TEMA 38

MÁQUINAS DÍNAMO-ELÉCTRICAS

38.1. PRINCIPIO Y CONSTITUCIÓN.

Las máquinas dínamo-eléctricas son sistemas rotativos que transforman, de una manera reversible, energía mecánica en energía eléctrica continua.

Si el dispositivo transforma energía mecánica en eléctrica, recibe el nombre genérico de *dínamo*, y si transforma energía eléctrica en mecánica, recibe el nombre genérico de *motor de corriente continua.*

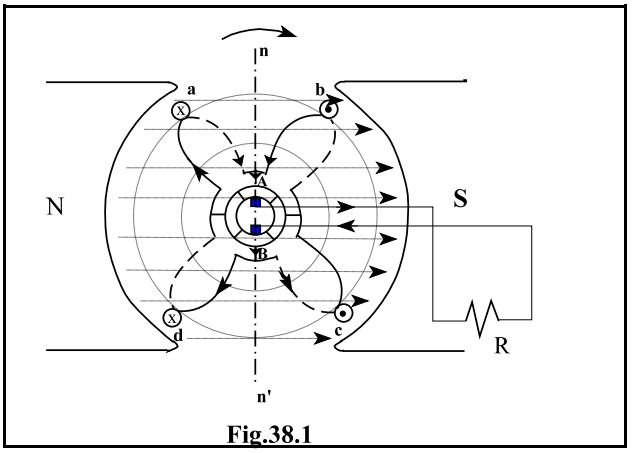


Fig.38.1

Supongamos que tenemos una dínamo tal como se indica en la Fig.38.1.

El campo magnético lo crean dos piezas polares **N** y **S**. En el seno del campo magnético existe un rotor que gira, según se indica en la Fig.38.1, en el sentido de las agujas del reloj. Si suponemos que la dínamo tiene cuatro espiras desfasadas **90º**, y que se encuentran unidas entre sí formando un circuito cerrado, el sentido de circulación de la corriente es el indicado en la figura.

El valor de la fuerza electromotriz inducida viene dada por la *Ley de Faraday*, y las corrientes que circulan por las espiras se comportarán de acuerdo con la *Ley de Lenz*. Así, en las espiras **a** y **c**, que en su movimiento tienden a aumentar el flujo cortado, las corrientes inducidas crearán flujos contrarios a los que crean las piezas polares, sin embargo, en las espiras **b** y **d**, en las que los flujos tienden a disminuir, las corrientes crearán flujos del mismo sentido que los creados por las piezas polares.

Conviene resaltar que el sentido de la fuerza electromotriz cambia en cada espira dos veces por revolución. La línea que marca el cambio de sentido de la fuerza electromotriz recibe el nombre de *línea neutra*, y en la Fig.38.1 está señalada como **n-n'**.

Por simetría se verifica:

$$e_a = e_c \quad y \quad e_b = e_d \tag{38.1}$$

En consecuencia, en el circuito interior de la dínamo, la fuerza electromotriz es nula.

La unión de espiras contiguas se realiza mediante una pieza que recibe el nombre de *delga*, que forma parte de un *colector*, el cual gira solidario con el rotor.

El circuito exterior se conecta al colector mediante dos piezas denominadas *escobillas*, que rozan de forma permanente con él mismo.

La fuerza electromotriz entre escobillas, en cada instante es:

$$e = e_a + e_d = e_b + e_c \tag{38.2}$$

Las fuerzas electromotrices en las espiras son alternas senoidales, pero debido al sistema *delgas-escobillas* quedan rectificados, y en consecuencia tienen el mismo sentido. La fuerza electromotriz resultante está representada en la Fig.38.2. Conviene señalar que dicha fuerza electromotriz varía entre los límites **h** y **H (h + h')**, pero si en lugar de disponer de cuatro espiras se dispusiese de mayor número, la diferencia **h'** disminuiría hasta llegar a ser despreciable con un número suficientemente grande de espiras.

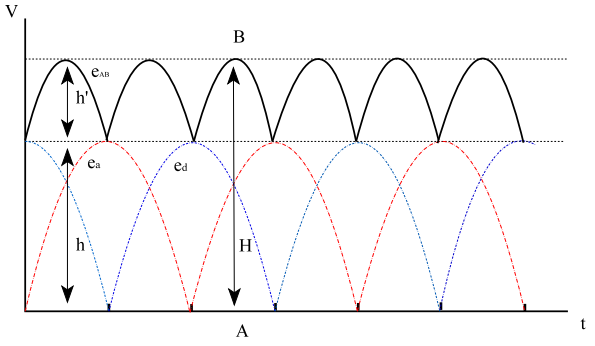


Fig.38.2

La dínamo descrita se puede sustituir por un circuito equivalente constituido por cuatro generadores conectados según se indica en la Fig.38.3. En dicha figura, cada generador equivale a una espira en rotación con velocidad angular **ω**. El conjunto **a-d** es una derivación que suministra toda la fuerza electromotriz, y por la que circula la mitad de la corriente que absorbe el receptor.

De lo que se acaba de ver, se pueden considerar los elementos que constituyen el generador de corriente continua, tal como se describen a continuación:

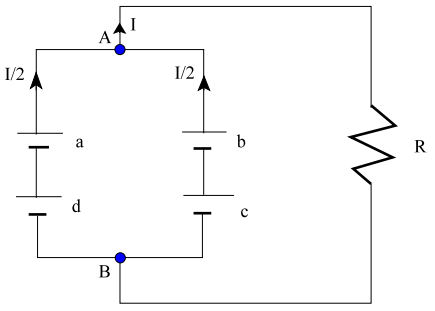


Fig.38.3

1º.- **Estator**: Es la parte destinada a producir el campo magnético inductor. Está constituida por:

1.1. *Yugo o culata:* Corona de material ferromagnético, en cuyo interior están distribuidos los núcleos polares.

1.2. *Bobinas inductoras:* Rodean a las piezas polares encargadas de producir el flujo magnético en cuyo seno se mueve el rotor.

2º.- **Rotor**: Es la parte móvil de la máquina, Está constituida por:

2.1. *Núcleo ferromagnético:* Láminas con ranurado en la superficie externa.

2.2. *Devanado inducido:* Conjunto de conductores que forman las espiras y las conexiones de éstas entre sí, y con el colector.

3º.- **Colector de delgas**: Está constituido por cierto número de láminas de cobre duro, aisladas unas de otras. Forma un bloque cilíndrico. Las láminas se llaman *delgas*.

4º.- **Escobillas**: Frotadores que apoyan directamente en el colector. Es por donde entra y sale la corriente en la máquina. Tienen un signo que las diferencia; positiva (+), y negativa (-). Por la positiva sale la corriente del generador.

5º.- **Entrehierro**: Se designa así al espacio comprendido entre el inducido y las piezas polares.

Las dínamos tienen **2p** polos (siendo **p** el número de pares de polos).

En la Fig.38.4 se han representado **2** pares de polos en una dínamo de **2p** polos.

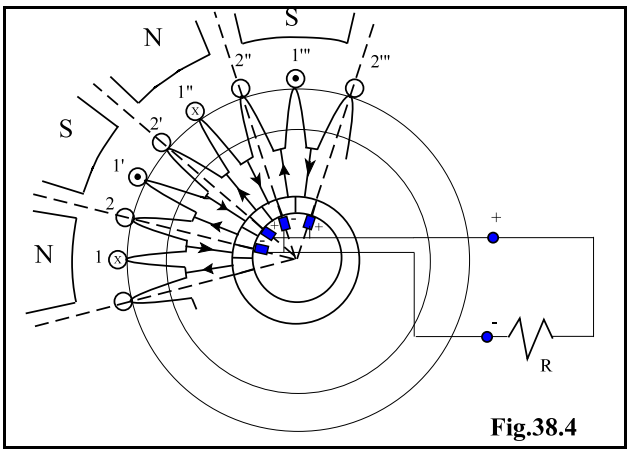


Fig.38.4

Entre cada dos polos contiguos existe una línea neutra, por tanto en la dínamo de la Fig.38.4 habrá **2p** líneas neutras.

Cuando una espira pasa por una línea neutra cambia en ella el sentido de la fuerza electromotriz inducida. Según esto, en la espira se produce una onda completa de la fuerza electromotriz inducida cuando pasa por una par de polos contiguos. La onda se repetirá tantas veces como pares de polos existan.

En cada línea neutra habrá colocada una escobilla, por lo tanto la dínamo de **2p** polos, tendrá **2p** escobilla; la mitad positivas y la otra mitad negativas.

Las escobillas positivas están unidas entre sí, lo mismo ocurre con las negativas. El inducido tiene dos terminales; uno positivo, al cual van unidas todas las escobillas positivas, y otro negativo, al cual van unidas todas las negativas.

La fuerza electromotriz que aparece en los terminales del inducido es la misma que la que aparece entre cada escobilla positiva y negativa, y ésta es la suma de la que existe entre dos escobillas; positiva y negativa, contiguas.

En la Fig.38.4 se verifica:

$$e = e_1 + e_2 = e_1' + e_2' = e_1'' + e_2'' = \cdots \qquad (38.3)$$

En consecuencia se han formado **2p** derivaciones, cada una de ellas con idéntico valor de la fuerza electromotriz

Se puede establecer un circuito eléctrico equivalente constituido por **2p** conjuntos de **2** generadores en serie, conectados en derivación tal como se indica en la Fig.38.5, por cada rama circulará una intensidad **I/2p**, valor idéntico al que circula por cada dos espiras contiguas conectadas entre polos contiguos; positivo y negativo.

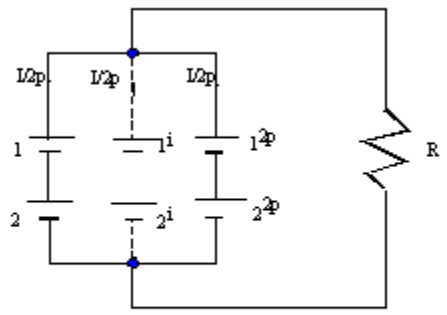


Fig.38.5

En resumen, en la dínamo de **2p** polos tenemos(Fig.38.4):

- ☞ 2p escobillas.
- ☞ 2p derivaciones.

La corriente que suministra la dínamo es **2p** veces mayor que la que pasa por cada espira.

Se entiende por:

Elemento de devanado o bobina: El conjunto de espiras que forma el devanado.

Haz activo de una bobina: La parte de la misma que corta las líneas de inducción.

Sección del devanado: La parte del devanado comprendido entre dos láminas del colector. La sección del devanado es el conjunto de espiras que se recorre cuando, partiendo de una lámina del colector, se acaba en la otra lámina.

Derivación: Conjunto de secciones conectadas en serie que se recorren entre dos escobillas consecutivas de signo contrario.

38.2. FUERZA ELECTROMOTRIZ DE UNA DÍNAMO.

Sea una dínamo con inducido constituido por **n** conductores activos. Este conjunto de conductores está agrupado en haces activos. Existen **2c** derivaciones y **2p** polos.

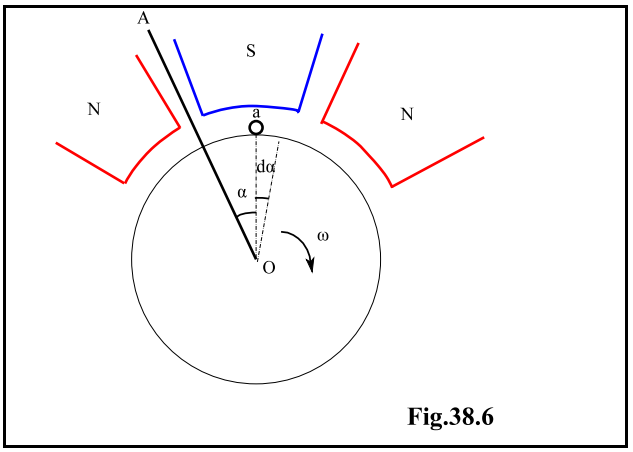


Fig.38.6

Supongamos que un conductor activo **a** se encuentra en la posición **α**, respecto a un origen cualquiera.

El rotor gira a una velocidad uniforme **N** (r.p.s), por tanto la velocidad angular será:

$$\omega = 2.\pi.N \quad (rd.s^{-1}) \tag{38.4}$$

En un tiempo **dt** el conductor recorre **dα** cortando un flujo **dΦ**. La fuerza electromotriz inducida, dada por la Ley de Faraday es:

$$e_c = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{38.5}$$

Si se supone que la inducción magnética es **B** y el conductor tiene una longitud ***l***.

$$e_c = B.l.v \tag{38.6}$$

(1)

Siendo **v** su velocidad tangencial.

$$v = \omega.r \tag{38.7}$$

Por tanto sustituyendo (38.4) en (38.7), y éste a su vez en (38.6) resulta:

$$e_c = B.l.2.\pi.N.r \tag{38.8}$$

Si los conductores se supone que están uniformemente distribuidos en el inducido, en **dα** habrá **(n/2.π).dα** conductores activos.

La fuerza electromotriz inducida en ellos será:

$$de' = \frac{n}{2.\pi}.d\alpha.e_c \tag{38.9}$$

---

1 $d\,e_c = (\bar{B} \wedge d\bar{l}).\bar{v}$

Sustituyendo (38.8) en (38.9) resulta:

$$de' = n.N.B.l.r.d\alpha \qquad (38.10)$$

Integrando (38.10) tendremos la fuerza electromotriz total del inducido.

$$E' = n.N\int_0^{2\pi} B.l.r.d\alpha \qquad (38.11)$$

$$\int_0^{2\pi} B.l.r.d\alpha = 2.p.\Phi \qquad (38.12)$$

Si existen **2p** polos, y el flujo por cada polo es **Φ**, se cumplirá:

En consecuencia:

$$E' = n.N.2.p.\Phi \qquad (38.13)$$

El cálculo se ha hecho para él supuesto que los **n** conductores activos estén conectados en serie. Como existen **2c** derivaciones, en cada una de ellas existen **n/2c** conductores. La fuerza electromotriz de una dínamo es la que corresponde a cada una de las derivaciones, o sea:

$$E = \frac{E'}{2c} = n.N.\Phi.\frac{p}{c} \qquad (38.14)$$

Esta es la expresión de la fuerza electromotriz inducida en una dínamo.

38.3. RESISTENCIA INTERIOR DE UNA DÍNAMO.

La resistencia interna de una dínamo es igual a las correspondientes al devanado $\mathbf{R_d}$, a las que hay que agregar las correspondientes a las escobillas $\mathbf{R_e}$, más la del contacto del colector con éstas últimas, $\mathbf{R_c}$.

Llamando $\mathbf{R_i}$ a la resistencia interna de la dínamo, se tiene:

$$R_i = R_d + R_e + R_c \qquad (38.15)$$

Supongamos que la resistencia de todo el hilo del devanado del inducido es **R**, como existen **2c** derivaciones, la resistencia de cada derivación será **R/2c**, por tanto la resistencia equivalente de las derivaciones, al estar las mismas en paralelo, es:

$$\frac{1}{R_d} = \frac{2.c}{\frac{R}{2.c}} = \frac{4.c^2}{R} \qquad (38.16)$$

Despejando $\mathbf{R_d}$ de (38.16) resulta:

$$R_d = \frac{R}{4.c^2} \qquad (38.17)$$

Sustituyendo (38.17) en (38.15) resulta:

$$R_i = \frac{R}{4.c^2} + R_e + R_c \qquad (38.18)$$

38.4. REACCIÓN MAGNÉTICA DEL INDUCIDO.

Según se ha visto en los apartados anteriores, la fuerza electromotriz que se induce en una dínamo es proporcional al flujo por polo del inductor.

Cuando la máquina funciona en carga, la corriente que circula por el inducido produce, a su vez, una fuerza magnetomotriz cuyo efecto consiste en disminuir el flujo útil por polo, con relación al que existe cuando la máquina trabaja en vacío. Por tanto, la dínamo en carga tiene un flujo por polo menor que en vacío, y en consecuencia la fuerza electromotriz en carga disminuirá.

Dos son las causas por las que la tensión en bornes de una dínamo en carga, es menor que la que existe en vacío:

1ª) La fuerza magnetomotriz que produce el inducido da lugar a una disminución del flujo útil por polo (reacción del inducido).

2ª) La caída de tensión en el inducido, debido al paso de la corriente por él.

Supongamos que existen un par de polos de una dínamo multipolar y se construye un diagrama rectificado de la sección.

La onda $\mathbf{B_i}$ que produce el par de polos considerado, está representada en la Fig.38.7 como **(a)**. Se trata de una onda simétrica.

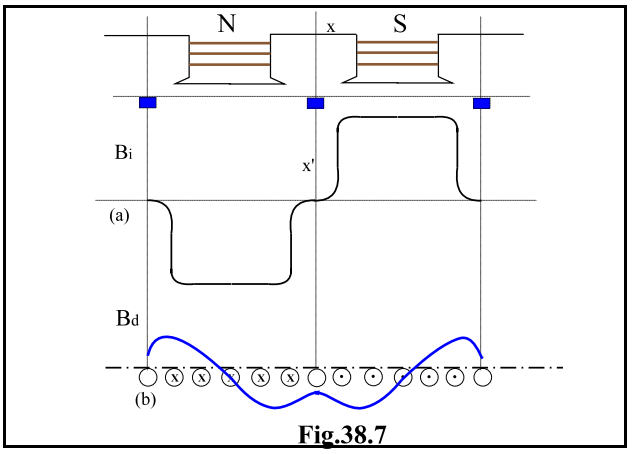


Fig.38.7

Las escobillas están situadas en las líneas neutras, entre cada dos polos contiguos, y es en estas líneas donde cambia de sentido la corriente en los conductores que constituyen el inducido.

En la Fig.38.7 se representa el conjunto de conductores del inducido situados frente a los dos polos magnéticos. El conjunto de haces equivale a una bobina de eje **x-x'**, que produce un campo magnético cuya inducción $\mathbf{B_d}$ está representada por la curva **(b)** de la figura. Esto es lo que se conoce como *la reacción del inducido*.

En la Fig.38.8 se ha representado mediante la curva **(c)**, el resultado de sumar la inducción del inductor con la reacción del inducido. Como se puede apreciar la onda resultante está distorsionada, aumentando el valor de la inducción en un extremo de la pieza polar y disminuyendo en el otro.

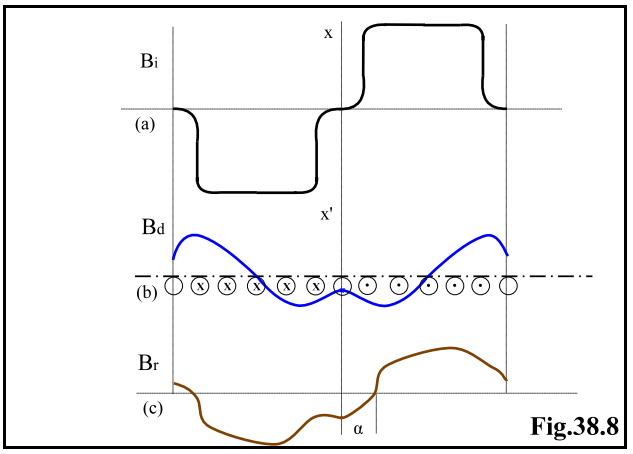


Fig.38.8

El circuito magnético de la máquina está normalmente saturado. Según esto, el aumento de la inducción, que se produce al sumarse las fuerzas magnetomotrices de inductor e inducido, es menor que la disminución, que se produce al restarse. Esto significa que el valor resultante $\mathbf{B_r}$, no es el que se corresponde con una suma algebraica de $\mathbf{B_i}$ y $\mathbf{B_d}$, si no que produce valores menores debido a la saturación con la que trabaja el circuito magnético.

Como resumen se puede decir que, el flujo útil por polo disminuye como consecuencia de la reacción magnética del inducido, y por tanto la fuerza electromotriz inducida en la dínamo en carga es menor que la que se induce en vacío.

38.5. REACCIÓN LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL DEL INDUCIDO.

Debido a la reacción del inducido, la inducción magnética $\mathbf{B_r}$ no toma el valor cero en la línea neutra **x-x'**, si no que lo alcanza después de un desplazamiento **α**, Fig.38.9

En consecuencia, tendrían que adelantarse las escobillas respecto a la línea neutra teórica, si se pretende que dicha línea coincida con el punto en que el valor de la inducción magnética $\mathbf{B_r}$ es nulo.

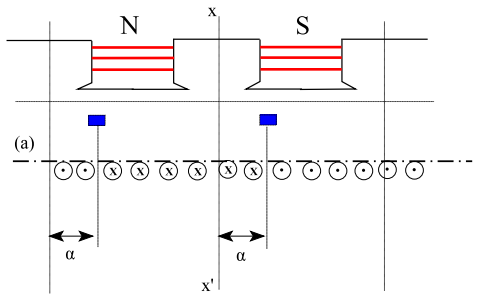


Fig.38.9

Al desplazar la línea neutra, el conjunto de conductores forman ahora dos bobinas, una representada por **(b)**, Fig.38.10, que produce una fuerza magnetomotriz transversal, y otra representada por **(c)**, Fig.38.11, que produce una fuerza magnetomotriz longitudinal, al enfrentarse a los polos inductores. La primera da lugar a la *reacción transversal* y la segunda a la *reacción longitudinal* del inducido.

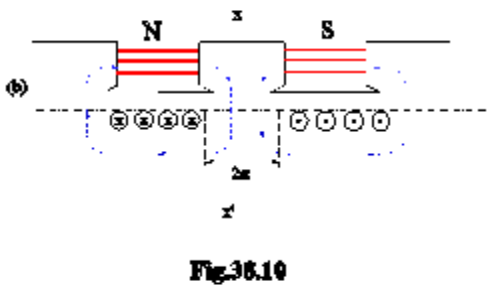


Fig.38.10

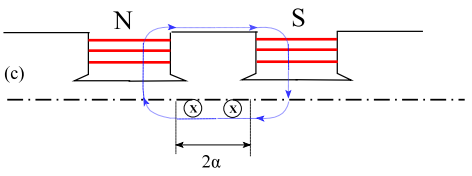


Fig.38.11

38.6 PÉRDIDA DE ENERGÍA EN UNA DÍNAMO.

Al igual que en cualquier otro dispositivo en que se transforma energía, en las dínamos existen unas pérdidas, que se pueden resumir de la siguiente forma:

1º) *Pérdidas mecánicas:* Debidas a rozamientos: en los cojinetes, en las escobillas con el anillo colector, y con el aire.

2º) *Pérdidas en el hierro:* Originadas en el inducido por histéresis y corrientes de Foucault[2]. Las pérdidas por histéresis se aminoran eligiendo el hierro para la construcción del núcleo de forma apropiada.

3º) *Pérdidas en el cobre:* Son las pérdidas que se producen por Joule, tanto en el inductor como en el inducido.

[2]Con objeto de disminuir en lo posible las pérdidas por Foucault, se construyen los núcleos de los inducidos con chapas de hierro aisladas entre sí.