

# TEMA II: MÁQUINA SÍNCRONA

Tema II: MÁQUINA SÍNCRONA

# PRINCIPIOS GENERALES

# Introducción

La generación de corriente alterna se inició cerca de la mitad del siglo XIX, con generadores monofásicos que, por ejemplo, se emplearon para la alimentación de instalaciones de iluminación. Los primeros generadores sincrónicos trifásicos fueron construidos, independientemente el uno del otro, por F. A. Haselwander y Bradley, en el año 1887.

El desarrollo posterior trajo como resultado dos diseños básicos, que se diferencian entre sí debido, básicamente, a la estructura del rotor.

- En el caso de las máquinas llamadas de polos salientes, el rotor está formado por una rueda polar, cuyos polos de excitación, repartidos en su contorno, generan el campo principal de manera similar a como lo hacen las máquinas de corriente continua.

- Por otra parte, en 1901, Charles E. L. Brown, un fundador de la empresa Brown, Boveri, AG., inventó el tipo de rotor cilíndrico en el que el devanado de excitación se encuentra repartido en varias ranuras de su contorno.



# Introducción

Debido a sus características particulares, campos de aplicación, así como por las ventajas y desventajas, las máquinas sincrónicas se diferencian notablemente de las máquina asíncronas.

## Ventajas

- Velocidad y frecuencia constantes
- Factor de potencia ajustable (p. ej.  $\cos \phi = 1$ ) o generación de potencia reactiva inductiva
- Más elevada potencia límite (o revoluciones por minuto) gracias a la implementación de rotores robustos, sin perjuicio de la utilidad de la máquina

## Desventajas

- Más elevados costes de material
- Debido a la estructura complicada (devanado de excitación), en los motores de anillos colectores se presenta una mayor propensión a los daños, además de gastos más elevados de mantenimiento
- Problemas de arranque al operar como motor

# Introducción

Pueden funcionar tanto como generadores como motores. En la práctica se usan como generadores de energía eléctrica de corriente alterna (alternador) en las centrales eléctricas a partir de fuentes primarias de energía hidráulica, térmica o nuclear.

En la generación de energía eléctrica a pequeña escala se emplean alternadores acoplados a motores de combustión interna, son los llamados grupos electrógenos, que se usan como equipos de emergencia en hospitales, aeropuertos, etc.



Un generador de la central hidroeléctrica Gorona del Viento



Grupo electrógeno diésel monofásico

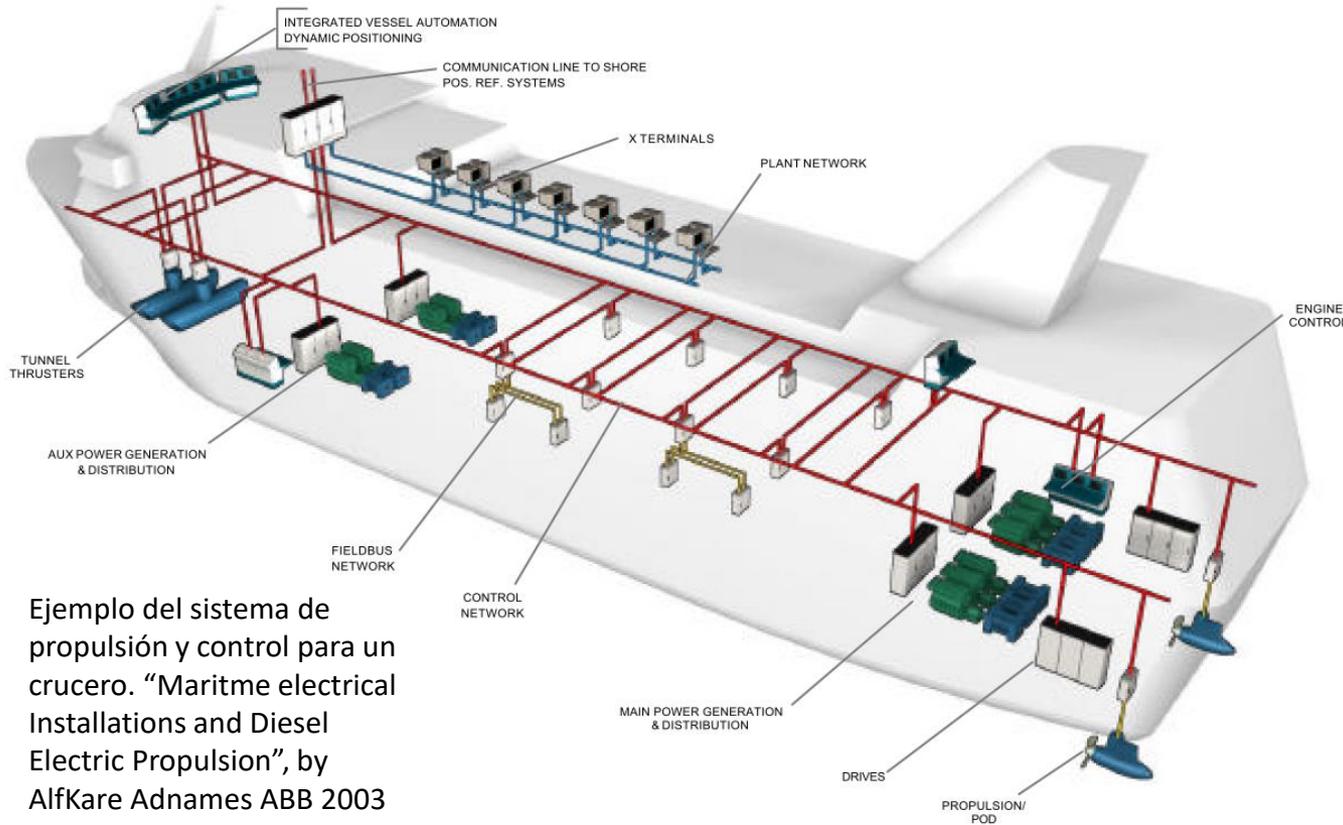


Grupo electrógeno diésel trifásico

# Introducción

En régimen de motor síncrono se emplea en accionamientos industriales que requieren velocidades de transmisión constantes teniendo además la ventaja frente a los motores asíncronos de poder regular simultáneamente el F.P. con el cual trabaja.

Cuando la máquina síncrona trabaja con F.P. capacitativo se dice que funciona como compensador o condensador síncrono.



Ejemplo del sistema de propulsión y control para un crucero. "Maritime electrical Installations and Diesel Electric Propulsion", by AlfKare Adnames ABB 2003



Motor eléctrico de propulsión para buque

Las máquinas sincrónicas aparecen en gran número entre las máquinas pequeñas y las micromáquinas, como por ejemplo en los relojes y en los tocadiscos.



# Aspectos constructivos

Las máquinas sincrónicas no se diferencian de las asíncronas en lo referente a la estructura de sus estatores, pero sí lo hacen claramente en cuanto a sus rotores.

En las máquinas sincrónicas se emplean rotores magnéticos con polos fijamente predeterminados, cuya estructura puede basarse en:

- electroimanes o en
- imanes permanentes.

También el funcionamiento de las máquinas sincrónicas, al igual que acontece con las demás máquinas, se deriva del principio de que los polos opuestos se atraen, mientras que los de igual signo se repelen. No obstante, por razones de funcionamiento, las máquinas sincrónicas sólo pueden desarrollar un par útil si:

Velocidad de giro del rotor = velocidad de giro del campo giratorio,

$$n = n_d$$



# Aspectos constructivos

El rotor posee su propio campo magnético, y éste actúa en conjunción con el campo magnético del estator.

Para su implementación se selecciona un electroimán o un imán permanente.

En el caso de los electroimanes, el rotor se equipa con un devanado, el cual se alimenta con una corriente continua por medio de los anillos colectores y las escobillas de carbón. En este caso se habla de excitación. En función de su intensidad, se pueden producir los siguientes casos:

- Campo del rotor más intenso que el del estator: La máquina sincrónica se encuentra **sobreexcitada** y se comporta como un condensador.
- Campo del rotor menos intenso que el del estator: La máquina sincrónica se encuentra **subexcitada** y se comporta como una inductancia.

Precisamente, esta capacidad es importante para la alimentación de corriente, debido a que, además de la potencia activa, las redes necesitan durante el día, en mayor medida, potencia reactiva inductiva y, por la noche, potencia reactiva capacitiva.

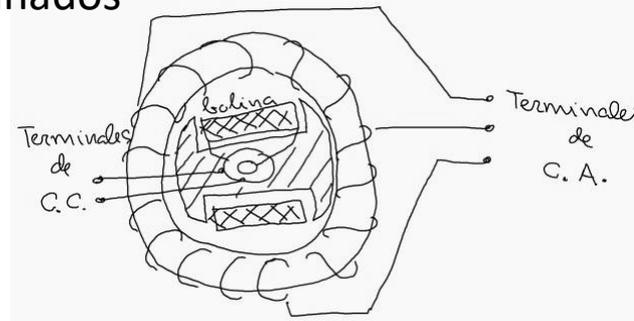
Dado que esto sólo se puede realizar sin problemas con las máquinas sincrónicas, las centrales eléctricas producen energía, casi exclusivamente, por medio de generadores sincrónicos.



# Aspectos constructivos

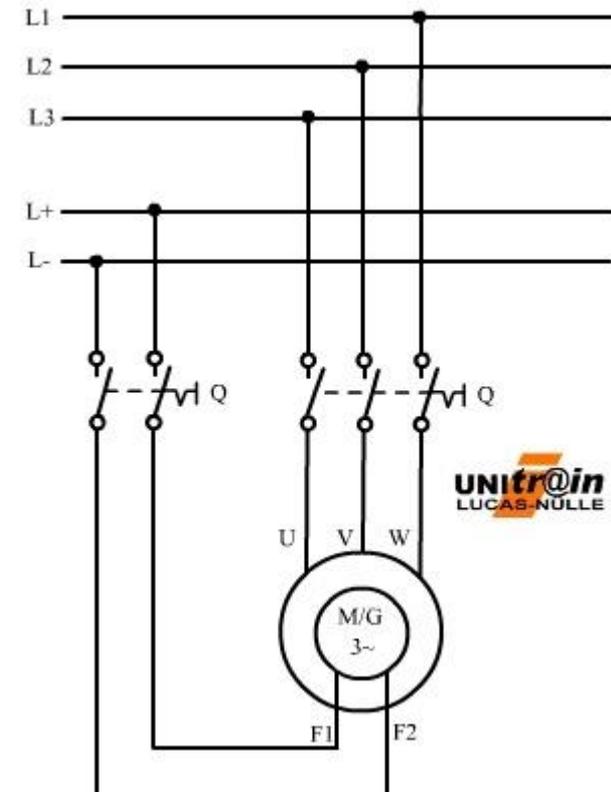
La máquina está constituida por dos devanados independientes:

- a) Un devanado inductor  
→ alimentado por corriente continua.
- b) Un devanado inducido  
→ arrollamiento trifásico.  
→ recorrido por corriente alterna.



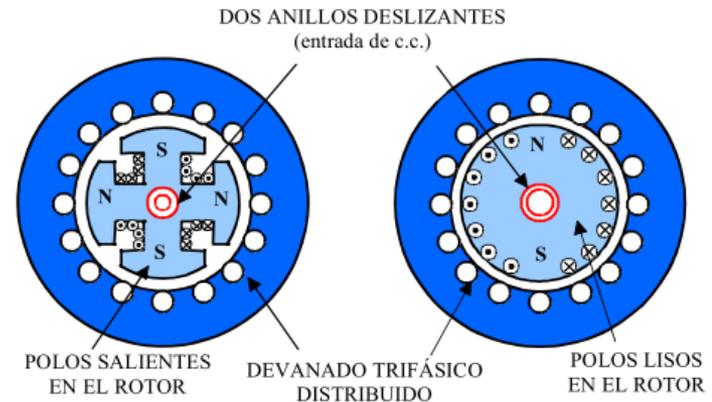
El circuito muestra una aplicación típica de una máquina síncrona en la red.

- Conexiones del devanado del estator U, V, W
- Conexiones del devanado del rotor F1 y F2, a través de los anillos colectores y las escobillas

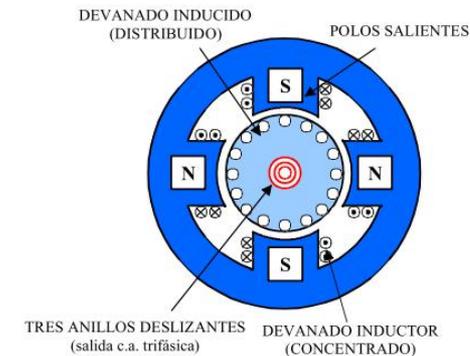


# Aspectos constructivos

El rotor se fabrica en dos versiones:



En máquinas pequeñas (10 kVA) el devanado inductor se coloca en el estator en forma de polos salientes



La razón en la diferencia de elegir un rotor de polos salientes o de polos lisos depende en la velocidad de régimen, que depende de la máquina motriz

# Aspectos constructivos

## Tipo de rotor

### Polos salientes

- Alternador movido por turbina hidráulica (Maq. de gran potencia)
  - Velocidad 100-400 r.p.m. lenta
  - Por lo que necesita 60-15 polos para tener una corriente de 50 Hz
  - Facilita la ventilación
- Rotor de 20 metros de diámetro para máquina de 500 MVA



[http://redinter.com.ar/nuestros\\_trabajos/reparacion.htm](http://redinter.com.ar/nuestros_trabajos/reparacion.htm)

### Polos Lisos

- Alternadores acoplados a motores diesel y a turbinas de vapor.
  - Velocidad 1500-3000 r.p.m. rápida
  - Por lo que necesita 4-2 polos para tener una corriente de 50 Hz
  - Alta fuerza centrífuga
  - Ruido por turbulencias
  - Dificultad para la ventilación
- Alternadores pequeños usan aspas para la ventilación
- Turboalternadores utilizan conductores que son unos tubos de cobre por cuyo interior circula algún refrigerante: agua destilada, aceite o gas, etc.



<http://genermex.net/rehabilitacion-de-rotoros.html>

# Placa de características

Toda máquina eléctrica posee una placa de características adherida a ella, por lo general, en la caja de conexiones. Aquí, junto a los datos de diseño de la máquina, se encuentra información acerca de la denominación de tipo y del fabricante.

1 LN Lucas-Nuelle Lehr- und Meßgeräte GmbH Germany - 50140 Kerpen - Siemensstr. 2			
2 SE2662-3Q	3 VDE 0530	4 IP: 20	5 Is.Kl. :
6 Δ / Y	7 U: 230 / 400V	8 I: 1,14 / 0,66A	9 cos : 0,97
10 Mot. SY	11 0,3 KW	12 f: 50 Hz	13
14 Uerr: 150-V	15 Ierr: 0,95-A	16 Made in Germany	
CA : μF	CB : μF		

Las casillas tienen el siguiente significado:

- 1.Indicación del fabricante
- 2.Denominación del tipo
- 3.Motor de corriente trifásica para conexión, en circuito delta o estrella, a una red de alimentación trifásica
- 4.Motor sincrónico
- 5.Velocidad nominal de giro
- 6.Tensión nominal del devanado de excitación
- 7.Corriente nominal del devanado de excitación
- 8.Lugar de fabricación
- 9.Frecuencia nominal
- 10.El factor de potencia describe la relación entre la potencia activa y la aparente
- 11.Corriente nominal del devanado del estator en circuito delta o estrella
- 12.Clase de aislamiento
- 13.El tipo de protección IP describe la protección contra la penetración de líquidos y cuerpos extraños
- 14.Norma DIN/VDE de acuerdo con la que se ha fabricado el motor
- 15.Tensión nominal del devanado del estator en circuito delta o estrella
- 16.Potencia de la que se dispone en el eje

Tema II: MÁQUINA SÍNCRONA

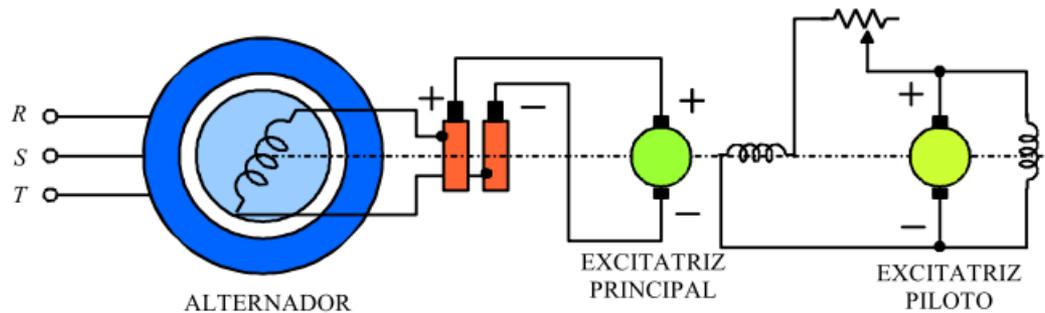
# SISTEMAS DE EXCITACIÓN

# Sistemas de excitación

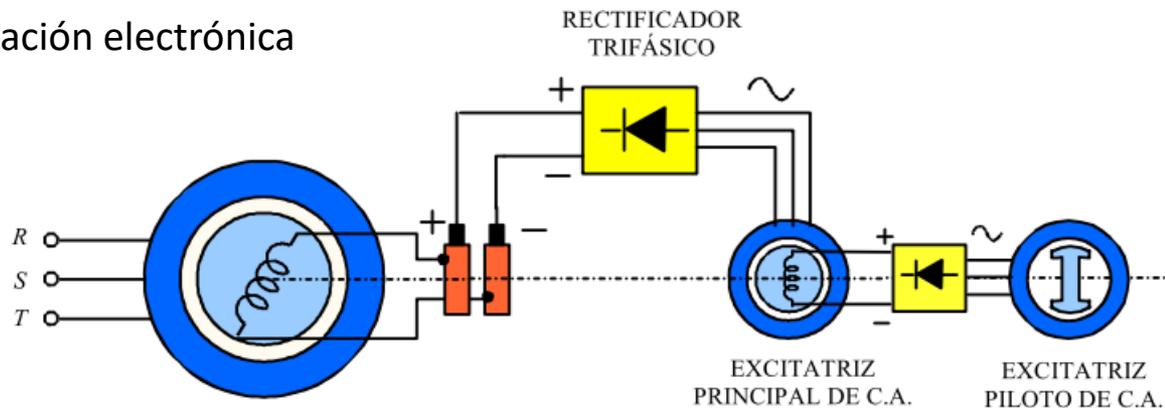
La c.c. procede una dinamo excitatriz (generador de c.c.) del tipo shunt (derivación, devando del inducido e inductor en paralelo) que está montada en el eje del grupo y cuya salida se aplica al rotor del alternador por medio de unos anillos deslizantes con sus correspondientes escobillas.

A veces se sustituye toda o parte de una excitación por una excitatriz piloto con objeto de mejorar la rapidez de respuesta.

Sistema de excitación con dinamo excitatriz



Sistema de excitación electrónica

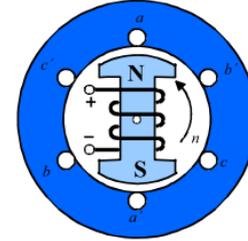


Tema II: MÁQUINA SÍNCRONA

# **PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR SÍNCRONO**

# Principio de funcionamiento de un alternador

Al girar el rotor a la velocidad  $n$ , se inducen f.e.m.s en los arrollamientos de las tres fases del estator, que van desfasadas en el tiempo  $120^\circ$ , que corresponde a la separación espacial (en grados eléctricos) existente entre las bobinas del estator.



Si estando funcionando un alternador en vacío, con una determinada corriente de excitación, se cierra el circuito del inducido conectando una impedancia de carga a sus terminales, se obtiene una tensión  $V$  en bornes de la máquina menor al valor que presentaba en vacío,  $E_o$ .

La reducción en la tensión de salida del generador es debida a la aparición de una corriente en el inducido que provoca una caída de tensión en la impedancia de los arrollamientos del inducido.

La corriente por inducido también produce una f.m.m. que reacciona con la del inductor modificando el flujo del entrehierro de la máquina.

Se define la regulación de tensión de una máquina sincronía como

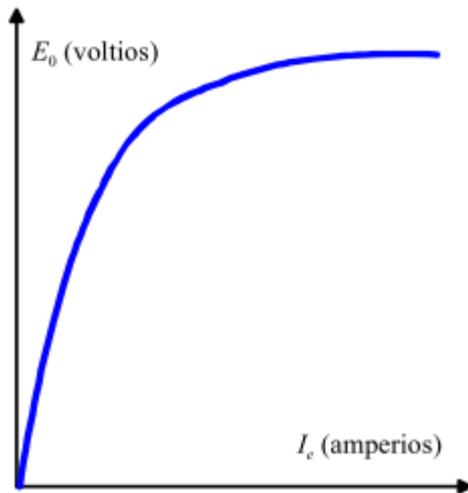
$$\varepsilon = \frac{E_o - V}{V} 100\%$$

que representa el cambio en la tensión de bornes del generador de vacío a plena carga para una determinada excitación en los polos.

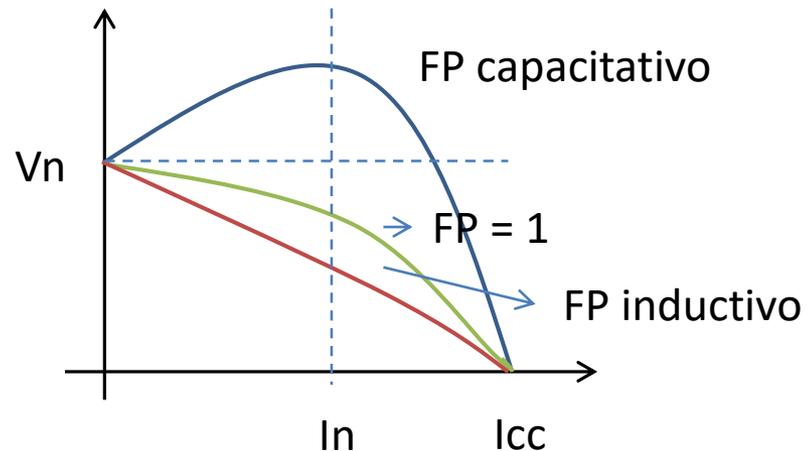
# Principio de funcionamiento de un alternador

La curva que representa la tensión en bornes del alternador en función de la corriente de la carga se denomina característica exterior. La excitación es tal que se obtiene en vacío la tensión asignada en bornes.

Curva en vacío del alternador



Curva en carga del alternador, característica exterior



Si se desea mantener constante la tensión en bornes al variar la corriente del inducido, será necesario variar la corriente de excitación.

Teniendo en cuenta que la f.e.m. generada en el inducido de un alternador es directamente proporcional al valor del flujo magnético del inductor, la regulación de tensión se consigue variando dicho flujo mediante la regulación de intensidad por el devanado inductor, es decir, la intensidad de excitación  $I_e$ .

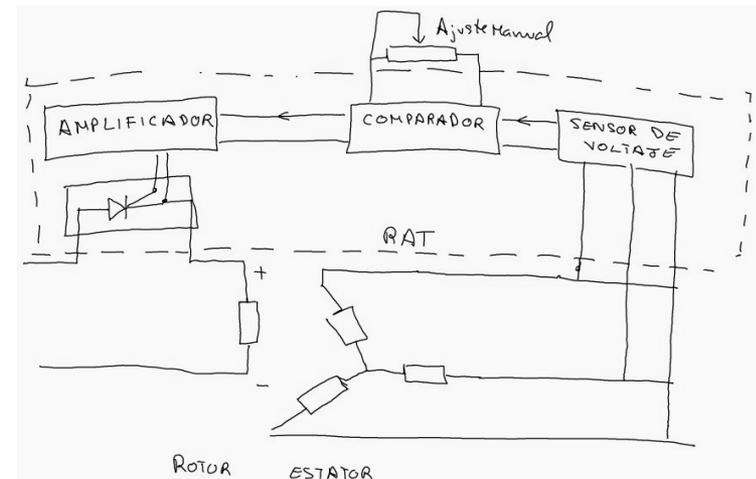
# Principio de funcionamiento de un alternador

El tiempo de respuesta a las variaciones de tensión, que debe ser lo más corta posible, depende del tipo de excitación empleado y puede mejorar sensiblemente con el empleo de reguladores automáticos.

Un sistema de excitación tradicional (RAT) puede tardar más de un segundo en responder a una caída de tensión de 15% ocasionada, por ejemplo, por el arranque de una bomba.

Un regulador automático de tensión permite tener una respuesta más rápida y con una regulación de tensión de salida menores. El diseño de un regulador automático depende mucho del fabricante pero en general consta de los siguientes elementos:

- El comparador, compara la tensión generada con el valor exigido, detectando cualquier diferencia.
- El amplificador, la señal de error producida por el circuito de comparación es amplificada y acondicionada convenientemente para el control de la excitación.
- El elemento de control, que debe ser construido por dispositivos que manejen intensidades del orden de cientos de amperios, como puede ser por ejemplo el tiristor.



# Fuerza electromotriz generada por fase

La f.e.m. producida por un transformador es

$$E = 4.44N\phi_{\max} f$$

siendo N el número de espiras, por lo que la E es la suma sobre todas las espiras de la f.e.m. inducida en cada espira.

En el caso de un alternador, como el bobinado está distribuido a lo largo de la armadura y el rotor, las f.e.m.s no se podrán sumar algebraicamente.

La ecuación que nos da la f.e.m.

$$E = 4.44NK_b K_s \phi_{\max} f = 4.44NK \phi_{\max} f$$

$K_b$  sería el factor de paso para el devanado del rotor (devanado de campo) y el  $K_s$  es el factor de distribución del devanado del estator.

Tema II: MÁQUINA SÍNCRONA

# CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR SÍNCRONO

# Circuito equivalente de un generador síncrono

El voltaje  $E_f$  generado internamente que se produce en cada fase de un alternador, no es, por lo general, el voltaje que aparece en los bornes del mismo ( $V_f$ ). De hecho esto sólo ocurre cuando no hay corriente alguna en el inducido.

Son varios los factores que hace que exista esa diferencia entre  $E_f$  y  $V_f$ :

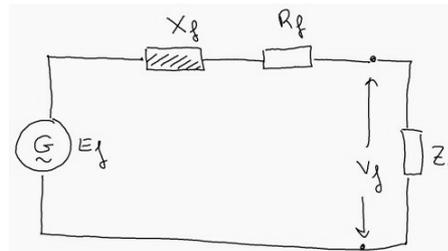
- La distorsión del campo magnético del entrehierro debido a la corriente que fluye en el estator o reacción del inducido.
- La autoinductancia de las bobinas del inducido o
- La resistencia de las bobinas del inducido.

Los efectos de la reacción del inducido y la autoinductancia en la máquina se suelen tomar en consideración de forma conjunta como si formasen una sola reactancia conocida como **reactancia síncrona** ( $X_f$ ).

$$V_f = E_f - I_f(jX_f + R_f)$$

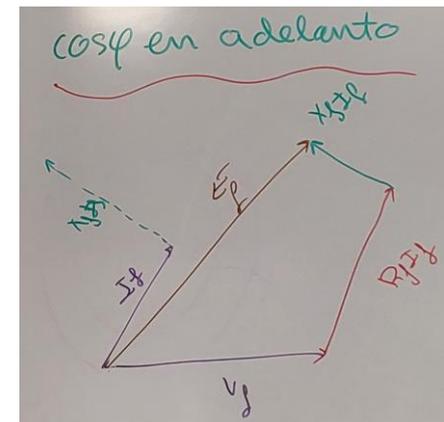
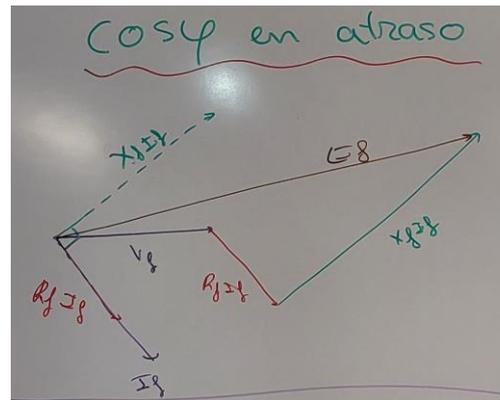
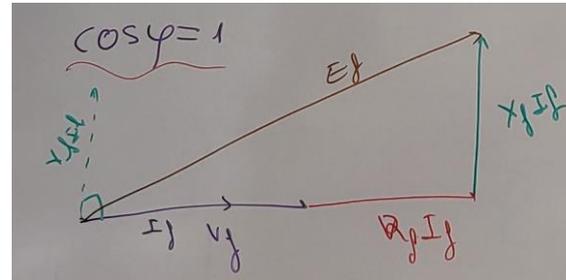
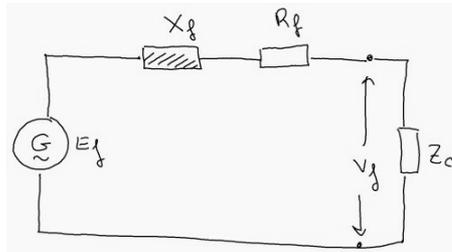
$$V_f = E_f - I_f Z_f$$

Siendo  $Z_f = R_f + jX_f$  la impedancia síncrona de la máquina. Por lo que el circuito equivalente queda dibujado como sigue:



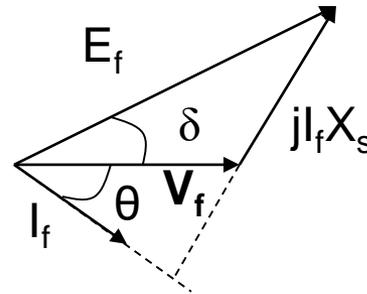
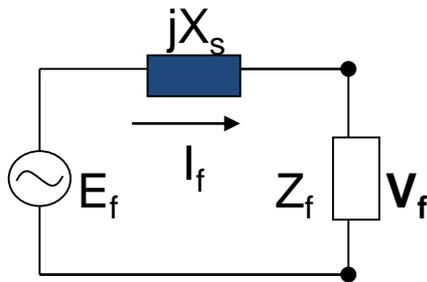
# Circuito equivalente de un generador síncrono

Aplicando la segunda ley de Kirchhoff a dicho circuito y teniendo en cuenta que lo que se maneja son valores alternos, podemos obtener los tres diagramas vectoriales correspondientes al circuito, según el valor y las características del factor de potencia del circuito.



# Circuito equivalente de un generador síncrono

En las máquinas reales la reactancia síncrona es normalmente mucho mayor que la resistencia del bobinado, de forma que en la mayoría de los casos, ésta se desprecia y el circuito equivalente se simplifica.



De este modelo se obtiene una expresión aproximada de la potencia de salida de un generador de rotor liso en función del **ángulo de potencia  $\delta$**  es:

$$P_d = 3V_f I_f \cos \theta$$

$$\bar{V}_f = \bar{E}_f - j\bar{I}_f X_s \Rightarrow \bar{I}_f = \frac{\bar{E}_f - \bar{V}_f}{jX_s} \left\{ \begin{array}{l} \bar{I}_f = \frac{E_f \operatorname{sen} \delta}{X_s} - j \frac{E_f \cos \delta - V_f}{X_s} \\ \bar{E}_f = E_f \cos \delta + jE_f \operatorname{sen} \delta \end{array} \right.$$

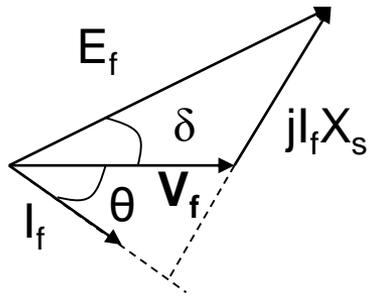
$$\bar{I}_f = I_f \cos \theta - jI_f \operatorname{sen} \theta \quad \rightarrow \quad I_f \cos \theta = \frac{E_f \operatorname{sen} \delta}{X_s}$$

$$P_d = 3V_f I_f \cos \theta \quad \rightarrow \quad P_d = 3V_f \frac{E_f \operatorname{sen} \delta}{X_s} \quad \Rightarrow \quad \boxed{P_d = P_{dm} \operatorname{sen} \delta}$$

En la práctica el ángulo de potencia tiene valores comprendidos entre  $15^\circ$  a  $20^\circ$ .

# Circuito equivalente de un generador síncrono

La potencia reactiva sería



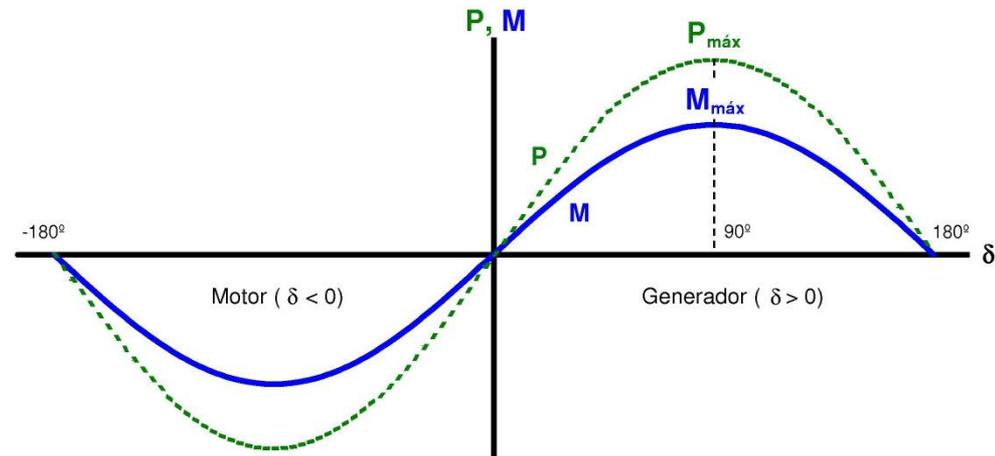
$$Q_d = 3V_f I_f \text{sen}\theta \quad \rightarrow \quad Q_d = 3V_f \frac{E_f \cos \delta - V_f}{X_s} = \frac{3V_f E_f}{X_s} \cos \delta - \frac{3V_f^2}{X_s}$$

$$I_f \text{sen}\theta = \frac{E_f \cos \delta - V_f}{X_s}$$

Donde el primer término es la potencia reactiva total generada internamente en la máquina y el segundo término es la potencia reactiva que la máquina consume para su funcionamiento, por lo que la diferencia es la potencia reactiva que la máquina suministra al exterior.

Se ha de notar que el par también es función del ángulo de potencia, si conectamos el generador a una línea de potencia infinita, la tensión y la frecuencia de alimentación se mantienen constantes y por tanto la velocidad de sincronismos de la máquina.

$$T_d = \frac{P_d}{\omega_1} = \frac{P_{dm}}{\omega_1} \text{sen}\delta = T_{dm} \text{sen}\delta$$

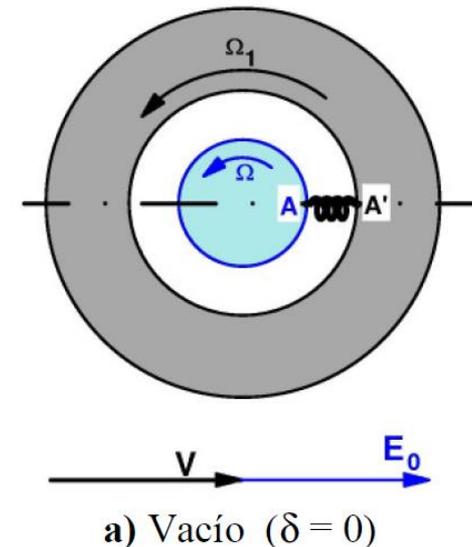


# Analogía mecánica del ángulo de potencia

En los apartados anteriores se ha visto como una máquina síncrona cilíndrica en red de potencia infinita tiene un par que sólo depende del ángulo  $\delta$ . Este ángulo es el que forman los fasores de f.e.m. de vacío  $E_f$  y de tensión en bornes  $V_f$ .

La f.e.m.  $E_f$  es originada por la acción del campo magnético inductor, es decir, por el campo generado por el bobinado del rotor. La tensión  $V_f$  viene impuesta por la red de potencia infinita, la cual también impone la frecuencia  $f$  y la velocidad de sincronismo  $\omega_1$ . Los fasores de ambas magnitudes están alineados cuando el par es nulo (y, en consecuencia,  $\delta = 0$ ). Por lo tanto, el desfase  $\delta$  entre ambos fasores se corresponde con el desfase que físicamente existe entre la posición del rotor en un momento dado con respecto a un punto que gire siempre a la velocidad de sincronismo.

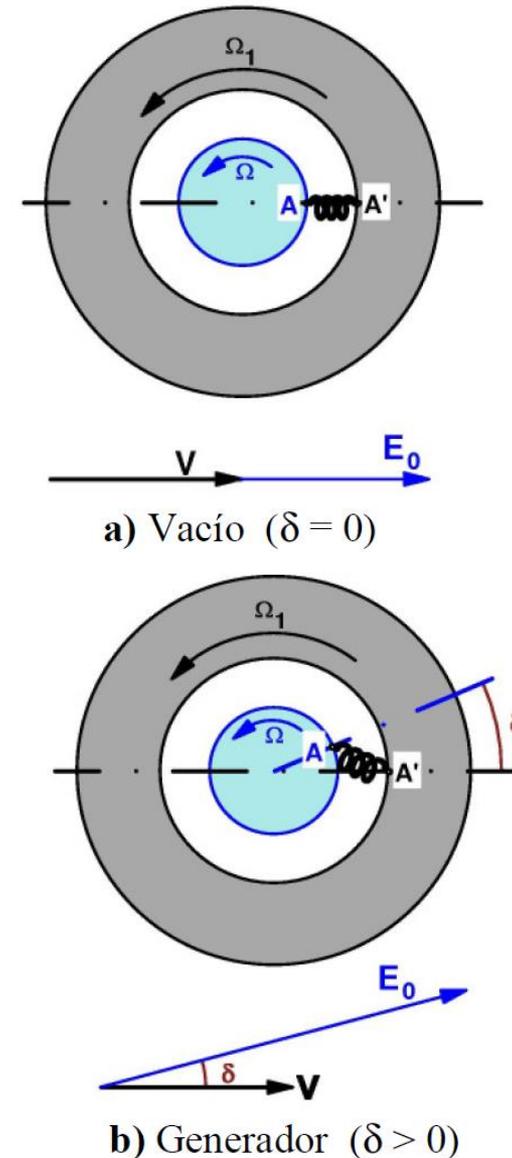
Esto permite establecer una analogía mecánica del par de una máquina síncrona, la cual facilita la comprensión de este fenómeno. Consideremos dos puntos imaginarios en el entrehierro de la máquina. Uno, el A, está fijo al rotor y gira, por tanto, a la velocidad  $\omega$  de la máquina. El otro punto, el A', está en el lado del estator, pero no está inmóvil sino que gira siempre a la velocidad de sincronismo  $\omega_1$ , constante e impuesta por la red de potencia infinita. Ambos puntos se encuentran enfrentados cuando la máquina está en vacío, es decir, cuando el par es nulo y  $\delta = 0$ .



# Analogía mecánica del ángulo de potencia

El efecto del par es equivalente a que entre A y A' hubiera un resorte de forma que no ejerce ninguna fuerza cuando A y A' están enfrentados, pero que comienza a tensarse (y a ejercer fuerza y, por lo tanto, también par) cuando A y A' se separan entre sí. Con la máquina en vacío, ambos puntos giran siempre a igual velocidad ( $\omega = \omega_1$ ) y el resorte no se tensa y no se transmite par entre ambos puntos. Para un observador que estuviera situado en A', girando siempre a la velocidad de sincronismo, el punto A permanecería inmóvil frente a él.

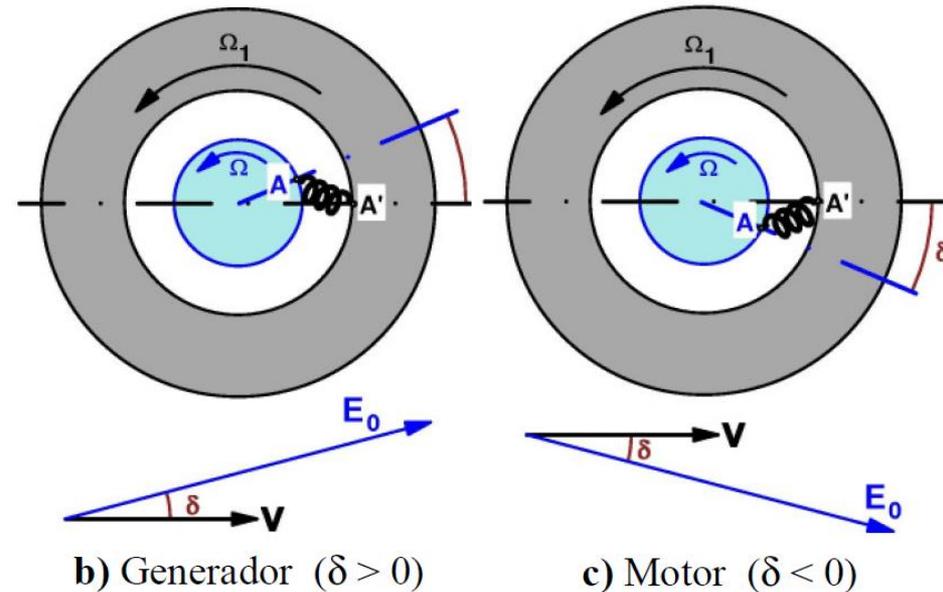
Si, partiendo de esta situación de vacío, el motor que mueve a la máquina síncrona aumenta su par, de momento nos encontramos en una situación de desequilibrio de pares. El par motor aumenta, pero el par de la máquina síncrona todavía es nulo, pues sigue sucediendo que  $d = 0$ . Esto origina que el rotor se acelere ligeramente, aumentando su velocidad y provocando que el punto A se adelante con respecto a A'.



# Analogía mecánica del ángulo de potencia

Por lo tanto, el resorte se tensa hasta que origine un par similar y opuesto al del motor, obligando al rotor a volver a girar a la velocidad de sincronismo. El par se transmite desde el rotor hacia el estator, pues es el punto A el que “tira” de A', y la máquina síncrona empieza a actuar como generador ejerciendo, en consecuencia, un par de frenado opuesto al del motor que la mueve. En la realidad, físicamente aparece este movimiento de adelanto del rotor hasta que el desfase entre los puntos A y A' dé lugar a un ángulo  $\delta$  que origine un par igual y opuesto al del motor. Así, un observador situado sobre A' vería como el punto A se adelanta hasta que el ángulo de par  $\delta$  es el adecuado para contrarrestar el par motor.

De forma análoga, si partiendo de la situación de vacío, se introduce una carga mecánica (por ejemplo, una bomba) en el eje de la máquina síncrona, el rotor se ve sometido a un par de frenado (el de la carga) que reduce su velocidad. Esto provoca que el punto A se retrase con respecto a A' haciendo que la máquina síncrona empiece a funcionar como motor.

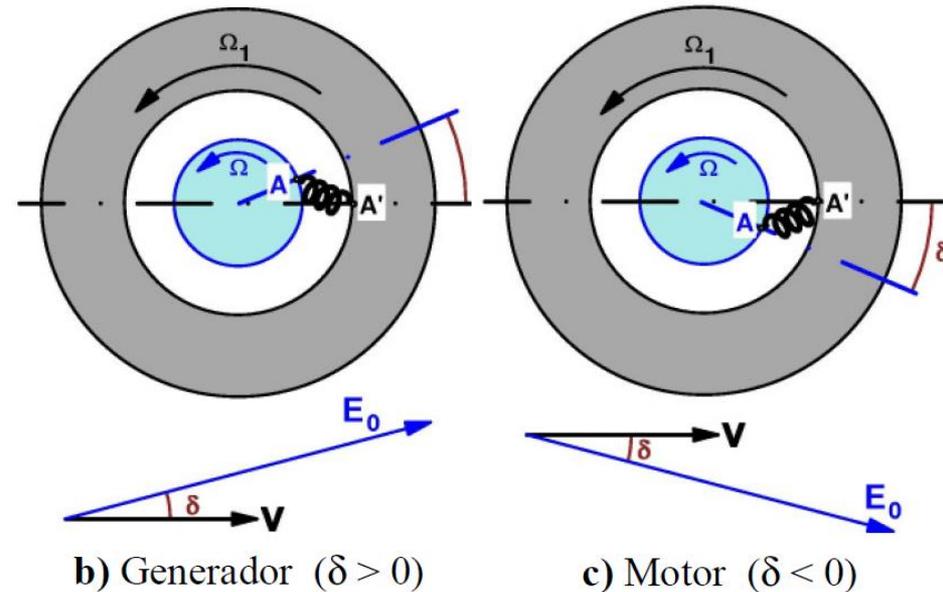


# Analogía mecánica del ángulo de potencia

Ahora el resorte se tensa en sentido contrario, es el punto  $A'$  el que arrastra al  $A$  (par transmitido desde el estator hacia el rotor) para obligar al rotor a que vuelva a girar a la velocidad de sincronismo. Al final el desfase entre  $A$  y  $A'$  será tal que el par debido al resorte equilibre al par de la carga.

Físicamente veríamos este movimiento de retraso del rotor hasta que el desfase entre los puntos  $A$  y  $A'$  dé lugar a un ángulo  $d$  que origine un par motor igual y opuesto al de la carga. Así, un observador situado sobre  $A'$  vería como el punto  $A$  se atrasa hasta que el ángulo de par  $d$  es el adecuado para contrarrestar el par de carga.

Por lo tanto, las variaciones del par repercuten en movimientos del rotor, hacia delante o hacia atrás, superpuestos al movimiento de giro con la velocidad de sincronismo. Es decir, el ángulo de par  $d$  es también el ángulo que físicamente forman entre sí un punto del rotor y otro que girase a la velocidad de sincronismo. En todos estos movimientos la velocidad del rotor  $\omega$  apenas se aparta de la velocidad de sincronismo  $\omega_1$  y, al final, se estabiliza manteniendo un valor constante e igual a  $\omega_1$ .



# Medición de los parámetros del modelo

El circuito equivalente tiene tres cantidades que es necesario obtener para poder describir completamente el comportamiento de un generador síncrono real.

a) La resistencia del inducido se obtiene sometiendo a la máquina a un ensayo de resistencia en c.c., consistente en aplicar un voltaje continuo entre las fases, midiendo la intensidad resultante. Debe tenerse en cuenta, en este caso, que la resistencia de los conductores de gran sección, recorrido por una corriente alterna se ve afectada por el denominado efecto “skin” (de superficie).

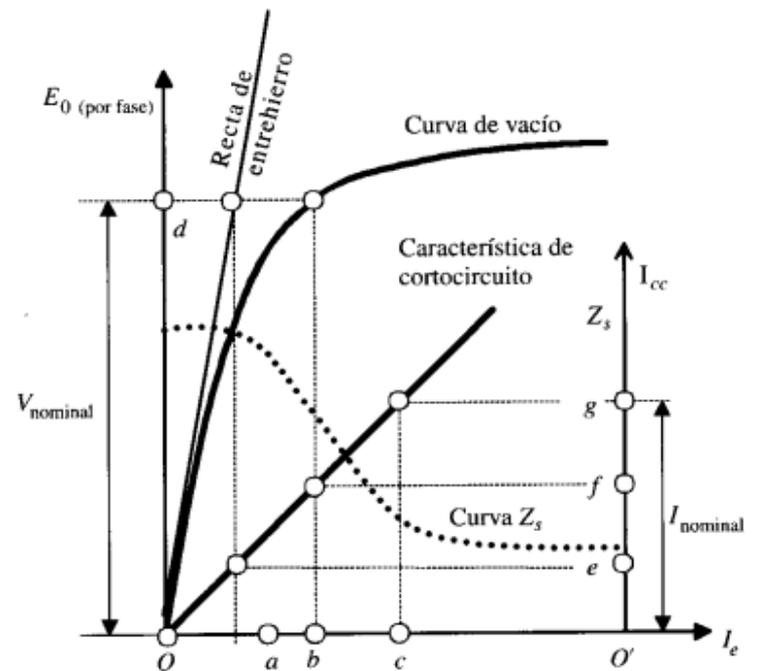
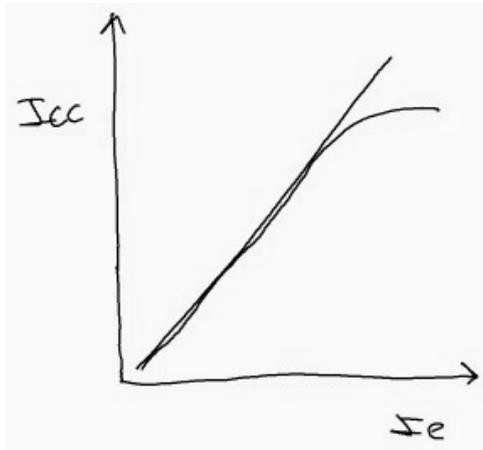
b) La relación entre la corriente de campo  $I_f$  y el flujo  $\Phi$  y por lo tanto entre dicha corriente y  $E_f$ . Para ello se realiza el denominado ensayo en vacío consistente en hacer girar el alternador a su velocidad nominal, desconectando todas las cargas de los terminales y poniendo la corriente de campo a cero. Luego dicha corriente se aumenta paulatinamente midiendo y registrando los correspondientes valores de voltaje. Podemos obtener así la curva característica de vacío.

c) La reactancia sincrónica se obtiene con los datos obtenidos a partir del denominado ensayo en cortocircuito. Dicho ensayo se lleva a cabo cortocircuitando la salida del alternador y haciendo girar a la misma velocidad que la utilizada para el ensayo en vacío; una vez en marcha, se alimenta el sistema inductor de forma gradual hasta alcanzar en el inducido una intensidad dos o tres veces la intensidad nominal. Los valores de intensidad obtenidos se llevan sobre un sistema de ejes cartesianos obteniéndose así la curva o característica de cortocircuito. Podemos obtener, entonces, la impedancia sincrónica  $Z_f$ , para una determinada velocidad de giro y para una intensidad de excitación concreta a partir de

# Medición de los parámetros del modelo

$$Z_f = \frac{E_f}{I_{cc}}$$

Y como  $Z_f = \sqrt{R^2 + X_f^2}$  obtenemos  $X_f = \sqrt{Z_f^2 - R^2}$



**Figura 5.20.** Características de vacío y cortocircuito de un alternador. Cálculo de la impedancia síncrona.

Tema II: MÁQUINA SÍNCRONA

# **ACOPLAMIENTO DE UN ALTERNADOR A LA RED**

# Acoplamiento de un alternador a la red

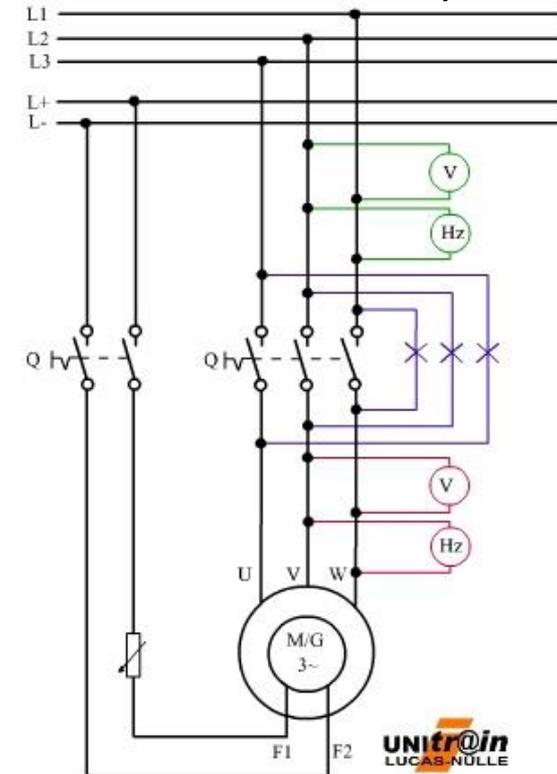
Las diferentes centrales eléctricas se conectan en paralelo, para aumentar el rendimiento y fiabilidad del sistema, por medio de líneas de transporte y distribución.

Al acoplar un alternador a la red se debe cumplir que:

1.- Las secuencias de fases del alternador y la red sean idéntica

2.- La tensión del generador debe tener un valor eficaz igual a la tensión de la red y sus fases deben coincidir.

3.- Las frecuencias de ambas tensiones deben ser iguales.



# Maniobra de acoplamiento

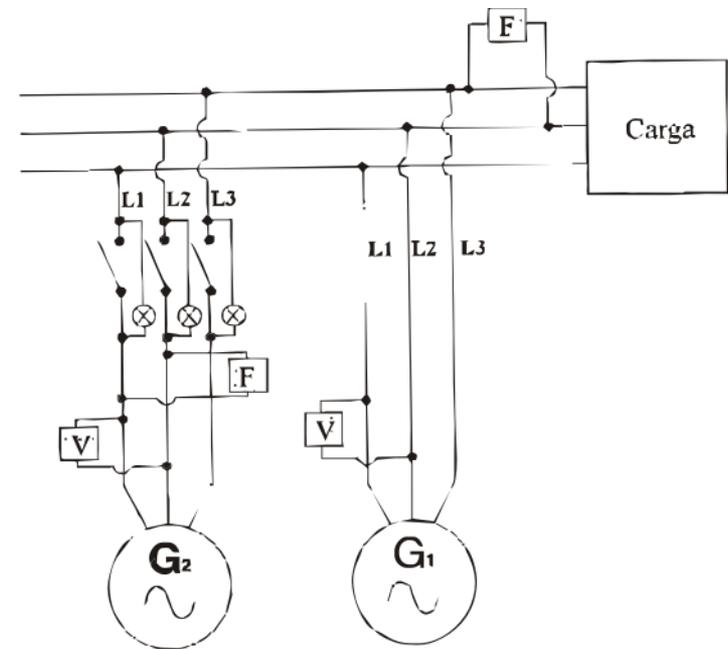
Por lo general esta maniobra se lleva a cabo de forma automática o semiautomática, aunque la maniobra manual es aún algo común. En el caso de semiautomático, el circuito electrónico se encarga de controlar los valores de voltaje, ángulo de fase y frecuencia del generador entrante, en relación con los respectivos valores del generador ya en funcionamiento, mientras que el operador se encarga de cerrar el interruptor cuando se den las condiciones para ello.

Supongamos un generador G1 que se encuentra en servicio y que queremos acoplar el generador G2. Para ello se debe seguir el siguiente proceso:

1- Se pone en marcha el motor o turbina que acciona el generador G2 y seguidamente se maniobra sobre el regulador de velocidad hasta conseguir que ésta sea lo más aproximada posible a la correspondiente a la frecuencia de G1. Para comprobarlo se observa el frecuencímetro conectado a los bornes de G2.

2- Se regula la corriente de excitación hasta obtener en bornes del generador entrante G2 una tensión ligeramente superior a la de G1.

3- Se comprueba la secuencia de fases. Para ello se suelen utilizar dos métodos:



# Maniobra de acoplamiento

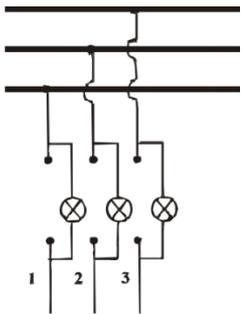
- a) Se conecta un pequeño motor de inducción alternativamente en los terminales de las barras (generador en servicio) y en los del generador entrante; si dicho motor gira en el mismo sentido en ambos casos, es que la secuencia de fases en uno y otro alternador es la misma.
- b) El segundo método es conocido como de las lámparas. Consiste en conectar una lámpara entre cada dos polos del interruptor tripolar que conecta el generador entrante con las barras.

Si el alternador que se pone en servicio está debidamente conectado, el brillo de las tres lámparas aumentará o disminuirá simultáneamente. Si el aumento o disminución se produce sucesivamente, quiere decir que la rotación de las fases del alternador es opuesta a la de las barras, de manera que debe cambiarse la conexión de dos terminales del alternador.

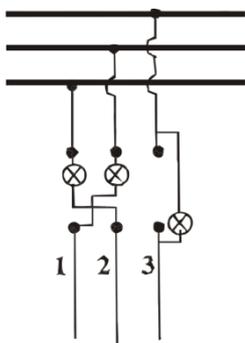
4- Se comprueba de nuevo que existe igualdad de frecuencias entre el generador entrante y las barras. Si hubiese diferencia, ajustaremos la frecuencia variando la velocidad del motor primario.

5- Una vez ajustadas las frecuencias, se procederá a ajustar las fases. Para ello se recurre a unos dispositivos denominados sincronoscopios. Se da este nombre a todo aparato destinado a señalar cuando un alternador funciona en sincronismo de acuerdo con las características de la corriente de la red a la que se quiere acoplar en paralelo. Los sincronoscopios más sencillos son los formados por lámparas cuya forma de colocación puede verse en el siguiente esquema.

# Maniobra de acoplamiento



Su funcionamiento es el siguiente: Las lámparas oscilan con una frecuencia igual a la diferencia entre las frecuencias del alternador entrante y la de las barras. Cuando la frecuencia del alternador se aproxima a la de las barras, la oscilación se amortigua más y más. Cuando se apagan las lámparas la diferencia de potencial entre las barras y el generador entrante es cero. Este sistema tiene una desventaja, las lámparas están apagadas aun cuando exista una sensible diferencia de potencial entre sus terminales, por lo que podrá acoplarse los alternadores con esa diferencia de tensión. Las dificultades anteriores pueden eliminarse si se cruzan las conexiones de dos de las lámparas.



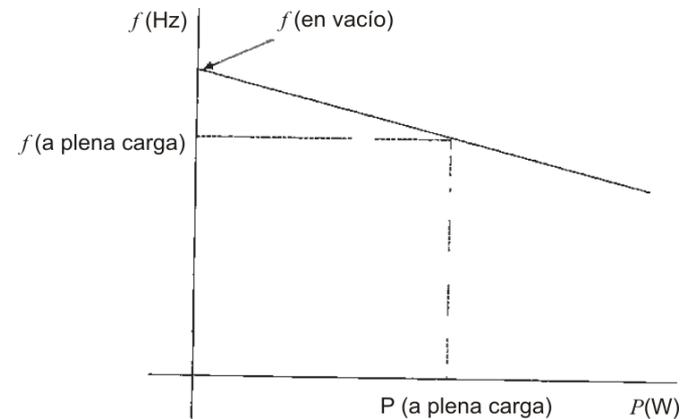
Si el alternador entrante y las barras están en sincronismo, la 1 y la 2 brillarán y la 3 estará apagada. Cuando se aproxima la sincronización, una de las dos lámparas encendidas aumenta de brillo y la otra disminuye, por lo que con este sistema es posible determinar con mayor precisión el momento en que debe cerrarse el interruptor.

Sin embargo, es muy utilizado el sincronoscopio de aguja o el digital que sincroniza automáticamente el generador a la red.

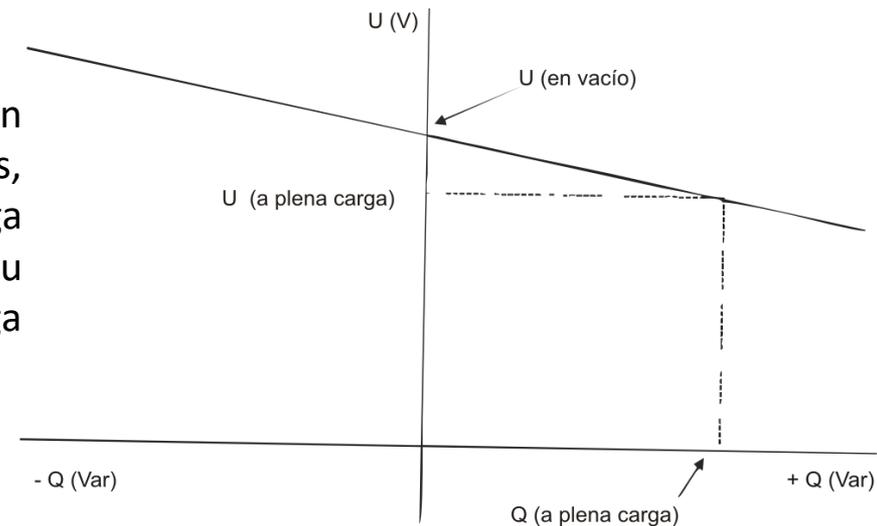


# Características de frecuencia del generador y del voltaje-potencia reactiva de un generador síncrono

Todos los generadores son accionados por un motor primario que constituye la fuente mecánica del mismo. Prescindiendo del tipo de generador (diesel, turbina, etc.) todos los motores primarios tienden a comportarse de forma similar: mientras la potencia que entregan aumenta, disminuye su velocidad de giro. Puesto que la velocidad del eje está directamente relacionada con la frecuencia de la corriente resultante, la potencia de salida de un alternador estará directamente relacionada con su frecuencia. En la siguiente gráfica se ve la relación de frecuencia con la potencia.



Una gráfica similar puede obtenerse para la relación entre potencia reactiva  $Q$  y la tensión en bornes, teniendo en cuenta que cuando se conecta carga inductiva (positiva) a un alternador, disminuye su tensión en bornes, mientras que si se añade carga capacitativa (negativa) aumenta dicha tensión.



**Ambas curvas desempeñan un importante papel en el funcionamiento en paralelo de dos alternadores.**

# Reparto de cargas entre dos generadores de igual tamaño

El funcionamiento en paralelo de dos o más alternadores se puede estudiar desde dos puntos de vista:

- a) Acoplamiento en paralelo de dos o más alternadores a un sistema de barras de potencia infinita.
- b) Acoplamiento en paralelo de un generador a un sistema de barras de potencia similar.

En el caso a), la potencia de la red es muy grande siendo la tensión y la frecuencia de la red constante, no viéndose afectada por el acoplamiento del generador entrante. Desde el punto de vista de análisis de circuitos, una red de potencia infinita es una fuente de tensión ideal (impedancia interna nula) la cual mantiene la pulsación y el valor de tensión independientemente de la corriente. Una máquina síncrona conectada a una red de potencia infinita tiene por tanto la tensión en bornes constante, fijada por la de la red, independientemente de la corriente que suministre.

En el caso b), los alternadores suelen ser de tamaño similar y las maniobras de acoplamiento afectan a las condiciones y características terminales de todas las máquinas. Estudiamos este caso con más detalle.

Supongamos dos generadores G1 y G2 acoplados en paralelo.

Se debe cumplir que la suma de las potencias activa y reactiva que entregan los dos alternadores debe ser igual a las P y Q exigidas por la carga conectada al sistema

$$P_{G1} + P_{G2} = P_{c \text{ arg } a}$$

$$Q_{G1} + Q_{G2} = Q_{c \text{ arg } a}$$

# Reparto de cargas entre dos generadores de igual tamaño

La característica potencia-frecuencia de este sistema, inmediatamente después de haberse conectado G2 puede verse en la siguiente gráfica.

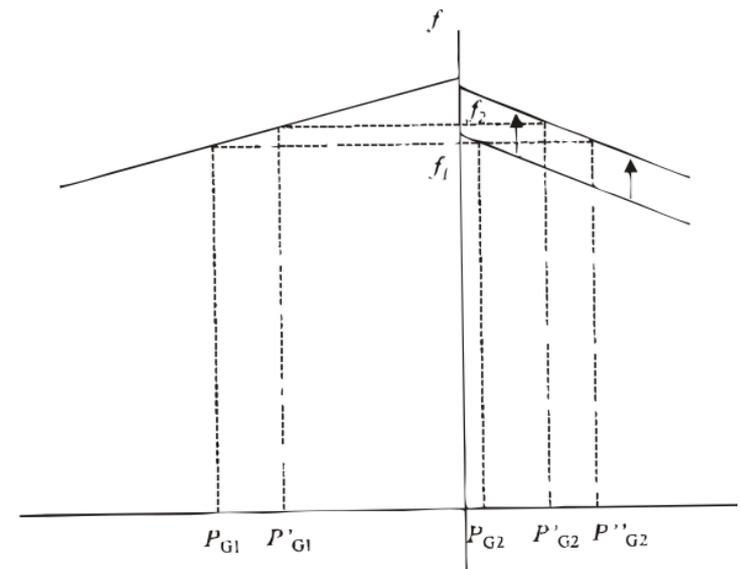
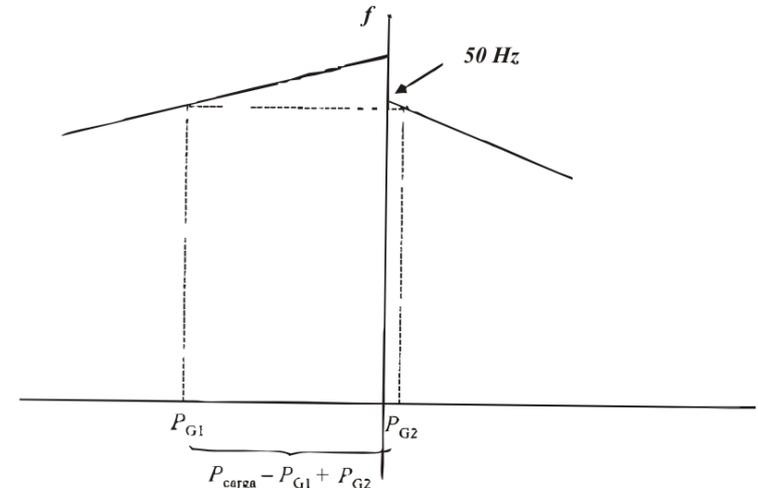
En estas condiciones, ¿qué ocurriría si aumentamos la velocidad de giro del motor primario del generador G2? En este caso, la correspondiente curva potencia-frecuencia se desplaza hacia arriba, como se ve en la figura.

En estas condiciones, a la frecuencia original  $f_1$ , la suma de la potencia de G1 y G2 sería mayor que la demanda por la carga:

$$P_{G1} + P_{G2}'' > P_{carga}$$

Pues bien, teniendo en cuenta que tal suposición no puede cumplirse, pues la suma de las dos potencias tiene que ser, necesariamente, igual a la potencia de carga, habrá que buscar sobre las dos curvas una nueva frecuencia, común a ambos generadores, para la que se cumpla que la suma de las nuevas potencias sea igual a la potencia de la carga.

$$P_{G1}' + P_{G2}' = P_{carga}$$

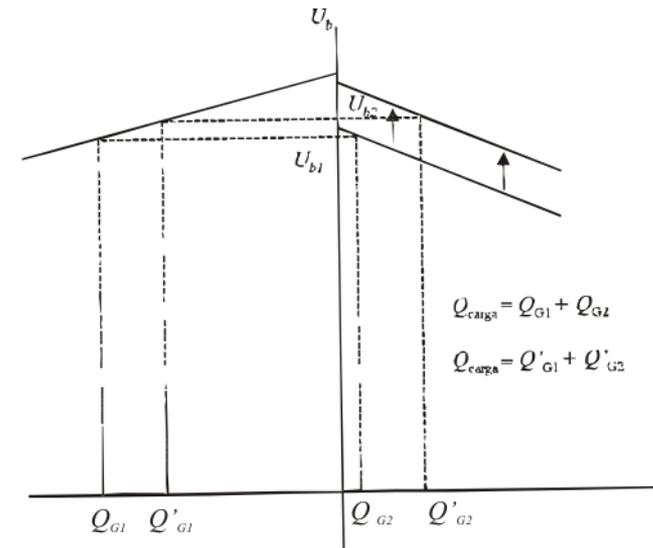


# Reparto de cargas entre dos generadores de igual tamaño

Por tanto, cuando dos generadores están trabajando en paralelo si aumentamos la velocidad de giro de uno de ellos:

- Aumentará la frecuencia del sistema.
- Aumentará la potencia que entrega dicho generador, mientras que se reduce la suministrada por el otro.

Por otro lado, ¿qué sucederá si aumentamos la corriente de excitación del generador G2?



Cuando dos alternadores están trabajando en paralelo y aumentamos la corriente de excitación de uno de ellos:

- La tensión en bornes del sistema aumenta.
- La potencia reactiva  $Q$  entregada por tal generador aumenta, mientras que disminuye la entregada por el otro.

En la práctica para **repartir la potencia activa** sin tener que aumentar la frecuencia del sistema, actuaremos aumentando las r.p.m. del motor primario de un generador y, simultáneamente, disminuirémos las del otro.

Para **repartir la potencia reactiva** sin variar la tensión del sistema tendremos que aumentar la corriente de excitación de un generador y de forma simultánea disminuir la del otro

Tema II: MÁQUINA SÍNCRONA

# ESTABILIDAD ESTÁTICA

# Estabilidad estática

Consideremos una máquina síncrona cilíndrica de resistencia de estator  $R$  despreciable e intensidad de excitación  $I_e$  y reactancia síncrona  $X_s$  constantes que está funcionando como generador acoplada a una red de potencia infinita.

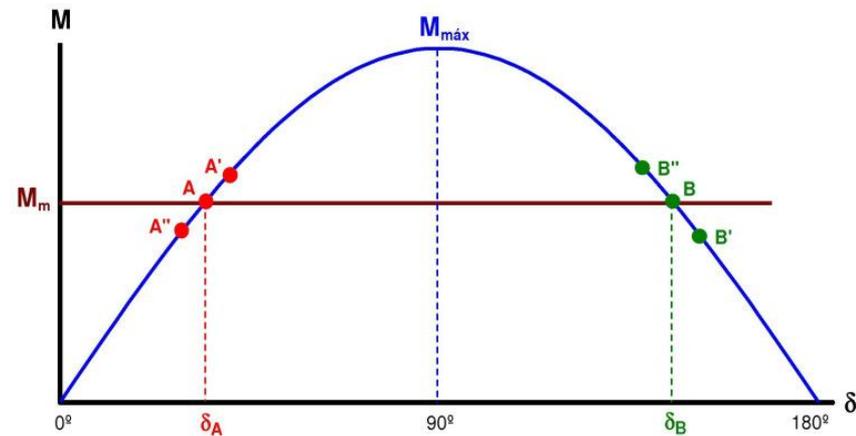
En estas condiciones la curva de par de esta máquina, restringida a la zona de funcionamiento como generador, es la representada en la siguiente figura.

Si el motor de accionamiento está proporcionando un par constante  $M_m$ , la máquina en régimen permanente puede estar funcionando en dos puntos, A y B, de la curva de par. Vamos a estudiar la estabilidad de la máquina en ambos puntos.

Evidentemente, se cumplirá que los ángulos de par  $\delta_A$  y  $\delta_B$  verifican que

$$M_m = M_A = M_{\max} \operatorname{sen} \delta_A$$

$$M_m = M_B = M_{\max} \operatorname{sen} \delta_B$$



# Estabilidad estática

Supongamos que la máquina funciona en el punto A, con el ángulo de par  $\delta A$ , y se produce una pequeña perturbación transitoria (por ejemplo, un aumento transitorio del par motor) que provoca un ligero aumento del par, con lo cual el ángulo de par pasa a ser  $\delta A'$ . La máquina síncrona pasa, entonces, a colocarse en el punto A'. En cuanto cese esta perturbación, el par motor vuelve a ser  $M_m$  pero la inercia mecánica de la máquina impide que el ángulo de par vuelva instantáneamente a valer  $\delta A$  (recordemos que las variaciones del ángulo de par repercuten en movimientos reales del rotor que se suman al giro a la velocidad de sincronismo). La máquina se encuentra, pues, en un estado de desequilibrio de pares: el par motor es  $M_m = M_A$ , pero el par de la máquina es mayor, pues es el que corresponde al punto A'. La máquina síncrona está actuando como generador, lo que significa que ejerce un par de frenado. Luego, tenemos un par de frenado,  $M_A'$ , superior al par motor,  $M_A$ , por lo que la máquina reduce entonces su velocidad. Esto, como se vio al estudiar la analogía mecánica del par, provoca que el ángulo de par vaya disminuyendo hasta que, al final, acabe valiendo  $\delta A$  y se alcancen otra vez el punto de equilibrio A y la velocidad de sincronismo  $\omega_1$ .

Si la perturbación transitoria desde el punto A produjo una disminución del par, la máquina pasará al punto A'', cuyo ángulo de par es  $\delta A''$ . Al desaparecer la perturbación el par motor sigue siendo  $M_m = M_A$ , pero el par de la máquina es inferior (es  $M_A''$ ). Luego, el par motor es mayor que el par de frenado y la máquina aumentará su velocidad. Esto hace que el ángulo de par aumente hasta que vuelva a valer  $\delta A$  y se alcancen otra vez el punto de equilibrio A y la velocidad de sincronismo  $\omega_1$ .

En resumen, aunque aparezcan perturbaciones transitorias que desvíen, tanto en sentido positivo como negativo, el ángulo de par con respecto al punto de equilibrio inicial A; la máquina vuelve a recuperar el equilibrio en el punto A. Por lo tanto, el punto A es un punto de funcionamiento estable del generador síncrono.

# Estabilidad estática

Supongamos que ahora la máquina se encuentra inicialmente en el punto de equilibrio B y que se produce una pequeña perturbación transitoria que provoca una ligera disminución del par con lo que el ángulo del par pasa a ser  $\delta B'$ . La máquina síncrona se coloca, entonces, en el punto B'. En el momento de desaparecer la perturbación el par motor sigue siendo  $M_m = M_B$ , pero el par de la máquina es inferior (es  $M_{B'}$ ). Luego, el par motor es mayor que el par de frenado y la máquina aumentará su velocidad. Esto hace que el ángulo de par aumente, separándose cada vez más de  $\delta B$  hasta que la máquina pierda el sincronismo con la red.

Si la perturbación transitoria desde el punto B produjo un aumento del par, la máquina pasará al punto B'', cuyo ángulo de par es  $\delta B''$ . Al desaparecer la perturbación el par motor sigue siendo  $M_m = M_B$ , pero el par de la máquina es mayor (es  $M_{B''}$  correspondiente a  $\delta B''$ ). Luego, el par motor es inferior que el par de frenado y la máquina reducirá su velocidad. Esto hace que el ángulo de par disminuya, alejándose cada vez más de  $\delta B$  hasta que alcance un nuevo equilibrio en el punto A.

En resumen, si aparecen perturbaciones transitorias que desvíen, tanto en sentido positivo como negativo, el ángulo de par con respecto al punto de equilibrio inicial B; la máquina es incapaz de recuperar el equilibrio en el punto B. Por lo tanto, el punto B es un punto de funcionamiento inestable del generador síncrono. Se deduce, entonces, que los puntos de funcionamiento del generador síncrono cuyos ángulos de par  $\delta$  estén comprendidos entre 0 y  $90^\circ$  son estables, mientras que si están comprendidos entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$  son inestables. Luego, el ángulo de par  $\delta = 90^\circ$  es el límite de estabilidad estática. En el punto de equilibrio estable A, la máquina recupera el equilibrio porque al apartarla de A aparece una diferencia de pares entre el generador síncrono y el motor que obliga al sistema al volver al punto de equilibrio A. Esta diferencia de pares se denomina par sincronizante  $M_s$ .

En esta explicación no se ha tenido en cuenta la energía cinética que el sistema acumula cuando se aparta del punto de equilibrio inicial A, la cual origina que la vuelta al punto de equilibrio no se realice directamente. Se producen una serie de oscilaciones -superpuestas al movimiento de giro con la velocidad de sincronismo- alrededor de A hasta que, finalmente, la máquina se estabiliza en dicho punto. Este fenómeno hace que el estudio de la estabilidad sea algo más complicado, lo que se tratará al estudiar las oscilaciones pendulares y la estabilidad dinámica.

Tema II: MÁQUINA SÍNCRONA

# MOTOR SÍNCRONO

# Introducción: Motor síncrono

Durante largo tiempo, los motores sincrónicos presentaron el problema de que no podían arrancar por sí mismos en la red. Es por esto que, en comparación con los motores asíncronos, su importancia es notoriamente menor. No obstante, las máquinas sincrónicas se hicieron presentes cuando era necesaria una velocidad de giro constante e independiente de la carga, como es el caso de los motores generadores y los compresores de émbolo.

Esta desventaja desaparece debido a los modernos convertidores de frecuencia, puesto que éstos, con un par pleno, pueden llegar a la velocidad de régimen a partir del estado de reposo, por medio de la variación de la frecuencia. En especial, como máquinas sincrónicas de excitación permanente, no necesitan potencia de excitación y no tienen pérdidas de rotor, por lo que, actualmente, son las máquinas con más alta densidad de potencia y las que prestan el más alto rendimiento. Por tanto, presentan la más alta tasa de crecimiento dentro de los accionamientos alimentados por convertidores de frecuencia.

Las máquinas sincrónicas aparecen en gran número entre las máquinas pequeñas y las micromáquinas, como por ejemplo en los relojes y en los tocadiscos.



# Funcionamiento del motor síncrono

Se conecta el estator a una red trifásica, se creará un campo giratorio y si alimenta el rotor a c.c., se creará un campo que se alineará con el anterior, siendo el rotor arrastrado por el campo giratorio.

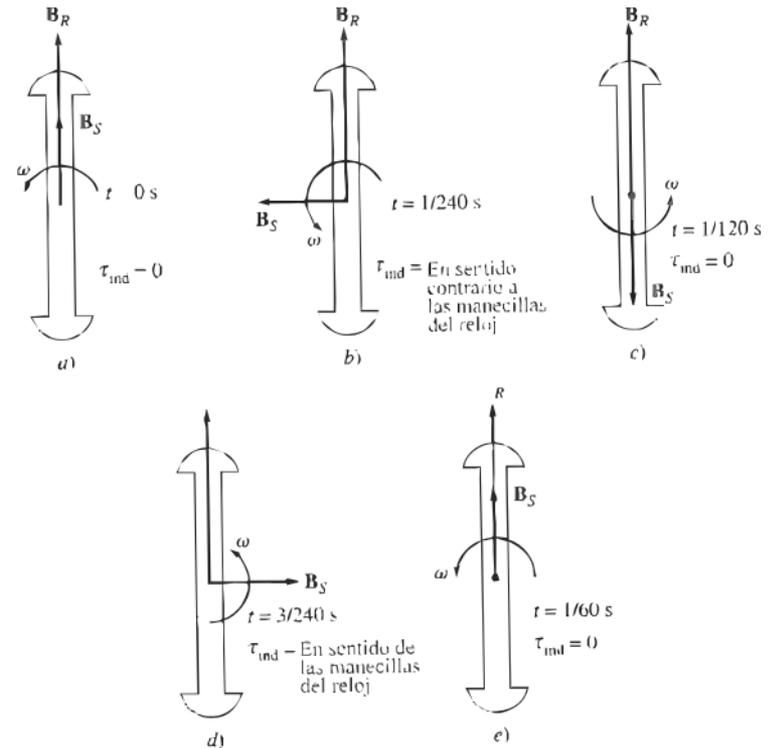
Son dos las diferencias con el motor asíncrono:

a) La velocidad de giro del motor síncrono es cte., independiente de la carga

$$n=60f/p$$

b) Su factor de potencia puede ser variado por el usuario pudiendo pasar de un f.d.p. inductivo a uno capacitativo.

El motor síncrono presenta un grave inconveniente. Si el rotor está en reposo o gira a otra velocidad distinta a la de sincronismo, el par medio que desarrolla al conectarlo a la red es nulo.



Durante un ciclo eléctrico el par está en sentido contrario al del reloj y luego en el mismo sentido por tanto el par promedio de un ciclo completo es cero. En este caso el motor vibra fuertemente con cada ciclo eléctrico y finalmente se calienta.

# Arranque de los motores síncronos

## 1) Arranque a frecuencia reducida:

Reducir la velocidad del campo magnético del estator hasta un valor suficientemente bajo como para que el rotor se pueda acelerar y enganchar con él durante medio ciclo de rotación del campo magnético. Esto se puede hacer reduciendo la frecuencia de la potencia eléctrica.

Al reducir la frecuencia se produce una reducción proporcional de la f.c.e.m. inducida en el estator ( $E_g = k\Phi f$ ) por lo que hay que reducir la tensión aplicada para no tener unos valores de corriente excesivos.

Esto es posible con un cicloconvertidor, que permite variar la frecuencia y el voltaje de una red de c.a.

## 2) Arranque con motor auxiliar

Usar un motor primario externo para acelerar el motor sincrónico hasta la velocidad de sincronismo, seguir el procedimiento para ponerlo en paralelo y poner la máquina en línea como un generador. Luego al apagar o desconectar el motor primario harán de la máquina síncrona un motor.

## 3) Arranque con jaula de ardilla parcial. Es el más usado

- Colocar en las caras polares del rotor, unos conductores gruesos de aluminio cortocircuitados en cada polo, formando una jaula de ardilla parcial como un rotor de inducción.
- En el arranque, no se conecta la c.c. y deja que el rotor arranque como un rotor de inducción en vacío.
- Una vez alcanzada una velocidad próxima a la síncrona se conecta la corriente continua y los campos quedan alineados.

El acoplamiento entre dos campos magnéticos es un acoplamiento elástico.

Si hay una variación en la carga produce movimiento oscilatorio muy perjudicial por lo que en ese caso la jaula de ardilla actúa como amortiguador, pues las oscilaciones que se produzca una corriente en ellas y tenderá a crear un movimiento que se opone (ley Lenz).

# Ejemplo de un sistema de arranque automático y operación

## UNITROL® 6080 - Soluciones flexibles comprobadas

UNITROL 6000 es la última generación de sistemas de excitación indirectos (AVR) y estáticos (SES) de ABB. Su versión más pequeña, UNITROL 6080, es una solución compacta y rentable que brinda plenas funcionalidades. Ofrece control eficaz, operación fácil, monitoreo y mantenimiento del sistema.

Funciones de limitación y protección facilitan el mantenimiento del sistema dentro de un rango seguro e incrementa la confiabilidad.

### Características principales de UNITROL® sistemas de excitación para motores

- Control de voltaje de motores por lazo cerrado de alto rendimiento
- Compensación de potencia reactiva
- Secuencia de arranque automático luego del cierre del disyuntor del circuito del motor
- Operación de motor estático suave dinámica y estable
- Soporte de estabilidad de voltaje
- Funciones integradas y extensivas de protección, limitación y monitoreo para la operación segura y la protección del motor
- Terminal de control de excitación potente (como aplicación de ordenador o integrada de forma opcional) para tiempos de puesta en servicio y de mantenimiento breves
- Estandarizado para obtener eficiencia económica y tiempo de elaboración más rápido
- Control auxiliar de motor integrado (opcional)

**ABB**



UNITROL® 6080 monocal 820A sistemas de excitación para motores

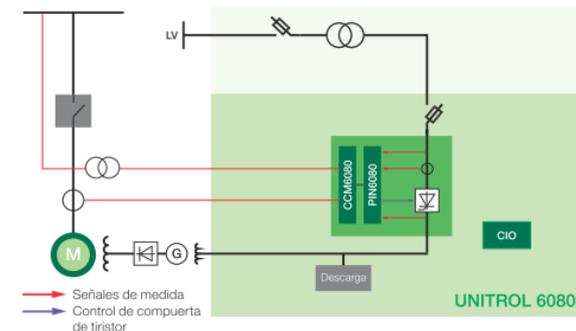


Diagrama eléctrico lineal para excitación de motor indirecta

***Ingeteam***

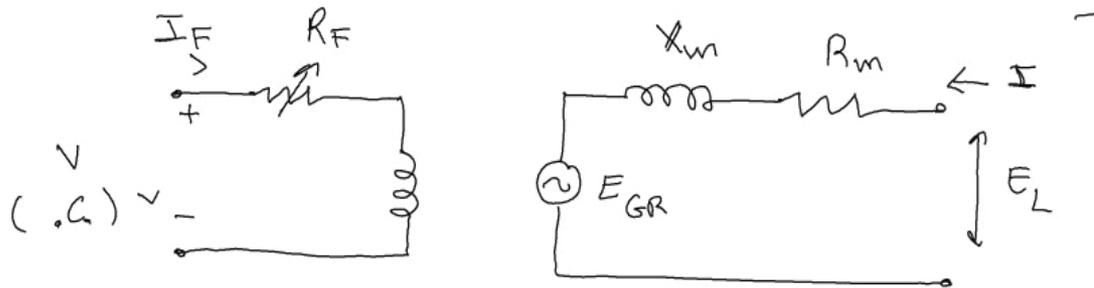
<http://www.ingeteam.com/es-es/inicio.aspx>

# Circuito equivalente

El circuito equivalente de un motor síncrono es similar al de un alternador, con la diferencia de que lo que en aquél era una f.e.m., en este caso es una fuerza contraelectromotriz.

Siendo la ecuación del circuito equivalente

$$V_f = E_f + I_f \cdot Z_f$$



$E_L$  = tensión de fase

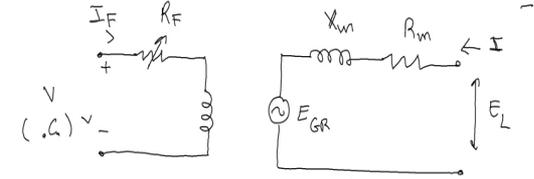
$E_{GR}$  = f. c. e. m

$R_m$  y  $X_m$  = Resistencia y reactancia sincrónica

$I$  = Intensidad de la línea por fase

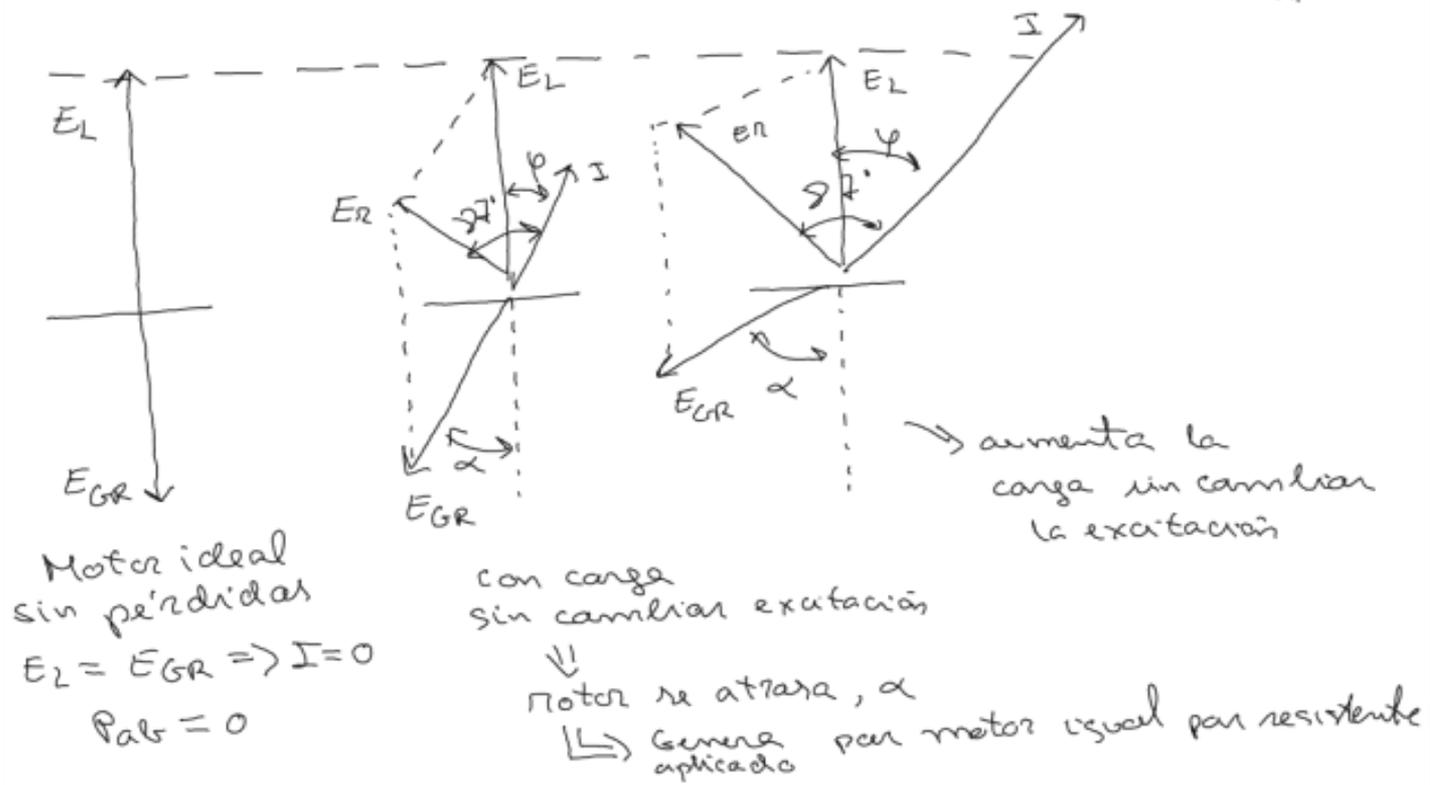
# Diagrama fasorial

Diagrama vectorial será:

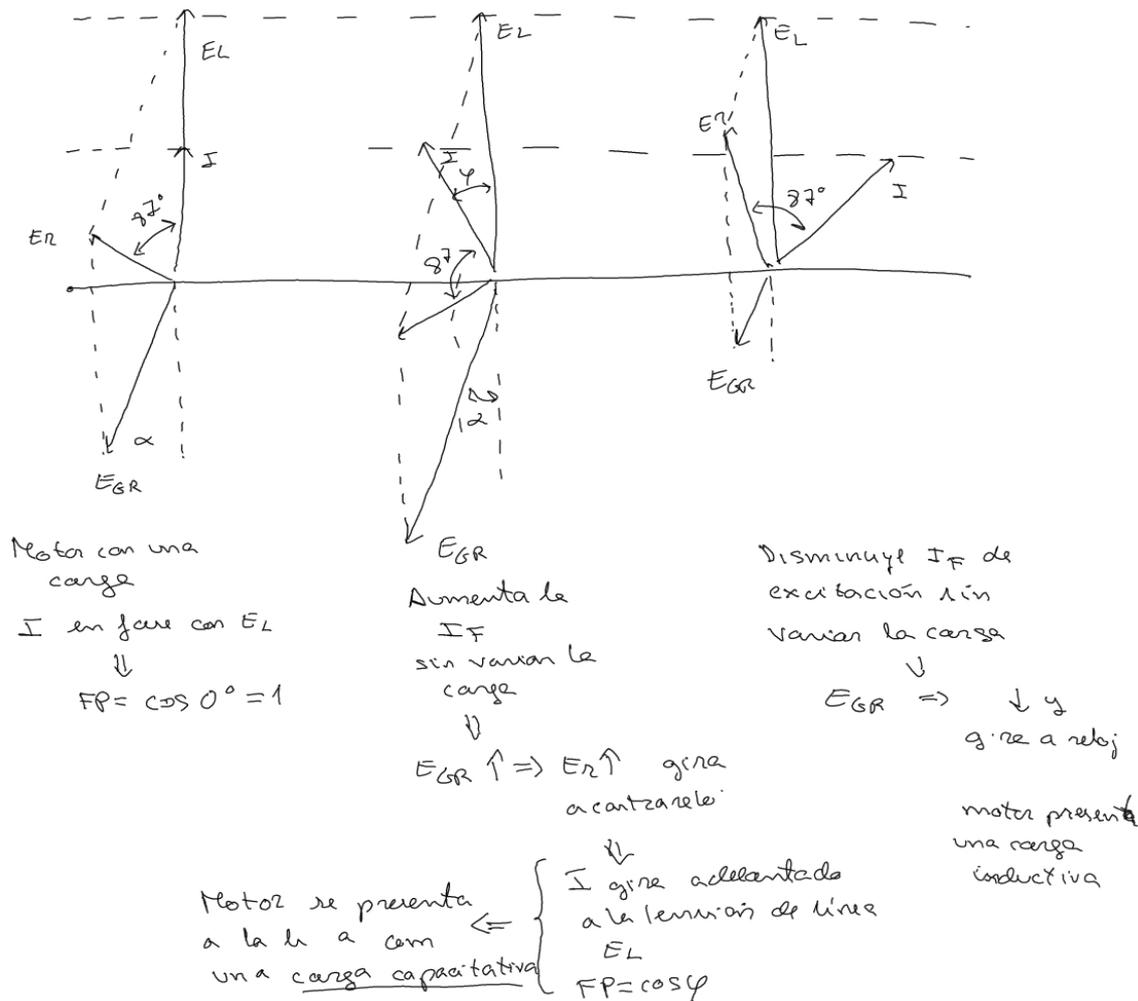


$$\bar{E}_L \neq \bar{E}_{GR} \Rightarrow \bar{E}_R \Rightarrow I = \frac{E_R}{R_m + jX_m}$$

$$P_{ab} = 3 E_L I \cos \varphi \Rightarrow P_{entregada\ a\ la\ carga} = 3 E_{GR} I \cos(\theta + \phi - \alpha)$$



# Efecto de la variación de la excitación en el motor síncrono y el condensador síncrono



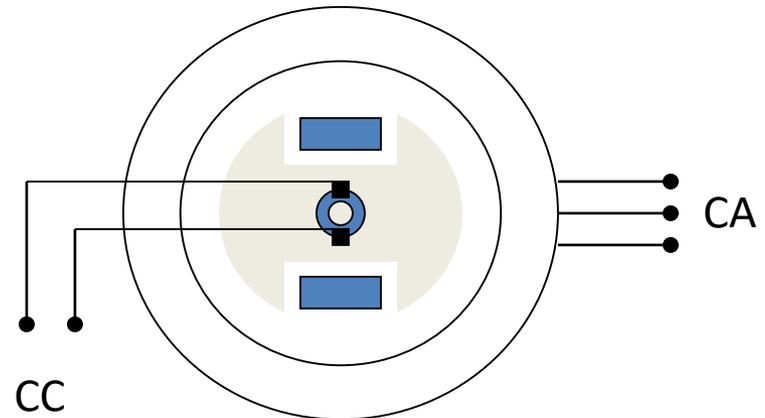
En la industria se usan motores síncronos sobre excitados que presentan una carga capacitativa, pudiendo facilitar la corrección del factor de potencia además su reactancia capacitativa se puede variar a voluntad. Se puede usar un motor síncrono sólo para corregir el Factor de Potencia, y en este caso recibe el nombre de condensador síncrono.

Tema II: MÁQUINA SÍNCRONA

# **DINÁMICA DEL GENERADOR SÍNCRONO**

Hay dos tipos de operaciones transitorias:

- Un transitorio eléctrico.
- Un transitorio mecánico



## Transitorios eléctricos

El transitorio más severo es el cortocircuito súbito de sus tres terminales. En este caso, en un generador que esté operando a la velocidad síncrona en condición sin carga (no hay corriente en el devanado de fase), la corriente en cada fase se sostiene por el voltaje generado  $E_{\phi}$  de la máquina.

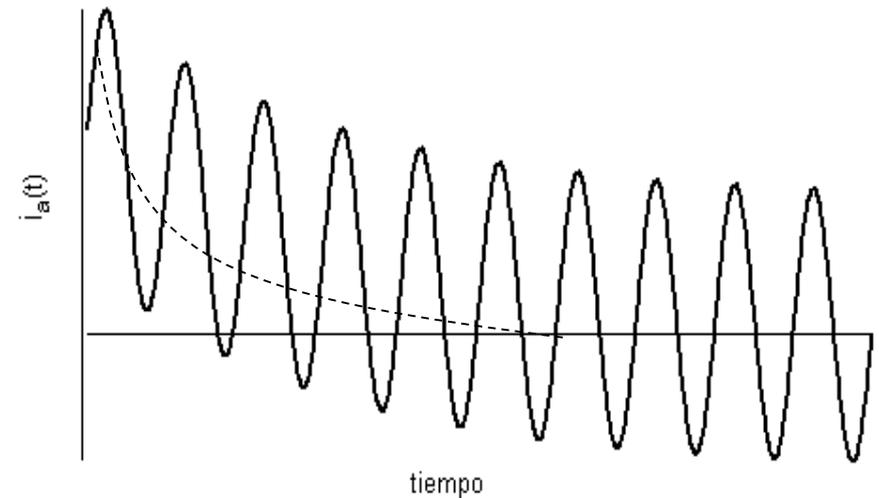
# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

Al aplicar el cortocircuito-trifásico:

- Las corrientes en los devanados de armadura son tales que mantienen el encadenamiento de flujo en el devanado de armadura en el valor que tenía cuando se presentó el corto. Hay 2 componentes de corriente:

- Una corriente de CA para oponerse al flujo variable en el tiempo que produce el devanado de campo cuando gira.

- Y una corriente de CC que corresponde al encadenamiento inicial de flujo que existía cuando se presentó el corto.

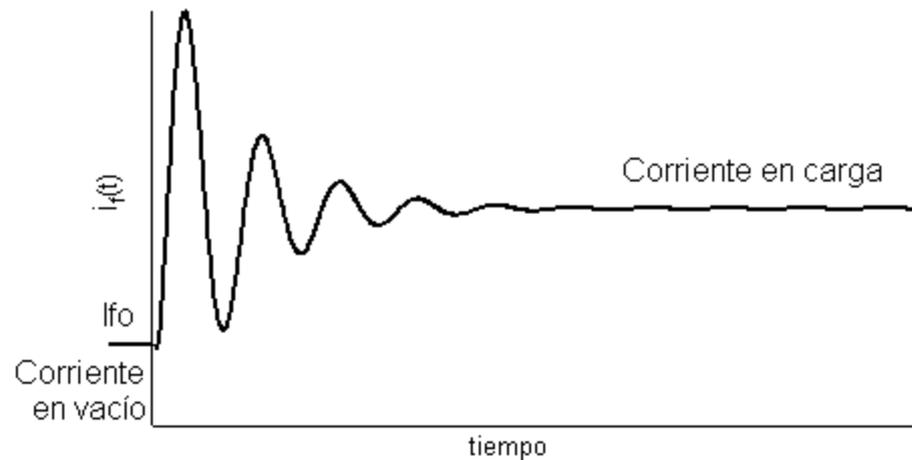


# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

- En el devanado de campo responde:

- Con una corriente de CA que se opone a la de CC del devanado de armadura.

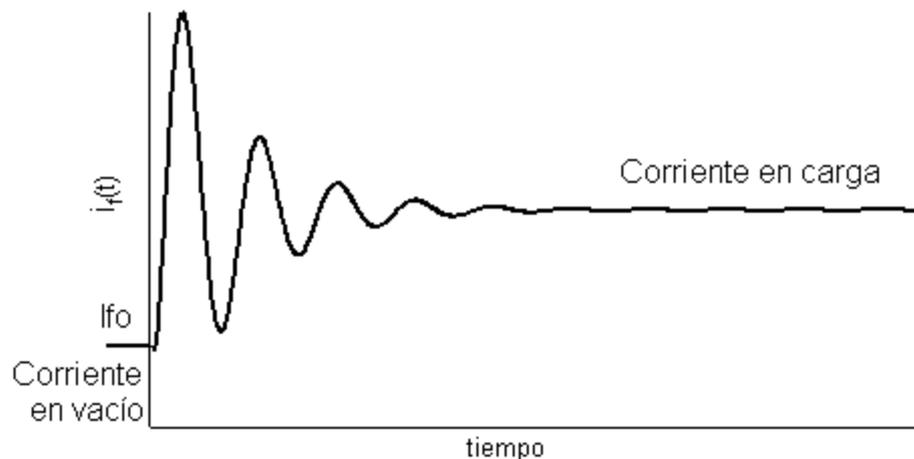
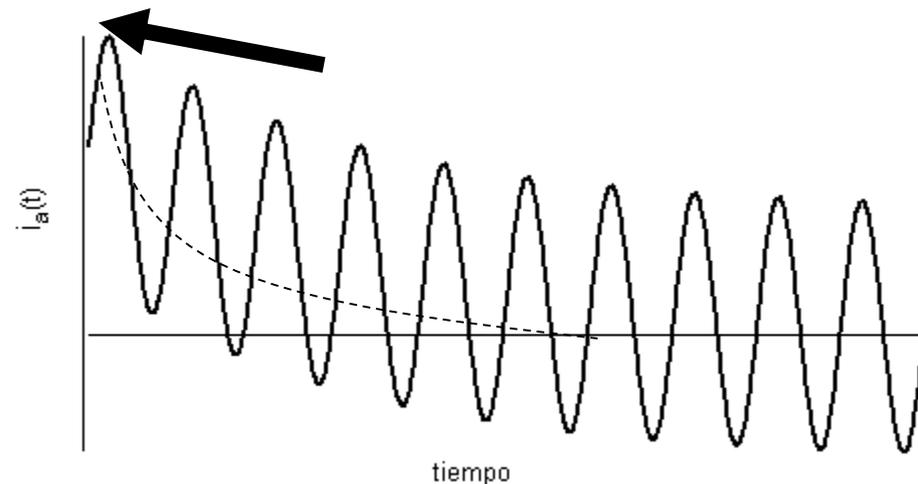
- Y una CC que se oponga a la componente de flujo rotatorio síncrono, creado por las CA de armadura.



# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

En cada corriente de fase tiene una componente de CC decayendo, aún cuando sólo están presentes voltajes de CA en el circuito de la armadura.

Esto es porque la máquina intenta mantener los concatenamientos constantes de flujo para cada una de las tres fases.



Debe haber una componente inducida de CC que se oponga a la componente de flujo rotatorio síncrono creado por las corrientes alternas de la armadura



# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

Para el desarrollo teórico suponemos:

- Generador opera en la región lineal de su característica de magnetización.
- Las resistencias de los devanados son despreciables.
- Suponemos que la máquina no usa un devanado de amortiguamiento.

Justo antes del cortocircuito, los concatenamientos totales de flujo del devanado de campo son

$$\lambda_f = N_f \phi_f = L_f I_f$$

$L_f$   $\equiv$  inductancia efectiva del devanado de campo

$I_f$   $\equiv$  corriente de campo

$$\lambda_f = (L_{lf} + L_{af}) I_f \quad (1)$$

$L_{lf}$   $\equiv$  inductancia de dispersión

$L_{af}$   $\equiv$  inductancia mútua entre los devanados  
del campo y la armadura

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

Como el generador ha estado operando sin carga antes del cortocircuito el concatenamiento de flujo debido al devanado de la armadura es

$$\lambda_a = 0$$

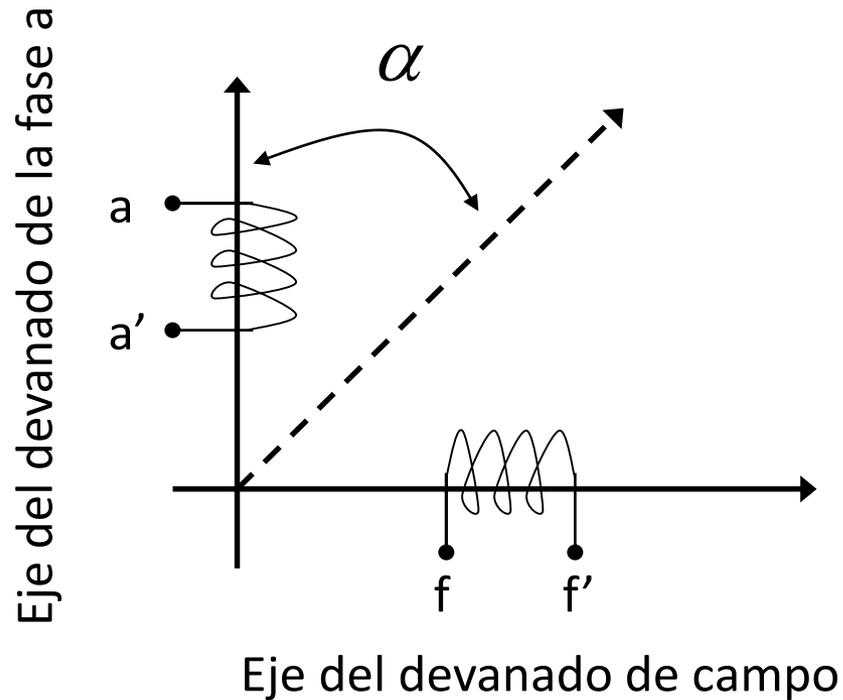
Cuando ocurre un cortocircuito trifásico a través de los terminales de la armadura en  $t=0$ , los ejes magnéticos del devanado del campo y del devanado de la armadura (tomamos como ejemplo la fase a) se consideran ortogonales.

Después de un tiempo breve, el rotor alcanza cierta posición angular  $\alpha$  respecto al eje magnético del devanado de la fase a y origina corrientes

$$\begin{array}{ll} i_a & \text{en la fase} \\ I_f + i_f & \text{en el devanado de campo} \end{array}$$

Con el objetivo de mantener los mismos concatenamientos de flujo total.

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos



El concatenamientos de flujo de la fase a es

$$\lambda_a = i_a (L_{la} + L_{af}) + (I_f + i_f) L_{af} \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad (2)$$

El concatenamientos de flujo para el devanado de campo es

$$\lambda_f = (I_f + i_f) (L_{lf} + L_{af}) + L_{af} i_a L_{af} \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad (3)$$

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

$$\lambda_f = (L_{lf} + L_{af})I_f \quad (1)$$

$$\lambda_a = i_a(L_{la} + L_{af}) + (I_f + i_f)L_{af}\text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad (2)$$

$$\lambda_f = (I_f + i_f)(L_{lf} + L_{af}) + L_{af}i_a\text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad (3)$$

Resolviendo el sistema tenemos las corrientes transitorias

$$i_a = \frac{L_{af}I_f(L_{lf} + L_{af})\text{sen}(90^\circ - \alpha)}{L_{af}^2\text{sen}^2(90^\circ - \alpha) - (L_{lf} + L_{af})(L_{la} + L_{af})}$$

$$i_f = -\frac{L_{af}^2\text{sen}^2(90^\circ - \alpha)I_f}{L_{af}^2\text{sen}^2(90^\circ - \alpha) - (L_{lf} + L_{af})(L_{la} + L_{af})}$$

La condición transitoria más severa ocurre cuando las corrientes son máximas.

Eso sucede cuando  $\alpha = 0$



$$i_a = \frac{L_{af}I_f(L_{lf} + L_{af})}{L_{af}^2 - (L_{lf} + L_{af})(L_{la} + L_{af})} \quad (4)$$

$$i_f = -\frac{L_{af}^2I_f}{L_{af}^2 - (L_{lf} + L_{af})(L_{la} + L_{af})}$$

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

De (4) podemos determinar la reactancia transitoria del generador síncrono que sigue su comportamiento durante el periodo transitorio.

Si multiplicamos y dividimos en (4) por  $\omega^2$  y simplificamos

$$i_a = \frac{\omega L_{af} I_f (\omega L_{lf} + \omega L_{af})}{\omega^2 L_{af}^2 - (\omega L_{lf} + \omega L_{af})(\omega L_{la} + \omega L_{af})}$$

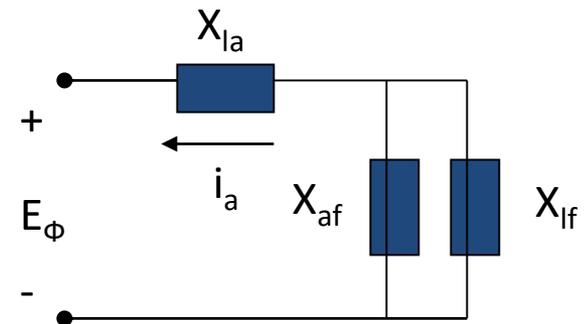
$$i_a = - \frac{E_\phi (X_{lf} + X_{af})}{X_{lf} X_{la} + X_{lf} X_{af} + X_{fa} X_{la}} \Rightarrow X'_d = \frac{E_\phi}{-i_a} = X_{la} + \frac{X_{af} X_{lf}}{X_{af} + X_{lf}}$$

Reactancia transitoria

El circuito equivalente es

$$E_\phi = I_f \omega L_{af} = I_f X_{af}$$

$E_\phi$  es el voltaje generado antes del cortocircuito en condiciones sin carga



## Corrientes de cortocircuito

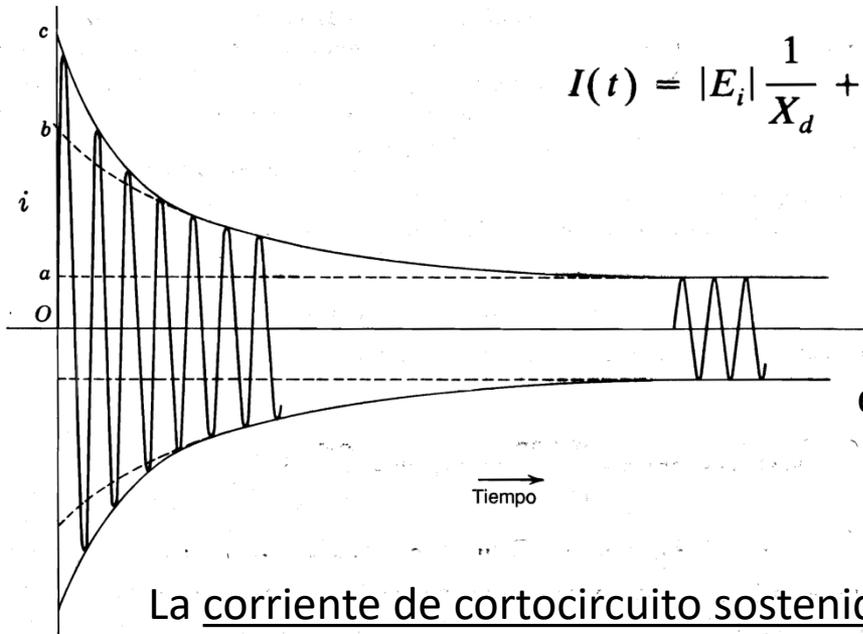
Cuando se aplica repentinamente un voltaje de ca a un circuito serie RL, la corriente que fluye tiene dos componentes: una de cd, que decae conforme a una constante de tiempo  $L/R$  de circuito.; y una componente de estado estable de amplitud constante que varía sinusoidalmente.

Un fenómeno similar pero más complejo, ocurre cuando un cortocircuito se presenta repentinamente en las terminales de una máquina síncrona.

Una buena forma de analizar el efecto de los cortocircuitos trifásicos en las terminales de un generador previamente descargado, es tomar un oscilograma de la corriente en una de las fases cuando se presenta la falla. Como los voltajes generados en las fases de las máquinas trifásicas están desplazados  $120^\circ$  eléctricos uno de otro, el cortocircuito ocurre en diferentes puntos de la onda de voltaje de cada fase. Por esta razón la componente transitoria unidireccional o de cd, es diferente en cada fase. Si se elimina la corriente cd de cada fase, la amplitud de la componente de ca de cada corriente de fase varía de la forma

$$I(t) = |E_i| \frac{1}{X_d} + |E_i| \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \varepsilon^{-t/T'_d} + |E_i| \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \varepsilon^{-t/T''_d}$$

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos



$$I(t) = |E_i| \frac{1}{X_d} + |E_i| \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} + |E_i| \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d}$$

Donde

$$e_i = \sqrt{2} |E_i| \cos \omega t$$

es el voltaje síncrono sin carga de la máquina

La corriente de cortocircuito sostenida

$$|I| = \frac{0-a}{\sqrt{2}} = \frac{|E_i|}{X_d}$$

La corriente de transitoria

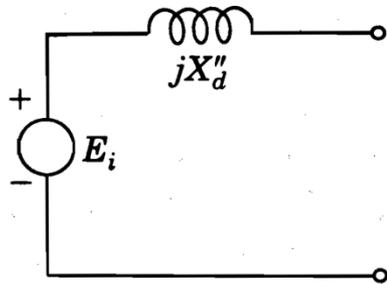
$$|I'| = \frac{0-b}{\sqrt{2}} = \frac{|E_i|}{X'_d}$$

La corriente subtransitoria ( corriente rms inicial simétrica inmediatamente después del cortocircuito)

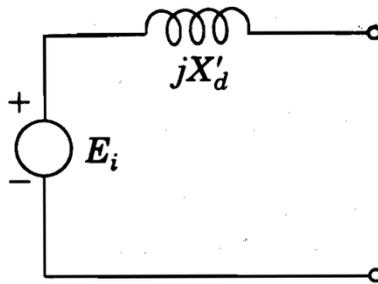
$$|I''| = \frac{0-c}{\sqrt{2}} = \frac{|E_i|}{X''_d}$$

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

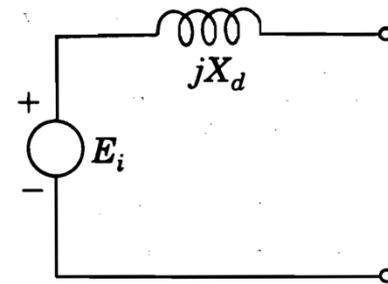
Si el generador está sin carga cuando ocurre la falla, se representa la máquina por el voltaje sin carga al neutro, en serie con la reactancia apropiada.



a)



b)



c)

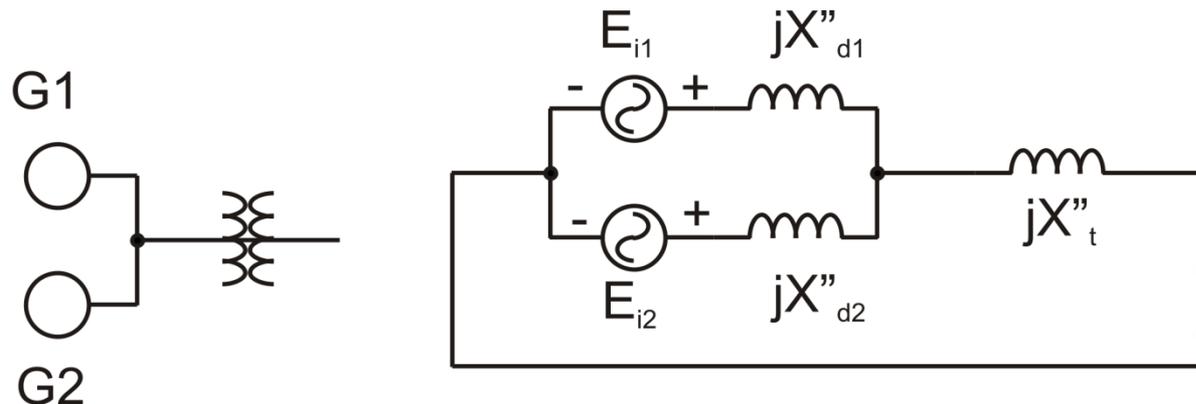
Circuitos equivalentes para un generador síncrono con voltaje interno  $E_i$

- a) Reactancia subtransitoria  $X''_d$
- b) Reactancia Transitoria  $X'_d$
- c) Reactancia sincrónica  $X_d$

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

## Ejemplo

Se conectan dos generadores en paralelo al lado de bajo voltaje de un transformador D-Y trifásico. El generador 1 es de 50000 kVA, y 13.89 kV. El generador 2 es de 25000 kVA y 13.8 kV. Cada generador tiene una reactancia subtransitoria de 25% sobre su propia base. El transformador es de 75000 kVA, 13.8 D/69Y kV, con una reactancia de 10%. Antes de que la falla ocurra, el voltaje en el lado de alta tensión del transformador es de 66 kV. El transformador está sin carga y no hay corrientes circulando entre los generadores. Encuentre la corriente subtransitoria en cada generador cuando ocurre un cortocircuito trifásico en el lado de alto voltaje del transformador

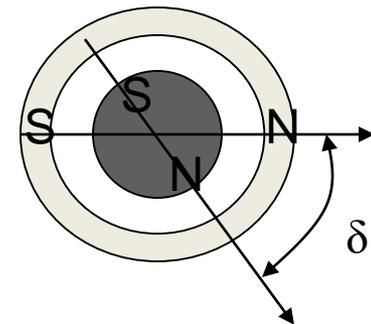


## Transitorios mecánicos

Se puede producir por un transitorio eléctrico en los terminales de su armadura. Si ocurre una modificación repentina en la potencia suministrada por el generador, necesita un cambio también repentino en el ángulo de potencia  $\delta$ . Sin embargo,  $\delta$  no puede cambiar súbitamente debido a la inercia del rotor. Esto conduce a una situación en la que la potencia de entrada no es igual a la de salida. La diferencia entre ellas produce un cambio en la energía cinética del rotor, lo que afecta a su velocidad.

Durante este proceso transitorio, el rotor acelera o desacelera hasta que las potencias de entrada y salida se igualan. Cuando pasa esto, el rotor recupera su velocidad síncrona.

Lo mismo pasa con un cortocircuito repentino.



# Dinámica del generador síncrono. Transitorios mecánicos

Durante el estado transitorio, la ecuación mecánica del par viene dado por:

$$\underbrace{T_d(t)}_{\substack{\text{Par desarrollado} \\ \text{en el generador} \\ \text{síncrono en un} \\ \text{momento dado}}} + D\omega_m(t) + J \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \underbrace{T_m}_{\substack{\text{Par mecánico} \\ \text{aplicado al} \\ \text{generador}}} \quad (5)$$

Si despreciamos las pérdidas por rotación en (5)

$$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_m - T_d(t) \Rightarrow J \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} = T_m - T_d(t) \quad (6)$$

Donde  $\theta_m$  es el desplazamiento del rotor respecto al marco de referencia estacionario:

$$\theta_m(t) = \underbrace{\omega_s}_{\substack{\text{velocidad} \\ \text{de sincronismo}}} t + \underbrace{\delta_m(t)}_{\substack{\text{ángulo de} \\ \text{potencia en } t}} \Rightarrow \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2}$$

Por lo que de (6) tenemos:

$$\boxed{J \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2} = T_m - T_d(t)}$$

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

Multiplicando por  $\omega_m(t)$  en (7)

$$\underbrace{J\omega_m(t)}_{\text{Momento angular } M(t)} \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2} = \underbrace{\omega_m(t)T_m}_{P_m(t)} - \underbrace{\omega_m(t)T_d(t)}_{\text{Potencia desarrollada } P_d(t)}$$

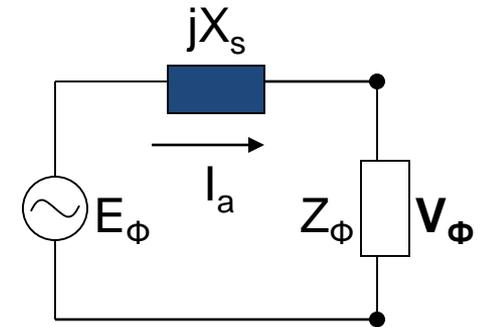
Nota:

Buscamos expresar la potencia desarrollada en un generador como función del ángulo de potencia  $\delta$ .

$$P_d = 3V_\phi I_\phi \cos\theta$$

$$\bar{V}_\phi = \bar{E}_\phi - j\bar{I}_\phi X_s \Rightarrow \bar{I}_\phi = \frac{\bar{E}_\phi - \bar{V}_\phi}{jX_s}$$

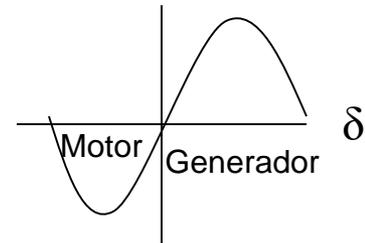
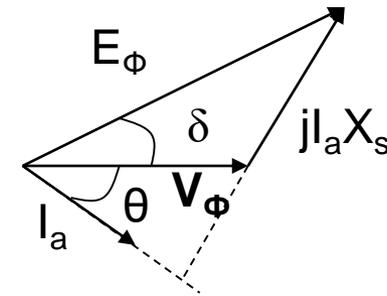
$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_\phi &= E_\phi \cos\delta + jE_\phi \text{sen}\delta \\ \bar{I}_\phi &= \frac{E_\phi \text{sen}\delta}{X_s} - j \frac{E_\phi \cos\delta - V_\phi}{X_s} \end{aligned} \right\}$$



$$\bar{I}_\phi = I_\phi \cos\theta - jI_\phi \text{sen}\theta \quad \rightarrow \quad I_\phi \cos\theta = \frac{E_\phi \text{sen}\delta}{X_s}$$

⇓

$$P_d = 3V_\phi I_\phi \cos\theta \quad \rightarrow \quad P_d = 3V_\phi \frac{E_\phi \text{sen}\delta}{X_s} \quad \Rightarrow \quad \boxed{P_d = P_{dm} \text{sen}\delta}$$



$$\underbrace{J\omega_m(t)}_{\text{Momento angular } M(t)} \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2} = \underbrace{\omega_m(t)T_m}_{P_m(t)} - \underbrace{\omega_m(t)T_d(t)}_{\text{Potencia desarrollada } P_d(t)}$$

Por lo tanto tenemos la siguiente ecuación (Ec. de vaivén)

$$J\omega_m(t) \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2} = P_m(t) - P_{dm} \text{sen}\delta_m(t) \quad (8)$$

Esto es una ecuación diferencial no lineal de segundo orden. Esta ecuación se puede resolver numéricamente por ejemplo usando el algoritmo de Runge-Kutta. También se puede hacer lineal suponiendo  $\delta_m$  es un ángulo pequeño

$$\text{sen}(\delta_m) \approx \delta_m$$

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

Expresando la ec. (8) en términos de cantidades por unidad respecto a la potencia específica del generador síncrono  $S_n$ , tenemos

$$\frac{J\omega_m(t)}{S_n} \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2} = \frac{P_m(t)}{S_n} - \frac{P_{dm}}{S_n} \text{sen}\delta_m(t)$$

Definimos la constante de inercia del generador como

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_s^2(t)}{S_n} = \frac{1}{2} \frac{J\omega_m^2(t)}{S_n}$$

Para que se cumpla la segunda igualdad se ha supuesto que el momento angular es constante.

Por lo tanto la ecuación de vaivén se expresa como

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2} = p_m - p_{dm} \text{sen}\delta_m(t) \quad (9)$$

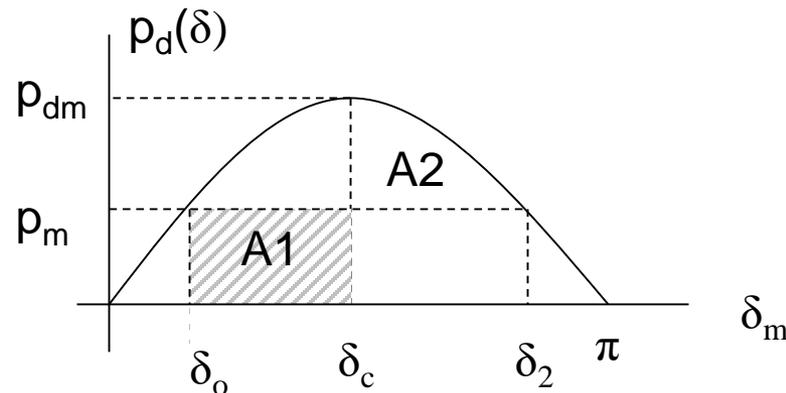
$p_m$  y  $p_{dm}$  potencias por unidad

## Criterio de igual área

Es otro método para determinar la estabilidad de un generador síncrono durante un estado transitorio.

Suponemos que el generador trabaja con una potencia  $p_o$  correspondiente al ángulo de potencia  $\delta_o$ . Además si ocurre un cortocircuito súbito en las tres fases, la potencia desarrollada se vuelve igual a 0,  $p_{dm}=0$  al desconectarse la máquina del bus-bar (barra de colectores) por medio de un sistema automático de protección. Por otro lado, el impulsor primario aún está suministrando energía mecánica al generador.

Por tanto de (9) y como



# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

como

$$\theta_m(t) = \omega_s t + \delta_m(t) \Rightarrow \omega_m(t) = \frac{d\theta_m(t)}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta_m(t)}{dt} \Rightarrow \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2}$$

de la ec. de vaivén (9)

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2} = p_m \Rightarrow \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} p_m$$

Integrando y con  $\omega_m(0) = \omega_s$

$$\int_{\omega_m(0)}^{\omega_m} d\omega_m(t) = \int_0^t \frac{\omega_s}{2H} p_m dt \Rightarrow \boxed{\omega_m(t) = \omega_s + \frac{\omega_s}{2H} p_m t} \quad (10)$$

Por tanto, vemos que la velocidad del eje es mayor que la velocidad síncrona y aumenta con el tiempo. Por lo que la máquina podría salirse de control

Integrando (10) obtenemos el ángulo de potencia

$$\delta_m(t) = \delta_o + \frac{\omega_s}{4H} p_m t^2$$

$\delta_o$  es el ángulo de potencia en el momento en que ocurre el cortocircuito.

Si la falla se corrige en el instante  $t_c$ , el generador se iniciará desarrollando potencia a un nivel más elevado que el del estado anterior a la falla pues

$$\delta_m(t) > \delta_o$$

Esto ocasiona que el rotor se desacelere. Si se corrige el fallo cuando  $P_{dm} > P_m$  ya no se podrá parar.

# Dinámica del generador síncrono. Transitorios eléctricos

como  $\theta_m(t) = \omega_s t + \delta_m(t) \Rightarrow \frac{d\delta_m(t)}{dt} = \frac{d\theta_m(t)}{dt} - \omega_s = \omega_m(t) - \omega_s$

Multiplicando por  $\frac{d\delta_m(t)}{dt}$  la ec.  $\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega_m(t)}{dt} = p_m - p_d$

$$\left( \frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega_m(t)}{dt} \right) \frac{d\delta_m(t)}{dt} = (p_m - p_d) \frac{d\delta_m(t)}{dt}$$

$$\frac{H}{\omega_s} \left( 2\omega_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} - 2\omega_s \frac{d\omega_m(t)}{dt} \right) = (p_m - p_d) \frac{d\delta_m(t)}{dt}$$

↓ Integrando

$\omega_{mo}$  ≡ es la velocidad angular antes del inicio del cortocircuito  
 $\omega_{m2}$  ≡ velocidad angular correspondiente al valor máximo de  $\delta_2$  después de que se ha corregido el cortocircuito

$$\frac{H}{\omega_s} \left( \int_{\omega_{mo}}^{\omega_{m2}} 2\omega_m d\omega_m - \int_{\omega_{mo}}^{\omega_{m2}} 2\omega_s d\omega_m \right) = \int_{\delta_o}^{\delta_2} (p_m - p_d) d\delta_m$$

$$\frac{H}{\omega_s} \left( (\omega_{m2}^2 - \omega_{mo}^2) - 2\omega_s (\omega_{m2} - \omega_{mo}) \right) = \int_{\delta_o}^{\delta_2} (p_m - p_d) d\delta_m$$

$$\omega_{mo} = \omega_s$$

en el máximo de  $\delta_m$  se cumple

$$\frac{d\delta_m(t_2)}{dt} = 0 \Rightarrow 0 = \omega_m(t) - \omega_s \Rightarrow \omega_{m2} = \omega_s$$

La ecuación se queda de la forma

$$\int_{\delta_o}^{\delta_2} (p_m - p_d) d\delta_m = 0$$
$$\int_{\delta_o}^{\delta_c} \left( p_m - \underbrace{p_d}_{=0} \right) d\delta_m = \int_{\delta_c}^{\delta_2} (p_d - p_m) d\delta_m$$

$\delta_c$  es el ángulo de potencia en donde la falla se corrige en el instante  $t_c$

## Ejemplo

Un generador síncrono, tetrapolar de 1000 KVA, 4.6 KV y 60 Hz, entrega 0.9 por unidad de potencia promedio con un ángulo de potencia de 18 grados cuando ocurre un cortocircuito trifásico a través de sus terminales. Calcular:

- a) La potencia generada por unidad por el generador cuando la falla se corrige 4 ciclos después de su inicio.
- b) El tiempo crítico para eliminar la falla con objeto de no perder la estabilidad.

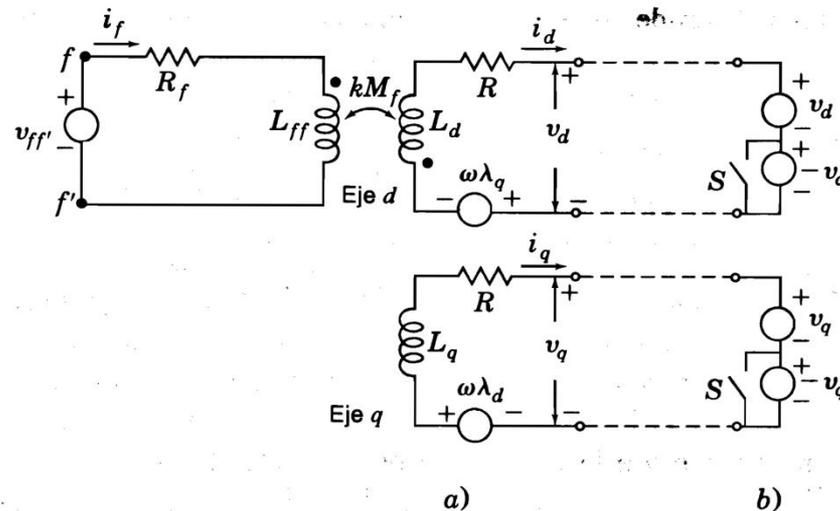
La constante de inercia  $H=10$  J/VA

# Resumen

- Aunque los transitorios mecánicos en los generadores síncronos son los menos frecuentes, son los más importantes porque la máquina podría sufrir autodestrucción.
- Después de un transitorio mecánico, el ángulo de potencia varía como función del tiempo y lo modela una ecuación diferencial de segundo orden (ec. de vaivén).
- Si la causa del transitorio mecánico se corrige dentro del lapso breve (algunos ciclos) la máquina no pierde su estabilidad durante el estado transitorio. De otro modo podría exceder su velocidad y causar daños permanentes al rotor.
- El criterio de igual área es una herramienta útil para determinar la estabilidad transitoria de un generador síncrono.

## Efectos transitorios y subtransitorios

Cuando ocurre una falla en la red de potencia, la corriente que fluye está determinada por las fems internas e impedancias de la máquina en la red. El interés inmediato está en conocer el valor de la inductancia efectiva cuando repentinamente ocurre un cortocircuito trifásico en las terminales de la armadura de una máquina síncrona.



El cortocircuito de las fases a, b, c impone que  $v_a=v_b=v_c=0$  y que  $v_d=v_q=0$ . Para simular las condiciones de cortocircuito, los terminales de los circuitos de ejes d y q deben cortocircuitarse. En la figura se hace poniendo en serie 2 fuentes iguales y de polaridad opuestas.





[http://genermex.net/bobinas\\_diamante.html](http://genermex.net/bobinas_diamante.html)

