transformador.

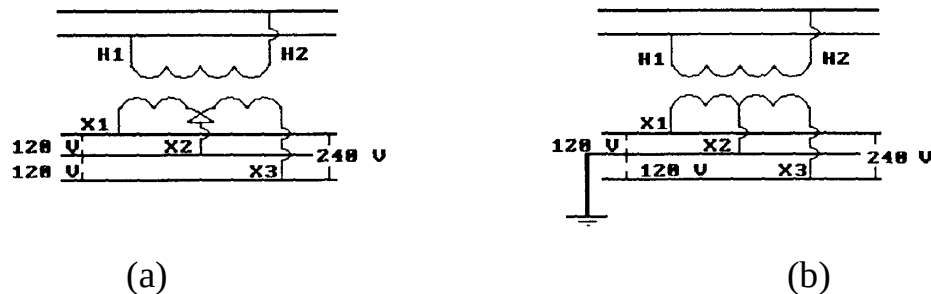


- (a) Polaridad aditiva, marcas terminales y posición de devanados
- (b) Circuito eléctrico para la prueba de polaridad aditiva
- (c) Polaridad sustractiva, marcas terminales y posición de devanados.
- (d) Circuito eléctrico para la prueba de polaridad sustractiva.

FIGURA 2.18 MARCAS TERMINALES Y POLARIDAD DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

Conexiones de los devanados: Cuando un transformador monofásico tiene dos o más bobinas secundarias estas se pueden conectar en serie o paralelo según sea la tensión y corriente que se quiera obtener en el devanado secundario. En las conexiones monofásicas del transformador, se pueden presentar los siguientes casos más comunes:

1. Una fase tres hilos (1F3H); en este caso el devanado primario se conecta a una alimentación de una fase y tierra, ó entre dos fases, mientras que del secundario salen 3 hilos, es decir que este devanado está dividido en dos partes iguales obteniéndose con ello las magnitudes de tensión, que se indican en la siguiente figura.



- (a) Conexión de devanados secundarios en serie para obtener 120/240 Volts
- (b) Conexión de un solo devanado secundario dividido en dos partes iguales para obtener 240/120 Volts

FIGURA 2.19 CONEXIÓN UNA FASE TRES HILOS

Para esta conexión se recomienda que la carga de cada mitad del devanado esté balanceada, para evitar sobrecargar cualquiera de las dos mitades.

2. Una fase dos hilos (1F2H); esta conexión también es llamada conexión paralelo, es similar a la anterior con la diferencia de que del secundario solo salen 2 hilos, con lo cual únicamente se dispone de una magnitud de tensión, tal como se indica en la siguiente figura:

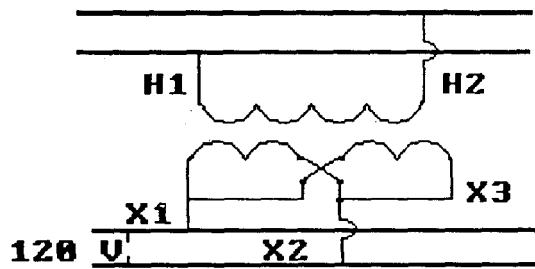


FIGURA 2.20 CONEXIÓN UNA FASE 2 HILOS

Conexiones trifásicas; Un transformador trifásico puede ser una sola unidad o estar formado por un banco de 3 transformadores monofásicos interconectados. La mayoría de los transformadores trifásicos se construyen conectando las fases entre líneas de alimentación para formar una DELTA, o conectando un extremo de cada devanado que forma una fase entre sí y los otros extremos a las líneas de alimentación para formar una ESTRELLA.

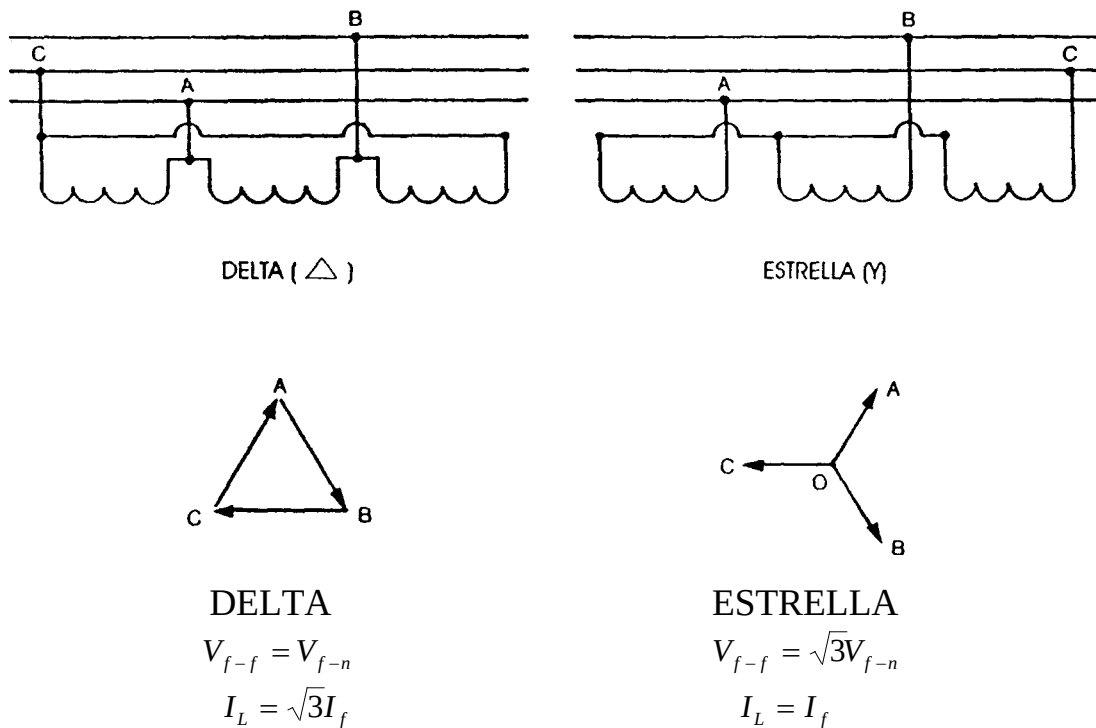


FIGURA 2.21 CONEXIONES TRIFÁSICAS

Con relación a las conexiones anteriores en el transformador trifásico, en el devanado primario o secundario se puede efectuar la conexión delta o estrella, conforme a las necesidades del sistema eléctrico al cual se conectara. En la siguiente figura se muestra las conexiones trifásicas más comunes:

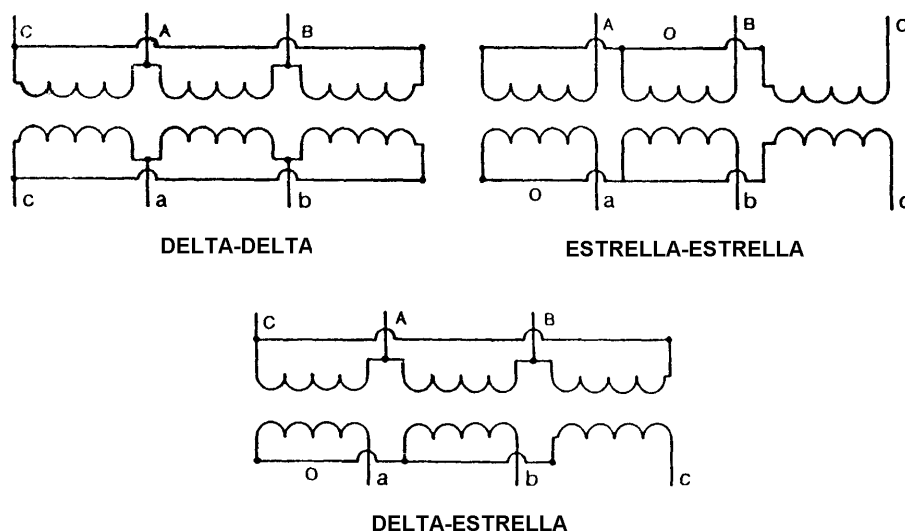


FIGURA 2.22 CONEXIONES TRIFÁSICAS COMUNES

Para transformadores trifásicos no es suficiente el marcado de las terminales para indicar la polaridad, ya que esta queda definida por la conexión interna entre fases así como la localización relativa de las terminales. Usualmente se designa por un diagrama vectorial el cual indica el desplazamiento angular de ambos devanados en donde los vectores representan la tensión inducida.

El desplazamiento angular de un transformador trifásico es el ángulo expresado en grado que hay entre el vector que representa la tensión de fase al neutro en la fase correspondiente en el lado de baja tensión. Se considera como dirección de rotación del ángulo que se establece en el sentido contrario y entre las manecillas del reloj.

El desplazamiento angular en el transformador puede ser de 0° , 180° , 150° y 30° . En la siguiente tabla se representa el desplazamiento angular para las conexiones más comunes:

TABLA 2.1

DESPLAZAMIENTO ANGULAR 0°				
DESPLAZAMIENTO ANGULAR 180°				
DESPLAZAMIENTO ANGULAR 30°				

2.9 ESPECIFICACIONES NOMINALES DE LOS TRANSFORMADORES

Con relación a lo anterior los valores nominales a plena carga de un transformador son principalmente la potencia, la tensión y la corriente de él los cuales se indican en la placa de datos del transformador aparte de otros parámetros nominales de dicha máquina estática.

Dentro de la potencia nominal tenemos tres magnitudes que se conocen como:

- a) Potencia aparente: la cual se representa por la letra S y generalmente nos representa los Volts – amperes y es el producto de la tensión por la corriente y además se puede expresar en kilovolts – amperes o megavolts – amperes y algebraicamente se puede determinar por la siguiente ecuación:

Transformador monofásico

$$S_{1\phi} = VI \quad 2.6$$

sus unidades son (VA, kVA, MVA)

Transformador trifásico

$$S_{3\Phi} = \sqrt{3} V_L I_L \dots\dots\dots 2.7$$

$$S_{3\Phi} = 3 V_f I_f = 3 S_{1\Phi} \dots\dots\dots 2.8$$

- b) Potencia útil: Esta potencia también recibe el nombre de potencia activa la cual se representa por la letra P y sus unidades son el Watts, kW o MW y esta en función de la potencia aparente y el F.P. de la carga y se puede determinar por las siguientes igualdades.

Transformador monofásico

$$P_{1\Phi} = V_f I_f \cos\theta$$

Transformador trifásico

$$P_{3\Phi} = \sqrt{3} V_L I_L \cos\theta$$

$$P_{3\Phi} = 3 V_f I_f = 3 P_1$$

$$F.P = \cos\theta = \cos\angle_I^V$$

- c) Potencia reactiva: Esta potencia se presenta cuando la potencia aparente se multiplica por el seno del ángulo del factor de potencia y siempre se tiene presente en los circuitos de corriente alterna y no tiene un trabajo útil por lo que esta potencia nos hace que la potencia útil disponible sea alta o baja por lo tanto su magnitud debe ser lo más pequeña posible para que la potencia casi sea igual a la potencia aparente con lo cual por ley se establece un F.P. nominal el cual debe de ser de 0.9 las ecuaciones que se pueden utilizar para determinar la potencia reactiva son las siguientes la cual generalmente se representa por la letra “Q” y sus unidades (VAR, KVAR, MVAR).

Transformadores trifásicos

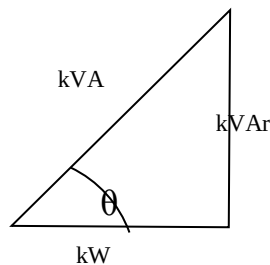
$$Q_{1\Phi} = V_f I_f \sen\theta$$

Transformador trifásico

$$Q_{3\Phi} = \sqrt{3} V_L I_L \text{ sen}\theta$$

$$Q_{3\Phi} = 3 V_f I_f \text{ sen}\theta$$

La potencia útil y la potencia reactiva están en función de la potencia aparente por lo tanto se puede establecer el triángulo de potencias el cual queda determinado por la siguiente figura:



Aparte de las especificaciones mencionadas anteriormente se tienen otras no menos importante tales como:

- d) Tipo de enfriamiento
- e) Número de fases
- f) Frecuencia en Hertz
- g) Tensión de alta tensión
- h) Conexión del devanado de alta tensión
- i) Tensión de baja tensión
- j) Conexión del devanado de baja tensión
- k) Porcentaje de impedancia y resistencia
- l) Elevación de temperatura, la cual puede ser: 55°C, 65°C ó 55/65°C sobre una ambiente máxima de 40°C y promedio de 30°C en un período de 24 horas.
- m) Altura de operación sobre el nivel del mar
- n) Nivel básico de aislamiento al impulso
- o) Líquido refrigerante, etc.

CONCLUSIÓN

Con la elaboración de este libro de texto de conversión de la energía II, para la carrera de ingeniería en control y automatización en el cual se incluyen diferentes temas relacionados con las maquinas estáticas y giratorias de corriente alterna en sus modalidades de generador o motor síncrono y motores asíncronas, la carrera contará con un libro de texto que se apega un 100% al programa de estudios vigente en la escuela, con lo cual el alumno tendrá material didáctico que satisfaga sus necesidades de consulta en la asignatura teórico - practica, además el docente tendrá el material de apoyo el cual complementará con su experiencia dentro del ramo de la ingeniería y de las asignaturas que imparta dentro o fuera de la carrera antes mencionada.

RECOMENDACIONES

Para que se cumpla el objetivo general de la asignatura, se recomienda:

- 1) El docente que imparta la teoría debe impartir el laboratorio, para que coordine el avance programático de la teoría y laboratorio.
- 2) El alumno debe tener los conocimientos básicos en electricidad y magnetismo, así como haber cursado las asignaturas de: conversión de la energía I, matemáticas I, II, III y IV, tecnología de los materiales eléctricos, electroctenia e instalaciones eléctricas I.
- 3) El personal docente que imparta la asignatura independientemente de que el programa de estudios no lo indica, dará resolución de problemas típico en las unidades que lo requieran, para fundamentar la teoría expuesta y los alumnos tengan una mejor comprensión y aplicación de los conceptos estudiados en la unidad.

- 4) Se recomienda que el docente haga uso del material didáctico y audiovisual con el que cuenta la escuela sus instalaciones, o que este a su alcance para mejorar la enseñanza aprendizaje.

BIBLIOGRAFIA

- STEPHEN J. CHAPMAN, Máquinas Eléctricas, Editorial McGraw Hill, 1978
- MICHAEL LIWSCHTZ-GARIK, CLYDE C. WHIPPLE, Máquinas de corriente alterna, 2ª . Impresión, Editorial C.E.C.S.A., abril de 1971
- IRVING L. KOSOW, Máquinas eléctricas y transformadores, Editorial Prentice Hall, 2ª edición, 1991
- JOHN H. KUHLMANN, Diseño de aparatos eléctricos, Editorial C.E.C.S.A., 1983
- J. R. COGDELL, Fundamento de máquinas eléctricas, Editorial Prentice Hall, Primera edición 2002
- ENCICLOPEDIA CEAC DE ELECTRICIDAD, transformadores convertidores, Ediciones CEAC, S.A., 1979
- ENRIQUE RAS, Transformadores de potencia de medida y de protección, Editorial Alfaomega Marcombo. 7ª edición renovada, 1991
- LEANDER W. WATSCH, Máquinas electromagnéticas y electromecánicas, Editorial Alfaomega, 1990
- VICENTE DEL TORO, Fundamentos de ingeniería eléctrica, Editorial Prentice Hall, 1988
- SYED A. NASAR, PH. D., Máquinas eléctricas y electromecánicas, Editorial McGraw Hill, 1990
- DAWES CHESTER L., Tratado de electricidad. Corriente alterna. Tomo II, Ediciones Gustavo Gili, S.A., 5ª edición, 1971
- PABLO VARGAS PRUDENTE, Alternador síncrono, Edición Instituto Politécnico Nacional, 1996
- PABLO VARGAS PRUDENTE, Motores síncronos, Ediciones Instituto Politécnico Nacional, 1996
- PABLO VARGAS PRUDENTE, Ahorro de energía en motores eléctricos, Editorial Limusa, 1997

- CARLOS LUCA MARIN, Máquinas eléctricas, Tomo 2, Editorial Representaciones y Servicios de Ingeniería, S. A., 1988
- JACINTO VIQUEIRA, Redes eléctricas, Tomo 3, editorial Representaciones y servicios de Ingeniería S. A., 1985