

Ventajas de los motores síncronos asimétricos

Florencio Jesús Cembranos Nistal

Advantages of asymmetric synchronous motors

RESUMEN

La gran mayoría de los accionamientos eléctricos en la industria se realizan mediante motores eléctricos de tipo asíncrono trifásico. Sin duda, las prestaciones de este tipo de motores y su reducido mantenimiento hacen de este tipo de motor el más adecuado. Actualmente, gracias a la mejora de la técnica, podemos aumentar el rendimiento de los accionamientos eléctricos utilizando motores síncronos que tienen todas las ventajas de los asíncronos y mejoras en cuanto a consumo, principalmente, por la mejora del coseno de ϕ . En este artículo se pretende dar una idea de cómo utilizar motores síncronos y controlarlos de una forma más simple que los asíncronos consiguiendo mejorar el rendimiento y reducir el consumo.

Recibido: 10 de septiembre de 2014

Aceptado: 28 de agosto de 2015

ABSTRACT

The vast majority of electric drives in the industry are made using three phase electric asynchronous motors. Certainly, the performance and low maintenance of this engine make this type of motor the most suitable. Today, thanks to improved technology, we can increase the efficiency of electric drives using synchronous motors that have all the advantages from the asynchronous and improvements in consumption, mainly due to ϕ coefficient improvement. This article is intended to give an idea of how to use synchronous motors and control them in a simpler way than asynchronous improving performance and reducing consumption.

Received: September 10, 2014

Accepted: August 28, 2015

Palabras clave

Motores eléctricos, motores síncronos, motores asíncronos, campo giratorio, factor de potencia

Keywords

Electric motors, synchronous motors, asynchronous motors, rotating field, power factor



Foto: Oleg Golovnev / Shutterstock

Introducción

Actualmente, la gran mayoría de motores eléctricos que se utilizan en todas las aplicaciones industriales son del tipo asíncrono, principalmente por la facilidad de su construcción, reducido mantenimiento y prestaciones buenas.

Sin embargo, tiene la desventaja del factor de potencia, que, aunque no es muy elevado, reduce la potencia efectiva del motor a la vez que introduce una carga reactiva en la línea que hace necesaria su eliminación mediante baterías de condensadores.

La solución a este problema es la utilización de motores síncronos. Esta solución, aunque actualmente es perfectamente factible, debido a que hace años pasaba por una gran complejidad en su instalación, tiene todavía poca penetración en la industria. Son muchas las instalaciones en las que, pudiendo instalar motores síncronos, se utilizan asíncronos por razones comerciales o por desconocimiento del funcionamiento del motor síncrono.

En este artículo se va a explicar el funcionamiento del motor síncrono y cómo, desde la tecnología actual, es posible utilizar motores síncronos con un arranque similar al asíncrono clásico, pero con las ventajas del motor síncro-

no, es decir, velocidad constante a la de sincronismo, por lo tanto, coseno de fi próximo a la unidad, en condiciones de funcionamiento a régimen constante.

Para el desarrollo voy a partir desde el concepto del campo giratorio para poder justificar un diseño del motor síncrono que he denominado de *reluctancia conmutada* para explicar mejor el funcionamiento de este tipo de motores, pasando por una breve descripción de la problemática de los motores síncronos actuales.

Efecto del campo giratorio

Disponemos de un conjunto de bobinas dispuestas de forma circular, como se aprecia en la figura. Si a estas bobinas les aplicamos una corriente de forma alternativa, comenzando por la primera y así sucesivamente, conseguiremos como resultado un campo magnético que seguirá el flujo de corriente. A este campo magnético se le denomina campo giratorio. Si en el interior de esta figura colocamos un disco de material ferromagnético, girará a una determinada velocidad impulsado por el campo magnético giratorio (figura 1).

En este caso, el vector fuerza del campo establecido, según el teorema de Ferraris, es igual al producto de la

mitad de la inducción máxima creada por cada una de las bobinas, ya que solo utilizamos la mitad de la inducción de las bobinas, multiplicada por el número de estas:

$$\beta F = m \frac{\beta \phi}{2}$$

Si la corriente aplicada a las bobinas es de tipo sinusoidal, esta tendrá la expresión:

$$\begin{aligned} i_1 &= I_0 \cdot \text{sen } \omega t \\ i_2 &= I_0 \cdot \text{sen } \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right) \\ i_3 &= I_0 \cdot \text{sen } \left(\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{m} \right) \\ i_4 &= I_0 \cdot \text{sen } \left(\omega t - 3 \cdot \frac{2\pi}{m} \right) \\ &\dots \\ i_{1m} &= I_0 \cdot \text{sen } \left(\omega t - (m-1) \cdot \frac{2\pi}{m} \right) \end{aligned}$$

La expresión entre paréntesis es el desfase del sistema.

Campo giratorio trifásico

En el caso concreto de la corriente alterna trifásica, las expresiones anteriores toman los siguientes valores ($m = 3$):

$$\begin{aligned} i_1 &= I_0 \cdot \text{sen } \omega t \\ i_2 &= I_0 \cdot \text{sen } \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = I_0 \cdot \text{sen } (\omega t - 120^\circ) \\ i_3 &= I_0 \cdot \text{sen } \left(\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{3} \right) = I_0 \cdot \text{sen } (\omega t - 240^\circ) \end{aligned}$$

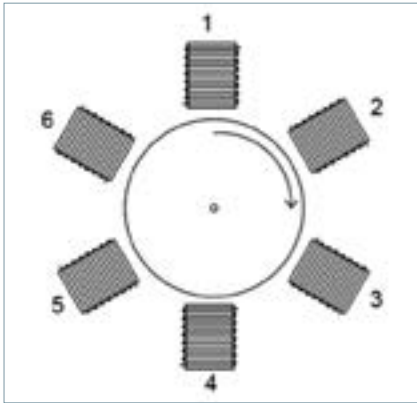


Figura 1. Disposición.

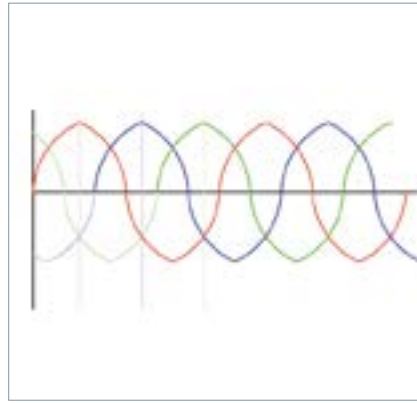


Figura 2. Representación de las tres intensidades de corriente trifásica.

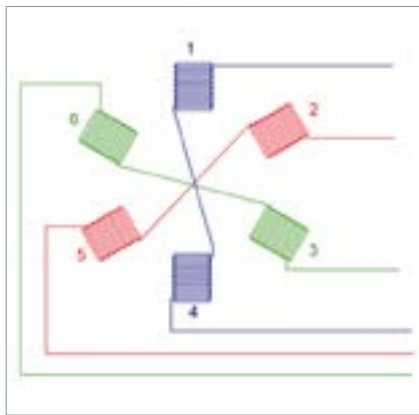


Figura 3. Esquema del estator.

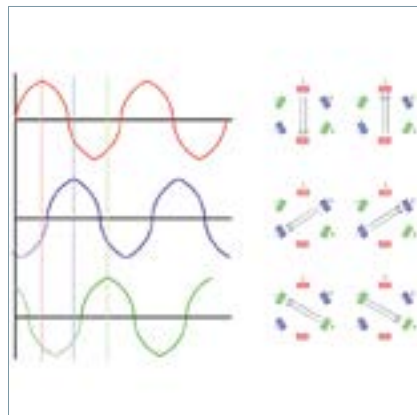


Figura 4. Direcciones del campo giratorio en el estator.

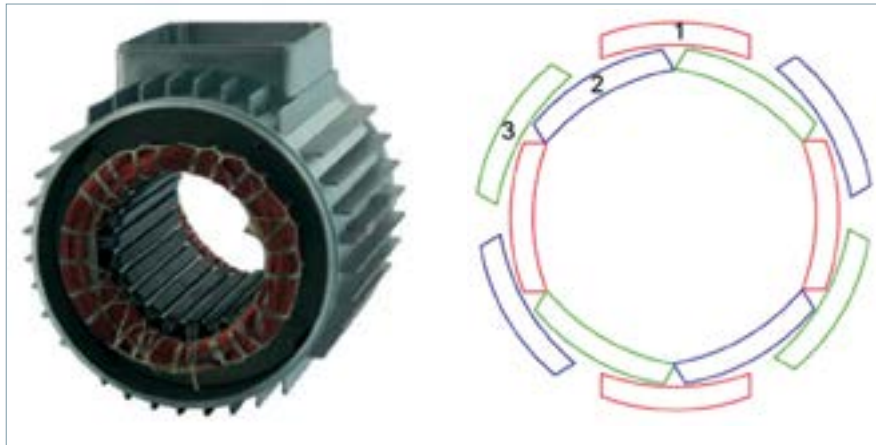


Figura 5. Estatores de dos pares de polos.

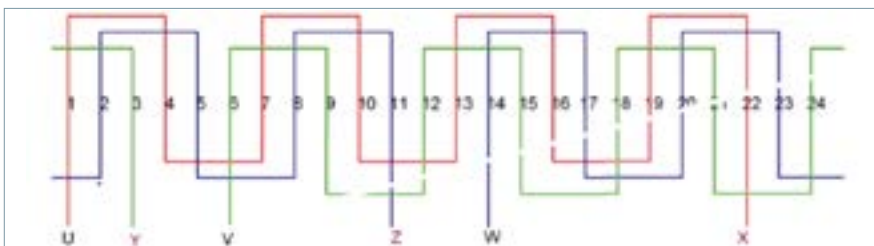


Figura 6.

En la figura 2 se muestra cómo son estas corrientes.

La disposición de las bobinas en lo que se denomina estator de la máquina quedaría dispuesta como se ve en la figura 3.

Campo giratorio en el estator

Aplicando una corriente alterna trifásica a una disposición de bobinas como la de la figura 3, en virtud del *teorema de Leblanc* el campo giratorio tendrá la forma de la figura 4.

La velocidad de giro del campo será igual a:

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

$$s = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3.000 \text{ rpm}$$

Siendo *f* la frecuencia aplicada y *p*, el número de pares de polos. En este caso, si la frecuencia es de 50 Hz, como solo tenemos un par de polos, la velocidad será:

Esta velocidad se denomina velocidad de sincronismo.

Constitución del bobinado del estator

Comercialmente, la mayoría de los estatores para motores asíncronos son de 1, 2 o 4 pares de polos, con lo que la velocidad de sincronismo a 50 Hz sería de 3.000 rpm, 1.500 rpm y 750 rpm.

El número de polos está en función del número de ranuras que tenga el estator (figura 5).

Es necesario repartir las bobinas de las tres fases entre todas las ranuras de que disponemos. Para ello se siguen unas sencillas reglas para el bobinado.

La disposición más común para los estatores de dos pares de polos (los más extendidos) es un estator de 24 ranuras. Como son dos pares de polos son necesarios 12 grupos de bobinas suficientes para bobinar el estator de 24 ranuras, con la disposición de la figura 5.

El esquema de conexión de las bobinas en el interior de las ranuras del estator podría ser como el de la figura 6.

U, V y W son el principio de las bobinas y X, Y y Z el final.

Rotor asíncrono y síncrono

Si en el interior del estator situamos una masa metálica, esta girará a una determinada velocidad. Se denomina asíncrono el motor así creado que gira

por debajo de la velocidad de sincronismo. La velocidad con la que gira el rotor dependerá del tamaño de este y de su construcción. Esta diferencia de velocidad se denomina *deslizamiento*.

Un motor asíncrono necesita crear el campo giratorio y vencer la reluctancia del entrehierro, por lo que produce un desfase en la corriente en la red. Por eso este tipo de motores necesita que se compense la energía reactiva mediante la utilización de condensadores en paralelo.

Si sustituimos la masa metálica por un imán que formará el rotor, el motor así formado girará, precisamente, a la velocidad de sincronismo.

Este tipo de motor es mucho más eficaz, no pierde velocidad ni par al aumentar la carga. Es un motor de velocidad constante. Además, al no existir deslizamiento, el desfase de corriente será mínimo en condiciones de funcionamiento a régimen permanente y no necesita condensadores para la compensación de la energía reactiva. El rendimiento es mejor y el consumo también.

Motor síncrono

Los motores síncronos son llamados así porque la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético del estator son iguales. Los motores síncronos se han usado en máquinas grandes que tienen una carga variable y necesitan una velocidad constante. Su arranque fue siempre complicado, por lo que su uso estuvo muy limitado. Desde hace años se han encontrado nuevos sistemas de arranque de los motores síncronos utilizando convertidores electrónicos y nuevos diseños, por lo que el motor síncrono ha comenzado a tener un nuevo auge.

Los motores síncronos funcionan de forma muy similar a un alternador. Dentro de la familia de los motores síncronos debemos distinguir:

- Los motores síncronos.
- Los motores asíncronos sincronizados.
- Los motores de imán permanente.

Arranque de un motor trifásico síncrono

Existen cuatro tipos de arranques para motores conectados directamente a la red:

1. Como motor asíncrono.
2. Como motor asíncrono, pero sincronizado.



Figura 7. Esquemas de los motores síncrono y asíncrono.



Figura 8. Fotografía con detalles del bobinado.

3. Utilizando un motor secundario o auxiliar para el arranque.

4. Como motor asíncrono, usando un tipo de arrollamiento diferente: llevará unos anillos rozantes que conectarán la rueda polar del motor con el arrancador.

Arranque como motor asíncrono

Cuando el par de arranque que se precisa es pequeño o con carga limitada, se recurre al motor síncrono de rotor polar y que dispone, además, de un bobinado amortiguador en cortocircuito que une las cabezas polares.

En estas condiciones se conecta a la red el bobinado inducido que, al ser recorrido por la corriente alterna, creará un campo magnético giratorio con velocidad igual a la de sincronismo.

El campo magnético cortará los conductores de la jaula amortiguadora induciendo en ellos una fuerza electromotriz que la pondrá en movimiento.

La velocidad que lleve será muy próxima a la de sincronismo. Conectando el bobinado de la rueda polar

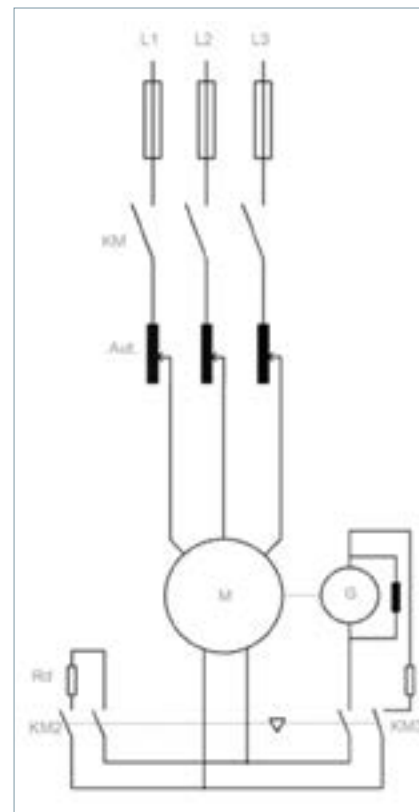


Figura 9. Esquema del arranque del motor asíncrono.

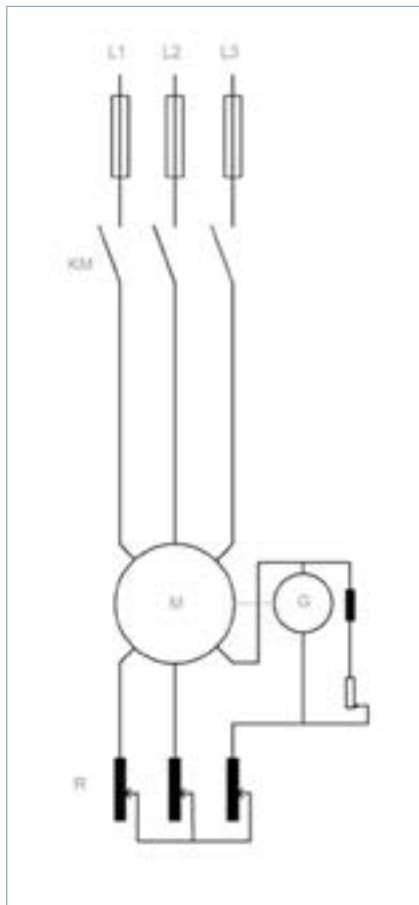


Figura 10. Esquema del arranque con motor de arrastre.

a la excitación de corriente continua, tras unas oscilaciones de velocidad, el *órgano* móvil alcanzará la velocidad síncrona.

Este procedimiento de arranque admite también todos los métodos de arranque expuestos anteriormente para los motores asíncronos, a fin de bajar el valor de la intensidad absorbida en el momento de la conexión a la red.

En serie con el bobinado inductor, suele conectarse una resistencia que, al tiempo que limita la corriente absorbida en el momento de la conexión a la red, ayuda al arranque, puesto que, al ser un arranque como motor asíncrono, el aumento de resistencias en el rotor favorece la puesta en marcha.

Motor asíncrono sincronizado

Si se desea arrancar con fuertes cargas, se recurrirá al empleo del motor denominado asíncrono sincronizado. El rotor de este motor es del tipo cilíndrico y en él se dispone un devanado trifásico de tres anillos colectores, como si

fuera un motor de inducción de rotor bobinado (figura 10).

El motor asíncrono sincronizado se puede arrancar en carga como con motor asíncrono, teniendo conectados los bobinados del rotor al reóstato de carga, a través de los anillos colectores y conectado el estator a la red.

Una vez que se tiene el motor funcionando a una velocidad próxima a la de sincronismo, se conmuta y se pasa a alimentar el rotor con corriente continua, con lo que se alcanza fácilmente la velocidad de sincronismo.

Arranque mediante motor de arrastre

Consiste en acoplar al eje del motor síncrono el eje de otro motor cuya velocidad de funcionamiento sea superior a la del motor síncrono que se quiere arrancar. Regulando el motor de arrastre de forma que su velocidad coincida con la de sincronismo del motor que deseamos arrastrar, solo restará que, una vez alcanzada esta, se suprima el motor de arrastre, dejando el síncrono funcionando normalmente.

Frenado de un motor trifásico síncrono

Por regla general, la velocidad deseada de este tipo de motor se realiza por medio de un reóstato.

El motor síncrono se detendrá cuando alcance el par crítico, aunque esta no es la forma más ortodoxa de hacerlo ya que produce un calentamiento del motor. El par crítico se alcanza cuando la carga asignada al motor supera al par del motor.

La mejor forma de hacerlo es ir variando la carga hasta que la intensidad absorbida de la red sea la menor posible, entonces desconectaremos el motor. Este método solo podrá utilizarse si la carga se puede variar de forma voluntaria por el usuario, por ejemplo, en trenes de laminado o cintas transportadoras.

Hasta hace unos años el uso de los motores síncronos fue muy limitado debido al problema de arranque, si bien, en funcionamiento tiene más par que el asíncrono. Además, el coseno de fi es uno en los síncronos en régimen permanente y con carga constante. De todas formas su uso se generalizó casi exclusivamente como alternadores para la producción de corriente alterna.

Desde hace ya varios años debido a la aparición de diversos tipos de motores

síncronos y, sobre todo, al gran avance de la electrónica, el motor síncrono ha tenido un nuevo resurgimiento.

Las aplicaciones de los motores síncronos en la industria la mayoría de las veces resultan en ventajas económicas y operacionales considerables, debido a sus características de funcionamiento. Las principales ventajas son:

Corrección del factor de potencia

Los motores síncronos pueden ayudar a reducir los costos de energía eléctrica y mejorar el rendimiento del sistema de energía, corrigiendo el factor de potencia en la red eléctrica en la que están instalados. En pocos años, el ahorro de energía eléctrica puede igualarse al valor invertido en el motor.

Velocidad constante

Los motores síncronos mantienen la velocidad constante tanto en las situaciones de sobrecarga como durante momentos de oscilaciones de tensión, respetándose los límites del conjugado máximo (*pull-out*).

Alto rendimiento

En la conversión de energía eléctrica en mecánica es más eficiente, por lo que genera mayor ahorro de energía. Los motores síncronos son proyectados para operar con alto rendimiento en un amplio rango de velocidad y para proveer un mejor aprovechamiento de energía para una gran variedad de cargas.

Alta capacidad de torque

Los motores síncronos son proyectados con altos torques en régimen, manteniendo la velocidad constante, incluso en aplicaciones con grandes variaciones de carga.

Mayor estabilidad en la utilización con convertidores de frecuencia

Puede actuar en un amplio rango de velocidad, manteniendo la estabilidad independiente de la variación de carga (p. ej., laminadoras, extrusoras de plástico, etc.).

Tipos más comunes de motores síncronos

En la actualidad, los motores síncronos han sufrido un gran avance en cuanto a diseño. Destacan los motores síncronos sin escobillas (*brushless* en inglés), aunque, al principio, este tipo de mo-

tores era de tamaño reducido y solo apto para aplicaciones electrónicas (motor para el movimiento de discos duros), en modelismo y pequeñas aplicaciones industriales o de laboratorio. Actualmente están apareciendo motores síncronos sin escobillas de potencia elevada e, incluso, están desplazando a los alternadores clásicos por el tipo de

alternadores sin escobillas para generación de energía.

- Los motores más comunes son:
- Motor síncrono de imán permanente (*PMSM motors*)
 - Motor de imán permanente sin escobillas o *brushless (BLC motors)*
 - Motor de reluctancia variable (*VRM motors*)

-Motor paso a paso (*steppers motors*)

Motor síncrono con reluctancia conmutada

Es posible realizar un motor síncrono que arranque sin ninguna fuerza exterior, como un asíncrono, sin necesidad de utilizar circuitos electrónicos complejos.

El motor aquí propuesto es síncrono con el rotor modificado geométricamente para producir un arranque directo, como en un asíncrono.

Este tipo de motor puede arrancarse de manera directa, mediante contactores, por medio de arrancadores electrónicos progresivos o mediante un variador de frecuencia, con el fin de obtener diversas velocidades.

Estator de bobinas

Para un primer prototipo se construyó un estator formado por seis bobinas que formaban la conexión de la figura

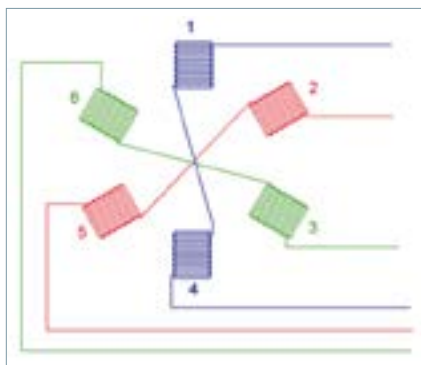


Figura 11.

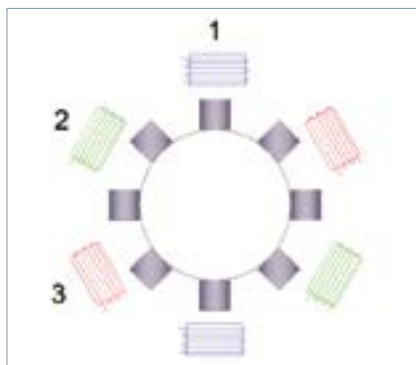


Figura 12.

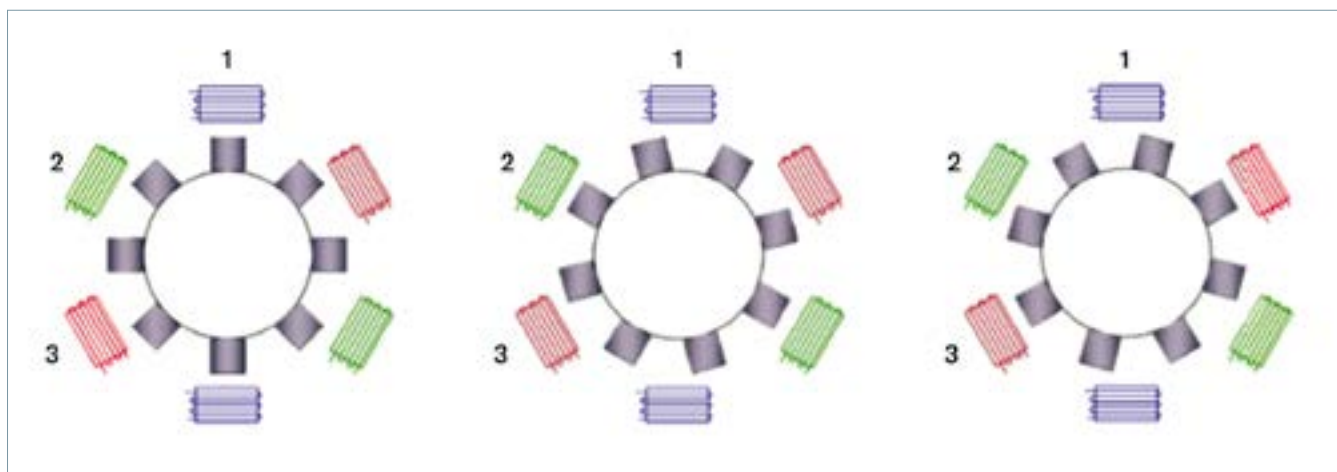


Figura 13. Esquema de la generación de pulsos.

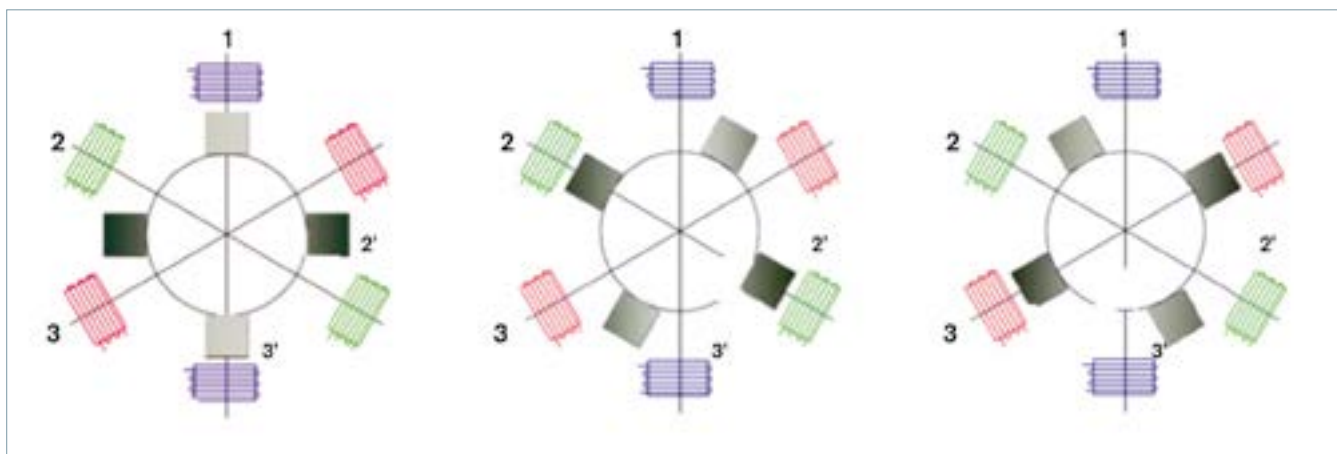


Figura 14. Impulsos del rotor desplazados 30 grados.



Figura 15. Prototipo desarrollado.

11, similar a la propuesta para probar el campo giratorio.

Uniendo el final de las bobinas 4, 5 y 6 generamos un neutro artificial y podemos conectar una red trifásica a las bobinas 1, 2 y 3 para generar el campo giratorio. Esta conexión puede ser sustituida por un generador de pulsos en las bobinas 1, 2 y 3 de frecuencia variable. El efecto va a ser el mismo.

El rotor que debemos construir debe ser de tipo asimétrico, esto es, tendrá un número de polos distinto al número de polos del estator para poder generar un par que le impulse. El rotor podrá tener 4 u 8 polos de forma que solo se encontrarán dos polos enfrentados con las bobinas.

La figura 12 muestra la disposición de estator y rotor con 8 polos.

La generación de pulsos en las bobinas 1, 2 y 3 provocará el giro a impulsos del rotor (figura 13).

En este caso el impulso de tensión en la bobina 1 atrae el primer polo y se sitúa como se ve en la figura de la izquierda. A continuación, el impulso en la bobina 2 hace que se desplace el polo más próximo a esta bobina hasta la situación en la figura central y el tercer impulso situará el rotor en la posición de la figura de la derecha, por lo que quedará dispuesto para que el siguiente impulso, por la bobina 1, vuelva a situar el rotor en la figura de la izquierda.

En este caso, cada impulso de las bobinas del estator genera un giro del rotor de 15 grados. Según la relación:

$$\frac{Z_s \times Z_r}{Z_s - Z_r} = \frac{6 \times 8}{6 - 8} = 24 \frac{\text{impulsos}}{\text{vuelta}}; \frac{24}{360^\circ} = 15^\circ$$

$$\frac{Z_s \times Z_r}{Z_s - Z_r} = \frac{6 \times 4}{6 - 4} = 12 \frac{\text{impulsos}}{\text{vuelta}}; \frac{12}{360^\circ} = 30^\circ$$

Podemos modificar el rotor fácilmente y construir otro de 4 polos. El funcionamiento sería similar, con la diferencia que a cada impulso el rotor se desplazaría 30 grados.

Construcción del prototipo

Para probar el funcionamiento se construye un sencillo prototipo con 6 bobinas y un rotor con 8 polos como se puede ver en la figura 15.

Con la ayuda de un PLC se puede generar una serie de pulsos de distinta frecuencia, consiguiendo que el rotor gire en función de los pulsos recibidos en las bobinas.

El funcionamiento se puede ver en el enlace siguiente:

<http://www.youtube.com/watch?v=sjLyrOEGsco&feature=youtu.be> (consultado en junio de 2015)

La alimentación de las bobinas puede realizarse en corriente continua o alterna. Con cada impulso que reciben las bobinas el rotor avanza 30 grados, conectado como se ha explicado anteriormente. Resulta que cada ciclo de 3 pulsos el rotor avanza 90 grados. Para realizar un ciclo completo son necesarios 4 ciclos, por lo que las revoluciones a las que girará serán:

$$rpm = \frac{f \cdot 60}{4}$$

Siendo f la frecuencia en ciclos/segundo de los impulsos recibidos por las bobinas. En el caso de estar conectado a una red trifásica de 50 Hz la velocidad de giro será de 750 rpm.

Funcionamiento como generador

Sustituyendo las chapas metálicas del rotor por imanes permanentes y haciendo girar el rotor obtendremos una señal de tipo alterno en las bobinas del estator. En este caso la frecuencia de la señal generada se deducirá de la fórmula anterior y sería:

$$f = \frac{rpm \cdot 4}{60}$$

Haciendo girar el rotor a 750 rpm obtendríamos 50 Hz. La tensión generada dependerá de la calidad de los imanes permanentes y de las bobinas instaladas.

Ventajas del motor síncrono asimétrico

El motor síncrono tiene bastantes ventajas respecto a los asíncronos, como ha quedado expuesto en el apartado en

el que se habla de los motores síncronos. Como resumen se podría exponer que los motores síncronos tienen las siguientes ventajas:

- Factor de potencia 1. En régimen permanente y carga constante. Esto elimina la necesidad de instalar baterías de condensadores para compensar el coseno de fi.

- Aumento de la potencia total. No existe pérdida de energía reactiva. Toda la potencia eléctrica del motor va a ser activa. Un motor síncrono va a tener una potencia activa de al menos un 15% más que otro asíncrono de la misma potencia eléctrica nominal debido a la ausencia de energía reactiva. También se debe a la no existencia de pérdidas por efecto Joule en el rotor.

- Aumento del par. El par o torque en los motores síncronos es mayor que en los asíncronos y también la estabilidad de velocidad ante cambios bruscos de carga.

Los motores síncronos, como el aquí expuesto, tienen la ventaja de la facilidad de arranque utilizando sistemas de arranque electrónicos similares a los variadores de frecuencia utilizados para el arranque de los motores asíncronos.

Como todas las máquinas eléctricas, este motor es reversible. Fácilmente, en caso de necesidad, puede convertirse en generador, sustituyendo las chapas del rotor por imanes permanentes, por ejemplo.

Todo ello hace que este tipo de motor sea más eficiente, tenga más rendimiento y consuma menos energía que los homólogos asíncronos.

Bibliografía

- Alcalde S. Miguel, Pablo (1999). Electrotecnia. 5ª edición. Madrid: Paraninfo.
- Fouillé, A (1971). Electrotecnia para Ingenieros. I Electricidad Fundamental. 8ª edición. Madrid: Aguilar.
- Manzano Orrego, Juan José (2008). Máquinas Eléctricas. Madrid: Paraninfo.
- Theodore Wildi (2012). Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. Prentice Hall.
- Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. (2006). 6ª edición. Mc Graw Hill.

Florencio Jesús Cembranos Nistal

fjcn86@gmail.com

Ingeniero técnico industrial en electricidad, grado en ingeniería electrónica y automática e ingeniero técnico aeronáutico en aeromotores. Profesor de formación profesional en el centro Don Bosco de León y profesor asociado en el departamento Eléctrico de la Universidad de León.