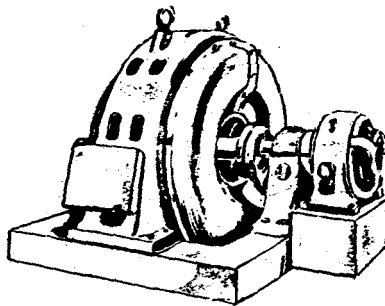


Capítulo 6

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA SINCRONA TRIFASICA

- 6.1 Aspectos físicos y constructivos
- 6.2 Campos magnéticos del rotor y del estator
- 6.3 El torque electromagnético
- 6.4 La f.e.m. inducida
- 6.5 Factores de distribución y de paso



ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA SINCRONA TRIFASICA

Las máquinas síncronas, en nuestro medio, son, en su mayoría, trifásicas y se usan más como generadores.

Los generadores síncronos de corriente alterna se llaman también alternadores.

En el país la firma ALGESA fabrica estas máquinas.

Los motores síncronos son de uso limitado en nuestro medio, aparte que no se construyen en el país.

6.1 ASPECTOS FISICOS Y CONSTRUCTIVOS

El funcionamiento de los generadores síncronos se basa en el principio de hacer girar una espira dentro de un campo magnético para que se induzca en aquélla una fuerza electromotriz.

También sucede lo mismo si se deja la espira fija y se hace girar el campo, es decir, los electroimanes que lo producen.

Este último sistema es el más conveniente puesto que en la espira se tendrá fuerte corriente, que es la misma que se utilizará en la red, mientras que en los electroimanes se tiene sólo una pequeña corriente continua auxiliar, encargada de producir el campo magnético necesario.

Por esta razón, la construcción de las máquinas síncronas se ha orientado en ese sentido. En la figura 6.1 se ilustra el principio constructivo aludido.

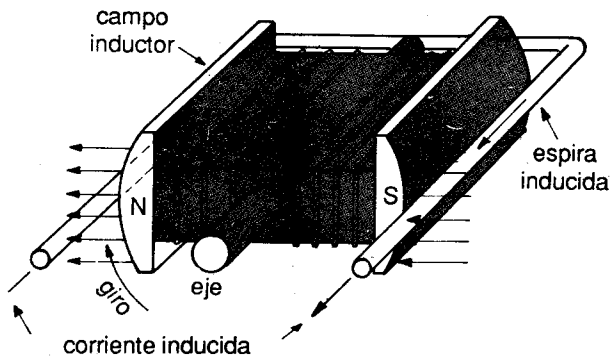


Fig. 6.1 Principio constructivo.

En la práctica, no se coloca una sola espira sino, un bobinado completo y, la mayoría de las veces, trifásico, para redes de este tipo.

Para el funcionamiento del generador se hace girar los electroimanes que producen el campo magnético mediante el auxilio de un motor primo (una turbina de vapor, de gas o hidráulica, un motor de combustión a petróleo o a gasolina, etc.). Este motor se acopla al eje del generador.

Los generadores tradicionales tienen un pequeño generador de corriente continua llamado **excitatriz** que alimenta los electroimanes inductores. Este generador suele estar acoplado al mismo eje principal del generador, directamente o por medio de un juego de poleas y correas.

La corriente proveniente de la excitatriz entra a los bobinados inductores mediante un contacto deslizante formado por dos escobillas que rozan contra dos anillos conductores aislados del eje. Estos anillos están unidos al principio y al fin del bobinado de los electroimanes ejecutado en la misma forma que en el bobinado inductor de las máquinas de continua.

La excitatriz es un generador de continua con excitación **shunt**, del modelo común, que tiene reóstatos en el circuito inductor y en el inducido para poder variar la corriente de excitación del generador.

Un generador síncrono está compuesto por varias partes perfectamente separadas, cada una de las cuales tiene una misión bien definida. Estas son: el estator, el rotor la carcasa y la excitatriz. En la figura 6.2 se muestra la ubicación relativa de todas estas partes entre sí, en una representación resumida y más bien simbólica.

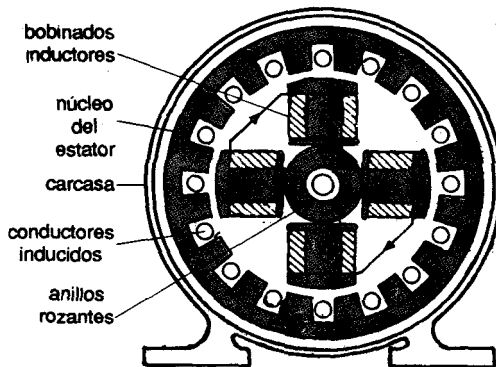


Fig. 6.2 Partes componentes de un generador.

6.1.1. El estator

Está compuesto por un núcleo de chapas de material ferromagnético, sujetas, formando un paquete, mediante una serie de pernos o de chavetas en forma de cola de milano.

Las chapas están aisladas entre sí, para evitar, en lo posible, las pérdidas producidas por las corrientes parásitas, que se traducen en un calentamiento de los núcleos de hierro sometidos a campos magnéticos alternos, calor que se produce a expensas de la energía eléctrica de la máquina.

El estator tiene ranuras en las que se alojan los conductores activos o inducidos que forman el bobinado del estator. Para aislar las bobinas del núcleo se colocan tubos de cartón aislante, abiertos, ocupando una longitud ligeramente mayor que la de la ranura del núcleo.

La figura 6.3 muestra el aspecto del estator de un generador en el que pueden verse las ranuras laterales para la corriente de aire de refrigeración, la que puede ser natural o forzada. Se ve, asimismo, las ranuras con las bobinas colocadas.

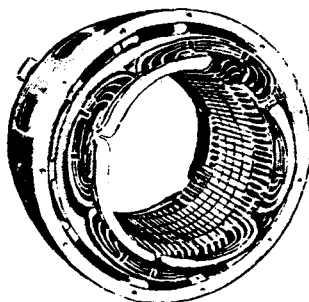


Fig. 6.3 Estator bobinado de un generador

6.1.2 El rotor

El inductor o rueda polar, se suele construir de una pieza para las máquinas de reducido número de polos o de un núcleo central macizo, al que se fijan las masas polares, en las máquinas multipolares.

El número de polos p , está ligado a la frecuencia f (Hz) de la red y a la velocidad de giro n (rpm) del rotor, por la relación:

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

Como la frecuencia de la red es dato, generalmente se tiene $f = 60$ Hz en el Perú, y la velocidad de giro del rotor depende del motor primo que se elija, el número de polos resultará grande para los generadores movidos por turbinas hidráulicas o motores de combustión interna y pequeño para los accionados con turbinas de vapor.

En la tabla 6.1 se muestra las velocidades síncronas de generadores para $f = 60$ Hz y diferentes números de polos.

Tabla 6.1

Nº de polos	Velocidad (r.p.m.)	Nº de polos	Velocidad (r.p.m.)
2	3 600	18	400
4	1 800	20	360
6	1 200	22	327
8	900	24	300
10	720	26	277
12	600	28	257
14	514	30	240
16	450	60	120

En el mismo eje del rotor suele estar fijo el inducido de la excitatriz que suministra la corriente de excitación aunque, en modelos antiguos, la excitatriz puede ser independiente y movida por una transmisión a correas o engranajes.

La figura 6.4 muestra un rotor de cuatro polos en el que se puede ver las masas y expansiones polares, las aletas de ventilación, los anillos deslizantes por los que entrará la corriente a las bobinas de campo, y el rotor de la máquina excitatriz. Los anillos están aislados del eje por medio de micanita prensada.

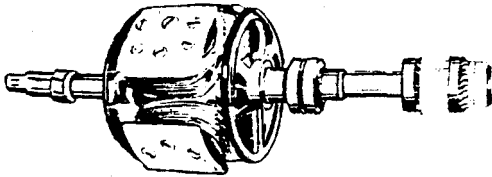


Fig. 6.4 Rotor de un generador mostrando el inducido de la excitatriz.

Como se ve, la excitatriz está montada del lado opuesto del eje que recibe el accionamiento del motor primo.

6.1.3 La carcasa

Es la parte externa de la máquina que envuelve al estator y comprende la cubierta, la base y los apoyos.

En la cubierta se encuentran los conductos y orificios para la ventilación.

En los apoyos se aseguran generalmente los portaescobillas para el inductor.

La figura 6.5 muestra un generador completo en el que se puede ver la excitatriz acoplada al mismo eje principal de la máquina; los anillos con los porta-escobillas colocados; los orificios para la ventilación; y la caja de bornes principales, en un costado.

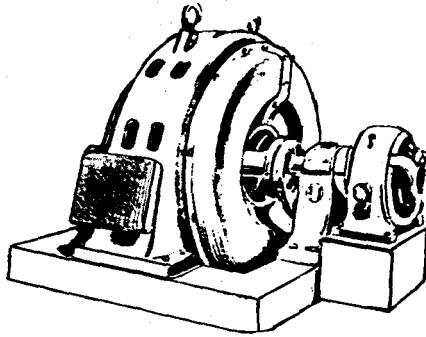


Fig. 6.5 Generador completo con su excitatriz.

La base está formada por un dado de hormigón, que debe tener dimensiones adecuadas para absorber las vibraciones que produce el movimiento de la máquina.

6.1.4 El bobinado del estator

Como la mayor parte de los generadores son trifásicos, sus devanados también lo serán.

Para diseñar un devanado, hay que tener en cuenta algunos factores importantes como son el número de polos y el número de ranuras del estator.

En la periferia se encuentra una determinada cantidad de ranuras longitudinales en las que se alojarán los conductores inducidos.

Se acostumbra, para diseñar un bobinado, repartir el número total N de ranuras en el número de polos y de fases, quedando así, un número de ranuras por polo y por fase q , que para bobinados trifásicos vale:

$$q = \frac{N}{3 \cdot p}$$

Para que se pueda realizar un devanado de paso completo ocupando todas las ranuras, q debe resultar un número entero.

Los devanados del estator se pueden realizar de dos formas: concentrados o distribuidos. En los primeros, se coloca un solo conductor o haz de conductores en una ranura por polo y por fase; así, para una máquina bipolar trifásica habría sólo seis ranuras con tres bobinas. Esta práctica se ha dejado por la de

efectuar los devanados distribuidos, en la que los conductores se reparten en varias ranuras por polo y por fase.

La razón es que en los concentrados se tenía un pésimo aprovechamiento de la periferia del estator, que resultaba de mayores dimensiones, para poder alojar en una ranura los conductores necesarios por polo y por fase. Además, la forma del campo magnético a lo largo del entrehierro no es sinusoidal y se generan armónicas que están presentes en la corriente de salida.

Como la ventaja del devanado concentrado es únicamente la de suministrar una f.e.m. inducida un poco mayor, no compensa el aumento de dimensiones de la máquina por las razones expuestas.

La proporciones de f.e.m. inducida en un devanado distribuido con respecto a uno concentrado se llama **factor de distribución**, y su valor revela que no se justifica la ejecución de los concentrados.

En la construcción de generadores se suele utilizar el bobinado distribuido denominado **bobinado en cadena**. Se le llama también **bobinado de cabezas distintas** porque las bobinas no son iguales entre sí, sino que las hay más cortas y más largas, para poder acomodar los cruces en las cabezas frontales.

El reparto de conductores en la periferia del estator es muy regular, con lo que el factor de potencia y el rendimiento de la máquina resultan ser los mejores. Las ranuras son de pequeñas dimensiones, pues alojan a un solo lado de bobina, con resultado de buen aprovechamiento del núcleo.

Las bobinas resultan de formas rectangulares, con sus cabezas con combas hacia afuera o hacia adentro, según el caso.

Las bobinas resultan de formas rectangulares, con sus cabezas con bombas hacia afuera o hacia adentro, según el caso.

6.2 CAMPOS MAGNETICOS DEL ROTOR Y DEL ESTATOR

6.2.1 Campo magnético del rotor

En la figura 6.6 se puede ver un rotor cilíndrico de máquina síncrona cuya periferia está constituida por ranuras donde se aloja el devanado inductor en forma distribuida.

El devanado está dispuesto de tal modo, que el campo engendrado es de dos polos y cuyos valores se distribuyen en forma aproximadamente senoidal en el espacio.

Estos rotores están formados por una o varias piezas de acero forjado. Se usan en turboalternadores accionados por motores rápidos tales como las turbinas de vapor o de gas, y se construyen de 2 y 4 polos para generar tensiones de 60 Hz.

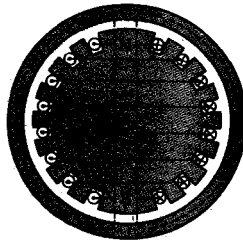


Fig. 6.6 Devanado inductor elemental de dos polos sobre rotor cilíndrico.

Los rotores de polos salientes se utilizan en equipos accionados por motores relativamente lentos, tales como las turbinas hidráulicas, por lo que para producir la misma frecuencia de 60 Hz se requiere un número de polos relativamente elevado. En la figura 6.7 se muestra, por ilustración, un rotor de dos polos salientes.

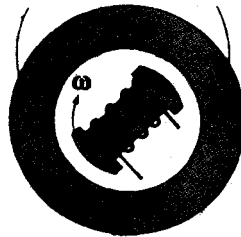


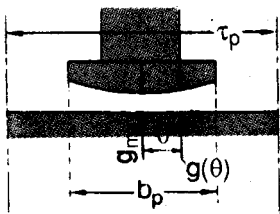
Fig. 6.7 Rotor de dos polos salientes.

El bobinado del rotor tiene un número N_p de espiras por polo y circula por el mismo una corriente continua constante de valor I_{ex} . La fuerza magnetomotriz por polo de la bobina inductora es igual a $F_p = N_p \cdot I_{ex}$. Esta f.m.m. es constante por serlo I_{ex} en condiciones permanentes.

En cambio la inducción B en cualquier punto del entrehierro dependerá de la reluctancia R correspondiente a todo el tubo respectivo (véase la figura 6.8) de área A donde se desprecia la reluctancia de los materiales ferromagnéticos del núcleo:

$$B = \frac{F_p}{R \cdot A} = \frac{F_p \cdot \mu}{g(\theta)}$$

donde $g(\theta)$ es la longitud del entrehierro la cual depende de la posición angular θ tal como se puede ver en la figura 6.8.



τ_p = paso polar
 b_p = longitud cara polar

Fig. 6.8 Variación de la longitud del entrehierro.

Las máquinas síncronas de CA suelen ser de entrehierro variable, con el fin de obtener una distribución espacial de los valores de la inducción B en la periferia del inducido lo más próxima a la forma senoidal de modo que la f.e.m. generada sea también senoidal.

En la figura 6.9 se representa la distribución espacial de la densidad de flujo B en el entrehierro en función del ángulo θ . En las máquinas reales se puede conseguir que la onda de valores de la densidad de flujo B tenga una forma aproximadamente senoidal perfilando adecuadamente las expansiones polares.

Una fórmula muy usada para definir la longitud g del entrehierro en una máquina de p polos y longitud de entrehierro mínima g_{\min} es la siguiente:

$$g = \frac{g_{\min}}{\cos \frac{p}{2} \theta}$$

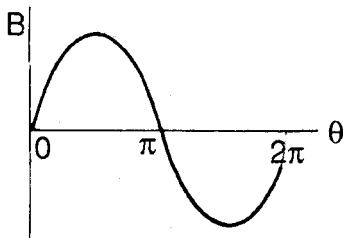


Fig. 6.9 Distribución espacial de la densidad de campo.

6.2.2 Campo magnético del estator

Todos los inducidos de las máquinas síncronas tienen el devanado distribuido, es decir, repartido sobre un número de ranuras alrededor de la periferia del entrehierro.

Las bobinas individuales se conectan entre si de modo que el campo magnético resultante tenga el mismo número de polos que el devanado inductor.

En la figura 6.10 se representa el bobinado de una fase del inducido de una máquina síncrona de dos polos por donde circula una corriente instantánea de valor $i(t)$. Se recuerda que esta corriente es alterna y, por lo tanto, variable con el tiempo.

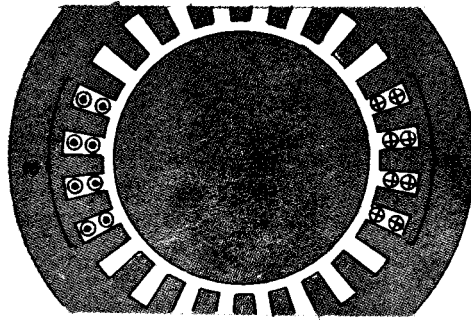


Fig. 6.10 Bobinado de una fase del inducido.

Cuando se proyecta máquinas de CA se pone especial cuidado en repartir o distribuir el devanado de tal modo, que la distribución espacial de la f.m.m. $F(\theta)$ sea lo más aproximadamente posible senoidal en cada instante.

En la figura 6.11 se representa la f.m.m. $F(\theta)$ distribuida a lo largo del devanado del estator para un instante t determinado.

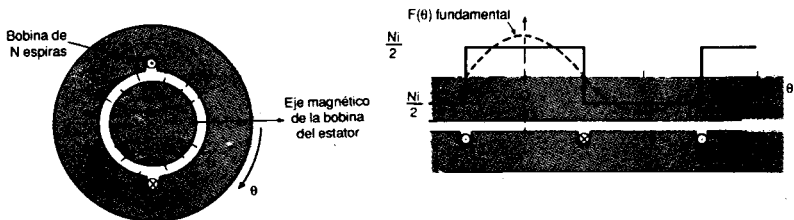


Fig. 6.11 Distribución espacial de la f.m.m. del estator por fase.

La distribución en el espacio puede expresarse por medio de la siguiente ecuación:

$$F(\theta) = F_{\max} \cos \theta$$

donde F_{\max} es proporcional a la corriente $i(t) = i_{\max} \sin \omega t$:

$$F_m = N \cdot i_{\max} \text{ sen } \omega t$$

De modo que la f.m.m queda expresada en función del espacio y del tiempo de la siguiente manera:

$$F(\theta, t) = F_{\max} \text{ sen } \omega t \text{ cos } \theta$$

Se observa que la f.m.m del bobinado de fase del estator tiene un valor máximo en el tiempo (el cual se encuentra siempre en el eje de la bobina) así como en el espacio.

Como se ve, los valores del campo magnético de una fase del inducido son pulsantes en cada punto del espacio del entrehierro. Algo similar sucede en los otros dos bobinados del estator con los respectivos desfases en el espacio y en el tiempo.

La interacción de estos tres campos pulsatorios da como resultado, afortunadamente, un campo magnético $f(\theta, t)$ de amplitud constante cuyos valores se distribuyen senoidalmente en el espacio y que parece estar girando a la velocidad de sincronismo n_s constante, por lo que se le llama también el **campo giratorio del estator**:

$$f(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{\max} \text{ cos } (\theta - \omega t)$$

Cuando se trata de un generador, este campo giratorio persigue al campo del rotor o inductor. En el caso de los motores el campo giratorio hala o arrastra al campo del rotor.

En la figura 6.12 se representa la onda de valores del campo magnético resultante del estator desplazándose a la velocidad de sincronismo.

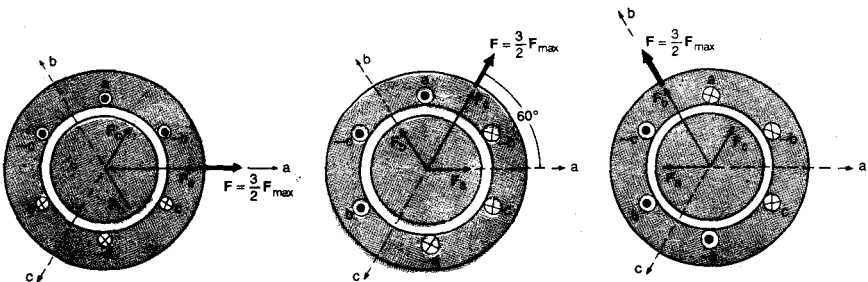


Fig. 6.12 El campo magnético giratorio del estator.

6.3 EL TORQUE ELECTROMAGNETICO

En la figura 6.13 se muestra una máquina síncrona de rotor cilíndrico para facilitar el análisis, donde se muestra los vectores representativos de los campos magnéticos del estator F_e y del rotor F_r , cuyas magnitudes son las amplitudes de las ondas del campo giratorio y del campo inductor respectivamente.

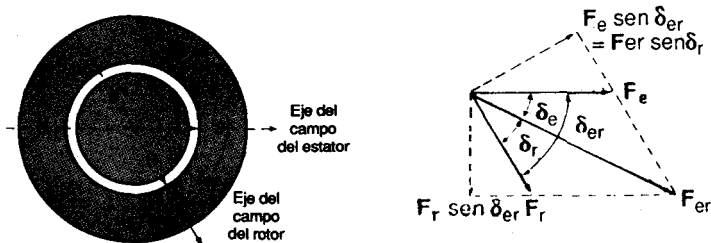


Fig. 6.13 Los campos magnéticos del estator y rotor de la máquina síncrona

En la misma figura se muestra los ángulos entre los campos del estator y del rotor y entre éstos y el campo resultante F_{er} .

Se demuestra en el libro "Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas" de Fitzgerald, que el torque electromagnético de una máquina de rotor cilíndrico es proporcional a las f.m.m.s del estator y del rotor y al seno del ángulo que forman entre sí:

$$T = k \cdot F_e \cdot F_r \cdot \text{sen } \delta_{er}$$

donde k es igual a:

$$k = \frac{p \mu_r \pi \cdot D \cdot l}{4 g}$$

El torque electromagnético también puede expresarse de la siguiente manera:

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{p}{2} \right)^2 \phi_{er} \cdot F_r \cdot \text{sen } \delta_r$$

En el capítulo 6.5 se demuestra que el flujo resultante ϕ_{er} despreciando la impedancia de dispersión del bobinado del estator, es igual a:

$$\phi_{er} = \frac{V_t}{4.44 k_w \cdot f \cdot N_{fase}}$$

Obsérvese que el flujo resultante permanece prácticamente constante aunque se varíe la carga con tal que la tensión en bornes V_t y la frecuencia f de la red permanezcan constantes.

En condiciones permanentes la f.m.m. del rotor F_r permanece constante por cuanto la corriente de excitación que la produce es constante:

$$F_r = N_p \cdot I_{ex}$$

En la figura 6.14 se muestra la curva característica de torque - ángulo δ_r para una máquina síncrona funcionando tanto como motor como generador. Se observa que el torque, en estas condiciones, depende sólo del seno del ángulo δ_r medido a partir de F_r .

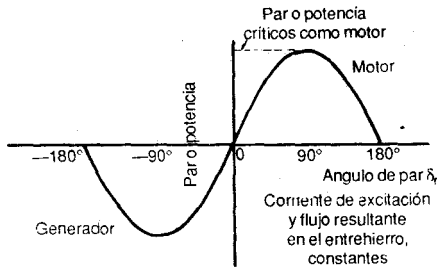


Fig. 6.14 Curva de torque - ángulo δ_r .

Se explicará el uso de esta curva haciendo funcionar la máquina síncrona como motor.

Con una ligera carga en el eje, se requiere un torque electromagnético relativamente pequeño, por lo que también será pequeño el ángulo δ_r . Véase la figura 6.15(a).

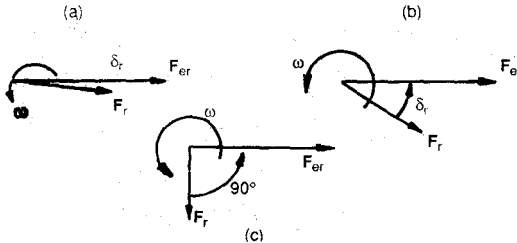


Fig. 6.15 Trabajo del motor síncrono con carga.

Al añadir carga al eje, el rotor debe retrasarse respecto al campo giratorio del estator hasta que δ_r adquiera el valor necesario para crear el nuevo par motor requerido. Véase la figura 6.15 (b).

El reajuste es un proceso dinámico que va acompañado de una disminución transitoria de la velocidad de giro del rotor y de una serie de oscilaciones mecánicas amortiguadas del mismo (rotor) alrededor de su nueva posición. Véase la figura 6.16. Este movimiento se denomina *penduleo* (oscilación pendular).

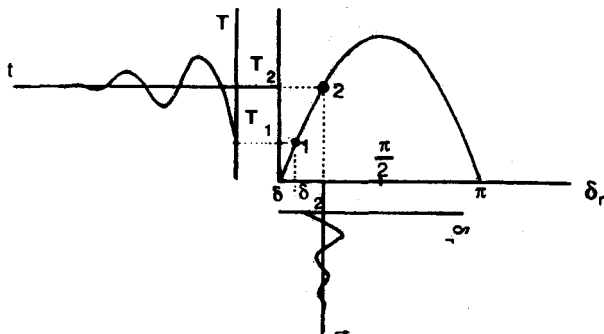


Fig. 6.16 Comportamiento transitorio de la máquina síncrona durante las variaciones de carga.

Una vez alcanzado el nuevo valor de δ_r se tiene un nuevo torque que permitirá que F_{er} , F_e y F_r giren a la misma velocidad, es decir, conjuntamente, manteniendo, así, el sincronismo.

En la práctica, puede variar, también, la densidad de flujo resultante debido a la saturación y pérdidas por dispersión del flujo.

Cuando δ_r vale 90° eléctricos (para una tensión y corriente de excitación dadas) se consigue el torque máximo posible, llamado torque motor crítico o límite. Véase la figura 6.15(c).

El torque crítico limita la sobrecarga instantánea máxima que se puede aplicar a un motor síncrono.

El valor del torque crítico se puede aumentar aumentando la corriente de excitación (y, por lo tanto, F_r) o la tensión en bornes (y, por lo tanto, ϕ_{er}). Véase la figura 6.17.

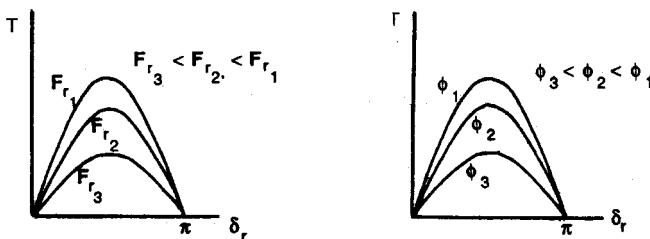


Fig. 6.17 Incremento de la capacidad de la máquina síncrona.

Si la demanda de potencia excede el punto crítico, el motor pierde velocidad debido al mayor torque requerido en el eje; desaparece, así, el sincronismo pues los campos del rotor y del estator ya no permanecen estacionarios el uno respecto al otro. Este fenómeno se conoce con el nombre de **pérdida de sincronismo**.

Si una máquina síncrona se conecta como generador a una red de CA de tensión y frecuencia constantes, suministrará energía a dicha red cuando su rotor sea movido mecánicamente de tal modo, que el campo magnético del mismo vaya adelantado respecto al campo del estator. Véase la figura 6.18.

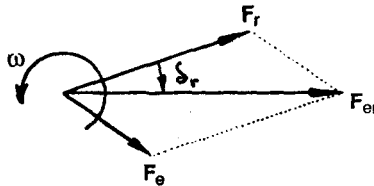


Fig. 6.18 Funcionamiento como generador.

Si el torque engendrado por la máquina motriz que arrastra el rotor fuere superior al torque crítico del generador, se perderá el sincronismo aumentando rápidamente la velocidad, por lo que se requiere en dichas máquinas un regulador de velocidad de respuesta rápida que actúe sobre el motor primo para evitar que se llegue a velocidades peligrosas.

6.4 LA F.E.M. INDUCIDA

Según la ley de Faraday, la f.em. inducida e en una bobina concentrada en un par de ranuras de N espiras en serie es la derivada del flujo concatenado con respecto al tiempo:

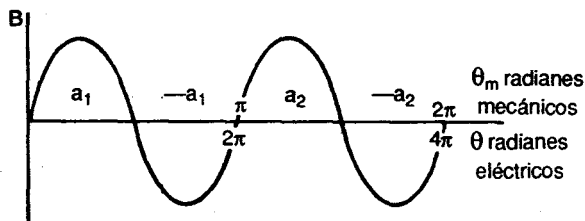
$$e = -\frac{d\lambda}{dt}$$

El signo menos (-) indica que, al decrecer el flujo abarcado por la bobina, se induce en ella una tensión de signo tal, que tiende a producir una corriente que se opone a la disminución del flujo abarcado.

El flujo concatenado λ , como se sabe, es el flujo ϕ de un campo magnético por el número N de espiras de la bobina que abraza. El flujo concatenado va a depender de la posición relativa del campo inductor con respecto a la bobina estática.

La densidad de campo inductor B se vio que se distribuye senoidalmente en el espacio según la expresión (véase también la figura 6.19):

$$B = B_{\max} \cos \theta$$



generador síncrono de 4 polos

Fig. 6.19 Distribución del campo inductor.

El flujo por polo en el entrehierro es la integral de la densidad de campo $B(\theta)$ a través del área que atraviesan las líneas de flujo, es decir, que, en una máquina de dos polos, se cumple lo siguiente:

$$\phi = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_{\max} \cos \theta \cdot l \cdot R \cdot d\theta = 2 l R B_{\max}$$

En una máquina de p polos el flujo por polo es igual a:

$$\begin{aligned} \phi &= 4 B_{\max} l \cdot R / p \\ &= 2 B_{\max} A / p \end{aligned}$$

donde: $A = 2 l R$.

Frente al polo considerado no siempre se va a tener flujo que abrace a las N espiras, en cuyo caso, el flujo concatenado con la bobina es máximo (véase la figura 6.20 (a)), sino que habrá posiciones para las cuales las líneas de flujo, en lugar de abrazar a las espiras, las atravesarán; el caso más crítico es cuando ninguna espira es abrazada por las líneas de flujo, es decir, cuando el flujo las atraviesa o las corta a todas, en cuyo caso el flujo concatenado con la bobina es cero (véase la figura 6.20 (b)).

Todo esto significa que si se toma el eje de la bobina del estator como eje de referencia, al girar el rotor (en sentido antihorario, por ejemplo) el eje magnético de la bobina inductora formará un ángulo $\alpha = \omega t$ con el eje de referencia. Véase la figura 6.20 (c).

Se observa, entonces, que el flujo concatenado dependerá del tiempo del siguiente modo:

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_{\max} \cos \alpha \\ &= \lambda_{\max} \cos \omega t \\ &= N \phi_{\max} \cos \omega t\end{aligned}$$

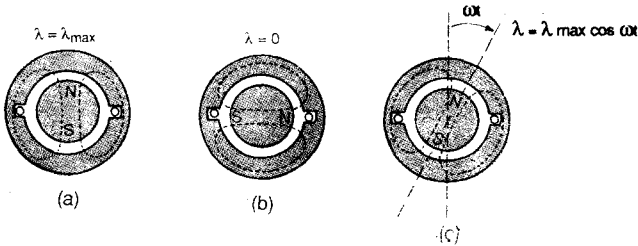


Figura 6.20 Variación del flujo concatenado.

Aplicando la expresión de la ley de Faraday al flujo concatenado se obtiene:

$$\begin{aligned}e &= -\frac{d}{dt} (N \phi_{\max} \cos \omega t) \\ &= N \left(-\frac{d}{dt} (\phi_{\max} \cos \omega t) \right) \\ &= N \left(-\phi_{\max} (-\omega \sin \omega t) - (\cos \omega t) \frac{d\phi_{\max}}{dt} \right) \\ &= N \left(\omega \phi_{\max} \sin \omega t - \frac{d\phi_{\max}}{dt} \cos \omega t \right) \\ &= \omega N \phi_{\max} \sin \omega t - N \frac{d\phi_{\max}}{dt} \cos \omega t\end{aligned}$$

El primer término del segundo miembro de esta ecuación es la tensión inducida debido al movimiento relativo entre la bobina y el campo; es la componente de estado permanente. El segundo término es la tensión inducida a manera de transformador, la cual existirá sólo si hay variación en la amplitud ϕ_{\max} de la onda de flujo en el entrehierro.

El flujo máximo ϕ_{\max} es constante cuando la máquina trabaja en condiciones estables normales; en este caso, la f.e.m. inducida se reduce simplemente a la debida al movimiento:

$$e = \omega N \phi_{\max} \sin \omega t$$

Tratándose de corrientes alternas, tiene más interés el valor eficaz de la tensión que los valores instantáneos.

Según la última ecuación, el valor máximo de la f.e.m. inducida es:

$$E_{\max} = \omega N \phi_{\max} = 2 \pi f N \phi_{\max}$$

y, el valor eficaz:

$$E_{\text{ef}} = \frac{2 \pi}{\sqrt{2}} f N \phi_{\max} = 4.44 f N \phi_{\max}$$

siendo f la frecuencia en Hertz.

La f.e.m. inducida en una bobina concentrada pasa por un ciclo completo de valores por cada revolución de la máquina de dos polos. Su frecuencia en ciclos/segundo o en Hertz es igual a la velocidad angular del rotor en revoluciones/segundo, es decir, que la frecuencia eléctrica está sincronizada con la velocidad mecánica, razón por la cual estas máquinas se denominan SINCRONAS.

La mayor parte de las máquinas síncronas tiene más de dos polos.

En la figura 6.21 se representa una máquina síncrona elemental monofásica de 4 polos en la que las bobinas inductoras se conectan de modo que los polos sean alternativamente un norte y un sur.

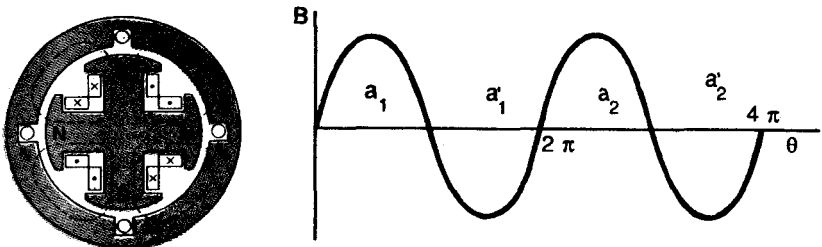


Fig. 6.21 Máquina síncrona de 4 polos.

A lo largo de la periferia, la distribución de densidad de flujo inductor abarca dos ondas o ciclos completos como puede verse en la misma figura a la derecha.

En este caso el devanado inducido consta de dos bobinas a_1 , a_1' y a_2 , a_2' unidas en serie por medio de sus conexiones extremas.

El espacio abarcado por cada bobina equivale a una semionda de flujo, y la tensión inducida recorre dos ciclos completos por cada revolución del rotor: la frecuencia f en Hz es el doble que la velocidad en rev/s.

Cuando en una máquina existe más de dos polos, se considera sólo dos de ellos teniendo en cuenta que las condiciones eléctricas, magnéticas y mecánicas relativas a cada uno de los restantes pares de polos no son más que una repetición de las existentes para el par considerado.

En general, el ángulo θ_e eléctrico es mayor que el ángulo θ_m mecánico en un número de $p/2$ veces:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$$

y de aquí:

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (\text{rad/s})$$

Como:

$$\omega_e = 2 \pi f \quad \text{y} \quad \omega_m = \frac{2 \pi n}{60}$$

donde n es la velocidad angular en rpm, entonces:

$$f = \frac{p}{2} \cdot \frac{n}{60}$$

y de aquí:

$$n = \frac{120 f}{p} \quad (\text{rpm})$$

que se conoce con el nombre de velocidad de sincronismo.

Todos los generadores síncronos son trifásicos debido a las ventajas que tiene este sistema en la producción, transmisión y utilización de potencias fuertes.

Para obtener un sistema trifásico se requiere 3 bobinas desplazadas 120° magnéticos entre sí, tal como se representa esquemáticamente en la figura 6.22. La figura representa una máquina trifásica elemental de 2 polos con una bobina por fase, señaladas éstas con las letras a, b y c respectivamente.

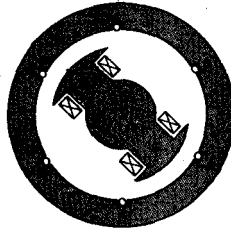


Fig. 6.22 Máquina trifásica elemental de 2 polos.

En una máquina elemental de 4 polos se requerirá, por lo menos, 2 grupos de 3 bobinas cada uno y, en general, una máquina de p polos requerirá $p/2$ grupos.

En la figura 6.23 se representa una máquina trifásica elemental de 4 polos.

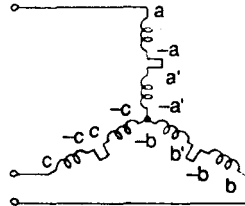
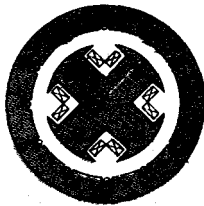


Fig. 6.23 Máquina elemental de 4 polos.

Las dos bobinas correspondientes a cada fase de esta figura se conectan en serie de forma que se sumen sus respectivas tensiones, y las tres fases así formadas pueden conectarse entre si en estrella o en triángulo. La figura de la derecha corresponde a la conexión estrella de los devanados.

6.5 FACTORES DE DISTRIBUCION Y DE PASO

En el subcapítulo anterior se encontró que la f.em. eficaz por fase es igual a:

$$E_{ef} = 4.44 f N \Phi_{max}$$

donde N es el número total de espiras en serie por fase.

Todos estos devanados elementales son concentrados y abarcan un paso polar, ya que los dos lados de cualquier bobina están separados 180° magnéticos, y todas sus espiras están concentradas en un par de ranuras.

En la práctica, las bobinas del devanado inducido correspondientes a cada fase se distribuyen en un cierto número de ranuras, como se ve en la figura 6.24.

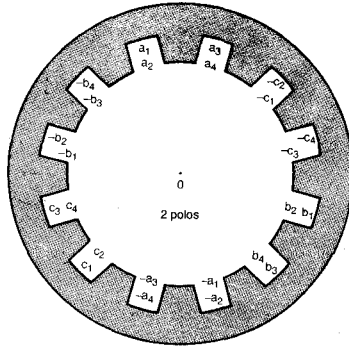


Fig. 6.24 Distribución del bobinado de una máquina síncrona trifásica.

Un devanado distribuido aprovecha más el hierro y el cobre y mejora la forma de onda.

En los devanados distribuidos es preciso aplicar un factor de corrección k_b ya que las f.e.m.s. inducidas en cada una de las bobinas que forman un grupo de fase están algo desfasadas entre sí.

Al conectarlas en serie, su suma vectorial es menor que la suma aritmética:

$$0.85 < k_b < 0.95$$

para un devanado trifásico.

Tratándose de devanados distribuidos, la f.e.m. eficaz inducida por fase se convierte en:

$$E_{cf} = 4.44 f \cdot k_b \cdot N \cdot \Phi_{max}$$

Sin embargo, las ondas de f.e.m. y de campo inducidos de los devanados distribuidos de paso diametral o polar de 180° tienen el inconveniente de presentar armónicos aparte de producir longitudes grandes de las cabezas de bobina.

Estos dos inconvenientes se superan acortando el paso de las bobinas a un ángulo menor que 180° a costa de una mayor reducción en el valor de la f.e.m. inducida. Para obtener el valor final de la f.e.m. inducida se utiliza otro factor adicional, el factor de paso k_p .

Estos dos efectos pueden englobarse en un factor de bobinado $k_w = k_b \cdot k_p$, de modo que la f.e.m. puede expresarse del siguiente modo:

$$E = 4.44 k_w \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max}$$