



Unidad Didáctica
Motores Síncronos

FONDO  FORMACION

Programa de Formación Abierta y Flexible

Obra colectiva de FONDO FORMACION

Coordinación *Servicio de Producción Didáctica de FONDO FORMACION
(Dirección de Recursos)*

Diseño y maquetación *Servicio de Publicaciones de FONDO FORMACION*

© FONDO FORMACION - FPE

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otro método, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

Depósito Legal *AS -742-2001*

Unidad Didáctica Motores Síncronos

La corriente que se genera en una central eléctrica convencional es corriente alterna trifásica, que se utiliza como monofásica sin más que conectar al receptor dos fases o bien una fase y neutro.

Por esta razón, la mayoría de los receptores, tanto domésticos como industriales, funcionan con corriente alterna. De aquí se comprende la necesidad de que los receptores puedan trabajar fácilmente con esta alimentación, ya que, en caso contrario, necesitarían una instalación más compleja (fuente de alimentación, rectificadores...).

Los motores son las máquinas más usadas y conocidas, tanto en el ámbito doméstico como en el industrial (secadores, lavadora, separadores centrífugos de partículas...).

A lo largo de esta unidad estudiaremos el principio de funcionamiento de los motores de corriente alterna, su clasificación y centraremos las explicaciones en el motor síncrono.

A lo largo de esta unidad estudiaremos los siguientes temas:

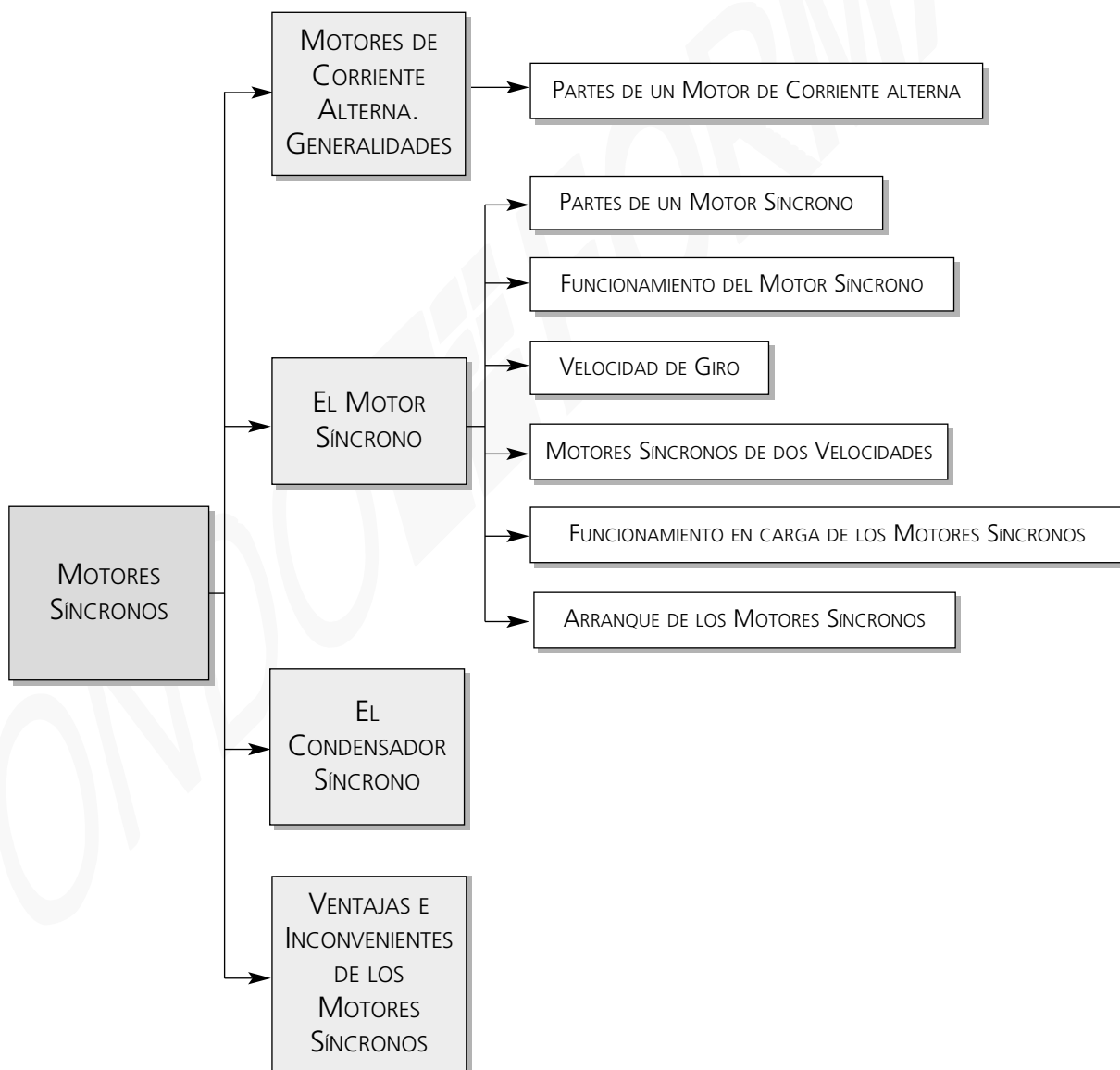
- Motores de corriente alterna: generalidades.
- Motor síncrono.
- El condensador síncrono.
- Ventajas e inconvenientes de los motores síncronos.

Tus objetivos

Al final de esta unidad serás capaz de:

- Clasificar los motores de corriente alterna según su velocidad y número de fase.
- Explicar el funcionamiento de un motor síncrono.
- Calcular la velocidad de sincronismo.
- Reconocer cuál es la principal aplicación del motor síncrono.

Esquema de estudio



Motores de corriente alterna. Generalidades

Un **motor eléctrico** es una máquina que *absorbe energía eléctrica y la transforma en movimiento* (energía mecánica). Cuando se alimenta con energía eléctrica cuyos parámetros (tensión e intensidad) tienen forma de onda, se dice que el motor es de corriente alterna.

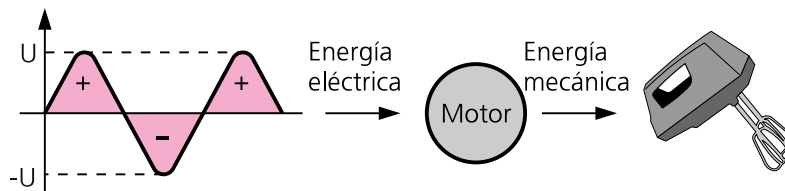


Fig. 1: Conversión de energía eléctrica en mecánica.

Recordemos cómo se produce la conversión de energía:

Cuando por un conductor circula una corriente eléctrica, se crea un campo magnético en sus proximidades, cuyas líneas de fuerza son circunferencias concéntricas, con centro sobre el propio conductor (figura 2).

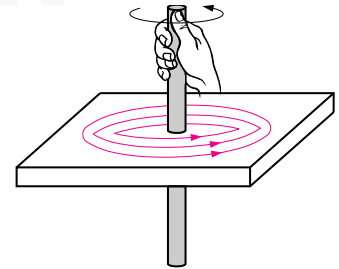


Fig. 2
Campo magnético de un conductor recorrido por corriente.

Si este conductor se introduce en otro campo magnético, se produce una interacción entre ambos campos, y como consecuencia, aparece una fuerza que mueve el conductor. Este fenómeno se conoce como **efecto motor**, y en él se basa el funcionamiento de todos los motores eléctricos.

Si el conductor tiene forma de espira, sobre cada uno de sus dos conductores actuará una fuerza. Estas fuerzas son iguales y de sentidos contrarios, lo cual origina un par de fuerzas que provocan el giro de la espira (fig. 3).

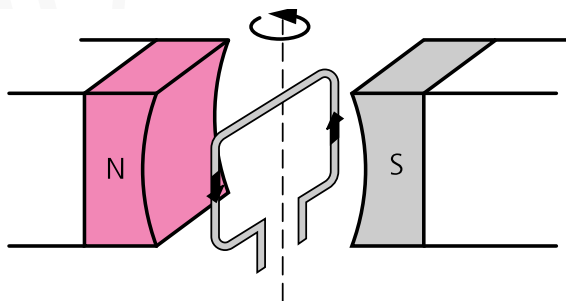


Fig. 3: Movimiento de una espira en un campo magnético.

Los motores de corriente alterna se clasifican de múltiples formas, según su velocidad, número de fases, número de polos...

MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA					
número de fases	Monofásicos (1fase)	número de polos	Bipolares ($2p = 2$)	velocidad	SÍNCRONOS
	Bifásicos (2 fases)		Tetrapolares ($2p = 4$)		Trifásicos con colector. Trifásicos con anillos y rotor bobinado.
	Trifásicos (3 fases)		Exapolares ($2p = 6$)		Trifásicos de jaula de ardilla. Monofásico. Asíncrono sincronizado. Motor universal o serie. Espira en cortocircuito. Hiposincrónico. Motor de repulsión.
			n-polares ($2p = n$)		
					ASÍNCRONOS (Motores de inducción)

En esta unidad nos centraremos en el estudio de los **motores síncronos**.

ACTIVIDAD 1

Indica si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas:

- Un motor es una máquina que transforma energía mecánica en energía eléctrica.
- Si un conductor recorrido por corriente se introduce en un campo magnético, aparece en él una fuerza que origina su desplazamiento (efecto motor).
- Una espira recorrida por corriente eléctrica en el interior de un campo magnético está sometida a un par de fuerzas que provocan su giro.
- Los motores se clasifican, según su velocidad, en bipolares y tetrapolares.

V F

☐ ☐

☐ ☐

☐ ☐

☐ ☐

Partes de un motor de corriente alterna

En cualquier motor de corriente alterna, se distinguen las siguientes partes:

- **Carcasa:** parte externa del motor, cuya función es proteger los elementos interiores.
- **Estátor:** conjunto de chapas magnéticas donde se aloja el devanado fijo. No se mueve.
- **Rotor:** elemento giratorio del motor; al igual que en el caso anterior, está constituido por chapas magnéticas y un devanado donde se induce la corriente.
- **Bobinados o devanados:** conjunto de conductores de la máquina eléctrica. Dependiendo de la función que realicen, se clasifican en bobinado inductor y bobinado inducido.
 1. **Bobinado inductor:** es el devanado por el que circula la corriente eléctrica que da lugar a la creación de un electroimán, con su correspondiente campo magnético. Si la corriente es continua, el campo magnético será constante, tanto en valor como en sentido. En el caso de que las bobinas estén recorridas por corriente alterna, el campo magnético es variable.
 2. **Bobinado inducido:** circuito eléctrico donde se induce el movimiento como consecuencia de la interacción entre campos magnéticos.

Estas partes tienen una forma y constitución variable, según hablemos de los distintos motores (fig. 4).

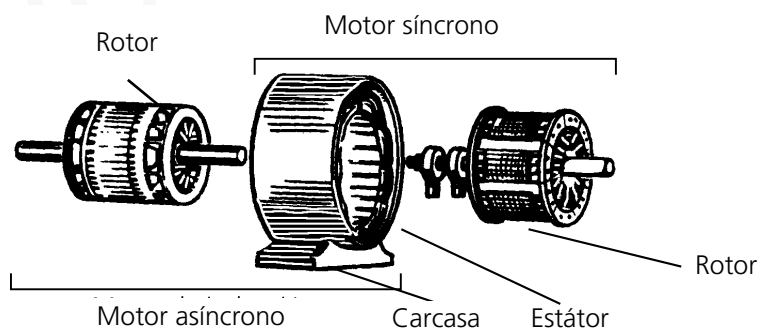


Fig. 4

Diferencia constructiva entre un motor asíncrono o de inducción y un motor síncrono.

El motor síncrono

Antes de comenzar a explicar las características de estos motores, veamos cuál es su constitución física.

1. Partes de un motor síncrono

El **estátor** (parte fija de la máquina) está formado por chapas magnéticas apiladas unas sobre otras y aisladas entre sí mediante barniz (fig. 5). En la cara interior del estátor se practican unas ranuras donde irá alojado el devanado, por el que se hará circular la corriente alterna, la cual dará lugar a un campo magnético variable que interactuará con el campo magnético del electroimán.

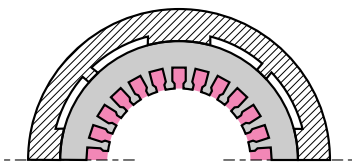


Fig. 5
Estátor de un motor síncrono.

El **rotor** suele ser del tipo **polos salientes**. El devanado inductor se arrolla alrededor de los polos (fig. 6a).

Cuando el motor se diseña para que gire a gran velocidad, su rotor es liso, y el bobinado se aloja en ranuras practicadas en su periferia (figura 6b).

- a. Polos salientes.
- b. Rotor liso:
 - 1. Estátor.
 - 2. Rotor.
 - 3. Devanados de excitación.
 - 4. Excitación de corriente continua.

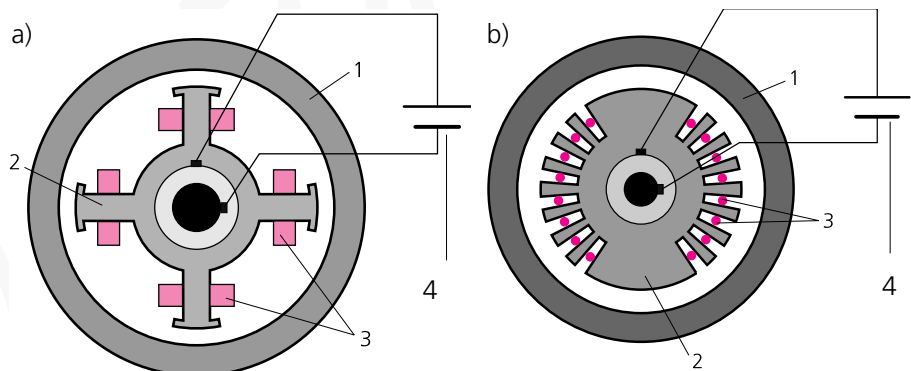


Fig. 6: Disposición del rotor de un motor síncrono.

Estas bobinas (**bobinas inductoras**) son las encargadas de crear el campo magnético del electroimán. Este campo magnético será fijo, ya que el devanado está recorrido por **corriente continua**.

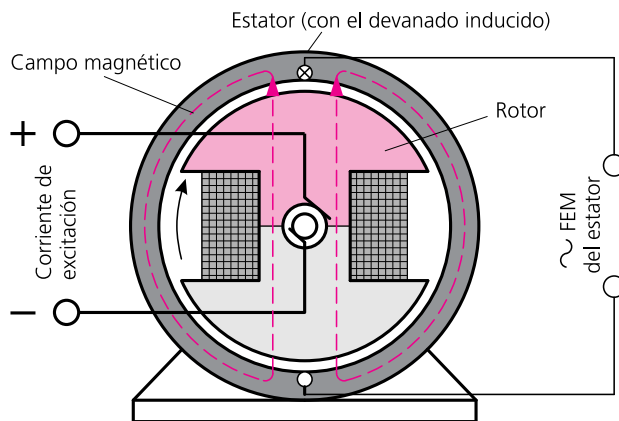


Fig. 7: Conexión de la excitación en un motor síncrono.

Este motor necesita una conexión a corriente alterna que suministre energía a las bobinas del inducido y a una fuente de corriente continua (**excitatriz**) que alimentará las bobinas del inductor. Además, es necesaria la presencia de un **sistema colector** que introduzca la corriente en el rotor.

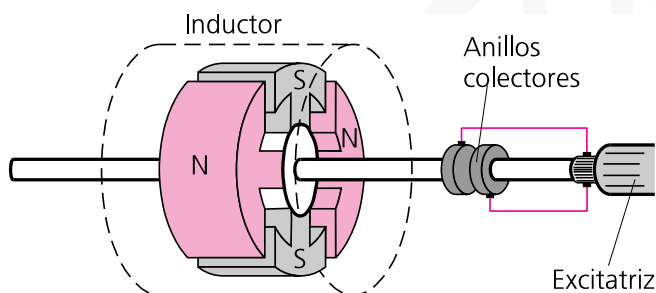
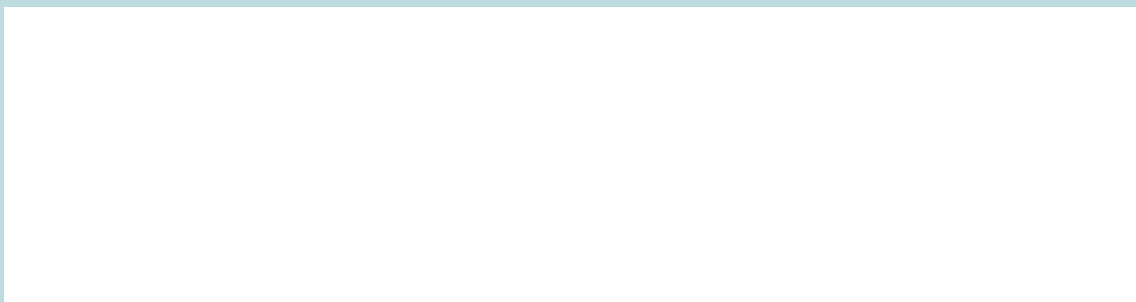


Fig. 8: Disposición de la excitatriz y los anillos colectores.

ACTIVIDAD 2

Haz un esquema donde aparezcan las partes de un motor síncrono.



2. Funcionamiento del motor síncrono

Un motor síncrono es aquél que gira siempre a la velocidad dada por la frecuencia de la red. Cada vuelta de su rotor equivale a un ciclo completo de la corriente que absorbe de la red.

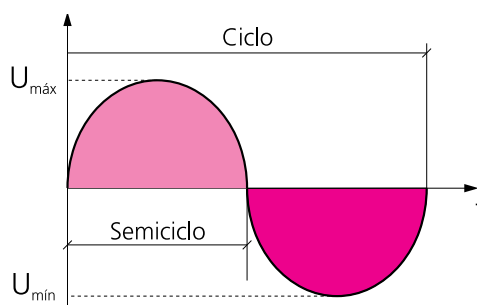


Fig. 9: Alimentación de un motor síncrono.

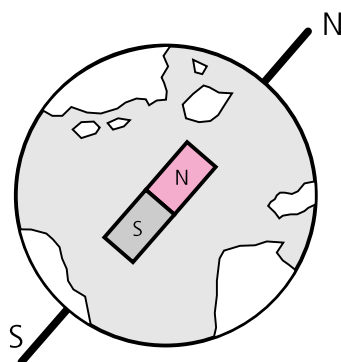


Fig. 10
Orientación de un imán
según el campo magnético
terrestre.

(Los polos N y S terrestres son
en S y N magnéticos).

Un motor síncrono es una máquina reversible, es decir, funciona como generador o como motor, dependiendo de que absorba energía mecánica o energía eléctrica.

El funcionamiento de un motor eléctrico se basa en la **interacción entre campos magnéticos**. Recuerda que, si colocamos una aguja imantada en el interior de un campo magnético, su polo sur se orienta hacia el polo norte del imán. Al girar el imán un ángulo cualquiera, la aguja lo seguirá hasta que sus polos vuelvan a enfrentarse.

Un motor síncrono también dispone de un campo magnético y de una "aguja imantada", que en este caso es el conductor o conductores recorridos por corriente alterna.

Si el conductor del que hablamos tiene forma de espira, al ser atravesado por la corriente eléctrica se crea un polo norte en una de sus caras y un polo sur en la otra (fig. 11). (El polo Norte coincide con la cara en la que el recorrido de la corriente tenga sentido opuesto a las agujas del reloj.)

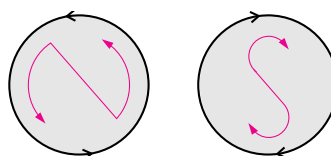


Fig. 11: Polaridad de una espira al ser recorrida por la corriente eléctrica.

Recuerda que cuando un conductor es recorrido por corriente eléctrica, se crea a su alrededor un campo magnético cuyas **líneas de fuerza son circulares** y con centro sobre el conductor. En el caso de que la **corriente** sea **alterna**, estas líneas de fuerza serán **variables**.

Cuando se introduce la espira en un campo magnético giratorio y se hace circular por ella una corriente eléctrica, la aparición del campo magnético y el enfrentamiento de polos originan su movimiento.

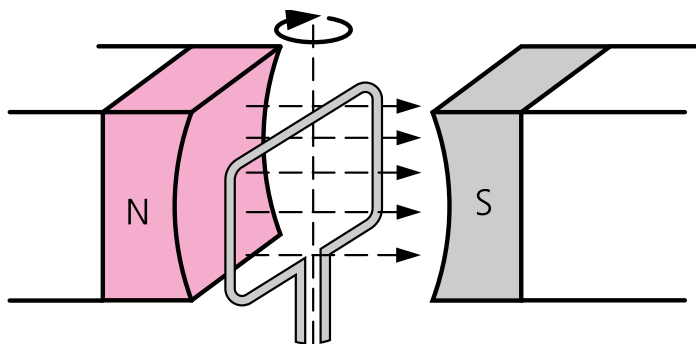


Fig. 12: Principio de funcionamiento del motor síncrono.

El sincronismo entre la velocidad de giro del campo y el giro del rotor (espiras o conjunto de espiras) es perfecto; es decir, giran a la misma velocidad. Los motores que se basan en este principio reciben el nombre de **motores síncronos**.

El rotor de un motor síncrono no podrá girar nunca a velocidades diferentes a la de sincronismo. Será un motor de velocidad constante, aunque varíe la carga (dentro de ciertos límites).

3. Velocidad de giro

La velocidad de giro del campo magnético y del inducido (espira o conjunto de espiras recorridas por corriente eléctrica) depende del **número de pares de polos** de la máquina (conjunto de polos norte y polos sur) y de la **frecuencia** de la corriente de la red de alimentación.

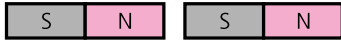


Fig. 13.
Dos pares de polos o cuatro polos.

Esta velocidad viene dada por la fórmula:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

f = Frecuencia de la corriente (Hz).

p = Pares de polos de la máquina (polo N + polo S).

n_s = Velocidad de giro de la máquina (r.p.m.).

Este valor de la velocidad es, precisamente, el de la velocidad **síncrona** correspondiente a la frecuencia de la red de alimentación.

La frecuencia de la red de alimentación es constante (en Europa es de 50 Hz, lo cual quiere decir que la intensidad realiza 50 ciclos cada segundo). El número de pares de polos de la máquina también es constante, por lo que un **motor síncrono gira siempre a la misma velocidad**.

Ejemplo:

Calcular la velocidad de giro de un motor síncrono de 8 polos ($2p = 8$) que está conectado a una red con una frecuencia de 50 Hz.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ r.p.m.}$$

ACTIVIDAD 3

Calcula la velocidad de un motor síncrono de 4 polos que está conectado a una red cuya frecuencia es de 60 Hz.

Nota: recuerda que el número de pares de polos (p) es igual al número total de polos ($2p$) dividido entre 2.

4. Motores síncronos de dos velocidades

Los devanados del estátor de un motor síncrono pueden conectarse de manera que su número de polos se duplique, de forma que la velocidad se reduce a la mitad.

Las distintas espiras que forman parte de una bobina suelen conectarse entre sí por el método de los **polos consecuentes**.

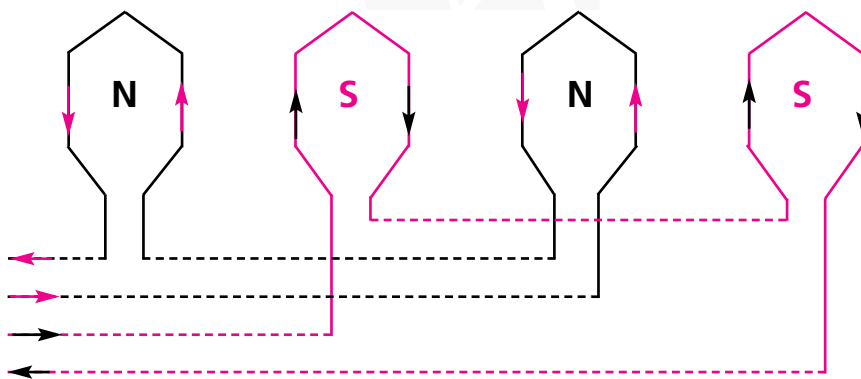


Fig. 14. Devanado conectado por polos consecuentes.

En la figura 14, que muestra esta conexión, observamos que la corriente, al circular por las distintas espiras, crea polos norte y sur alternados (sentido de circulación contrario a las agujas del reloj, polo norte; sentido de circulación de la corriente igual a las agujas del reloj, polo sur).

Si se cambia el sentido de circulación de la corriente en una de las conexiones (fig. 15), todas las espiras serán recorridas en el mismo sentido, por lo que su polaridad será la misma (en este caso, en todas se crea un polo norte).

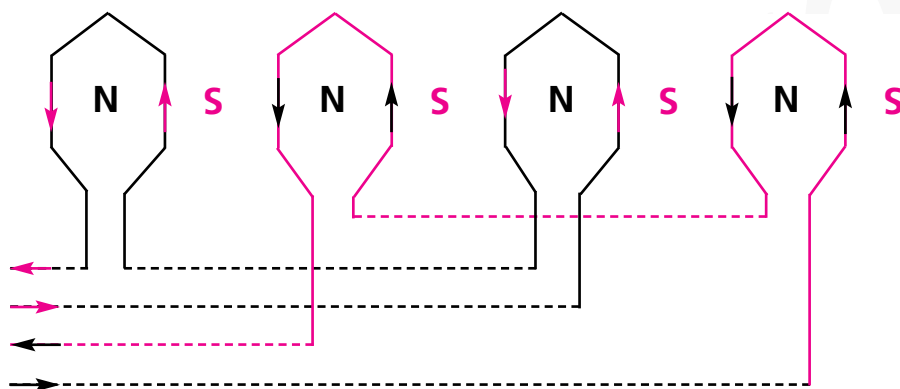


Fig. 15: Conexión que reduce a la mitad la velocidad del motor.

En el espacio comprendido entre dos espiras aparece un polo sur, como consecuencia de la circulación de corriente en el sentido de las agujas del reloj. De este modo, con sólo invertir el sentido de la corriente en una de las conexiones, hemos logrado duplicar el número de polos, reduciendo así la velocidad a la mitad.

Ejemplo:

Calcula la velocidad de un motor de 4 polos ($2p = 4p$) que está conectado a una red de 50 Hz. Si queremos reducir la velocidad a la mitad, ¿qué haremos?

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.500 \text{ r.p.m.}$$

Para reducir la velocidad a la mitad, cambiamos el sentido de circulación en uno de los devanados, duplicando así el número de polos.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ r.p.m.}$$

5. Funcionamiento en carga de los motores síncronos

Cuando se conecta una carga al motor (una bomba, por ejemplo), aparece una reactancia inductiva* (X_L) en el bobinado inducido, que da lugar a una caída de tensión.

Por otro lado, cuando el motor síncrono está en marcha, los conductores del bobinado se mueven en el interior del campo magnético, y al ser cortados por sus líneas de fuerza, se crea en ellas una fuerza electromotriz que se opone a la de alimentación del motor, y recibe el nombre de **fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.)**.

Recordemos que los motores síncronos giran a velocidad constante. El aumento de la potencia y del par, (y, como consecuencia, de la intensidad (I_l) que recorre sus devanados) no debe reducir su velocidad, sino que producirá un retraso en el tiempo debido al **par resistente** (par de fuerzas que se oponen al giro del motor como consecuencia de la carga).

Al producirse un retardo de fase cuando se le aplica una carga, el rotor obliga al motor a absorber la corriente exigida por este aumento de la carga de la línea de alimentación.

Resumiendo, cuando la frecuencia es constante, la velocidad media de los motores síncronos también es constante. El rotor adopta una posición angular ligeramente retrasada con respecto a la que tendría funcionando en vacío, sin modificar su velocidad media.

ACTIVIDAD 4

Completa el texto con las palabras siguientes:

fuerza contraelectromotriz, carga, velocidad, inducido, par resistente.

Cuando se conecta una a un motor síncrono aparece una reactancia inductiva (X_L) en el bobinado

Cuando el motor síncrono está en marcha, las líneas de fuerza del campo magnético cortan los conductores que se están moviendo, y aparece la

El que ofrece la carga se opone al movimiento del motor.

Cuando la frecuencia es constante, la de los motores síncronos también es constante.

6. Arranque de los motores síncronos

Para que un motor síncrono funcione correctamente, los conductores del devanado inducido deben alcanzar la misma velocidad angular* que el campo giratorio. Para conseguirlo, es necesario utilizar un sistema que permita al rotor alcanzar esta velocidad.

Existen diversos sistemas para conseguir el arranque, que pueden resumirse en dos:

- Acoplamiento de un motor auxiliar al eje del motor síncrono.
- Utilización de un devanado auxiliar en el rotor.

El condensador síncrono

Si a un motor síncrono se le suministra una corriente de excitación suficientemente elevada, se comporta como un **generador de energía reactiva capacitiva***. Es decir, que actúa sobre la red como si se tratara de una batería de condensadores.

Recuerda que la potencia reactiva aparece en corriente alterna y responde a la fórmula:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

U = Tensión en voltios (V).

I = Intensidad en amperios (A).

$\sin \varphi$ = Seno del ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad.

Q = Energía reactiva en voltamperios reactivos (VAr).

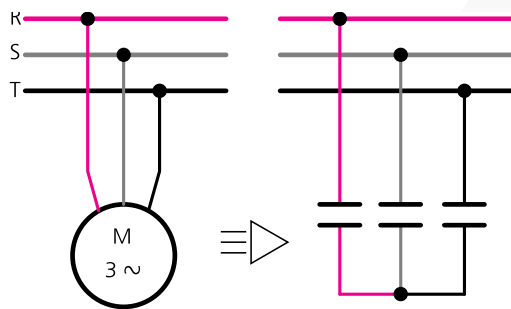


Fig. 16: Equivalencia de un motor síncrono trifásico.

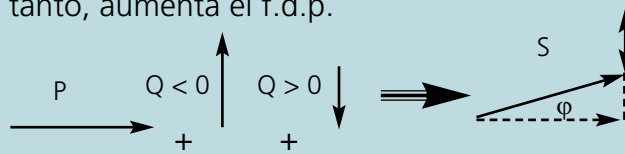
Esta propiedad del motor síncrono es tan importante que constituye su mayor aplicación. Cuando cumple esta función recibe el nombre de **condensador síncrono**.

Para que un motor síncrono pueda funcionar como generador de energía reactiva capacitiva, se le hace funcionar en vacío, de forma que la potencia activa absorbida de la línea sea la mínima. Por otra parte, al estar sobreexcitado, la fuerza contraelectromotriz generada en el inducido tendrá un valor elevado, y la corriente de carga estará adelantada, respecto a la tensión en bornes, en un ángulo de 90°.

El factor de potencia (f.d.p) de un motor es el coseno del ángulo que la tensión de alimentación forma con la intensidad que lo recorre. Este ángulo es el mismo que el que forma la potencia aparente (S) con el eje horizontal.

Cuanto mayor sea este ángulo y, como consecuencia menor, su coseno, menor será el rendimiento del motor.

Un motor síncrono suministra energía reactiva (Q) a la red, que se resta con la que consumen los distintos dispositivos y, por lo tanto, aumenta el f.d.p.



Ventajas e inconvenientes de los motores síncronos

Los máquinas síncronas se emplean normalmente como generadores, pero tienen algunas aplicaciones como motores. Las **ventajas** que presenta su utilización son las siguientes:

- Elevado rendimiento.
- Posibilidad de conexión directa a una red de alta tensión sin necesidad de transformadores*.
- Funcionamiento como condensadores síncronos, con el consiguiente aumento del factor de potencia de la red.

Los **inconvenientes** suelen superar a las ventajas:

- Imposibilidad de arranque en carga: antes de su conexión a la línea, el rotor debe alcanzar la velocidad de sincronismo.
- Necesidad de **excitatriz** en el devanado inductor.
- Sólo giran a una velocidad, que es la de **sincronismo**.
- No permiten variaciones bruscas de la carga.

Si consideras que has concluido el estudio de esta unidad, intenta responder a las siguientes cuestiones de autoevaluación.

Cuestiones de autoevaluación

1

Completa el texto con las palabras adecuadas:

Los motores se clasifican según su número de fases en:

Monofásicos (.....), bifásicos (2 fases) y (3 fases).

Según la velocidad, la clasificación es la siguiente:

..... y (o de inducción).

2

Indica si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas:

V F

- a. El estátor es la parte móvil de un motor síncrono. ☐ ☐
- b. En un rotor de polos salientes, el devanado inductor se arrolla alrededor de los polos. ☐ ☐
- c. En un motor síncrono, el campo magnético del electroimán es variable. ☐ ☐
- d. En este tipo de motores es necesaria la presencia de un sistema colector que introduzca corriente continua en el rotor. ☐ ☐

3

Si un motor síncrono está conectado a una red de 50 Hz y gira a una velocidad de 1.500 r.p.m., ¿cuántos pares de polos tiene?

4

¿Cuál es la principal aplicación del motor síncrono?

Respuestas a las actividades

R

ACTIVIDAD 1

Las afirmaciones **b** y **c** son verdaderas.

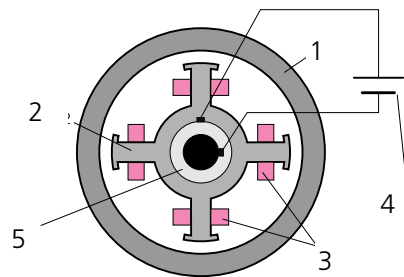
- a. **Falsa:** en el motor se produce una conversión de energía eléctrica en mecánica.
- d. **Falsa:** los motores se clasifican, según su velocidad, en síncronos y asíncronos.

R

ACTIVIDAD 2

En el esquema deben aparecer:

- 1. Estátor.
- 2. Rotor.
- 3. Bobinas inductoras.
- 4. Excitación.
- 5. Colector.



R

ACTIVIDAD 3

Para calcular la velocidad de este motor basta con aplicar la fórmula:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.800 \text{ r.p.m.}$$

R

ACTIVIDAD 4

Cuando se conecta una **carga** a un motor síncrono, aparece una reactancia inductiva (X_L) en el bobinado **inducido**.

Cuando el motor síncrono está en marcha, las líneas de fuerza del campo magnético cortan los conductores que se están moviendo, y aparece la **fuerza contraelectromotriz**.

El **par resistente** que ofrece la carga se opone al movimiento del motor.

Cuando la frecuencia es constante, la **velocidad** de los motores síncronos también es constante.

Respuestas a las cuestiones de autoevaluación

Los motores se clasifican según su número de fases en:

1

Monofásicos (**1 fase**), bifásicos (2 fases) y **trifásicos** (3 fases).

Según la velocidad, la clasificación es la siguiente:

Síncronos y **asíncronos** (o de inducción).

Las afirmaciones **b** y **d** son verdaderas.

2

a. **Falsa**: el estátor es la parte fija de cualquier máquina rotativa.

d. **Falsa**: el campo magnético del electroimán es fijo, ya que está originado por una corriente continua.

Para calcular el número de pares de polos del motor (p) despejaremos este parámetro de la fórmula:

3

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

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1.500} = 2 \text{ pares de polos.}$$

Luego **$2p = 4$** .

El motor síncrono se emplea normalmente como generador de energía reactiva capacitiva; recibe el nombre de condensador síncrono.

4

Resumen de Unidad

Motor eléctrico Un **motor eléctrico** de corriente alterna es una máquina que absorbe energía eléctrica alterna y la transforma en movimiento (energía mecánica).

Atendiendo a su velocidad, los motores de corriente alterna se clasifican en **síncronos** y **asíncronos**.

Motor síncrono Es aquél en el que el rotor gira a la velocidad del campo magnético; es decir, cada ciclo de la onda de la tensión corresponde con una vuelta del rotor. Dicha velocidad recibe el nombre de **velocidad síncrona (n_s)**.

Velocidad síncrona La velocidad síncrona viene dada por la fórmula:

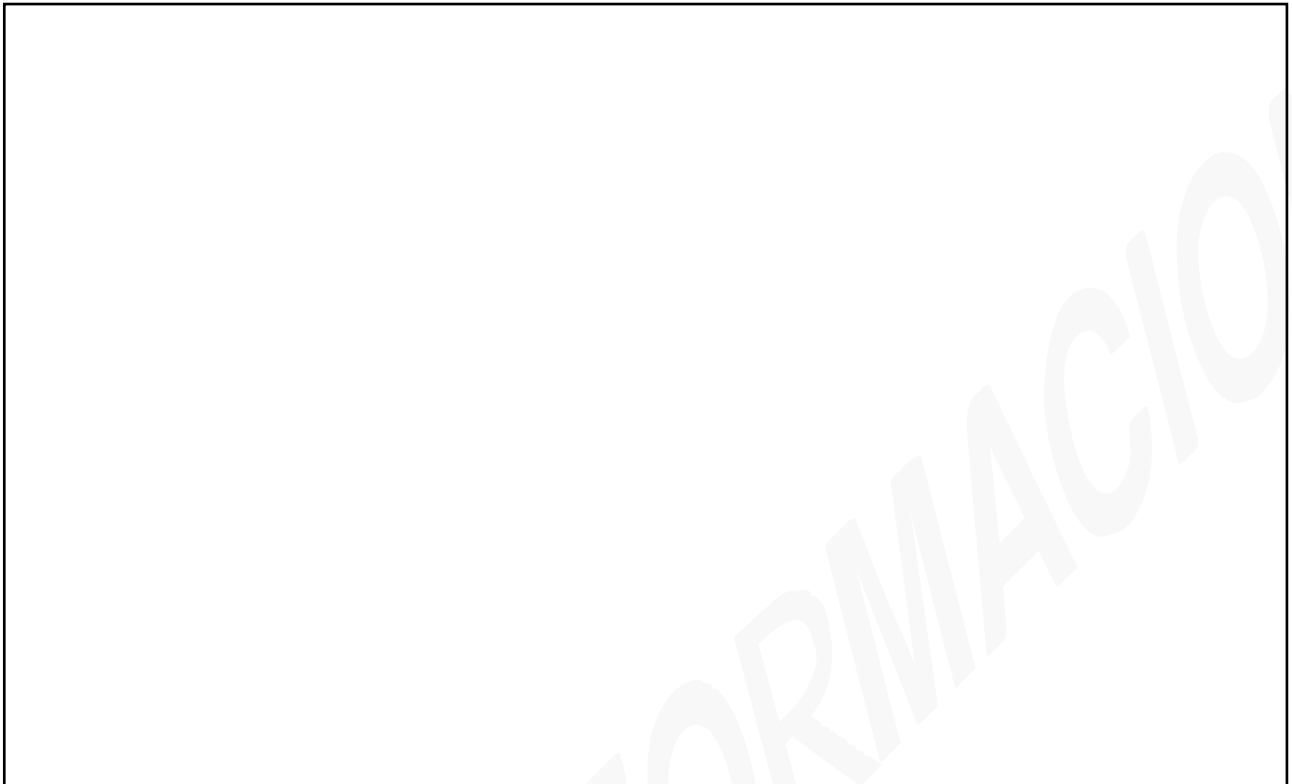
$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

El rotor o núcleo de este motor está formado por electroimanes recorridos por corriente continua, con lo cual su campo magnético es fijo. Es necesaria la presencia de un conductor para introducir esta corriente continua en el rotor.

El estátor está formado por un apilamiento de chapas magnéticas y devanados recorridos por corriente alterna.

La principal aplicación de un motor síncrono es el generador de energía reactiva o el condensador síncrono.

Notas



Vocabulario

Energía reactiva capacitiva: energía que suministra un condensador a la red. No es aprovechable, pero aumenta el factor de potencia de la instalación y con ello su rendimiento.

Reactancia inductiva: oposición que una bobina ejerce al paso de la corriente.

Transformador: máquina eléctrica que transfiere potencia entre dos circuitos: uno de alta tensión y otro de baja (o viceversa).

Velocidad angular: cociente del ángulo que recorre un punto cuando sigue una trayectoria circular y el tiempo que tarda en recorrer dicho ángulo. Se mide en rad/s.



FONDO  FORMACION