

MOTOR MONOFÁSICO DE INDUCCIÓN

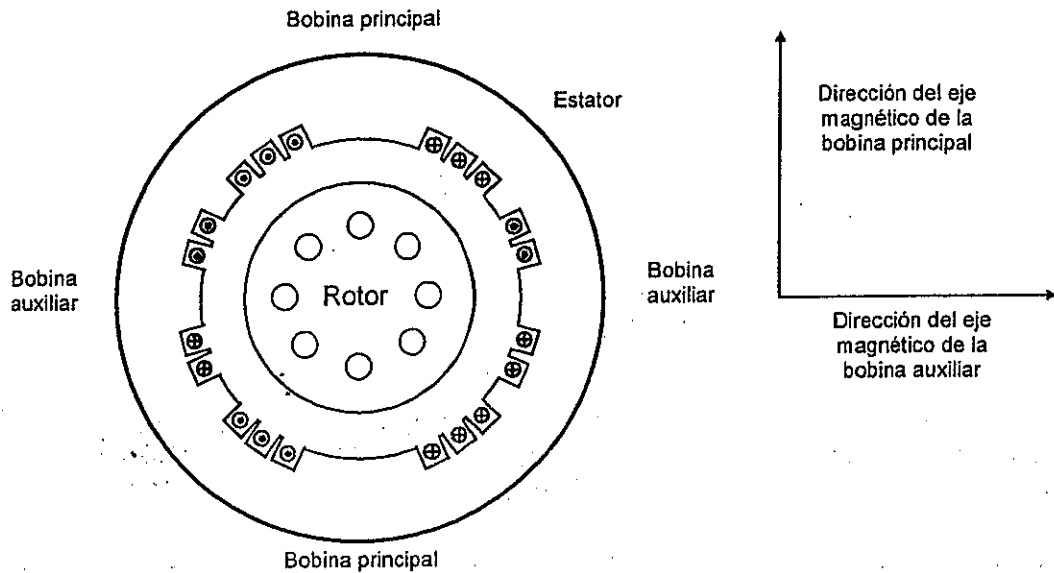


Figura 10.5 Corte de un motor monofásico con fase partida

Las bobinas presentan resistencia óhmica y reactancia, pudiéndose plantear los siguientes casos:

Bobinas principal y auxiliar con igual relación resistencia reactancia

En esta situación las corrientes que circulan por ambos bobinados se encuentran en fase, lo cual se ha representado en la figura 10.6.

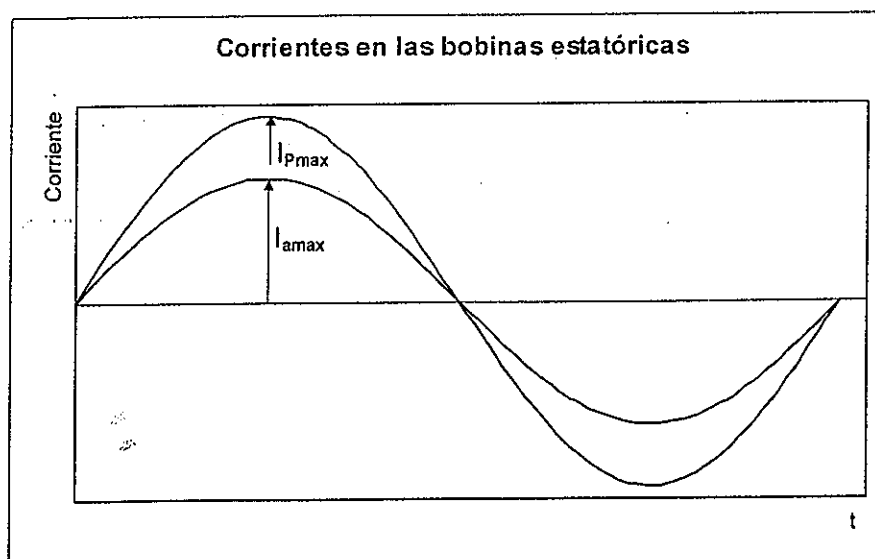


Figura 10.6 Corrientes en las bobinas estáticas con igual relación resistencia-reactancia

Efectuemos un análisis de la composición de las fuerzas magnetomotrices, que se producen en los bobinados para los siguientes instantes:

$t = 0^\circ$	$i_p = 0 \ i_{pmax}$	$i_a = 0 \ i_{amax}$
$t = 45^\circ$	$i_p = 0,707 \ i_{pmax}$	$i_a = 0,707 \ i_{amax}$
$t = 90^\circ$	$i_p = i_{pmax}$	$i_a = i_{amax}$
$t = 135^\circ$	$i_p = 0,707 \ i_{pmax}$	$i_a = 0,707 \ i_{amax}$
$t = 180^\circ$	$i_p = 0 \ i_{pmax}$	$i_a = 0 \ i_{amax}$

Si graficamos las fuerzas magnetomotrices y su resultante obtenemos el grafico de la figura 10.7.

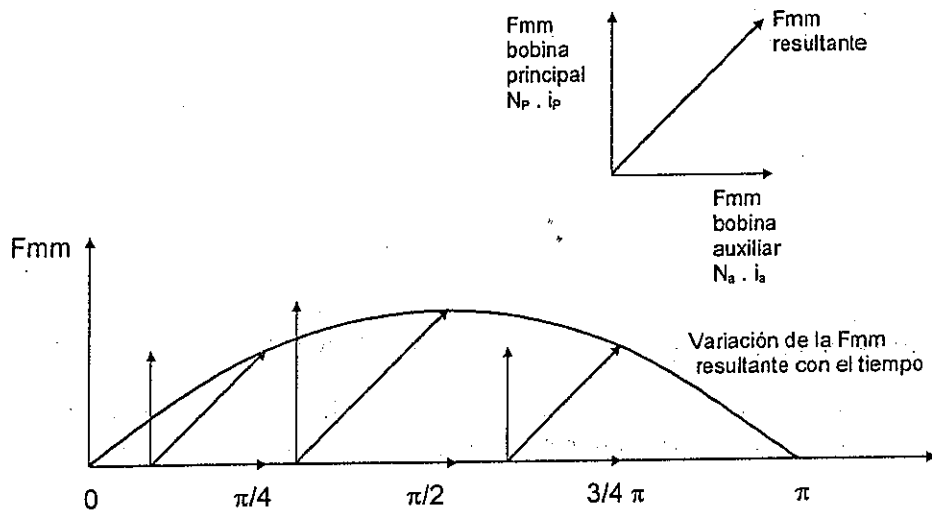


Figura 10.7 Gráficos de las variaciones de las fuerzas magnetomotrices en las bobinas y su resultante para corrientes en fase

De la figura anterior se puede observar, que la fuerza magnetomotriz resultante varia en módulo con el tiempo en forma senoidal, pero el eje magnético mantiene su posición, motivo por el cual en este caso no se logra obtener una cupla.

Bobinas principal y auxiliar con distinta relación resistencia reactancia

En este caso las corrientes estarán desfasadas un cierto ángulo, lo cual se ha graficado en la figura 10.8. En la misma la corriente auxiliar tiene un adelanto en el tiempo de 30°

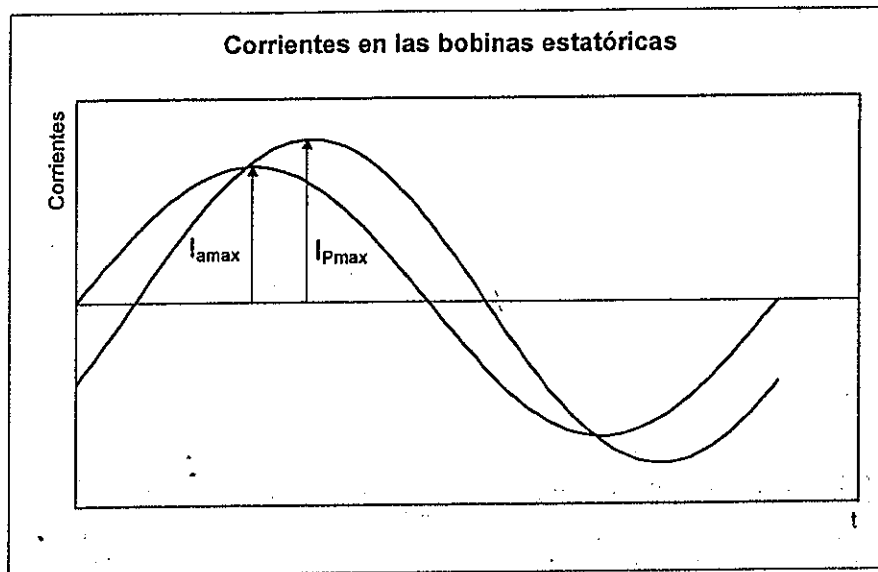


Figura 10.8 Corrientes en las bobinas estáticas con distinta relación resistencia-reactancia

Si procedemos a calcular las fuerzas magnetomotrices en forma proporcional, de las bobinas para distintos instantes, y efectuamos la suma de las mismas obtenemos el esquema de la figura 10.9.

Ángulo en radianes	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3/4 \pi$	π	$5/4 \pi$	$3/2 \pi$	$7/4 \pi$	2π
$F_{mm p}$	-0,5	0,259	0,866	0,966	0,5	-0,259	-0,866	-0,966	-0,5
$F_{mm a}$	0	0,707	1	0,707	0	-0,707	-1	-0,707	0
$F_{mm R}$	0,5	0,753	1,322	1,197	0,5	0,753	1,322	1,197	0,5
Ángulo geométrico	270°	340°	41°	53,8°	90°	200°	229,1°	230,1°	270°
Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9

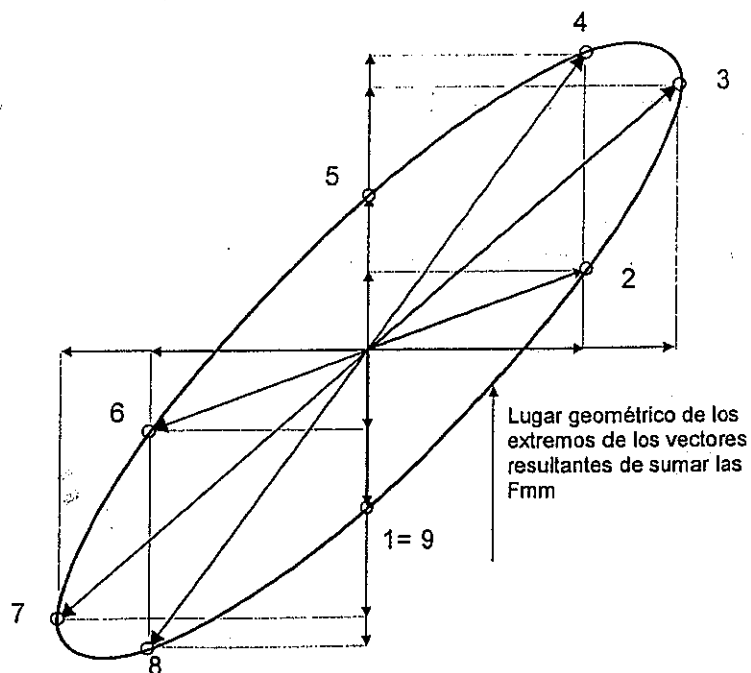


Figura 10.9 Lugar geométrico de la resultante de las fuerzas magnetomotrices de las bobinas

Como conclusión de lo graficado en la figura anterior, vemos que lo que se obtiene es un campo rotante elíptico. De esta forma se origina una cupla para el arranque de este tipo de motores.

Una vez que la velocidad llega a un 80 % de la nominal, el bobina auxiliar se desconecta, mediante un contacto centrífugo, instalado en el rotor, el cual se abre por la fuerza centrífuga originada, y se vuelve a cerrar cuando el motor se detiene, dejándolo preparado para otro arranque.

Esto se debe a que el bobinado auxiliar normalmente no está preparado para soportar la corriente en forma permanente.

La cupla de este tipo de motores responde a la siguiente expresión:

$$C = k \cdot I_p \cdot I_a \cdot \text{sen } \theta$$

Donde:

k : Constante de construcción del motor

I_p : Corriente del bobinado principal

I_a : Corriente del bobinado auxiliar

θ : Ángulo de desfasaje entre las corrientes

En la siguiente figura 10.10 se observa el diagrama fasorial para este tipo de motor.

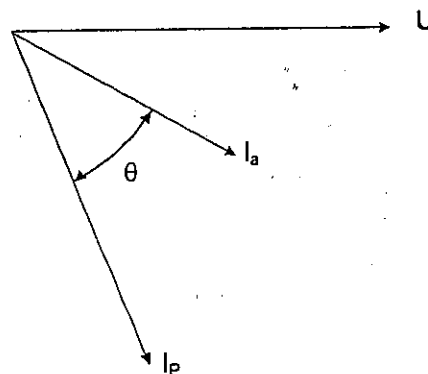


Figura 10.10 Diagrama fasorial de un motor de fase partida

Motor con capacitor

Dado que el valor de la cupla depende del ángulo de desfasaje entre las corrientes, su valor máximo se obtendría si el mismo fuera de 90° (seno = 1), lo cual se puede lograr agregando al bobinado auxiliar un capacitor del valor adecuado, de forma tal que la corriente auxiliar este en adelanto, formando un ángulo entre las corrientes lo más cercano a 90° eléctricos.

En la figura 10.11 y 10.12, se muestran el diagrama fasorial y el esquema eléctrico correspondiente a este tipo de motor.

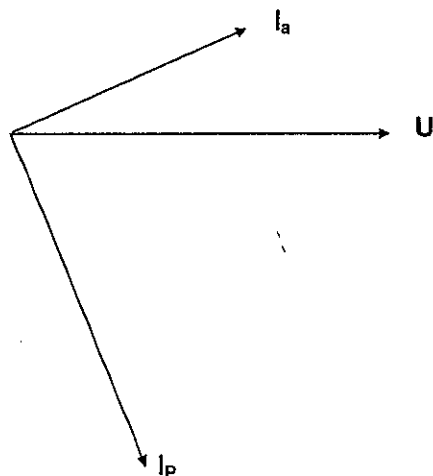


Figura 10.11 Diagrama fasorial para un motor con capacitor

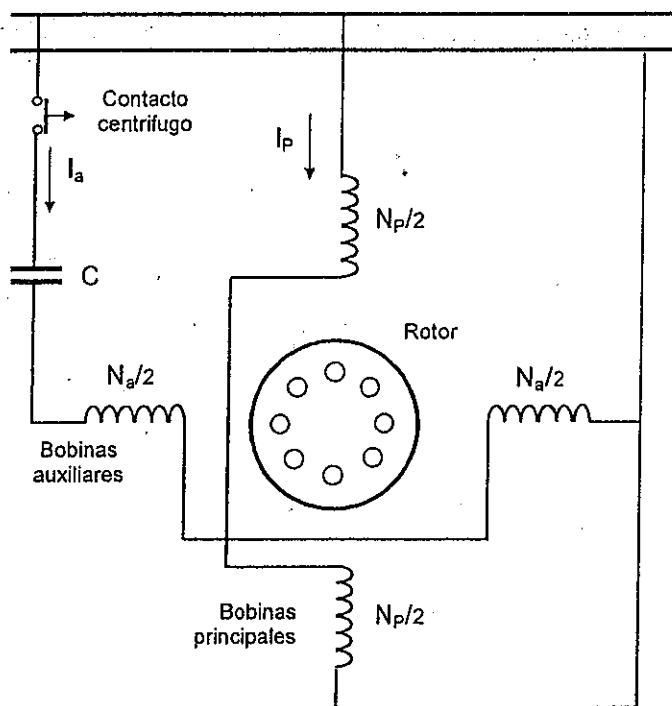


Figura 10.12 Esquema eléctrico de un motor con capacitor

Algunos motores tienen dos capacitores, uno para el arranque y otro para funcionamiento normal ya que con eso se obtiene una cupla mayor.

Cambio del sentido de giro de los motores monofásicos

Para invertir el sentido de giro de este tipo de motores se debe hacer que el campo rotante así lo haga. Para ello se debe invertir la polaridad de una de las bobinas. En la figura 10.13 se encuentra un esquema para efectuar el cambio.

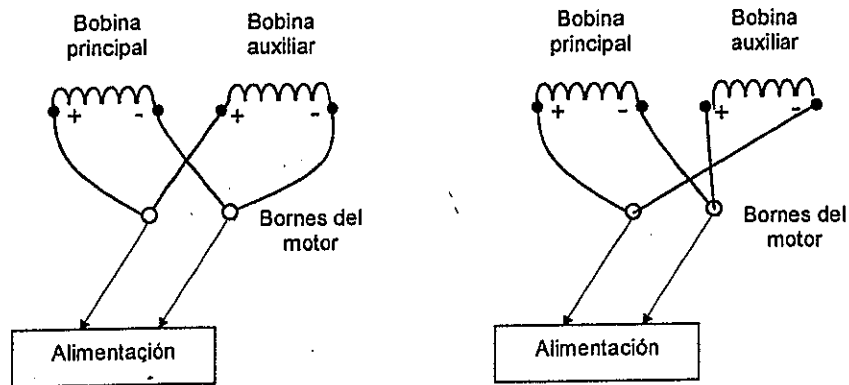


Figura 10.13 Esquema para realizar el cambio del sentido de giro de un motor monofásico

Motor de polos sombreados ó con espira en cortocircuito

Este es un motor de muy pequeña potencia, siendo su esquema físico el mostrado en la figura 10.14, en la cual se ve un corte perpendicular al eje de la máquina.

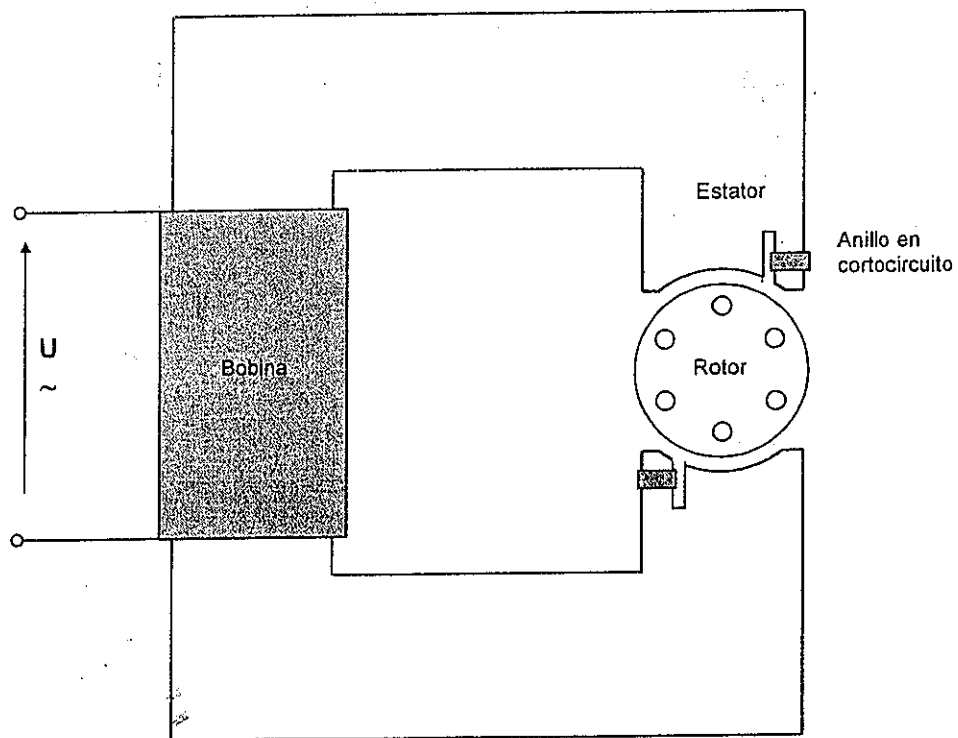


Figura 10.14 Esquema de un motor con anillo en cortocircuito

El flujo magnético originado por el bobinado que está dividido en dos partes, en la parte en que se encuentra el anillo mencionado se divide en dos partes, una principal y otro auxiliar que atraviesa el anillo. Los ejes magnéticos de estos dos flujos forman un pequeño ángulo geométrico. Esto se puede observar en la figura 10.15, en la cual se ha graficado esta parte de la máquina.

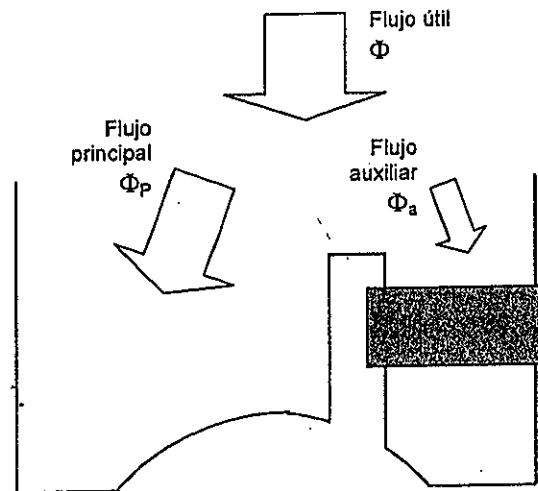


Figura 10.15 Detalle de recorrido de los flujos magnéticos en la zona del anillo en cortocircuito

El flujo magnético que atraviesa el anillo, al ser variable en el tiempo induce una fuerza electromotriz, la cual origina una corriente en atraso debido a las características del anillo. Esta corriente en el anillo dará lugar a la aparición de un flujo magnético en fase con la corriente del anillo, el cual se compone con el flujo magnético auxiliar. Este flujo resultante tiene un ángulo de desfase con respecto al principal, con lo cual se tienen las dos características para obtener un campo magnético rotante, o sea ángulo geométrico entre los flujos y desfase de los mismos.

En la figura 10.16, se trazó el diagrama fasorial correspondiente.

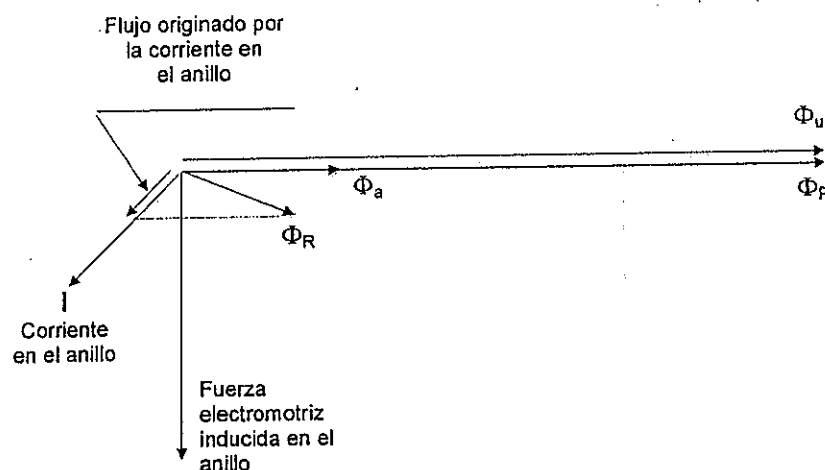


Figura 10.16 Diagrama fasorial para un motor con anillo en cortocircuito

En este tipo de motores el sentido de giro está definido por la ubicación de las espiras en cortocircuito, y por lo tanto no se puede modificar el mismo.

MÁQUINA SINCRÓNICA

11.1 Introducción

La generación, transmisión y distribución de energía eléctrica se efectúa a través de sistemas trifásicos de corriente alterna.

Las ventajas que se obtienen en los sistemas trifásicos con respecto a los monofásicos son:

- Ahorro de materiales en equipos, líneas de transmisión y distribución.
- Generación de campos magnéticos rotantes (Principio de funcionamiento de los motores).
- Potencia instantánea constante (Lo cual hace que los motores tengan una marcha más suave y silenciosa).

11.2 Fuentes de generación trifásicas

El generador sincrónico trifásico ó alternador es la máquina que se utiliza en las centrales eléctricas (Turboalternador) o bien como sistema autónomo de generación (Grupo electrógeno).

Es una máquina compuesta por dos partes:

- Una fija ó estator, constituido por un paquete de chapas magnéticas conformando un cilindro con una serie de ranuras longitudinales, sobre las cuales están colocados conductores, conectados entre si, de forma tal de crear un conjunto de bobinas.
- Una parte móvil ó rotor, ubicada dentro del estator y que consiste en un electroimán alimentado por corriente continua.

El giro del rotor se produce mediante una máquina impulsora (Motor diesel, turbina de vapor, de gas, hidráulica, eólica), que mantiene una velocidad angular constante. La alimentación del electroimán se logra a través de un par de anillos rozantes que permiten la continuidad eléctrica entre una parte fija y una parte móvil.

Los alternadores de cierta potencia cuentan con excitatriz, que es a su vez un generador de corriente alterna trifásico (Cuyo inductor está montado sobre el estator del alternador y el inducido sobre el rotor), en cuya salida se encuentra un rectificador trifásico, que alimenta el electroimán, con lo cual se evitan los anillos mencionados, que ocasionan pérdidas en los mismos y desgaste de los carbones.

El esquema elemental de un generador sincrónico trifásico es el mostrado en la figura 11.1.

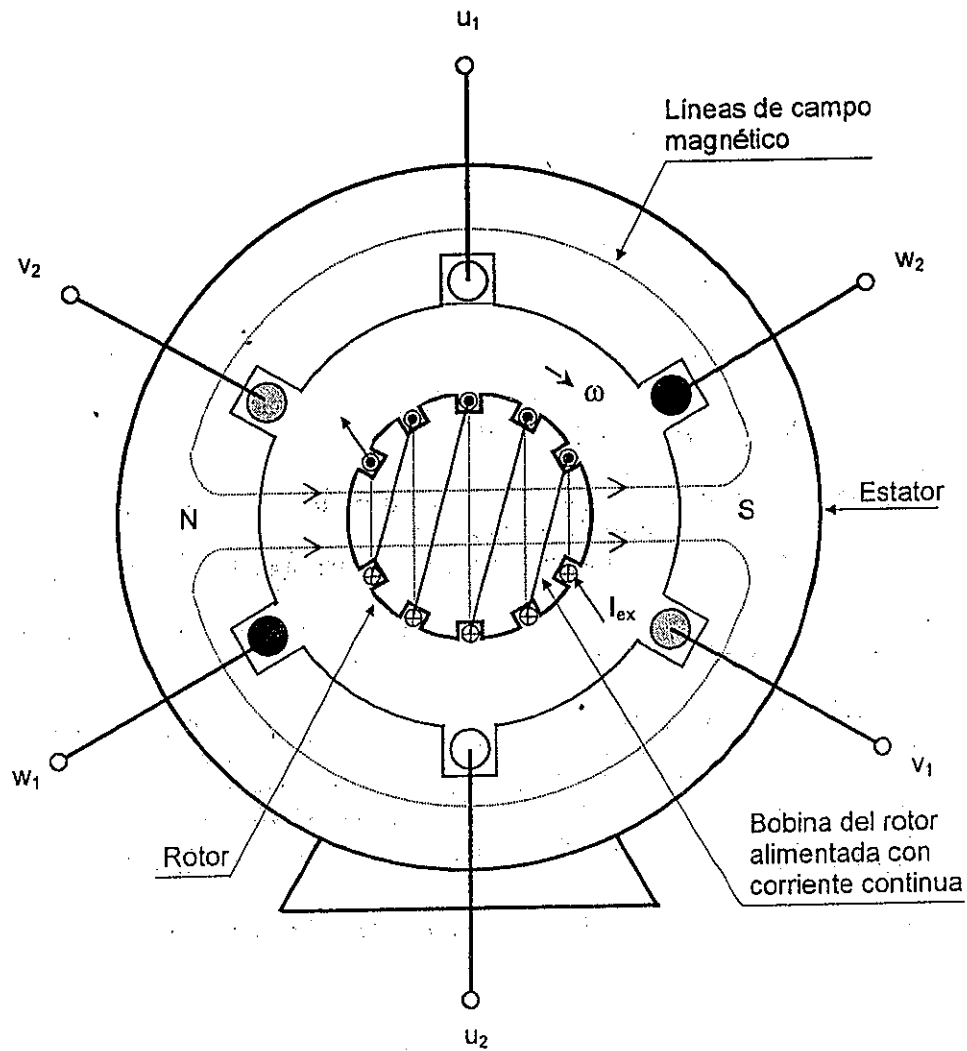


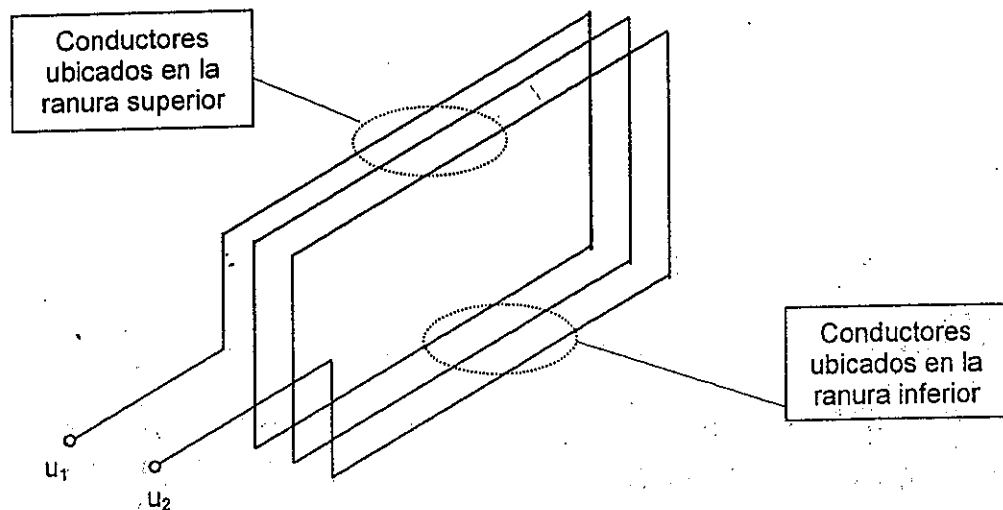
Figura 11.1 Esquema de un generador síncrono trifásico

El esquema presenta solamente 6 ranuras, y sobre cada par de ranuras opuestas se colocan los lados de una bobina, cuyos principios y finales tienen la siguiente denominación:

Bobina 1:	$U_1 - U_2$
Bobina 2:	$V_1 - V_2$
Bobina 3:	$W_1 - W_2$

En la figura 11.2 se ha esquematizado la bobina 1, donde se puede ver como están ubicados los conductores en las ranuras, siendo las otras dos bobinas idénticas, pero con su ejes magnéticos, formando un ángulo de 120° , entre si.

Dado que el electroimán produce un flujo magnético $[\Phi]$ de valor constante, las bobinas concatenarán un valor de dicho flujo de acuerdo a la posición instantánea del rotor.

Figura 11.2 Disposición de la bobina 1 ($u_1 - u_2$)

Si analizamos la bobina $u_1 - u_2$ de "N" espiras (La cual en el esquema anterior está representada por una sola por simplicidad del dibujo), y llamamos " α " al ángulo entre el eje magnético del electroimán y el eje magnético de la bobina, el flujo concatenado por la misma para un instante cualquiera está dado por, la proyección del flujo producido por el electroimán sobre el eje magnético de la bobina, o sea:

$$\varphi = \Phi \cos \alpha = \Phi \cos \omega t \quad \text{Siendo } \omega \text{ la velocidad angular del rotor.}$$

De acuerdo a la ley de Faraday-Lenz, entre los terminales de la bobina se inducirá una fuerza electromotriz cuyo valor está dado por:

$$e_{u_1-u_2} = -N \frac{d\varphi}{dt} = N \Phi \omega \sin \omega t$$

$$\text{Llamando } E_{\max} = N \Phi \omega \quad \text{nos queda:}$$

$$e_{u_1-u_2} = E_{\max} \sin \omega t$$

Si analizamos la bobina $v_1 - v_2$, vemos que el fenómeno se repite pero con un atraso de 120° , debido a la disposición geométrica en que las mismas están colocadas, o sea que:

$$e_{v_1-v_2} = E_{\max} (\sin \omega t - 2\pi/3)$$

Lo mismo sucede con la bobina $w_1 - w_2$:

$$e_{w_1-w_2} = E_{\max} (\sin \omega t - 4\pi/3)$$

De esta manera se ha logrado tener un sistema de tres tensiones alternas desfasadas una de otra, 120° en el tiempo, según puede observarse en la figura 11.3.

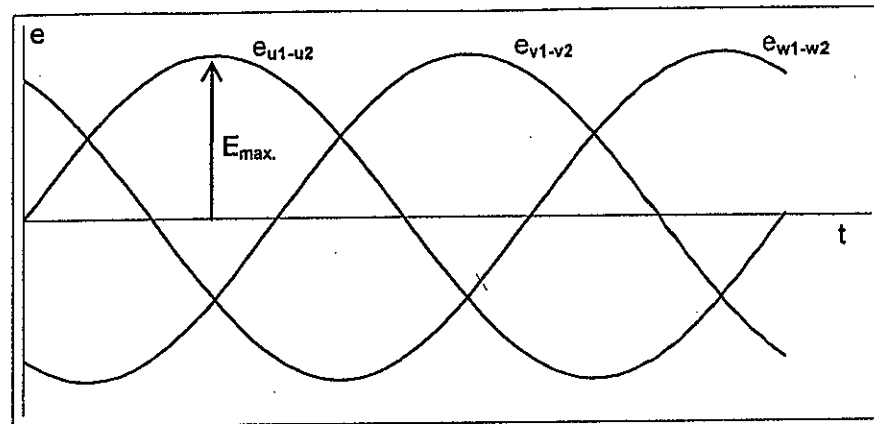


Figura 11.3 Sistema trifásico de tensiones

Si analizamos el valor eficaz de la tensión en bornes de cada una de las bobinas ó fases del generador, el mismo será:

$$E_F = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \quad \omega = 2\pi f \quad \text{Siendo } f: \text{ la frecuencia}$$

$$E_F = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi = 4,44 f N \Phi$$

Frecuencia y número de polos

La máquina que analizamos era de 2 polos magnéticos, y por cada vuelta que efectúa el rotor se genera un ciclo completo de la fuerza electromotriz inducida en cada una de las fases del estator, por lo tanto si el rotor gira a "n_s" vueltas por minuto, se cumpliran "n" ciclos por minuto, por lo tanto la frecuencia en ciclos por segundo en el estator será:

$$f = \frac{n_s}{60}$$

$$f = \frac{n_s \cdot p}{60} \quad \text{Donde:}$$

Si la máquina tiene mas de un par de polos, la expresión general de la frecuencia obtenida es:

f: Frecuencia de la fuerza electromotriz inducida en ciclos por seg ó Hertz [Hz]

p: Cantidad de pares de polos

n_s: Velocidad de giro del rotor [r.p.m.]

El esquema de la figura 11.4 se muestra una máquina de 4 polos (Dos pares de pólos):

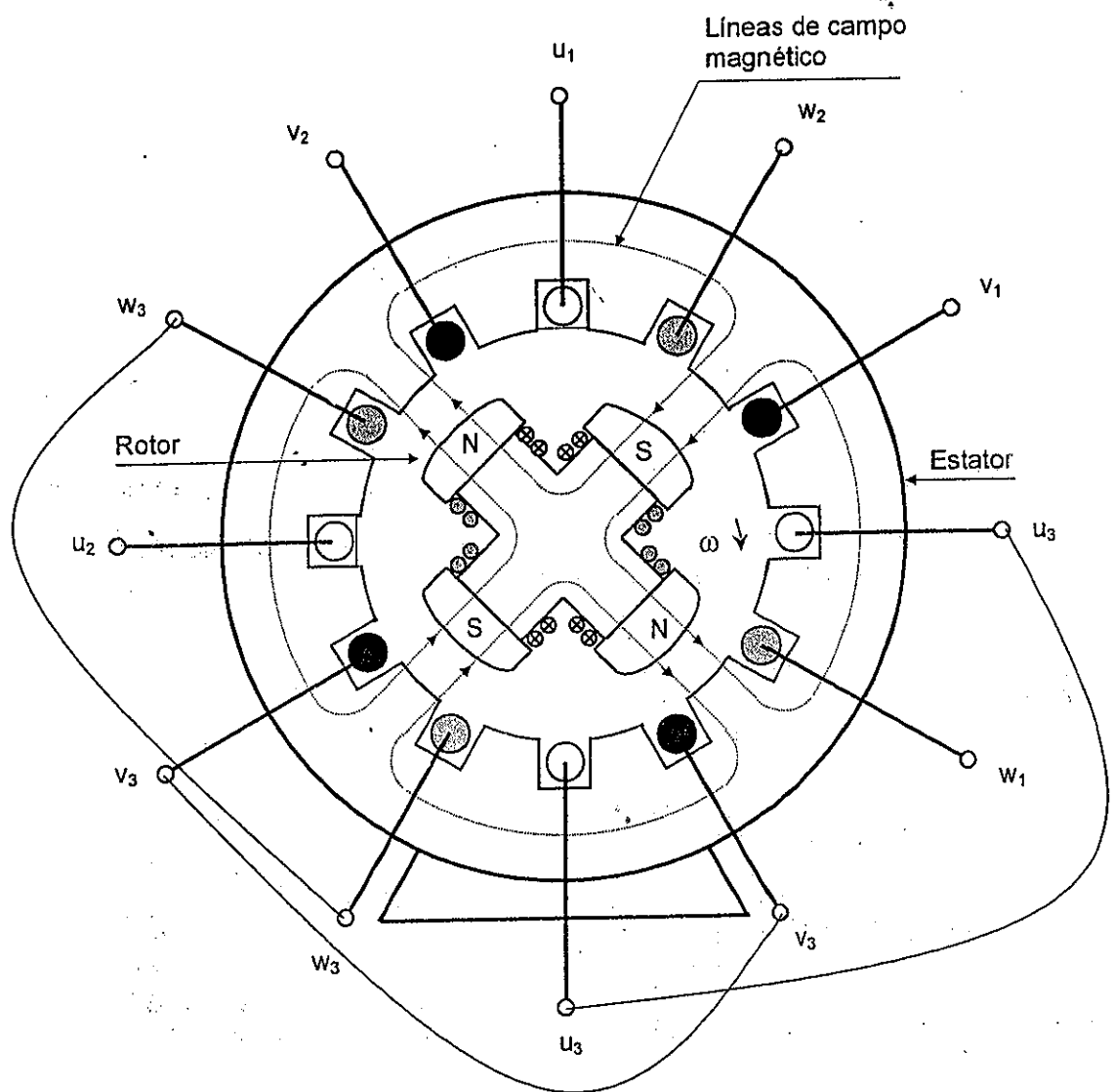


Figura 11.4 Generador sincrónico trifásico de cuatro polos

Esta máquina presenta dos pares de polos en el rotor y además en el estator la cantidad de ranuras es el doble que en el caso anterior, de tal forma que cada fase ocupa el doble de ranuras, estando formada cada una de ellas por dos bobinas conectadas en serie, con el mismo eje magnético de la siguiente forma:

Fase 1: $U_1 - U_3 - U_3 - U_2$

Fase 2: $V_1 - V_3 - V_3 - V_2$

Fase 3: $W_1 - W_3 - W_3 - W_2$

La figura 11.5 muestra como está conformada una de las fases, la cual tiene dos bobinas con un mismo eje magnético, pero el flujo originado por las corrientes tiene sentido opuesto.

Las bobinas están conectadas en serie pero el sentido de arrollamiento de las mismas hace que la corriente de origen a fuerzas magnetomotrices de sentido contrario

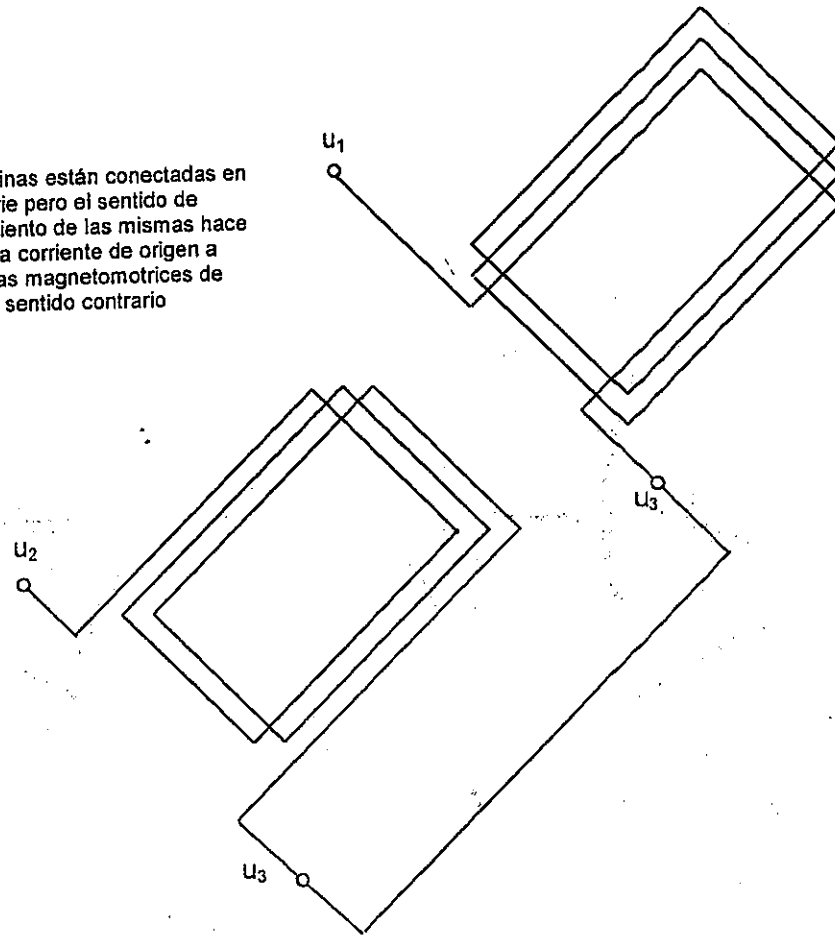


Figura 11.5 Esquema de las bobinas $u_1 - u_3 - u_3 - u_2$ para una fase de la máquina

Las tres bobinas del estator se unen en un punto común ($x = y = z$ ó $x_1 = y_1 = z_1$), conformando un tipo de conexión que se denomina "estrella", según se muestra en el esquema de la figura 11.6.

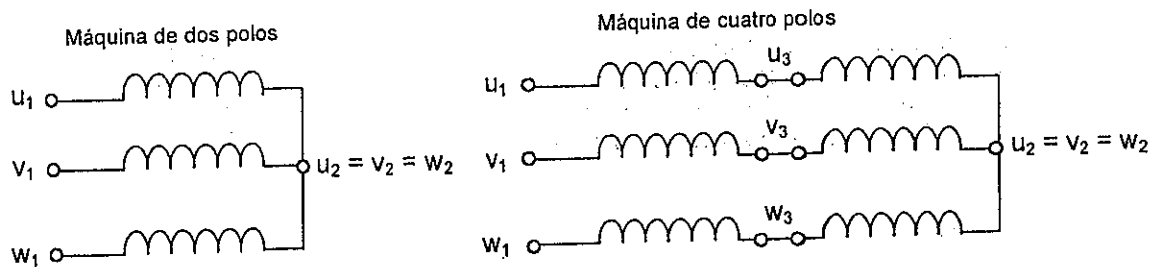


Figura 11.6 Conexión en estrella de los bobinados estáticos

Comparando ambas máquinas podemos observar que en la de dos polos, cada lado de bobina ve pasar un polo (Norte ó sur) del rotor una vez por cada vuelta, en cambio en la máquina de cuatro polos corresponde dos veces por cada vuelta, lo que nos indica que la frecuencia para la misma velocidad angular es el doble.

Por lo tanto para obtener la misma frecuencia, las velocidades del rotor deben ser diferentes, e ir disminuyendo a medida que la cantidad de polos aumenta o sea que la velocidad del rotor para una misma frecuencia es la siguiente:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Además la relación entre los grados geométricos de giro del rotor y los grados eléctricos de la fuerza electromotriz es:

$$\text{"Grados eléctricos"} = p \text{"Grados geométricos"}$$

Las máquinas accionadas por turbinas de vapor gas son de alta velocidad, lo cual hace que las mismas tengan 1 par de polos, con lo cual el rotor presenta la forma de un cilindro ranurado (Rotor liso), como se represento en el primer esquema, por lo que las exigencias de equilibrio dinámico sean mejor satisfechas.

Las máquinas accionadas por turbinas hidráulicas son de baja velocidad, lo cual hace a la necesidad de tener muchos pares de polos y gran diámetro del estator, siendo el rotor construido mediante polos salientes de acuerdo al segundo esquema.

11.3 Circuito equivalente

Hemos visto que debido al flujo magnético originado en el rotor, se induce en el estator una fuerza electromotriz, que es función de dicho flujo y de la velocidad de giro de la máquina impulsora.

Si la máquina no tiene carga, la tensión que aparece en los terminales de la máquina es directamente la fuerza electromotriz inducida.

Cuando se carga la máquina la tensión que tenemos en sus terminales se modifica debido básicamente a los siguientes factores:

Reacción de armadura

Si las tres bobinas del estator se unen en un punto común ($u_2 = v_2 = w_2$), formando una conexión que se denomina estrella y colocamos una carga por las mismas circulará una corriente que dependerá de las características de dicha carga (óhmica, óhmica-inductiva, óhmica-capacitiva), lo cual hará que la corriente este desfasada un cierto ángulo en atraso ó en adelanto.

Debido a esa corriente, en el estator se creará un campo magnético alternativo en cada una de las fases, los que al componerse dará origen a un campo magnético rotante que llamaremos reacción de armadura y que gira a la misma velocidad del rotor.

En la figura 11.7 vemos la situación para una posición del rotor en la cual la bobina estatórica ($u_1 - u_2$), concatena el máximo flujo rotórico ya que sus ejes magnéticos son coincidentes.

En esta situación, la fuerza electromotriz inducida en la mencionada bobina tiene un valor igual a cero, en cambio las otras dos tienen un valor mitad con los sentidos indicados (Punto "saliente" y cruz "entrante"). Estos sentidos los podemos obtener del gráfico de la figura 11.3 de valores instantáneos de las fem inducidas, en el cual vemos que en la situación para $t = 0$, en la bobina ($v_1 - v_2$), la fem es negativa, o sea entrante (cruz), por el terminal " v_1 ", por lo que en el terminal " v_2 " va a ser saliente (punto), y en la bobina $w_1 - w_2$, es positiva o sea saliente (punto) por el terminal w_1 , y entrante(cruz) por el terminal w_2 .

Pasemos a analizar lo que pasa con distintos tipos de carga en el estator.

Carga óhmica pura

Con este tipo de carga la corriente va a estar en fase con la tensión en bornes de la máquina, lo cual hace que las corrientes sean entrantes y salientes de acuerdo a lo mostrado en la figura 11.7, y coincidiendo su sentido con el indicado en la figura 11.8, en la cual la corriente en " $u_1 - u_2$ ", tiene un valor igual a cero y en la bobina " $v_1 - v_2$ " la corriente es entrante por " v_1 " (negativa y saliente por " w_1 " (positiva).

Debido a esto en el estator se produce un campo magnético rotante, como vimos anteriormente, cuya posición es la indicada en la figura, para el instante que se está estudiando. Podemos observar que el eje magnético del rotor y el eje magnético del campo rotante del estator están formando un ángulo de 90° .

Esto hace que la tensión en bornes difiera de la fuerza electromotriz inducida, debido a que el campo en el entrehierro de la máquina no solo el producido por el rotor, sino que se compone con el de reacción de armadura.

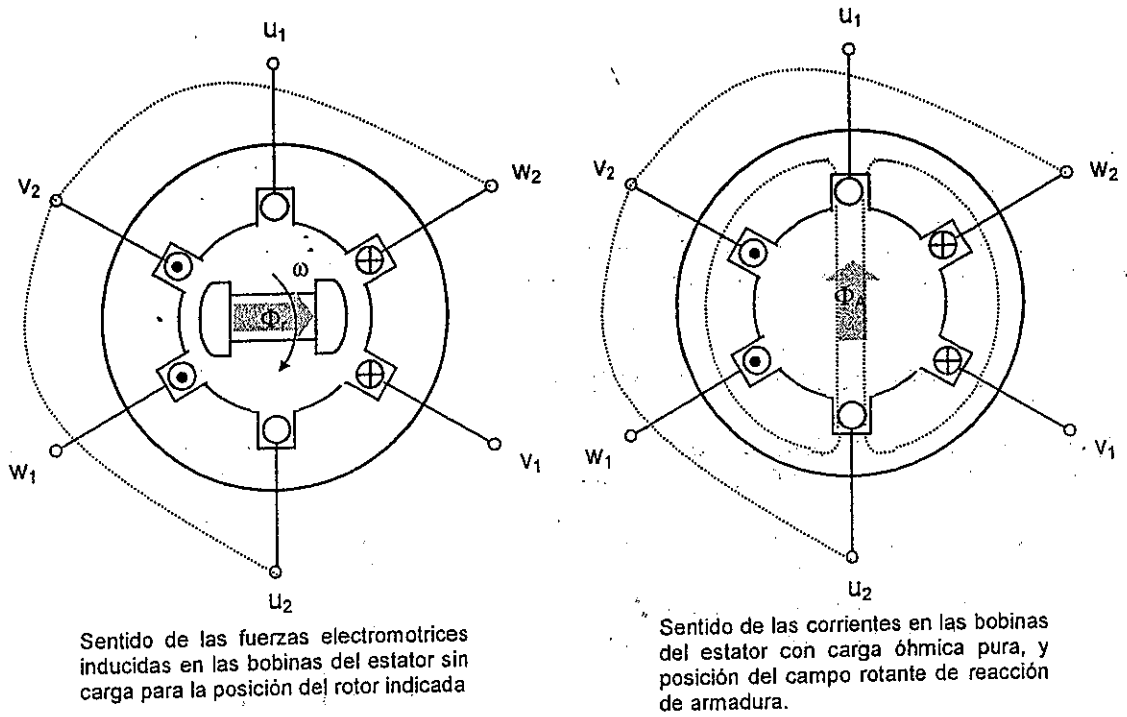


Figura 11.7 Posición de los campos magnéticos del rotor y de reacción de armadura para carga óhmica pura

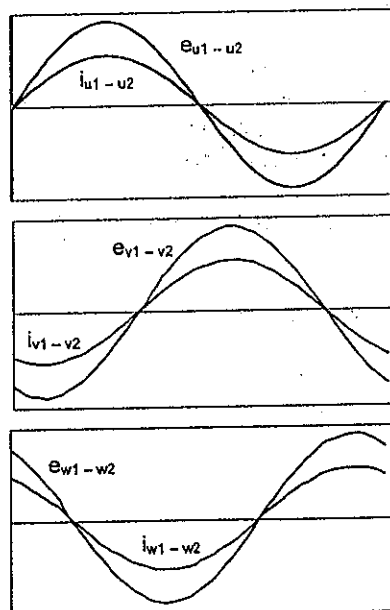


Figura 11.8 Valores instantáneos de las fem inducidas y las corrientes en el estator para carga óhmica pura

Carga inductiva pura

En la figura 11.9 y para la misma posición del rotor ($t = 0$), vemos cual es la situación de las corrientes en el estator, que en este caso tienen un ángulo de atraso de 90° .

Debido a que en la bobina $u_1 - u_2$, la fem inducida pasa por cero, la corriente que circula por la misma, para ese instante pasa por su valor máximo, mientras que en las otras dos bobinas su valor es la mitad y de signo contrario para que la suma de las tres sea igual a cero. En la figura 6.10 se observa el signo de las corrientes.

En esta situación el campo magnético giratorio del estator tiene su posición indicada en la figura. De aquí se observa que las fuerzas magnetomotrices del rotor y de la armadura se oponen, lo cual nos está indicando que el efecto de esta última es netamente "desmagnetizante".

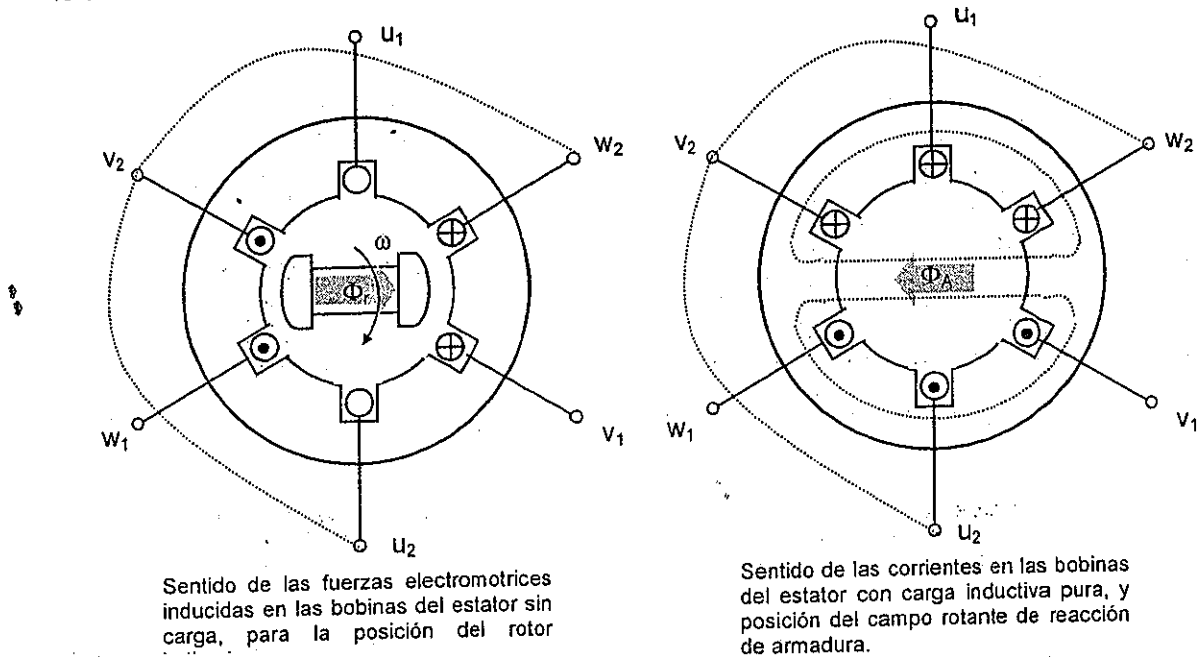


Figura 11.9 Posición de los campos magnéticos del rotor y de reacción de armadura para carga inductiva pura

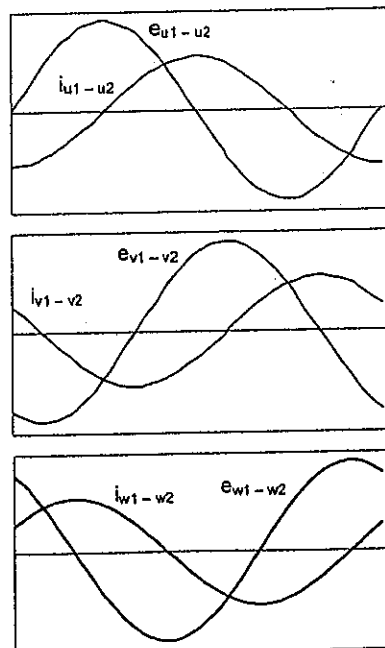


Figura 11.10 Valores instantáneos de las fem inducidas en el estator para carga inductiva pura

Carga capacitiva pura

En la figura 11.11 y para la misma posición del rotor, vemos cual es la situación de las corrientes en el estator, que en este caso tienen un ángulo de adelanto de 90° .

Debido a que en la bobina $u_1 - u_2$, la fem inducida pasa por cero, la corriente que circula por la misma, para ese instante pasa por su valor máximo, mientras que en las otras dos bobinas su valor es la mitad y de signo contrario para que la suma de las tres sea igual a cero.

El sentido de las corrientes lo podemos obtener de la figura 11.12.

En esta situación el campo magnético giratorio del estator tiene su posición indicada en la figura. De aquí se observa que las fuerzas magnetomotrices del rotor y de la armadura se superponen, lo cual nos está indicando que el efecto de esta última es netamente "magnetizante".

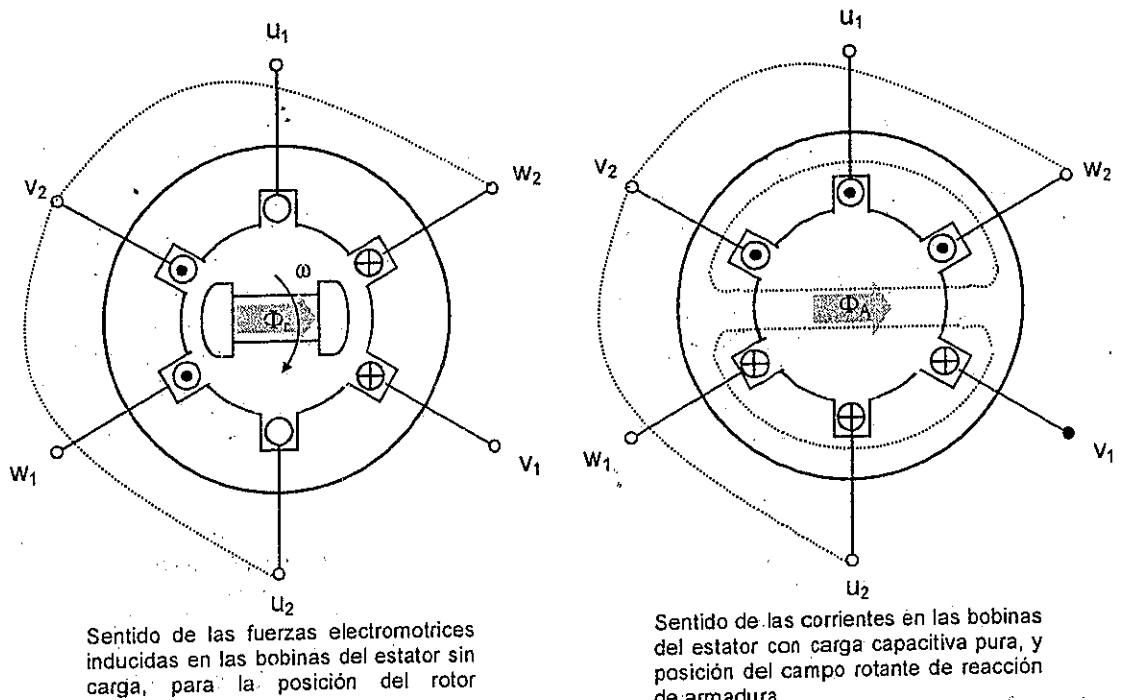


Figura 11.11 Posición de los campos magnéticos del rotor y de reacción de armadura para carga capacitiva pura

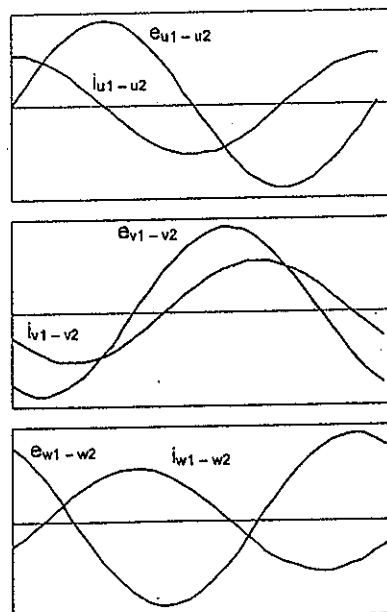
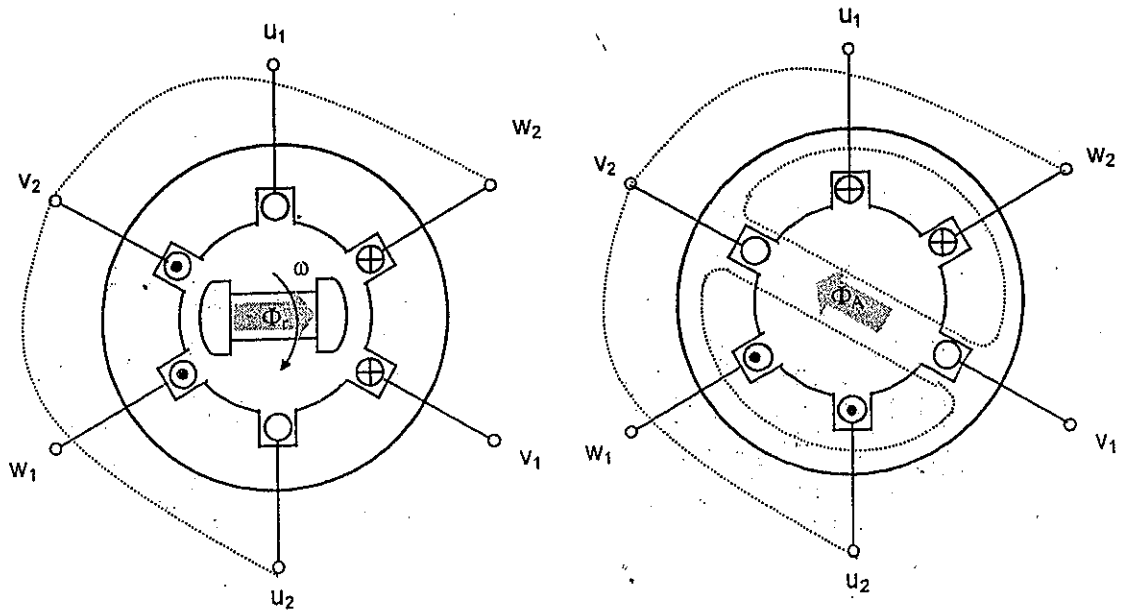


Figura 11.12 Valores instantáneos de las fem inducidas y las corrientes en el estator para carga capacitiva pura

Carga óhmico inductiva

En la figura 11.13 y para la misma posición del rotor, vemos cual es la situación de las corrientes en el estator, que en este caso tienen un ángulo de atraso de 60° .

Debido a que en la bobina $u_1 - u_2$, la fem inducida pasa por cero, los valores y sentidos de las corrientes se observan en la figura 11.14. En esta situación el campo magnético giratorio del estator tiene su posición indicada en dicha figura, en la que se observa que la misma es desmagnetizante y deformante.



Sentido de las fuerzas electromotrices inducidas en las bobinas del estator sin carga, para la posición del rotor indicada

Sentido de las corrientes en las bobinas del estator con carga óhmica inductiva cuyo ángulo de atraso es de 60° , y posición del campo rotante de reacción de armadura.

Figura 11.13 Posición de los campos magnéticos del rotor y de reacción de armadura para carga óhmico-inductiva

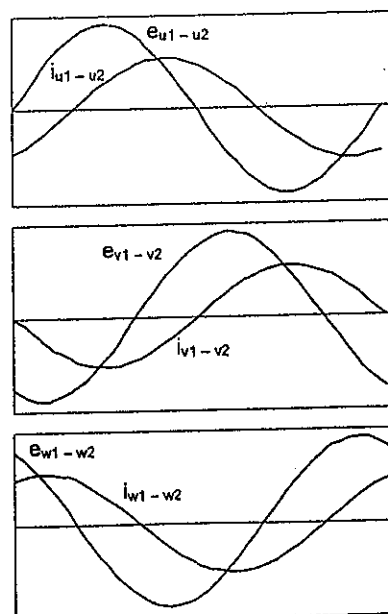


Figura 11.14 Valores instantáneos de las fem inducidas y las corrientes en el estator para carga óhmico - inductiva

Este efecto lo representamos para simplificar el análisis, mediante una reactancia de reacción de armadura, que nos representa la fuerza electromotriz inducida en el estator debido a las corrientes que circulan por el mismo, cuyo valor está dado por:

$$E_{\text{Fase estator}} = j X_A I_{\text{estator}}$$

Flujo disperso en los bobinados estáticos

Las bobinas del estator tienen también autoinductancia, con su correspondiente reactancia (función de la frecuencia de las corrientes que circulan por el mismo), lo que produce una variación de la tensión en bornes. Esta reactancia que representa el flujo disperso en el estator y la de reacción de armadura se engloban en lo que se denomina reactancia sincrónica de la máquina.

Resistencia óhmica de los bobinados

Además las bobinas presentan resistencia óhmica, que depende de la longitud de las bobinas y de la sección efectiva de las mismas.

Este conjunto de efectos hace que la tensión de la máquina cuando esta suministrando potencia sea diferente a la que aparece en la misma cuando no circula corriente por el estator (En vacío).

$$U_F = E_F - R I - j X_A I - j X_d I = E_F - R I - j X_s$$

De acuerdo a estas simplificaciones podemos representar la máquina mediante un circuito equivalente para una fase del mismo de acuerdo al esquema de la figura 11.15.

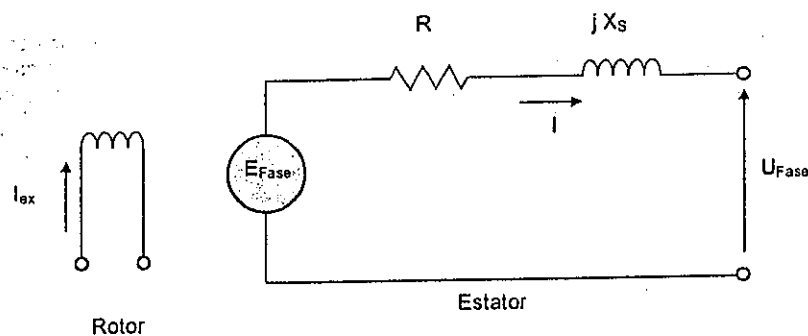


Figura 11.15 Circuito equivalente de un generador sincrónico

11.4 Característica de vacío

La característica de vacío de la máquina, es la relación de la tensión en sus bornes, con la corriente de excitación que se hace circular en la bobina del rotor manteniendo la **velocidad angular** del mismo **constante** y sin que circule corriente por las bobinas del estator (No entrega potencia).

En este caso esta tensión coincide con la fuerza electromotriz inducida por efectos del flujo magnético originado en el rotor.

El circuito de ensayo es el mostrado en la siguiente figura 11.16

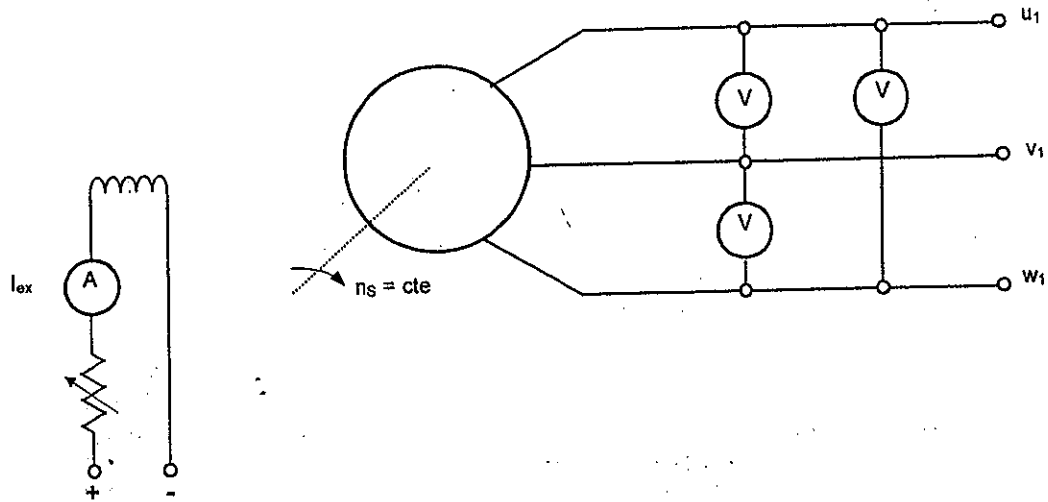


Figura 11.16 Circuito para ensayo en vacío de un generador sincrónico

Alimentando con una fuente de corriente continua la bobina del rotor, variando la intensidad de la misma y efectuando las lecturas de los voltímetros se obtiene la curva de la figura 11.17.

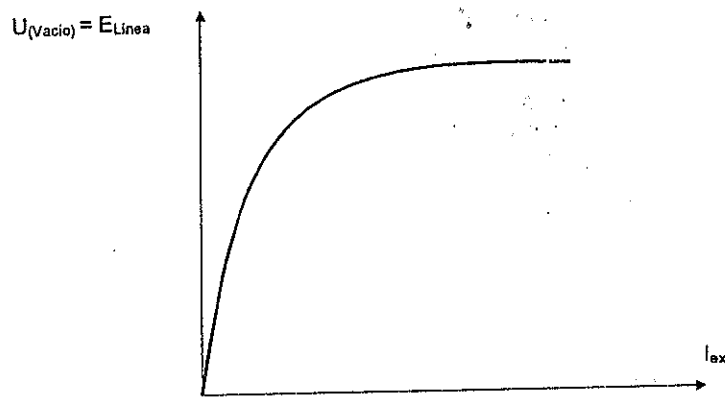


Figura 11.17 Curva de vacío de un generador sincrónico.

De la curva observamos que en la primera parte hay una relación lineal entre la corriente de excitación y la fuerza electromotriz, luego aparece un codo de saturación y por último una zona saturada en la cual para un incremento de la corriente de excitación, se logran pequeños incrementos de la tensión.

El análisis que efectuamos sobre la máquina lo hacemos dentro de la zona lineal a los efectos de simplificar los conceptos.

Esta curva se corresponde con la de imanación de la máquina (Para una determinada velocidad del rotor), ya que la tensión es función del flujo y la intensidad de campo magnético es proporcional a la corriente de excitación.

11.5 Característica de cortocircuito

La característica de cortocircuito es la relación entre la corriente estatórica y la corriente de excitación con los bornes cortocircuitados.

Este ensayo se realiza cortocircuitando los bornes del generador a través de amperímetros, y manteniendo la velocidad constante, se varía la corriente de excitación y se efectúan las lecturas de la corriente estatórica, utilizando el circuito de la figura 11.18.

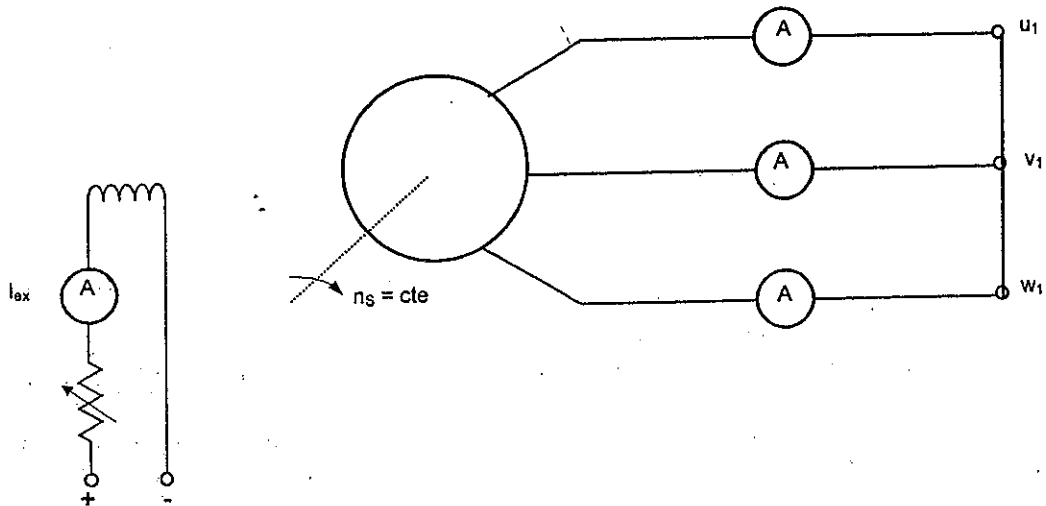


Figura 11.18 Circuito para ensayo en cortocircuito de un generador sincrónico

Dado que la reacción de armadura es netamente desmagnetizante, debido a que la propia reactancia sincrónica de la máquina actúa de única carga, la relación entre ambas corrientes es lineal, ya que el circuito magnético no se satura, según se observa en la figura 11.19.

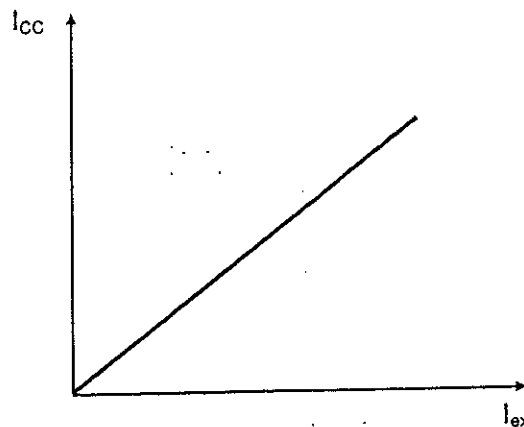


Figura 11.19 Curva de cortocircuito de un generador sincrónico

Dada la relación prácticamente lineal entre ambas corrientes, con determinar un punto de la misma, se la puede graficar, trazando la recta al origen.

11.6 Determinación de la impedancia sincrónica

Conociendo las características de vacío y cortocircuito de la máquina y volcándolas sobre un mismo gráfico (Figura 11.20) se puede obtener de las mismas el valor de la impedancia sincrónica.

En cortocircuito la tensión en bornes es "cero", luego la fuerza electromotriz inducida es igual a la caída de tensión en la impedancia sincrónica ó sea:

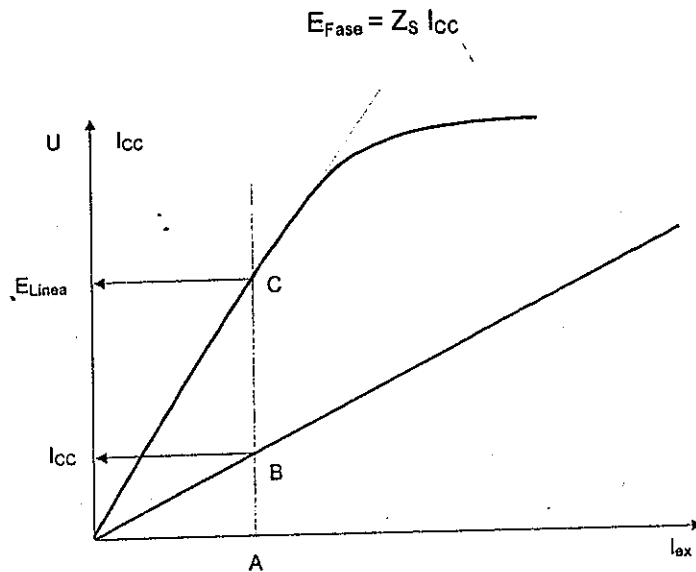


Figura 11.20 Curvas de vacío y cortocircuito de un generador sincrónico

Gráficamente para un valor de la corriente de excitación del rotor (Punto A), se levanta una vertical y donde corta a la característica de cortocircuito (Punto B), obtenemos el correspondiente valor de la corriente en el estator, y donde corta a la característica de vacío (Punto C), obtenemos la fuerza electromotriz inducida. Trabajando con las escalas gráficas correspondientes obtenemos:

$$|Z_S| = \frac{|E_{Línea}|}{\sqrt{3} |I_{CC}|} = \frac{AC \cdot \text{Escala V/cm}}{AB \cdot \text{Escala A/cm}}$$

Si determinamos la resistencia por medición directa de la misma, la reactancia sincrónica será:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R^2} \quad \text{Si } X_S \text{ es mucho mayor que } R \Rightarrow Z_S \cong X_S$$

Cabe aclarar que este valor es prácticamente constante si nos mantenemos dentro de la zona lineal de la característica de vacío, pero el valor de la misma disminuye a medida que se produce la saturación, según puede verse en el gráfico de la figura 11.21.

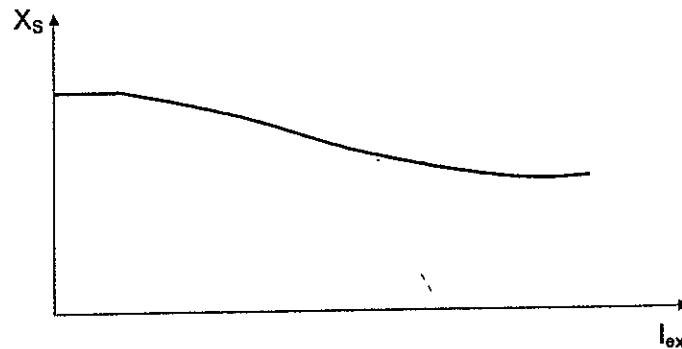


Figura 11.21 Variación de la reactancia sincrónica con la excitación de la máquina

11.7 Potencia interna

Si despreciamos la resistencia óhmica de los bobinados el diagrama fasorial para una carga de características óhmico-inductivas es el de la siguiente figura 11.22.

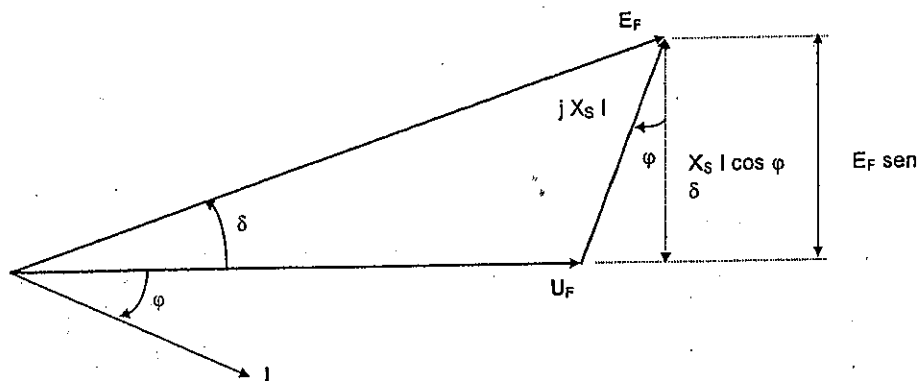


Figura 11.22 Diagrama fasorial de un generador sincrónico con carga óhmico - inductiva

La potencia activa entregada por el generador está dada por la siguiente expresión:

$$P = 3 U_F I \cos \varphi \quad \text{Del diagrama vemos que:}$$

$$X_S I \cos \varphi = E_F \text{ sen } \delta \quad \text{Luego:}$$

$$P = 3 \cdot \frac{U_F \cdot E_F}{X_S} \text{ sen } \delta$$

Siendo:

U_F : Tensión de fase en bornes de la máquina

E_F : Fuerza electromotriz inducida por fase

X_S : Reactancia sincrónica por fase

δ : Angulo entre la fuerza electromotriz inducida y la tensión en bornes o ángulo de potencia de la máquina.

11.8 Características externas del alternador funcionando en forma independiente

La característica externa del generador nos indica como varía su tensión en bornes, en función de la intensidad de la corriente que absorbe la carga (Figura 11.23).

Para su estudio utilizaremos el circuito equivalente analizado y en él consideraremos la resistencia óhmica despreciable y la reactancia sincrónica constante (Zona lineal).

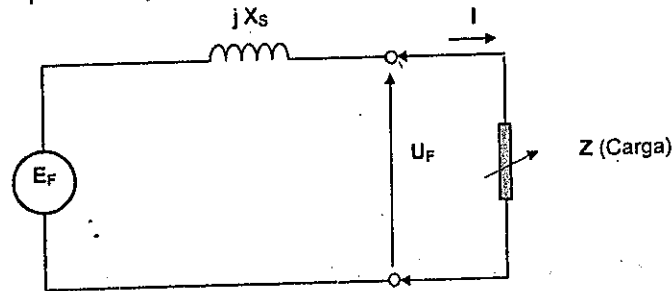


Figura 11.23 Generador sincrónico alimentando una carga

El circuito se analiza para una fase del generador, y la ecuación que nos da la tensión de salida en bornes del generador es:

$$U_F = E_F - j X_s I$$

Carga puramente óhmica

En este caso la corriente del estator está en fase con la tensión en bornes del generador, de acuerdo al fasorial dibujado en la figura 11.24.

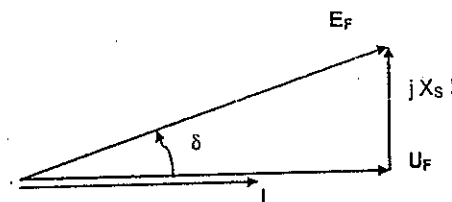


Figura 11.20 Diagrama fasorial de un generador sincrónico con carga óhmica

Vemos que:

$$E_F^2 = U_F^2 + (X_s \cdot I)^2 \quad \text{ó también :}$$

$$\frac{U_F^2}{E_F^2} + \frac{I^2}{\left(\frac{E_F}{X_s}\right)^2} = 1$$

Manteniendo la corriente de excitación constante (E se mantiene constante), la ecuación anterior corresponde a una elipse de semiejes E_F y E_F/X_s , como se observa en la figura 11.25.

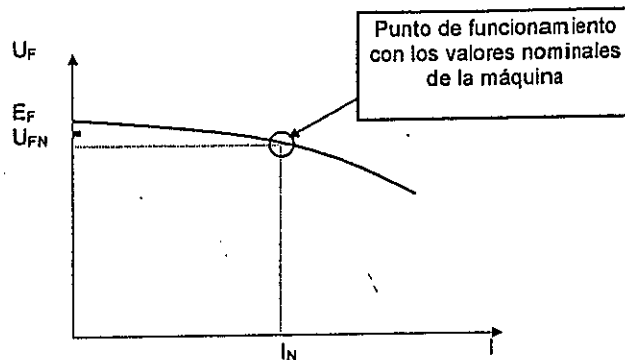


Figura 11.25 Variación de la tensión en bornes del generador con carga óhmica pura

Si se varía la corriente de excitación, se obtienen elipses por encima o por debajo de la anterior.

Carga puramente inductiva

En este caso la corriente atrasa 90° a la tensión en bornes de la máquina, siendo el esquema fasorial el de la figura 11.26 y la variación de la tensión en sus bornes el de la figura 11.27.

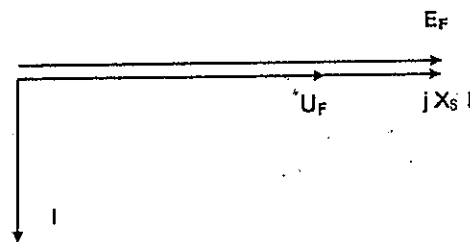


Figura 11.26 Diagrama fasorial de un generador sincrónico con carga inductiva pura

$$E_F = U_F + X_s I \quad (\text{Suma escalar})$$

$$U_F = E_F - X_s I \quad \text{Presenta una variación lineal}$$

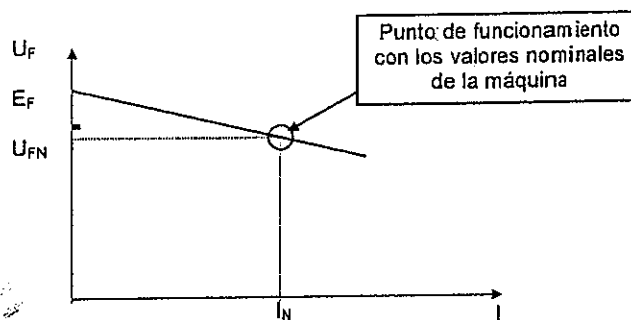


Figura 11.27 Variación de la tensión en bornes de un generador con carga inductiva pura

En este caso la caída de tensión es más fuerte que en el caso anterior. La reacción de armadura es totalmente desmagnetizante.

La variación de la corriente de excitación implica obtener rectas paralelas.

Carga puramente capacitiva

La corriente del estator adelanta 90° a la tensión en bornes de la máquina, siendo su diagrama fasorial el de la figura 11.28 y la variación de la tensión en sus bornes se observa en la figura 11.29

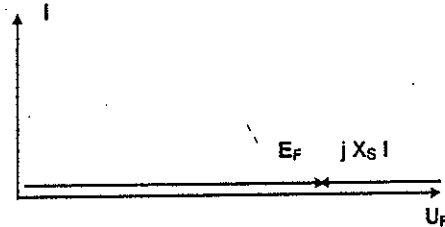


Figura 11.28 Diagrama fasorial de un generador sincrónico con carga capacitiva pura

$$U_F = E_F + X_s I \quad (\text{Suma escalar})$$

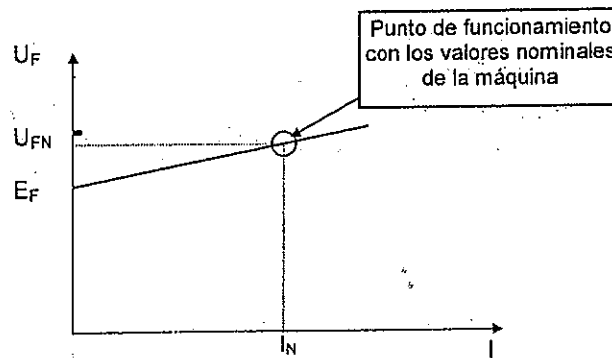


Figura 11.29 Variación de la tensión en bornes de un generador con carga capacitiva pura

La variación de la corriente de excitación, nos lleva a obtener rectas paralelas. En este caso el efecto es puramente magnetizante, lo cual hace que la tensión en bornes de la máquina sea superior a la fuerza electromotriz inducida.

Todo lo analizado ha sido suponiendo "condiciones ideales", pero en la práctica los generadores poseen resistencia óhmica interna y la reactancia sincrónica no es constante debido a los efectos de la saturación.

Ante esto las curvas analizadas difieren ligeramente de las estudiadas, pero con la misma tendencia.

Las curvas reales se pueden obtener en forma experimental y su aspecto es el que se muestra en la siguiente figura 11.30.

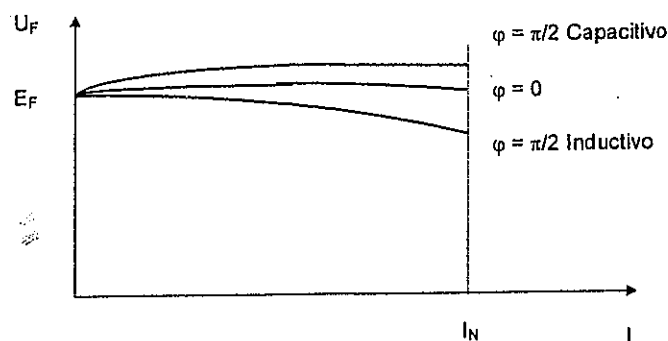


Figura 11.30 Variación de la tensión en bornes del generador real

11.9 Alternadores en paralelo

En numerosas instalaciones se precisa conectar en paralelo varios generadores con el fin de atender una carga variable según las horas ó circunstancias.

Para que esto se pueda cumplir se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Igualdad de secuencia
- Igualdad de frecuencia
- Igualdad de los módulos de tensión
- Igualdad de fase

Analizaremos el caso de tener que conectar un generador con una red de potencia mucho mayor que la propia, con lo cual la tensión y la frecuencia están impuestas por dicha red. La forma práctica de la maniobra, se basa en la indicación de tres lámparas conectadas entre los terminales del generador y la red de acuerdo al esquema de la figura 11.31.

Con los frecuencímetros y los voltímetros verificamos la igualdad de frecuencia y módulo de tensión entre la red y el generador.

Para variar los valores en la máquina debemos actuar:

- Para variar la frecuencia sobre la velocidad de la máquina impulsora.
- Para variar el módulo de la tensión, fundamentalmente sobre la excitación (También varía con la velocidad de la máquina impulsora)

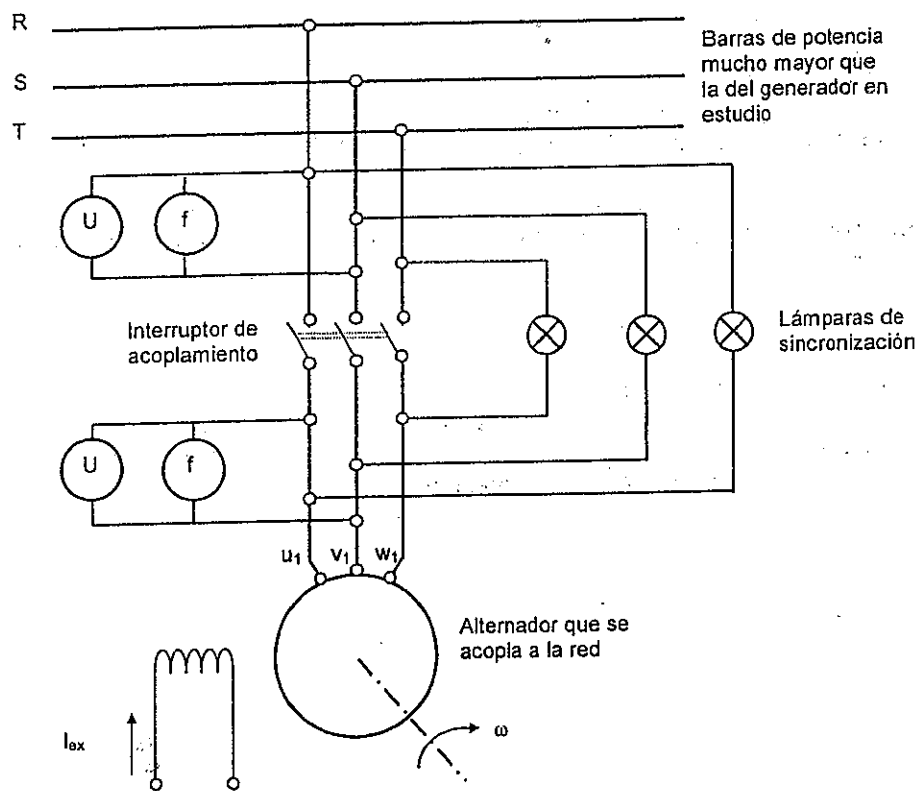


Figura 11.31 Circuito para puesta en paralelo de un generador sincrónico

Si la secuencia de la red y de la máquina son coincidentes los fasoriales superpuestos se muestran en la siguiente figura 11.32.

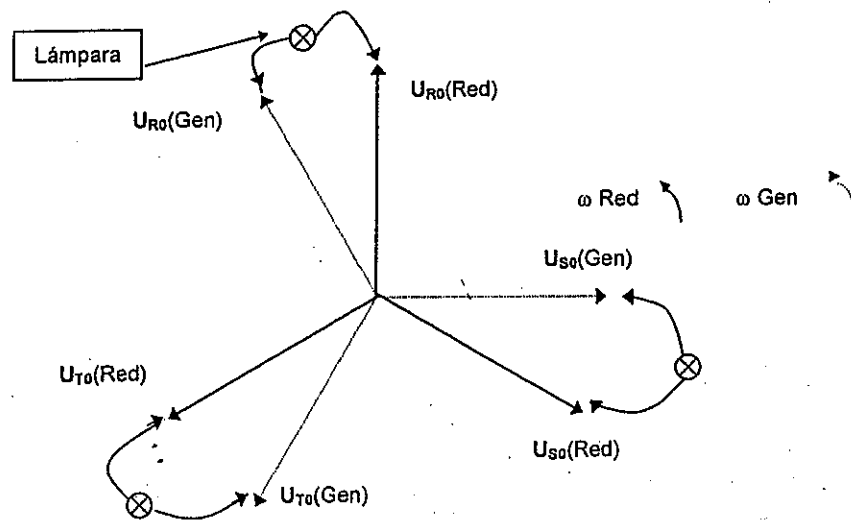


Figura 11.32 Diagrama fasoriales superpuestos del generador y la red eléctrica

Vemos que las tensiones que aparecen sobre las lámparas son iguales y su valor es la diferencia de potencial entre las tensiones de fase de la red y las del generador.

Si hay diferencia de velocidades angulares, el brillo de las lámparas varía en forma simultánea con un mismo valor para las tres, pasando por un máximo cuando los fasores de la misma fase están en sentido opuesto y un mínimo cuando son coincidentes (En fase).

En el caso de que el brillo de las lámparas sea cero, los módulos de las tensiones son iguales.

Para acoplar el generador a la red, se debe maniobrar de forma tal que si las lámparas no se llegan a apagar, se debe actuar sobre la excitación de la máquina para variar su tensión hasta que las lámparas lleguen a estar apagadas (Mayor corriente de excitación, mayor tensión), en algún instante. Luego si la variación en el brillo de las lámparas es muy rápido se debe actuar sobre la velocidad de la máquina impulsora (Modificación de frecuencia), hasta que la variación sea lenta, y en el momento en que las lámparas se apaguen se debe cerrar el interruptor de acoplamiento, ya que en ese momento se cumplen las condiciones de sincronismo.

En esa situación el generador tiene la misma tensión en sus bornes e igualdad de frecuencia (Impuestos por la red)

Si las secuencias son distintas se observa lo de la siguiente figura 11.33

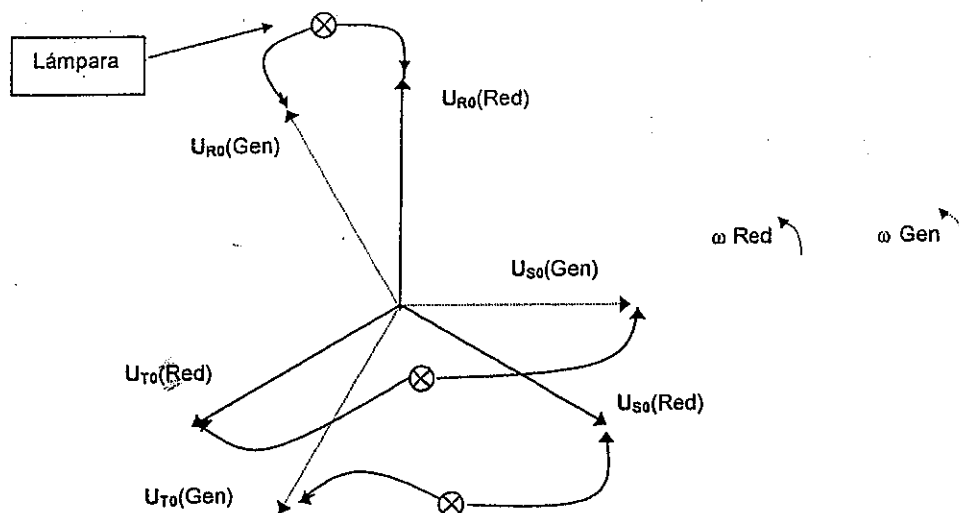


Figura 11.33 Diagramas fasoriales superpuestos del generador y la red con secuencias distintas

Aquí observamos que las lámparas no tienen el mismo brillo, sino que se produce un efecto de rotación del mismo. Para modificar esta situación se deben permutar dos fases cualesquiera, de forma tal que se tengan iguales secuencias.

El método que hemos analizado se denomina de lámparas apagadas, motivo por el cual se debe tener sumo cuidado de verificar que ninguna de ellas se encuentra "quemada", ya que en caso contrario podríamos estar cerrando el interruptor sin cumplir las condiciones y por lo tanto circularían corrientes que podrían dañar el generador.

En las centrales eléctricas la maniobra de sincronización se efectúa en forma automática mediante sincronoscopios, que en el momento de estar cumplimentadas las condiciones mencionadas, el mismo, envía la orden de cerrar el interruptor de acoplamiento, con lo cual la máquina en paralelo con la red.

También se puede efectuar la sincronización mediante un sistema de lámparas encendidas de acuerdo al circuito mostrado en la figura 11.34.

Se observa que una lámpara está conectada igual que en el caso anterior y que las otras dos tiene las conexiones cruzadas, con lo cual cuando las dos ternas estén superpuestas y tengan igualdad de módulos de tensión, la lámpara sobre la fase "R" estará apagada y las lámparas sobre la fase "S" y "T" tendrán el mismo brillo, momento en el cual se deberá cerrar el interruptor.

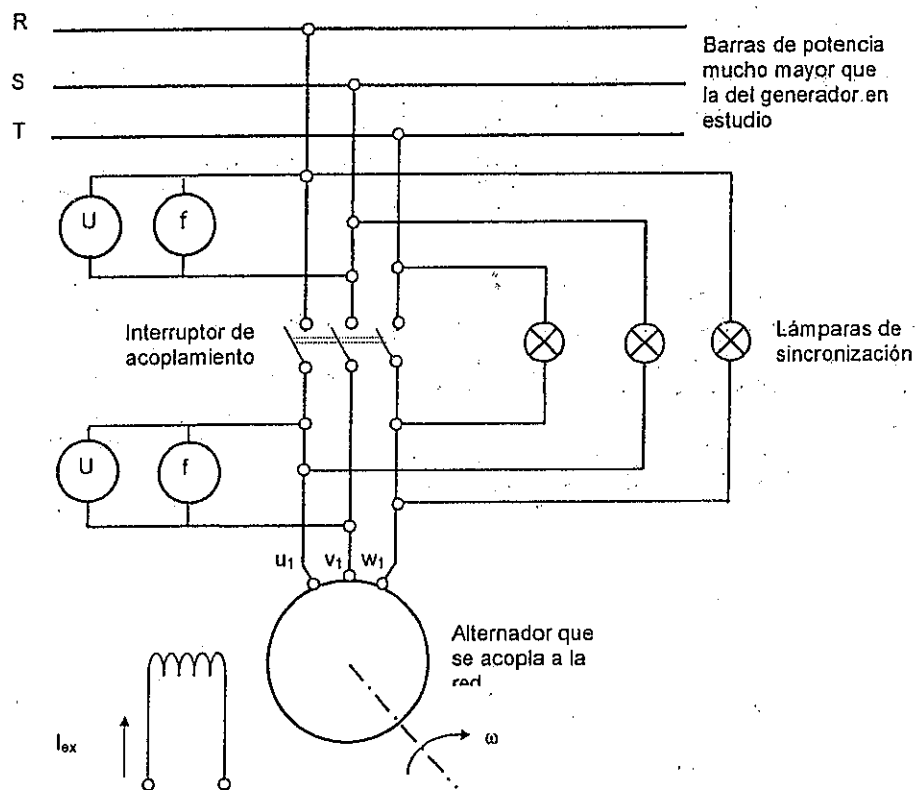


Figura 11.34 Sincronización mediante el sistema de lámparas encendidas

11.10 Generador trabajando en paralelo con la red entregando potencia activa constante

En el caso de tener el alternador en paralelo con la red (Potencia muy superior), la misma fija la tensión y la frecuencia, que no se puede modificar con el alternador. De acuerdo a estas premisas se cumplen las siguientes condiciones:

$$P = 3 U_F I_F \cos \varphi = \text{constante}$$

$$P = 3 \quad \text{sen } \delta$$

$$P = \text{constante}$$

$$I \cos \varphi = \text{constante}$$

$$E_F \text{ sen } \delta = \text{constante}$$

Si analizamos el diagrama fasorial correspondiente a un estado, en el cual se mantiene constante la potencia activa, la frecuencia y la tensión en bornes del generador, según lo dibujado en la figura 11.35.

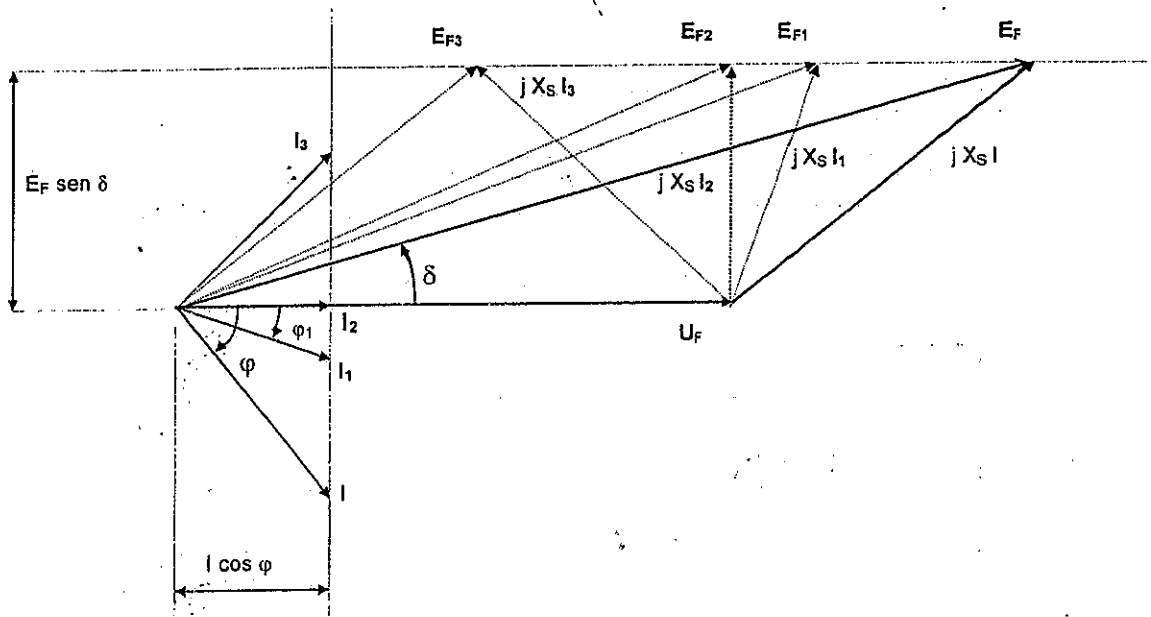


Figura 11.35 Diagrama fasorial de un generador síncrono con tensión y potencia activa constante

De aquí podemos sacar las siguientes conclusiones:

El fasor de la corriente en el estator se desplaza sobre una recta, de forma de mantener $I \cos \varphi = \text{constante}$, y el fasor de la fuerza electromotriz inducida se desplaza sobre otra recta de forma tal que $E_F \text{ sen } \delta = \text{constante}$.

Si disminuimos la corriente de excitación, disminuye la fuerza electromotriz inducida, hasta el valor E_{F1} , con lo cual la caída de tensión en la reactancia sincrónica es: $j X_S I_1$, lo que lleva a que la corriente en el estator I_1 , ocupe una nueva posición disminuyendo su módulo.

En forma análoga si volvemos a disminuir la corriente de excitación hasta un valor tal que la fuerza electromotriz sea E_{F2} , la corriente será I_2 , la cual está en fase con la tensión en bornes del generador y su valor será mínimo.

Disminuyendo nuevamente la corriente de excitación hasta obtener E_{F3} , la corriente será I_3 , la cual ha aumentado su valor pero se encuentra en adelante con respecto a la tensión en bornes del generador.

O sea que con la modificación de la corriente de excitación lo que hemos modificado es la potencia reactiva que la máquina entrega, pasando de potencia reactiva inductiva, a potencia reactiva capacitiva, pasando por su valor de mínima corriente que es cuando entrega solamente potencia activa.

Por lo tanto la potencia reactiva demanda por la red a la cual se encuentra alimentando el generador, se modifica mediante la corriente de excitación del generador.

En cambio la potencia activa que la misma suministra a la red se modifica actuando sobre la máquina impulsora, modificando la cupla del mismo, ya que su velocidad se debe mantener constante ya que la frecuencia así lo es.

MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

12.1 Generalidades

La máquina de corriente continua puede ser utilizada tanto como generador o como motor, aunque en la actualidad su uso está dado como motor, ya que la generación de energía en corriente continua se logra mediante equipos rectificadores, de mejor eficiencia y menor costo.

En cuanto a su uso como motor, tiene gran importancia en la industria automotriz ya que los vehículos, cuentan con un número importante de motores de pequeña potencia (limpiaparabrisas, motor de arranque, levanta vidrios, calefactor, etc).

12.2 Generador de corriente continua

Esta máquina está conformada por dos partes, de las cuales una es fija o estator sobre la cual se montan bobinas alimentadas con corriente continua, las que producen el campo magnético de excitación, tal cual se muestra en la figura 12.1.

El estator se construye de material macizo, ya que en el mismo no se producen pérdidas de tipo magnético. En la figura se observan dos bobinas, las cuales se conectan en serie y producen el campo magnético necesario. El consumo de energía de las mismas es pequeño con respecto a la que producirá como generador.

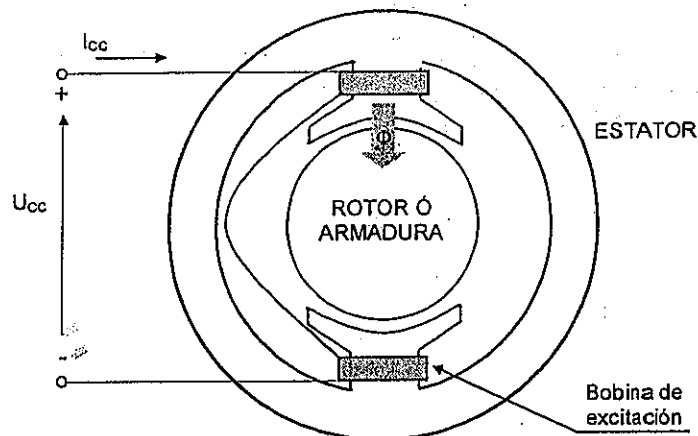


Figura 12.1 Corte de una máquina de corriente continua

Dentro del estator se ubica el rotor o armadura, el cual montado sobre un eje, puede efectuar un movimiento de rotación.

Esta parte de la máquina se construye con chapas magnéticas, ya que la corriente que circula en el mismo es alterna y aparecen las pérdidas en el hierro analizadas con anterioridad.

A los efectos del análisis de la máquina separemos el estator del rotor, reemplazando el estator por el flujo magnético que se origina en las bobinas del mismo, teniendo en cuenta que el mismo tiene un valor que depende de la corriente continua que hagamos circular en dichas bobinas. Coloquemos en el rotor una espira, cuyos lados están alojados en ranuras paralelas al eje, tal como se muestra en la figura 12.2, y cuyos terminales están unidos a lo que llamaremos "delgas". Estas delgas están eléctricamente aisladas del eje del rotor y entre sí.

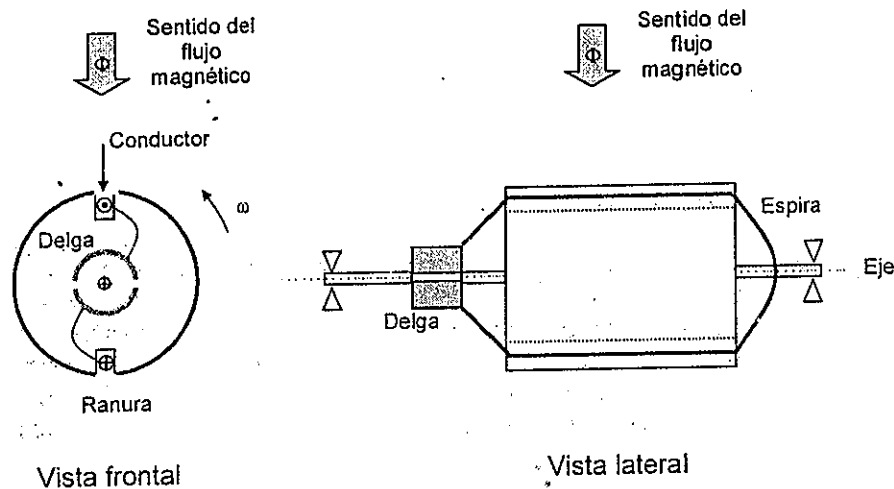


Figura 12.2 Vistas del rotor de una máquina de corriente continua

Si mediante una máquina impulsora (Motor diesel, etc.), hacemos girar el rotor a velocidad angular " ω " constante, la espira concatenará un flujo que estará variando en el tiempo, lo cual inducirá en la mencionada espira una fuerza electromotriz también variable en el tiempo, tal como si fuera un generador de tensión alterna senoidal (aproximadamente), y esta forma de onda se verá reflejada entre ambas delgas, tal como se observa en la figura 12.3.

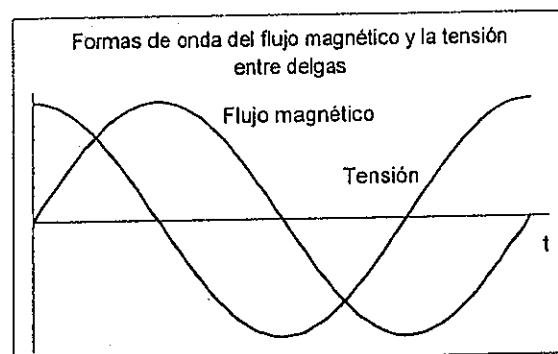


Figura 12.3 Formas de onda del flujo magnético concatenado por la espira rotórica y la fuerza electromotriz entre delgas

Si ahora colocamos dos carbones o escobillas que hagan contacto con ambas delgas (figura 12.4), pero estos se montan fijos, de forma tal que durante el giro del rotor los carbones se deslicen sobre dichas delgas, pasemos analizar que tensión aparece en los mismos.

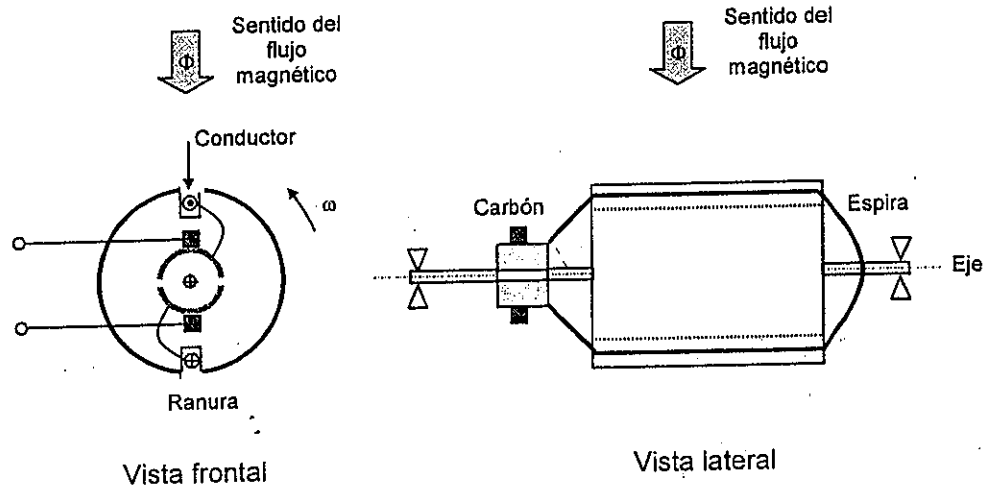


Figura 12.4 Ubicación de los carbones sobre las delgas

De acuerdo al sentido de giro antihorario, y al flujo magnético originado por el estator, la fuerza electromotriz inducida es saliente en el conductor superior y entrante en el inferior, según lo indicado en la figura 12.4.

Esto hace que el terminal conectado al carbón superior tenga polaridad "positiva", y el inferior polaridad "negativa". A medida que el rotor gira el carbón tiene la misma polaridad que la delga sobre la que desliza

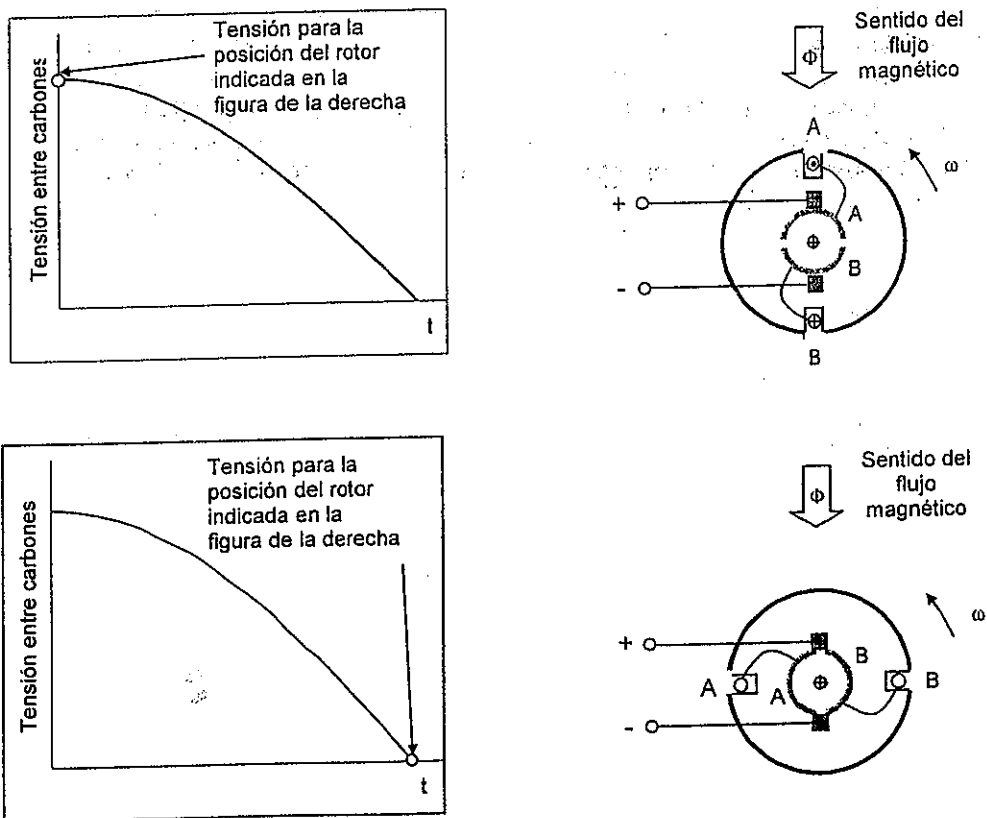


Figura 12.5 Tensión entre carbones durante un giro de 90° del rotor

En la figura 12.5 se muestra como varía la tensión entre carbonos, desde la posición en la cual la espira no concatena flujo magnético tal la posición de la figura 12.4, hasta la cual el mismo toma un valor máximo (giro de 90°).

Cuando se produce un giro de 90° los carbonos hacen contacto con ambas delgas simultáneamente (las cortocircuitan), pero en ese momento la tensión entre las mismas toma un valor nulo.

Al seguir girando el rotor, el carbón superior que estaba en contacto con la delga "A" cuya fuerza electromotriz era saliente, pasa a estar en contacto con la delga "B" que ahora tiene polaridad positiva, en cambio el carbón inferior que estaba en contacto con la delga "B" que tenía polaridad negativa, ahora pasa a tener contacto con la delga "A" que ahora tiene dicha polaridad. Esto se debe a que los conductores pasan de estar bajo la influencia de un polo magnético, al contrario cuando se supera el giro del rotor en 90°.

Esto hace que los terminales de la máquina mantengan su polaridad, mientras la misma está girando, lo cual se observa en la figura 12.6. Por lo tanto el conjunto delgas - carbonos hace la especie de un rectificador mecánico.

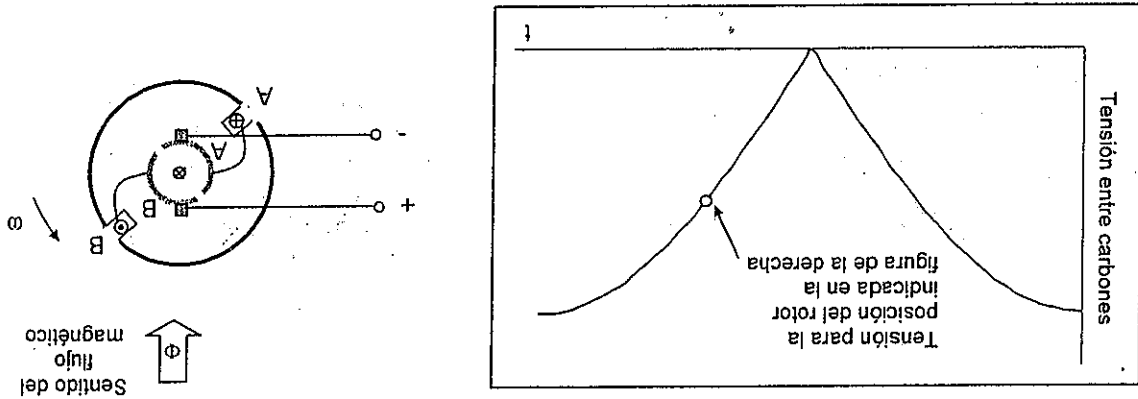


Figura 12.6 Tensión en los carbonos después de haber girado el rotor 90°

Por los conductores ubicados en el rotor, la fuerza electromotriz cambia de sentido, a medida que se produce el giro, pero la tensión que nos aparece en los carbonos es del tipo unidireccional, tal como se ha mostrado.

Dado que la máquina no cuenta con solo dos conductores formando una espira, sino que tiene una cantidad mayor, lo cual hace que la tensión obtenida sea más constante. Dado que cada conductor termina en una delga, estas se verán incrementadas en función de la cantidad de espiras. Al conjunto de delgas que se montan sobre el eje de la máquina, se lo llama colector. A los efectos de mostrar una tensión de salida mejorada analicemos una máquina con cuatro delgas. La misma tendrá cuatro espiras, cuyos terminales son: 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', los cuales están conectados a las delgas según se muestra en la figura 12.7.

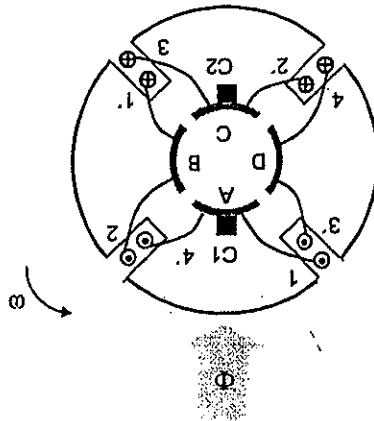


Figura 12.7 esquema del rotor de una máquina con cuatro delgas

Dado que los conductores que conforman cada espira están unidos por la parte posterior de la máquina, las mismas están conectadas eléctricamente según se muestra en la figura 12.8., para la posición del rotor indicada.

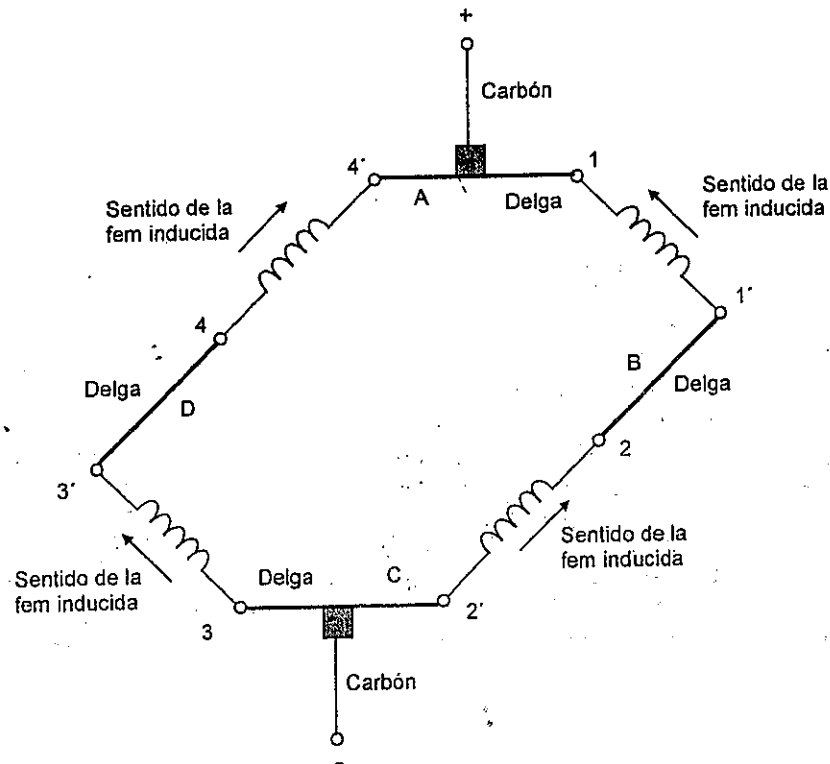


Figura 12.8 Esquema de conexión de las espiras y el sentido de las fuerzas electromotrices inducidas

En la figura anterior podemos observar que las bobinas ó espiras están conectadas de la siguiente forma:

Bobina 1 - 1' en serie con la 2 - 2'

Bobina 3 - 3' en serie con la 4 - 4'

Además ambos conjuntos están en paralelo en función de cómo están ubicadas las escobillas o carbones.

En la figura 12.9 podemos observar como varía la fuerza electromotriz inducida en las bobinas, en un giro completo del rotor.

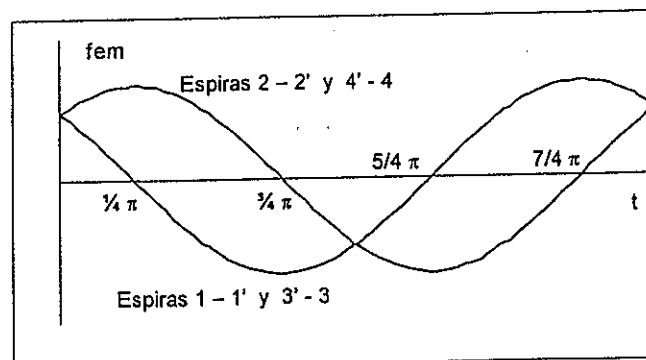


Figura 12.9 Valores de las fuerzas electromotrices inducidas en las espiras

De acuerdo a los sentidos de las fuerzas electromotrices inducidas en los conductores, la escobilla "C1" tiene polaridad positiva y la escobilla "C2" polaridad negativa. Esta situación se mantiene hasta que el rotor gira 45° desde la posición inicial, y en esta posición las escobillas cortocircuitan las delgas según se puede observar en la figura 12.10.

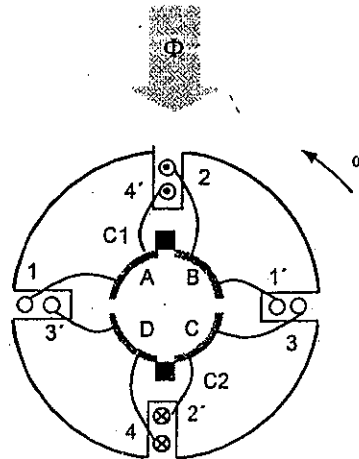


Figura 12.10 Posición de las delgas y espiras con un giro de 45°

En esta posición del rotor la conexión eléctrica de las bobinas es la que mostramos en la figura 12.11.

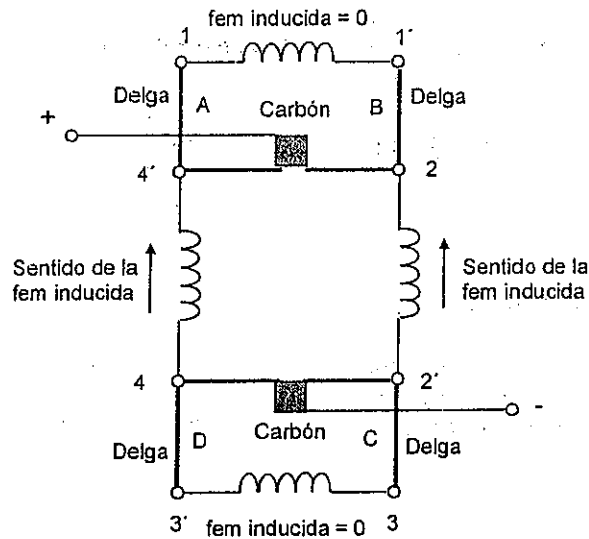


Figura 12.11 Conexión de las bobinas y escobillas con un giro de 45°

Debemos observar que en esta posición la fuerza electromotriz inducida en las espiras 1 – 1' y 3 – 3' tienen un valor "cero" ya que el flujo magnético concatenado por las mismas pasa por su valor máximo. Esto hace que al ser cortocircuitadas no haya una corriente en las mismas, y la diferencia de potencial entre carbones es la que tienen las bobinas 2 – 2' y 4 – 4' que están en paralelo.

Un avance en el giro posterior se muestra en la figura 12.12.

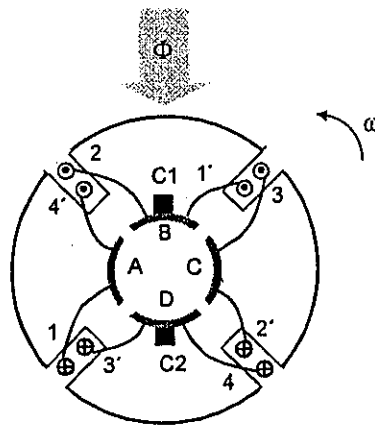


Figura 12.12 Posición del rotor después de un giro de 90°

De acuerdo a esta nueva posición la conexión de las bobinas y escobillas es la de la figura 12.13.

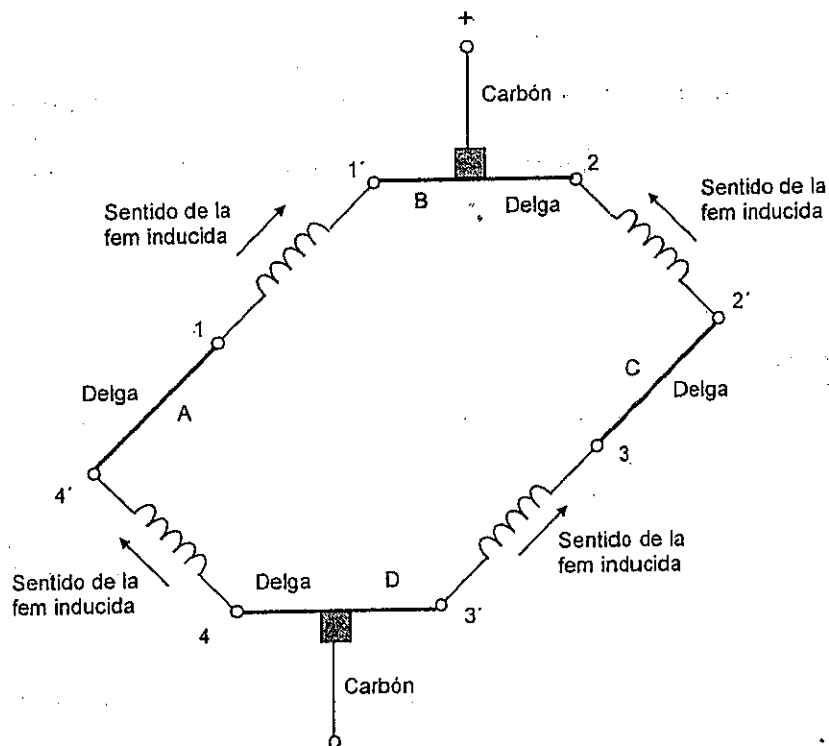


Figura 12.13 Conexión de las bobinas y escobillas con un giro de 90°

De acuerdo al esquema anterior, podemos observar que el carbón "C1", que originalmente estaba conectado a los terminales 1 y 4' que eran positivos, ahora está conectado a los terminales 1' y 2 que son los positivos.

De igual forma el carbón "C2", que estaba conectado a los terminales 2' y 3 que eran negativos, ahora está conectado a los terminales 3' y 4 que son los negativos. Esto nos muestra que el colector hace mantener la polaridad sobre los carbones, o sea actúa como si estuviera rectificando las ondas de tensión que se inducen en las bobinas. Debemos tener en cuenta que la tensión que se obtiene es la suma de las tensiones de dos bobinas, instante a instante, lo cual podemos observar en la figura 12.13.

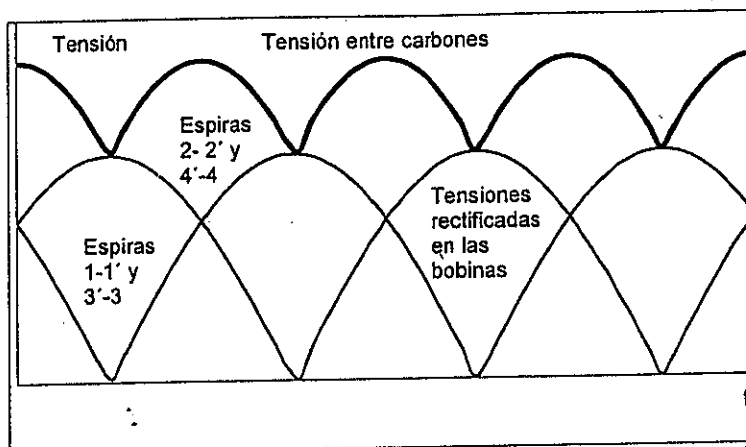


Figura 12.13 Forma de onda rectificadas en las espiras y onda resultante que aparece entre los carbones

Si ahora analizamos una máquina que tenga 6 ranuras, en la figura 12.14, vemos la ubicación de los conductores y la posición de las escobillas para que la conmutación se efectúe cuando la tensión de las espiras que cortocircuite pase por cero, o sea se deben ubicar en la línea neutra.

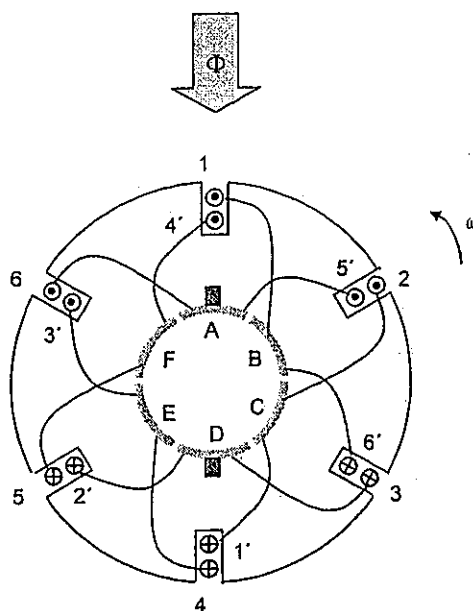


Figura 12.14 Esquema del rotor de una máquina con seis delgas

Las conexiones entre las espiras se muestran en la figura 12.15:

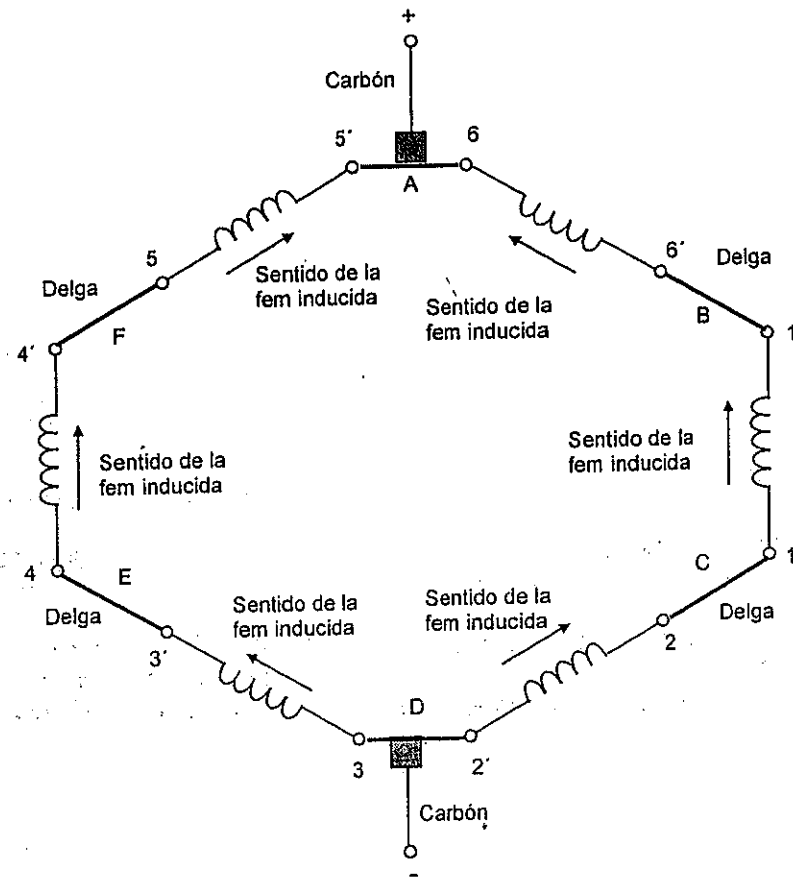


Figura 12.15 Conexiones de las bobinas en la posición del rotor de la figura 12.14

En forma análoga se muestran las posiciones para un giro de 30° y 60° en las figuras 12.16, 12.17, 12.18 y 12.20.

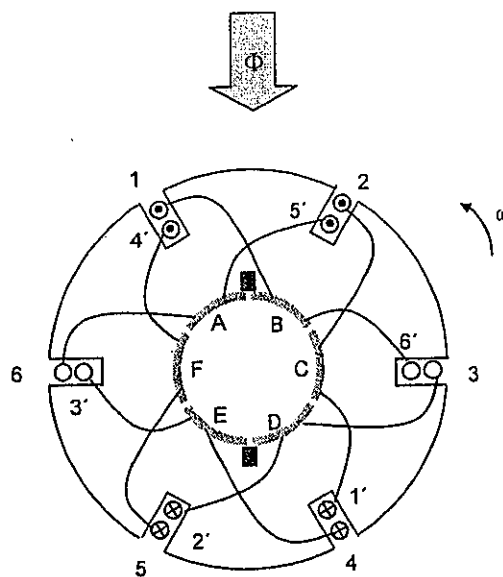


Figura 12.16 esquema del rotor de una máquina con seis delgas con un giro de 30°

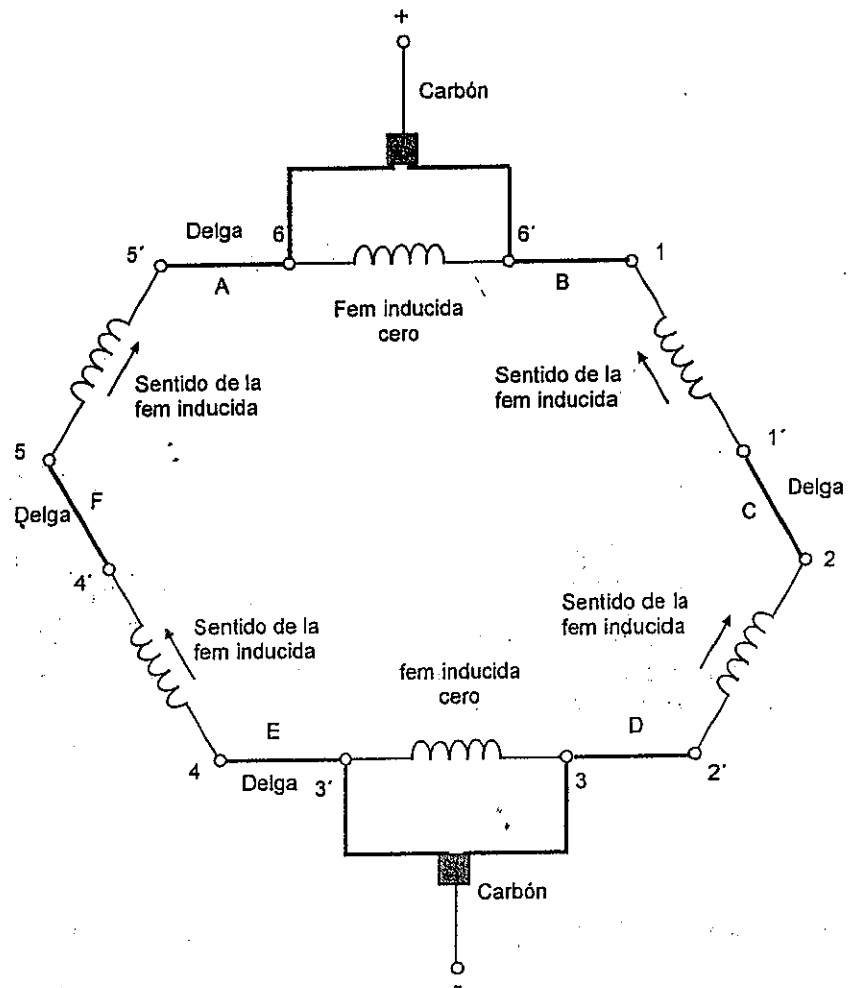


Figura 12.17 Conexiones de las bobinas en la posición del rotor de la figura 12.16

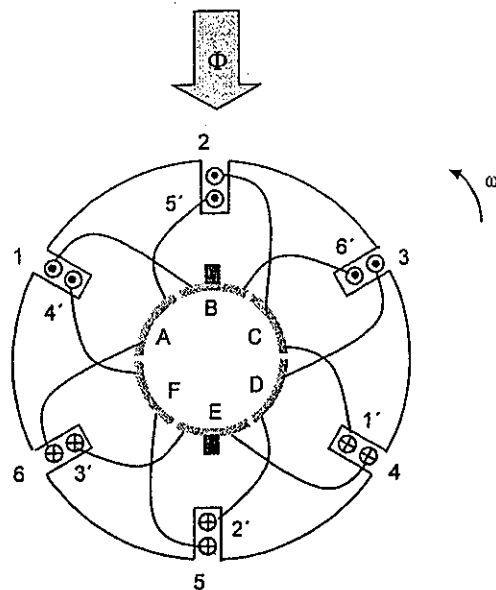


Figura 12.18 esquema del rotor de una máquina con seis delgas con un giro de 60°

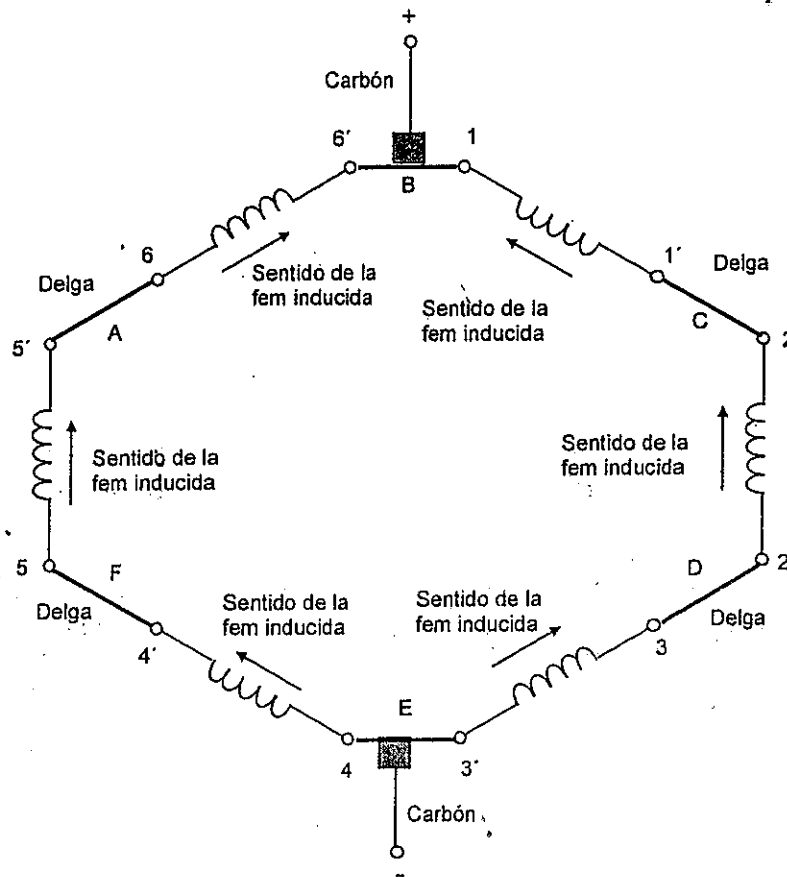


Figura 12.19 Conexiones de las bobinas en la posición del rotor de la figura 12.18

Las formas de onda de fuerza electromotriz en cada espira se muestra en la figura 12.20, y en la 12.21 se observa la tensión de salida del generador, partiendo de la posición del rotor indicada en la figura 12.14.

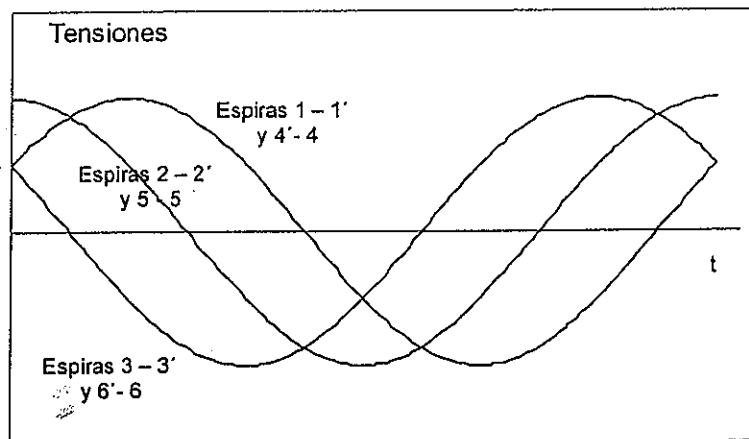


Figura 12.20 Formas de onda en las espiras de la máquina

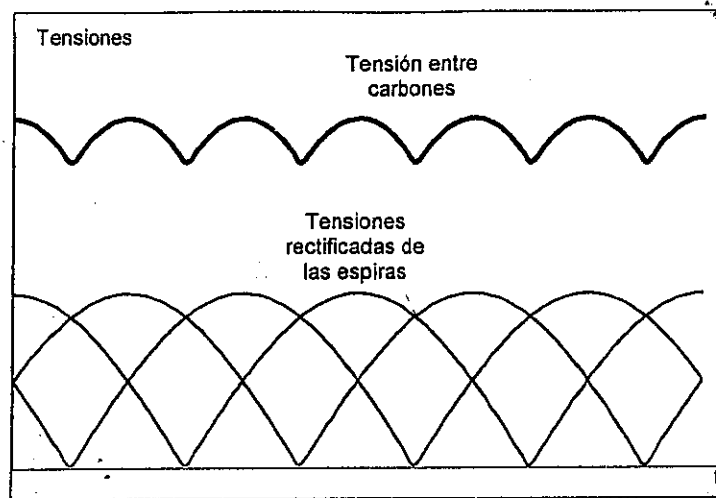


Figura 12.21 Formas de onda rectificadas de las espiras y la tensión entre carbones como suma de las mismas

Reacción de armadura

Todo lo analizado anteriormente es válido si por los conductores de la armadura no circula corriente, ya que en todo momento hemos supuesto que el flujo magnético actuante, tenía su eje coincidente con el plano formado por las escobillas ó carbones.

Hemos visto que todos los conductores ubicados por arriba del plano que pasando por el eje del rotor, es perpendicular al flujo magnético, tenían una fuerza electromotriz saliente y el la parte de abajo entrante, tal cual se esquematiza en la figura 12.22.

La línea que separa los conductores con sentido de fem entrante a los de fem saliente recibe el nombre de "línea neutra".

Si al generador se le coloca una carga, la corriente circulante, tendrá el mismo sentido que la fuerza electromotriz, pero con esa distribución de corrientes, se origina un flujo magnético como el indicado en la figura.

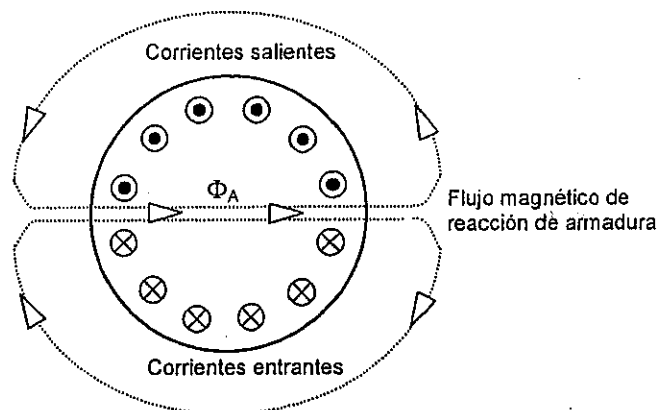


Figura 12.22 Esquema del flujo magnético originado en la armadura por la circulación de corriente

La composición de este flujo magnético con el originado por las bobinas del estator, nos dará uno resultante cuya dirección y sentido se aparta del originado por el estator, lo cual trae aparejado que cuando los carbones cortocircuiten dos delgas, la tensión entre ambas no sea cero con una corriente circulante elevada.

Si giramos los carbonos hasta ubicarlos de forma tal que su plano concuerde con la dirección del flujo resultante, se solucionaría el problema, pero como la corriente de carga puede variar, no sería práctico estar ajustando la posición de las escobillas.

Para poder solucionar este inconveniente lo que se hace en la práctica es colocar dos bobinas en serie, cuyo eje magnético coincida con la dirección del flujo magnético originado por la armadura, y por las mismas se hace circular la corriente de la carga, con lo cual se compensa automáticamente la reacción de armadura ya que la compensación tiene sentido contrario, tal como se muestra en la figura 12.23.

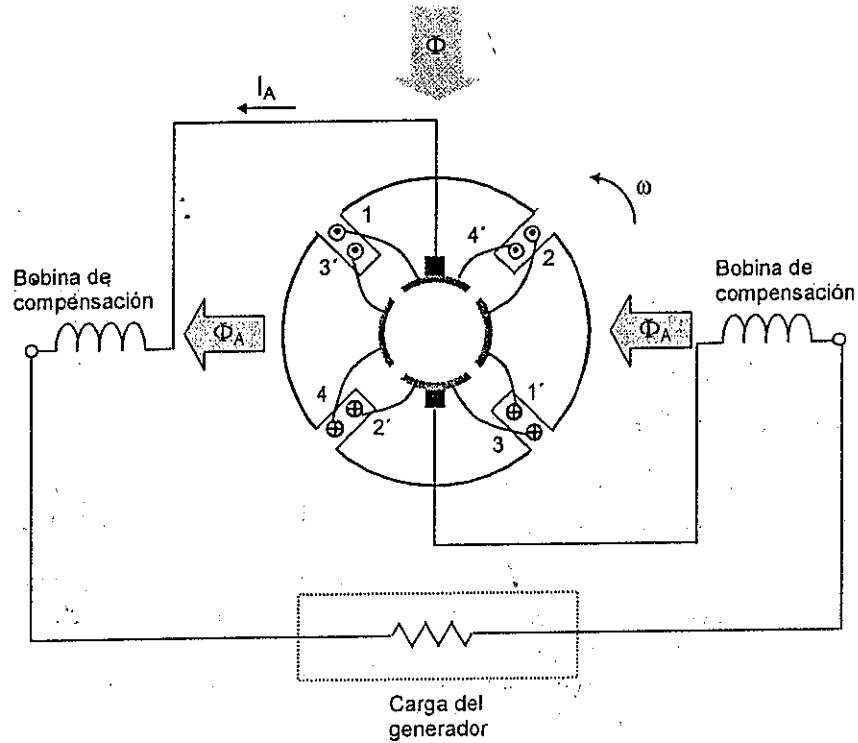


Figura 12.23 Esquema de compensación de la reacción de armadura

En la figura 12.24 se muestra la disposición de las bobinas principales y auxiliares o de compensación.

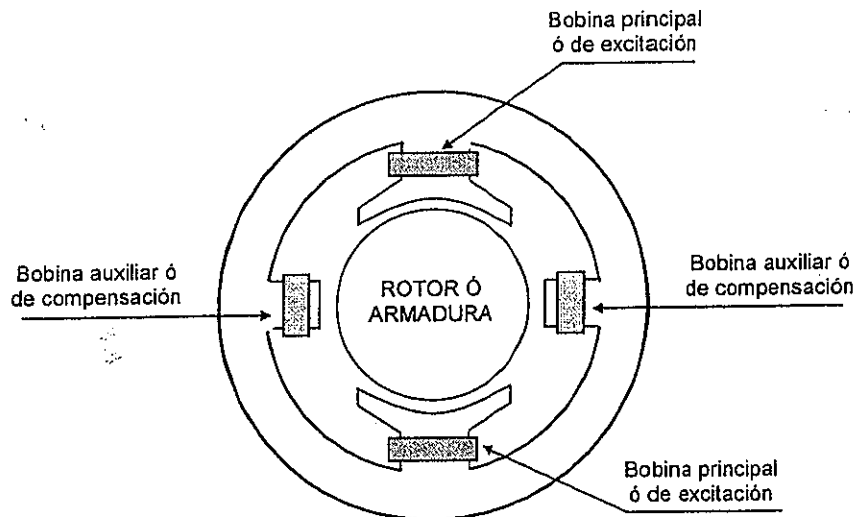


Figura 12.24 Disposición de las bobinas en el estator de la máquina

Tensión inducida

La tensión inducida en los conductores estará dada por la siguiente expresión:

$$E = B \cdot L \cdot v \quad [\text{V}]$$

Donde: B: Inducción originada por la corriente de las bobinas excitadoras del estator [T]

L: Longitud del conductor bajo la influencia del campo magnético, que es la longitud del rotor [m]

v: Velocidad tangencial del rotor [m/s]

El valor de la inducción magnética lo podemos obtener como:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Siendo "S" la sección de la máquina asociada con cada polo magnético, por lo tanto si la misma cuenta con "P" polos, la sección es la del cilindro que forma el rotor dividida por la cantidad de polos magnéticos, con lo cual nos queda:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\frac{\pi \cdot D \cdot L}{P}} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L}$$

La velocidad tangencial en función de la velocidad angular es:

$$v = \omega \frac{D}{2}$$

Siendo "D" el diámetro del rotor

Y la velocidad tangencial tomando la velocidad "n" en revoluciones por minuto está dada por:

$$v = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{D}{2}$$

Reemplazando nos queda:

$$E = \frac{P}{60} \cdot \Phi \cdot n$$

Esta expresión es válida para una máquina de un solo conductor. Si la misma tiene "Z" conductores y la corriente total se divide en "a" ramas en paralelo, la expresión nos queda:

$$e = \frac{Z \cdot P}{a \cdot 60} \cdot \Phi \cdot n$$

Teniendo en cuenta que "Z", "P" y "a" son constantes, la ecuación nos va a quedar:

$$E = K_1 \cdot \Phi \cdot n$$

12.3 Motor de corriente continua

La máquina que estuvimos analizando es reversible, y alimentando la armadura con una fuente de corriente continua, dicha máquina funciona como motor.

Para analizar conceptualmente su principio de funcionamiento analizaremos un rotor con solo dos conductores, a los efectos de simplificar el estudio.

En el estator se origina el campo principal, el cual representaremos por un flujo magnético.

La alimentación del rotor se efectúa con corriente continua, manteniendo la polaridad de la máquina, tal como se muestra en la figura 12.25.

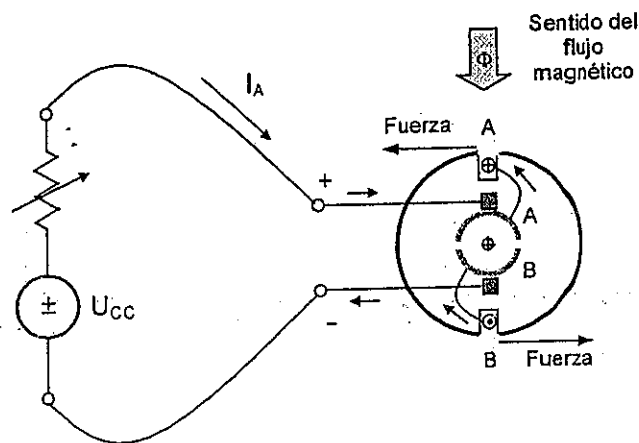


Figura 12.25 Alimentación del rotor de un motor de corriente continua

En la posición del rotor mostrada la corriente a la armadura entra por el borne positivo de la máquina, haciendo el recorrido indicado por las flechas. De acuerdo al sentido de la corriente en cada conductor y dado que los mismos están en presencia del campo magnético originado por el estator, sobre ellos aparecen fuerzas con el sentido indicado.

Estas fuerzas producen una cupla que hace girar al mismo. Luego de un giro de 90° , los carbones cortocircuitan las delgas, por lo que la corriente de alimentación se cierra a través de las mismas, tal como se muestra en la figura 12.26.

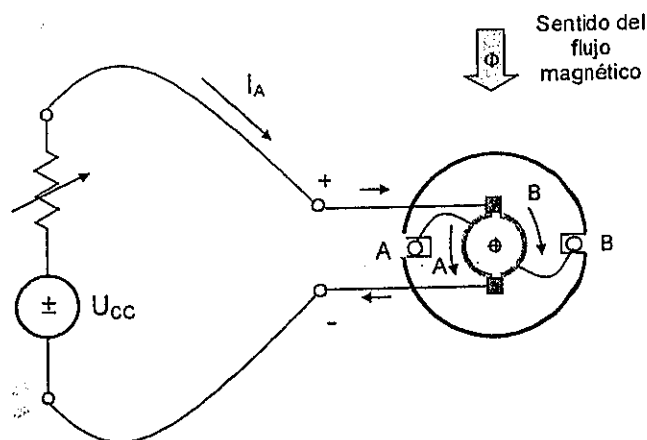


Figura 12.26 Circulación de la corriente en la armadura cuando se cortocircuitan las delgas

En este instante la corriente no circula por la espira, lo cual trae aparejado que no originen fuerzas, pero la máquina sigue girando ya que tiene otros conductores que aportan que no se han colocado para simplificar el estudio.

Al seguir girando la máquina la corriente en los conductores del rotor invierte su sentido de circulación de forma tal que siguen aportando cupla en el mismo sentido, tal como se muestra en la figura 12.27.

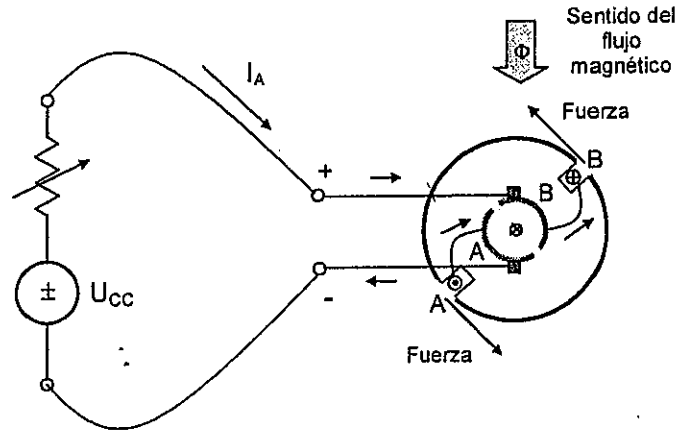


Figura 12.27 Sentido de circulación de la corriente en la armadura después de un giro superior a 90°

En el motor también por el hecho de tener los conductores del rotor, girando en presencia de un campo magnético, se induce en los mismos una fuerza electromotriz, que en este caso se llama contraelectromotriz.

Cupla interna

La cupla que aporta cada conductor está dada por:

$$T_{ic} = B \cdot I_c \cdot L \frac{D}{2}$$

De la misma forma que vimos para el funcionamiento como generador:

$$B = \frac{\Phi}{\pi \cdot D \cdot L} = \frac{2 \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L}$$

La corriente por conductor está dada por la corriente total dividida en la cantidad de ramas en paralelo, o sea:

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

reemplazando nos queda:

$$T_{ic} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot a} \Phi \cdot I_A$$

Para "Z" conductores nos queda:

$$T_i = \frac{P \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot a} \Phi \cdot I_A$$

teniendo en cuenta los valores constantes:

$$T_i = K \cdot \Phi \cdot I_A$$

Circuito equivalente

La armadura o inducido de la máquina de corriente continua, la podemos considerar desde las escobillas, como una serie de tensiones elementales, caracterizadas por la fuerza electromotriz y una resistencia óhmica propia de los conductores, con lo cual un circuito equivalente se muestra en la figura 12.28.

En este circuito la excitación está alimentada mediante una fuente externa o independiente.

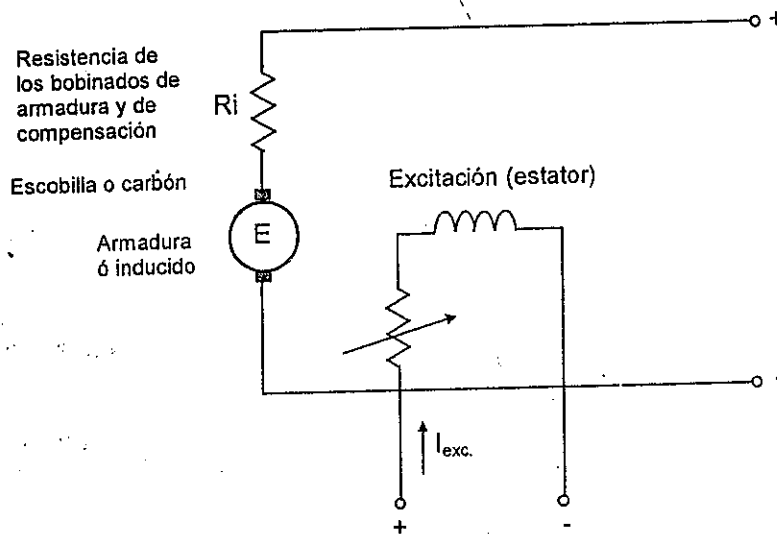


Figura 12.28 Circuito equivalente de una máquina de corriente continua

Máquina autoexcitada

Excitación en derivación

La máquina autoexcitada alimenta su bobina de excitación, con la propia tensión que genera, o bien con la tensión con la que se alimenta en el caso de motor.

En la figura 12.29 están representados los circuitos equivalentes, tanto para generador como motor.

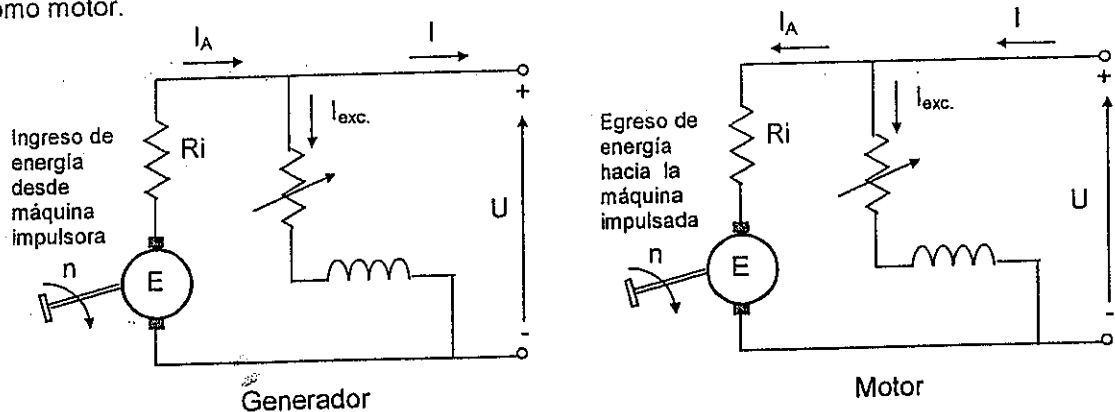


Figura 12.29 Sentido de las corrientes de las máquinas autoexcitadas en derivación

De acuerdo a la configuración mostrada, las ecuaciones que ligan a las máquinas son:

$$U = E - I_A \cdot R_i \quad \text{Como generador}$$

$$E = U + I_A \cdot R_i \quad \text{Como motor}$$

A la caída de tensión en la resistencia interna se le deberá agregar la caída de tensión en las escobillas por su resistencia y la que ofrece por contacto, lo cual se puede estimar en 1 V por cada escobilla.

Se debe tener en cuenta que el generador, en el momento de arranque en el cual la tensión generada vale cero, la excitación se logra mediante el flujo magnético remanente que tiene la máquina, el cual origina una fem pequeña que alimenta el campo de excitación, aumentando el flujo, el cual a su vez aumenta la tensión generada, hasta llegar a su punto de funcionamiento.

A tales efectos en la figura 12.30 se muestra la forma en que varía la fuerza electromotriz inducida en función de la corriente de excitación.

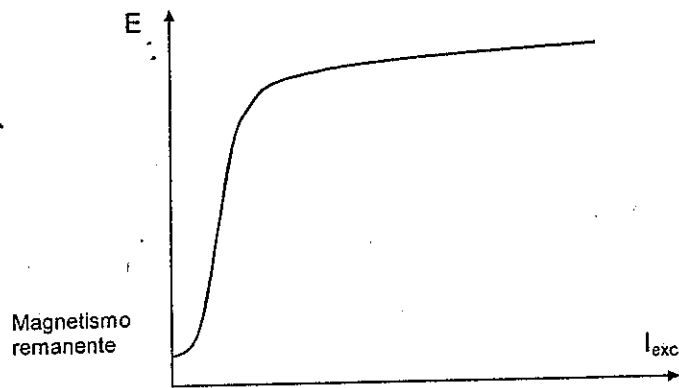


Figura 12.30 Curva de magnetización de una máquina de corriente continua

Dado que la tensión de salida y la fuerza electromotriz generada es prácticamente igual, dicho valor se obtiene por dos caminos:

- A través de la armadura en la cual la tensión en bornes depende de la corriente de excitación, por la curva de la figura 12.30
- A través del inductor en el cual la tensión en bornes es igual a la corriente de excitación multiplicada por la resistencia total (propia de la bobina más la resistencia adicional para variar la corriente), siendo esta la ecuación de una recta.
- El punto de funcionamiento del generador es aquel en el cual se cumplen simultáneamente ambos valores o sea en la intersección de ambas curvas. Esto se observa en la figura 12.31

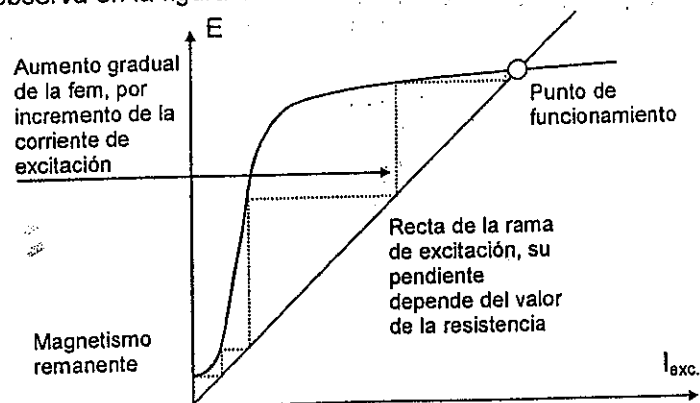


Figura 12.31 Punto de funcionamiento de un generador derivación, y forma en que se autoexcita

Es importante tener en cuenta que la excitación esté bien conectada, ya que en caso contrario, si el flujo originado por la corriente se opone al magnetismo remanente, la máquina se desmagnetiza y la misma no "levanta tensión".

Excitación serie

En este caso la corriente de armadura y la de excitación son iguales, siendo su esquema el de la figura 12.32.

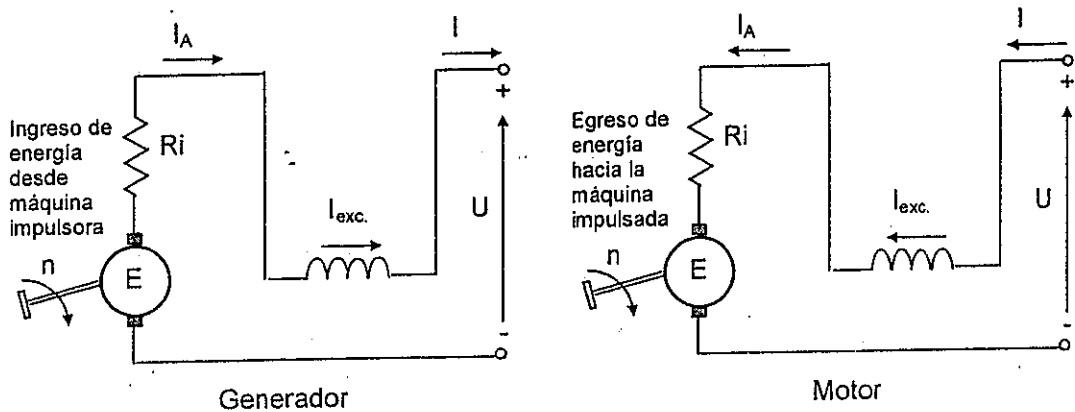


Figura 12.32 Sentido de las corrientes de las máquinas autoexcitadas en serie

De acuerdo a la configuración mostrada, las ecuaciones que ligan a las máquinas son:

$$U = E - I_A \cdot (R_i + R_{exc}) \quad \text{Como generador}$$

$$E = U - I_A \cdot (R_i + R_{exc}) \quad \text{Como motor}$$

La resistencia de excitación comprende la resistencia propia de la bobina más la resistencia adicional para poder regular la corriente.

Excitación compuesta

En este caso la excitación surge de tener ambas excitaciones simultáneamente, o sea derivación y serie, pudiendo ser el campo originado en las mismas adicional ó diferencial, con lo cual se logran distintas características de la máquina en cuestión.

En la figura 12.33 se muestra la forma de conexión para un motor de este tipo.

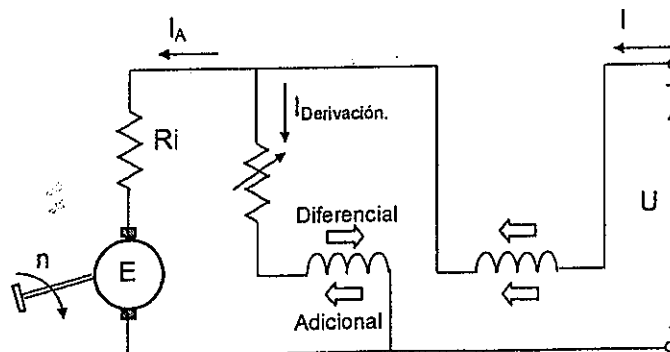


Figura 12.33 esquema de conexión compuesta

Flujo de potencia

Las pérdidas que presentan estas máquinas son las siguientes:

- Pérdidas en el cobre de la excitatriz
- Pérdidas en el cobre del inducido o armadura
- Pérdidas por la resistencia de las escobillas
- Pérdidas por frotamiento en las escobillas
- Pérdidas por frotamiento en los cojinetes
- Pérdidas por frotamiento con el aire del rotor
- Pérdidas por ventilación
- Pérdidas en el hierro (Histéresis y Foucault)

Al conjunto de las pérdidas por frotamientos las llamaremos pérdidas mecánicas que sumadas a las pérdidas en el hierro, llamaremos pérdidas rotacionales.

Luego un diagrama del flujo de potencia en esta máquina se diagrama en la figura 12.34.

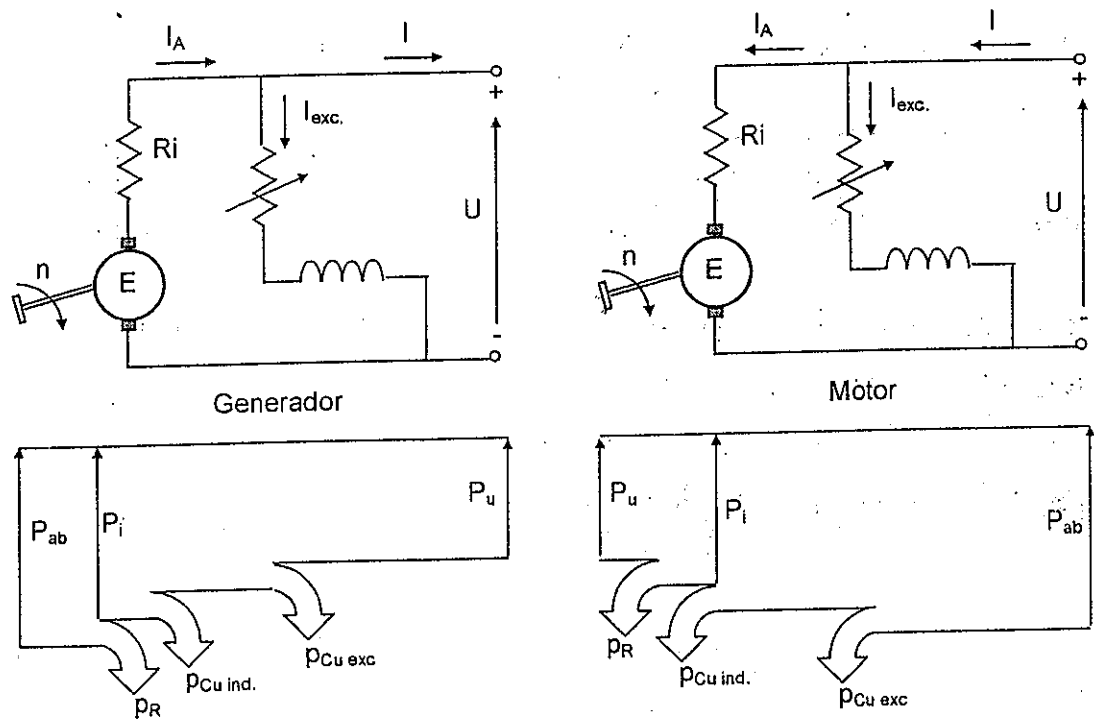


Figura 12.34 Diagrama del flujo de potencia en una máquina de corriente continua

En el diagrama la nomenclatura utilizada representa:

$P_{ab} = T \cdot \omega$ [W] La potencia entregada por la máquina impulsora en el caso del generador través del eje (Cupla[N.m] . velocidad angular [r/s])

$P_{ab} = U \cdot I$ [W] La potencia absorbida desde la red eléctrica

$P_i = E \cdot I_A$ [W] Es la potencia interna de la máquina es la potencia útil más las pérdidas rotacionales en el caso del motor, o bien la potencia absorbida menos las pérdidas rotacionales en el caso de generador

$p_{Cu\ ind.}$ Son las pérdidas en el inducido o armadura en las resistencias de las bobinas principales y de conmutación

$p_{Cu\ exc.}$ Son las pérdidas en las resistencias del circuito de excitación (Resistencia de la bobina + resistencia para regular la corriente de excitación)

Cupla y velocidad de los motores

Excitación en derivación

Habíamos visto que para un motor se cumple:

$$U = E + I_A \cdot R_i \quad \text{reemplazando } E = K_1 \cdot \Phi \cdot n$$

$$U = K_1 \cdot \Phi \cdot n + I_A \cdot R_i$$

El valor de la cupla está dado por: $T_i = K \cdot \Phi \cdot I_A$ de aquí: $I_A = \frac{T_i}{K \cdot \Phi}$

$$U = K_1 \cdot \Phi \cdot n + \frac{T_i}{K \cdot \Phi} R_i \quad \text{Despejando la velocidad:}$$

$$n = \frac{U}{K_1 \cdot \Phi} - \frac{R_i}{K \cdot K_1 \cdot \Phi^2} T_i \quad \Rightarrow \quad n = n_0 - \frac{R_i}{K \cdot K_1 \cdot \Phi^2} T_i$$

Si se mantiene la excitación y la tensión constantes, la ecuación anterior es una recta, tal cual se muestra en la figura 12.35. dado que la resistencia interna de la máquina es muy pequeña, el segundo término es pequeño, lo cual hace que la velocidad de este tipo de motor tenga muy poca variación con la cupla.

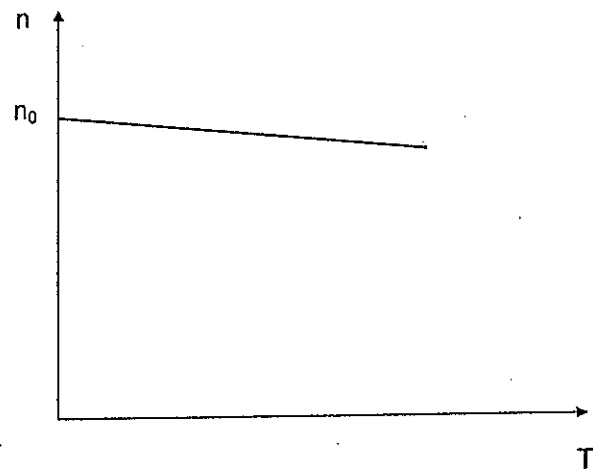


Figura 12.35 Variación de la velocidad con la cupla en un motor derivación