



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 26 – ENERO DE 2010

## “MATERIAL PARA DIVERSIFICACIÓN: LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS PARA EL ALUMNADO DE ALTO NIVEL”

AUTORIA <b>ANDRÉS ANTONIO GIL MARTÍN</b>
TEMÁTICA <b>TECNOLOGÍA</b>
ETAPA <b>BACHILLERATO</b>

### Resumen

En este artículo se analizan las distintas clases de máquinas eléctricas en función de las fems de sus devanados, estos conceptos están recogidos dentro de los objetivos planteados en Bachillerato, pero de forma mucho más básica de la aquí planteada. Dentro del alumnado aparecen casos donde es necesario programas de diversificación, entre los que se incluyen los de alto nivel, este artículo está enfocado como material complementario para este alumnado, de forma tal que partiendo de los conocimientos de grupo adquiridos, sea capaz de profundizar en este campo, a través de un aprendizaje significativo.

### Palabras clave

Diversificación, aprendizaje por descubrimiento, FEMs, devanado, síncronos, asíncronos...

### 1º) INTRODUCCIÓN: JUSTIFICACION

A partir de los conocimientos previos, impartidos durante el bachillerato, el texto pretende englobarse dentro de las técnicas de aprendizaje significativo, que recordemos huye del aprendizaje memorístico y repetitivo. Dado el alto nivel cognitivo del alumno, éste debería ser capaz de seguir los planteamientos matemáticos partiendo de leyes básicas ya conocidas como las de Faraday y de Lenz, entre otras, las cuales sirvieron de base para un primer análisis de las distintas formas y tipos de máquinas eléctricas.

Éste podrá por sí mismo constituir la base de otro método de aprendizaje por descubrimiento, en el que aparte de lo relacionado directamente con el tema en cuestión (FEMs de las máquinas eléctricas), le enseñaría a sí mismo la relación directa entre las distintas materias y conceptos para su aplicación conjunta a diferentes contextos y a la realidades físicas, que constituyen y en este caso supera con creces las competencias básicas y objetivos del bachillerato.

Las máquinas eléctricas se pueden clasificar no solo por lo que hacen:

- 1.- Convierten la energía mecánica en electricidad. Generadores
- 2.- Convierten la energía eléctrica en mecánica. Motores.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 26 – ENERO DE 2010

Sino que a partir del estudio de sus devanamos podemos determinar su estructura y tipo de máquina, así tenemos:

## 2º) F.E.M INDUCIDA EN UN DEVANADO DE UNA MÁQUINA ELECTRICA.

### GERALIDADES

En los devanados de las máquinas eléctricas, se inducen f.e.m.s. debidas a las variaciones del flujo enlazado por los arrollamientos. Estos cambios son el resultado de:

- La variación con el tiempo de la magnitud del flujo, lo que da lugar a la llamada f.e.m. de pulsación o de acción transformadora:  $e_p$
- Del movimiento del circuito inducido, respecto del flujo, resultando una f.e.m. de rotación, velocidad o movimiento:  $e_r$
- De la combinación de los dos casos anteriores, apareciendo las f.e.m.s.  $e_p$  y  $e_r$ .

En el cálculo de la f.e.m. se realiza en cada caso, aplicando la ley de Faraday, y para analizar este problema de generación, se va a considerar el prototipo de máquina eléctrica constituido por un devanado inductor, y un arrollamiento inducido, que consiste en un bobinado de N espiras concentradas de paso diametral. Ambos devanados están situados en el estator y en el rotor respectivamente, girando éste a una velocidad angular (rad/s). Se van a considerar además las siguientes hipótesis:

- El flujo inductor varía senoidalmente con el tiempo, para ello se introduce en el estator una corriente alterna con una frecuencia y una pulsación.
- El flujo inductor se distribuye senoidalmente por la periferia del entrehierro.
- El eje del devanado del rotor tiene una posición respecto del eje del flujo del estator.
- El bobinado del inducido está en circuito abierto, para considerar únicamente el efecto de generación de f.e.m.

De acuerdo con las hipótesis anteriores, se obtendrá una expresión para el flujo distribuido en el entrehierro:

$$\Phi_1 = \Phi_{\max} \cos \omega t \cos p\alpha$$

En consecuencia la f.e.m. inducida será:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = \frac{N_2 \Phi_{\max}}{2} [(\omega_1 + p\omega_r) \text{sen}(\omega_1 + p\omega_r)t + (\omega_1 - p\omega_r) \text{sen}(\omega_1 - p\omega_r)t]$$
 la ecuación anterior

indica, que la f.e.m. inducida en el rotor, contiene pulsaciones que responden a la expresión general:

$$\omega_2 = \omega_1 \pm p\omega_r$$

y teniendo en cuenta que:

$$\omega = 2\pi f \quad \text{y} \quad \omega_r = 2\pi \frac{n}{60}$$

la expresión anterior se transforma en:

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$$



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 26 – ENERO DE 2010

ecuación muy importante que relaciona las frecuencias de los circuitos inductor e inducido con la velocidad del rotor y el número de polos.

La ecuación general de la f.e.m. inducida permite analizar los dos casos siguientes:

#### A) INDUCIDO FIJO. FLUJO VARIABLE.

En este caso la velocidad del rotor es nula, ya que el devanado del rotor es estacionario, por lo tanto la f.e.m. resultante será:

$$e_2 = N_2 \omega_1 \Phi_{\max} \sin \omega_1 t \cos p\alpha$$

pero en el caso real, ambos devanados estarán arrollados sobre el mismo núcleo magnético sin necesidad de entrehierros. La f.e.m. inducida tendrá una expresión instantánea definida por:

$$e_2 = N_2 \omega_1 \Phi_{\max} \sin \omega_1 t$$

que corresponde a la expresión anterior pero cuando  $p\alpha = 0$ . El valor eficaz de la f.e.m. será:

$$E_2 = \frac{N_2 \omega_1 \Phi_{\max}}{\sqrt{2}}$$

teniendo en cuenta que  $\omega_1 = 2\pi f_1$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_2 f_1 \Phi_{\max} = 4,44 N_2 f_1 \Phi_{\max}$$

expresión importante y que se empleará en el estudio de los transformadores.

De acuerdo con  $\omega_2 = \omega_1 \pm p\omega_r$  las frecuencias de las corrientes del inducido coinciden con las del inductor.

#### B) INDUCIDO MÓVIL. FLUJO CONSTANTE.

En este caso la pulsación del estator es cero, la f.e.m. resultante, debida al movimiento del inducido será:

$$e_2 = N_2 p \omega_r \Phi_{\max} \sin p\alpha$$

y teniendo en cuenta que  $\alpha = \omega_r t$  es:

$$e_2 = N_2 p \omega_r \Phi_{\max} \sin p \omega_r t$$

cuyo valor eficaz:

$$E_2 = \frac{N_2 p \omega_r \Phi_{\max}}{\sqrt{2}}$$

y la pulsación vale:

$$\omega_2 = p \omega_r \Rightarrow f_2 = \frac{np}{60}$$

Las máquinas que responden a estas consideraciones se denominan síncronas, y deben su nombre a que según la frecuencia del inducido es proporcional a la velocidad del rotor.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 26 – ENERO DE 2010

La expresión de la f.e.m. para las máquinas síncronas, puede tomar otra forma si se tiene en cuenta que  $\omega_r = 2\pi n / 60$ , resultando:

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \frac{pn}{60} N_2 \Phi_{\max} = 4,44 \frac{pn}{60} N_2 \Phi_{\max} = 4,44 f_2 N_2 \Phi_{\max}$$

en realidad las expresiones anteriores vienen afectadas por unos coeficientes que tienen en cuenta la forma real del flujo y la distribución del devanado como indicaremos a continuación.

### FACTORES QUE AFECTAN A LA F.E.M. INDUCIDA EN UN DEVANADO

Anteriormente se ha visto la expresión general de la f.e.m. que aparece en un devanado; el análisis ha partido de unas hipótesis que facilitaban el cálculo, pero en realidad no son correctas. Las máquinas eléctricas rotativas reales muestran las siguientes diferencias:

- El flujo inductor no se reparte siempre, de una forma senoidal por el entrehierro.
- El devanado no se encuentra concentrado, sino que está distribuido en ranuras, a lo largo de la periferia de la máquina.
- Los arrollamientos no son siempre de paso diametral sino que presentan acortamientos de paso, con objeto de mejorar la onda de f.e.m. inducida.

Cada uno de estos inconvenientes que aparecen en las máquinas reales introduce un factor, por el cual la f.e.m. inducida, en la práctica, es menor que la calculada anteriormente. De acuerdo con las diferencias apuntadas aparecen los factores de reducción correspondientes, denominados: factor de forma, factor de distribución y factor de paso o acortamiento:

#### 1) Factor de forma

Este factor aparece debido a que no tiene una distribución senoidal en el entrehierro. En el supuesto de que flujo inductor sea constante y de valor máximo aparecerá una f.e.m. cuyo valor medio, vendrá expresado por:

$$E_m = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 4 N_2 f_2 \Phi_{\max}$$

Para calcular el valor eficaz de la f.e.m. deberá multiplicarse por un coeficiente que sí tiene en cuenta la forma de esta onda

$$E = 4 K_f N_2 f_2 \Phi_{\max}$$

en el caso de que la onda de flujo se reparta senoidalmente por el entrehierro, se cumplirá que  $K_f = 1,11$ . En la práctica se consigue que la distribución sea senoidal aumentando la curvatura de los polos inductores frente a la superficie del inducido.

#### 2) Factor de distribución

En partes anteriores se ha calculado la f.e.m. producida por un devanado concentrado y de paso diametral. En la práctica el arrollamiento está distribuido en ranuras a lo largo de toda la periferia de tal forma que las f.e.m.s. del bobinado van desfasadas y su suma no es aritmética sino geométrica.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 26 – ENERO DE 2010

Si denominamos  $q$  al número de ranuras por polo y fase de la máquina,  $m$  al número de fases y  $2p$  al número de polos, el número de ranuras de la máquina designado por  $K$  será:

$$K = q m 2p$$

El ángulo geométrico entre dos ranuras consecutivas será:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{K}$$

que corresponde a un ángulo eléctrico  $p\gamma$ .

La f.e.m. resultante debida a todo el devanado está representada por su magnitud:

$$E_f = 2R \operatorname{sen} \frac{qp\gamma}{2}$$

Si se llega a considerar que el devanado está concentrado, la f.e.m. teórica hubiera sido:

$$E_t = 2R q \operatorname{sen} \frac{p\gamma}{2}$$

El coeficiente o factor de distribución se define como el cociente de la f.e.m. geométrica  $E_f$  y la teórica  $E_t$  y se designa con el símbolo  $K_d$ , resultando:

$$K_d = \frac{E_f}{E_t} = \frac{\operatorname{sen} \frac{qp\gamma}{2}}{q \operatorname{sen} \frac{p\gamma}{2}}$$

En consecuencia y de acuerdo con la formula anterior, la f.e.m. producida por un devanado distribuido se podrá calcular como si estuviera concentrado y el resultado habrá que multiplicarlo por  $K_d$  para obtener la f.e.m. real que tiene en cuenta la diferencia de fase entre las f.e.m.s. parciales de cada bobina.

### 3) Factor de paso o acortamiento

Los devanados reales, tienen un paso acortado en vez de un paso diametral, ya que de esta forma se eliminan armónicos. Para una bobina de paso diametral le corresponde una anchura de  $180^\circ$  eléctricos, lo cual quiere decir que si una rama está situada frente al polo norte, la otra parte de la bobina está situada frente al polo sur.

La f.e.m. real de la bobina será:

$$E_{\text{bob}} = 2E_r \cos \frac{p\alpha}{2}$$

Si las f.e.m.s. llegan a sumarse aritméticamente, que es lo que sucede en las bobinas de paso diametral, se obtendrá una f.e.m. teórica dada por:

$$E_t = 2E_r$$

El coeficiente de acortamiento  $K_a$  define el cociente:

$$K_a = \frac{E_{\text{bob}}}{E_t} = \cos \frac{p\alpha}{2}$$

En consecuencia y teniendo en cuenta todos los coeficientes de devanado; distribución y paso y el de forma, la f.e.m. de un devanado en su forma más general posible, será:



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 26 – ENERO DE 2010

$$E = 4 K_f K_d K_a N_2 f_2 \Phi_{\max}$$

En el caso particular de distribución senoidal de flujo en el entrehierro,  $K_f = 1,11$  resultando:

$$E = 4,44 K_d K_a N_2 f_2 \Phi_{\max}$$

### 3º) CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

En la expresión  $f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$  se han relacionado las frecuencias del inductor e inducido de una máquina eléctrica por medio del número de polos y las r.p.m. del rotor.

Los diferentes tipos de máquinas, se pueden clasificar atendiendo a una serie de criterios selectivos y ordenados que tienen en cuenta la existencia de órganos móviles, el tipo de corriente aplicada al inductor y la forma de las conexiones externas; de acuerdo con el siguiente proceso:

PRIMER CRITERIO: Movimiento del inductor o inducido.

a) Si no existen órganos móviles;  $n = 0$ , lo que indica de acuerdo con la fórmula anterior que:

$$f_2 = f_1$$

es decir coinciden las frecuencias del inductor e inducido, resultando las llamadas máquinas estáticas.

b) En el caso de que  $n \neq 0$ , se sigue conservando la expresión general:

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$$

dando origen a las máquinas rotativas.

SEGUNDO CRITERIO: Características del flujo inductor.

a) Si el flujo inductor es constante, es decir independiente del tiempo, indica que la frecuencia de la corriente que alimenta este devanado es  $f_1 = 0$ . En el caso de las máquinas estáticas, se cumplirá:

$$f_2 = f_1 = 0$$

no existiendo ninguna máquina que cumpla esta condición, ya que al no aparecer variaciones de flujo en el inducido no se tiene conversión de energía.

Para las máquinas dotadas de movimiento, la condición  $f_1 = 0$ , da lugar a la expresión:

$$\omega_2 = \pm p \omega_r \Rightarrow f_2 = \pm \frac{np}{60}$$

es decir la frecuencia del inducido es función directa de la velocidad del rotor.

b) Si el flujo inductor es variable, es  $f_1 \neq 0$ , lo cual indica, en el caso de las máquinas estáticas:

$$f_2 = f_1 \neq 0$$

y para las máquinas rotativas se sigue cumpliendo la expresión general:

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$$



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 26 – ENERO DE 2010

TERCER CRITERIO: Dispositivo de conexión al circuito exterior.

- a) Si la máquina tiene un inducido cuya unión con el circuito exterior, se realiza por medio de conexiones fijas (caso en que el inducido está situado en el estator) o por anillos (inducido en el rotor), la frecuencia en el circuito exterior definida por  $f_L$  es igual que la frecuencia del inducido  $f_2$ , es decir:

$$f_2 = f_L$$

en el caso de las máquinas estáticas se obtiene el transformador y el regulador de inducción monofásico. En el caso de máquinas móviles con  $f_1 = 0$ , se cumplirá:

$$f_L = f_2 = \pm \frac{np}{60}$$

que dan origen a las máquinas síncronas constituidas por el generador síncrono o alternador y el motor síncrono.

En el caso de las máquinas móviles con  $f_1 \neq 0$ , se cumplirá:

$$f_L = f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$$

que dan lugar a las máquinas asíncronas o de inducción, constituidas por el generador asíncrono, el motor asíncrono y los convertidores asíncronos.

- b) Si la máquina tiene un inducido, cuya unión con el circuito exterior, se realiza por medio de un colector de delgas, la frecuencia en el circuito exterior, es de diferente naturaleza que la del inducido, es decir:

$$f_2 = f_L$$

el colector de delgas se coloca siempre en el rotor, por ello en las máquinas estáticas esta combinación no existe.

En las máquinas móviles en que  $f_1 = 0$ , se cumplirá:

$$f_L \neq f_2 = \pm \frac{np}{60}$$

En las máquinas móviles en las que  $f_1 \neq 0$ , teniendo en cuenta que responden a la expresión general

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}, \text{ se cumplirá:}$$

$$f_L \neq f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$$

que dan lugar a los motores de c.a. con conmutador o con colector de delgas.

#### **4º) ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE CORRIENTE ALTERNA Y ALGUNOS DE SUS USOS MÁS FRECUENTES:**



**-Transformadores:**

Son máquinas estáticas  $n=0$ , ( $f_2=f_1$ ) constituidas por dos devanados inductor e inducido. El devanado inductor se conecta a una fuente de c.a. de frecuencia  $f_1$  y se denomina *primario*. El devanado inducido tiene una frecuencia  $f_2=f_1$  y entrega energía eléctrica a un circuito exterior por medio de conexiones fijas ( $f_L=f_2$ ); este arrollamiento inducido recibe el nombre de *secundario*.

Si la tensión entre los terminales del arrollamiento primario  $V_1$ , es menor que la tensión secundaria  $V_2$ , es decir  $V_1 < V_2$  el transformador se denomina *elevador*; en el caso contrario se llama transformador *reductor* ( $V_1 > V_2$ ).

Si suponemos el *transformador ideal*, sin pérdidas, ni caídas de tensión, se cumplirá en primario y secundario:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

que se denomina la relación de transformación. Si designamos con  $I_1$  e  $I_2$  las corrientes primaria y secundaria, en el caso ideal se cumplirá:

$$V_1 * I_1 = V_2 * I_2$$

que expresa la igualdad entre las potencias de entrada y salida. Teniendo en cuenta además la expresión se puede poner:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

que indica que para una determinada potencia a transmitir, si se eleva la tensión  $V_2 > V_1$ , se obtiene  $I_2 < I_1$ , lo que indica la conveniencia de instalar los transformadores en las grandes redes eléctricas, pues manejando altas tensiones las corrientes se reducen y como consecuencia de ello se requiere una menor sección en los conductores de cobre de la línea con el consiguiente ahorro económico. Los transformadores permiten, en consecuencia, adaptar de un modo sencillo, las tensiones de las redes a los valores más adecuados y económicos.

**-Máquinas asíncronas o de inducción :**

Son máquinas rotativas  $n \neq 0$ , y  $f_1 \neq 0$ ;  $f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$

Están constituidas por un devanado inductor situado en el estator por el que se introduce una c.a. de frecuencia  $f_1$ , creando una frecuencia en el circuito exterior:  $f_L=f_2$ .





ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 26 – ENERO DE 2010

La máquina puede funcionar como:

- a) Motor: es el caso más normal. En esta situación el campo giratorio del estator induce f.e.m.s. en el devanado del rotor y al estar éste en cortocircuito o cerrado por medio de un reóstato de arranque aparecen corrientes en el rotor que al reaccionar con el campo giratorio del estator, mueven la máquina a una velocidad  $n$  muy cercana y por debajo de la de sincronismo  $n_1$ , de tal forma que nuestra identidad queda expresada:

$$f_2 = f_1 - \frac{np}{60}$$

Se denomina deslizamiento “s” al cociente:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Los deslizamientos a plena carga de estos motores que giran a una velocidad asíncrona respecto al campo giratorio del estator varían entre el 3% y 8% y es difícil de regular, sin embargo la simplicidad y robustez de estos motores los hacen aptos para todo tipo de trabajo en el que no sea necesario un control preciso de la velocidad como en grúas, ascensores, máquinas herramientas, hormigoneras, etc..., por ello es la máquina electromagnética de mayor aplicación en la ingeniería, cubriendo más del 80% de los motores eléctricos empleados en la industria.

- b) Generador: si girando la máquina asíncrona como motor, a una velocidad  $n < n_1$ , se obliga a mover el rotor, por un medio exterior, a una velocidad superior a la de sincronismo y en su mismo sentido, de acuerdo con energía mecánica que se convierte en eléctrica devuelta a la red por el estator a frecuencia  $f_1$ . La máquina trabaja entonces como generador, pero este tipo de funcionamiento no se utiliza casi nunca en la práctica porque no es autónomo, siendo necesaria la red eléctrica de “alimentación” para suministrar la corriente de magnetización de la máquina. No obstante existen procedimientos de autoexcitación de generadores asíncronos a base de condensadores.
- c) Convertidor de frecuencia: si se alimenta el estator de una máquina eléctrica por medio de una red de c.a. de frecuencia  $f_1$  y se mueve el rotor por un medio mecánico exterior a velocidad  $n$ , se obtiene una frecuencia en el rotor, cuyo valor es:

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$$

el sumando es positivo o negativo según que el sentido de giro del rotor tenga diferente o igual sentido que el campo giratorio del estator. La máquina recibe energía eléctrica por el inductor y energía mecánicas por el eje, de tal forma que por los anillos del inducido se puede alimentar una carga eléctrica a frecuencia  $f_2 \neq f_1$ .



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 26 – ENERO DE 2010

### -Motores de c.a. de colector :

Son máquinas rotativas  $n \neq 0$ , y  $f_1 \neq 0$ ;  $f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}$

pero en esta ocasión  $f_2$ , es decir, consisten en un inductor, situado en el estator, alimentado generalmente por c.a. monofásica. El inducido está en el rotor y dispone de colector de delgas. Normalmente los devanados del estator y rotor van en serie, resultando una máquina con características similares al motor serie de c.c. En su versión de pequeña potencia (fracción de CV), son muy empleadas en aparatos electrodomésticos: batidoras, máquinas de afeitar, taladros eléctricos de mano, secadores, etc... Con potencias más elevadas se utilizan en tracción eléctrica a frecuencias que oscilan entre 50 Hz y  $50/3 = 16,66$  Hz. Pueden adaptarse también a un funcionamiento con c.a. o c.c., recibiendo entonces el nombre de *motores universales*.

### Bibliografía:

- Fourez, G. (2008). *Cómo se elabora el conocimiento*. Madrid: Narcea.
- Fraile Mora, J. (2008) *Máquinas eléctricas*. Madrid: Mcgraw-Hill/ interamericana de España S.A
- Martínez Domínguez, F.(1996) *Tecnología eléctrica*. Madrid: Thomson Paraninfo, S.A.
- Alcalde San Miguel, P (2002) *Electrotecnia*. Madrid: Thomson Paraninfo, S.A.
- Augé, R. (1999) *Curso de electricidad general: tomo I y II*. Madrid: Thomson Paraninfo, S.A.
- Chapman, S. (1993) *Máquinas eléctricas*. Madrid: Mcgraw-Hill

### Autoría

- 
- Nombre y Apellidos: Andrés Antonio Gil Martín
  - Centro, localidad, provincia: Granada
  - E-mail: [aagm72@gmail.com](mailto:aagm72@gmail.com)