

MÁQUINA SINCRÓNICA

9.1 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).

9.2 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 9.1.

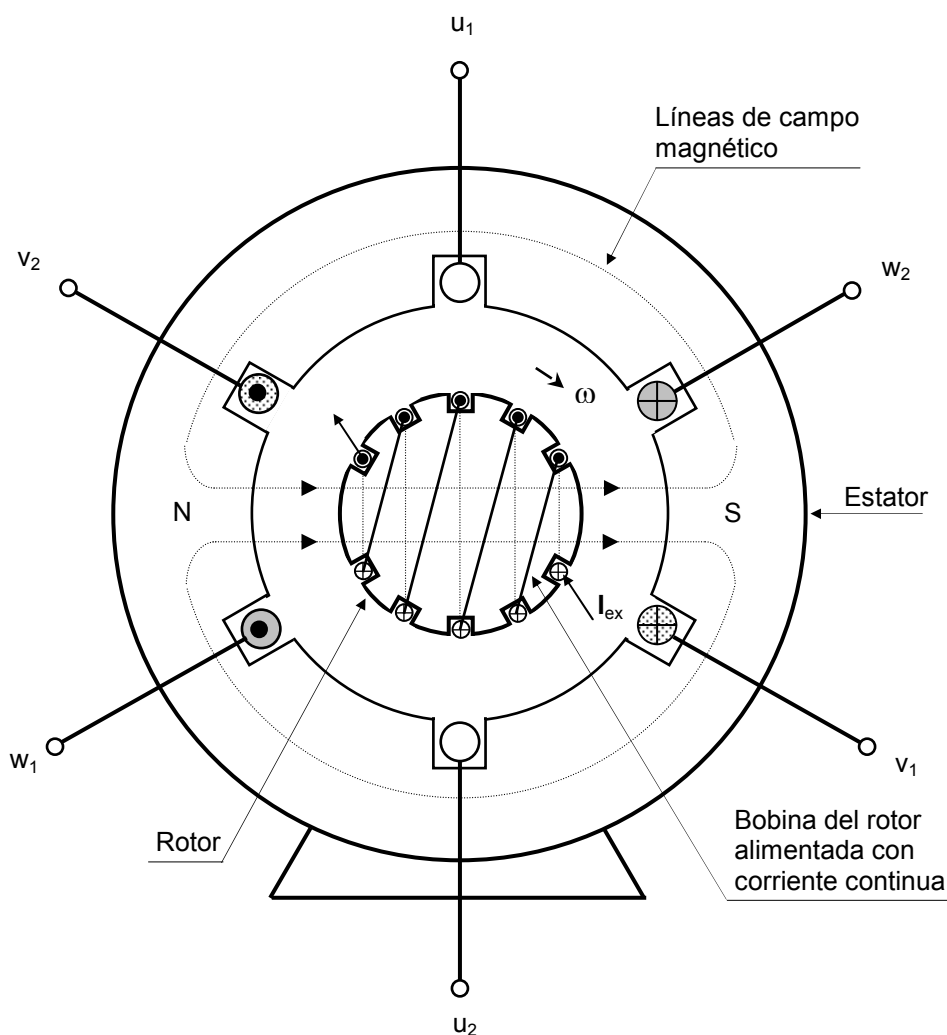


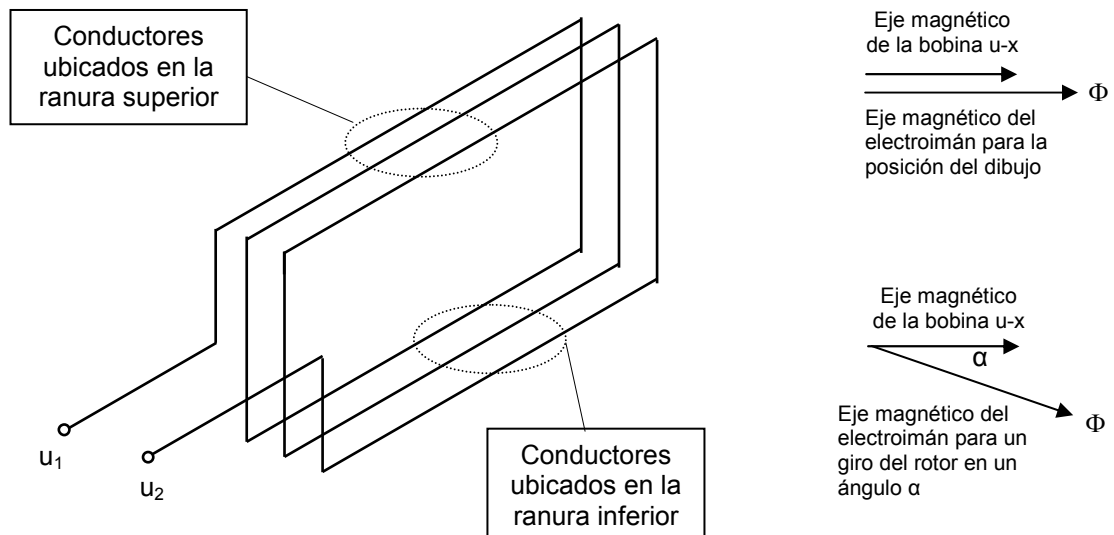
Figura 9.1 Esquema de un generador síncrono trifásico

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 9.2 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 sí.

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 9.2 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 valor del 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:

$$e_{u1-u2} = -N \frac{d\varphi}{dt} = N \Phi \omega \sin \omega t$$

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

$$e_{u1-u2} = E_{\max.} \sin \omega t$$

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:

$$e_{v1-v2} = E_{\max.} (\sin \omega t - 2\pi/3)$$

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

$$e_{w1-w2} = E_{\max.} (\sin \omega t - 4\pi/3)$$

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 9.3.

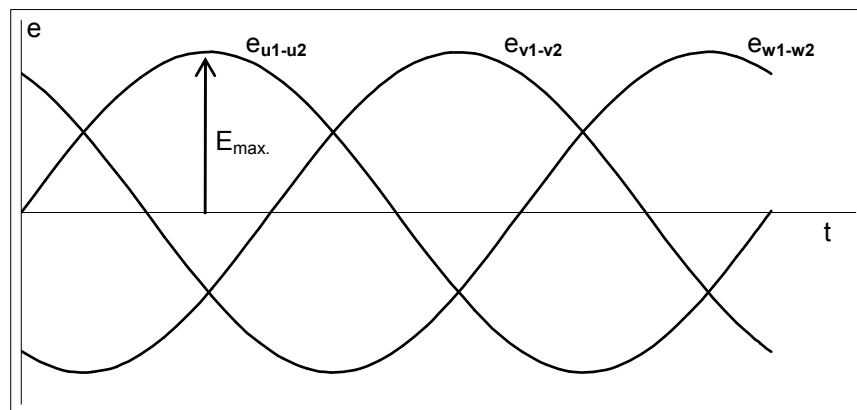


Figura 9.3 Sistema trifásico de tensiones

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 cumplirán “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 9.4 se muestra una máquina de 4 polos (Dos pares de pólos):

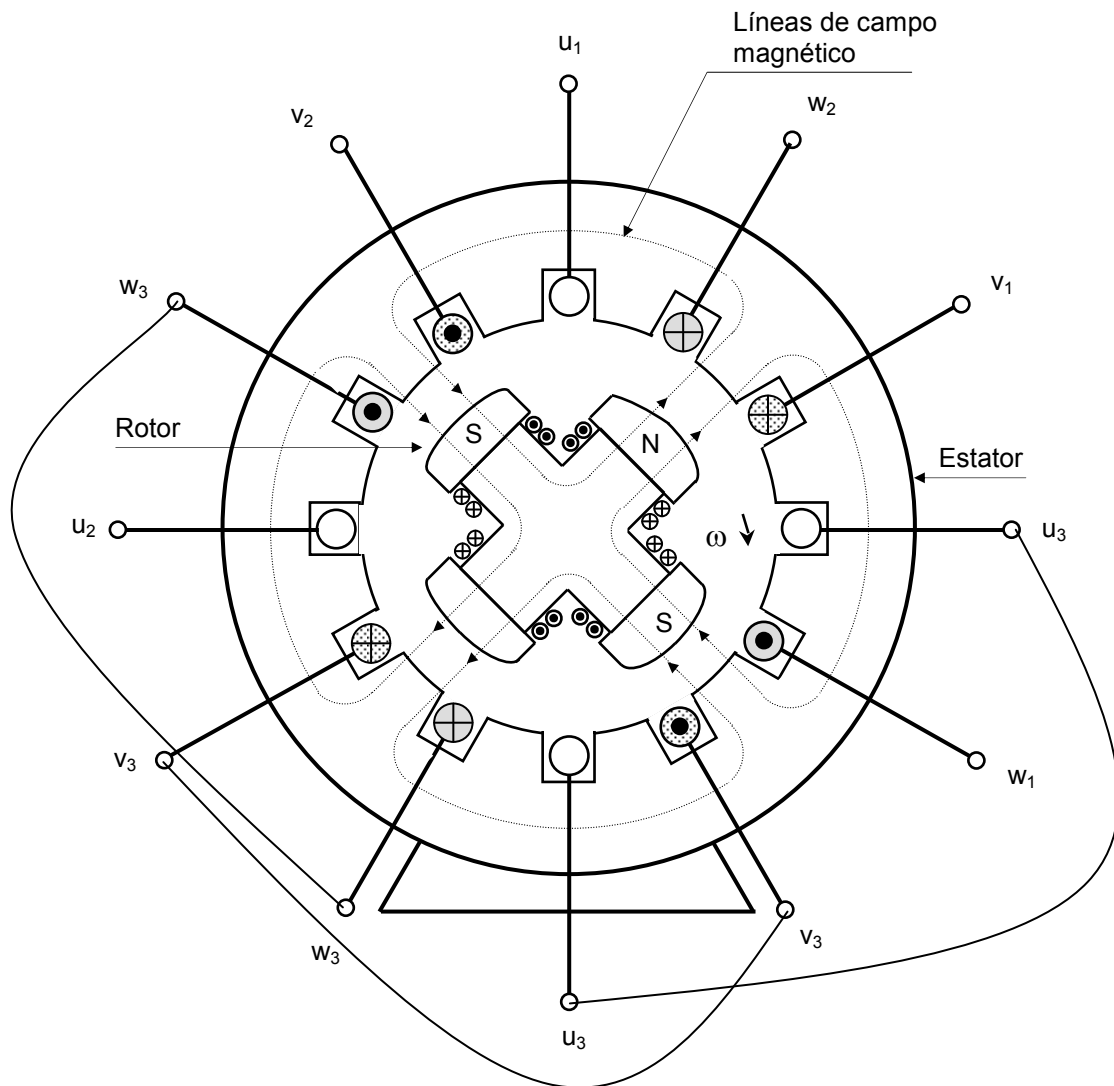


Figura 9.4 Generador síncrono trifásico de cuatro polos

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 9.5 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.

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

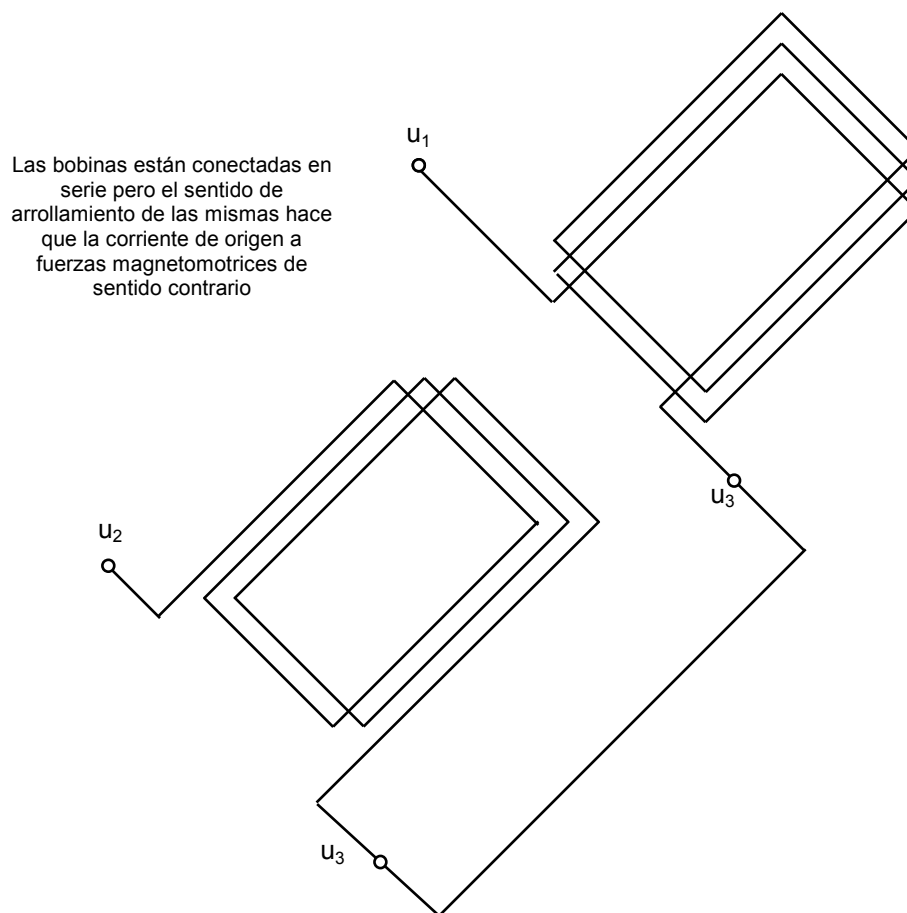


Figura 9.5 Esquema de las bobinas $u_1 - u_3 - u_3 - u_2$ para una fase de la máquina

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 9.6.

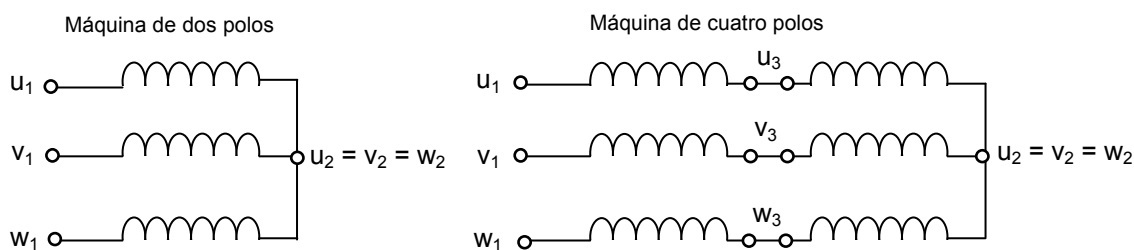


Figura 9.6 Conexión en estrella de los bobinados estáticos

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:

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 representó 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.

9.3 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 esté 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 9.7 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 5.3 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 5.7, y coincidiendo su sentido con el indicado en la figura 9.8, 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.

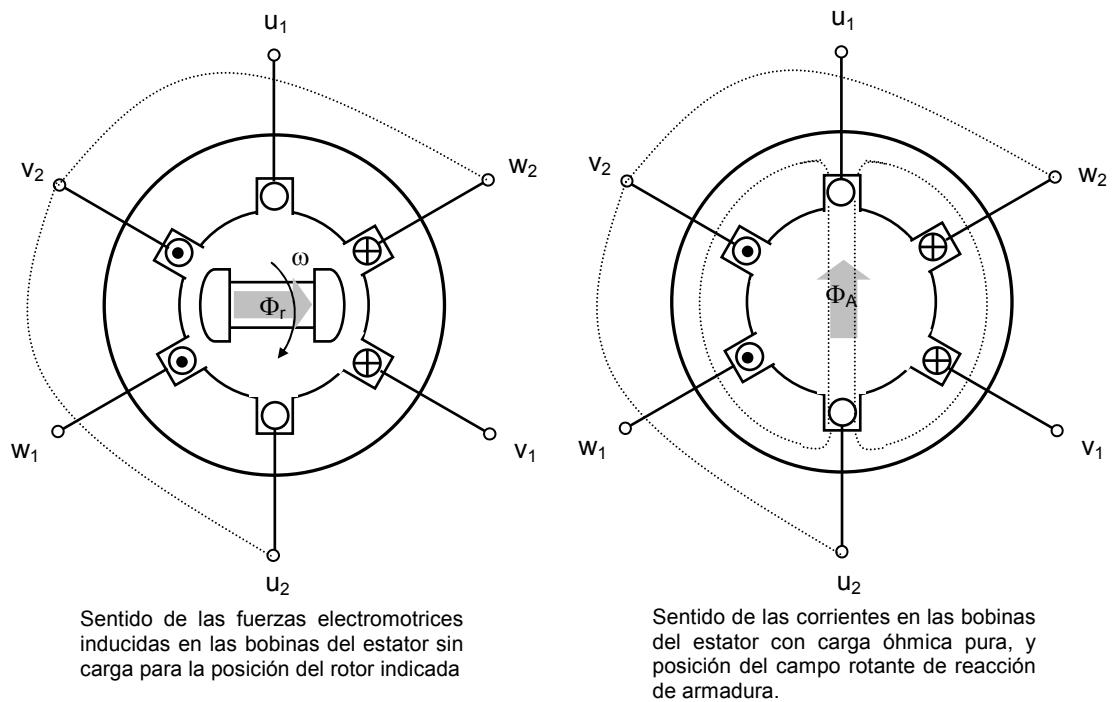


Figura 9.7 Posición de los campos magnéticos del rotor y de reacción de armadura para carga óhmica pura

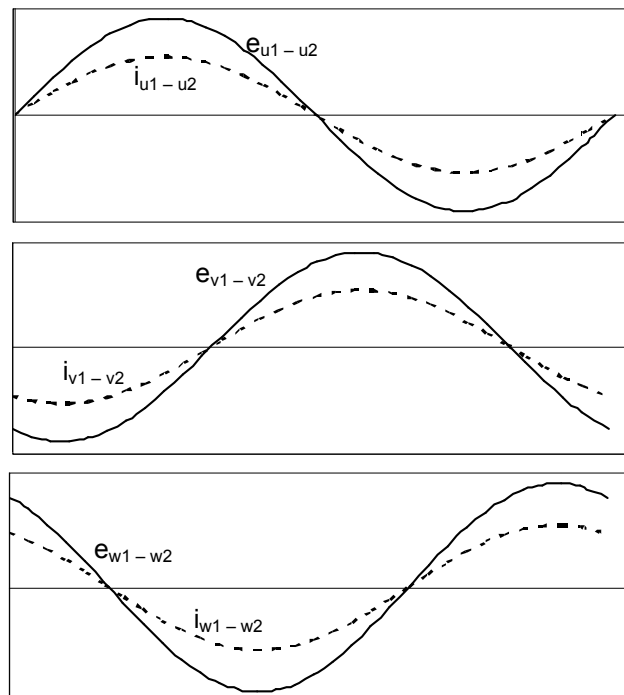


Figura 9.8 Valores instantáneos de las fem inducidas y las corrientes del estator para carga óhmica pura

Carga inductiva pura

En la figura 9.9 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 9.10 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”.

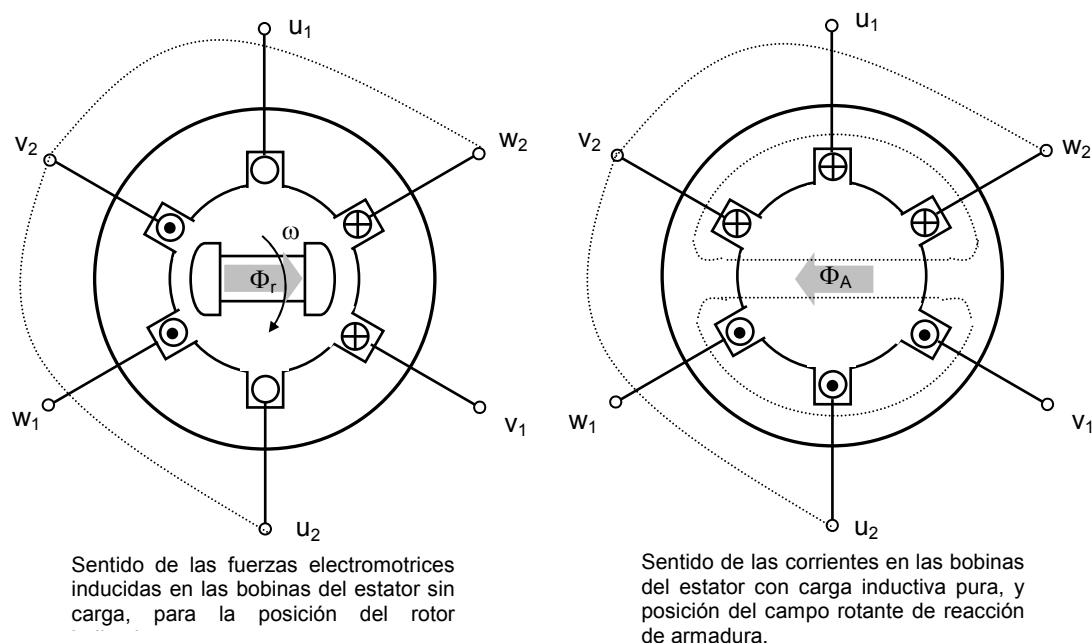


Figura 9.9 Posición de los campos magnéticos del rotor y de reacción de armadura para carga inductiva pura

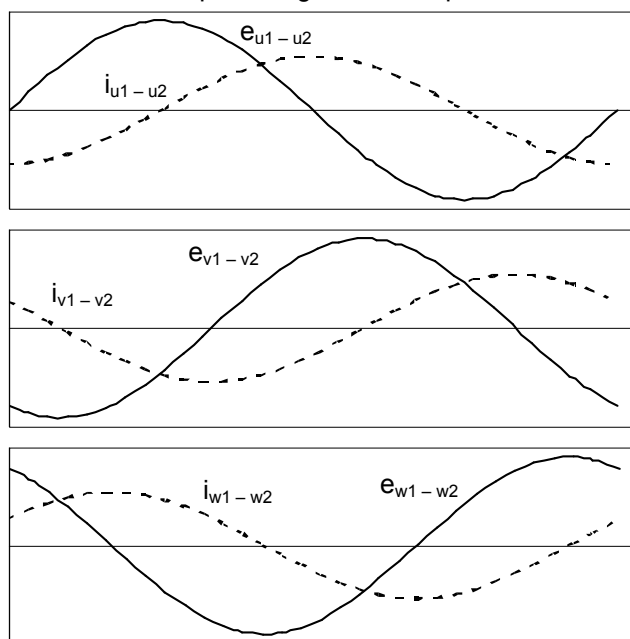


Figura 9.10 Valores instantáneos de las fem inducidas y las corrientes del estator para carga inductiva pura

Carga capacitiva pura

En la figura 9.11 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 9.12.

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".

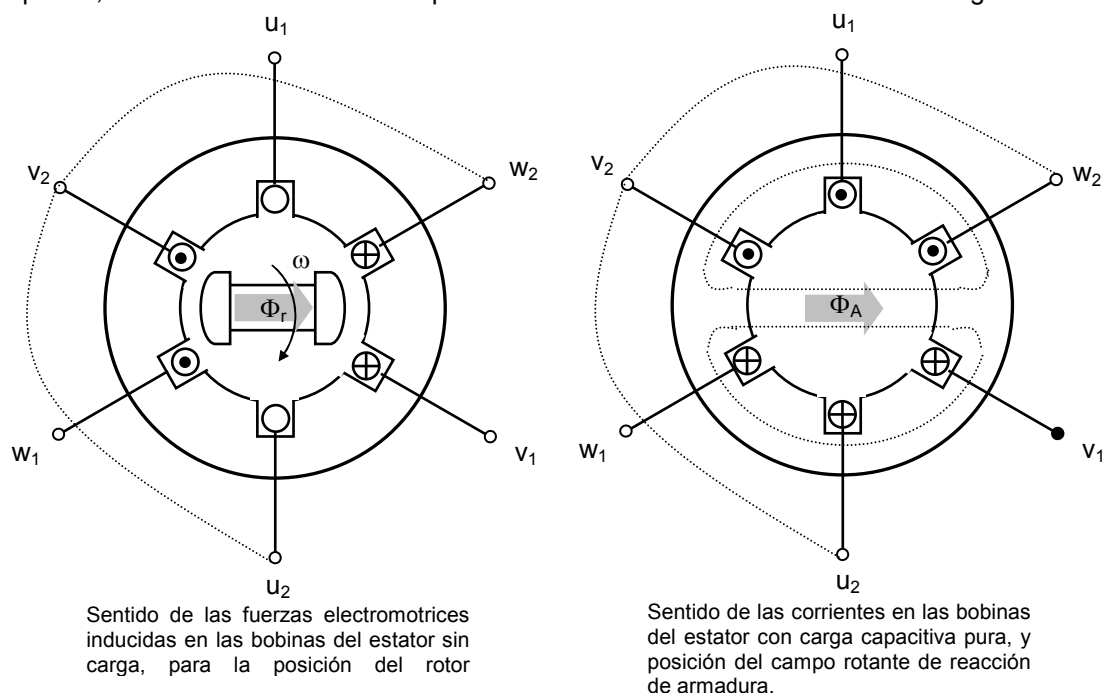


Figura 9.11 Posición de los campos magnéticos del rotor y de reacción de armadura para carga capacitiva pura

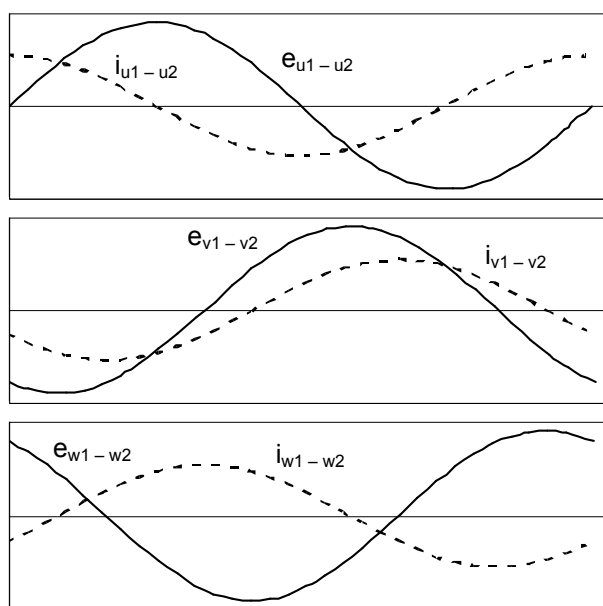


Figura 9.12 Valores instantáneos de las fem inducidas y las corrientes del estator para carga capacitiva pura

Carga óhmico inductiva

En la figura 9.13 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 9.14. 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.

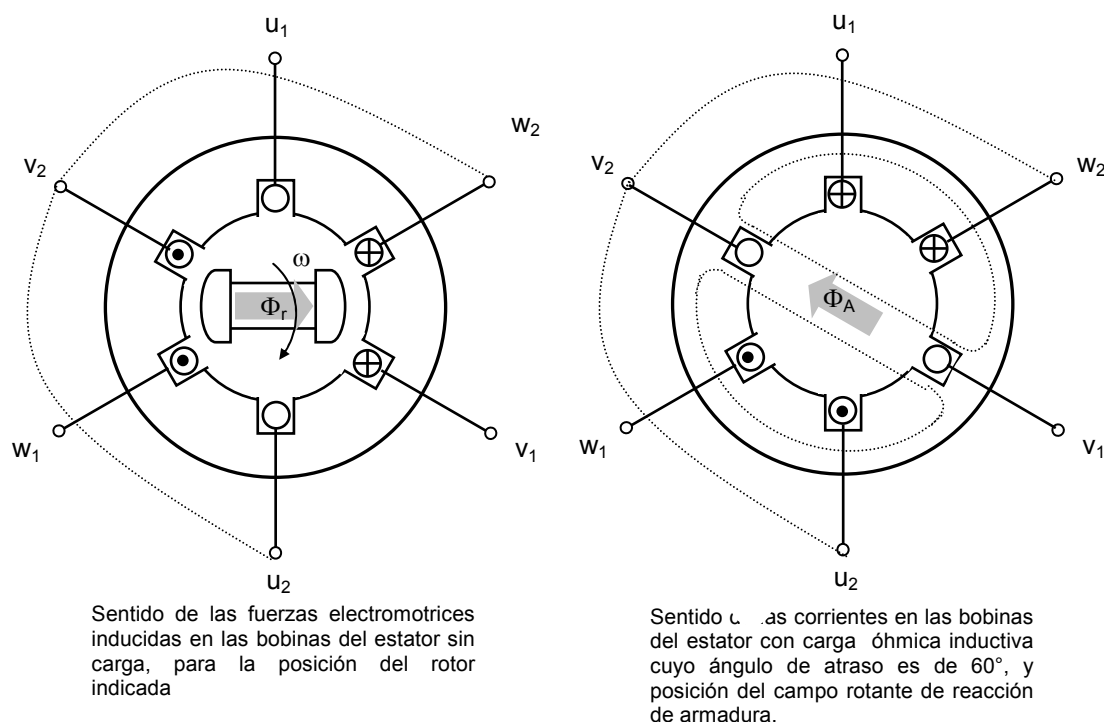


Figura 9.13 Posición de los campos magnéticos del rotor y de reacción de armadura para carga óhmico-inductiva

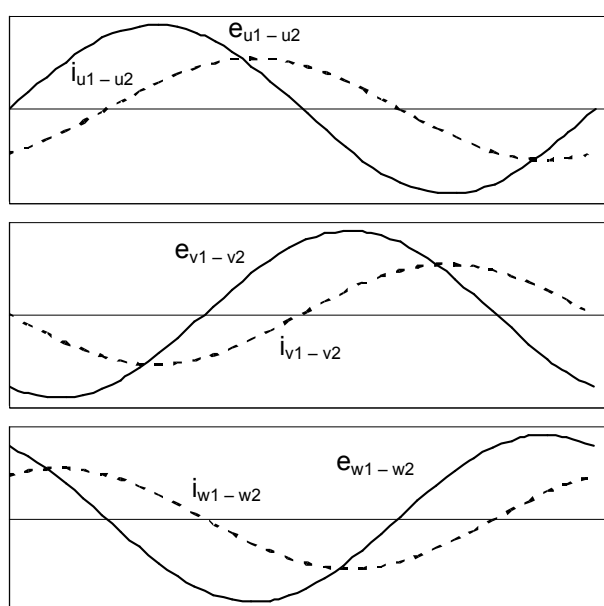


Figura 9.14 Valores instantáneos de las fem inducidas y las corrientes del estator para carga óhmica inductiva

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).

$$U_F = E_F - R_S I - j X_A I - j X_d I = E_F - R_S I - j X_S$$

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 9.15.

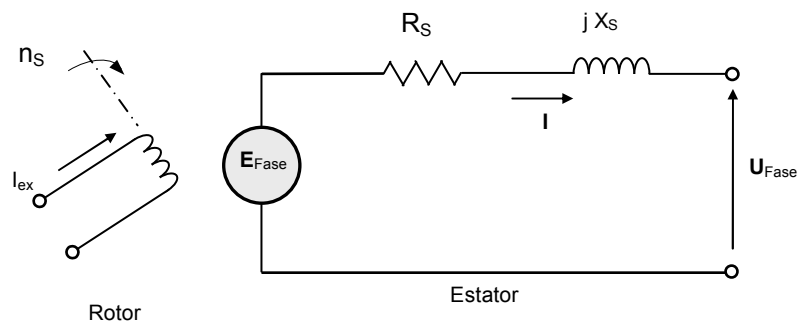


Figura 9.15 Circuito equivalente de un generador sincrónico

9.4 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 9.16

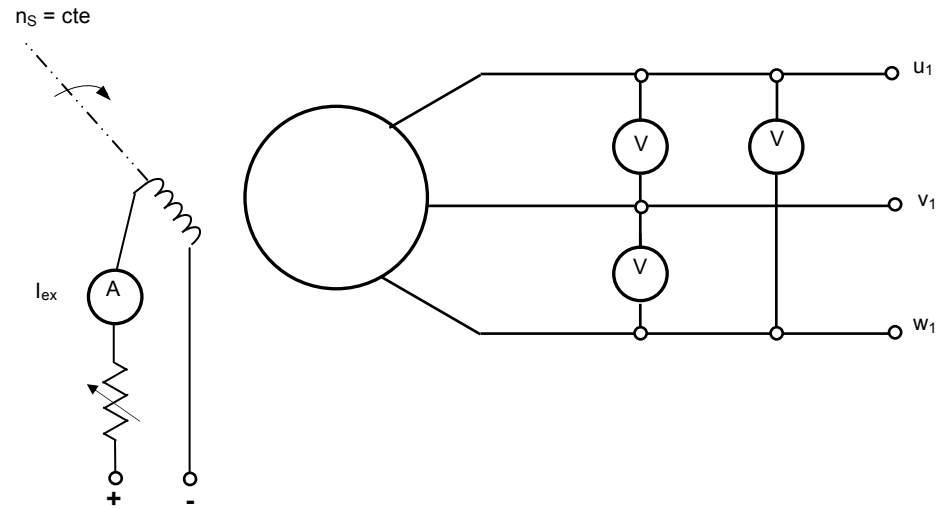


Figura 9.16 Circuito para ensayo en vacío de un generador sincrónico

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 9.17.

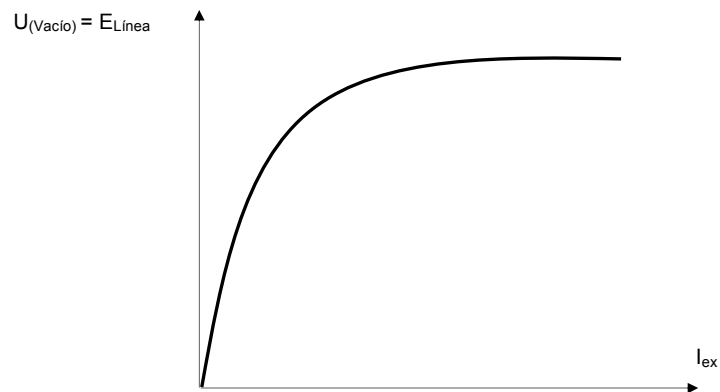


Figura 9.17 Curva de vacío de un generador sincrónico

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.

9.5 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 9.18.

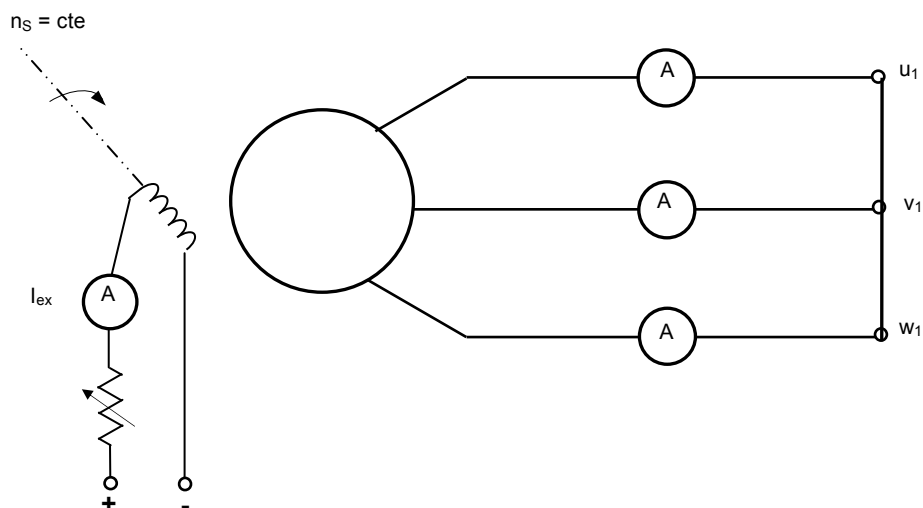


Figura 9.18 Circuito para ensayo en cortocircuito de un generador síncrono

Dado que la reacción de armadura es netamente desmagnetizante, debido a que la propia reactancia síncrona 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 9.19.

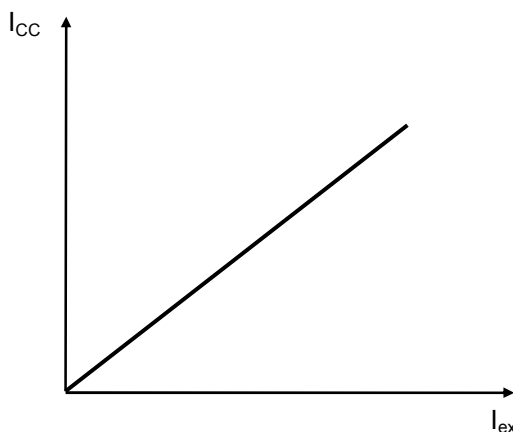


Figura 9.19 Curva de cortocircuito de un generador síncrono

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

9.6 Determinación de la impedancia sincrónica

Conociendo las características de vacío y cortocircuito de la máquina y volcándolas sobre un mismo gráfico (Figura 9.20) 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:

$$E_{\text{fase}} = Z_S I_{\text{CC}}$$

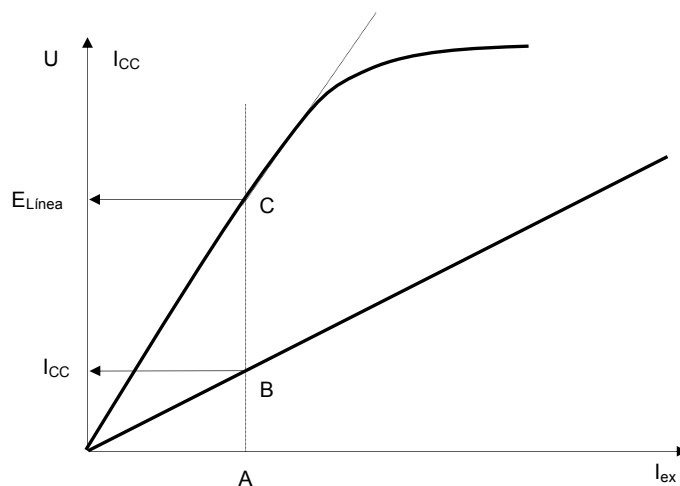


Figura 9.20 Curvas de vacío y cortocircuito de un generador sincrónico

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:

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

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 9.21.

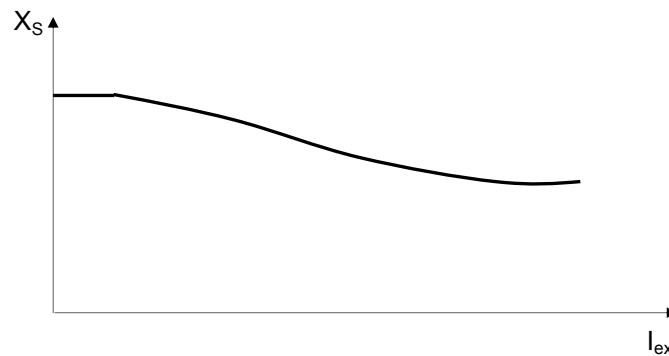


Figura 9.21 Variación de la reactancia sincrónica con la excitación de la máquina

9.7 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 9.22.

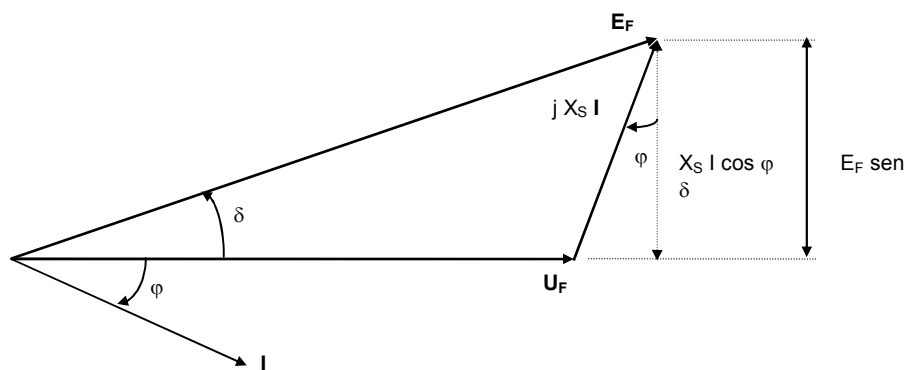


Figura 9.22 Diagrama fasorial de un generador sincrónico con carga óhmico - inductiva

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

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

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

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

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.

9.8 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 9.23).

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

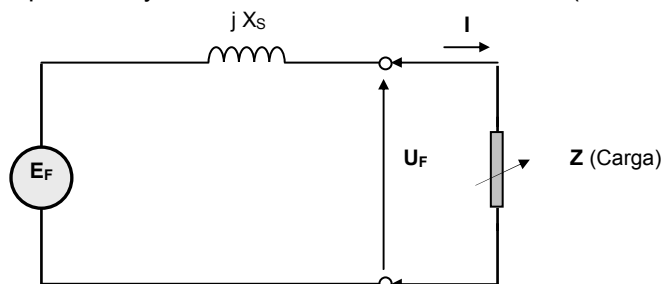


Figura 9.23 Generador sincrónico alimentando una carga

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 5.24.

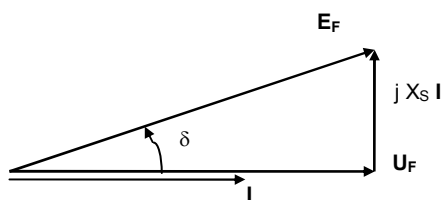


Figura 5.24 Diagrama fasorial de un generador sincrónico con carga óhmica

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 9.25.

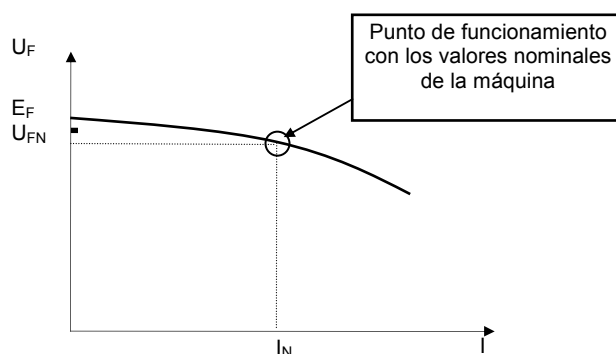


Figura 9.25 Variación de la tensión en bornes del generador con carga óhmica pura

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 9.26 y la variación de la tensión en sus bornes el de la figura 9.27.

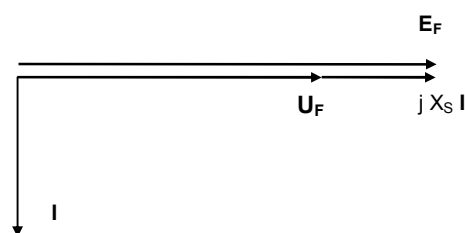


Figura 9.26 Diagrama fasorial de un generador sincrónico con carga inductiva pura

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

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

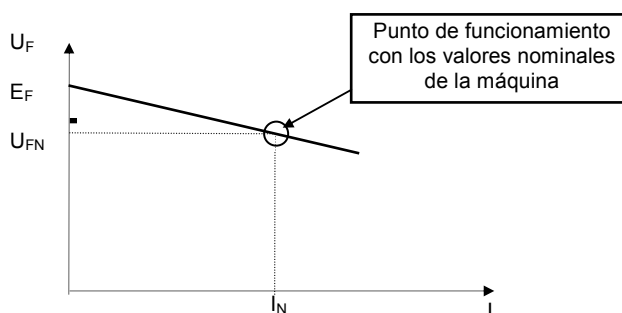


Figura 9.27 Variación de la tensión en bornes de un generador con carga inductiva pura

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 9.28 y la variación de la tensión en sus bornes se observa en la figura 9.29

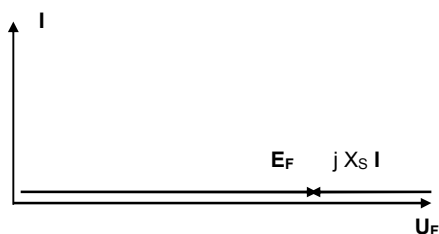


Figura 9.28 Diagrama fasorial de un generador síncrono con carga capacitiva pura

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

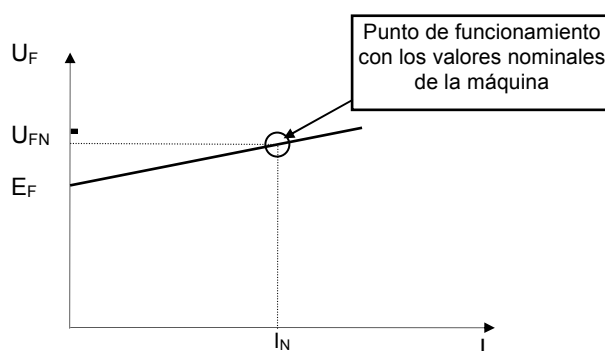


Figura 9.29 Variación de la tensión en bornes de un generador con carga capacitiva pura

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 síncrona 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 9.30.

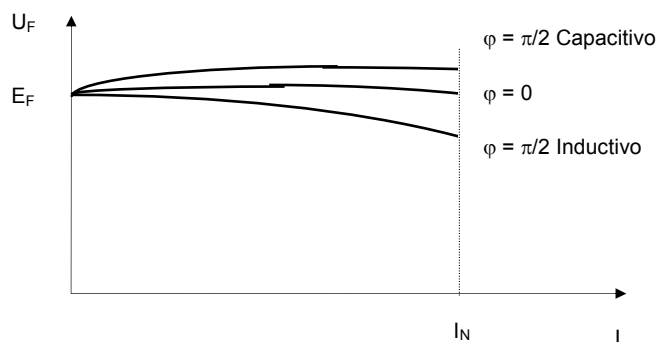


Figura 9.30 Variación de la tensión en bornes del generador real

9.9 Alimentación del bobinado inductor del rotor

La corriente continua para alimentar el bobinado inductor del rotor se puede obtener desde una fuente exterior a través de anillos rozantes que se encuentran montados sobre su eje, aislados eléctricamente del mismo y conectados a los terminales de la bobina, que permiten el pasaje de la corriente mencionada desde una parte fija exterior, a la parte en movimiento, mediante un sistema de escobillas o carbones que apoyan sobre dichos anillos, tal como puede observarse en la figura 9.31.

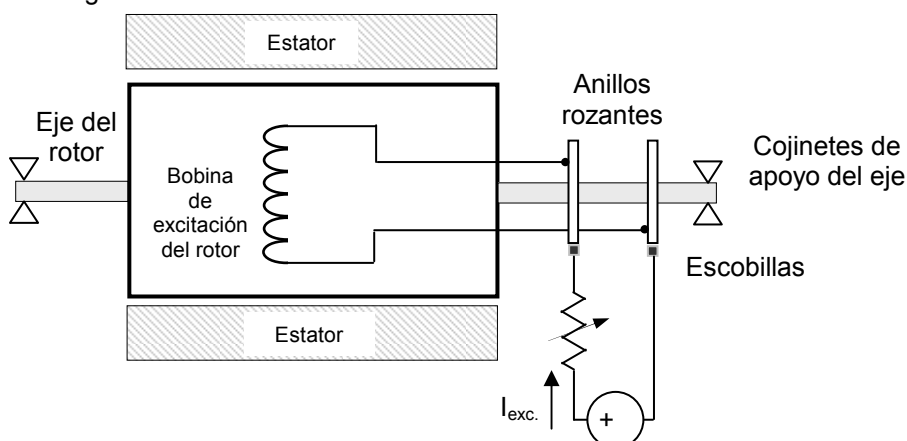


Figura 9.31 Alimentación del bobinado de excitación desde una fuente exterior

Otra forma de alimentar dicho bobinado, es mediante un pequeño alternador, el cual tiene los bobinados trifásicos montados sobre el rotor y la bobina de excitación en el estator del generador principal.

Mediante el sistema de tensiones originado en el estator se alimenta un equipo rectificador, que provee la corriente continua de la bobina de excitación del generador auxiliar, generando un sistema trifásico de tensiones en los bobinados que se encuentran sobre el rotor y a su vez estos alimentan otro equipo rectificador que suministra la energía a la bobina de excitación principal.

Al hacer girar la máquina, el magnetismo remanente del electroimán del rotor induce en el estator una tensión que alimenta el rectificador y que hace incrementar el efecto mencionado.

En la figura 9.32, se observa la disposición mencionada.

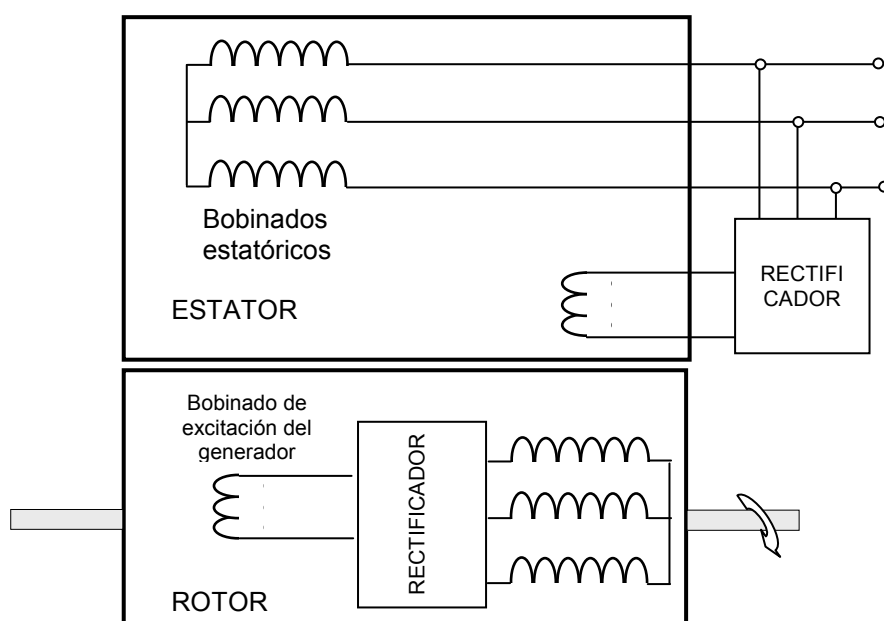


Figura 9.32 Alimentación del bobinado de excitación retórico sin escobillas

9.10 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 9.33.

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)

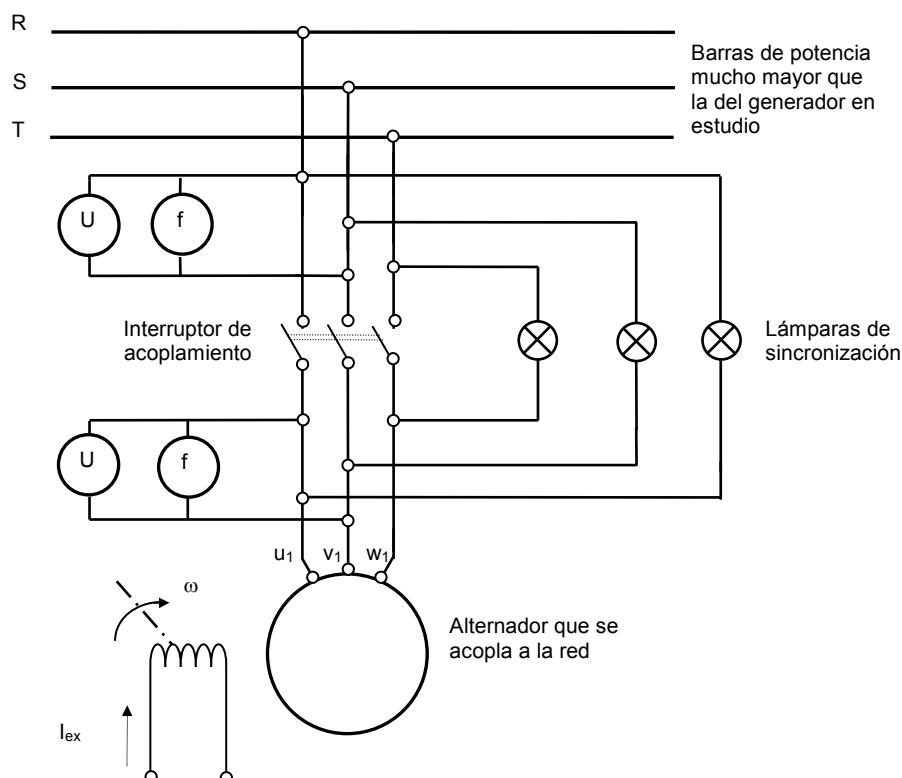


Figura 9.33 Circuito para puesta en paralelo de un generador síncrono

Si la secuencia de la red y de la máquina son coincidentes los fasoriales superpuestos se muestran en la siguiente figura 9.34.

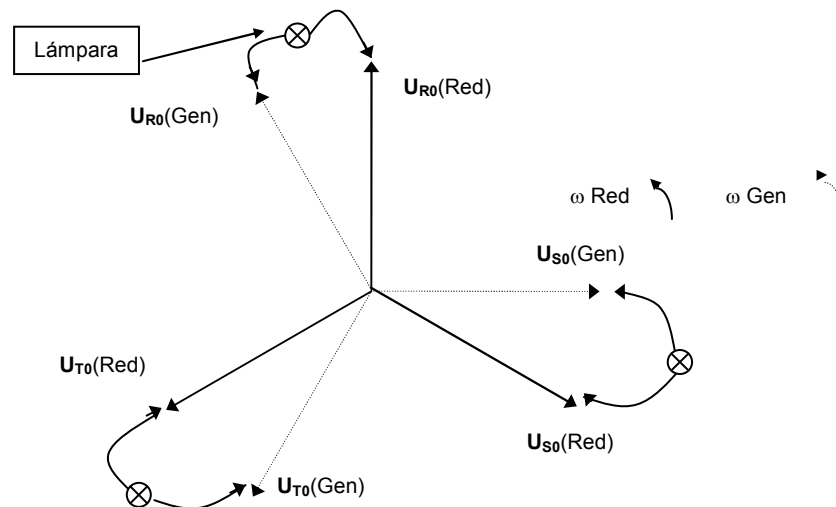


Figura 9.34 Diagrama fasoriales superpuestos del generador y la red eléctrica

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 9.35

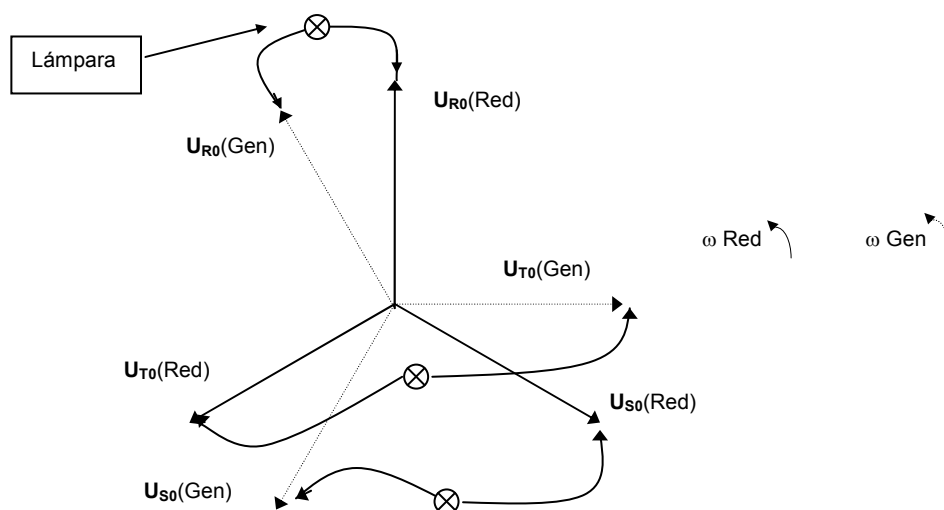


Figura 9.35 Diagramas fasoriales superpuestos del generador y la red con secuencias distintas

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 9.36.

Se observa que una lámpara está conectada igual que en el caso anterior la fase “R” del generador con fase “R” de la red y que las otras dos tiene las conexiones cruzadas, la fase “S” del generador con la fase “T” de la red y la fase “T” del generador con la fase “S” de la red, según puede observarse en la figura 9.37.

Cuando las dos ternas estén superpuestas y tengan igualdad de módulos de tensión, la lámpara sobre la fase común “R” estará apagada y las otras dos lámparas tendrán el mismo brillo, momento en el cual se deberá cerrar el interruptor.

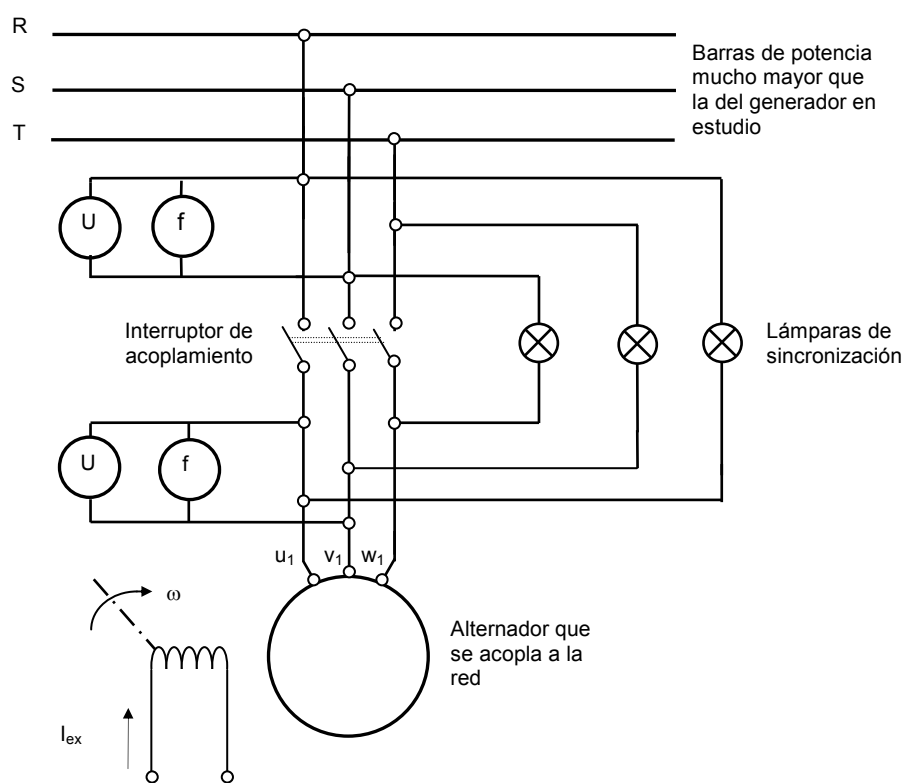


Figura 9.36 Sincronización mediante el sistema de lámparas encendidas

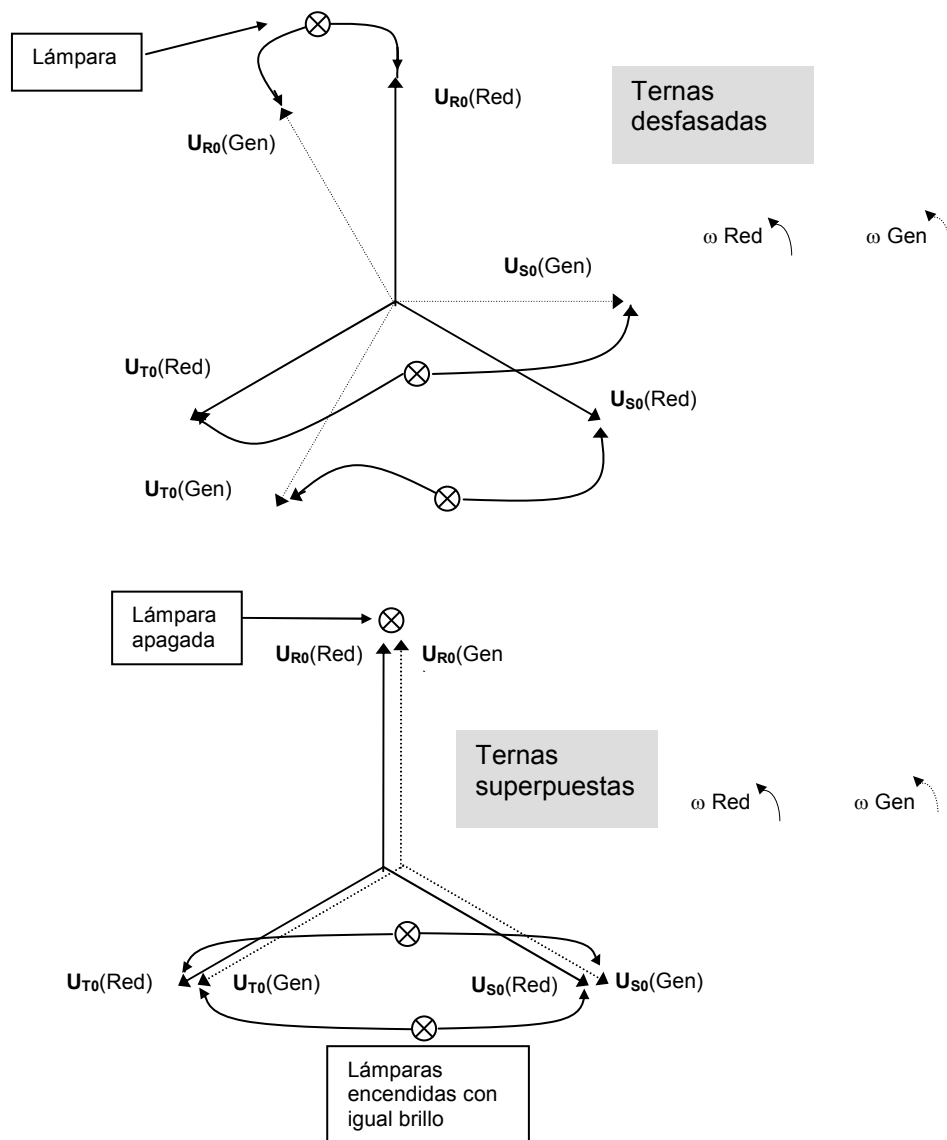


Figura 9.37 Diagrama fasoriales superpuestos del generador y la red eléctrica con el sistema de luces encendidas

9.11 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:

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

$$P = 3 \frac{U_F E_F}{X_S} \sin \delta$$

$$P = \text{constante}$$

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

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

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 9.38.

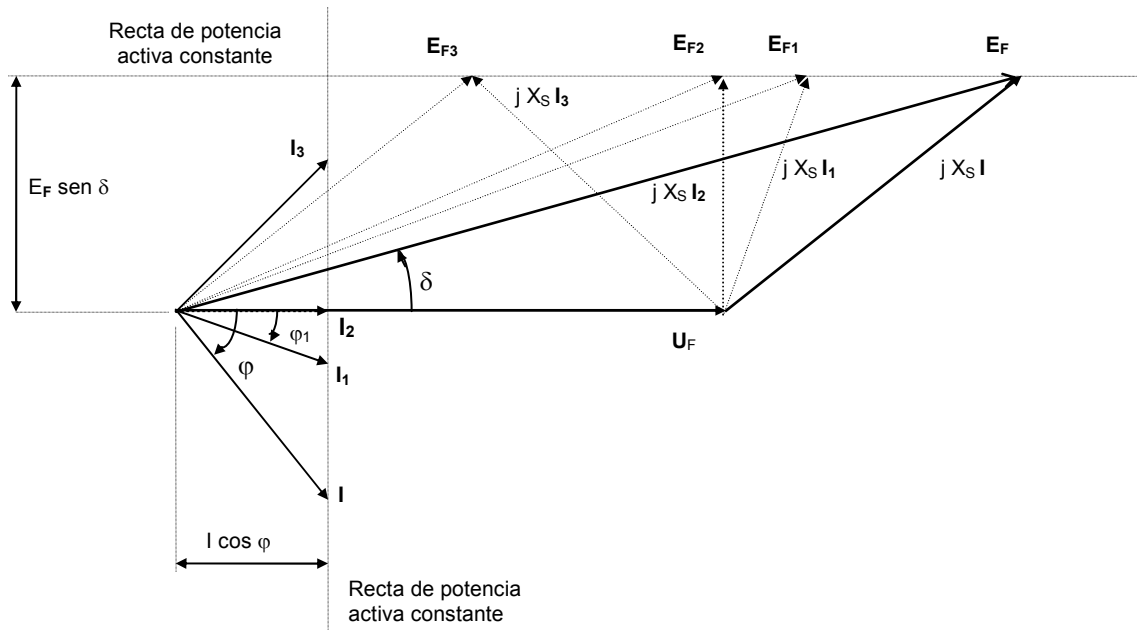


Figura 9.38 Diagrama fasorial de un generador síncrono con tensión y potencia activa constante

De aquí podemos sacar las siguientes conclusiones:

- El fasor de la corriente en el estator (I), se desplaza sobre una recta vertical, de forma de mantener $I \cos \varphi = \text{constante}$.
- El fasor de la fuerza electromotriz inducida (E), se desplaza sobre otra recta horizontal de forma tal que $E_F \sin \delta = \text{constante}$.

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 adelanto 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, siendo el valor de mínima corriente 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.

9.12 Motor sincrónico

Características de arranque

Si la máquina sincrónica que hemos estado analizando como generador, la desacoplamos de la máquina impulsora y alimentamos sus bobinados estatóricos mediante un sistema de tensiones trifásico, esta funcionará como motor, a una velocidad constante que es la sincrónica.

Debido a su forma constructiva y de funcionamiento, este tipo de motor no presenta una cupla de arranque, de valor suficiente para que su rotor comience a girar.

El hecho es que dado que en el estator se origina un campo magnético rotante de velocidad sincrónica y en el rotor, el campo cuando este está detenido, tiene un valor fijo y estático, hace que los mismos no se “enganchen”, debido a la gran diferencia de velocidades.

Para ello, se debe lograr por medio de algún método que el rotor gire a una velocidad cercana a la del campo magnético del estator, y en esa situación, se alimenta la bobina del rotor y el campo magnético producido por la misma, logra acoplarse al del estator y entonces alcanza la velocidad de sincronismo.

Uno de los métodos consiste en construir en el rotor una jaula de ardilla como tienen los motores asíncronos, a los efectos que arranque como tal. Este tipo de jaula que se llama “amortiguadora” y algunos generadores cuentan con ella a los efectos de amortiguar los cambios bruscos en la carga, ya que al así suceder, se altera la velocidad de su eje y por lo tanto aparecen corrientes parásitas en la jaula, que tienden a oponerse a la causa que las generó, restableciéndose más rápidamente la velocidad sincrónica.

El bobinado de excitación del rotor, debe estar cortocircuitado, durante este proceso de arranque, a los efectos de que la tensión, que se induce en el mismo, debido al campo estatórico, no llegue a un valor peligroso.

En el caso de máquinas de pequeña potencia, debido a las corrientes parásitas que se originan en el núcleo del rotor, estas provocan una pequeña cupla que puede poner en movimiento el eje.

9.13 Circuito equivalente

El circuito equivalente para una fase del motor es semejante al de la máquina como generador, pero en este caso la corriente tiene sentido entrante, debido a que la máquina absorbe potencia eléctrica. El mismo se observa en la figura 9.39.

En este caso se cumple:

$$\mathbf{U} = \mathbf{E} + R_s \mathbf{I} + j X_s \mathbf{I} \quad \text{o bien:}$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{U} - R_s \mathbf{I} - j X_s \mathbf{I}$$

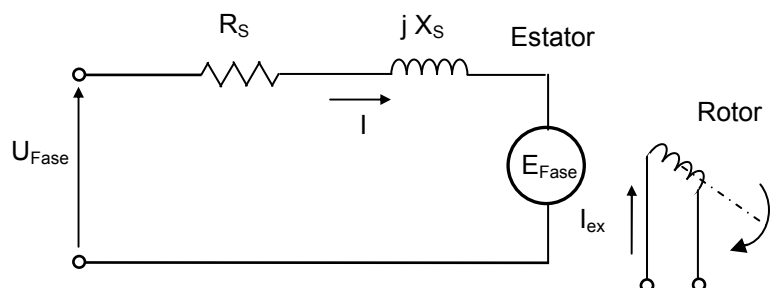


Figura 9.39 Circuito equivalente de un motor sincrónico

El diagrama fasorial correspondiente es el siguiente:

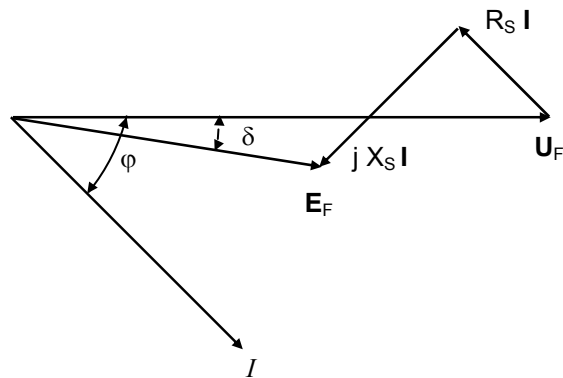


Figura 9.40 Diagrama fasorial del motor síncrono

9.14 Potencia interna

En forma análoga al análisis efectuado para el generador síncrono, y despreciando la resistencia del bobinado estático, frente al valor de la reactancia síncrona, el fasorial nos queda:

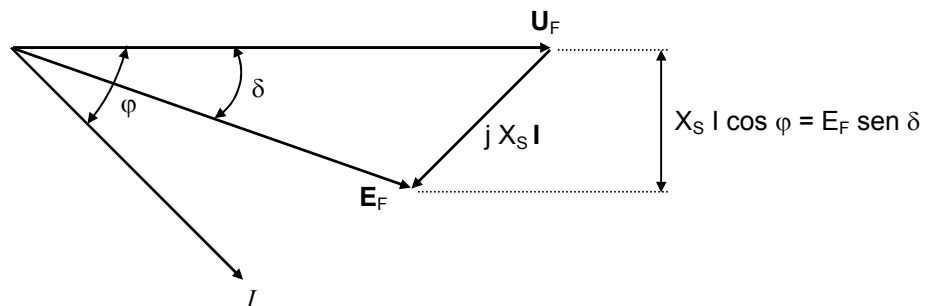


Figura 9.41 Diagrama fasorial de un motor síncrono despreciando la resistencia estática

Del diagrama obtenemos:

$$P = 3 \cdot U_F \cdot I \cdot \cos \varphi = 3 \frac{U_F \cdot E_F}{X_S} \sin \delta$$

9.15 Cupla interna

La relación entre la potencia y la velocidad del motor, define el valor de la cupla, o sea:

$$T[\text{N.m}] = \frac{P[\text{W}]}{\omega_s[\text{r/s}]}$$

Dado que la velocidad del rotor es constante e igual a la del campo magnético rotante del estator, la curva de la cupla en función de la velocidad es la de la figura 9.42.

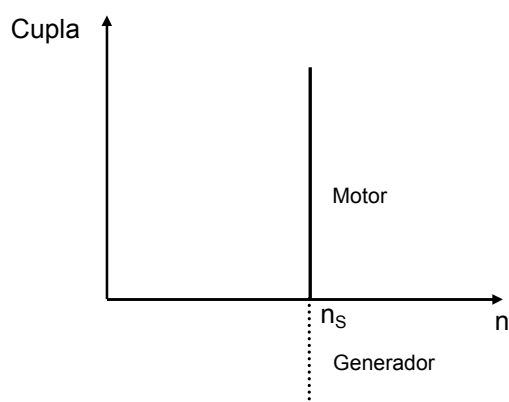


Figura 9.42 Cupla de una máquina sincrónica en función de la velocidad

En función de la expresión de la potencia interna, el valor de la cupla está dada por:

$$T = 3 \frac{U_F \cdot E_F}{\omega_s \cdot X_s} \sin \delta \qquad \omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}$$

Si se mantiene la tensión constante, y la corriente de excitación también constante ($E = \text{constante}$), un aumento en la cupla resistente, implica que se produzca un aumento del ángulo δ , cuyo valor máximo estaría dado cuando dicho ángulo sea de 90° . Este es un valor teórico ideal, ya que en ese caso la corriente estática tendería a un valor infinito, según se puede observar del esquema fasorial. Por lo tanto el límite está determinado por el valor de la corriente nominal del motor.

Si graficamos la curva de cupla en función del ángulo de potencia del motor, obtenemos el esquema de la figura 9.43.

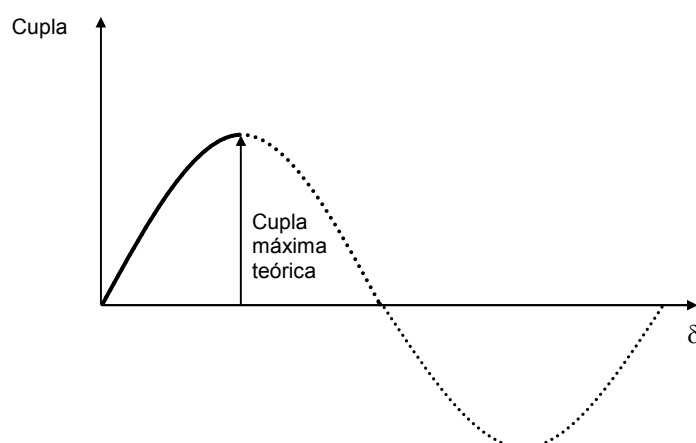


Figura 9.43 Cupla de un motor sincrónico en función del ángulo de potencia para tensión y excitación constantes

9.16 Potencia reactiva

Si hacemos trabajar el motor a potencia en el eje constante (No se modifica la carga acoplada al mismo), y como la tensión de alimentación de la red de suministro es constante, se cumple:

$$P = 3 \cdot U_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi = 3 \frac{U_F \cdot E_F}{X_S} \sin \delta = \text{Constante}$$

Lo cual nos lleva a que: $I_F \cos \varphi = \text{constante}$ y $E_F \sin \delta = \text{constante}$

Partiendo de estas condiciones, la única posibilidad de modificación en la máquina es su corriente de excitación, y si analizamos el diagrama fasorial correspondiente, vemos que el extremo del fasor que representa E_F se mantiene sobre una recta horizontal y el extremo de la corriente del estator sobre una recta vertical.

Partamos nuestro análisis, tomando una corriente de excitación tal que la fem en el estator tiene el valor E_F con lo que el motor absorbe corriente en atraso con un ángulo φ . Si ahora se aumenta dicha corriente de excitación, aumenta la fem al valor E_{F1} , y la caída de tensión en la reactancia sincrónica será $j X_S I_1$, la corriente estatórica debe estar a 90° de esta y pasa a ocupar la posición I_1 (disminuye su valor ya que disminuye la potencia reactiva del motor).

Si ahora pasamos a una corriente de excitación mayor tal que provoque la E_{F2} , haciendo el mismo análisis la corriente estatórica ocupa la posición I_2 , en fase con la tensión, lo cual indica que no hay potencia reactiva en juego, y el valor de la corriente estatórica toma su valor mínimo, para la potencia activa que se analiza.

Si volvemos a aumentar la corriente de excitación la fem toma el valor E_{F3} , y en este caso la corriente estatórica vuelve a aumentar su valor (I_3), pero la misma adelanta a la tensión de la red, con lo cual toma potencia reactiva capacitiva.

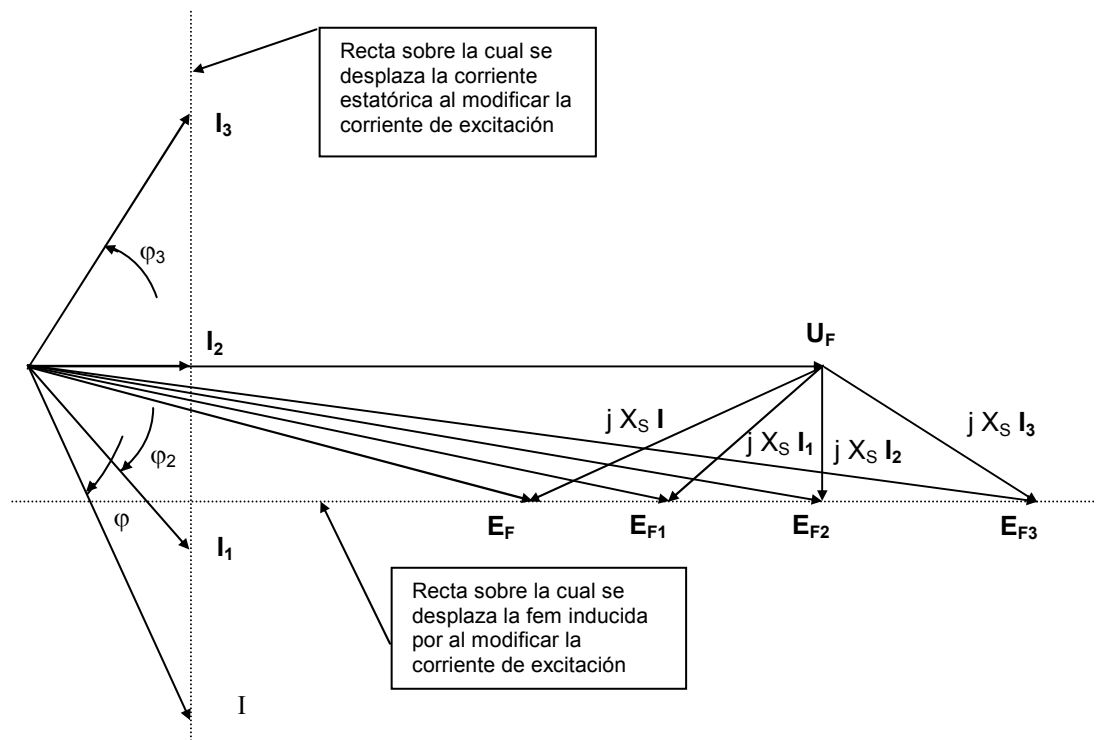


Figura 9.44 Diagramas fasoriales para distintas corrientes de excitación a potencia activa y tensión constantes

De aquí se concluye que el motor trabajando a potencia activa constante, o sea a velocidad y cupla constante, variando la excitación del mismo se puede hacer que la máquina se comporte como un inductor o un capacitor a los efectos de la red de suministro eléctrico. Debido a eso se puede utilizar la máquina como un compensador de potencia reactiva.

Al contrario del generador, el motor trabajando subexcitado absorbe potencia reactiva inductiva y sobreexcitado potencia reactiva capacitiva.

Si efectuamos un gráfico en el cual llevamos en ordenadas la corriente estatórica y en abscisas la corriente de excitación correspondiente, lo que se obtiene es lo que se llama curva "V" de la máquina, lo cual se observa en la figura 9.45, para distintas potencias activas.

En dicha figura se puede observar que con factor de potencia unitario la corriente que toma el motor es mínima, y ese valor es el que fija si la máquina está subexcitada o sobreexcitada.

Este mínimo se desplaza hacia la derecha a medida que se incrementa la potencia en el eje de la máquina.

Los límites inferiores de la corriente de excitación están determinados por la obtención de un campo magnético muy débil, lo cual hace que la máquina funcione en forma inestable.

Los límites superiores están limitados por el valor excesivo de la corriente estatórica, que puede ocasionar calentamiento excesivo.

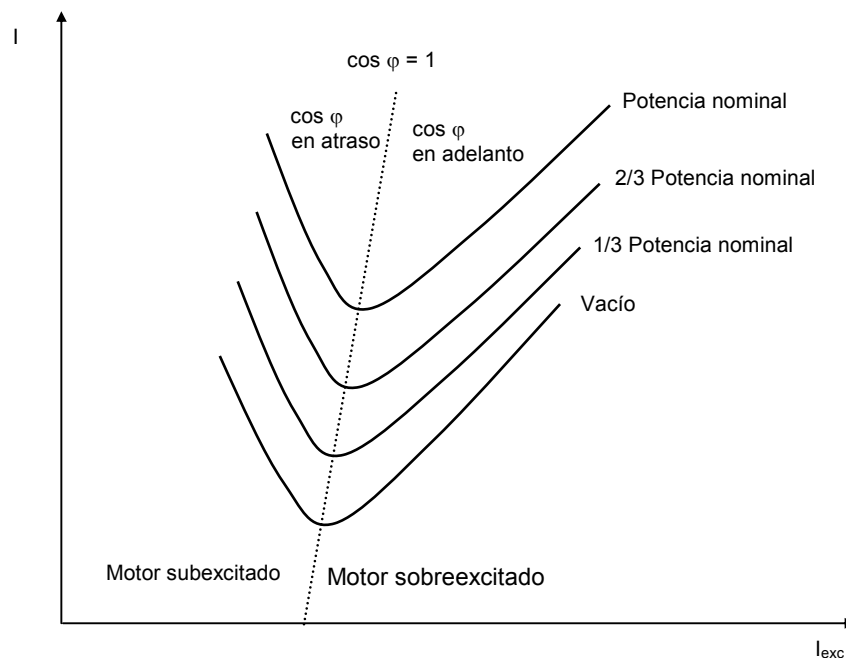


Figura 9.45 Curvas características en "V" de un motor síncrono