



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA



F.E.M.S INDUCIDAS EN LOS **DEVANADOS DE LAS** **MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

© 2009, Miguel Ángel Rodríguez Pozueta
Universidad de Cantabria (España)
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Está permitida la reproducción total o parcial de este documento con la condición inexcusable de citar su autor y su carácter gratuito.

Este documento puede descargarse gratuitamente desde esta Web:

<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

F.E.M.S INDUCIDAS EN LOS DEVANADOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

F.E.M. DE ROTACIÓN

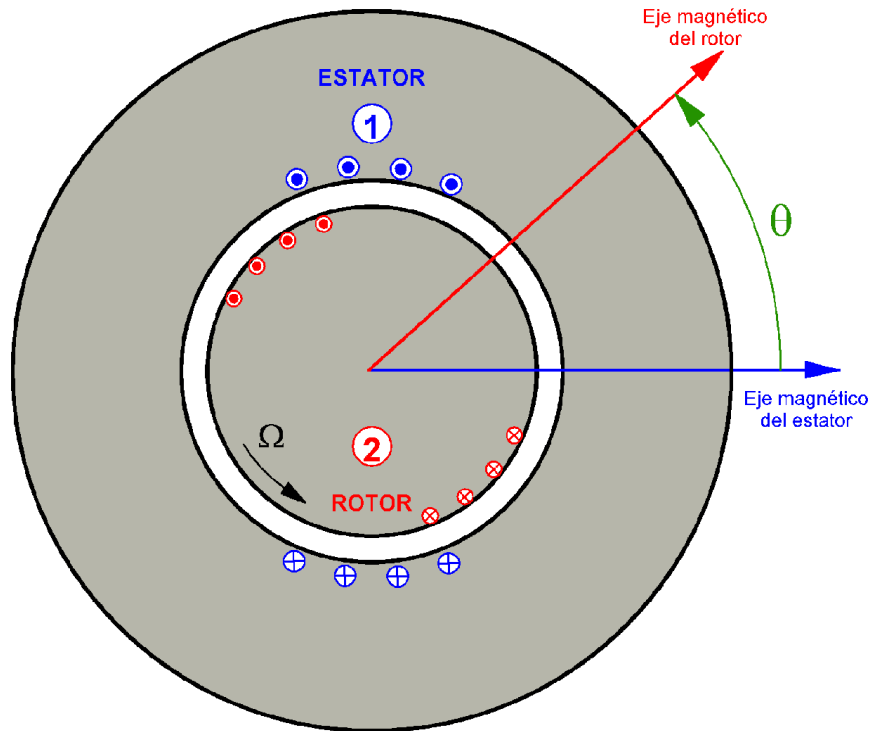


Fig. 1: Máquina eléctrica elemental con dos devanados y dos polos

En la Fig. 1 se muestra una máquina eléctrica bipolar elemental con dos devanados monofásicos, uno en el estator y otro en el rotor, y entrehierro uniforme. El ángulo eléctrico entre los ejes de ambos devanados es θ .

Supóngase que el devanado del rotor se deja en circuito abierto (esto es, sin conectar a ningún generador ni a ninguna carga) mientras que por el devanado del estator circula una corriente continua. Esto hace que el campo magnético esté generado únicamente por el estator (que actúa, entonces, como inductor). Dado que el eje magnético del estator coincide con el origen de coordenadas, la f.m.m. en el entrehierro tendrá su valor máximo en el origen de coordenadas. Si sólo se toma su armónico fundamental, esta f.m.m. es así:

$$\mathcal{F}(\alpha) = \mathcal{F}_M \cos \alpha$$

Al ser una máquina de entrehierro constante, la distribución de la inducción B en el entrehierro tiene la misma forma que la de la f.m.m. \mathcal{F} :

$$B(\alpha) = B_M \cos \alpha$$

Este campo magnético no es giratorio (es debido sólo a un devanado monofásico inmóvil) ni variable en el tiempo (la corriente del estator es continua) y da lugar a unos

enlaces de flujo en el devanado del rotor ψ_2 que dependerán del ángulo θ . Serán máximos (en valor absoluto) para $\theta = 0^\circ$ o 180° y nulos para $\theta = \pm 90^\circ$ eléctricos. Es decir, cumple la siguiente relación:

$$\psi_2 = \psi_{2M} \cos \theta \quad (1)$$

El valor máximo de estos enlaces de flujo se calcula así:

$$\psi_{2M} = N_2 \xi_{b2} \Phi_M \quad (2)$$

donde:

N_2 es el número de espiras efectivas en serie del rotor

ξ_{b2} es el factor de bobinado del rotor

Φ_M es el flujo por polo

Si el rotor gira con una velocidad de Ω rad/s, lo que equivale a n r.p.m. y a ω rad eléctricos/s, se tiene que:

$$\theta = \omega \cdot t \quad (3)$$

y, en consecuencia:

$$\psi_2 = \psi_{2M} \cos (\omega \cdot t) \quad (4)$$

Lo que significa que, aunque el campo magnético es invariable e inmóvil, el movimiento del rotor hace que su devanado esté sometido a un campo variable en el tiempo y actuará como el inducido de la máquina. Así, un conductor del rotor en un momento dado está frente a un polo norte del estator, un poco más tarde el giro del rotor hace que este conductor se encuentre frente a un polo sur del estator, y así sucesivamente, lo que provoca que este conductor “vea” un campo magnético variable en el tiempo. Por lo tanto, en bornes del bobinado del rotor aparece una f.e.m. inducida de rotación que se obtiene a partir de la Ley de Faraday:

$$e_2 = - \frac{d \psi_2}{d t} = \omega \cdot \psi_{2M} \cdot \text{sen} (\omega \cdot t) \quad (5)$$

Es decir, es una f.e.m. de la forma

$$e_2 = \sqrt{2} E_2 \cos \left((\omega_2 \cdot t) - \frac{\pi}{2} \right) \quad (6)$$

Comparando las expresiones (5) y (6) y teniendo en cuenta las relaciones (2) y (4), se deduce que esta f.e.m. tiene las siguientes propiedades:

* Está retrasada en el tiempo 90° o $\pi/2$ radianes con respecto a los enlaces de flujo.

* Su pulsación ω_2 es igual a la velocidad de giro del rotor en rad elect/s. Luego, la frecuencia f_2 de esta onda vale:

$$\omega_2 = 2 \pi f_2 = \omega$$

$$f_2 = \frac{\omega}{2 \pi} = \frac{p \Omega}{2 \pi} = \frac{p n}{60}$$

$f_2 = \frac{n p}{60}$

(7)

* El valor eficaz de esta f.e.m. vale:

$$E_2 = \frac{\omega \cdot \Psi_{2M}}{\sqrt{2}} = \frac{(2 \pi f_2) \cdot (N_2 \xi_{b2} \Phi_M)}{\sqrt{2}} = \left(\frac{2 \pi}{\sqrt{2}} \right) N_2 f_2 \xi_{b2} \Phi_M$$

$E_2 = 4,44 N_2 f_2 \xi_{b2} \Phi_M$

(8)

Este mismo resultado se habría obtenido si el devanado hubiera estado inmóvil y estuviera bajo la acción de un campo que girase con una velocidad de ω rad eléctricos/s.

Lo mismo sucedería también si ambos, el rotor y el campo giratorio, girasen con velocidades diferentes. En este caso, la velocidad a considerar en la relación (7) es la velocidad relativa del devanado con respecto al campo magnético.

F.E.M. DE TRANSFORMACIÓN

Supóngase ahora que en la máquina de la Fig. 1 el rotor permanece inmóvil y está en circuito abierto. El estator está ahora recorrido por una corriente alterna de frecuencia f_1 y de pulsación ω_1 :

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \tag{9}$$

Por lo tanto, ahora se obtiene una f.m.m. inmóvil (es debida sólo al devanado del estator que está inmóvil) y variable en el tiempo (es originada por una corriente alterna). Esta f.m.m. es, pues, de esta manera:

$$\mathcal{F}(\alpha, t) = \mathcal{F}_M \cos \alpha \cos (\omega_1 t)$$

Donde ahora \mathcal{F}_M es a la vez el máximo en el espacio y en el tiempo de la f.m.m. en el entrehierro. La inducción magnética tiene en el entrehierro una distribución similar a la de la f.m.m.:

$$B(\alpha, t) = B_M \cos \alpha \cos (\omega_1 t)$$

Consecuentemente, los enlaces de flujo del rotor ahora siguen esta ley:

$$\psi_2 = \psi_{2M} \cos \theta \cos (\omega_1 \cdot t) \quad (10)$$

Donde el ángulo θ es ahora constante (rotor inmóvil) y el valor máximo en el espacio y en el tiempo ψ_{2M} de estos enlaces de flujo se siguen calculando mediante la relación (2) (si en dicha expresión se toma Φ_M como el flujo por polo cuando el campo magnético del entrehierro es máximo (cuando $\cos \omega_1 t = 1$)).

Estos enlaces de flujo son variables en el tiempo, no porque el rotor esté girando, como sucedía en el apartado anterior (ahora se supone que el rotor está parado), sino porque el campo magnético en el entrehierro ya es de por sí variable en el tiempo (está originado por una corriente alterna). Aplicando la Ley de Faraday se obtiene la f.e.m. inducida de transformación que aparece en bornes del devanado del rotor:

$$e_2 = - \frac{d \psi_2}{d t} = \omega_1 \cdot \psi_{2M} \cos \theta \cdot \text{sen} (\omega_1 \cdot t) \quad (11)$$

Esta f.e.m. tiene las siguientes propiedades:

- * También está desfasada en el tiempo 90° o $\pi/2$ radianes con respecto a los enlaces de flujo.
- * Tiene la misma frecuencia f_1 que la corriente del devanado inductor (el estator).
- * Su valor eficaz E_2 vale:

$$E_2 = \frac{\omega_1 \cdot \psi_{2M}}{\sqrt{2}} \cos \theta = \frac{(2 \pi f_1) \cdot (N_2 \xi_{b2} \Phi_M)}{\sqrt{2}} \cos \theta$$

$E_2 = 4,44 N_2 f_1 \xi_{b2} \Phi_M \cos \theta$

(12)

- * Este valor eficaz será máximo cuando el rotor esté alineado con el estator ($\theta = 0^\circ$) y la f.e.m. será nula si $\theta = \pm 90^\circ$ eléctricos.

CASO GENERAL

Es posible que se induzcan simultáneamente f.e.m.s de rotación y de transformación sobre el devanado del rotor. Esto sucederá cuando exista un movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético en el entrehierro y éste, a su vez, sea variable en el tiempo. La f.e.m. instantánea total será en este caso la suma de las f.e.m.s instantáneas de rotación y de transformación.

Aunque aquí se ha tratado del devanado del rotor, esto se puede generalizar a cualquier devanado en el que exista un movimiento relativo del devanado con respecto al campo magnético (lo cual puede ser debido a que el devanado esté quieto (por ejemplo, en

el estator) y lo que se mueva sea el campo magnético) y/o esté sometido a la acción de un campo magnético que varíe con el tiempo.

Los resultados obtenidos sobre la máquina elemental bipolar de la Fig. 1 se pueden generalizar a máquinas de cualquier número de polos si se utilizan ángulos eléctricos, que es lo que se ha hecho al deducir las expresiones anteriores.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CORTES CHERTA. 1994. *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. 5 tomos*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- [2] FRAILE MORA, J. 2008. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [3] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo I*. Moscú: Editorial Mir.
- [4] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [5] SANZ FEITO. 2002. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Pearson Educación.
- [6] SERRANO IRIBARNEGARAY. 1989. *Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.