

Motor Síncrono

por Andrés Monjo

Resumen

En la presente monografía se describen los motores síncronos, sus aspectos constructivos, principio de funcionamiento y campo de aplicación. Se analizan los distintos métodos de arranque y al motor funcionando como compensador síncrono.

Introducción

Los motores síncronos son máquinas síncronas que se utilizan para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica de rotación. La característica principal de este tipo de motores es que trabajan a velocidad constante que depende solo de la frecuencia de la red y de otros aspectos constructivos de la máquina. A diferencia de los motores asíncronos, la puesta en marcha requiere de maniobras especiales a no ser que se cuente con un sistema automático de arranque. Otra particularidad del motor síncrono es que al operar de forma sobreexcitado consume potencia reactiva y mejora el factor de potencia.

Aspectos constructivos

La máquina síncrona es una máquina reversible ya que se puede utilizar como generador de corriente alterna o como motor síncrono. Está constituido por dos devanados independientes:

- Un devanado inductor, construido en forma de arrollamiento concentrado o distribuido en ranuras, alimentado por corriente continua, que da lugar a los polos de la máquina y que se coloca en el rotor.
- Un devanado inducido distribuido formando un arrollamiento trifásico recorrido por corriente alterna ubicado en el estator que está construido de un material ferromagnético, generalmente de chapas de acero al silicio.

La estructura del rotor puede ser en forma de polos salientes o de polos lisos como se ve en la figura 1 si el motor tuviese solo un par de polos.

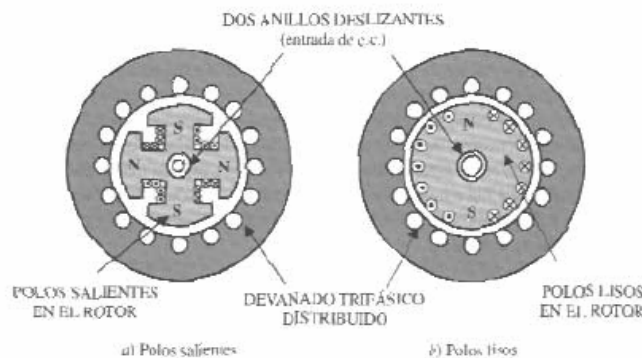


figura 1: tipos constructivos de máquinas síncronas

Principio de funcionamiento

Si a un alternador trifásico se le retira la máquina motriz y se alimenta su estator mediante un sistema trifásico de corriente alterna se genera en el estator un campo magnético giratorio, cuya velocidad sabemos que es $N = 60 f/p$ donde f es la frecuencia de la red, y p es el número de pares de polos del rotor. Si en estas circunstancias, con el rotor parado, se alimenta el devanado del mismo con corriente continua se produce un campo magnético rotórico fijo, delante del cual pasa el campo magnético del estator. Los polos del rotor están sometidos ahora a atracciones y repulsiones en breves periodos de tiempo, por parte de los polos del estator pero el rotor no consigue girar, a lo sumo vibrará.

Al llevar el rotor a la velocidad de sincronismo, haciéndolo girar mediante un motor auxiliar, al enfrentarse polos de signo opuestos se establece un enganche magnético que les obliga a seguir girando juntos, pudiendo ahora retirar el motor auxiliar. Este enganche magnético se produce ya que el campo giratorio estatórico arrastra por atracción magnética al rotor en el mismo sentido y velocidad.

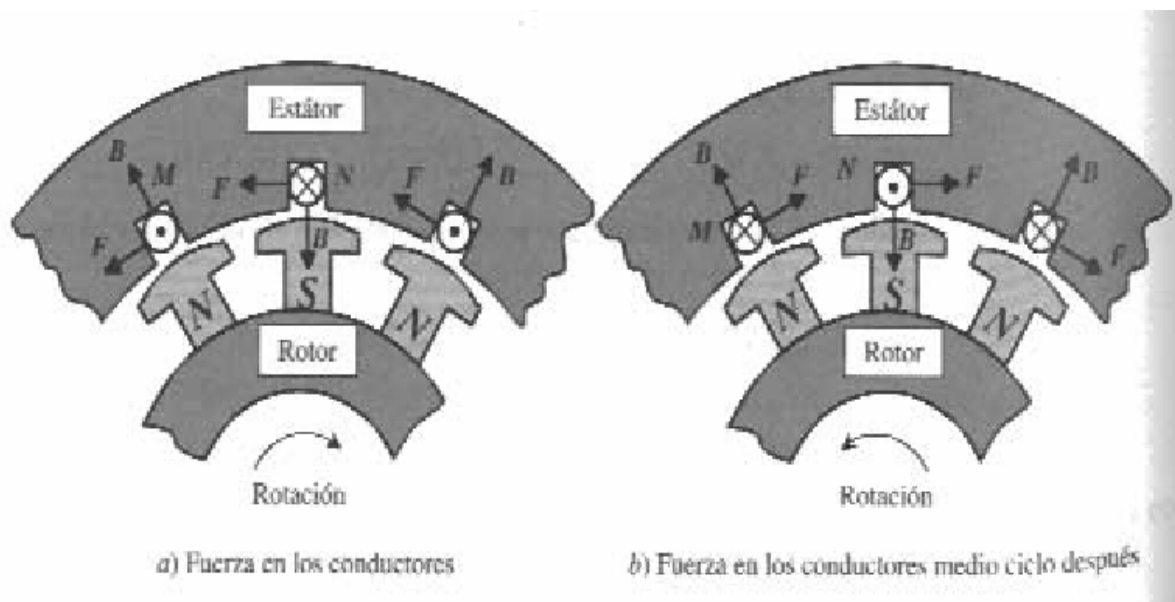


figura 2: principio de funcionamiento del motor síncrono

En la figura 2 se muestran dos conductores del inducido enfrentando a dos polos consecutivos del rotor para dos instantes de tiempo consecutivos. Se puede concluir que si el rotor está en reposo o gira a otra velocidad diferente a la de sincronismo, el par medio que desarrolla al conectarlo a la red es nulo por lo que el motor no arranca.

Circuito equivalente

Ya que el motor síncrono es igual físicamente al generador, las ecuaciones básicas de velocidad, potencia y par son las mismas. La única diferencia es que el sentido de flujo de potencia (y por lo tanto el sentido de la corriente de carga) es opuesto para el motor.

Consideremos un motor síncrono funcionando en régimen estacionario con una tensión por fase U . Suponemos que la reactancia de dispersión es constante, que se pueden despreciar las pérdidas en el hierro y que el entrehierro es uniforme. En la figura 3 se puede ver el circuito eléctrico equivalente (diagrama de Blondel) que representa al motor síncrono conectado a la red en el cual el estator se comporta como el primario de un transformador.

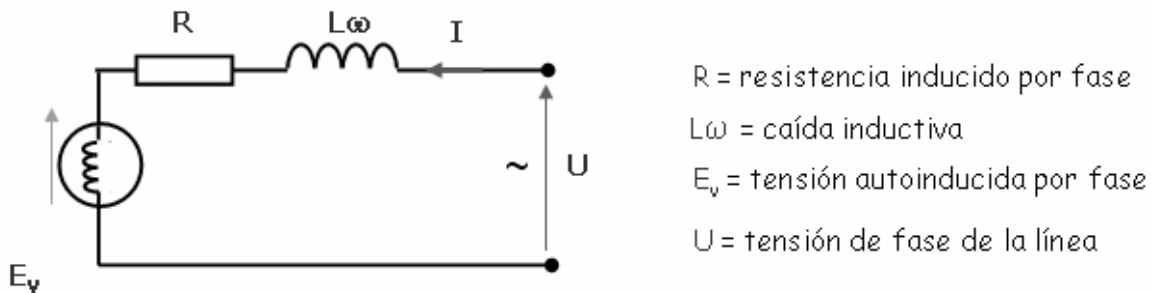


figura 3 : circuito equivalente de un motor síncrono trifásico

Por la Ley de tensiones de Kirchhoff, se cumple: $U = -E_v + R I_g + jL_w I$

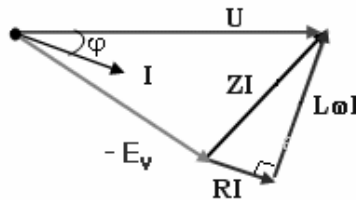


figura 4 : diagrama fasorial de Blondel (note que la f.e.m. está atrasada con respecto a U , al revés que para el generador)

Una vez que se produce la conexión del motor a la red, ocurre un desplazamiento δ del eje de los polos del rotor respecto de los polos ficticios del estator (figura 5), que aumenta con la carga del motor, y si este desplazamiento supera un límite el motor se para.

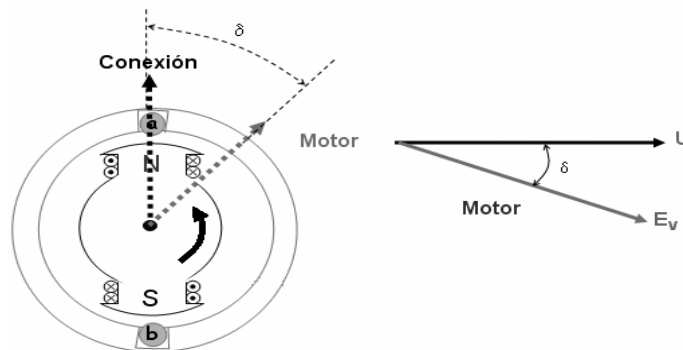


figura 5 : motor síncrono bajo carga

Curvas características

Como se sabe, la velocidad de este tipo de motores es constante desde vacío hasta el par máximo que el motor puede suministrar que cuyo valor es:

$$\tau_{\max} = \frac{3UE_v}{\omega_m X_s}$$

Esto indica que mientras más grande sea la corriente de excitación (y por lo tanto E_v), más grande será el par máximo del motor

Si se fija una carga al eje de un motor síncrono, el motor desarrollará suficiente par como para mantener el motor y su carga a velocidad síncrona. Al incrementar la carga en el eje, se mantendrá la velocidad pero aumentará el ángulo δ . El voltaje interno generado E_v es igual a $K\omega\Phi$ y por tanto sólo depende de la corriente de excitación en la máquina y de la velocidad de ésta. Por lo tanto, al variar la carga, el valor de E_v se debe mantener constante. Como se puede ver en la figura 6, conforme aumenta la carga, E_v se mueve hacia abajo, se incrementa la corriente de carga y también cambia el factor de potencia (al aumentar la carga cada vez está más en retraso).

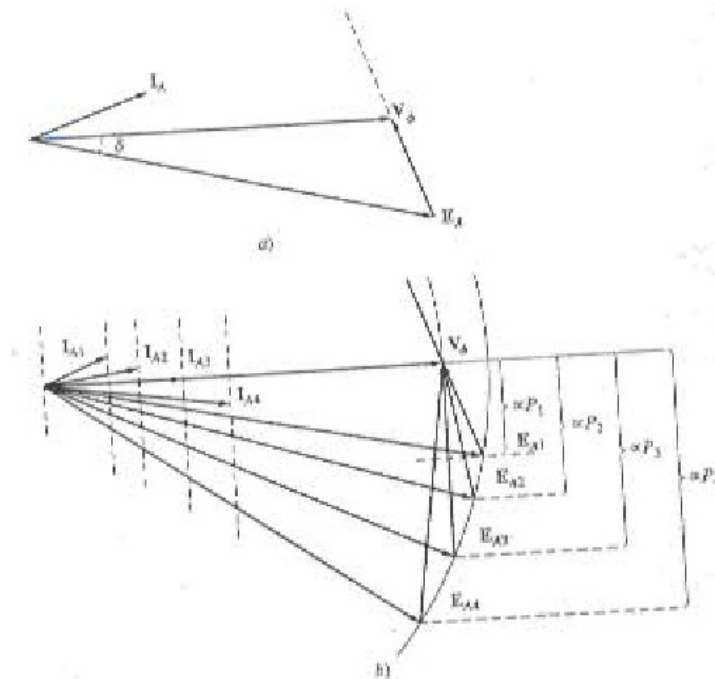
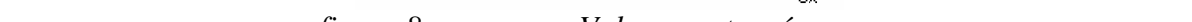
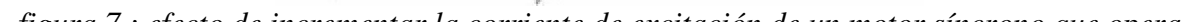


figura 6 : efecto de incrementar la carga en la operación de un motor síncrono que opera con un factor de potencia en adelanto



Para bajos valores de excitación, la máquina es inductiva y consume potencia reactiva Q . Para $\cos\varphi=1$, la corriente es mínima, por lo que los mínimos en cada estado de carga determinan la curva de $\cos\varphi=1$. Estos puntos se encuentran desplazados hacia la derecha porque a mayor carga más reacción de inducido, por lo que es necesario aumentar la excitación. Para valores grandes de excitación la máquina es capacitiva y suministra potencia reactiva al sistema. Es importante destacar que al controlar la corriente de excitación, se puede controlar la potencia reactiva suministrada a, o consumida, por el sistema de potencia.

Para muy bajos valores de excitación llega un punto en que la fuerza de atracción magnética no es suficiente para mantener al rotor ligado al campo giratorio, y la máquina se desengancha y se detiene. Estos puntos determinan el límite de estabilidad.

Un motor puede trabajar subexcitado o sobreexcitado para un mismo estado de carga (punto 1 o 2 a media carga), pero ante una sobrecarga ($I_2 - I_1$) en el primer caso se detiene (punto 1'); en cambio en el segundo solo pasa a un estado de carga mayor (punto 2'). Por tanto, el motor sobreexcitado, además de entregar un par máximo más grande, es más estable y presenta mejor $\cos\varphi$.

El motor como condensador síncrono

Es muy común la práctica de conectar un motor síncrono a la línea y operarlo de forma sobreexcitada en vacío para corregir el factor de potencia. Ya que la potencia real suministrada a la máquina es cero (excepto por las pérdidas), con un factor de potencia unitario la corriente es nula. Al incrementar la corriente excitatriz, la corriente en la línea (y la potencia reactiva suministrada por el motor) aumenta de manera lineal hasta llegar hasta el punto de saturación.

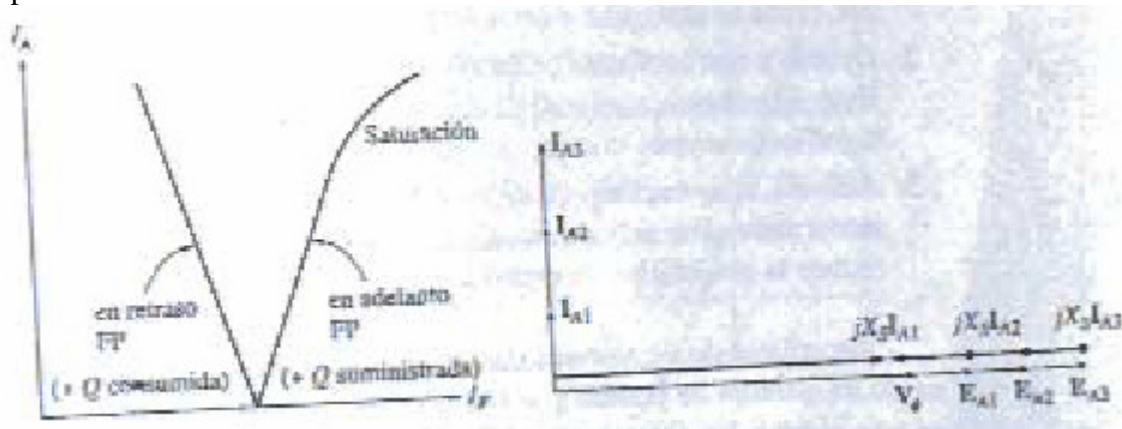


figura 9 : curva en V de un capacitor síncrono

En la figura 9 se puede observar el diagrama fasorial de un capacitor síncrono. Como no hay transferencia de potencia (el motor está en vacío) $\cos\varphi=0$ y la corriente de carga adelanta 90° con respecto a la tensión de línea. El motor es una carga con factor de potencia variable. Al hacer que el motor síncrono trabaje en régimen capacitivo se disminuye el valor de la corriente de línea y del factor de potencia. Esto que hace que disminuyan las pérdidas de transmisión ($P=3RI^2$) y se mejora notablemente la eficiencia de operación del sistema

Métodos de arranque

Como se mencionó antes, cuando el motor está detenido y se lo conecta a la red, éste vibrará fuertemente y se sobrecalentará. Existen varios métodos para arrancarlo de forma segura. A continuación se describirán los tres métodos más utilizados y finalmente se mostrará un circuito para el arranque automático.

1. Arranque por medio de la reducción de la frecuencia eléctrica

Si los campos magnéticos del estator en un motor síncrono giran a una velocidad lo suficientemente baja, no habrá ningún problema para que el rotor se acelere y se enlace con el campo magnético del estator. Entonces, se puede incrementar la velocidad de los campos magnéticos del estator aumentando gradualmente la frecuencia hasta su valor nominal de 50 Hz. Para esto pueden utilizar accionadores de estado sólido como cicloconvertidores.

2. Arranque con un motor primario externo

Para llevar al motor a su velocidad síncrona se le puede adjuntar un motor de arranque externo. Una vez alcanzada esta velocidad, se conecta la máquina en paralelo a la red y se desconecta el motor primario del eje. El motor de arranque puede tener valores nominales mucho más pequeños que el motor que arranca ya que sólo debe superar la inercia de la máquina síncrona en vacío.

3. Arranque con devanados de amortiguamiento

Éste es el método más popular de arranque. Recibe el nombre de devanado amortiguador porque reduce las oscilaciones que se producen en los procesos transitorios de las máquinas: acoplamiento a la red, vibraciones bruscas de carga eléctrica o mecánica, etc. Los devanados de amortiguamiento son barras especiales dispuestas en ranuras hechas en la cara del rotor en un motor y en cortocircuito en cada extremo con un anillo (figura 10). Esto crea un rotor del tipo jaula de ardilla y el motor arranca como si fuera un motor asíncrono trifásico.

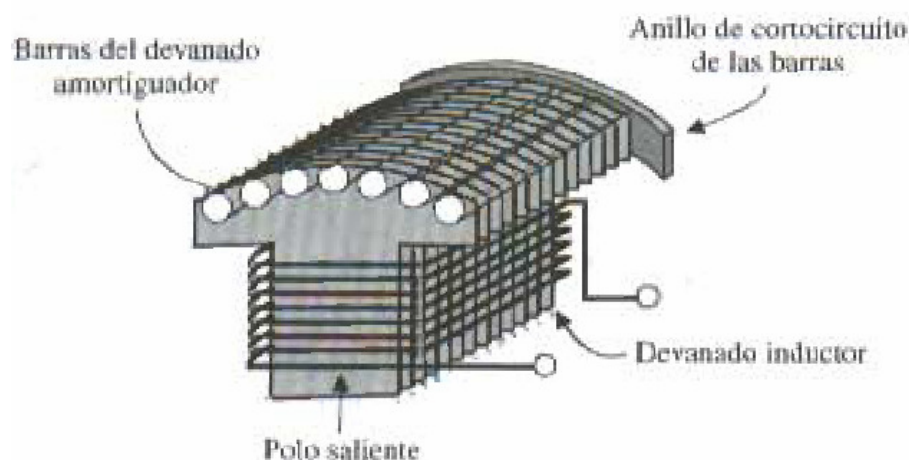
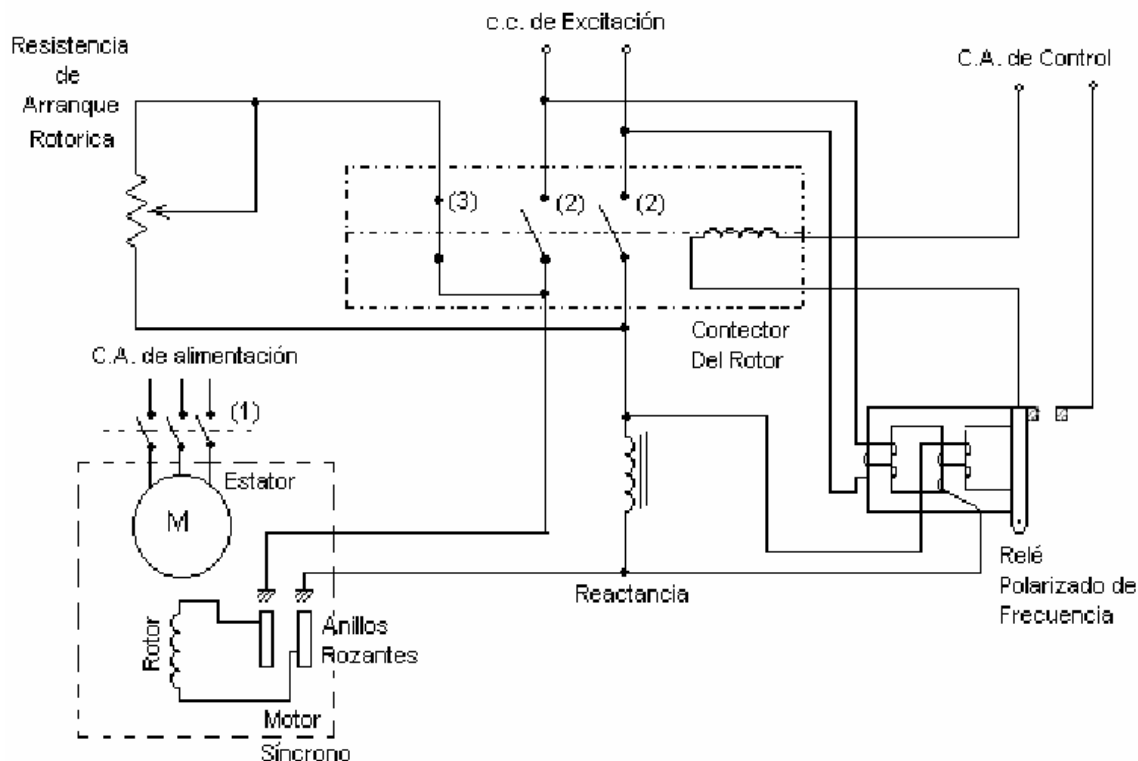


figura 10: devanado amortiguador colocado en los polos (jaula de ardilla)

4. Arranque automático

Mediante el siguiente circuito se puede arrancar al motor de forma automática. Primero se cierra el interruptor 1 que alimenta al estator del motor. En el instante de arranque el rotor tiene la frecuencia de la red (alta frecuencia). En el circuito del rotor, que alimenta la resistencia de arranque, para que ésta absorba la tensión elevada de las bobinas de los polos, aparece una diferencia de potencial a los bornes de la reactancia. Esta diferencia de potencial alimenta una bobina del relé polarizado, que mantiene abierto los contactos del mismo. La máquina arranca como motor asíncrono debido a la jaula de ardilla que poseen los polos del rotor. A medida que aumenta la velocidad, la frecuencia del rotor disminuye, por consiguiente disminuye la diferencia de potencial a los bornes de la reactancia hasta que ésta no puede mantener el yugo del relé, ya cercana a la velocidad de sincronismo, y cierra los contactos de él. Al cerrarse este contacto se alimenta la bobina del contacto, quien cierra los interruptores 2 y abre el 3 quedando de esta manera alimentado el rotor por corriente continua y funcionando en sincronismo.



Referencias:

- 1 Jesús Fraile Mora, *Máquinas eléctricas* (5ª Edición), Mc Graw Hill 2003
- 2 Marcelo A. Sobrevila, *Máquinas eléctricas* (2ª Edición)
- 3 Stephen J. Chapman, *Máquinas eléctricas* (4ª Edición), Mc Graw Hill 2005
- 4 www.tuveras.com