



Generador Sincrónica

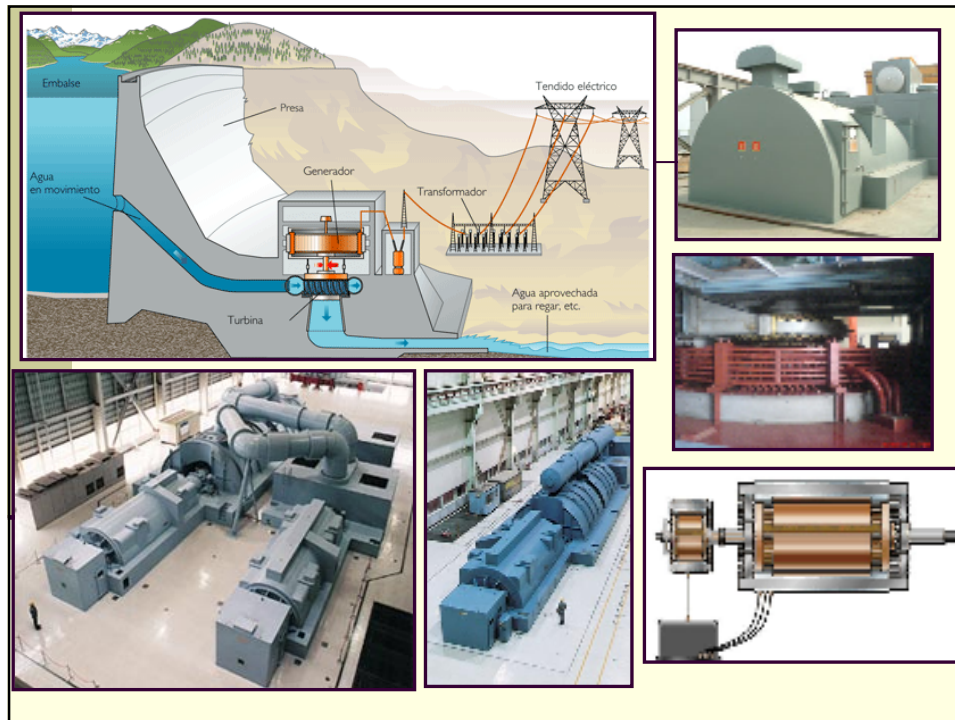
IE 0516 Máquinas Eléctricas

Ing. Óscar Sánchez Salazar

Introducción

- Los generadores de corriente alterna (CA) suelen recibir el nombre de generadores síncronos o alternadores. Una máquina síncrona, ya sea como generador o como motor, opera a velocidad síncrona, es decir, a la velocidad a la que gira el campo magnético creado por las bobinas del campo.



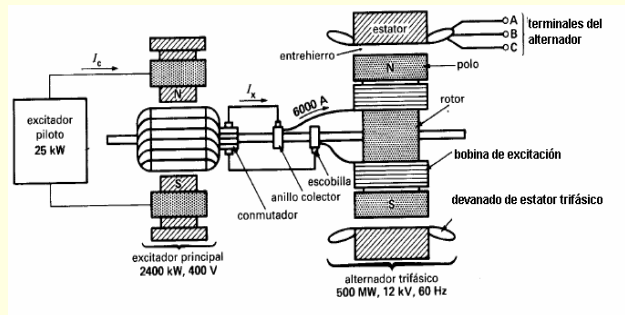


Generadores síncronos

- Son la principal fuente de potencia eléctrica del mundo, convirtiendo energía mecánica en energía eléctrica desde una fracción de kVA hasta los 1500 MVA.
- En materia constructiva existen dos versiones clásicas de generadores síncronos, los de polos salientes, empleados en centrales hidráulicas, y de polos lisos o rotor cilíndrico, que se utilizan en las centrales térmicas

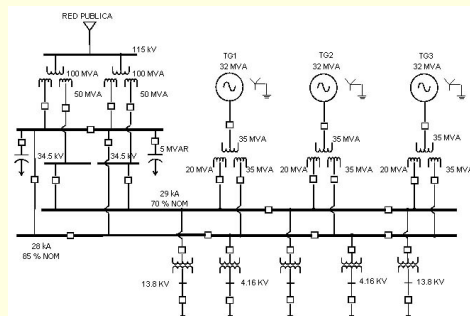
Construcción

- Un generador síncrono de campo rotatorio tiene una armadura estacionaria llamada estator.
- Una armadura estacionaria facilita también el aislamiento de los devanados porque no están sujetos a fuerzas centrífugas.



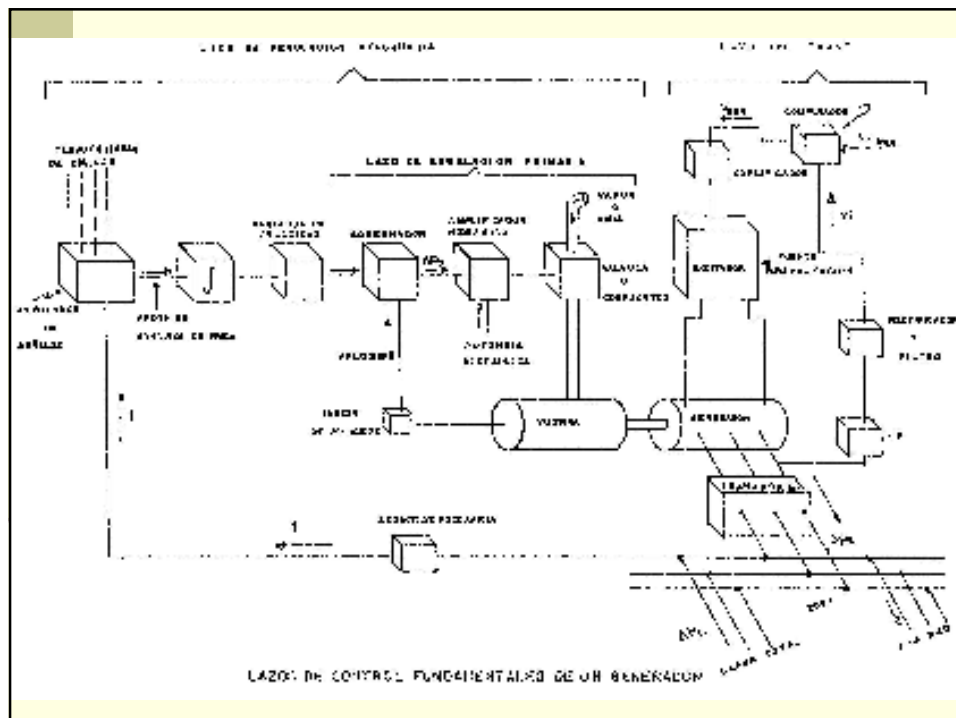
Modo de operación

- Pueden ser operados en paralelo, y de hecho, existe mayor confiabilidad de operar un sistema de potencia cuando cientos de estas máquinas operan en paralelo, interconectados por líneas de transmisión, además de tener ventajas económicas en costos de operación.

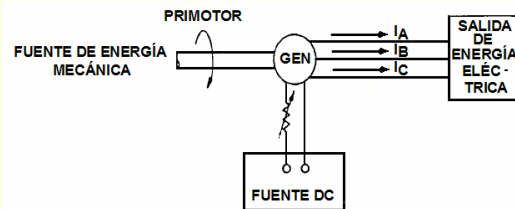


Principios básicos de operación

- En una máquina polifásica síncrona circula corriente alterna en el devanado de armadura (estator) y se suministra excitación de CD al devanado de campo (rotor).
- Un generador síncrono que suministra energía a una impedancia de carga actúa como fuente de voltaje cuya frecuencia la determina la velocidad de su máquina primotor (fuente de energía mecánica). Lazo de control " $P - f$ ".

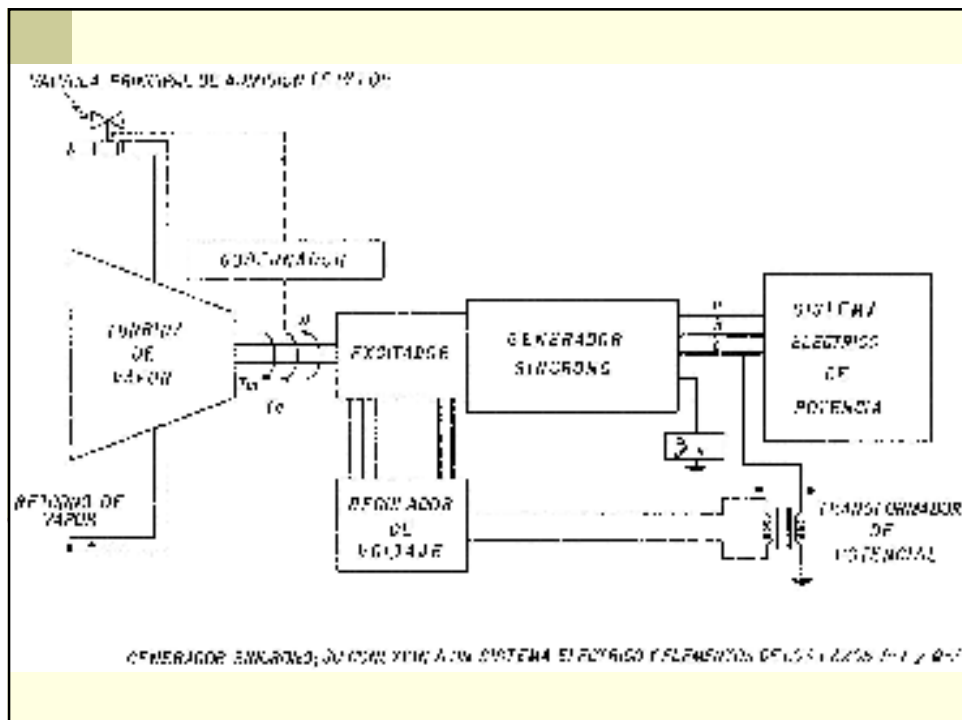


Lazo de control Q-V



- La corriente y el factor de potencia se determinan entonces por la excitación del campo del generador, la impedancia de este devanado, y por la carga. Lazo de control “Q – V.”

“El rotor gira a velocidad constante gracias a la fuente de energía mecánica conectada a su eje”.



Aspectos Constructivos

- Un devanado de campo, construido en forma de arrollamiento concentrado o bien distribuido en ranuras, alimentado por corriente continua, y es el devanado que produce el campo magnético principal en la máquina.
- Un devanado de armadura, distribuido formando un arrollamiento trifásico recorrido por corriente alterna, donde se induce el voltaje principal.
- En las máquinas sincrónicas los devanados de campo están sobre el rotor, mientras que los de armadura se sitúan en el estator.

Estator

- Está formado por laminaciones delgadas de acero sumamente permeable a fin de reducir las pérdidas en el núcleo.
- El bastidor, que puede ser de hierro fundido o fabricarse con placas soldadas de acero suave, no se diseña para conducir flujo, sino para dar apoyo mecánico al generador síncrono.
- El interior del estator tiene una variedad de ranuras cuyo objetivo es alojar los gruesos conductores de la armadura (devanados)



Estator

- La fem inducida por fase en generadores síncronos de gran tamaño es del orden de kV con capacidad de generación que se mide en MVA.
- En principio, el devanado del estator se puede conectar en delta (D) o estrella (Y) (Ver documento "Devanados de la armadura de máquina síncrona"). Sin embargo, como comúnmente el generador se conecta a una línea de transmisión de alto voltaje, la mejor conexión es la Y

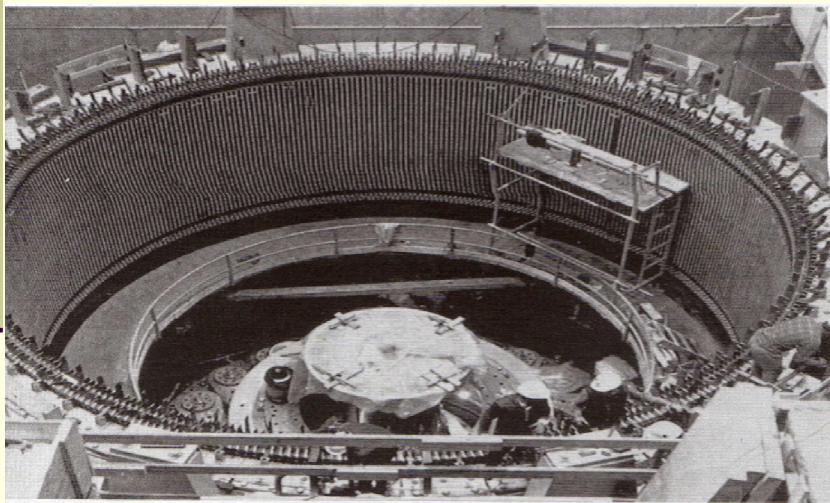
Ventajas de la conexión estrella respecto a la conexión delta

- A. El voltaje por fase es de solo 58% del voltaje entre líneas. Esto significa que el voltaje más alto entre un conductor del estator y el núcleo de este conectado a tierra es de sólo el 58% del voltaje de línea. Esto permite reducir la cantidad de aislante en las ranuras y de esta manera incrementar el diámetro de los conductores. Un conductor más grande permite incrementar la corriente y por ende la capacidad nominal de la máquina.

Ventajas de la conexión estrella respecto a la conexión delta

- B. Con una conexión en Y, los armónicos de línea a neutro distorsionantes no aparecen entre las líneas porque se cancelan entre sí.
- C. Desafortunadamente, cuando se utiliza una conexión delta, los voltajes armónicos no se cancelan, sino que se acumulan. Como la conexión delta es cerrada, producen una corriente circulante de tercer armónico, la cual incrementa las pérdidas eléctricas .

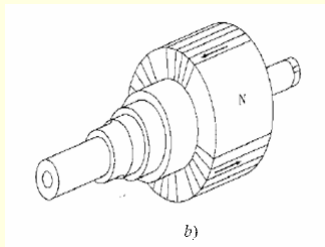
Estator de un generador trifásico de 500 MVA, fp de 0.95, 15 kV, 60 Hz y 200 rpm, diámetro interno = 9.25 m; longitud axial efectiva de las laminaciones de hierro es de 2.35 m, 378 ranuras.



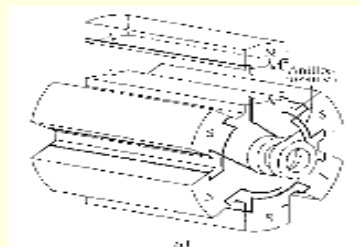
Rotor

- Los generadores síncronos se construyen con dos tipos de rotores: rotores de polos salientes y rotores cilíndricos o de polos lisos.
- La elección entre ambos tipos de rotores viene impuesta por la velocidad de rotación de la máquina, la cual depende a su vez del tipo de motor primario que la hace girar, y así, se distinguen los turbogeneradores, hidrogeneradores y los generadores acoplados a motores diesel.

Tipos de rotor



Rotor polos lisos



Rotor polos salientes

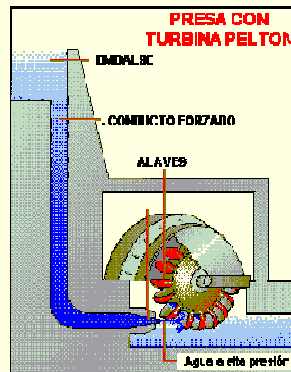
Rotores de polos salientes

- Los hidrogenadores están movidos por turbinas hidráulicas cuyo tipo y velocidad de giro dependen de las características del salto de agua.

Gran altura: Turbinas Pelton

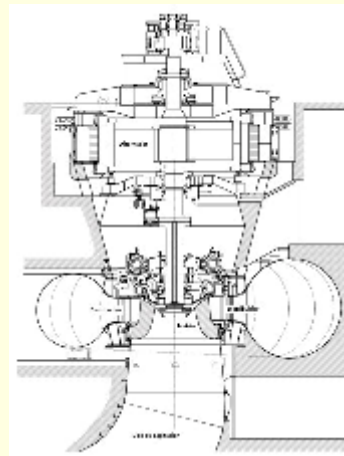


Impulsan grupos de eje horizontal que giran a velocidades entre 750 rpm y 375 rpm



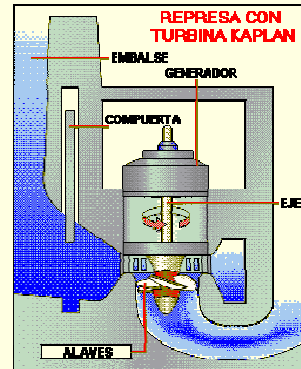
Saltos medios: Turbinas Francis

Disposición vertical del grupo, de tal forma que las velocidades de sincronismo utilizadas son menores que con alturas elevadas, pudiéndose llegar a valores cercanos a las 150 rpm.



Saltos de pequeña altura: Turbinas Kaplan

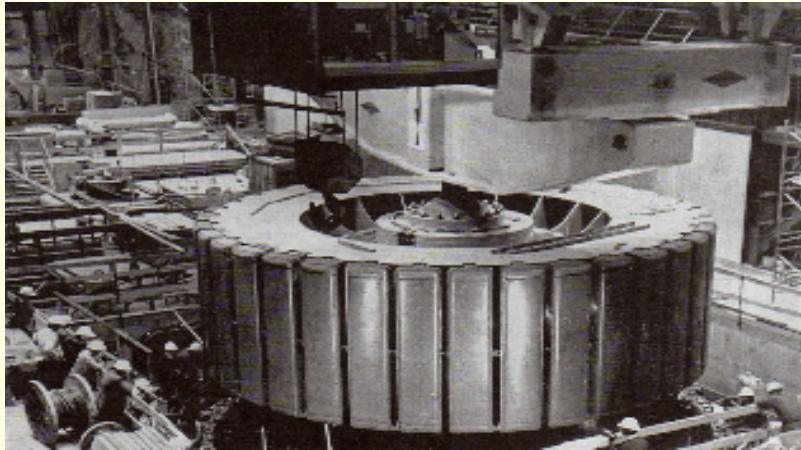
La velocidad del grupo es generalmente inferior a 100 r.p.m.



Características de los grupos de generación hidráulicos

- Las potencias medias de los generadores hidráulicos oscilan entre 150 MVA y 350 MVA y se han llegado a construir unidades de 750 MVA.
- Debido a las velocidades tan bajas de giro, se construyen en forma de polos salientes con un gran número de ellos, generalmente entre 20 y 40 polos.
- Es por este motivo que los rotores de baja velocidad siempre tienen un gran diámetro a fin de proporcionar el espacio necesario para los polos

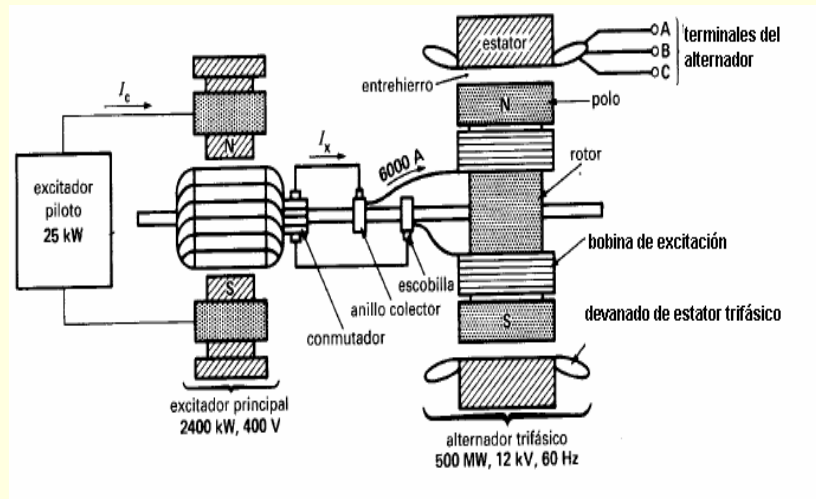
Rotor de 36 polos



Alimentación del campo del rotor

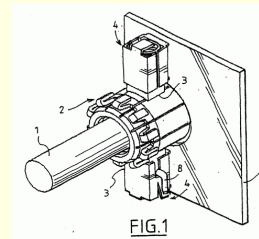
- El devanado de campo de la máquina sincrónica se encuentra en el rotor, y este es alimentado con C.D. Puesto que el rotor está girando, se requiere un arreglo especial para entregar potencia C.D. a sus devanados de campo.
 - Suministrar la potencia C.D. desde una fuente C.D. externa al rotor por medio de anillos rozantes y escobillas.
 - Suministrar la potencia C.D. desde una fuente C.D. especial montada directamente en el eje del generador sincrónico.

Esquema de escobillas y anillos rozantes para alimentación DC



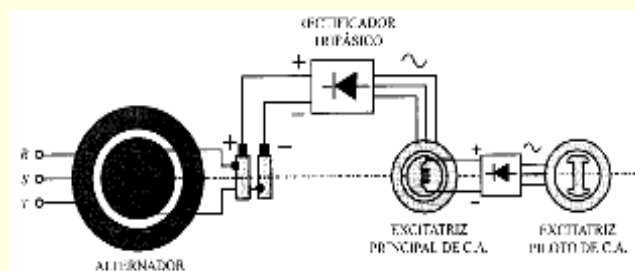
Problemas en las escobillas

- Exigen más mantenimiento en la máquina ya que se deben revisar con regularidad las escobillas debido a su desgaste.
- La caída de tensión en las escobillas puede causar pérdidas significativas de potencia en las máquinas que tienen grandes corrientes de campo.
- Se utilizan en todas las máquinas sincrónicas pequeñas ya que ningún otro método de suministro de la corriente de campo C.D. es adecuado por el costo.



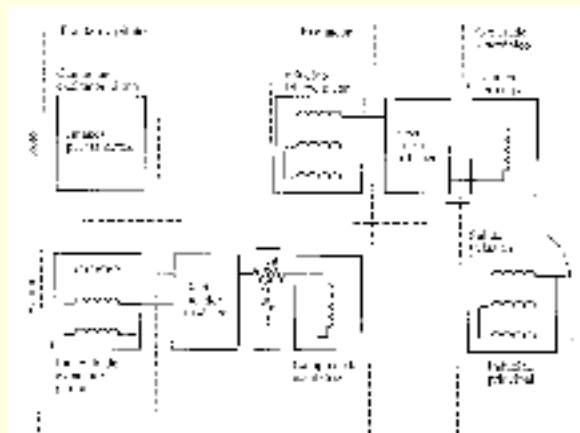
Excitador sin escobillas

- Se utilizan en generadores y motores grandes.
- Un excitador sin escobillas es un generador C.A. pequeño cuyo circuito de campo está montado en el estator y su circuito de armadura está montado sobre el eje del motor.



Excitación de CC independiente

- Se utiliza un excitador piloto de imanes permanentes conectado directamente al rotor.



Ecuación del par Generador

- Es posible visualizar el comportamiento de estado estacionario de una máquina síncrona, en términos de la ecuación del par, que se muestra a continuación

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\text{Polos}}{2} \right)^2 \Phi_R F_f \text{sen } \delta_{RF}$$

donde

Φ_R = flujo resultante del entrehierro por polo.

F_f = FMM del devanado de campo de corriente directa.

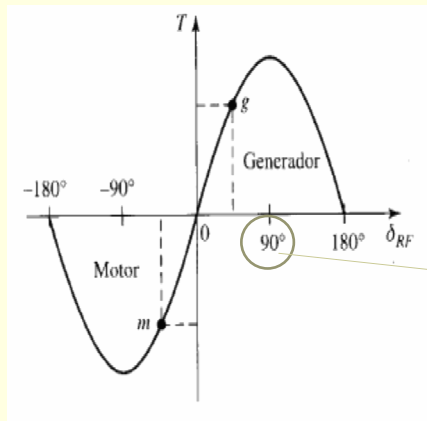
δ_{RF} = ángulo de fase eléctrico entre los ejes magnéticos de Φ_R y F_f .

Características del par

- Actúa en la dirección que favorece la alineación de los campos que interactúan en la máquina.
- En condiciones de estado estacionario el par electromecánico equilibra el par mecánico que se aplica al eje.



Curva de ángulo del par



- Los procesos transitorios que conllevan a un equilibrio ante cambios en el par del primotor se caracterizan por oscilaciones mecánicas amortiguadas de aceleración y desaceleración.

**Ángulo de par crítico.
Pérdida de sincronismo**

Estudio de los devanados de la armadura máquina sincrónica

- Los generadores de casi todos los generadores síncronos están devanados con tres arrollamientos distintos e independientes para generar energía trifásica.
- Los tres devanados son exactamente iguales en forma, pero desplazados 120° eléctricos.
- Pueden conectarse en Y o en Δ .
- Normalmente se usa el devanado de doble capa, el cual tiene tantas bobinas idénticas como ranuras haya en el estator.

Devanado de doble capa

- Un lado de cada bobina se sitúa en la mitad inferior de una ranura y el otro lado de la misma bobina llena la mitad superior de otra ranura.

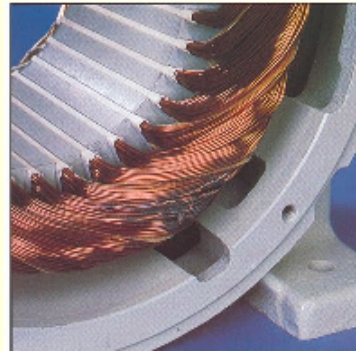
Número de ranuras

$$n = \frac{S}{Pq}$$

Número de bobinas por polo y por fase

fases

Polos



Bobina de paso completo

- Es una bobina que abarca 180° eléctricos.
- Como las fem inducidas en ambos lados de una bobina de paso completo están exactamente en fase, el ideal teórico prescribiría la colocación de bobinas de paso completo desde el punto de vista de la fem inducida.



¿Porqué los generadores se devanan con bobinas de paso fraccionario?

Bobinas de paso fraccionario

- Reduce las armónicas que generan distorsión y produce una forma de onda más apegada a la senoidal.
- Acorta las conexiones finales de los devanados, por lo que no solo ahorra cobre sino que reduce las pérdidas en el cobre de la bobina.
- Disminuye la longitud total del generador y reduce al mínimo la dispersión de flujo.
- La eliminación de armónicas de alta frecuencia también disminuye las pérdidas magnéticas en el generador.

Desventaja de la bobina de paso fraccionario

- La fem inducida en ella es menor que en una bobina de paso completo.
- Esto se debe a que el flujo total que enlaza la bobina de paso fraccionario es más pequeño que el de la bobina de paso completo.

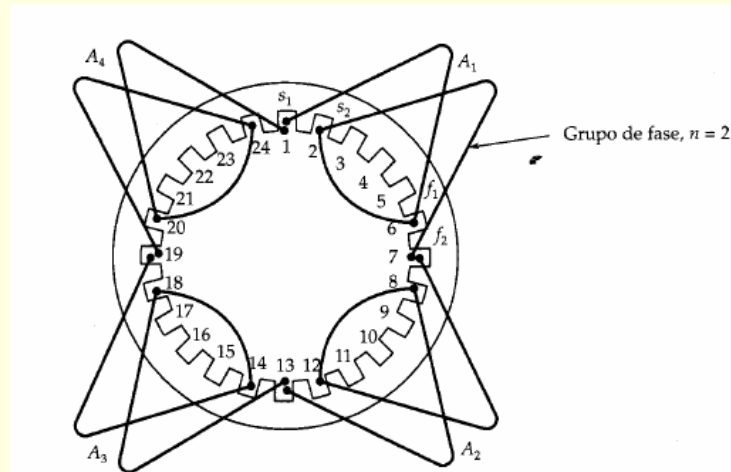
Consideraciones

- Para la colocación de los devanados de fase en las ranuras de un generador síncrono se supondrá que
 - Todas las bobinas son idénticas.
 - Cada bobina es de paso fraccionario en tanto un grupo de fase contenga más de una bobina. Todas las bobinas en un grupo de fase están conectadas en serie.
 - Cada grupo de fase se extiende 180° eléctricos.

Ejemplo

- Un generador síncrono, trifásico y tetrapolar tiene 24 ranuras. Determine los pasos de ranura, de bobina y el número de bobinas en un grupo de fase. Trace el esquema de la ubicación de las bobinas para una de las fases.

Solución



Factor de paso

- Como las bobinas no son de paso completo, el flujo máximo que enlazan está dado por

$$\Phi_{cm} = \Phi_p k_p$$

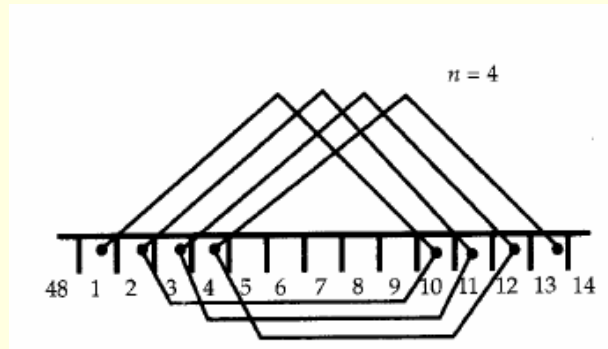
Donde k_p es el factor de paso y está dado por

$$k_p = \text{sen}(\rho/2)$$

Alcance de bobina

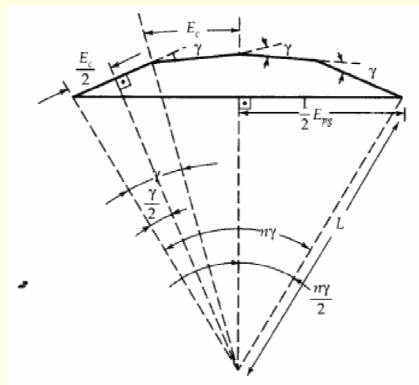
Ejemplo

- Calcule el factor de paso para una bobina de 48 ranuras, trifásico y tetrapolar.



Factor de distribución

- Factor por el cual se reduce la fem inducida en un grupo de fase debido a que la de cada bobina no están en fase, de esta manera.



$$E_{pg} = k_d n E_c$$

$$k_d = \frac{\sin(n\gamma/2)}{n \sin(\gamma/2)}$$

Ejemplo

- Calcule el factor de distribución para un devanado trifásico con 108 ranuras y 12 polos.

Velocidad de rotación de un generador sincrónico

- Las máquinas sincrónicas heredan su nombre debido al hecho de que logran entrelazar o sincronizar la frecuencia eléctrica producida con la tasa mecánica de rotación, esto para un generador.

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

- Para generar potencia eléctrica a 60 Hz es necesario que para un motor de 2 polos, el primotor gire a 3600 rpm, mientras que para un generador de 4 polos el primotor debe girar a 1800 rpm.

Ecuación de la fem inducida

- El flujo que enlaza cada bobina en el tiempo está dado por

$$\Phi_c = \Phi_p k_p \cos \omega t$$

- De la ley de Faraday se tiene que

$$e_c = N_c k_p \omega \Phi_p \sin \omega t$$

- El valor rms de la fem inducida es

$$E_c = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c k_p \omega \Phi_p$$

Ecuación de la fem inducida

- Puesto que en general un grupo de fase tiene más de una bobina conectada en serie y cada una de ellas está desplazada por un paso de ranura, la fem inducida en el grupo de fase está dada por

$$E_{pg} = \frac{\sqrt{2}}{2} n N_c k_p k_d \omega \Phi_p$$

Factor de devanado

$$k_w = k_p k_d$$

Para un generador P con polos y a trayectorias paralelas, la fem inducida por fase (voltaje de fase) es

$$E_a = \frac{\sqrt{2} P}{2 a} n N_c k_w \omega \Phi_p$$

$$E_a = \frac{\sqrt{2}}{2} N_s \omega \Phi_p$$

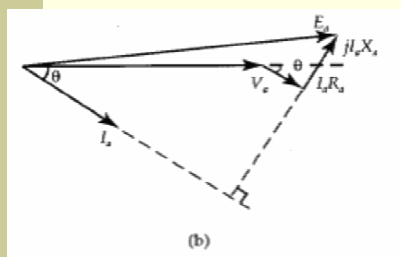
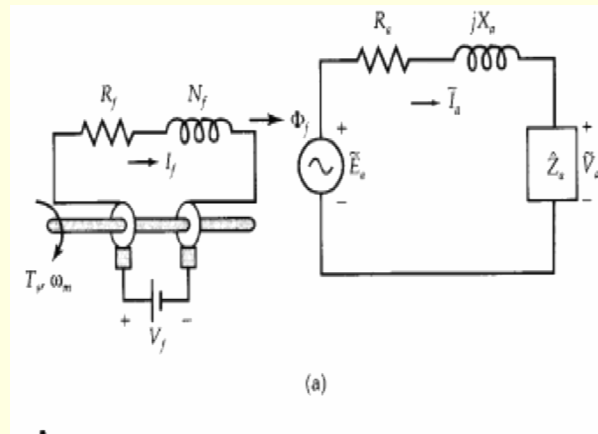
Ejercicio 2.1

Cada bobina de un generador síncrono con devanado de doble capa, trifásico, de 16 polos y 144 ranuras, conectado en Y tiene 10 vueltas. El rotor se impulsa a una velocidad de 375 rpm. El flujo por polo es de 25 mWb. Cada devanado de fase está conectado con dos trayectorias paralelas. Determine a) la frecuencia de la fem inducida, b) el voltaje de fase y c) el voltaje de línea.

Circuito equivalente de la máquina síncrona

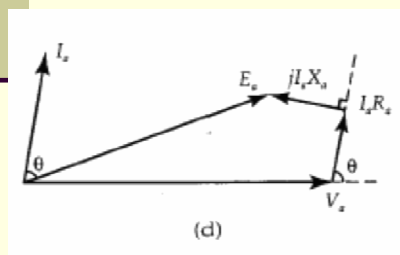
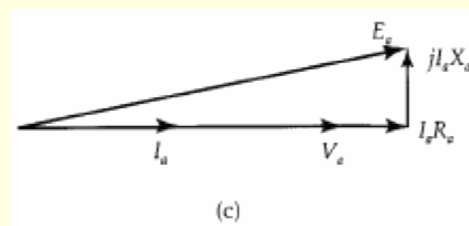
- El voltaje obtenido E_a es el voltaje interno generado, en una fase del generador síncrono. Sin embargo, este voltaje no es usualmente el voltaje que aparece en los terminales del generador.
- Existen varios factores que provocan la diferencia entre el voltaje interno generado y el voltaje de salida.

Caída de voltaje en la resistencia de armadura y caída de voltaje en reactancia de dispersión de armadura



Carga en atraso

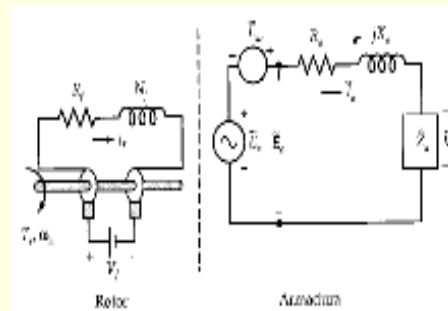
FP unitario



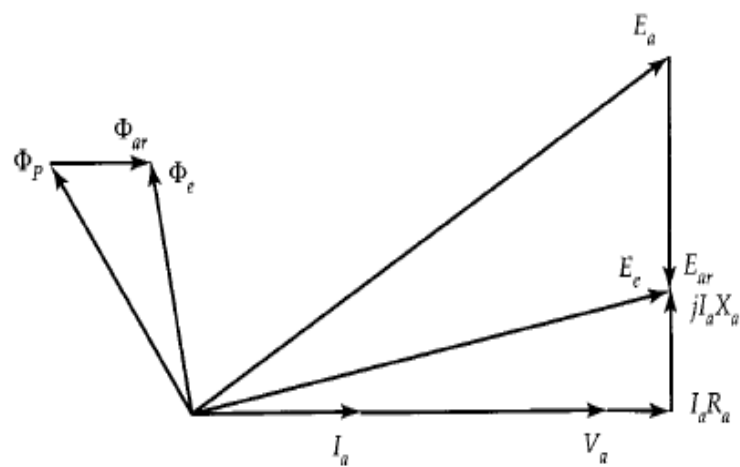
Carga en adelante

Reacción de armadura

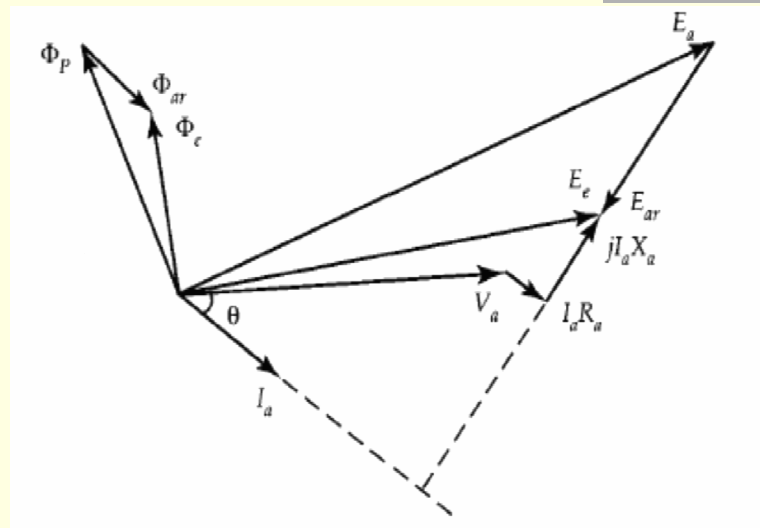
- El flujo producido por el devanado de la armadura reacciona con el flujo establecido por los polos sobre el rotor, lo que ocasiona que el flujo total cambie. Tal interacción entre los dos flujos se conoce como reacción de la armadura.



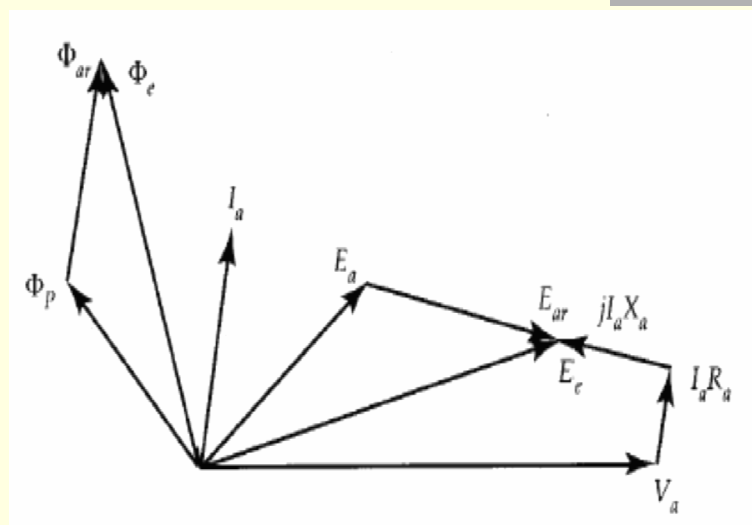
FP unitario



FP en atraso



FP en adelanto



¿De qué manera se puede modelar la reacción de armadura?



- Como la fem de reacción de armadura está en atraso respecto de la corriente en 90° , también puede expresarse como sigue:

$$\bar{E}_{ar} = -j\bar{I}_a X_m$$

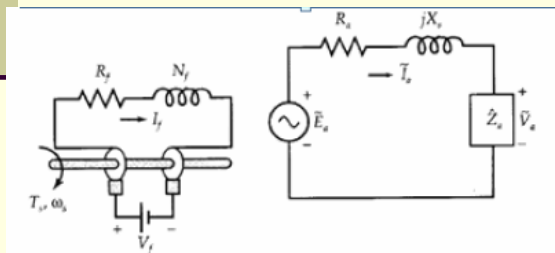
Tanto la reactancia de magnetización como la de dispersión están presentes al mismo tiempo. Resulta difícil separar una de la otra, por lo que se combinan y la suma

$$X_s = X_m + X_a$$

Reactancia síncrona

- La reactancia síncrona suele ser muy grande en comparación con la resistencia del devanado de la armadura. En seguida puede definirse la impedancia síncrona por fase, como sigue

$$\bar{Z}_s = R_a + jX_s$$



$$RV\% = \frac{E_a - V_a}{V_a} \times 100$$

Ejercicio 2.2

Un generador síncrono de 9 kVA, 208 V, trifásico y conectado en Y tiene un devanado con resistencia de 0.1 Ω /fase y una reactancia síncrona de 5.6 Ω /fase. Determine su regulación de voltaje cuando el factor de potencia de la carga es a) 0.8 en atraso, b) la unidad y c) 0.8 en adelante.

Pruebas de generadores síncronos

- Prueba de resistencia
- Prueba de circuito abierto.
- Prueba de cortocircuito

Prueba de resistencia

- Esta prueba se realiza para medir la resistencia del devanado de la armadura de un generador síncrono cuando se halla en reposo y el devanado de campo está abierto.

$$R_a = 0.5R_L$$

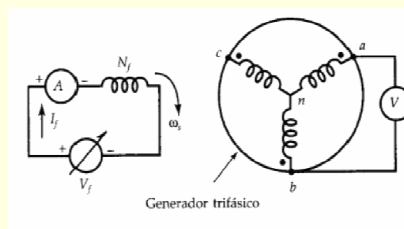
Generador en Estrella

$$R_a = 1.5R_L$$

Generador en Delta

Prueba de circuito abierto

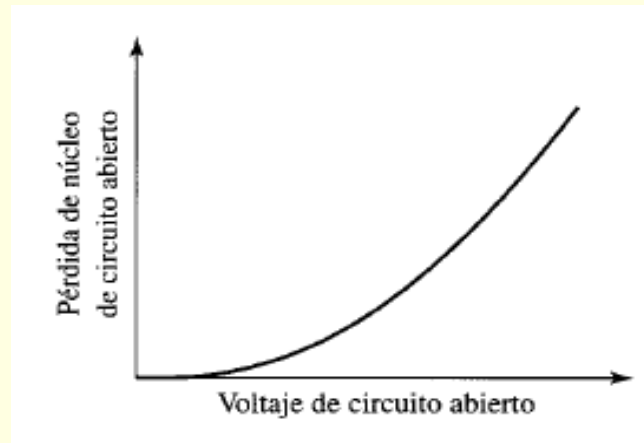
- Se efectúa impulsando el generador a su velocidad nominal al tiempo que se deja abierto el devanado de la armadura.
- La corriente del campo se varía en pasos apropiados y se registran los valores correspondientes del voltaje a circuito abierto entre dos pares cualesquiera de terminales de los devanados de la armadura



Característica de Circuito abierto

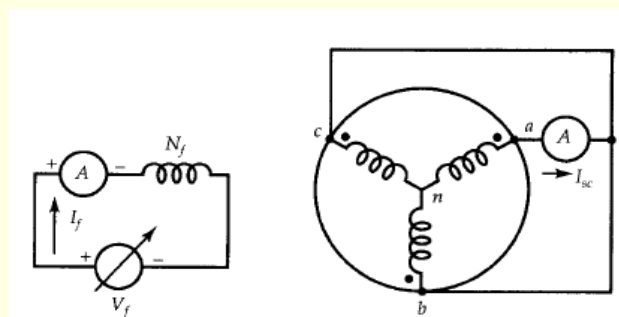
- La corriente del campo puede aumentarse hasta que el voltaje a circuito abierto sea el doble del valor especificado.
- De los datos registrados para el voltaje a circuito abierto es posible calcular el voltaje por fase (circuito abierto). Cuando se grafica el voltaje por fase (circuito abierto) como función de la corriente de campo, se obtiene una gráfica llamada *característica (curva) de saturación a circuito abierto (CCA)*.

Pérdidas en el núcleo



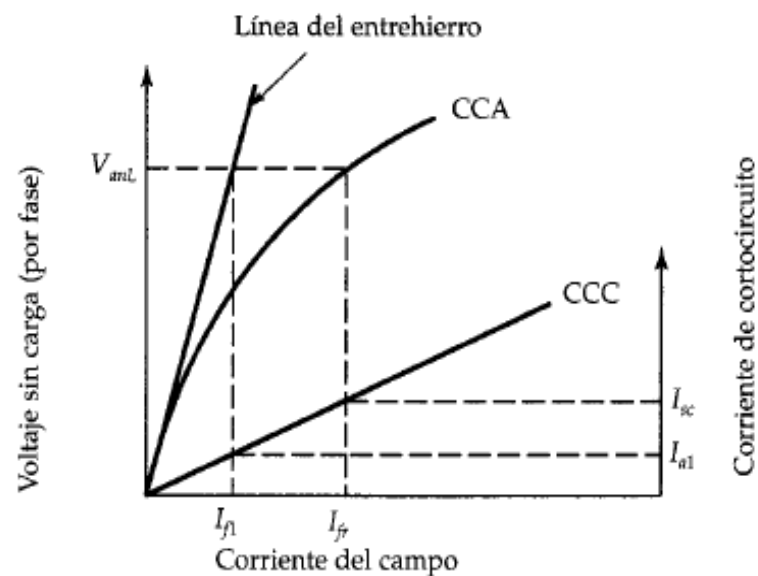
Prueba de cortocircuito

- Se lleva a cabo impulsando el generador a su velocidad nominal, con las terminales del devanado de la armadura en cortocircuito

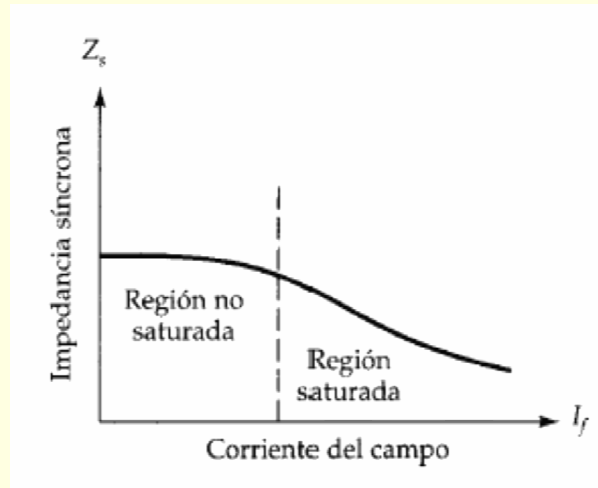


Prueba de cortocircuito

- Se coloca un amperímetro en serie con una de las tres líneas en cortocircuito.
- Se incrementa gradualmente la corriente de campo y se registra el valor correspondiente de la corriente.
- La corriente máxima de la armadura en cortocircuito no debe exceder el doble de la corriente especificada del generador.
- Con base en los datos registrados se calcula la corriente por fase en el cortocircuito.



Curva de impedancia síncrona en función de la corriente de campo



Ejercicio 2.3

Un generador síncrono trifásico de 500 kVA, 2 300 V, conectado en Y trabaja a su velocidad especificada para obtener su voltaje nominal sin carga. Cuando se establece un cortocircuito, la corriente de fase es de 150 A. La resistencia promedio de cada fase es de $0.5 \, \Omega$. Determine la reactancia síncrona por fase. Con el sistema por unidad, determine la regulación porcentual de voltaje cuando el generador alimenta la carga especificada a su voltaje nominal y con un factor de potencia de 0.8 en atraso.

Análisis no lineal de la máquina síncrona: método de Potier

- Se aplica a máquinas síncronas de rotor cilíndrico que trabajan en zona de saturación.
- No se puede aplicar el método de la reactancia síncrona ya que las fems no son ahora proporcionales a las FMMs, debido esto a la no linealidad de la zona del circuito magnético en que trabaja.
- Este método calcula la caída de tensión en la reactancia de dispersión y la FMM que produce la reacción de inducido.

Método de Potier o del FP nulo

- Para aplicarlo es preciso conocer la CCA del generador.
- Es necesario también realizar un ensayo con carga inductiva pura, realizando un gráfico de la tensión de salida respecto a la FMM de excitación (la cual es proporcional a la corriente de excitación), para una corriente de armadura constante e igual a la intensidad nominal.

Esquema de conexión para estudio del método de Potier

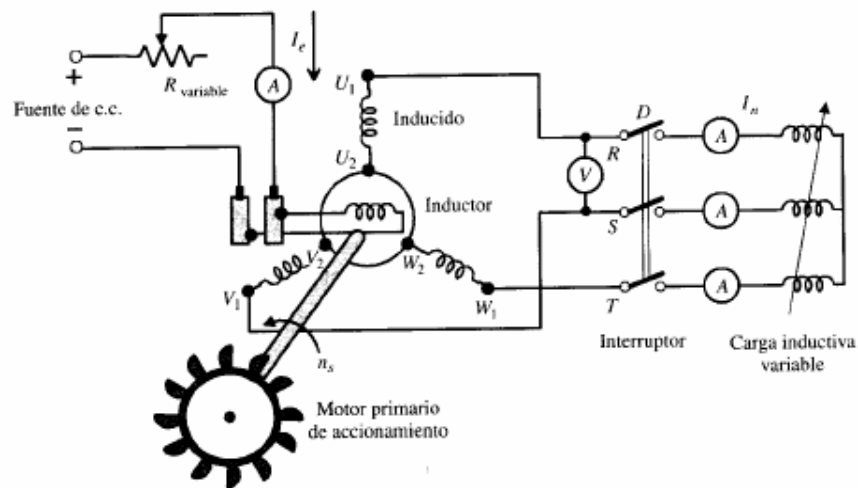
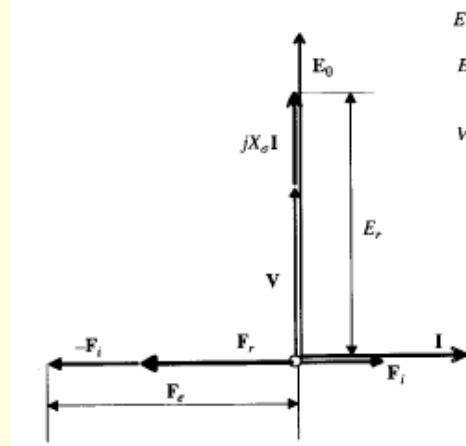
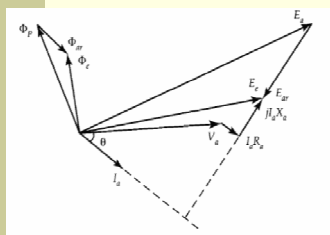
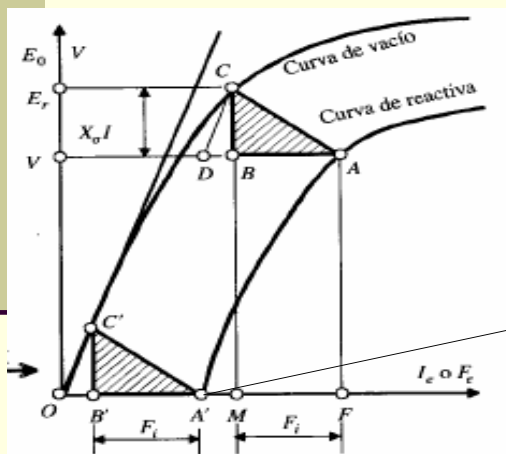


Diagrama fasorial de carga inductiva pura despreciando la resistencia de armadura



$$F_e = F_i + F_r \quad ; \quad E_r = V + X_g I$$

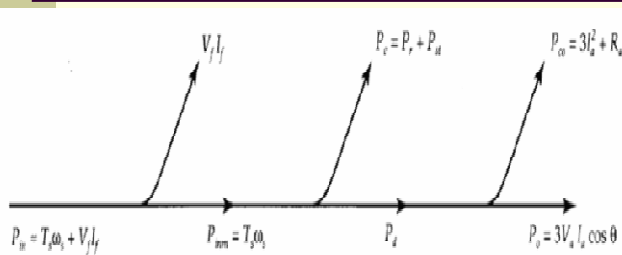
Características de circuito abierto y reactiva



El desplazamiento entre ambas curvas se debe a la FMM de reacción de inducido y a la FMM necesaria para compensar la caída de tensión por reactancia de dispersión.

Segmento OA' corresponde a la excitación necesaria para que circule la corriente de plena carga en cortocircuito

Diagrama de flujo de potencia generador síncrono



$$P_c = P_r + P_{sat} + V_f I_f$$

$$P_{in} = T_s \omega_s + V_f I_f$$

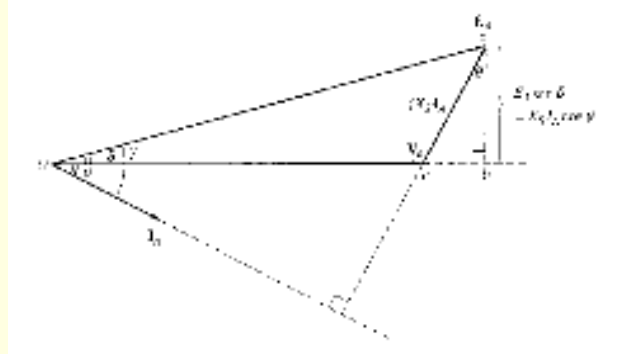
$$P_{in} = 3V_a I_a \cos \theta + 3I_a^2 R_a + P_r + P_{sat} + V_f I_f$$

Potencia mecánica alimentada

Potencia DC entregada al rotor

$$\eta = \frac{3V_a I_a \cos \theta}{3V_a I_a \cos \theta + 3I_a^2 R_a + P_c}$$

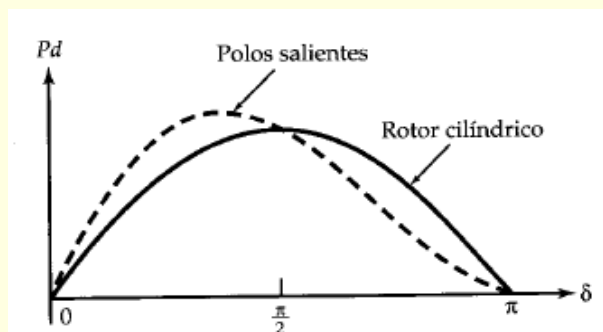
Relaciones de potencia



$$P = \frac{3V_A E_A}{X_s} \sin \delta$$

$$Q = 3 \left[\frac{V_A E_A}{X_s} \cos \delta - \frac{V_A^2}{X_s} \right]$$

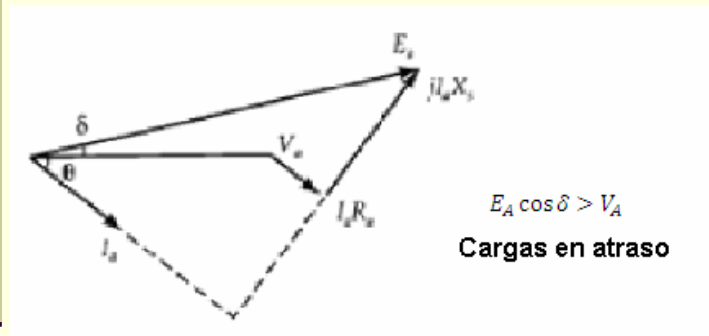
Relación del ángulo de potencia



$$T = \frac{3V_A E_A}{X_s \omega_s} \sin \delta$$

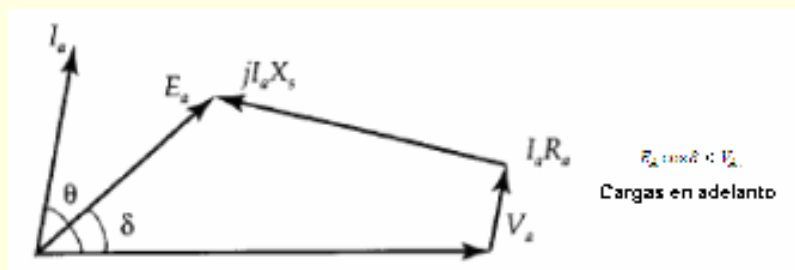
También se le conoce como
ángulo de par

Generador sobre-excitado



$$Q = 3 \left[\frac{V_A E_A}{X_s} \cos \delta - \frac{V_A^2}{X_s} \right] > 0$$

Generador sub-excitado



$$Q = 3 \left[\frac{V_A E_A}{X_s} \cos \delta - \frac{V_A^2}{X_s} \right] < 0$$

Ejercicio 2.4

Encuentre las expresiones para la potencia activa y reactiva entregadas por un generador síncrono en el caso en que R_a no sea despreciable. Demuestre que estas se pueden escribir como

$$P = \frac{3V_A E_A}{|Z|} \sin(\delta + \alpha_Z) - 3 \frac{R_a V_A^2}{|Z|^2} \quad \text{y} \quad Q = \frac{3V_A E_A}{|Z|} \cos(\delta + \alpha_Z) - 3 \frac{X_s V_A^2}{|Z|^2}$$

donde $\bar{Z} = Z \angle \varphi_Z$ y $\alpha_Z = 90^\circ - \varphi_Z$.

Ejercicio 2.5

¿Cuál es la máxima potencia reactiva por unidad que puede abastecer una máquina síncrona que opera con un voltaje terminal, cuya reactancia síncrona es de 1.6 por unidad y cuya máxima corriente de campo se limita a 2.4 veces la corriente que se requiere para alcanzar el voltaje terminal en condiciones de circuito abierto?

Generador sincrónico operando en forma aislada

La característica externa de un generador síncrono muestra la variación del voltaje en las terminales, con la carga de un generador independiente.



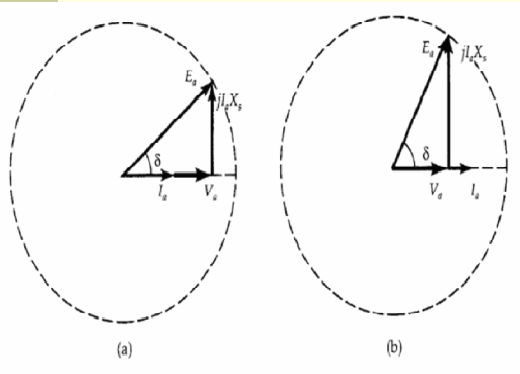
Operación aislada del generador

- Del circuito equivalente aproximado del generador, se tiene que

$$\bar{V}_a = \bar{E}_a - j\bar{I}_a X_s$$

- Puesto que $\bar{E}_a$ y X_s son constantes, el voltaje en las terminales $\bar{V}_a$ depende de la magnitud de la corriente en la carga y de su factor de potencia.
- El lugar geométrico de $\bar{E}_a$ es un círculo.

Factor de potencia unitario

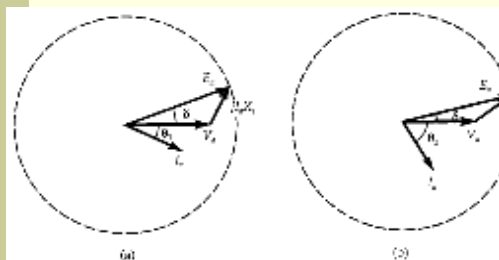


El incremento en la corriente de carga ocasiona que:

1. Se incremente la caída de voltaje a través de la reactancia síncrona.
2. Aumente el ángulo de potencia.
3. Disminuya el voltaje en las terminales.

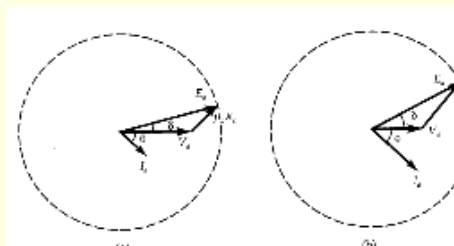
$$\bar{Z}_L = R_L$$

Factor de potencia en atraso



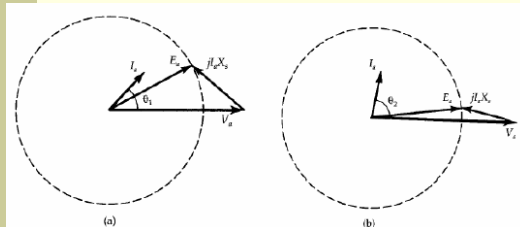
Aumento en la magnitud de corriente

$$\bar{Z}_L = R_L + jX_L$$



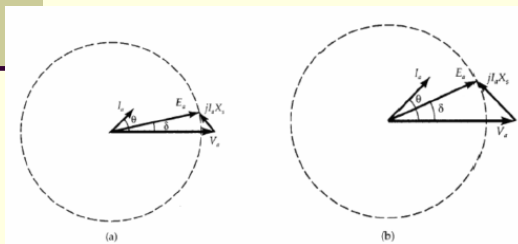
Aumento en el factor de potencia

Factor de potencia en adelanto



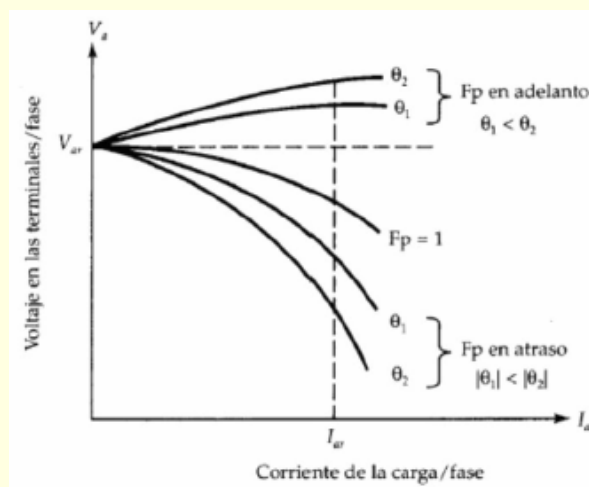
Aumento en la magnitud
de corriente

$$\bar{Z}_L = R_L - jX_C$$



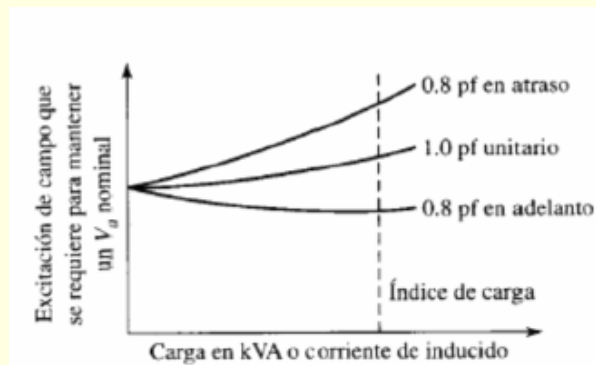
Aumento en el factor de
potencia

Características externas



Curvas de composición

- Representan el ajuste que se debe aplicar a la corriente de campo para que el generador entregue potencia al voltaje nominal.

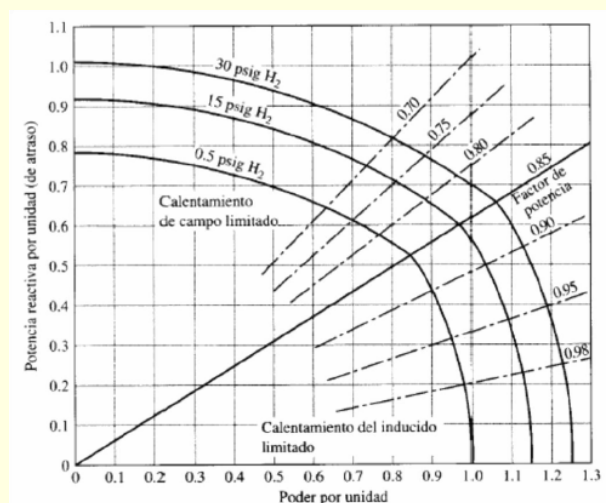


Ejercicio 2.7

Curva de capacidad

- Los generadores síncronos se evalúan por lo general por su capacidad máxima en potencia aparente a un determinado voltaje y FP que puedan entregar de manera continua sin calentarse.
- La salida de potencia real del generador se limita a un valor dentro del índice de potencia aparente por medio de la capacidad del motor principal (primotor).
- Debido a su sistema de regulación de voltaje la máquina opera normalmente a un voltaje terminal constante.

Ejemplos de curvas de capacidad



Límite corriente de armadura

- La operación bajo condiciones de voltaje terminal constante y corriente de armadura (al máximo valor permitido por las limitaciones de calentamiento), corresponde a un valor constante de potencia aparente. En p.u. se tiene que

$$\text{Potencia aparente} = \sqrt{P^2 + Q^2} = V_a I_a$$

- Donde P representa la potencia real por unidad y Q la potencia reactiva por unidad.
- La anterior ecuación representa un círculo centrado en el origen de una gráfica de potencia reactiva en función de la potencia real.

Límite corriente de campo

- Se va a considerar la operación cuando el voltaje terminal es constante y la corriente de campo se limita a un valor máximo, que también es determinado por limitaciones de calentamiento. En valores por unidad se tiene que

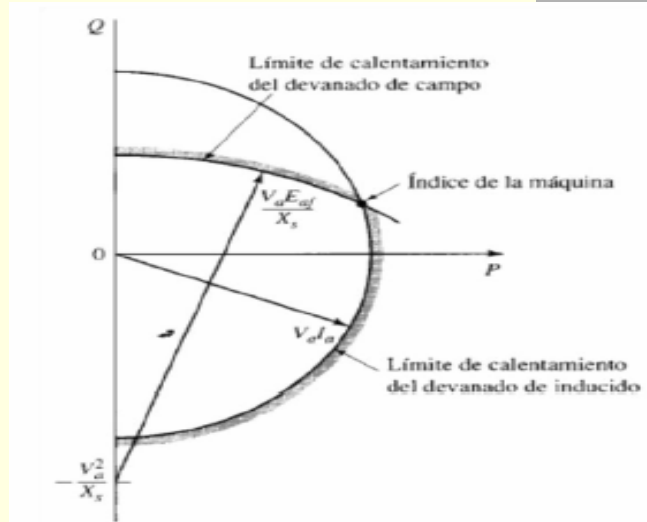
$$P - jQ = \bar{V}_a \bar{I}_a \quad \text{y} \quad \bar{E}_a = \bar{V}_a + jX_s \bar{I}_a$$

$$P^2 + \left(Q + \frac{V_a^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{V_a E_a}{X_s}\right)^2$$

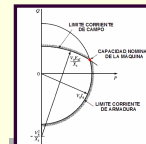
→ Círculo centrado en

$$Q = -\frac{V_a^2}{X_s}$$

Curva de capacidad



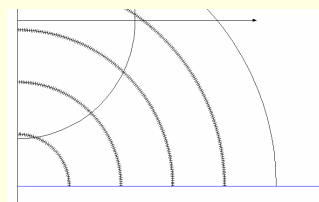
CURVA DE CAPACIDAD (GS POLOS LISOS)



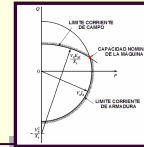
LÍMITE PRÁCTICO DE ESTABILIDAD

La curva del límite práctico de estabilidad se traza considerando un margen del 5 al 10% de la potencia nominal de la máquina de acuerdo con:

- A. Se divide la longitud del radio "límite de corriente de campo", en partes iguales y se trazan los semicírculos

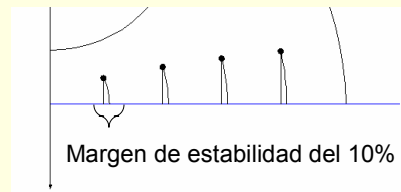


CURVA DE CAPACIDAD (GS POLOS LISOS)



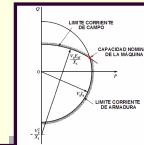
LÍMITE PRÁCTICO DE ESTABILIDAD

- B. Al límite superior de cada división se le resta el margen considerado (10%). Se establecen los nuevos puntos:



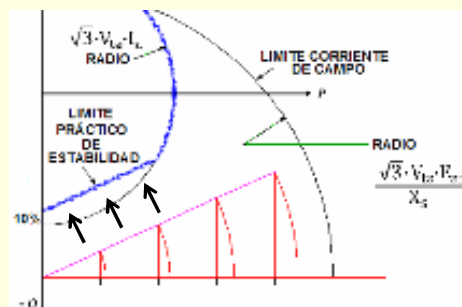
- C. Se traza la curva que interseca cada uno de estos nuevos puntos.

CURVA DE CAPACIDAD (GS POLOS LISOS)

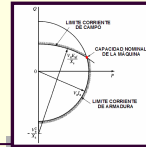


LÍMITE PRÁCTICO DE ESTABILIDAD

- D. Finalmente, una vez trazada la línea que une los nuevos puntos, dicha línea se traslada a la curva de capacidad como se observa:



CURVA DE CAPACIDAD (GS POLOS LISOS)



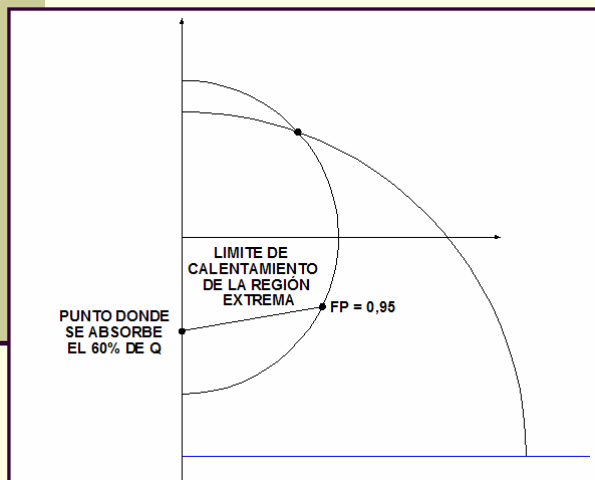
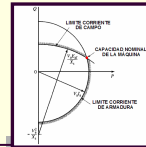
LIMITE DE CALENTAMIENTO DE LA REGIÓN EXTREMA DE LA MÁQUINA (CABEZALES DE BOBINA)

Es importante en las máquinas de rotor sólido subexcitadas.

Se determina experimentalmente ó de la siguiente forma:

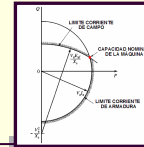
“Se traza una línea recta desde el punto de factor de potencia 0,95 en adelante sobre la curva del límite de corriente de armadura, hasta el punto donde se absorbe el 60% de Q ($P = 0$).”

CURVA DE CAPACIDAD (GS POLOS LISOS)

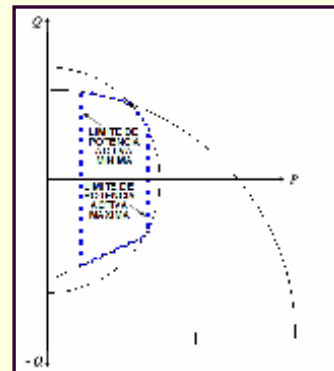


LOS LÍMITES QUE NO
INCLUYE EL
FABRICANTE NOS
PERMITEN
DETERMINAR CUAL
ES LA MÁXIMA
POTENCIA REACTIVA
QUE PUEDE
ABSORBER LA
MÁQUINA

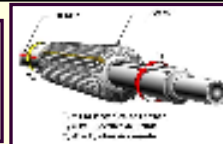
CURVA DE CAPACIDAD (GS POLOS LISOS)



También existe un límite de potencia activa mínimo y máximo impuesto por el primotor o por la fuente de energía mecánica del generador (turbina, caldera, etc.)

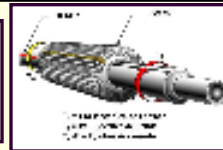


EL FENÓMENO DE LA PERDIDA DE SINCRONISMO

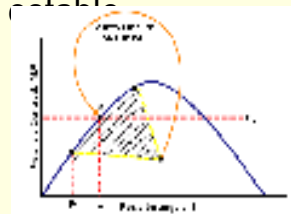


- En el funcionamiento normal de estado estable en una máquina sincrónica el par electromagnético equilibra al par mecánico que se aplica en $\tau_{ACELERANTE} = \tau_M - \tau_E$
- En un generador, el par de impulsión actúa en la dirección de rotación del rotor, impulsando a la onda de fuerza magnetomotriz del rotor adelante del flujo resultante en el entrehierro. Entonces, el par electromagnético se opone a la rotación. En el caso de un motor sincrónico, el par electromecánico está en dirección de la rotación, oponiéndose al par de retardo de la carga mecánica sobre el eje.

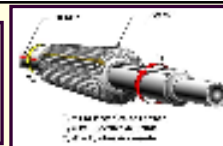
EL FENÓMENO DE LA PERDIDA DE SINCRONISMO



- Cuando se aumenta el par de la máquina impulsora debe aumentarse la magnitud de δ hasta que el par electromagnético equilibre al par en el eje. El proceso de reajuste en realidad es dinámico, acompañado por un cambio temporal en la velocidad mecánica instantánea del rotor y una oscilación mecánica amortiguada, llamada “búsqueda”, del rotor alrededor de su nuevo ángulo de par de estado estable.

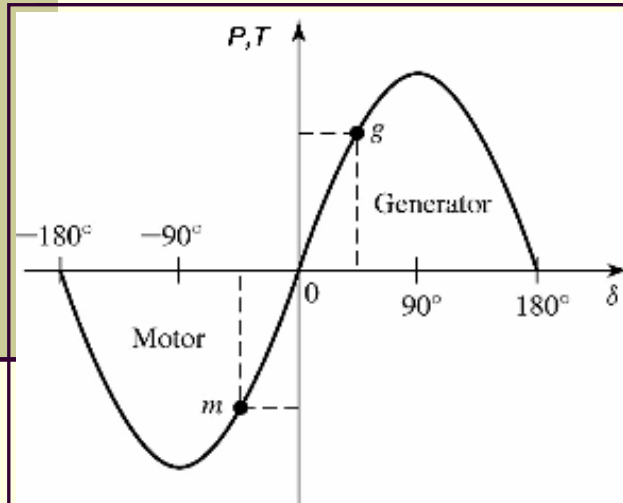
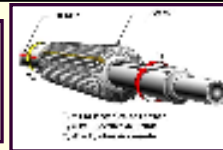


EL FENÓMENO DE LA PERDIDA DE SINCRONISMO

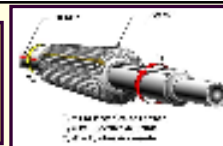


- A medida que se aumenta el par de la máquina impulsora, aumenta δ . Cuando δ llega a 90° , en una máquina de polos lisos, la potencia y el par electromagnético alcanzan su valor máximo que se denominan potencia máxima, par crítico o par límite, respectivamente. Cualquier aumento en el par impulsor (potencia mecánica) no puede ser equilibrado por un aumento correspondiente en el par electromagnético sincrónico y como resultado se acelerará el rotor y no se mantendrá la operación sincrónica. A este fenómeno se le llama **pérdida de sincronismo**.
- En el caso de un motor síncrono, si se da un aumento de la carga en el eje más allá del par límite hará que el rotor pierda sincronismo y, por lo tanto, se desacelere.

EL FENÓMENO DE LA PERDIDA DE SINCRONISMO



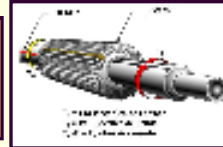
EL FENÓMENO DE LA PERDIDA DE SINCRONISMO



Tanto para la máquina de polos lisos como para la de polos salientes se cumple que la potencia máxima que la máquina puede entregar sin perder sincronismo se da para el ángulo δ tal que la derivada de la potencia con respecto al ángulo δ sea igual a cero, es decir:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = 0$$

EL FENÓMENO DE LA PERDIDA DE SINCRONISMO



- Para la máquina de rotor liso es evidente que la potencia máxima se da cuando $\delta=90^\circ$.
- Para la máquina de polos salientes hay que hacer la derivada correspondiente, igualar a cero y finalmente despejar el valor del ángulo δ para el cual se produce la potencia máxima. En ambos casos, el valor de la potencia máxima se obtiene evaluando la expresión de la potencia en el ángulo δ que la maximiza.
- Además de pérdida de sincronismo, es importante destacar el concepto de potencia sincronizante, la cual se define con la potencia en activa por grado eléctrico. De otra manera, es la derivada de la potencia con respecto al ángulo de carga, evaluada en el punto de operación.

$$\left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{\delta, E_a, V_t, X_s}$$

Operación en paralelo de generadores síncronos

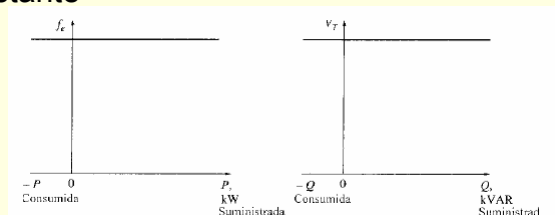
- La generación, transmisión y distribución de energía eléctrica deben efectuarse en forma eficiente y confiable a un costo razonable con el menor número de interrupciones posible.
- Por eficiente se entiende que el generador debe operar no solo a su eficiencia máxima, sino que la eficiencia debe ser máxima a plena carga o cerca de ella.
- Esto en la práctica es difícil por cuanto la carga puede fluctuar mucho durante el día.

Confiabilidad

- Los consumidores nunca deben darse cuenta de una pérdida de energía eléctrica. Esto no se puede lograr con un solo generador.
- Un generador aislado no es eficiente ni rentable ni confiable para un sistema eléctrico.
- Para garantizar confiabilidad se genera energía en una ubicación central donde estén conectados varios generadores en paralelo.

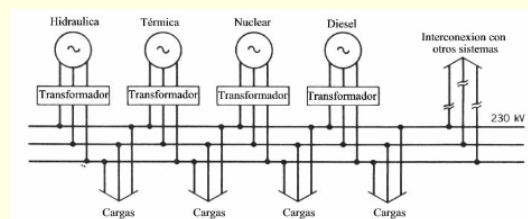
Barra infinita

- Línea común a la cual se conectan todos los generadores en paralelo.
- Las modificaciones que se den en el generador entrante no van a producir impacto en dicha barra.
- Cumple con dos condiciones
 - Voltaje constante
 - Frecuencia constante



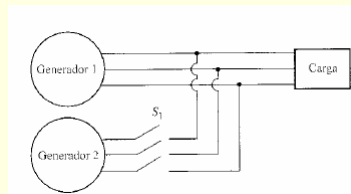
Ventajas de tener un sistema de generadores en paralelo

- ✓ Se quede alimentar más carga.
- ✓ Se aumenta la confiabilidad en caso de fallas.
- ✓ Se puede dar mantenimiento a las unidades manteniendo continuidad en el servicio.
- ✓ Se aumenta la eficiencia de las unidades en línea (lo ideal que los generadores funcionen a plena carga).



Sincronización del generador entrante

- Es el proceso mediante el cual se conecta en paralelo un generador ya sea a otro existente o la barra de potencia infinita, de manera segura.

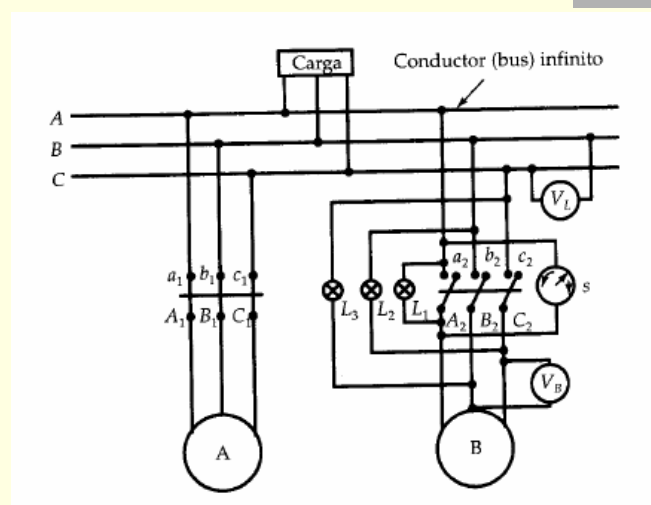


- Si el interruptor se cierra arbitrariamente en cualquier momento, los generadores están sujetos a daños severos y la carga puede perder potencia.

Condiciones de sincronización

- El voltaje de línea del generador debe ser igual al del voltaje de línea del otro generador (o barra infinita).
- La secuencia de fases del generador entrante debe ser igual a la secuencia de fases del otro generador (o barra infinita).
- La frecuencia del generador entrante debe ser ligeramente mayor que la del sistema o la del otro generador.
- Los ángulos de fase de las dos fases “a” deben ser iguales.

Diagrama de conexión



Procedimiento de sincronización

- El generador entrante se impulsa especificada, o muy cerca de ella, y se aumenta la corriente de campo hasta un nivel en el que su voltaje sin carga es casi igual al de la red. Se coloca un voltímetro entres dos líneas cualesquiera del generador entrante.
- Para comprobar la secuencia de fase se conectan asimétricamente tres lámparas. Cuando la secuencia de fase es la misma, la lámpara L1 está apagada mientras las otras dos están iluminadas. En caso de tener secuencias contrarias, las tres lámparas estarán apagadas o encendidas simultáneamente.

Procedimiento de sincronización

- Cuando la secuencia de fase es la apropiada y la frecuencia del generador entrante es exactamente igual que la de la red, la lámpara L1 permanece apagada mientras que las otras dos brillan. Cualquier desigualdad en la frecuencia obliga a las tres lámparas a pasar de apagadas a iluminadas en orden sucesivo.

Sincronoscopio

- Es un aparato que se conecta a través de una de las fases, midiendo así la diferencia angular entre mismas fases del voltaje del generador entrante y del sistema (o el otro generador).
 - Si la frecuencia del generador es un poco mas alta que la del sistema, la manecilla gira en el sentido de las manecillas del reloj. (Rápido)
 - Si la frecuencia del generador está un poco baja, la manecilla gira en sentido contrario al de las manecillas del reloj.



Ejemplo #11:

Un ingeniero graduado en el área de electrónica recibe una excelente oferta de trabajo en la que le duplican su salario (ser el encargado de operación de una planta privada de generación eléctrica).

Durante su primer mes de trabajo se presenta el primer gran problema, se daña el sistema de sincronización de uno de los 3 generadores con la red de potencia.

Utilizando sus conocimientos en electrónica, y lo que recuerda del curso de Máquinas II decide sincronizar los generadores por medio de dos osciloscopio y dos voltímetro (supongamos que se puede hacer esto, y que los voltímetros no miden voltajes RMS, sino valores instantáneos con intervalos menores a un ciclo, quedando registradas las mediciones instantáneas), al analizar la forma de onda y los desfases presentes en las ondas de voltajes, tanto del generador como de la red.

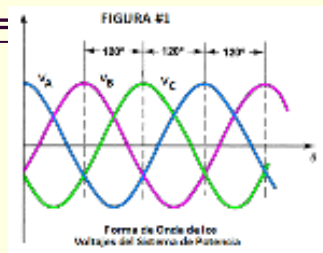
Ejemplo #11:

- a) El ingeniero designa a su gusto las fases del generador que va sincronizar y mide las diferencias de voltaje entre la fase "a" del generador y la fase "a" del sistema; realiza esto con las tres fases. Asuma que el ingeniero tiene la secuencia de fases invertidas (secuencia abc contra secuencia acb).

¿Qué diferencia de voltaje observará entre voltímetro #1 y el voltímetro #2 (comportamiento de la diferencia de voltajes a lo largo de un periodo), si se está midiendo la fase B del sistema contra la fase C del generador?

Asuma que la magnitud de los voltajes de fase es la misma para ambos sistemas. Utilice la forma de onda para explicar lo que sucede. Como ayuda recuerde lo que sucede con los bombillos en el laboratorio.

Ejemplo #11:

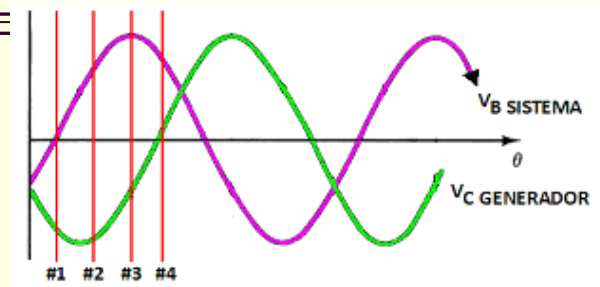


PROBLEMA DE FASES INVERTIDAS:

Al suponer que con los voltímetros se podrá medir el voltaje instantáneo en registro adecuados, podrá notarse claramente que la diferencia de voltaje entre la fase B y la fase C, aumentará desde cero hasta un valor máximo, y luego regresará a cero.

Analicemos lo que sucede con las formas de ondas vistas en el osciloscopio:

Ejemplo #11:



Claramente al tener una secuencia de fases como la sugerida para realizar el análisis en el instante #1, la diferencia entre los voltajes empezará a aumentar, hasta llegar a alcanzar su máximo en un punto entre los instantes #2 y #3, para luego empezar a decrecer (instante #4), hasta retornar a cero.

Ejemplo #11:

En el laboratorio lo que ocurre con los bombillos es que se encienden en forma secuencial (la diferencia de voltaje no es la misma entre fases), es decir, primero se enciende el bombillo de la fase A, luego conforme este se va apagando se enciende el de la fase B, y luego el de la fase C, debido a los 120° de desfase entre devanados. Lo anterior por cuando se alcanzan los máximos y mínimos de las ondas de voltaje con desfases de 120° y 240° .

Ejemplo #11:

- b) Suponiendo que el ingeniero no se da cuenta del problema de secuencia de fases invertidas, por lo que decide sincronizar el generador de esta forma, explique con base en argumentos matemáticos y de diagramas fasoriales el porqué el generador se motorizará al entrar en operación con la red.

PROBLEMA DE MOTORIZACIÓN DEL GENERADOR AL CONECTARSE CON LA SECUENCIA DE FASES INVERTIDAS

De acuerdo a lo explicado anteriormente al estar la secuencia de fases de la máquina invertida con la secuencia de fases del sistema de potencia existirá una diferencia de potencia, no solo entre una de las fases, sino entre todas (recuérdese que el tomar como referencia una fase es un artificio matemático, no un principio físico).

Ejemplo #11:

Lo anterior provoca que en el instante de la sincronización exista una corriente de armadura determinada por la siguiente ecuación:

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{X_S}, \text{ al despreciar } R_a$$

Dicho valor de corriente será de signo negativo debido a que V_T adelantará a E_A produciendo una circulación de corriente del sistema hacia el motor.

Debe recordarse que en el instante en que se sincroniza un generador, se busca que el valor de I_A sea lo menor posible para evitar flujos de corriente que puedan originar daños.

Ejemplo #11:

Al sincronizar el generador con la red cuando la secuencia de fases esta invertida tendremos que existirá una circulación de corrientes del sistema hacia el generador (corrientes de sentido contrario del caso generador).

La circulación de estas corrientes dentro del devanado de armadura de la máquina provocará una fuerza magnetomotriz contraria a la rotación originada por el primotor (en ese momento la energía mecánica entregada por el primotor es baja ya que solo debe mantener la rotación a velocidad constante al contrarrestar la reacción de armadura).

Ejemplo #11:

Como en un motor sincrónico la FMM de armadura (provocada por la circulación de corrientes) y la FMM de campo se alinean en el sentido de rotación, la suma algebraica de la fuerza magnetomotriz contraria a la rotación originada por el primotor será mayor que la fuerza magnetomotriz inducida en para el caso generador, obteniéndose como resultado que el generador se motorice, lo que a su vez provocará un ruido bastante fuerte producto de la interacciones de los pares generador – motor.

Con diagramas fasoriales lo anterior se verá de la siguiente forma si despreciamos la resistencia de la máquina:

Ejemplo #11:

Antes de la sincronización:

$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= 0 & jX_S \bar{I}_A &= 0 \\ \phi &= 0 & \bar{E}_A &= \bar{V}_T \\ \delta &= 0 \end{aligned}$$

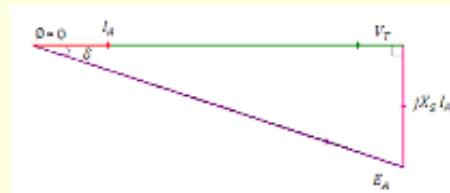
Lo anterior debido a que la máquina se encuentra en vacío.

Al presentarse una secuencia de fases invertida, desde que cerramos el interruptor de sincronización tendremos una circulación de corriente de la red hacia el motor ($-I_A$), debido a que existirá un desfase entre los voltajes V_T y E_A , recuérdese que V_T adelanta a E_A :

Ejemplo #11:

$$I_A = \frac{E_A \sin \delta - V_T \sin \alpha}{X_S}, \quad \text{donde } \delta < \alpha$$

Por lo tanto el diagrama fasorial será el siguiente suponiendo factor de potencia unitario (recuérdese que el factor de potencia de una máquina sincrónica es definido por el voltaje de excitación del circuito de campo):

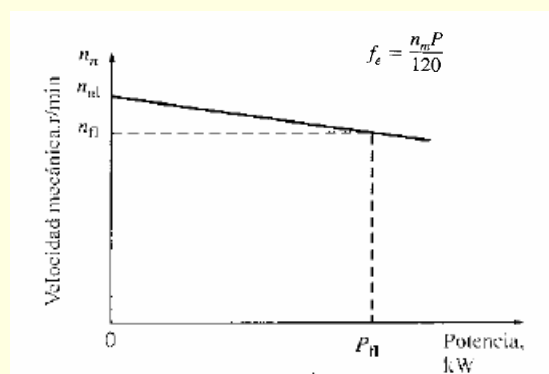


Característica frecuencia-potencia

- Todos los generadores son accionados por un motor primario, que es la fuente de potencia mecánica del generador.
- Se comportan de tal manera que cuando la potencia tomada de ellos se incrementa, decrece la velocidad a la cual giran.
- Esta disminución de velocidad no es lineal en general, para ello se incluye un mecanismo llamado gobernador.

Caída de velocidad

- Es la curva que muestra la caída suave en la velocidad en la turbina conforme se incrementa la potencia.



La mayoría de turbinas tienen una caída de velocidad entre 2% y 4%.

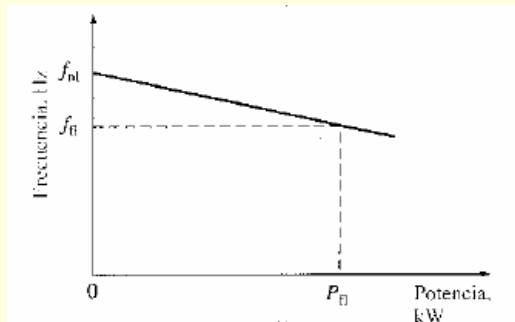
$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\%$$

$$f_e = \frac{n_n P}{120}$$

Curva de frecuencia en función de la potencia activa

- La velocidad del eje está relacionada con la frecuencia eléctrica por medio de la ecuación

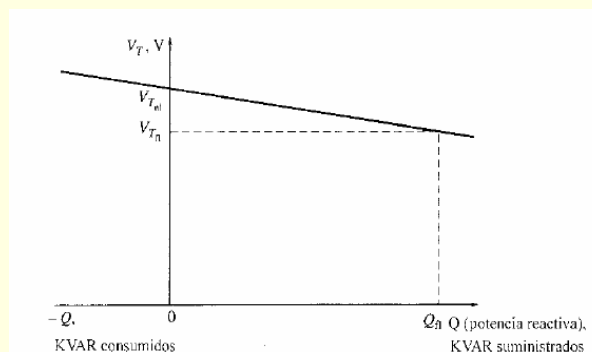
$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$



$$P = s_P(f_{n1} - f_{sis})$$

Característica Voltaje en función de potencia reactiva

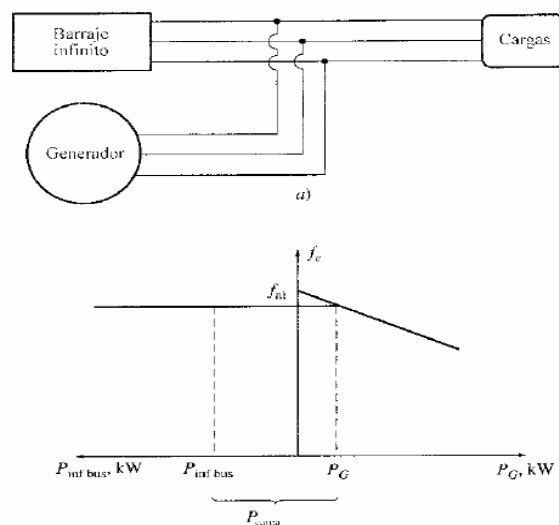
- Cuando se adiciona una carga en atraso a un generador sincrónico, cae su voltaje en las terminales.
- Cuando se adiciona una carga en adelanto a un generador sincrónico, se incrementa el voltaje en las terminales.



Generador que opera aislado

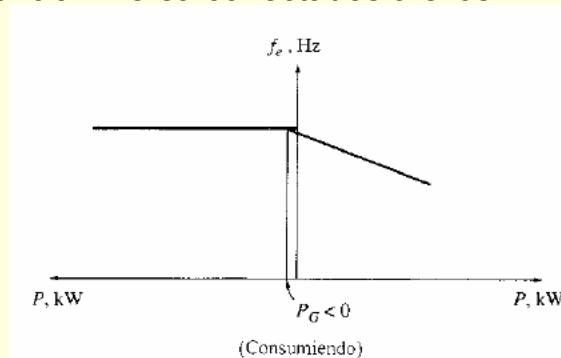
- La potencia activa y reactiva que entrega el generador será de la magnitud que demande la carga.
- El control de frecuencia del sistema lo hace el gobernador.
- La corriente de campo (o el AVR) controlará la tensión terminal del sistema de potencia.

Funcionamiento de generadores con grandes sistemas de potencia



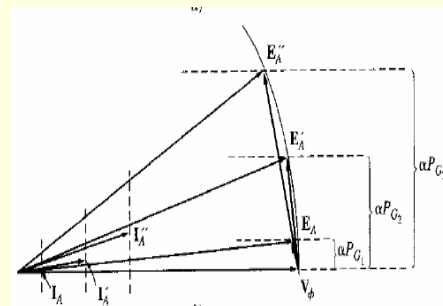
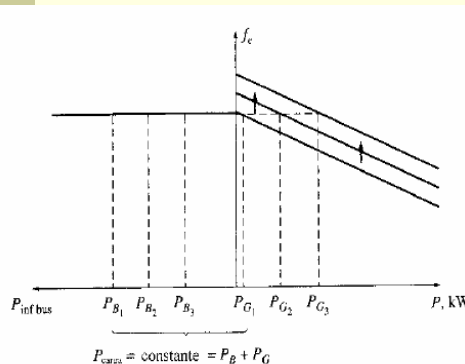
¿Qué sucede si la frecuencia del generador entrante es menor?

- El generador consume potencia eléctrica y gira como motor.
- Los generadores reales tienen disparadores de potencia inversa conectados a ellos.



¿Qué ocurre cuando se incrementa el punto de calibración del gobernador?

- El efecto es desplazar hacia arriba la frecuencia de vacío del generador.



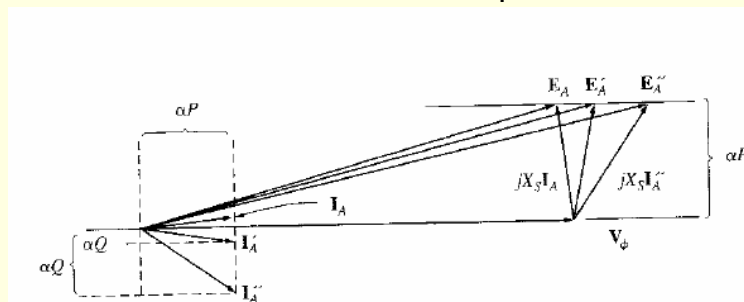
¿Qué ocurre en el sistema si la potencia de salida del generador se incrementa hasta exceder la potencia consumida por la carga?

- Si esto ocurre, la potencia extra generada fluye hacia el barraje infinito.
- Por definición, el barraje infinito puede suministrar o consumir cualquier cantidad de potencia sin experimentar cambios en la frecuencia.

Conclusión: La potencia extra es consumida.

¿Qué se hace para que la máquina suministre reactivo?

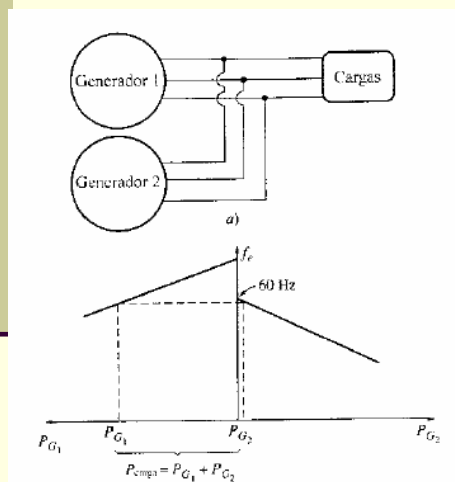
- Se debe modificar la corriente de campo de la máquina.
- Restricción:
 - La potencia debe permanecer constante cuando la corriente de campo varía.



Resumen generador operando con barra infinita

- La frecuencia y el voltaje en los terminales del generador son controlados por el sistema al cual está conectado.
- Los puntos de ajuste del gobernador del generador controlan la potencia real suministrada por el generador al sistema.
- La corriente de campo del generador controla la potencia reactiva suministrada por el generador al sistema.

Operación de generadores en paralelo con otros de igual tamaño



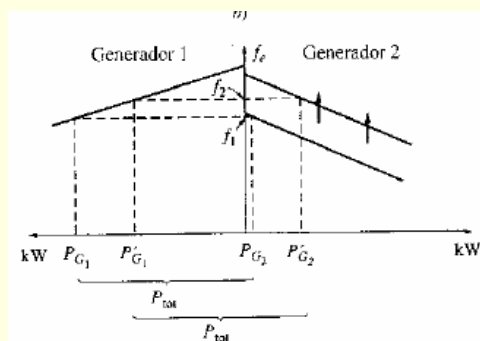
Condiciones del sistema

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{carga}} = P_{G1} + P_{G2}$$

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{carga}} = Q_{G1} + Q_{G2}$$

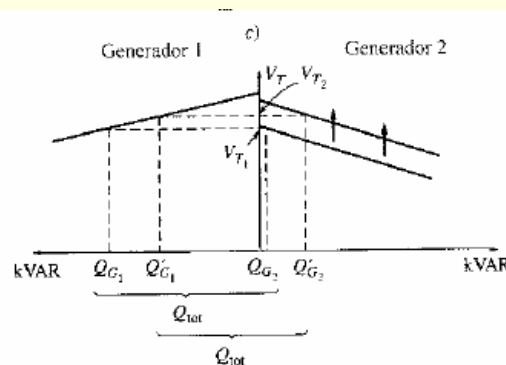
¿Qué ocurre si se incrementa la calibración en los puntos de ajuste del gobernador de G2?

- La curva potencia-frecuencia de G2 se desplaza hacia arriba.
- El sistema opera a una nueva frecuencia.
- G2 incrementa su potencia entregada mientras que G1 la reduce.



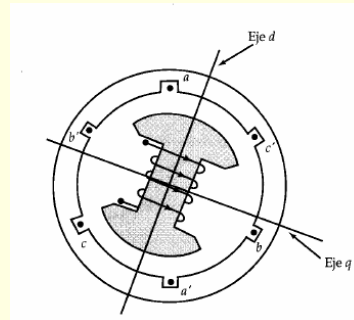
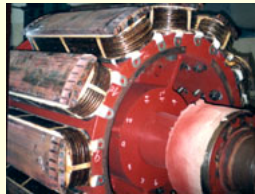
¿Qué ocurre si se aumenta la corriente de campo G2?

- Se incrementa el voltaje en las terminales del sistema.
- G2 incrementa su potencia reactiva entregada mientras que G1 la reduce



Generador síncrono de polos salientes

Un rotor de polos salientes tiene un entrehierro más grande en la región entre los polos que en la región apenas por arriba de ellos.

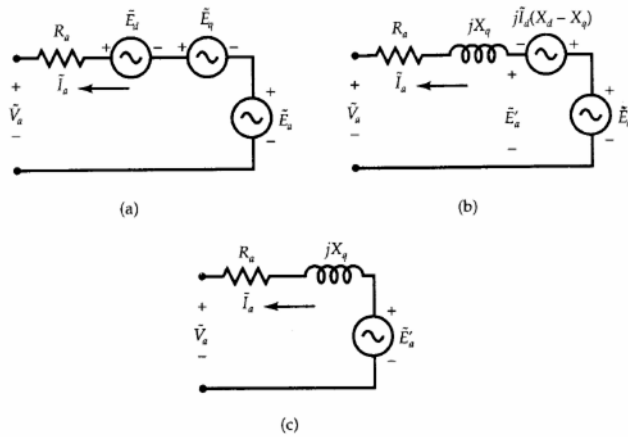


Reactancias de eje directo y de cuadratura

- Por la forma del rotor de polos salientes, se espera que la reluctancia de la región entre los polos sea distinta a la región directamente encima de ellos.
- La reactancia síncrona se divide en dos componentes:
 - Reactancia de eje directo
 - Reactancia de eje en cuadratura.
- La corriente de armadura también se divide en dos componentes
 - Componente directa
 - Componente cuadratura.

Circuito equivalente

$$\bar{E}_q = -jX_q \bar{I}_q \quad \bar{E}_d = -jX_d \bar{I}_d \quad jX_d \bar{I}_d = j\bar{I}_d X_q + j\bar{I}_d (X_d - X_q)$$

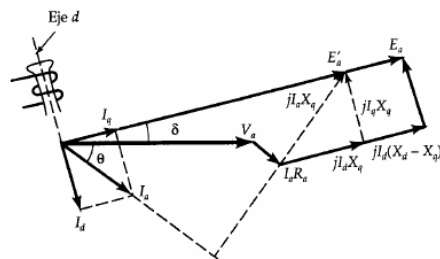


$$\bar{I}_a = \bar{I}_d + \bar{I}_q$$

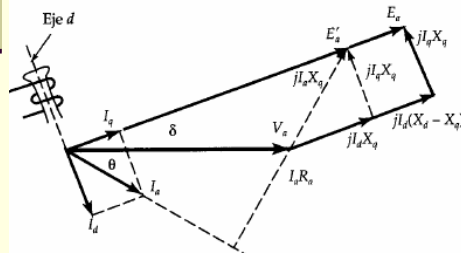
$$\bar{E}_a = \bar{E}'_a + j\bar{I}_d (X_d - X_q)$$

$$\bar{E}'_a = \bar{V}_a + \bar{I}_a R_a + j\bar{I}_a X_q$$

Diagramas fasoriales



Tomando en cuenta
resistencia de armadura



Despreciando resistencia
de armadura

