

FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*José Francisco Gómez
González*

Benjamín González Díaz

*María de la Peña Fabiani
Bendicho*

Ernesto Pereda de Pablo

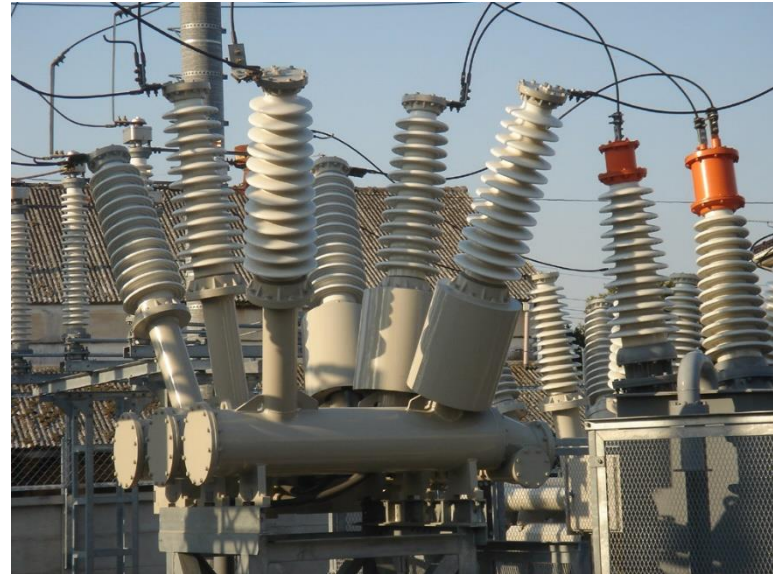


**Universidad
de La Laguna**

**Departamento de
Ingeniería Industrial**



Tema 9: Máquinas síncronas



PUNTOS OBJETO DE ESTUDIO

- ▶ Introducción a los generadores.
- ▶ Creación del campo en el rotor: por anillos rozantes y por excitatriz.
- ▶ Frecuencia y voltaje inducidos.
- ▶ Circuito equivalente del generador.
- ▶ Voltaje de fase y voltaje terminales.
- ▶ Potencia de salida y torque inducido.
- ▶ El motor síncrono: Circuito equivalente y aplicaciones.
- ▶ Problemas en el arranque y su resolución.

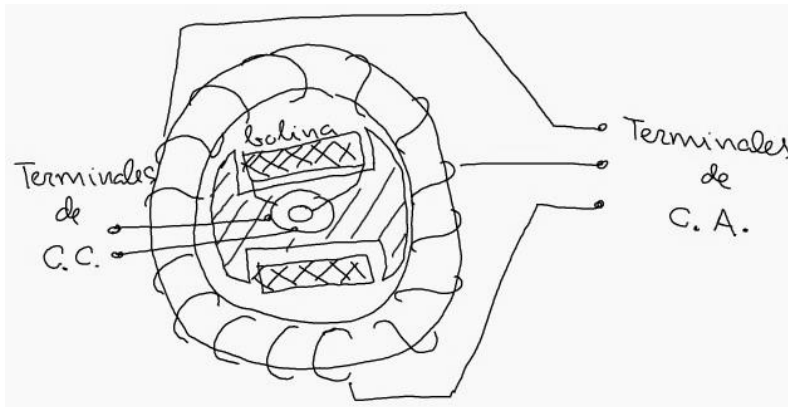
Introducción a los generadores (I)

- ▶ 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.

Introducción a los generadores (II)

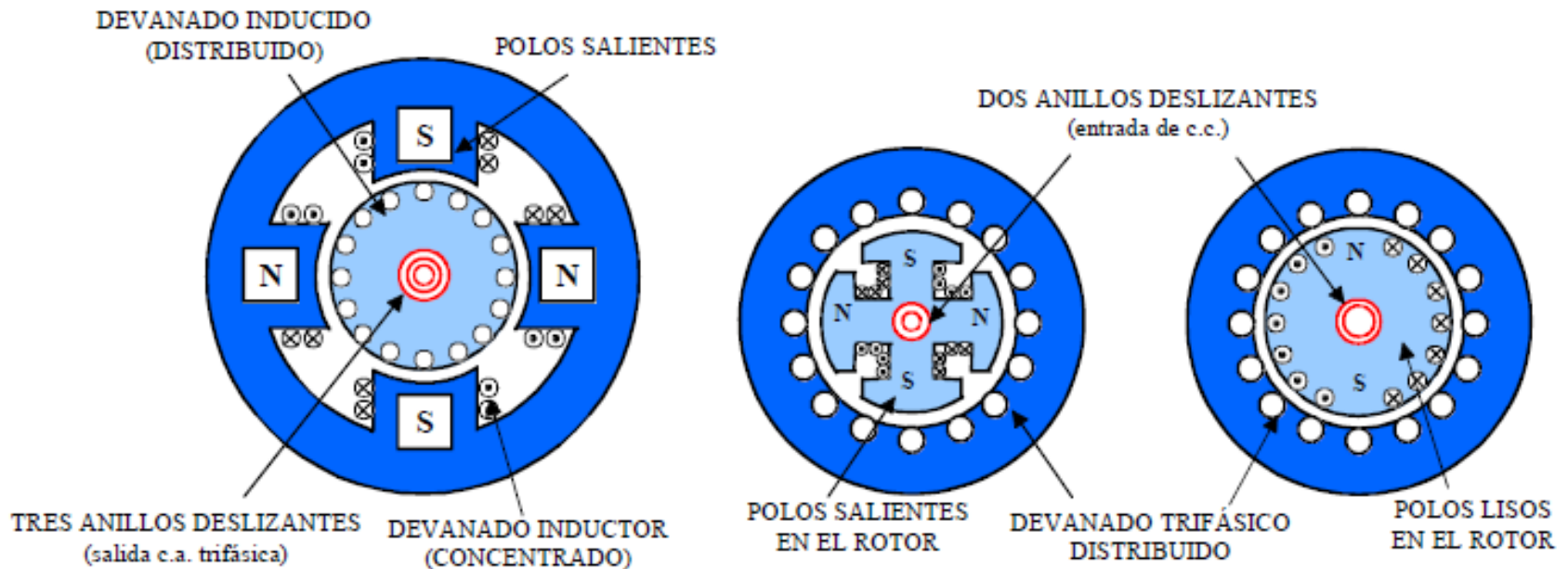
- ▶ En régimen de motor síncrono se emplea en accionamientos industriales que requieren velocidades de transmisión constantes teniendo además la ventaja frente a los motores asíncronos de poder regular simultáneamente el F.P. con el cual trabaja.
- ▶ Cuando la máquina síncrona trabaja con F.P. capacitativo se dice que funciona como compensador o condensador síncrono.

Aspectos constructivos: devanado

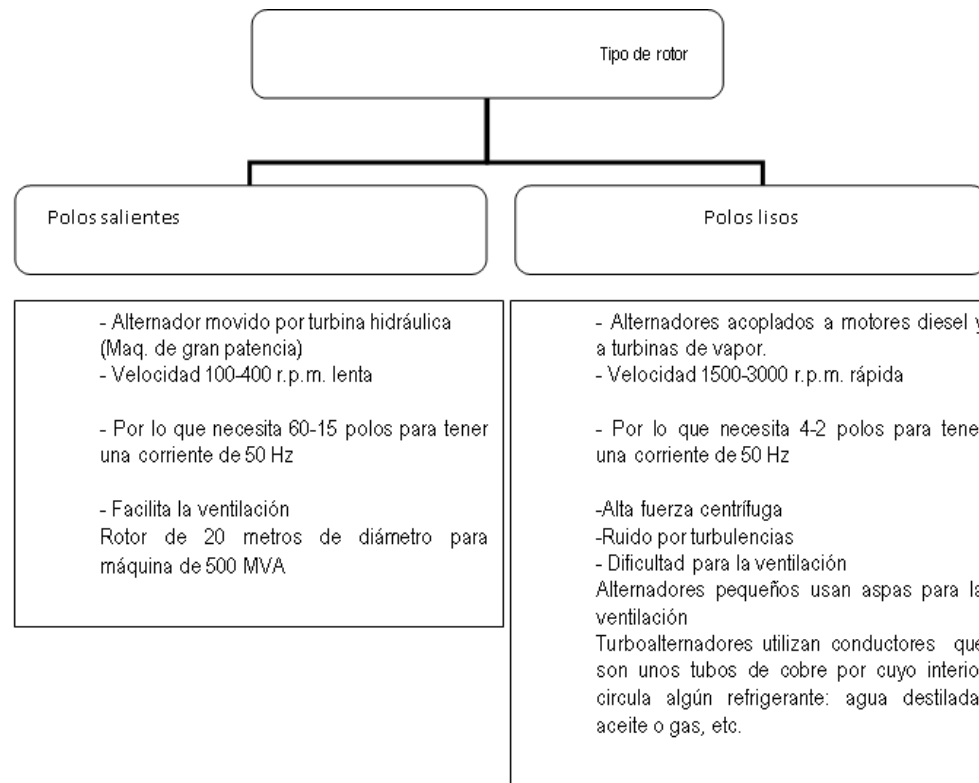


- ▶ La máquina está constituida por dos devanados independientes:
- ▶ Un devanado inductor
 - ▶ - alimentado por corriente continua (rotor).
- ▶ Un devanado inducido
 - ▶ - arrollamiento trifásico.
 - ▶ - recorrido por corriente alterna.

Aspectos constructivos: rotor (I)



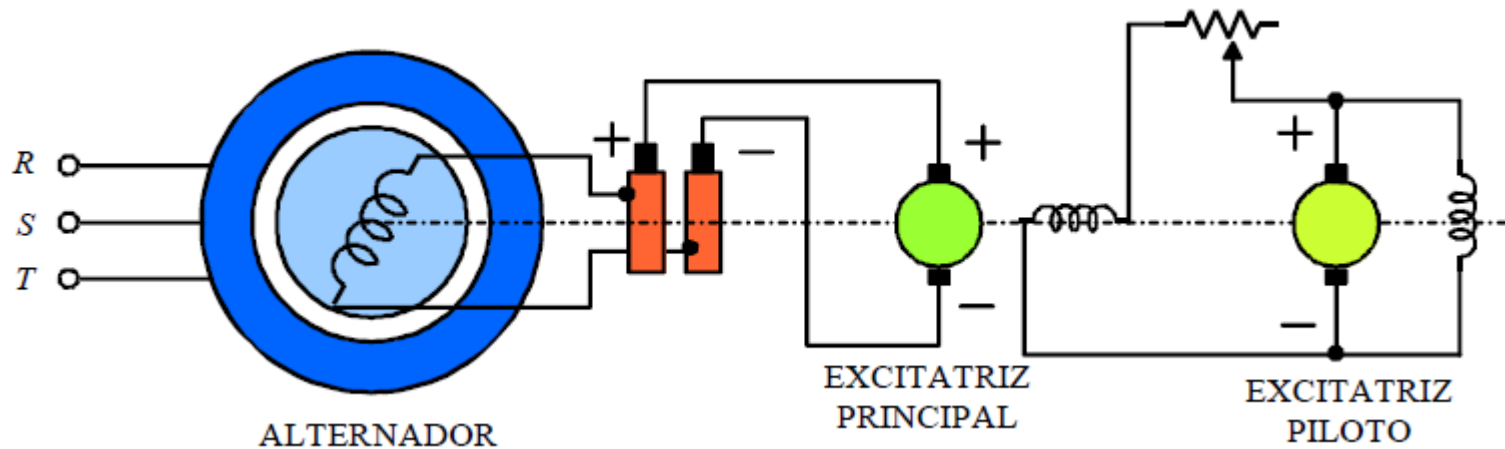
En máquinas pequeñas (10 kVA) el devanado inductor se coloca en el estator en forma de polos salientes



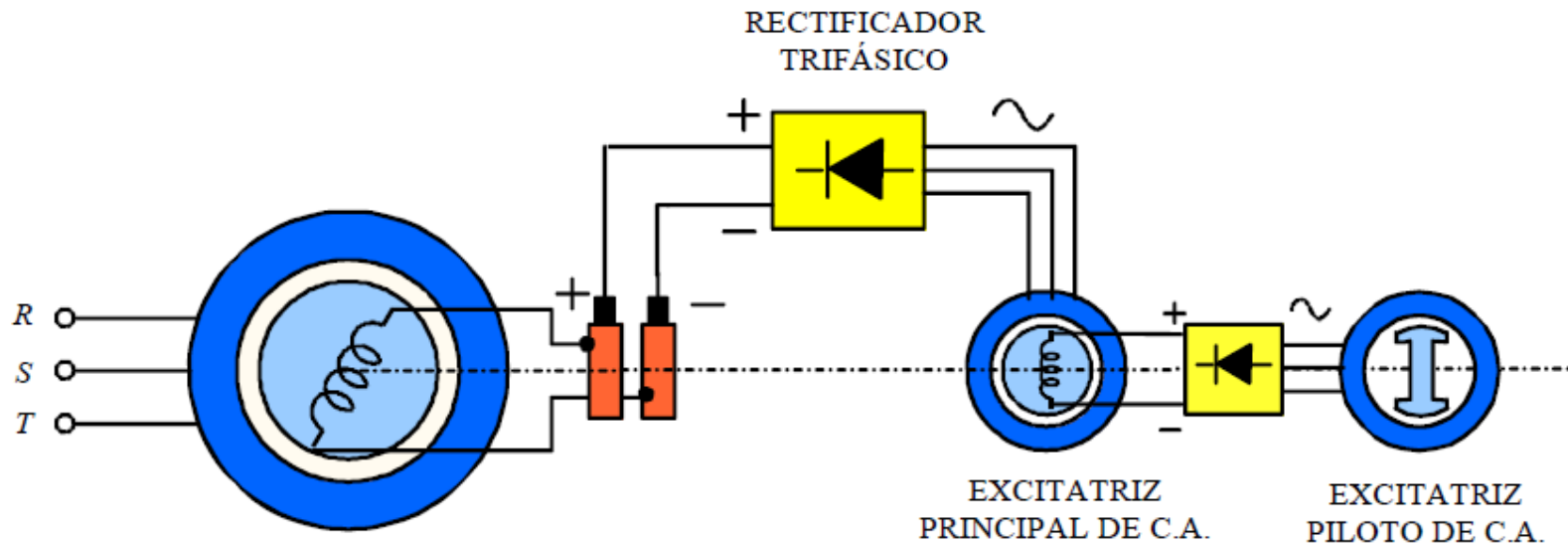
Sistemas de excitación

- ▶ La c.c. procede una dinamo excitatriz (generador de c.c.) del tipo shunt (derivación, devanado 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

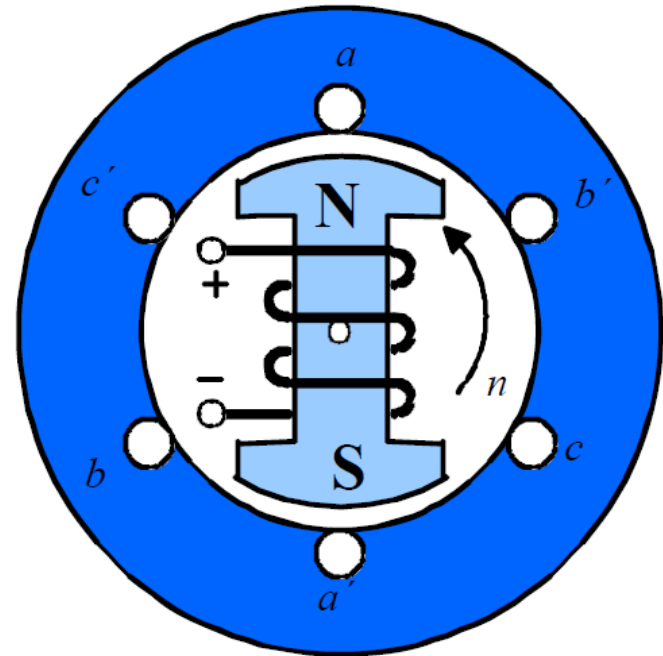


Sistema de excitación electrónica



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR (I)

- ▶ 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° , que corresponde a la separación espacial (en grados eléctricos) existente entre las bobinas del estator.
- ▶ Si estando funcionado 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_0 .



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR (II)

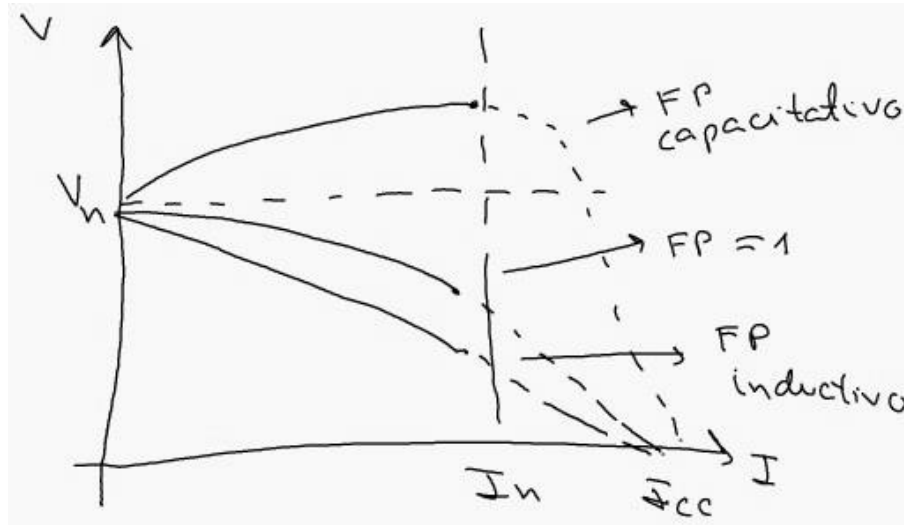
- ▶ La reducción en la tensión de salida del generador es debida a la aparición de una corriente en el inducido que provoca una caída de tensión en la impedancia de los arrollamientos del inducido.
- ▶ La corriente por inducido también produce una f.m.m. que reacciona con la del inductor modificando el flujo del entrehierro de la máquina.
- ▶ Se define la regulación de tensión de una máquina sincrónica 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 (III)

- ▶ 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.



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR (IV)

- ▶ 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 .
- ▶ 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.

FUERZA ELECTROMOTRIZ GENERADA POR FASE

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

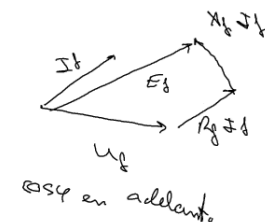
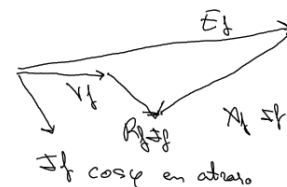
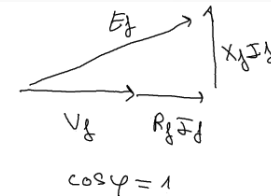
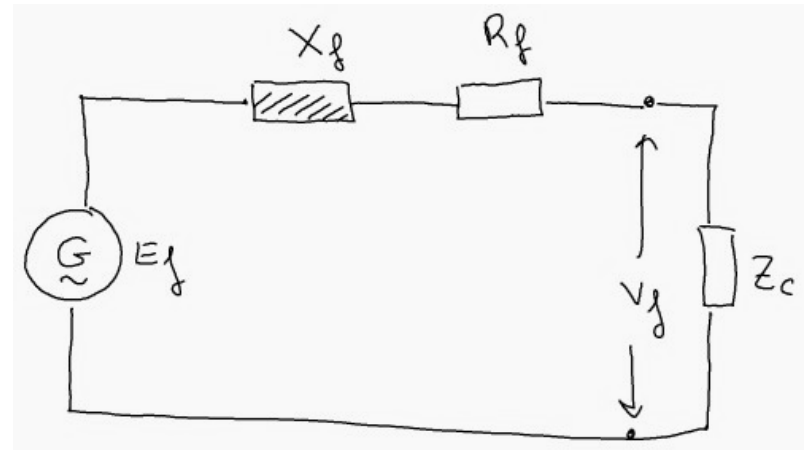
$$E = 4.44N\phi_{\max} f$$

- ▶ 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.

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

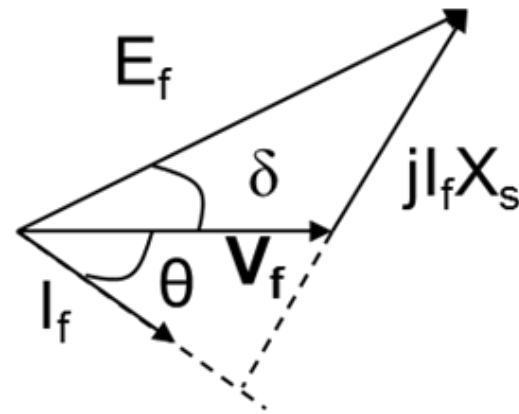
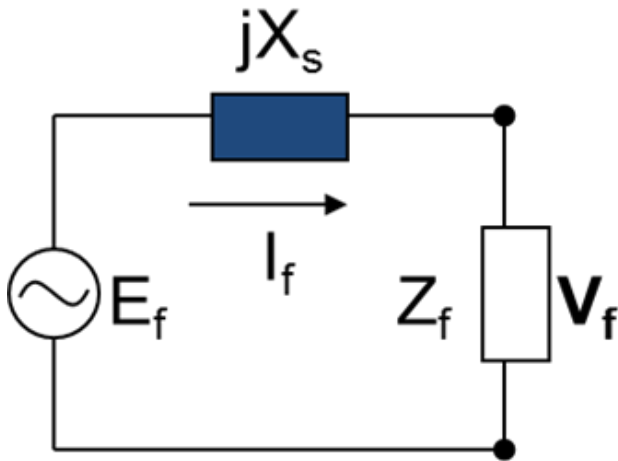
CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR SÍNCRONO

- ▶ 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).
- ▶ $V_f = E_f - I_f \cdot (jX_f + R_f)$
- ▶ $V_f = E_f - I_f \cdot Z_f$
- ▶ Siendo $Z_f = R_f + jX_f$ la impedancia síncrona de la máquina



CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR SÍNCRONO REAL (I)

- ▶ 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.



CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR SÍNCRONO REAL (II)

- De este modelo se obtiene una expresión aproximada de la potencia de salida de un generador en función del ángulo de potencia δ es

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

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

↓

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

⇓

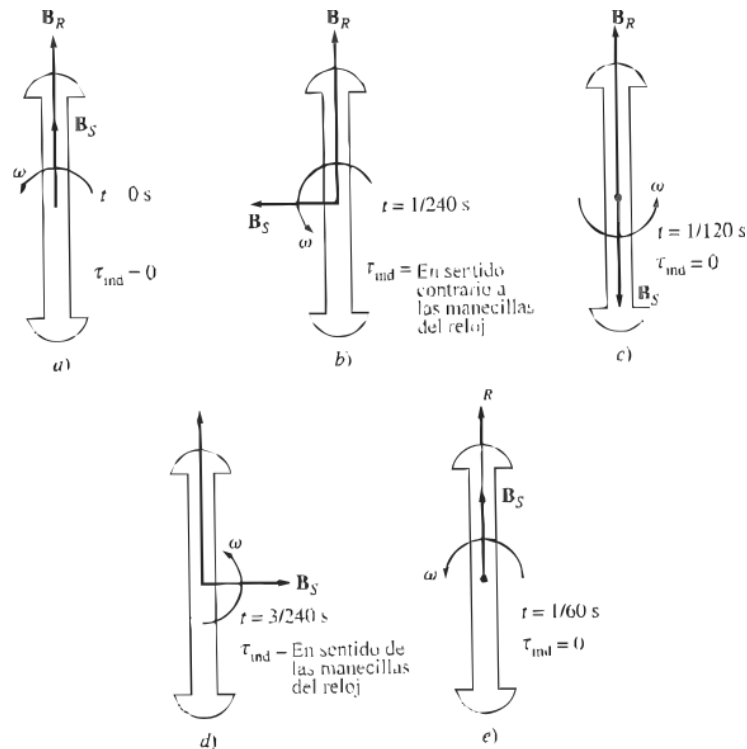
$$P_d = 3V_f I_f \cos\theta \quad \rightarrow \quad P_d = 3V_f \frac{E_f \text{sen}\delta}{X_s} \quad \Rightarrow \quad P_d = P_{dm} \text{sen}\delta$$

En la práctica el ángulo de potencia tiene valores comprendidos entre 15° a 20°

EL 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:
 - ▶ La velocidad de giro del motor síncrono es cte., independiente de la carga $n=60f/p$
 - ▶ 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.

ARRANQUE DE LOS MOTORES SÍNCRONOS



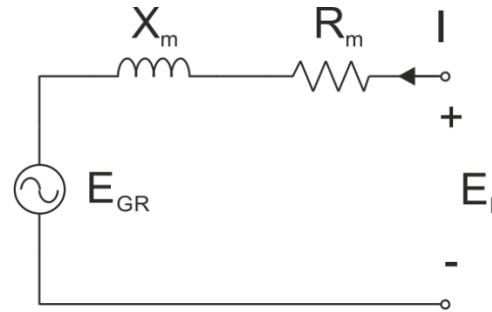
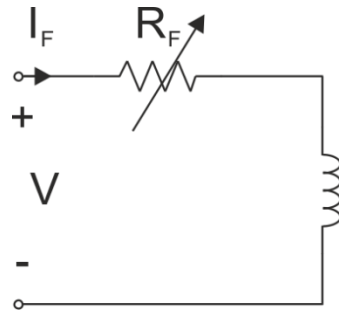
- ▶ Durante un ciclo eléctrico el par está en sentido contrario al del reloj y luego en el mismo sentido por tanto el par promedio de un ciclo completo es cero.
- ▶ En este caso el motor vibra fuertemente con cada ciclo eléctrico y finalmente se calienta

MÉTODOS DE ARRANQUE

- ▶ Arranque a frecuencia reducida
- ▶ Arranque con motor auxiliar
- ▶ Arranque con jaula de ardilla parcial

CIRCUITO EQUIVALENTE

- ▶ El circuito equivalente de un motor síncrono es similar al de un alternador, con a 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 síncrona
- ▶ I = Intensidad de línea por fase