

REACCIÓN DE INDUCIDO EN MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Norberto A. Lemozy

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente capítulo es estudiar el origen, los efectos y la corrección de la reacción de inducido o de armadura en las máquinas de corriente continua.

La mayoría de las máquinas eléctricas, salvo los reactores y los electroimanes monofásicos, poseen dos o más arrollamientos y, cuando se encuentran en carga y circulan corrientes por esos arrollamientos cada uno de ellos produce una fuerza magnetomotriz (fmm) que, al combinarse, dan lugar al flujo en la estructura magnética, a las tensiones inducidas, y a las fuerzas y cuplas que originan las acciones ponderomotrices de la máquina.

En la figura 1 se muestra un corte esquemático de una máquina básica de corriente continua de dos polos y se indican sus partes principales:

La *carcasa* completa el circuito magnético y es el órgano estructural a donde se fijan, entre otras cosas, los *polos* y los *escudos* (no indicados) que soportan al *eje* por medio de los *cojinetes*.

Los *polos principales* o *de excitación*, con sus *expansiones polares* y sus *arrollamientos de excitación* de tipo *concentrado*.

El *inducido* o *armadura* con su *arrollamiento de armadura*, de tipo *distribuido*, alojado en *ranuras*, y también se muestran figuradamente las *escobillas* que en realidad apoyan sobre el *colector* (no indicado).

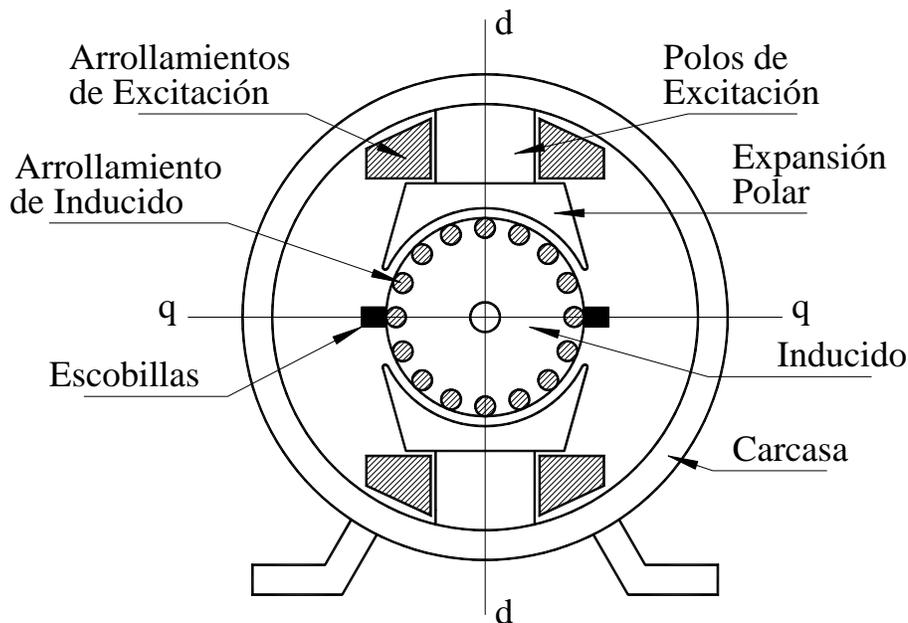


Fig. 1. Corte de una máquina básica.

También se indican el eje *longitudinal* o *directo* $d-d$, definido por los polos de excitación y el eje *transversal* o en *cuadratura* $q-q$, que son ejes de simetría de la máquina.

2 ANÁLISIS CUALITATIVO

A continuación se analizan los *mapas de campo* aproximados que se tienen en una máquina de corriente continua, como la representada en la figura 1 y con la siguiente distribución de corrientes en la excitación y en el inducido. Figura 2.

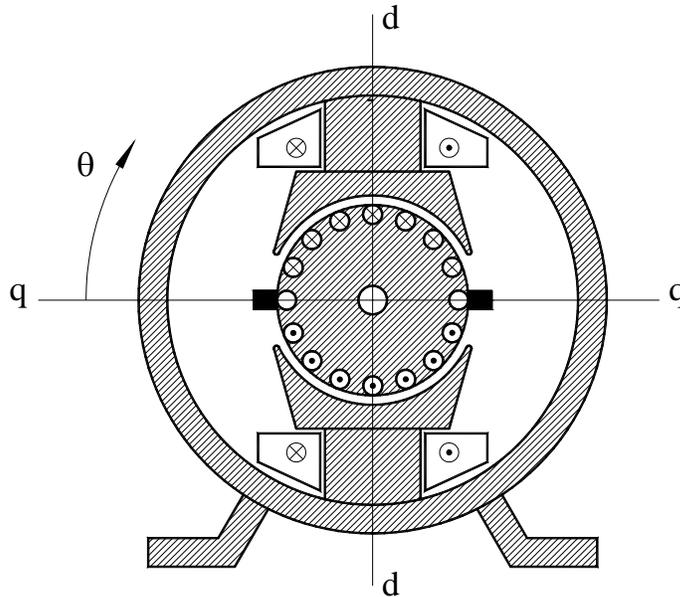


Fig. 2. Corrientes de excitación y de inducido.

El análisis se hará en tres situaciones: cuando hay solamente corriente de excitación I_f , cuando hay solamente corriente en el inducido I_a y cuando están presentes ambas corrientes.

2.1 Campo de excitación

Cuando hay solamente corriente de excitación las líneas de fuerza del campo producido siguen una trayectoria como la mostrada en la figura 3 donde el sentido de la corriente I_f es tal que el polo superior resulta norte y el inferior sur. En la figura se indicó con un vector F_f la dirección dominante de ese campo.

Se puede observar que la *línea neutra magnética*, $n-n$, es decir la recta que une los puntos de campo nulo del inducido, coincide con el eje transversal de la máquina; además la inducción magnética es prácticamente constante bajo los polos y decae en los extremos de las expansiones polares. Esta es la situación que existe en un generador en vacío, y es la distribución de campo que se desea en las máquinas de corriente continua.

2.2 Campo armadura

Si se tiene solamente corriente de armadura I_a , lo que no es una situación normal en las máquinas de corriente continua, se producirá una fuerza magnetomotriz, indicada simbólicamente por el vector F_a , en la dirección definida por las escobillas, figura 4. El sentido de la corriente de armadura se supuso entrante en la mitad superior del inducido y saliente en la otra mitad, por lo tanto el inducido genera un polo norte en su lado izquierdo y un sur en el derecho.

En este caso el campo resultante se cierra principalmente a través de las expansiones polares y también resulta una inducción prácticamente constante en el entrehierro.

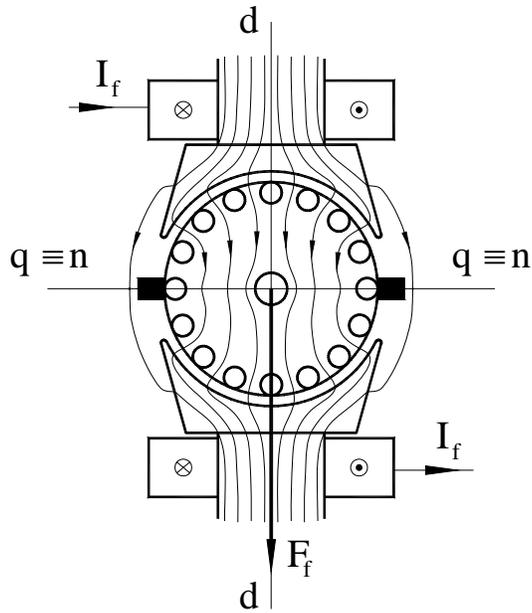


Fig. 3. Campo de excitación.

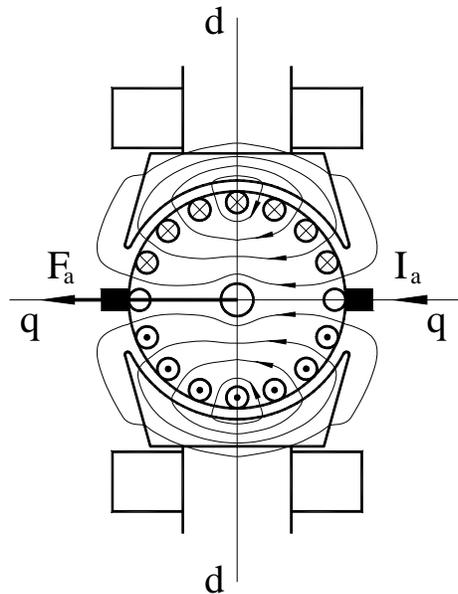


Fig. 4. Campo de armadura.

2.3 Campo resultante

Cuando la máquina de corriente continua se encuentra en carga y hay corriente en la excitación y en el inducido, la fuerza magnetomotriz transversal del inducido distorsiona el campo producido por la excitación, produciendo un campo resultante como se indica aproximadamente en la figura 5, que se aleja de la distribución ideal mostrada en la figura 3.

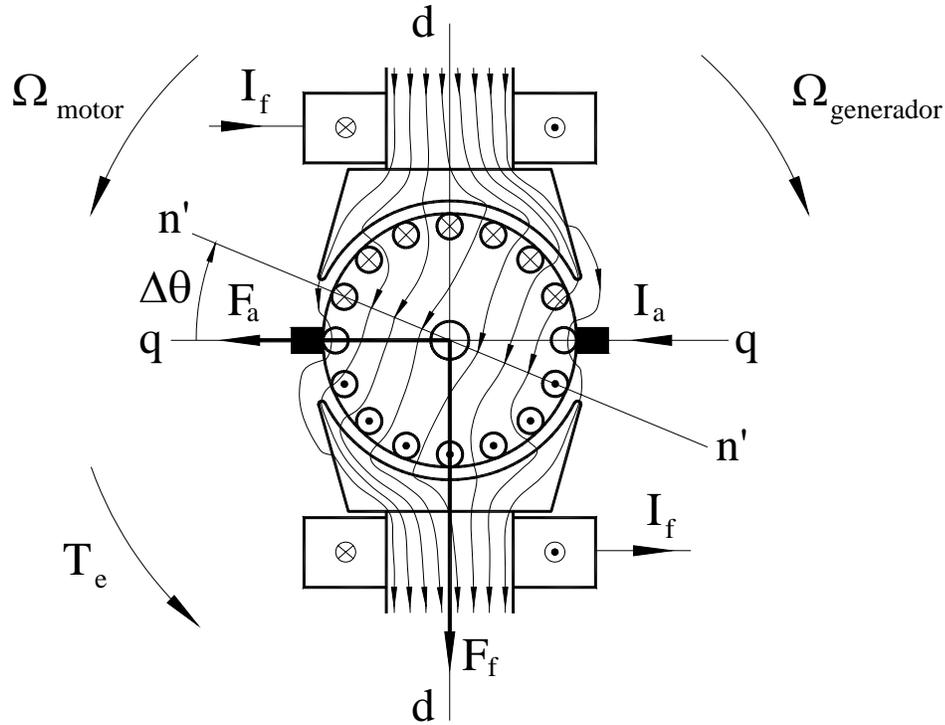


Fig. 5. Campo resultante.

De acuerdo al *principio de alineación*, que establece que las fuerzas magnetomotrices tratan de alinearse, la F_a trata de alinearse con la F_f y se genera una cupla electromagnética en el rotor (inducido) en sentido antihorario, por lo tanto la figura 5 corresponde a un motor girando en ese sentido o a un generador haciéndolo en sentido contrario.

Analizando el campo resultante en la figura 5 se pueden observar dos efectos significativos.

2.3.1 Corrimiento de la línea neutra magnética.

La línea neutra magnética se desplaza un ángulo $\Delta\theta$, en el sentido de giro de un generador, a una nueva posición $n'-n'$. Esto origina problemas de *conmutación* que se traducen en la formación de chispas entre las escobillas y el colector las que erosionan la superficie de este último. Esto se soluciona agregando a la máquina los denominados *polos auxiliares* que se ubican en el eje transversal y su fmm restituye la línea neutra magnética al eje transversal. Figura 7.

Antiguamente las máquinas de cierto porte poseían un mecanismo para poder mover *manualmente* las escobillas a la posición donde se producían menos chispas; pero como esto es función de la carga, podrían requerirse ajustes frecuentes. Además si se mueven las escobillas a una posición próxima a la de la línea neutra magnética, la fmm de armadura genera una componente en el eje longitudinal F_{ad} que se opone a la de excitación, figura 6, lo que es altamente indeseable ya que se reduce la fuerza electromotriz inducida y la cupla electromagnética y puede llevar a los motores a un funcionamiento inestable. Además si se invierte el sentido de giro el efecto es totalmente contrario y se empeora la conmutación.

Por lo expuesto, esta práctica ha sido totalmente abandonada, y una máquina con polos auxiliares bien diseñados conmuta perfectamente para todos los estados de carga sin necesidad de ajustes posteriores.

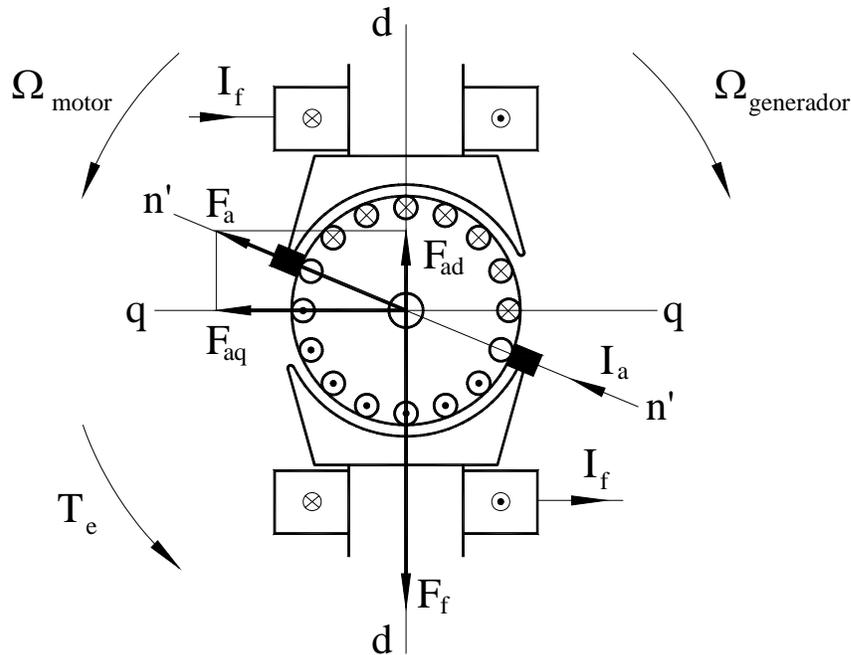


Fig. 6. Fuerza magnetomotriz desmagnetizante.

2.3.2 Distribución no uniforme del flujo bajo la cara polar.

En la figura 5 se puede observar que las líneas de fuerza del campo magnético se concentran en un extremo de la expansión polar y se separan en el otro extremo, esto da lugar a los siguientes efectos, en orden de importancia:

Aumento de la tensión entre las delgas correspondientes a las bobinas que pasan por la zona de alta inducción.

Saturación de ese extremo de la expansión polar.

Aumento de las pérdidas en el hierro en el inducido y en las superficies de las expansiones polares.

La tensión entre delgas que toleran las máquinas a colector es relativamente reducida, ya que ellas se mueven en un ambiente poco favorable: el aire está ligeramente ionizado y hay restos del grafito de las escobillas entre las delgas, en general no debe superar los 20 V. En las máquinas grandes, que poseen un flujo polar importante, y aunque las bobinas tengan una sola espira, este límite se alcanza con bastante facilidad.

En esas máquinas grandes, no es tolerable un aumento de la tensión entre delgas ya que se corre el riesgo de que se generalice un arco eléctrico en toda la superficie del colector, que lo destruiría y se produciría un cortocircuito importante.

La saturación de un extremo de la expansión polar reduce el flujo por polo y consecuentemente la fuerza electromotriz inducida y la cupla electromagnética.

Como las pérdidas en el hierro de la máquina se determinan por medio de un ensayo en vacío, al aumento que se produce en carga, por la reacción de inducido, que no es muy grande; se lo considera como una pérdida adicional de la máquina.

Todos los problemas anteriores se solucionan colocando un arrollamiento distribuido en ranuras en las expansiones polares, denominado *arrollamiento compensador*. Como su

construcción es bastante compleja, se reserva a las máquinas multipolares de gran potencia donde el problema de la tensión entre delgas es crítico. Las máquinas de pocas decenas de kilowatts se las puede diseñar con tensiones entre delgas suficientemente bajas tal que, aunque aumenten, no requieran del arrollamiento compensador que las encarecería.

En la figura 7 se muestra esquemáticamente una máquina como la de la figura 2, con el agregado de los polos auxiliares y del arrollamiento compensador, aunque este último no sería común en una máquina de dos polos. También se indicaron los sentidos de las fuerzas magnetomotrices, y como se puede observar, tanto los polos auxiliares (F_{aux}) como el arrollamiento compensador (F_c) generan fuerzas magnetomotrices opuestas a la de la armadura (F_a).

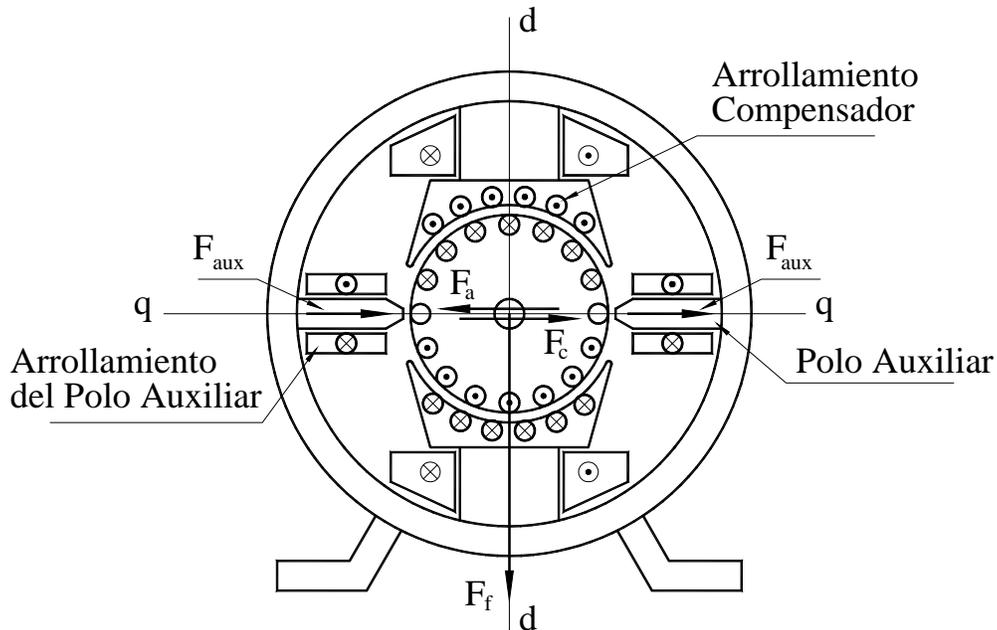


Fig. 7. Máquina compensada.

Como los efectos de la reacción de armadura son proporcionales a la corriente del inducido I_a , los polos auxiliares y el arrollamiento compensador, identificados con las letras GH, se conectan en *serie sustractiva* con el inducido (AB), como se muestra en la figura 8, de forma tal que la corriente I_a entra al inducido por un borne homólogo (A) y sale por el correspondiente de los polos auxiliares (H), para que se resten las fuerzas magnetomotrices. El puente entre los bornes B y G suele ser interno de la máquina y en el tablero de conexiones solamente están presentes los bornes A y H.

Los efectos de la reacción de inducido en una máquina bien diseñada, con polos auxiliares y arrollamiento compensador, son insignificantes y funcionará correctamente en todas las condiciones de carga y velocidad, aún con pequeñas sobrecargas. Una máquina en tales condiciones, se dice que está *totalmente compensada*.

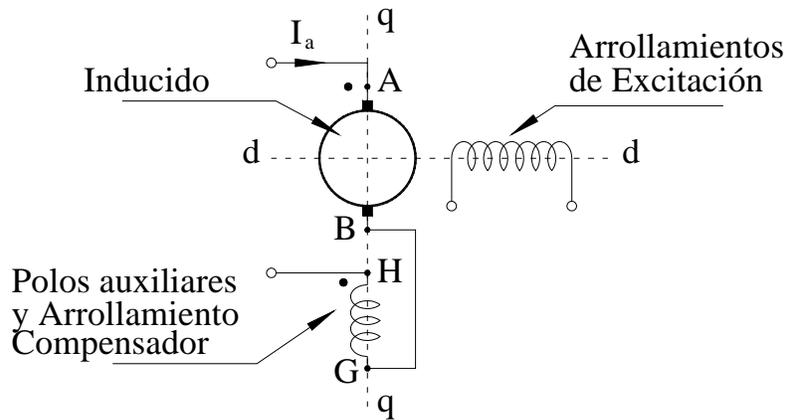


Fig. 8. Conexiones.

3 ANÁLISIS EN BASE A FUERZAS MAGNETOMOTRICES

Una forma más detallada de analizar el fenómeno de la reacción de inducido en las máquinas de corriente continua es estudiar la distribución de las distintas fuerzas magnetomotrices en el entrehierro de la máquina. En una máquina básica, como la mostrada en la figura 2, se encuentran presentes dos fuerzas magnetomotrices: la de excitación y la de armadura.

A fin de facilitar la representación de las fuerzas magnetomotrices, conviene representar a la máquina desarrollada, tomando como eje de abscisas el ángulo θ definido en la figura 2, siguiendo este criterio la máquina de esa figura se vería de la siguiente manera, figura 9.

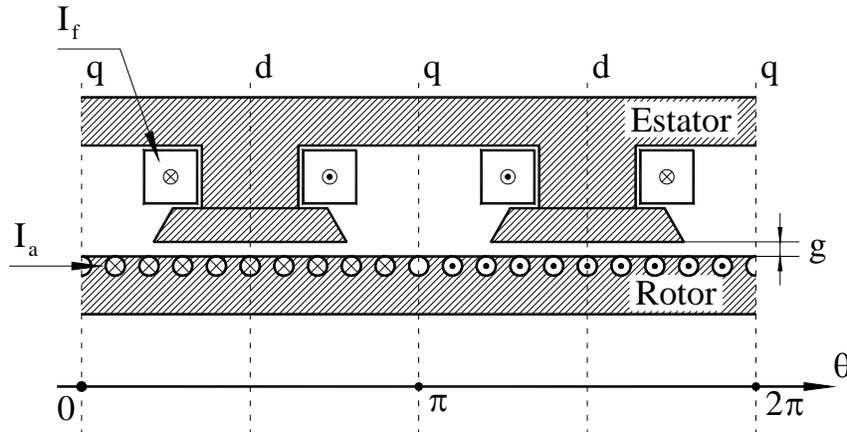


Fig. 9. Máquina desarrollada.

3.1 Fuerza magnetomotriz de excitación

Si se considera solamente la corriente de excitación I_f , se puede obtener la diferencia de potencial magnético que actúa en el entrehierro aplicando la ley de Ampère:

$$\oint H \cdot dl = \int_s J \cdot ds \quad (1)$$

Donde:

- H Campo magnético [A/m]
- dl Diferencial de longitud [m].
- J Densidad de corriente [A/m^2].
- ds Diferencial de superficie [m^2].

Si para evaluar la integral curvilínea se toma como trayectoria una línea de fuerza, los vectores H y los dl tendrán la misma dirección y el producto escalar se transforma en algebraico, si además se supone al hierro infinitamente permeable, el campo H en el mismo será nulo y solamente contribuirá a la integral el campo en el entrehierro. Tomando una trayectoria como la indicada en la figura 10, la fuerza magnetomotriz encerrada por la misma es $2N_f \cdot I_f$ que, por simetría, se reparte mitad en cada entrehierro.

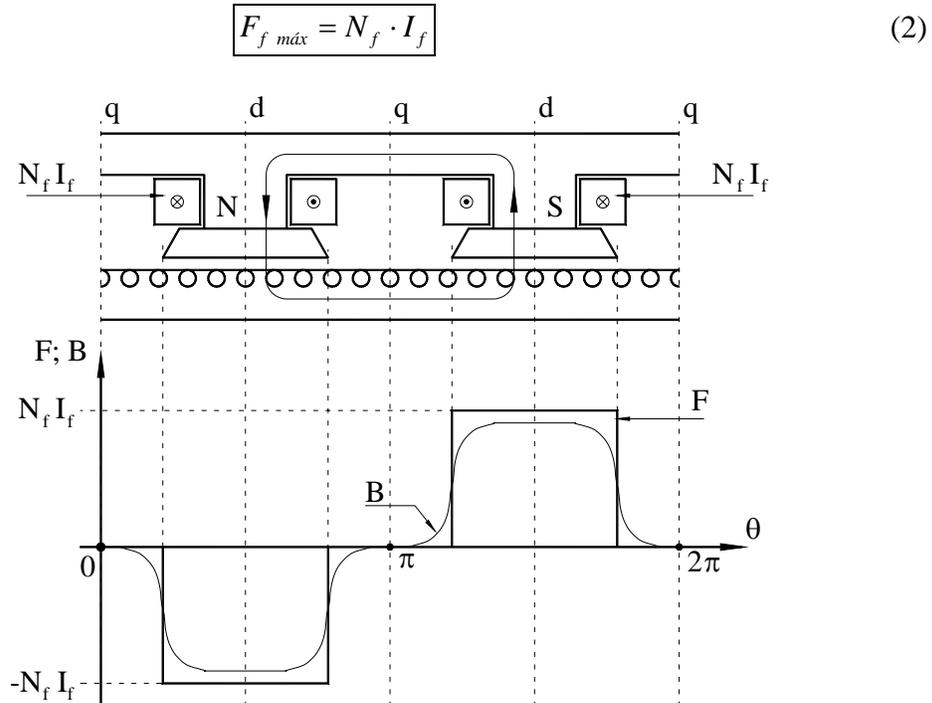


Fig. 10. Fuerza magnetomotriz de excitación.

Al considerar al hierro infinitamente permeable, toda la superficie de la expansión polar será, desde el punto de vista magnético, equipotencial; y se puede suponer, simplídicamente, que fuera de la misma la diferencia de potencial magnético o fuerza magnetomotriz actuante, es nula, resultando una distribución rectangular, como se muestra en el gráfico de la figura 10.

Debido a la dispersión de las líneas de fuerza en los extremos de la expansión polar y a la saturación que se puede originar en los mismos, la inducción magnética B sigue una distribución más redondeada. En la figura 10 se muestra aproximadamente como podría ser esta curva.

La mejor manera de obtener la distribución de inducción en el entrehierro es resolver las ecuaciones del campo utilizando algún método de cálculo numérico, como por ejemplo el de los elementos finitos, considerando la geometría de la máquina, la permeabilidad de sus distintas partes y las corrientes en los arrollamientos.

3.2 Fuerza magnetomotriz de armadura

Los inducidos, salvo en máquinas muy pequeñas, poseen una considerable cantidad bobinas y éstas se encuentran uniformemente distribuidas en la superficie del mismo, esta situación se aproxima mucho a una capa de corriente. Como la corriente de inducido I_a se reparte en las ramas en paralelo del mismo, si se llama a al número de *pares de ramas en paralelo*, la corriente en cada rama será:

$$\frac{I_a}{2a} \quad (3)$$

Si Z es el número total de conductores del inducido y D el diámetro del mismo, la densidad lineal de corriente en la superficie del inducido será:

$$A = \frac{Z}{\pi D} \frac{I_a}{2a} \text{ [A/m]} \quad (4)$$

Esta densidad lineal de corriente, en las máquinas grandes puede ser de varias decenas de kA por metro de perímetro del inducido.

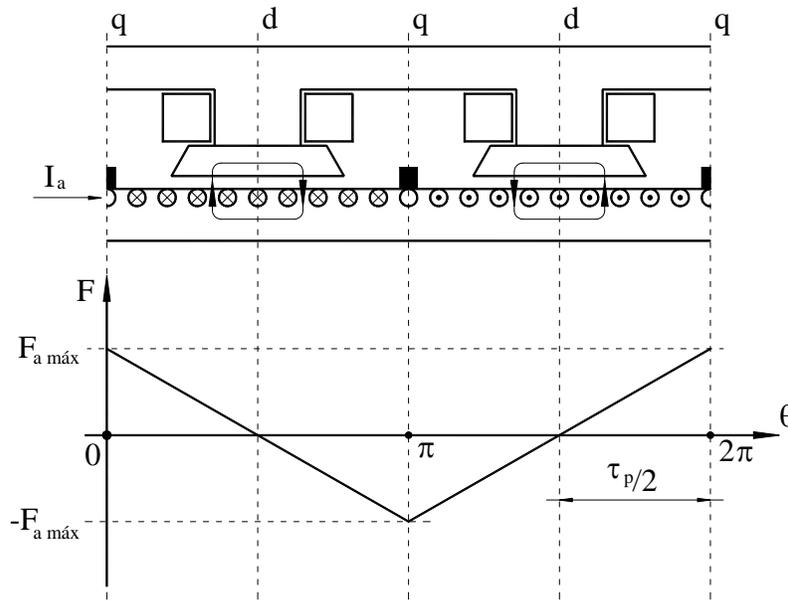


Fig. 11. Fuerza magnetomotriz de armadura.

Como ya se mostró en la figura 4 las líneas de fuerza del campo producido se cierran principalmente a través de las expansiones polares. Si se presenta la máquina desarrollada y se hacen circulaciones como las indicadas en la figura 11, la fuerza magnetomotriz encerrada será proporcional a la longitud de la capa de corriente que se encuentra dentro de esas trayectorias.

Al suponer infinita la permeabilidad del hierro, el campo H en el mismo es nulo y esa fmm se reparte por mitades en el entrehierro. Además como la corriente está uniformemente distribuida en la superficie del inducido, la variación de la fmm es lineal.

Los máximos de esa fmm se encuentran sobre el eje transversal q y su valor se puede calcular sumando los Ampère vuelta que producen los conductores del inducido que se encuentran desde el eje longitudinal d , hasta el eje transversal q , es decir medio paso polar.

La cantidad de conductores en medio paso polar será:

$$\frac{1}{2} \frac{Z}{2p} \quad (5)$$

Multiplicando esos conductores por la corriente en cada uno de ellos, dada por la expresión (3), se tiene el valor máximo de la fmm de armadura:

$$F_{a \text{ máx}} = \frac{1}{8} \frac{Z}{ap} I_a = A \frac{\tau_p}{2} \quad (6)$$

Si bien esa fmm puede ser importante, como actúa en el eje transversal, donde el entrehierro es grande, los valores de inducción que desarrolla no son grandes, pero sus efectos no son nulos, como sería de desear, y la línea neutra magnética se desplaza.

3.3 Fuerza magnetomotriz resultante

Si se tienen simultáneamente las corrientes de excitación y de armadura, la fmm resultante será la suma de las representadas en las figuras 10 y 11 y se indica en la figura 12.

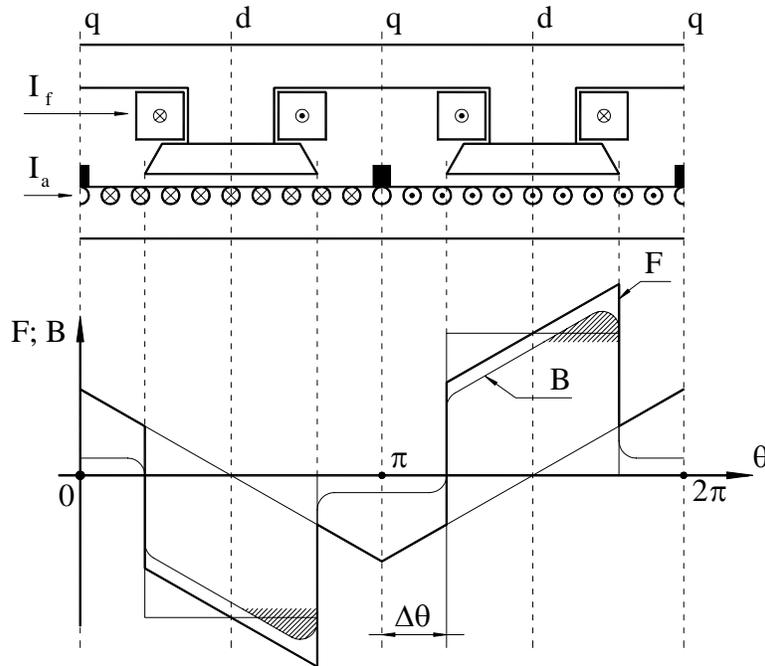


Fig. 12. Fuerza magnetomotriz resultante.

Teniendo en cuenta el valor del entrehierro en cada punto, se puede inferir aproximadamente como sería la curva de inducción B , la que pasará por cero donde la fmm resultante también lo es, puntos que se encuentran desplazados $\Delta\theta$ del eje transversal, lo que desmejora la conmutación.

También se observa que en un extremo de cada expansión polar la inducción se reduce y en el otro crece. Si las expansiones trabajaran en la zona lineal de la curva de magnetización del hierro, la reducción que se produce en un lado se compensaría con el incremento que se produce en el otro y el flujo por polo permanecería constante. Pero en la práctica las expansiones polares de las máquinas, es especial las de mediana a gran potencia, se diseñan próximas a la saturación, y el extremo más exigido por la reacción de armadura se satura y la inducción crece menos de lo esperado, como se indica la figura 12 con un rayado, y el flujo por polo se reduce, con la consecuente reducción de la fuerza electromotriz inducida y de la cupla electromagnética.

3.4 Polos auxiliares

A fin de no desmejorar la conmutación, se debe anular el campo resultante en eje transversal de la máquina y mantener la línea neutra en esa posición, para lo cual, como ya se dijo, se colocan los polos auxiliares, según se muestra en la figura 7. En principio esos polos auxiliares

deberían producir una fmm igual al valor máximo de la fmm de la armadura $F_{a \text{ máx}}$, figura 13, pero como se verá al estudiar el fenómeno de la conmutación, al invertirse el sentido de circulación de la corriente en las bobinas de la armadura que están conmutando y debido a las inductancias presentes, aparece una tensión inducida, denominada *tensión de reactancia*, que también empeora la conmutación. Esa tensión de reactancia se puede compensar con los polos auxiliares para lo cual se incrementa su fmm en un valor ΔF_{aux} , lo que se indica con un rayado en la figura 13.

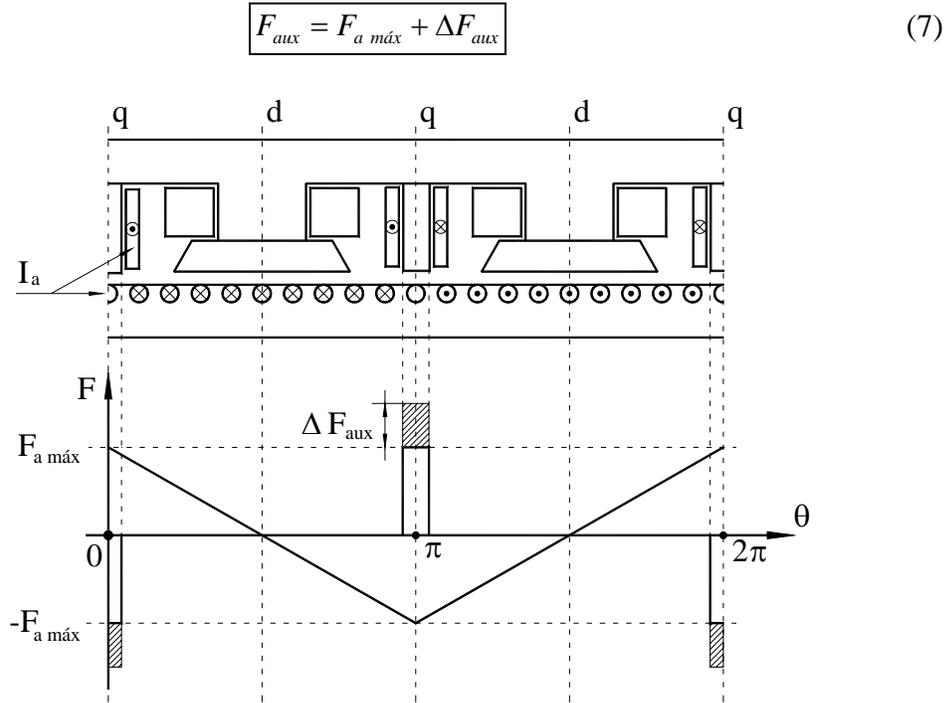


Fig. 13. Fuerza magnetomotriz de los polos auxiliares.

3.5 Arrollamiento compensador

Como ya se dijo, para evitar los inconvenientes producidos por la distribución no uniforme de la inducción en la zona polar, se coloca el arrollamiento compensador mostrado esquemáticamente en la figura 7. El arrollamiento compensador debe producir una fmm igual y opuesta a la que la armadura produce en esa zona, de forma tal que al sumarlas den una resultante nula y no se altere la fmm de excitación, figura 14.

Si el ancho de la expansión polar es b_p la fmm máxima del arrollamiento compensador resulta:

$F_{c \text{ máx}} = \frac{b_p}{\tau_p} F_{a \text{ máx}}$
(8)

La presencia del arrollamiento compensador reduce la fmm necesaria en los polos auxiliares, en efecto al valor dado por la expresión (7) se le puede descontar la (8):

$F_{aux} = \left(1 - \frac{b_p}{\tau_p}\right) \cdot F_{a \text{ máx}} + \Delta F_{aux}$
(9)

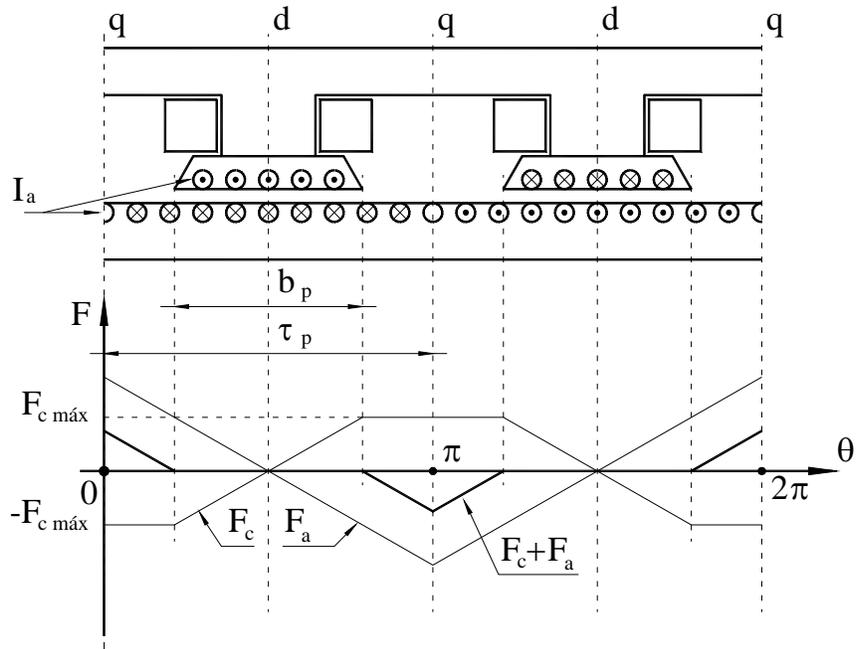


Fig. 14. Fuerza magnetomotriz de compensación.

4 CONCLUSIONES

Los efectos indeseables de la necesaria reacción de inducido son más críticos cuanto mayor es la potencia de las máquinas. Las de menor potencia admiten un grado de sobredimensionamiento que hace innecesaria la compensación, a partir de unos pocos kilowatts resulta conveniente colocarle polos auxiliares y en las de mayor porte, algunas decenas de kilowatts, se les agrega el arrollamiento compensador, ya que el diseño es más ajustado y el sobredimensionamiento resulta muy costoso. Una máquina de corriente continua bien diseñada, mantenida y utilizada, funcionará correctamente y tendrá una vida útil que seguramente cubre las mejores expectativas.

5 BIBLIOGRAFÍA

Manuel Cortés Cherta: “Curso Moderno de Máquinas Eléctricas Rotativas” Tomo II Máquinas de Corriente Continua. Editores Técnicos Asociados S. A., 1972.

M. P. Kostenko y L. M. Piotrovski: “Máquinas Eléctricas” Volumen I, Montaner y Simon S. A., 1979.

Michael Liwshitz-Garik y Clyde C. Whipple: “Máquinas de Corriente Continua” Compañía Editorial Continental CECSA, 1972.

Alexander S. Langsdorf: “Principles of Direct Current Machines” Editorial Mac. Graw Hill, 1959.

Juan Corrales Martín: “Cálculo Modular de Máquinas Eléctricas” Editorial Marcombo, 1994.