

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

REACCIÓN DE INDUCIDO

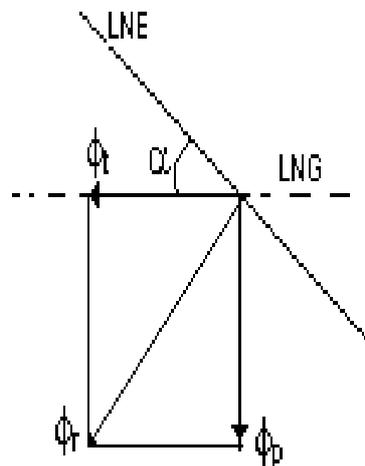
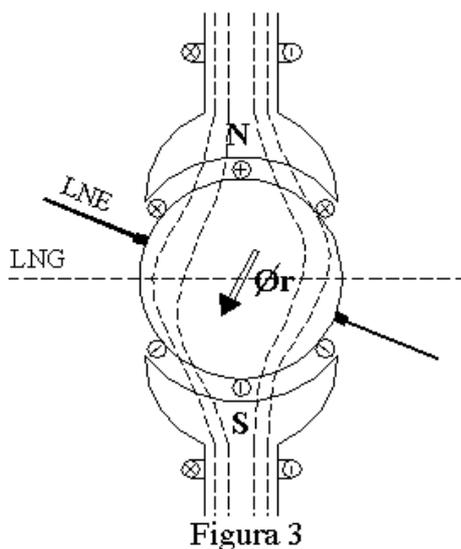
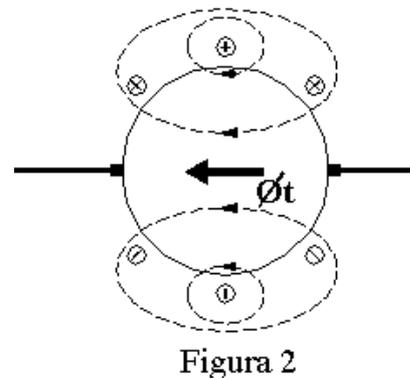
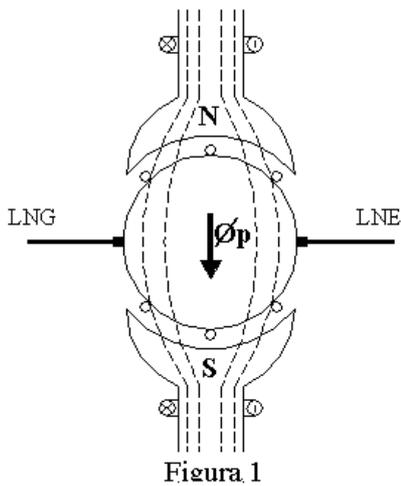
Durante el funcionamiento del generador en vacío, la corriente en el inducido es muy pequeña o casi nula. En este caso, el campo magnético que crea el devanado de los polos principales, para una máquina bipolar es como en Figura 1.

El eje del campo magnético coincide con el de los polos. La línea perpendicular al eje del campo magnético, es la línea neutra geométrica (LNG), que en este caso coincide con la línea neutra eléctrica (LNE).-

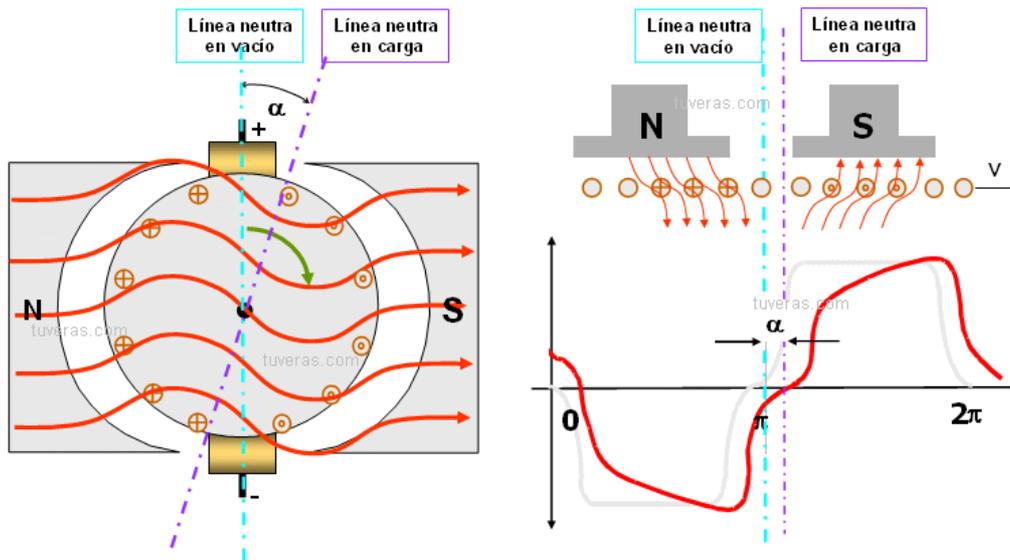
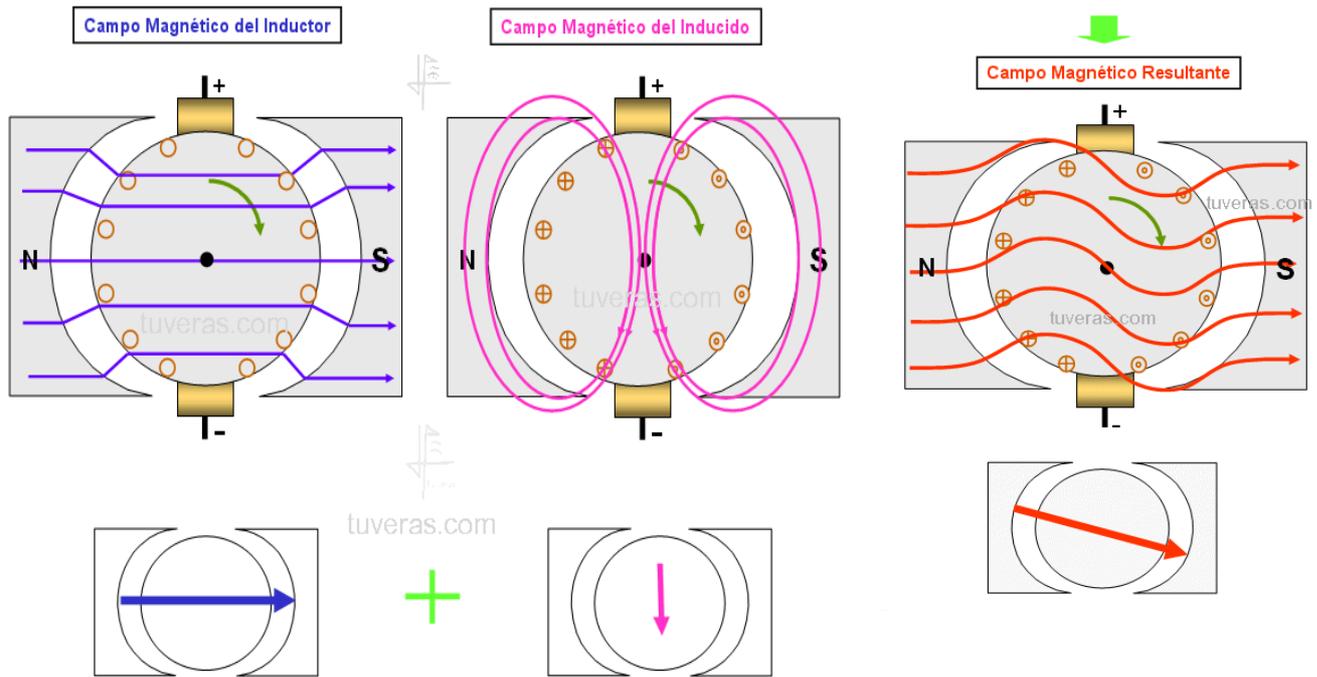
Cuando la máquina entra en carga, es decir, entrega corriente a la red, circulará corriente por el inducido que creará su propio campo magnético o campo del inducido. En la Fig.2 se representa a este solamente.-

En marcha normal existen los dos campos simultáneamente, es decir, la superposición del Campo de los polos y el Campo del inducido conformando un único campo resultante, el que tomará la configuración que muestra la Figura 3.-

La acción del campo magnético del inducido sobre el de los polos se denomina "reacción de inducido".-



MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA



CONSECUENCIAS DE LA REACCIÓN DE INDUCIDO

1) En la Fig.4 representamos la composición del vector flujo principal Φ_p con el de reacción de inducido o flujo transversal ϕ_t que da como resultante el Φ_r .

Como se ha desplazado el eje del campo magnético, la LNE perpendicular a Φ_r se ha desplazado un ángulo α , Fig. 3 y 4.

En la máquina ideal (sin reacción de inducido) las escobillas estarían situadas en la LNG = LNE, zona ideal, porque al pasar la escobilla de una delga a otra, lo haría sin corriente, por consiguiente no se producirían chispas; en cambio, en la máquina real, al desplazar la LNE, por el efecto de la reacción de inducido, se deberían desplazar las escobillas hasta esa línea, ya que, en caso contrario, al interrumpir el circuito con corriente, se producirán chispas, que deterioran el colector y las escobillas.

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Entonces, como primera consecuencia tenemos la necesidad de desplazar las escobillas a la nueva LNE.-

2º) El decalar las escobillas trae aparejado otro problema; al ubicarlas en la nueva LNE, Fig.5, ha quedado dividido el inducido simétricamente en dos partes: los conductores 1, 2 y 3 con sus simétricos son los que determinan la fuerza magneto motriz transversal θ_t que da origen al Φ_t .

En cambio ahora, los conductores 4 y 5 con sus simétricos, determinan una fuerza magneto motriz longitudinal θ_l y su flujo Φ_l que se opone directamente al Φ_p , disminuyéndolo y ocasionando una nueva necesidad de desplazar las escobillas. Esto lo podemos observar en la composición vectorial de Fig.6.

Al disminuir el Φ_r , disminuye la Fem. E, por consiguiente otra consecuencia es la caída de tensión.-

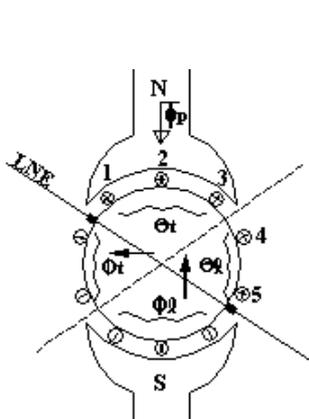


Figura 5

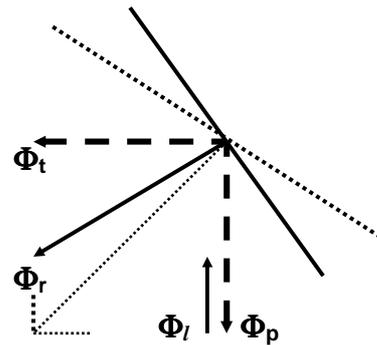


Figura 6

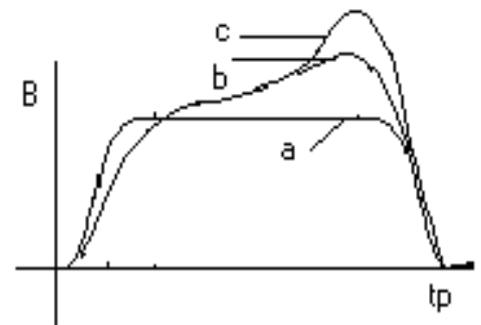


Figura 7

3º) El simple hecho de desplazar las escobillas no soluciona totalmente el chisporroteo ya que podemos observar que el módulo del vector Φ_t depende de la carga de la máquina ($\Phi = \Lambda \cdot N \cdot I$), entonces, cuando varía la carga (caso más común) varían Φ_t , Φ_r y la posición de la LNE.

Tendríamos que estar acomodando las escobillas para cada estado de carga de la máquina. Si así no se hiciese, que además no sería práctico ni se hace, habría estados para el cual la máquina chisporrotearía.

Este es un inconveniente que presentan aquellas máquinas que no tienen compensada la reacción de inducido.

4º) La distorsión del campo magnético resultante da origen a dos problemas adicionales:

4º-1) Desmagnetiza una parte del polo y satura la otra. Esto se puede apreciar en la Fig.3, en que la dirección del Φ_r afecta un extremo polar y es más grande que Φ_p Fig.4. Cuando se trabaja con inducciones apreciables, que es lo común por razones económicas, el debilitamiento de una mitad del polo no se compensa por su incremento en la otra mitad.

En efecto, en la Fig.7, la curva "a" es la de inducción debida al campo principal solamente, al deformarse el campo por influencia del Φ_t , crecería en un extremo hasta 'b', pero por saturarse no llega más allá de 'c'. La superficie comprendida por la curva 'c' es menor que la de 'a', y como estas superficies son proporcionales al Φ disminuye E y se produce otra caída de tensión.-

4º - 2) Este aumento del campo en una parte del polo, hace que en esa zona aumente la tensión entre delgas, lo que favorece la producción de chispas.-

El valor de la tensión entre delgas en vacío, debe quedar por debajo de ciertos límites, para que al funcionar en carga el aumento de B no forme chispas.

4º - 3) Disminuye indirectamente el rendimiento (se debe aumentar la corriente de excitación para compensar el efecto anterior) \Rightarrow aumentan las Pérdidas de Joule y \Rightarrow disminuye el rendimiento.

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

F.M.M. POR REACCIÓN DE INDUCIDO

Para cuantificar el campo por reacción de inducido, consideremos la denominada "capa de corriente" o "carga lineal específica", \overline{CI} , que es la corriente que circula por los N conductores del inducido por unidad de perímetro de este, es decir:

$$\overline{CI} = \frac{N \cdot i}{\pi \cdot D_i}$$

Algunos valores indicativos de \overline{CI} :

Para máquinas pequeñas: 100 A/cm

Para máquinas grandes : 600 A/cm

La fmm ($\theta'' = NI$) por par de polos será: $\theta''_i = t_p \cdot \overline{CI}$

La corriente por el conductor "i" en función de la corriente de inducido I_i es:

$$i = \frac{I_i}{2 \cdot a}$$

siendo $2a$ el nº de ramas en paralelo.

$$\text{Reemplazando en la anterior tenemos: } \theta''_i = t_p \cdot \overline{CI} = \frac{\pi \cdot D_i}{2 \cdot p} \cdot \frac{N \cdot i}{\pi \cdot D_i} = \frac{N \cdot i}{2 \cdot p} = \frac{N \cdot I_i}{2 \cdot p \cdot 2 \cdot a}$$

Que por polo será la mitad: $\theta'_i = \frac{N \cdot I_i}{8 \cdot p \cdot a}$

EJEMPLOS

- 1º) Máquina bipolar; dos ramas en paralelo: $2a = 2$; $I_i = 10 \text{ A}$;
3 espiras = 6 conductores; Fig.8

$$i = I_i / 2a = 10 / 2 = 5 \text{ A}$$

si en 3 espiras circulan 5 A tenemos: $3 \text{ espiras} \times 5 \text{ A} = 15 \text{ Av}$

Aplicando la fórmula:

$$\theta''_i = (N I_i) / (4 \cdot p \cdot a) = (6 \cdot 10) / (4 \cdot 1 \cdot 1) = 15 \text{ Av}$$

- 2º) Máquina tetrapolar: $2a = 2$; $I_i = 40 \text{ A}$; $i = I_i / 2a = 40 / 2 = 20 \text{ A}$

6 espiras = 12 conductores: Fig.9

$$\theta''_i = (N \cdot I_i) / (4 \cdot p \cdot a) = (12 \cdot 40) / (4 \cdot 2 \cdot 1) = 60 \text{ Av}$$

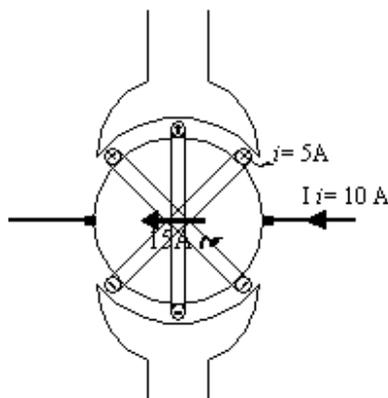


Figura 8

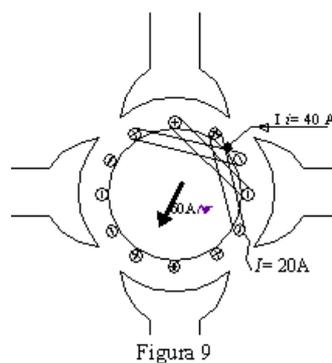


Figura 9

CONMUTACIÓN

Comprende los fenómenos que se manifiestan al pasar las delgas del colector bajo las escobillas.

Consideremos una bobina de una espira, la que se encuentra alojada en dos ranuras del inducido (Fig.10)

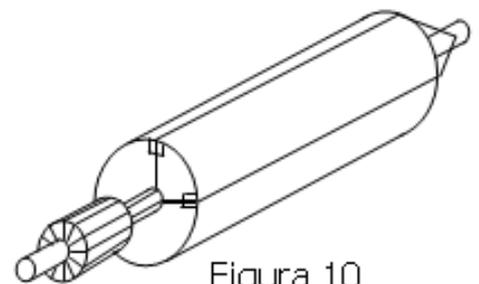


Figura 10

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

La dibujaremos según Fig. 2, conectados sus extremos a las delgas 1 y 2, recordando que ésta no se encuentra aislada de las demás, sino que el fin de una bobina es el comienzo de la próxima.

Analizaremos el fenómeno en tres instantes distintos, cuando la escobilla está en la delga 1; entre las delgas 1 y 2 y por último en la delga 2. (Fig. 11- A, B, C)

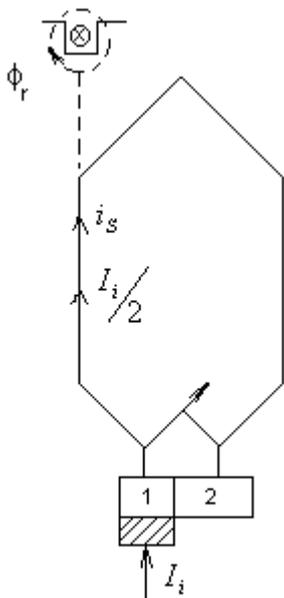


Figura 11-A

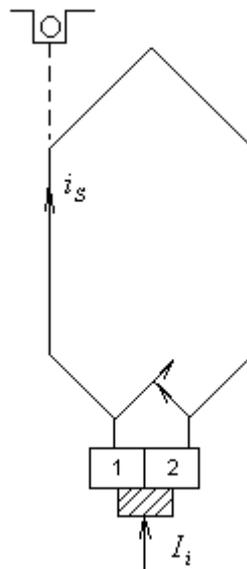


Figura 11-B

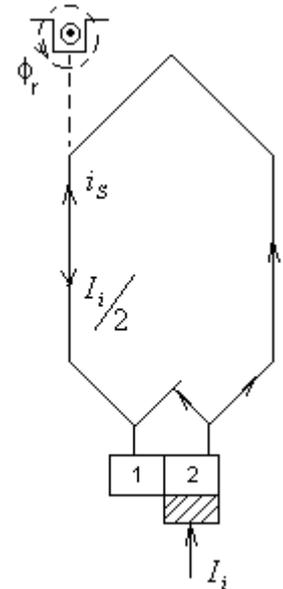


Figura 11-C

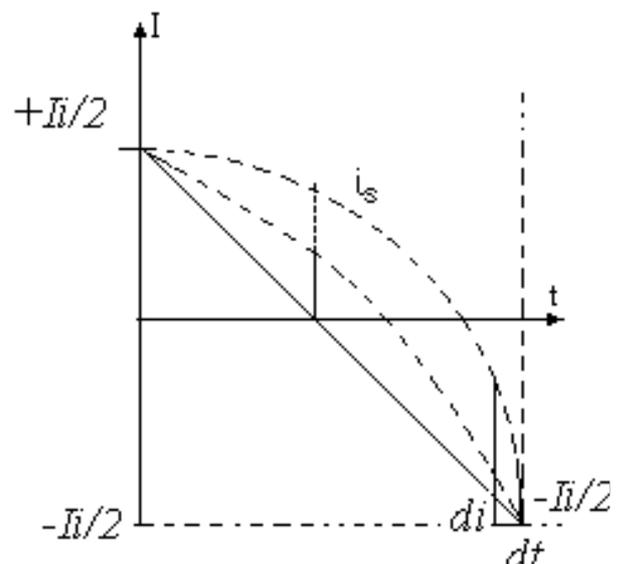
En las figuras se proyecta el lado izquierdo de la espira y se lo indica alojado en la ranura.

En el primer instante (Fig.11-A) la corriente I_i , que suponemos entrante en la escobilla se divide en las dos ramas, y circulará $(I_i/2)$ en cada conductor, y en la ranura será entrante; en el segundo instante no circula corriente en la espira, por ser iguales y de sentido contrario o porque está en cortocircuito; y en el tercer instante, al entrar la corriente por la delga 2, en el conductor en estudio circulará $(I_i/2)$ en sentido contrario al instante 1 y será saliente en la ranura.

En conclusión, al pasar la escobilla de una delga a otra, en el conductor se invierte el sentido de la corriente. Esto origina dos problemas:

1) Si consideramos el fenómeno puramente resistivo, la variación de $+I_i/2$ a $-I_i/2$ será lineal (Fig.12) y tendremos un instante en el que $I = 0$, punto ideal para producir el cambio de delgas (conmutación) ya que, al no haber corriente, no se producen chispas.

Pero en la realidad no es así, ya que al haber variación de corriente (di/dt) en una bobina con un cierto número de espiras (N), tendremos el fenómeno de autoinducción de Faraday ($L = A.N^2$), por lo que se inducirá una Fem. $E = -L.di/dt$, que origina una corriente suplementaria, $i_s = E/R$, que se opone a la causa que la produce (signo -); como del instante 1 al 2, la corriente disminuye, y del 2 al 3 aumenta en sentido negativo, la i_s tendrá los sentidos marcados en las figuras, Ello modifica la recta, transformándola en curva (línea de trazos _ _ _).-



MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Ahora, en el instante 2 hay corriente i_s , y si en ese momento se produjese la inversión, se está abriendo un circuito con corriente, lo que trae aparejada la aparición de chispas en el colector.

Las chispas en el colector deterioran las delgas, picándolas, producen asperezas, gastan las escobillas y generan calentamiento.

Además, si estudiamos el conductor en la ranura, al haber variación de flujo de ranura, ($d\phi_r/dt$), nuevamente se genera una Fem debido a este cambio: $e = -d\phi_r/dt$ que da lugar a una corriente inducida suplementaria que incrementa la i_s , desplazando más la curva (ahora línea de trazo y punto -.-) aumentando aun más el riesgo del chisporroteo.

Primera Solución:

Como el problema es generado por L y este es proporcional a N^2 , una primera solución será diseñar bobinas con pocas espiras.

- Como anteriormente habíamos dicho que convenía tener muchas bobinas (para tener una onda lo más continua posible) ahora agregaremos "*muchas bobinas con pocas vueltas cada una*"

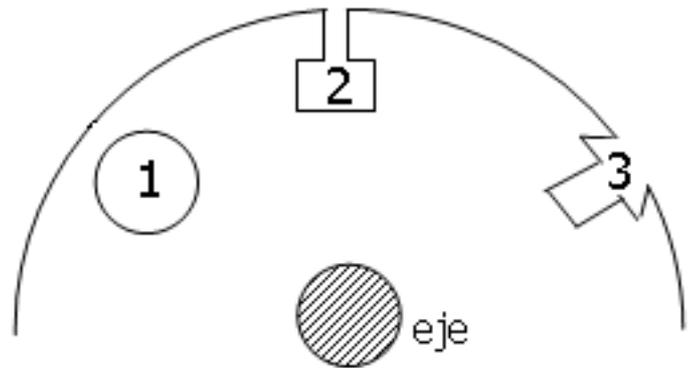


Figura 13

Segunda Solución:

Al encontrarse el conductor dentro de una ranura y rodeado por material muy permeable, la corriente crea un flujo de ranura, ϕ_r , que al pasar del instante 1 al 3, cambia de sentido (ver Fig.11).

Como el problema lo originó el flujo de ranura, diseñaremos una que tenga mucha reluctancia.

En máquinas eléctricas rotativas se usan tres tipos diferentes de ranura, denominadas: cerradas (1), semiabiertas (2) y abiertas (3) (Fig.13), indudablemente, para máquinas de c.c. la más conveniente es la abierta por tener la mayor reluctancia y pueda así disminuir la Fem. e .

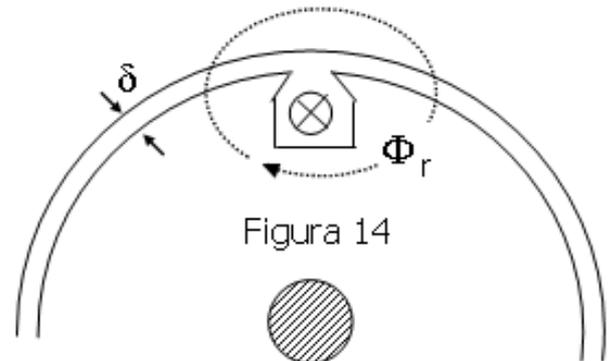


Figura 14

La adopción de la ranura abierta trae como consecuencia la necesidad de adoptar entrehierros grandes. En efecto, si el entrehierro fuese chico (Fig. 14) veríamos que el Φ_r , vuelve a tener un camino de alta permeabilidad con lo cual no ganamos nada. En cambio, al tenerlo grande (Fig.15) obligamos al Φ_r a cerrar por el aire $\gg \mathfrak{R}$ (reluctancia).

Todo esto explica porqué las máquinas de corriente continua tienen entrehierros grandes, por ejemplo, un motor de c.c. de 1,8 kW tiene un entrehierro de $\delta = 1,5$ mm, y en cambio los motores asíncronos, que no tienen problemas de conmutación por supuesto, tienen entrehierros pequeños, por ejemplo, motor asíncrono de igual potencia, $\delta = 0,30$ mm. La modificación de la recta en curva (Fig. 12) nos indica además que la variación de la corriente a la salida de la escobilla es grande, lo que favorece las chispas en el flanco saliente de las mismas.

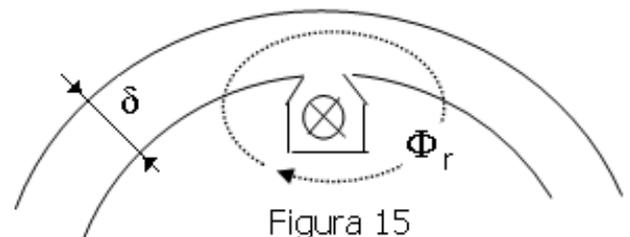


Figura 15

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Y por último, otra solución sería crear una Fem. igual y opuesta a la suma de las dos mencionadas anteriormente, para anularlas.

Esto es posible, como veremos más adelante, y se denomina Fem. de conmutación.

En resumen, para mejorar la conmutación se puede recurrir a las siguientes soluciones:

- 1 - Muchas bobinas con pocas espiras cada una
- 2 - Ranuras abiertas
- 3 - Entrehierros grandes
- 4 - Creación de una Fem. de conmutación
- 5 - Cierta decalaje en las escobillas para buscar la posición de corriente nula en la inversión.

Polos de conmutación

Planteados los dos principales problemas para las máquinas de corriente continua, que son la reacción de inducido y la conmutación, se deduce la necesidad de una solución integral, y esta se obtiene a través de los polos de conmutación.

La reacción de inducido crea el inconveniente del flujo transversal y la necesidad del decalaje de las escobillas.

La conmutación, las Fems inducidas por variación de corriente y flujos de ranura.

Por consiguiente, los polos de conmutación, para eliminar estos inconvenientes deberán:

- 1° anular el campo transversal por reacción de inducido
- 2° poder dejar las escobillas en la zona neutra geométrica
- 3° crear una Fem. de conmutación

Para anular el campo transversal, se ubican en la zona neutra geométrica, se conectan sus arrollamientos en serie con el inducido y arrollados en un sentido para que produzcan una polaridad tal que genere el flujo ϕ_c (*flujo de compensación*) que se oponga al transversal (Fig.16 y 17)

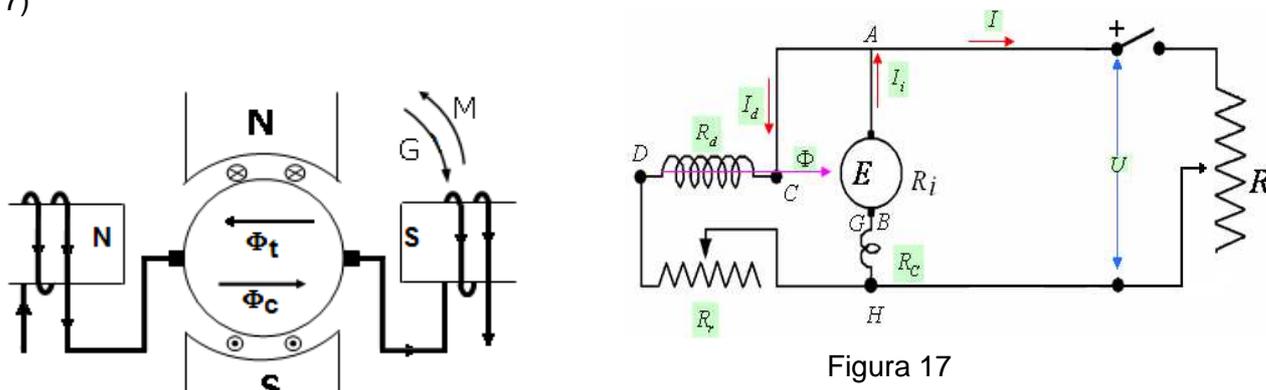


Figura 17

Al estar en serie con el inducido, la misma corriente que creaba ϕ_t , ahora crea ϕ_c , sus módulos varían igualmente y como están en sentido contrario, se anulan para cualquier estado de carga.

Anulado el flujo transversal, se puede volver a colocar las escobillas en la zona neutra geométrica.

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Para que las variaciones de flujo sean siempre proporcionales a las variaciones de corriente, el circuito magnético de los polos de conmutación no se debe saturar, para ello se eligen inducciones bajas ($B \approx 0.5$ Tesla) y entrehierro grandes en estos polos.

Y por último, para crear la Fem de conmutación necesaria, se aprovecha el campo producido en el entrehierro de los polos de conmutación. En efecto, cuando éstos no están (Figura 18) la espira en la zona neutra se desplaza paralelamente a las líneas de campo, por consiguiente no genera.



En cambio, por la presencia de ellos (Figura 19) ahora la espira cortará las líneas de campo en el entrehierro bajo los polos, y generará una Fem. $e = B \cdot l \cdot v$ que podemos aprovechar para que sea igual y opuesta a la $e = -L \cdot di/dt$

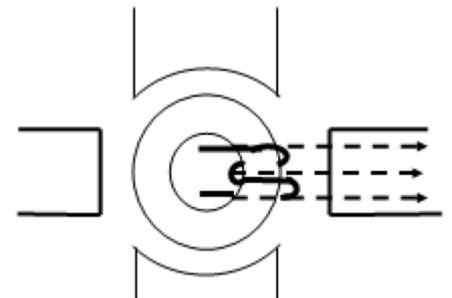


Figura 19

Es de destacar, que no se necesita cambiar la conexión de los arrollamientos de los polos, cuando se invierte el sentido de marcha, lo que se puede comprobar analizando los sentidos en cada caso.-

Esto explica el porqué en la bornera de la máquina en lugar de aparecer los bornes con las designaciones A - B (para el inducido) y G_a - H_a (para los polos de conmutación) solo aparecen A - H pues internamente ya están unidos B con G.-

Aplicaciones: Prácticamente en todas las máquinas modernas.

Arrollamiento de compensación

Los polos de conmutación no alcanzan a eliminar los efectos de la reacción de inducido bajo los polos principales (Figura 21).

Es así, entonces, que para reducir o eliminar el Φ_t no compensado, se adopte lo que se llama, un arrollamiento de compensación.

Se ubica en ranuras practicadas en las piezas Polares (Fig.22). Se conectan en serie con el inducido (Fig. 23) por los mismos motivos expresados para los polos de conmutación.

Deberán ser recorridos por corrientes opuestas a las del inducido, para crear Φ_{comp} opuesto al Φ_t bajo los polos (Fig.22).

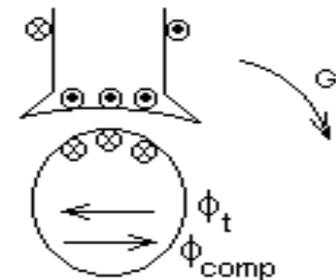


Figura 22



Figura 21

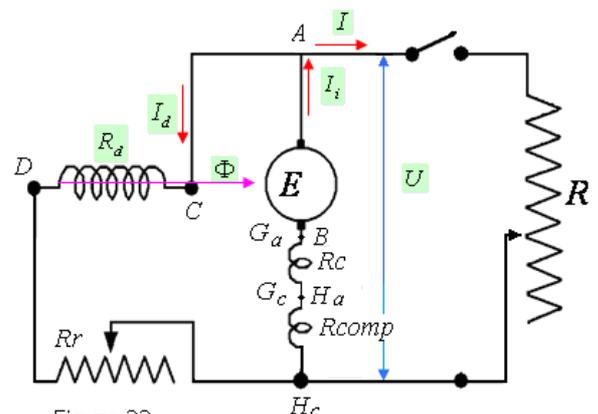


Figura 23

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

APLICACIONES:

En máquinas muy grandes o que se encuentren sujetas a fuertes condiciones de trabajo.

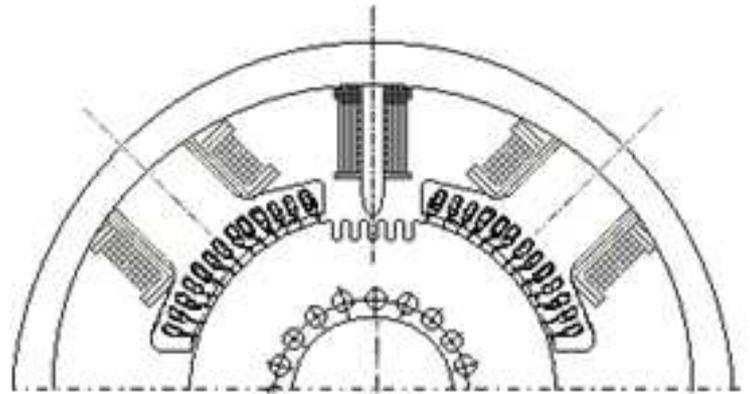


Figura 24

Máquina con polos auxiliares y arrollamiento compensador en las ranuras de las expansiones polares.