

## PARES ADICIONALES DEBIDOS A LOS ARMÓNICOS EN EL TIEMPO

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Supongamos que un motor asíncrono trifásico tiene unos devanados de estator y rotor que generan campos magnéticos en el entrehierro distribuidos de manera perfectamente sinusoidal. Esto significa que en esta máquina no existen armónicos en el espacio del campo magnético.

Si este motor se alimenta con tensiones no perfectamente sinusoidales, por las fases de la máquina circularán corrientes con armónicos en el tiempo. Al estudiar el Teorema de Ferraris, se comprobó que:

- Los armónicos temporales de corriente de orden  $h' = 3k$  ( $k =$  número entero) generan un campo magnético total nulo y no dan par.

De hecho, como estos armónicos forman un sistema homopolar y en las máquinas de inducción no se utiliza la conexión estrella con el neutro unido a la red (se utilizan las conexiones triángulo o estrella con el neutro aislado), normalmente ni siquiera existirán estos armónicos de corriente.

- Los demás armónicos temporales de corriente generan campos magnéticos giratorios, todos ellos de igual número de polos ( $2p$ ) pero de velocidades distintas  $\Omega_{h'}$  que verifican que

$$\begin{aligned}\Omega_{h'} &= \pm h' \cdot \Omega_1 \\ (n_{h'} &= \pm h' \cdot n_1)\end{aligned}\quad (1)$$

donde  $\Omega_1$  (ó  $n_1$ ) es la velocidad de giro del armónico fundamental (velocidad de sincronismo).

Los armónicos de orden  $h' = 6k + 1$  giran en el mismo sentido que el armónico fundamental (o primer armónico ( $h' = 1$ )) y para ellos se pondrá el signo + en la relación (1).

Los armónicos de orden  $h' = 6k - 1$  giran en sentido contrario al armónico fundamental y para ellos se pondrá el signo - en la relación (1).

Los sentidos de giro de estos campos magnéticos son lógicos, pues los armónicos de corriente de orden  $h' = 6k + 1$  forman un sistema trifásico directo y los armónicos de corriente de orden  $h' = 6k - 1$  constituyen un sistema trifásico inverso.

El par total de la máquina será la suma de los originados por cada campo giratorio actuando individualmente más los pares debidos a la interacción de cada uno de estos campos magnéticos con los demás.

Dado que todos estos campos magnéticos son de igual número de polos ( $2p$ ), no se puede considerar a priori que las interacciones mutuas entre ellos son nulas y no dan pares.

Lo que sucede es que las velocidades de giro de estos campos magnéticos son diferentes y, en consecuencia, el ángulo que forman entre sí en el espacio va ir variando en el tiempo entre 0 y  $2\pi$  radianes eléctricos. Es decir, en unos instantes la interacción entre dos de estos campos da lugar a un par de sentido positivo y en otros origina un par negativo. El par medio resultante es, pues, nulo.

Por lo tanto, las interacciones entre estos campos giratorios provocan unas pequeñas oscilaciones del par (que son absorbidas por la inercia del rotor) y dan lugar a un par medio nulo. Así pues, el par medio total de la máquina  $M$  es la suma de los pares  $M_{h'}$  producidos actuando cada armónico por separado; esto es, se puede aplicar el principio de superposición a los pares cuando se trata de calcular el par medio:

$$M = \sum_{h'=1}^{\infty} M_{h'} \quad (2)$$

Cada uno de estos campos magnéticos actúa individualmente de igual manera que el fundamental, dando lugar a una curva de par similar a la del fundamental, pero con una velocidad de sincronismo diferente dada por la relación (1). En la figura 1 se muestra las curvas de par para los armónicos fundamental, 5° y 7°. En ella se muestra la velocidad de sincronismo de cada campo y los pares debidos a cada armónico cuando la máquina gira a la velocidad nominal. Las escalas horizontal (de velocidad) y vertical (de par) se han tomado diferentes para cada armónico (las tres curvas no están a la misma escala).

Si la máquina está girando a una velocidad  $\Omega$ , el deslizamiento para el armónico  $h'$  vale

$$s_{h'} = \frac{\Omega_{h'} - \Omega}{\Omega_{h'}} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_{h'}} = 1 - \frac{\Omega}{\pm h' \cdot \Omega_1} \quad (3)$$

Para el armónico fundamental el deslizamiento vale

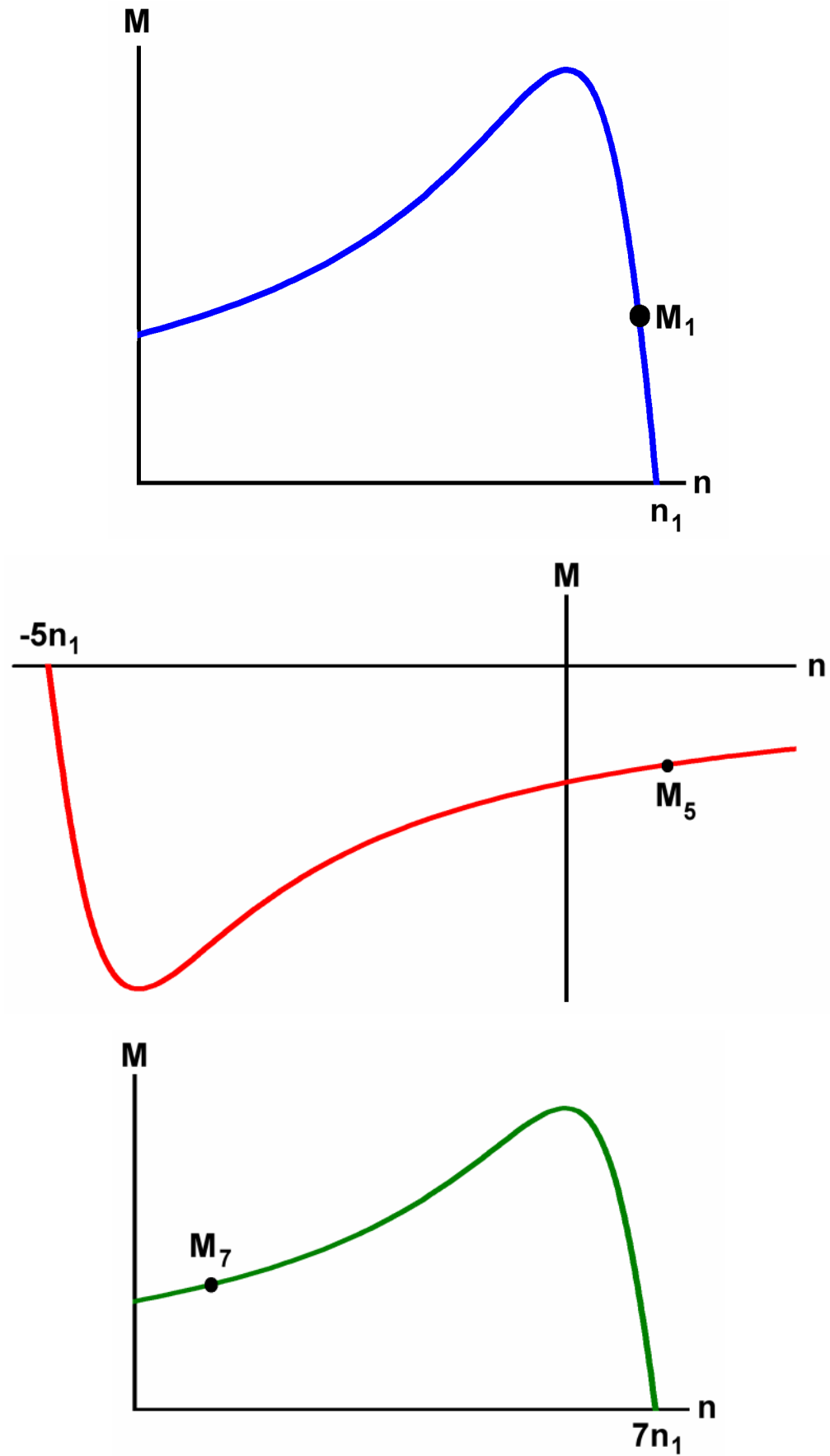
$$s = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_1} \quad (4)$$

Luego:

$$\frac{1-s}{1-s_{h'}} = \frac{\frac{\Omega}{\Omega_1}}{\frac{\Omega}{\pm h' \cdot \Omega_1}} = \pm h'$$

$$s_{h'} = 1 - \left( \frac{1-s}{\pm h'} \right) \quad (5)$$

Si la máquina actúa como motor, el deslizamiento  $s$  para el armónico fundamental toma valores comprendidos entre 0 y 1. En consecuencia, el deslizamiento  $s_{h'}$  para otro armónico distinto del fundamental toma valores próximos a la unidad ( $s_{h'} \approx 1$ ). Esto se cumple más exactamente a medida que aumenta el orden  $h'$  del armónico.



*Fig. 1: Curvas de par para varios armónicos del campo magnético actuando aisladamente*

En consecuencia, el par producido por cada armónico es de un valor próximo al que produce en el arranque (donde el deslizamiento vale 1).

De la relación (5) y de la figura 1 se deduce que:

- Los armónicos de orden  $h' = 6k - 1$  trabajan con deslizamientos ligeramente superiores a 1. Luego, ejercen un efecto de frenado a contracorriente y dan pares negativos (de signo contrario al par producido por el armónico fundamental).
- Los armónicos de orden  $h' = 6k + 1$  trabajan con deslizamientos ligeramente inferiores a 1. Es decir, funcionan en la zona de motor. Por lo tanto dan pares positivos.