



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA*



MOTORES

MONOFÁSICOS

DE INDUCCIÓN

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

© 2015, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.



Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.

Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Introducción

En su forma básica un motor monofásico de inducción consiste en una máquina asíncrona de jaula de ardilla cuyo devanado del estator es monofásico.

El *Teorema de Leblanc* señala que un devanado monofásico recorrido por una corriente alterna monofásica crea un campo magnético *pulsante*, el cual equivale a dos campos magnéticos giratorios iguales que rotan en sentidos opuestos. Cada uno de estos campos giratorios origina un par similar al de una máquina asíncrona polifásica.

Si el motor gira a una velocidad n , el deslizamiento s_d del campo giratorio directo (el que gira en el mismo sentido que el motor) vale

$$s_d = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1} = s \tag{1}$$

y el deslizamiento s_i del campo inverso (el que gira en sentido contrario al del eje del motor) vale

$$s_i = \frac{(-n_1) - n}{(-n_1)} = 1 + \frac{n}{n_1} = 2 - s \tag{2}$$

La Fig. 1 representa los pares producidos por los dos campos giratorios. El par M_i del campo inverso se opone al par M_d del campo directo, por lo que se representa hacia el lado negativo del eje de ordenadas. El par resultante M se obtiene sumando M_d y M_i .

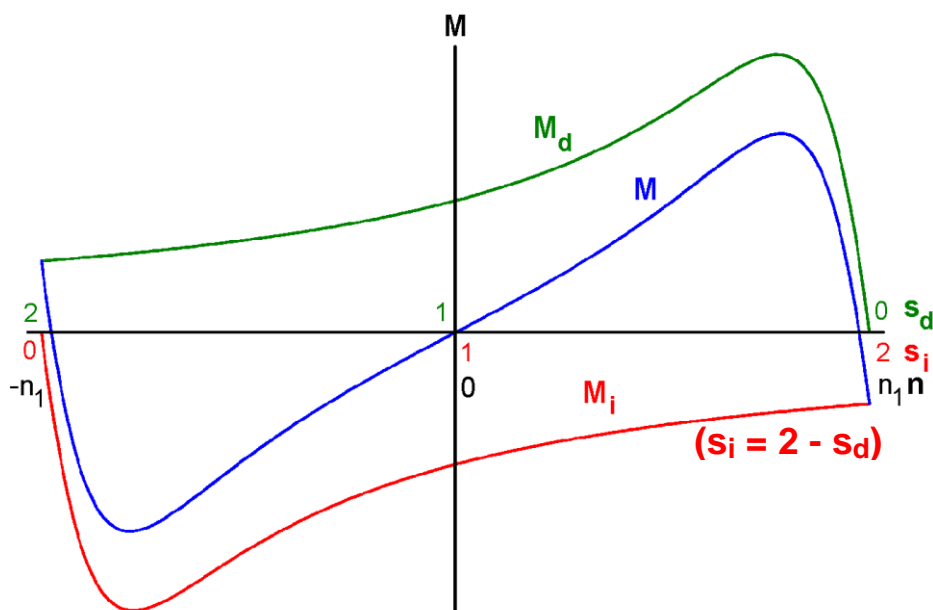


Fig. 1: Curva Par-velocidad de un motor monofásico de inducción

MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Nótese que el par de arranque de este motor es nulo, pues a velocidad nula los deslizamientos s_d y s_i son iguales y los dos campos giratorios ejercen pares de igual valor y sentidos opuestos, por lo que se anulan entre sí.

Sin embargo, las relaciones (1) y (2) indican que si se consigue hacer girar al motor a una velocidad n los deslizamientos de los dos campos giratorios no son iguales y el par resultante no será nulo. Por lo tanto, una vez arrancado, el motor sigue girando por sí mismo.

Como el par inverso M_i se opone al par directo M_d , este motor consume más corriente que si sólo actuase un único campo giratorio.

El análisis de los motores monofásicos de inducción se realiza mediante el circuito equivalente de la Fig. 2.

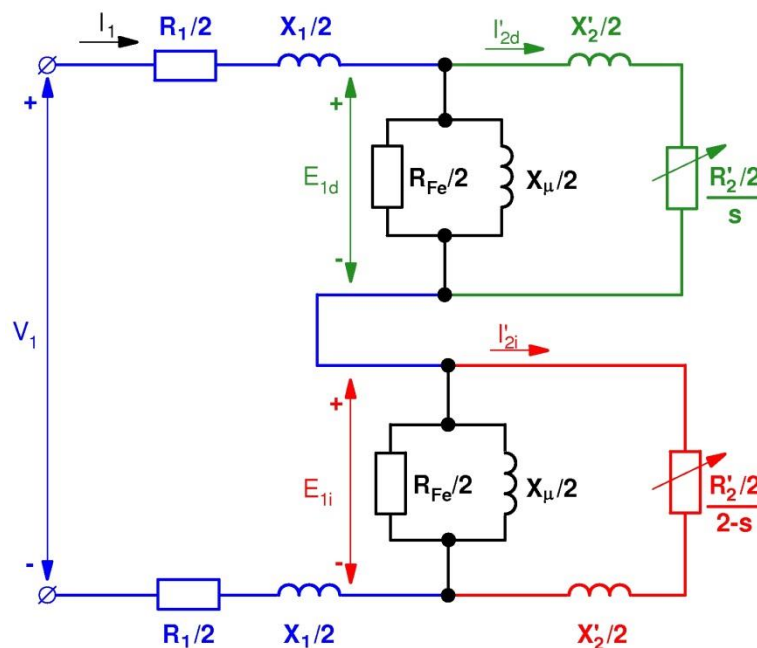


Fig. 2: Circuito equivalente de un motor monofásico de inducción

El principal inconveniente de los motores monofásicos de inducción es que tienen un par de arranque nulo. Existen variantes del motor monofásico que consiguen superar este problema haciendo que el motor se comporte como bifásico. Así se tienen los motores monofásicos con arranque por condensador y de fase partida.

Motores con arranque por condensador

Los motores monofásicos con arranque por condensador poseen en su estator dos devanados desfasados 90° eléctricos en el espacio; uno de ellos se denomina *principal* y cubre los $2/3$ de las ranuras del estator y el otro se denomina *auxiliar* y cubre el resto del estator.

En serie con el devanado auxiliar se conecta un condensador de tal manera que las intensidades que circulan por ambos devanados queden aproximadamente desfasadas 90° en el tiempo y sus módulos sean iguales (Fig. 3).

MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

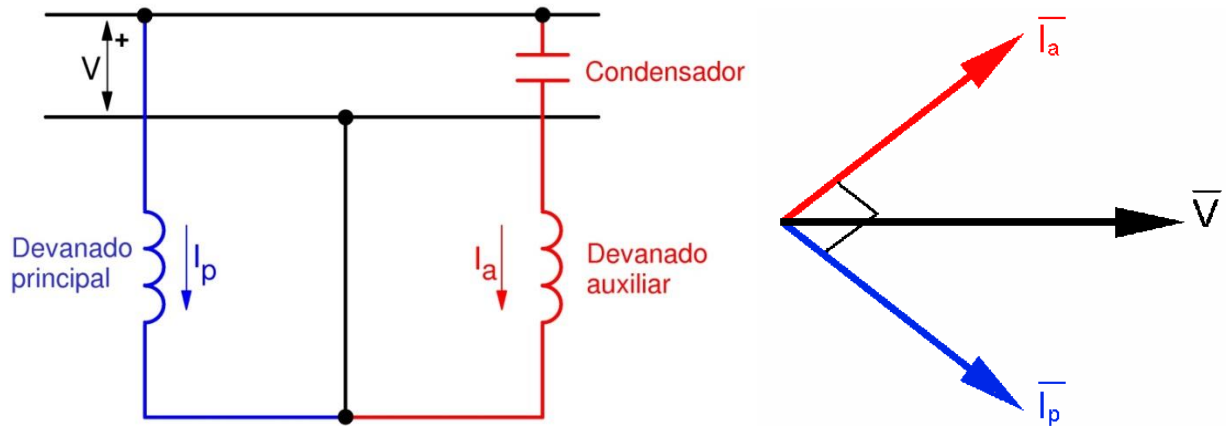


Fig. 3: Motor monofásico de condensador

Al circular unas corrientes de iguales valores eficaces y desfasadas entre sí 90° en el tiempo por unos devanados desfasados 90° eléctricos en el espacio la máquina se comporta como un motor bifásico y se genera un campo magnético giratorio que hace girar al motor.

Una vez arrancado el motor, se desconecta el devanado auxiliar y el motor sigue funcionando como monofásico simple.

También existen motores monofásicos de condensador en los que, tanto el condensador como el devanado auxiliar, permanecen conectados permanentemente. En este caso hay que dimensionar el condensador y el devanado auxiliar para que puedan funcionar conectados a la red no sólo durante el arranque, sino de forma permanente. En estos motores los devanados principal y auxiliar son idénticos y, en consecuencia, cada uno de ellos cubre la mitad de las ranuras del estator. Para mejorar el arranque de estos motores se suele colocar un condensador adicional en paralelo con el condensador de funcionamiento normal. Este condensador de arranque se desconecta una vez que la máquina ha alcanzado cierta velocidad, para lo cual se puede utilizar un interruptor centrífugo.

Motores de fase partida

Los motores de fase partida poseen también dos devanados desfasados 90° eléctricos entre sí. El devanado principal tiene gran reactancia y baja resistencia y el devanado auxiliar tiene gran resistencia y baja reactancia. Así se consigue que las corrientes que circulan por ambos devanados estén desfasadas entre sí un ángulo α (Fig. 4).

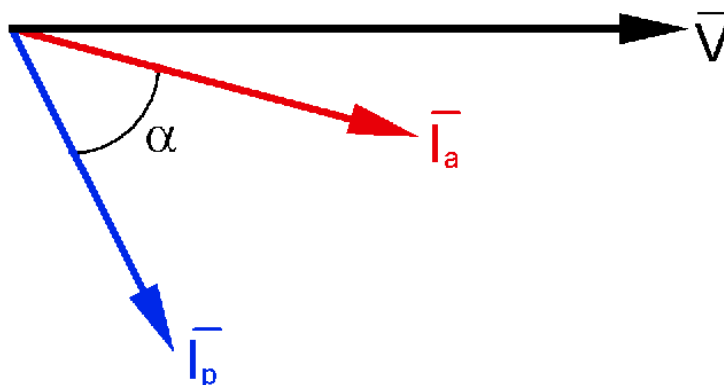
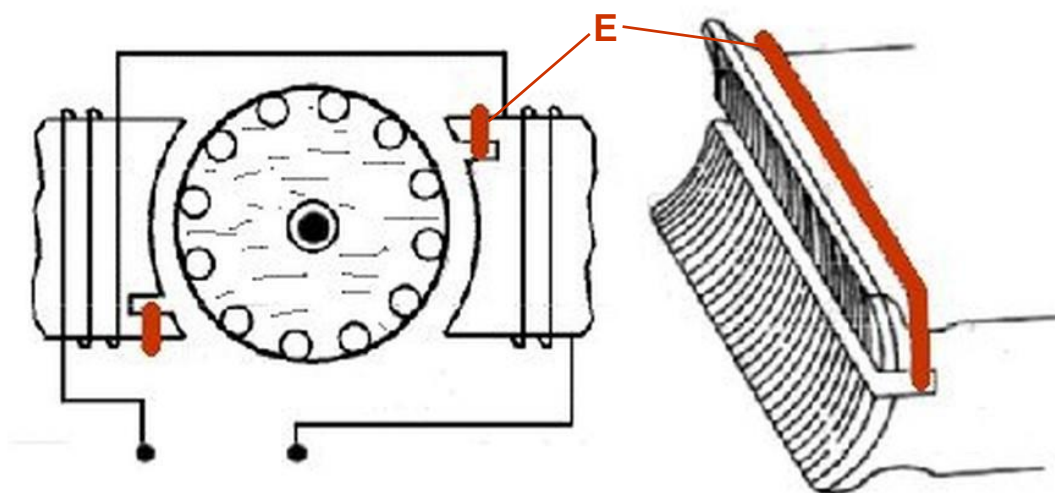


Fig. 4: Diagrama fasorial de un motor de fase partida

MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Las intensidades que circulan por ambos devanados, I_a e I_p , no tienen un desfase de 90° , por lo que no se obtiene un campo giratorio perfecto (de amplitud constante) sino un campo magnético giratorio de amplitud variable. Aun así, este campo logra hacer girar el rotor con lo que se consigue el arranque del motor. Una vez que el motor ha arrancado, un interruptor centrífugo desconecta automáticamente el devanado auxiliar y el motor queda funcionando como monofásico simple.

Motores de espira de sombra



(Fuente: Centro Integrado de Formación Profesional (MSP).
http://www.cifp-mantenimiento.es/e-learning/index.php?id=22&id_sec=6#)

*Fig. 5: Motor de espira de sombra
(E: Espira de sombra)*

Los motores de espira de sombra son motores monofásicos de muy pequeña potencia (de hasta 50 W) que tienen un rotor de jaula de ardilla y un estator de polos salientes (Fig. 5) fabricado a partir de apilar chapas magnéticas. El estator tiene un devanado concentrado que se alimenta desde una red de corriente alterna monofásica y sus polos están abrazados parcialmente por espiras de sombra (Fig. 5).

Las espiras de sombra de dos polos consecutivos están colocadas en posiciones separadas 180° eléctricos (lo que equivale a posiciones diametralmente opuestas en el caso de máquinas de dos polos, como se aprecia en la Fig. 5) y cada una de ellas consiste en una espira en cortocircuito que presenta una impedancia básicamente resistiva.

La parte del flujo total que es abrazada por una espira de sombra induce una f.e.m. sobre ella que está desfasada 90° en el tiempo respecto a dicho flujo. Esta f.e.m. origina en la espira una corriente prácticamente en fase con ella (la espira es una impedancia predominantemente resistiva) y, por tanto, perpendicular al flujo original. Finalmente, esta corriente de la espira da lugar a un nuevo flujo en fase con ella -y, en consecuencia, desfasado 90° con respecto al original- que se superpone al flujo original.

MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Al final, lo que se tiene son dos flujos: uno es el que pasa a través de las espiras de sombra y el otro es el que pasa por el resto de la superficie de los polos. Ambos flujos forman entre sí un ángulo en el espacio y tienen un desfase temporal. Al combinarse, ambos flujos dan lugar a un campo magnético giratorio imperfecto (es un campo *elíptico*; es decir, aunque este campo magnético gira su amplitud no permanece constante), pero suficiente como para que al actuar sobre la jaula de ardilla del rotor genere un par que consigue hacer girar al motor.

Los motores de espira de sombra son baratos pero de bajo rendimiento. Estos motores tienen una curva par-velocidad bastante plana y presentan un elevado deslizamiento asignado. Se han empleado en ventiladores, tocadiscos, proyectores de diapositivas, fotocopiadoras, bombas de agua de lavadoras, etc.

En la Fig. 6 se muestra una fotografía con el despiece de un motor de espira de sombra. Se puede apreciar que en este caso se han colocado dos espiras de sombra en cada polo y que las dos espiras de sombra de un polo abrazan flujos diferentes. Se consigue que así el motor funcione mejor.

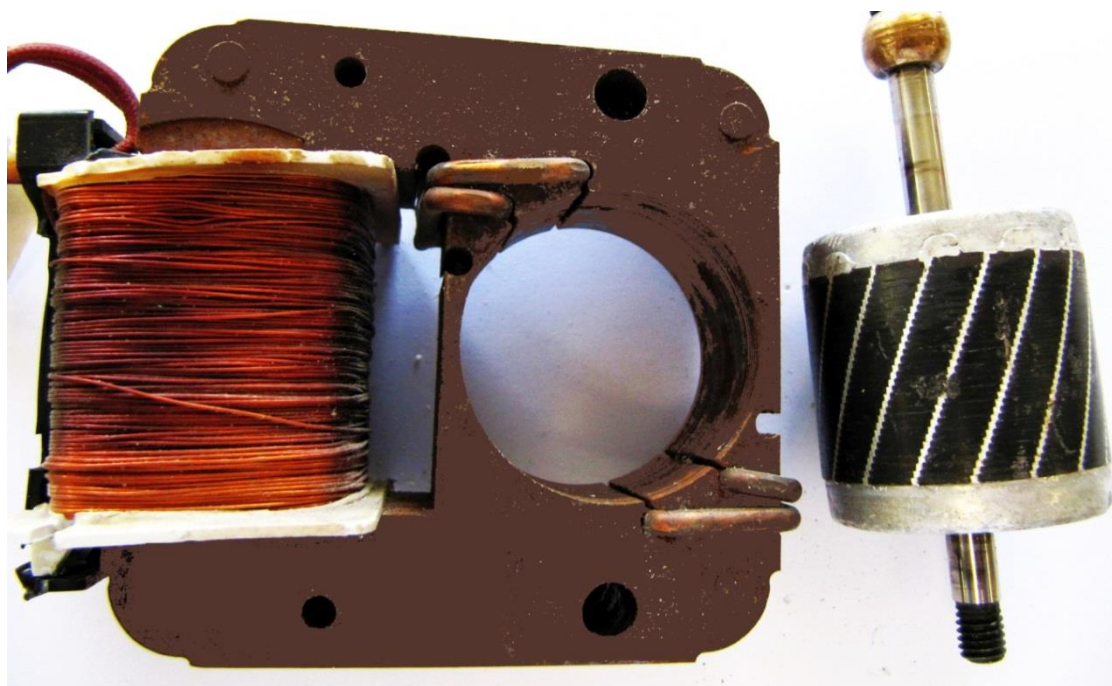


Fig. 6: Despiece de un motor de espira de sombra

CONEXIÓN STEINMETZ

Hay ocasiones en las que se dispone de un motor trifásico y se le quiere utilizar en una instalación doméstica, la cual es monofásica.

Si dos de los terminales de un motor de inducción trifásico con el rotor parado se conectan a una red monofásica, el motor no arranca por sí mismo y consume una corriente elevada que acaba por averiarlo. Esto se debe a que el campo magnético que genera el estator ya no es giratorio, sino pulsante, como en un motor monofásico simple.

MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Una forma de conseguir que un motor trifásico pueda funcionar en una red monofásica consiste en usar un convertidor electrónico. Este dispositivo consta de un rectificador -en este caso un puente rectificador de doble onda monofásico- que alimenta a un inversor trifásico. El inversor transforma electrónicamente la tensión continua proporcionada por el rectificador en una tensión alterna trifásica.

Existe otra forma más sencilla y económica, aunque menos perfecta, de conseguir que un motor trifásico funcione en una red monofásica. Esta forma consiste en hacer funcionar al motor trifásico como si fuera un motor monofásico de condensador mediante la conexión Steinmetz (Fig. 7).

En esta conexión lo primero es conectar el motor en estrella o en triángulo como si la tensión de la red monofásica fuese la tensión de línea de una red trifásica. Así, un motor trifásico de 400/230 V habrá que conectarlo en triángulo si se usa en una red monofásica de 230 V y en estrella si se piensa utilizar en una red monofásica de 400 V.

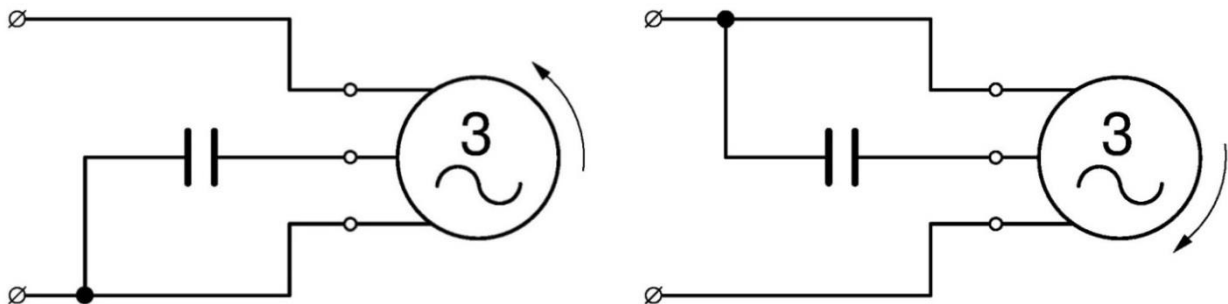


Fig. 7: Conexión Steinmetz para dos sentidos de giro opuestos

A continuación los tres terminales del motor -que, en principio, deberían unirse a los tres conductores de una red trifásica- se conectan así (Fig. 7):

- Dos de estos terminales se conectan directamente a los dos conductores de la red monofásica.
- El tercer terminal del motor se conecta en serie con un condensador y el conjunto se une a uno cualquiera de los conductores de la red monofásica. Dependiendo a cuál de los dos conductores de la red monofásica se conecte este terminal con condensador, la máquina girará en un sentido o en el contrario (ver la Fig. 7).

De esta manera se consigue que entre las corrientes de las tres fases del motor exista un cierto desfase, lo cual origina un campo giratorio. Este campo no es *circular* (giratorio y de amplitud constante) sino *elíptico* (es giratorio, pero su amplitud no es constante). No obstante, este campo magnético consigue que el motor gire. De todos modos, un motor trifásico conectado de esta manera no tiene un reparto idóneo de campo magnético y corrientes y no se le puede exigir una potencia superior a un 70% de la asignada.

El condensador a utilizar debe ser apto para funcionar con corriente alterna y, además, debe estar dimensionado para que aguante holgadamente la tensión de la red. Por esta razón, se recomienda que el condensador sea capaz de soportar una tensión igual o superior a 1,25 veces el valor máximo de la tensión de la red monofásica.

MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Según la literatura técnica la capacidad del condensador necesaria en esta conexión es de unos 60 μF por kW de potencia asignada del motor en redes monofásicas de 230 V y 50 Hz. De esto se deduce que la potencia reactiva Q_C del condensador -cuando la tensión entre sus bornes tiene el mismo valor eficaz V y la misma frecuencia f que la red monofásica- es prácticamente igual a la potencia asignada P_N del motor:

$$Q_C \approx P_N \quad (3)$$

Partiendo de estos datos, la capacidad que se necesita para cualquier red monofásica se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$C = 60 P_N \left(\frac{230}{V} \right)^2 \frac{50}{f} = \frac{1,6 \cdot 10^8}{f V^2} P_N \quad (4)$$

(C en μF ; P_N en kW)

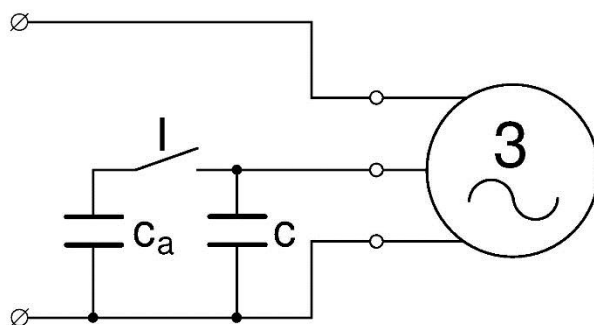
Las magnitudes que aparecen en las expresiones anteriores son las siguientes:

- V Tensión eficaz de la tensión de la red monofásica, la cual es igual a tensión asignada de línea del motor (V).
- f Frecuencia de la tensión de la red monofásica, que es igual a la frecuencia asignada del motor (Hz).
- P_N Potencia asignada del motor (kW).
- Q_C Potencia reactiva del condensador cuando está sometido a la tensión V y a la frecuencia f.
- C Capacidad del condensador (μF).

A partir de la expresión (4) se deducen los siguientes valores de capacidad (en μF) por kW de potencia asignada del motor para las tensiones más habituales en redes monofásicas de 50 Hz:

- * 200 $\mu\text{F}/\text{kW}$ en redes de 127 V.
- * 66 $\mu\text{F}/\text{kW}$ en redes de 220 V.
- * 60 $\mu\text{F}/\text{kW}$ en redes de 230 V.
- * 22 $\mu\text{F}/\text{kW}$ en redes de 380 V.
- * 20 $\mu\text{F}/\text{kW}$ en redes de 400 V.

El par de arranque del motor trifásico se reduce apreciablemente cuando se utiliza la conexión Steinmetz. Para evitarlo y conseguir que el par de arranque del motor apenas varíe del que tiene cuando se conecta a una red trifásica, se puede colocar un condensador adicional en paralelo con el de funcionamiento normal (Fig. 8). Este condensador de arranque tiene una capacidad doble de la del condensador de funcionamiento normal (la cual puede calcularse mediante la fórmula (4)) y se debe desconectar una vez que el motor ha arrancado.



*Fig. 8: Conexión Steinmetz con condensador de arranque.
(C_a : Condensador de arranque)*

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AENOR. 1997. *UNE 60034-2: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2: Métodos para la determinación de las pérdidas y del rendimiento de las máquinas eléctricas rotativas a partir de los ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción)*. Madrid: AENOR.
- [2] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [3] CORTES. 1977. *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo 3: Máquinas de c.a. asíncronas*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- [4] FAURE BENITO. 2000. *Máquinas y accionamientos eléctricos*. Madrid: Colegio oficial de ingenieros navales y oceánicos.
- [5] FITZGERALD, KINGSLEY Y UMANS. 2004. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [6] FRAILE MORA, J. 2015. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones, S.L.
- [7] GURRUTXAGA, J. A. 1985. *El fenómeno electromagnético. Tomo IV. Las máquinas eléctricas II*. Santander: Dpto. de publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander.
- [8] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 2*. Moscú: Editorial Mir.
- [9] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [10] LANGSDORF. 1977. *Teoría de las máquinas de c.a.* Méjico: McGraw-Hill.
- [11] SANZ FEITO. 2002. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Pearson Educación.
- [12] SERRANO IRIBARNEGARAY. 1989. *Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.

PROBLEMA PROPUESTO

Un motor monofásico de rotor de jaula de ardilla tiene estas características:

$2p = 4$ polos	$f_1 = 50$ Hz	$V_{1N} = 230$ V
$R_1 = 4 \Omega$	$R'_2 = 3,6 \Omega$	$R_{Fe} = \infty$
$X_1 = 5 \Omega$	$X'_2 = 2,6 \Omega$	$X_\mu = 50 \Omega$

Las pérdidas mecánicas de este motor son despreciables.

Calcular el par y la potencia en el eje de este motor cuando su velocidad es 1425 r.p.m.

Solución: $M = 3,87$ Nm, $P_u = 578$ W