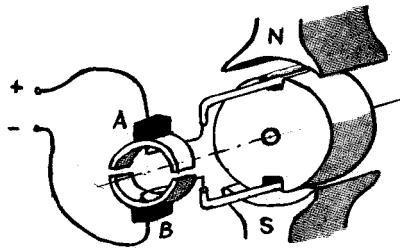


# Capítulo 2

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

- 2.1 Principio de funcionamiento
- 2.2 Campo magnético producido por el estator
- 2.3 La f.e.m. inducida
- 2.4 Campo magnético producido por el rotor o reacción de armadura
- 2.5 Arrollamiento de compensación e interpolos
- 2.6 El torque electromagnético





# PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

## 2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En el bobinado del rotor o armadura de una máquina de corriente continua se producen cantidades eléctricas alternas (tensiones y corrientes).

Gracias a un ingenioso dispositivo mecánico, denominado colector se ha podido convertir estas cantidades alternas en cantidades de continua, es decir, de valor medio constante.

Para comprender de manera sencilla el funcionamiento del colector conviene utilizar la máquina de continua elemental operando como generador. En la figura 1.10 se vio el esquema de un generador elemental cuyo inducido estaba constituido por un solo conductor desplazándose transversalmente al campo.

Sea un generador con un rotor de dos ranuras diametralmente opuestas, las cuales alojarán los dos conductores de una espira, tal como se ve en la figura 2.1.

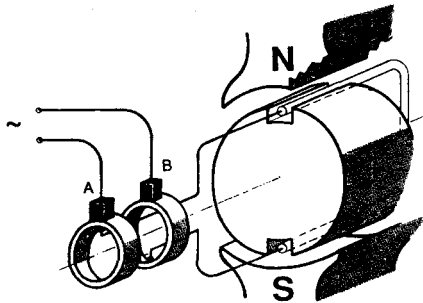


Fig. 2.1 Generador elemental de alterna con una sola espira.

Los extremos de la espira se han conectado a dos anillos aislados entre sí, y sobre los anillos se han instalado las escobillas A y B, a las cuales se conecta los bornes externos del generador.

Se conviene en llamar a la línea que pasa por el centro del inducido, justamente por la mitad de la distancia entre los polos N y S, **línea neutra geométrica**; y a la parte de la circunferencia del inducido  $\tau$ , que corresponde a un polo, **paso polar**.

La máquina representada en la figura 2.1 tiene dos pasos polares y un par de polos.

Al girar el rotor de radio  $r$  con una velocidad angular  $\omega$  cada conductor se desplazará a lo largo de la periferia del rotor con una velocidad tangencial  $v = \omega r$  induciéndose instantáneamente en cada uno de ellos una f.e.m. de valor:

$$E = l \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \omega t$$

$$= (E_{\text{max}}) \text{sen } \omega t$$

que dice claramente de la naturaleza alterna de la f.e.m. inducida en los bornes de la espira.

En una vuelta completa de la espira la f.e.m., variable con el tiempo, cambia su polaridad dos veces.

Como los dos conductores están en serie, la f.e.m. resultante en los bornes de la espira es el doble de la de cada conductor.

En la figura 2.2 se muestra la sinusoide de la f.e.m.

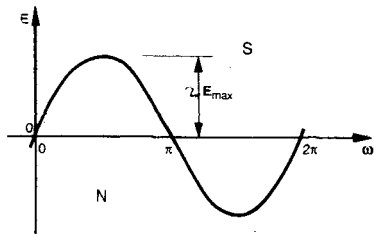


Fig. 2.2 Curva de la f.e.m. en los bornes de una espira de un alternador.

Recuérdese que el número de polos es siempre par.

Examinando la figura 2.1, se ve que cada escobilla está conectada por intermedio del anillo con un solo conductor. Por consiguiente, en los bornes del circuito exterior surge tensión variable con el tiempo y por éste se genera una tensión alterna de una cierta frecuencia.

Para obligar a esta tensión a aparecer por el circuito exterior en una sola dirección cualquiera, es decir, rectificarla, la máquina es dotada de un dispositivo especial llamado **colector**. Véase la figura 2.3.

Su principio de funcionamiento consiste en lo siguiente. Los extremos de la espira se conectan a dos segmentos de cobre (llamados también **delgas** o **láminas de colector**) aislados entre si con mica y montado el conjunto sobre el mismo eje del rotor aunque eléctricamente aislado de él.

Sobre las delgas se colocan las escobillas **A** y **B**, fijas en el espacio, las cuales conectan la espira con el circuito exterior. La disposición de las escobillas en las delgas tiene mucha importancia.

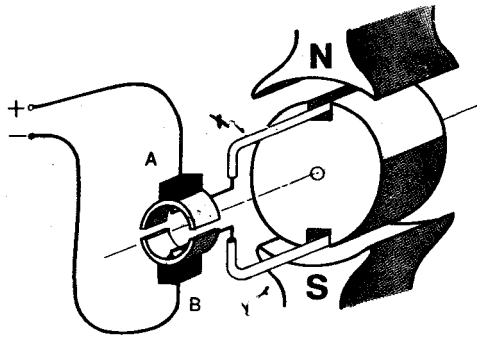


Fig. 2.3 Esquema de funcionamiento de una máquina de corriente continua.

Para rectificar totalmente la tensión alterna es necesario colocar las escobillas a lo largo de la línea media que pasa por los polos denominada también **eje principal**: de este modo la f.e.m. inducida en la espira se hace igual a cero cuando la escobilla pasa de una delga a otra.

Entonces, al girar el rotor, en la espira se sigue generando f.e.m. variable, pero cada una de las escobillas hará contacto sólo con aquella delga y, por consiguiente, con aquel conductor que se encuentren bajo el polo de polaridad dada.

Por ejemplo, la escobilla **A** hace contacto siempre sólo con la delga a la cual va conectado el conductor bajo el polo **N**; al contrario, la escobilla **B** hace contacto sólo con el conductor que se encuentra bajo el polo **S**.

Esto significa que la polaridad de las escobillas permanece invariable del mismo modo que no varía la polaridad del campo inductor. La tensión en la escobilla **A** será siempre mayor que la tensión en la escobilla **B**, de allí los signos **+** y **-**.

Por consiguiente, la tensión se aplicará al circuito exterior sólo en una dirección, en otras palabras, tiene lugar la rectificación de la f.e.m. variable inducida y alterna en la espira a f.e.m. pulsante en las escobillas y, por lo tanto, en el circuito exterior.

Si logramos fijar la escobilla **B** a una tensión de referencia, por ejemplo, la tensión cero, se obtiene la gráfica de la figura 2.4.

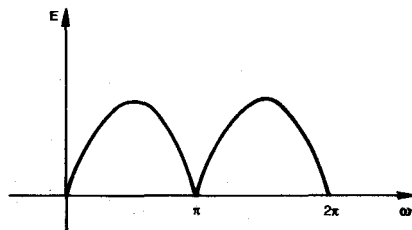


Fig. 2.4 F.e.m. rectificadas en función del tiempo.

La pulsación de la tensión en la figura 2.4 tiene lugar en los límites desde su valor máximo hasta cero.

La tensión media o continua entre escobillas es:

$$E_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \omega \phi \operatorname{sen} \omega t \, d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \omega \phi$$

Más adelante se mostrará que la pulsación de la f.e.m. se suaviza si en el inducido se arrolla un devanado compuesto por un gran número de conductores, ejecutado de manera correspondiente y conectado al colector.

## 2.2 CAMPO MAGNETICO PRODUCIDO POR EL ESTATOR

Este subcapítulo tiene por finalidad explicar el modo en que se crea la fuerza magnetizante de los polos principales, necesaria para la creación del flujo inductor o flujo magnético principal.

El flujo inductor de una máquina de continua es el flujo en el entrehierro EH en un área correspondiente a un paso polar  $\tau$ , en marcha en vacío de la máquina.

En la figura 2.5 se muestra en forma esquemática una forma de una máquina de continua de cuatro polos y se representa el cuadro del flujo magnético creado por los polos principales.

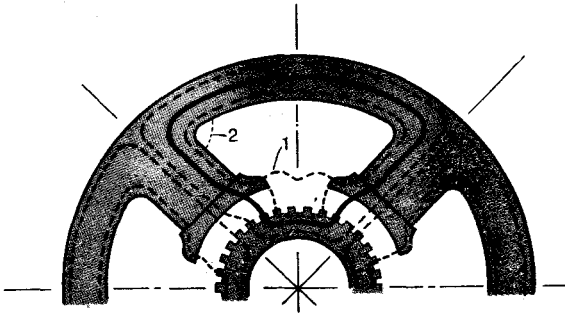


Fig. 2.5 Circuito magnético de los polos principales de una maquina de continua.

En virtud de la simetría completa de la máquina, el flujo creado por cada uno de los polos se divide respecto de la línea axial del polo en dos partes, que forman dos circuitos magnéticos iguales dispuestos simétricamente a ambos lados de la línea axial del polo dado.

El número de estos circuitos es igual al número de polos de la máquina, pero el cálculo de la fuerza magnetomotriz f.m.m. toma en cuenta sólo uno de ellos.

La parte del flujo principal, correspondiente a la mitad del polo, se muestra en la figura 2.5 con línea de trazos gruesos, que determinan los límites exterior e interior del circuito, y una línea plena que pasa por la mitad del circuito.

El flujo principal constituye sólo una parte del flujo creado por el polo. La otra parte del flujo, llamada **flujo de dispersión**, se deriva al espacio entre los polos y, por lo tanto, no pasa al inducido y no participa en la creación de f.e.m.

En la figura 2.5 el flujo de dispersión se muestra convencionalmente con dos líneas finas de trazos 1 y 2.

En la figura 2.6 se muestra un polo del estator desarrollado sobre una recta para mayor claridad.

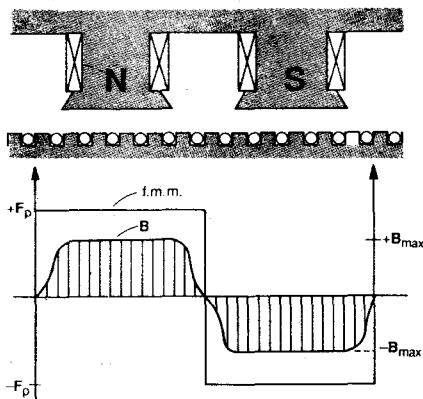


Fig. 2.6 Distribución de la f.m.m. y de la densidad de campo inductoras en el EH de una máquina de continua.

Por la bobina de  $N_p$  espiras circula una corriente continua  $I$  de valor constante, dando lugar a la aparición de una **f.m.m. por polo  $F_p$**  de valor constante e igual a:

$$f.m.m. por polo = F_p = N_p \cdot I$$

Esta f.m.m. se aplica al núcleo del circuito magnético considerando originando la aparición de los flujos principal y de dispersión. Estos flujos originan caída de tensión magnética o de f.m.m. en las partes de hierro y sobretodo en el entrehierro.

En la determinación de la inducción magnética  $B$  o densidad de campo magnético en cada punto de la superficie del entrehierro se requiere conocer la longitud del EH. Esta es constante frente a los polos y se hace cada vez mayor conforme se acerca a la línea neutra, en donde esta longitud se hace máxima, tal como puede verse en la figura 2.5.

La densidad de campo resulta ser inversamente proporcional a la longitud del EH, tal como lo demuestran las siguientes relaciones:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{F_p}{R \cdot A} = \frac{\mu \cdot F_p \cdot A}{l \cdot A} = \frac{\mu \cdot F_p}{l}$$

donde: R es la Reluctancia del circuito magnético,  $\mu$  es la permeabilidad del núcleo, A es la sección transversal que atraviesa el flujo  $\phi$ , y l es la longitud del circuito magnético.

En la figura 2.6 puede verse la curva de distribución resultante de B a lo largo de la periferia del rotor. Téngase en cuenta el cambio de polaridad para la consideración del signo de  $F_p$  y de B. B cambia de signo al pasar por la línea neutra.

### 2.3 LA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

La distribución de la densidad de campo B puede aproximarse a una distribución senoidal en el espacio. Las dos ranuras que contenían inicialmente los dos conductores de una espira contendrán ahora a dos bobinas en paralelo de Ns espiras en serie cada una conectadas en la forma que se ve en la figura 2.7.

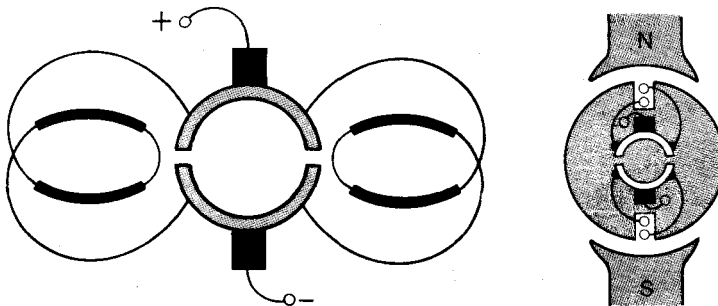


Fig. 2.7 Máquina de corriente continua de dos polos y dos bobinas concentrada en la armadura en paralelo.

La velocidad eléctrica  $\omega_e$  y la velocidad mecánica  $\omega_m$  están relacionadas a través del número de polos, resultando siempre que la velocidad mecánica es menor o igual que la velocidad eléctrica:

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m$$



$$\lambda = N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R \cdot \int_{\alpha - \frac{\pi}{2}}^{\alpha + \frac{\pi}{2}} \text{sen } \theta \, d\theta$$

$$= N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R \cdot \left[ \cos \theta \right]_{\alpha - \frac{\pi}{2}}^{\alpha + \frac{\pi}{2}}$$

$$\lambda = -N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R (-\text{sen } \alpha - \text{sen } \alpha)$$

$$= 2 N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R \text{sen } \alpha$$

$$= 2 N_s \cdot B_{\max} \cdot l \cdot R \text{sen } \omega_m t \quad , \quad \alpha = \omega_m t$$

$$= N_s \cdot B_{\max} \cdot A \cdot \text{sen } \omega_m t \quad , \quad \text{suponiendo } \alpha_0 = 0$$

$$, \quad A = 2 l \cdot R$$

$$= \lambda_{\max} \text{sen } \omega_m t \quad , \quad \lambda_{\max} = N_s \cdot B_{\max} \cdot A$$

Entonces, la f.e.m. resulta ser igual a:

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d}{dt} (\lambda_{\max} \text{sen } \omega_m t)$$

$$= \lambda_{\max} \omega_m \text{cos } \omega_m t$$

$$= e_{\max} \text{cos } \omega_m t \quad , \quad e_{\max} = \omega_m \lambda_{\max}$$

$$= e_{\max} \text{cos } \omega_e t \quad , \quad \omega_m = \omega_e \quad \text{para } p = 2$$

Como se sabe, en los bornes se produce tensión rectificada cuyo valor medio  $e_m$  es igual a:

$$e_m = \frac{2}{\pi} e_{\max} = \frac{2}{\pi} N_s \cdot A \cdot B_{\max} \cdot \omega_e$$

La última expresión puede ponerse en función del flujo máximo  $\phi_{\max}$  y de la velocidad mecánica  $\omega_m$ :

$$e_m = \frac{2}{\pi} N_s \cdot A \cdot \frac{\phi_{\max}}{A} \cdot \frac{p}{2} \omega_m$$

$$e_m = \frac{1}{\pi} p \cdot N_s \cdot \phi_{\max} \cdot \omega_m$$

Si en lugar del número de espiras en serie  $N_s$ , se considera el número total de conductores activos  $Z_c$ , la expresión que se obtiene es la siguiente:

$$e_m = \frac{p \cdot Z_c}{2 \pi a} \phi_{\max} \cdot \omega_m$$

En la expresión anterior,  $Z_c$  es igual a 2 veces  $N_s$ ,  $a$ ; y el número de ramas en paralelo  $a$  depende del tipo de bobinado del inducido, tema que se verá más adelante:  $a=2$ , si el bobinado es ondulado;  $a=p$ , si el bobinado es imbricado.

Una forma bastante útil de esta última expresión es la siguiente:

$$E_m = k_a \cdot \phi_{\max} \cdot \omega_m$$

donde,  $k_a$  es igual a  $p \cdot Z_c / (2 \pi a)$

## 2.4 CAMPO MAGNETICO PRODUCIDO POR EL ROTOR O REACCION DE ARMADURA

Cuando una máquina de continua ideal trabaja en vacío, es decir, sin carga la corriente de armadura  $I_a$  es nula y, por lo tanto, no existe el campo magnético del rotor.

Sin embargo, cuando la máquina trabaja con carga, por la armadura circula una corriente  $I_a$ , la cual producirá una f.m.m. en el rotor, cuya dirección será la del eje neutro, es decir, perpendicular a la dirección del campo principal. Véase la figura 2.8.

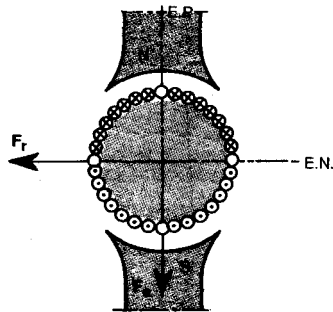


Fig. 2.8 Fuerzas magnetomotrices del estator y del rotor en una máquina de continua.

La dirección y el sentido del campo magnético del rotor se determina con

ayuda de la figura 2.8, basándose en la configuración del bobinado del rotor. Como se observa, por encima de la línea neutra, las corrientes tienen un sentido mientras que por debajo, sentido contrario.

Esta configuración, en su conjunto, es como si se tratase de una bobina común envuelta alrededor de un núcleo, de modo que la dirección y el sentido del campo resultante se determina de idéntica forma, tal como se ve en la figura 2.8.

Los valores de f.m.m. en el espacio se distribuyen según una onda aproximadamente triangular, siendo nula en el eje principal y máxima en el eje neutro. Véase la figura 2.9. En esta figura se muestra cómo son las trayectorias de las líneas de flujo magnético.

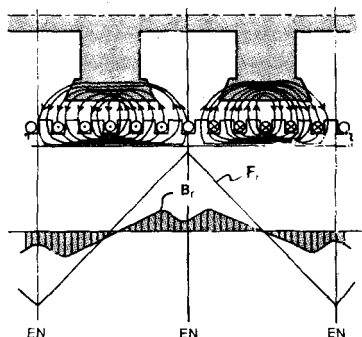


Fig. 2.9 Ondas en el espacio de la f.m.m. y de la densidad de campo de la armadura.

Por la ley de Ampere se sabe que la f.m.m. es proporcional a la cantidad de corriente abrazada por una línea cerrada. Por lo tanto, cuanto mayor sea el número de conductores envueltos por una línea de flujo, mayor será también la f.m.m. en ese punto.

En la figura 2.9 se muestra también la onda de valores en el espacio de la densidad de campo de la armadura. Recuérdese que la densidad de campo es inversamente proporcional a la longitud del entrehierro.

Se observa que la f.m.m. de la armadura produce una apreciable densidad de flujo que equidista de los polos.

A esta f.m.m. de la armadura se le conoce como **reacción de armadura** y tiene un efecto desmagnetizante en el campo.

Nótese que frente a cada polo las corrientes tienen sentidos diferentes y que en cada bobina de la armadura, contenida en un par de ranuras diametralmente opuestas, la corriente está variando en forma alterna, siendo máxima cuando los conductores pasan por el eje principal y nula cuando pasan por el eje neutro.

Justamente es de interés el paso de los conductores por el eje neutro, momento en el cual se produce en la bobina un cambio en el sentido de la corriente con una serie de efectos perjudiciales para el buen funcionamiento de la máquina. A este fenómeno se le conoce con el nombre de **conmutación**.

## 2.5 ARROLLAMIENTO DE COMPENSACION E INTERPOLOS

La corriente de campo y la corriente de armadura están presentes bajo carga y sus f.m.m.s combinadas producen una onda de la densidad de flujo algo parecida a la mostrada por la línea punteada en la figura 2.10, con la región de densidad de flujo cero desplazada del eje neutro, en el sentido de rotación para un generador y en el sentido contrario para un motor.

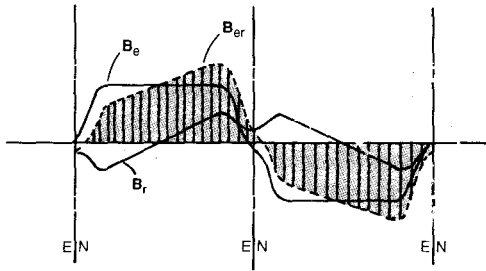


Fig. 2.10 Ondas de la densidad de los flujos inductor, inducido y resultante

Una componente del flujo en el eje de cuadratura causa dificultades en la conmutación en máquinas de continua, y, usualmente, se toman medidas para minimizarlas.

Es importante que los lados de las bobinas que sufren una conmutación caigan en una región de baja densidad de flujo.

Existen dos métodos comúnmente usados para eliminar los efectos indeseables de la reacción de armadura en la conmutación.

El primero, usado en máquinas antiguas y en máquinas actuales pequeñas, consiste en desplazar las escobillas en el sentido de rotación para los generadores y en contrasentido para los motores.

El segundo método hace uso de los polos conmutables (polos de conmutación o interpolos) colocados en el eje neutro cuyos embobinados se conectan en serie opuestos a la armadura. La f.m.m. de los interpolos es, por lo tanto, siempre proporcional a la corriente de la armadura.

En la figura 2.11 se muestra un diagrama simplificado de una máquina de continua con polos conmutadores.

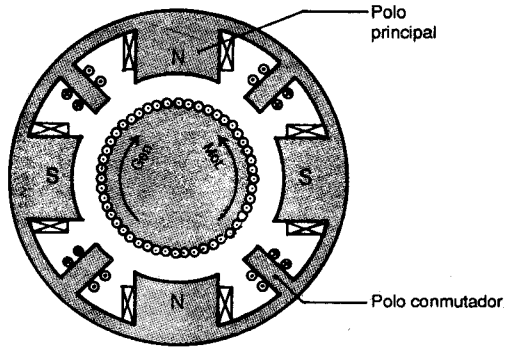


Fig. 2.11 Máquina de continua con polos de conmutación.

La tensión existente entre delgas adyacentes tiene una distribución en el espacio similar a la de la densidad de flujo resultante, siendo la tensión más elevada entre delgas adyacentes donde el lado de la bobina conectada cae en el campo más fuerte.

En algunas aplicaciones las máquinas están sujetas a fuertes sobrecargas o cargas que varían rápidamente, como en el caso de motores de las fábricas de acero.

Durante sobrecargas extremas o cambios de carga repentinos, la tensión entre delgas adyacentes puede volverse suficientemente elevada como para causar que el conmutador se arquee desde una escobilla hasta la siguiente de polaridad opuesta, resultando en un cortocircuito y algunas veces quemando el conmutador.

Estas puntas en los valores de la densidad y de la tensión se neutralizan mediante el uso de un embobinado compensador colocado en las caras de los polos de campo principales como se indica en la figura 2.12.

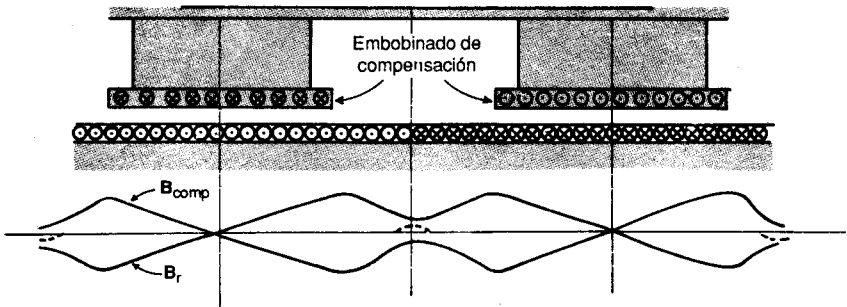


Fig. 2.12 Vista simplificada de una máquina de continua de dos polos con un embobinado de compensación.

El embobinado de compensación se conecta en serie con la armadura y el número de conductores en éste es tanto, como para hacer su f.m.m. igual a la de los conductores de la armadura bajo cada cara de polo.

## 2.6 EL TORQUE ELECTROMAGNETICO

Si a los bornes de una máquina de continua, cuyo campo principal  $B$  está excitado, se aplica una diferencia de potencial, entonces, por los conductores del rotor circulará una corriente  $I_c$  igual a:

$$I_c = \frac{I_a}{a}$$

donde  $I_a$  es la corriente de armadura total y  $a$  es el número de ramas en paralelo.

Como resultado de esto, sobre cada conductor se ejercerá una fuerza electromagnética  $F$  cuyo sentido y valor se determinan a partir de la conocida ley:

$$\vec{F} = l \cdot \vec{I}_c \times \vec{B}$$

$$F = l \cdot I_c \cdot B$$

Los  $Z_c$  conductores del rotor originarán, entonces, un torque  $T_{em}$  igual a:

$$T_{em} = Z_c \cdot F \cdot r$$

$$T_{em} = Z_c \cdot l \cdot I_c \cdot B \cdot r$$

donde  $r$  es el radio del rotor y  $B$  puede expresarse de una manera más útil:

$$B = \frac{p \cdot \phi_{max}}{2 \pi r \cdot l}$$

donde  $\phi_{max}$  es el flujo producido por un polo.

Reemplazando en la última expresión del torque los valores de  $B$  e  $I_c$  se tiene la expresión:

$$T_{em} = Z_c \cdot l \cdot \frac{I_a}{a} \cdot \frac{p \cdot \phi_{max}}{2 \pi r \cdot l} \times r$$

$$T_{em} = \frac{p \cdot Z_c}{2 \pi a} \phi_{max} \cdot I_a$$

$$T_{em} = k_a \cdot \phi_{max} \cdot I_a$$

Nótese el parecido de la expresión de  $T_{em}$  con la de  $E_m$ .

Es importante observar que el torque electromagnético se produce por la existencia de los campos magnéticos del estator y del rotor que están desfasados en  $90^\circ$ .

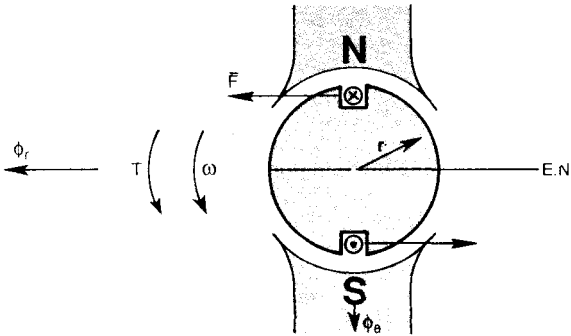


Fig. 2.13 El torque electromagnético en una máquina de continua.

El torque electromagnético se produce por la tendencia a alinearse de los dos campos. Si no existiera el conmutador, los campos se alinearían y el torque  $T_{em}$  desaparecería. El conmutador no permite que esto suceda y mantiene siempre la dirección del flujo de la armadura a  $90^\circ$  con el campo del estator, por lo que el torque permanece constante a pesar del movimiento.

En los generadores este torque tiene sentido contrario al movimiento, por lo que se dice que se trata de un torque antagonista que se opone al movimiento. En los motores este torque tiene el mismo sentido del movimiento por lo que se le llama torque motor.