

Universidad Carlos III de Madrid
Dept. Ingeniería eléctrica



Máquinas eléctricas de corriente alterna

Capítulo 3 Máquina Síncrona



David Santos Martín



CAPÍTULO 3 Máquina Síncrona



- 3.1.- Introducción
- 3.2.- Sistemas de Excitación
- 3.3.- Principio de Funcionamiento
- 3.4.- Circuito Equivalente
- 3.4.- Potencias de la Máquina
- 3.6.- Límites de Capacidad



CAPÍTULO 3 Máquina Síncrona



3.1 Introducción



Introducción

Es la máquina más utilizada para las grandes centrales eléctricas: térmicas, hidráulicas y nucleares

La velocidad de la máquina síncrona está rígidamente vinculada con la frecuencia f de la red, según $n=60 f/p$ (n : velocidad, p : pares de polos).

Su uso habitual es como generador aunque es posible como motor (bombeo hidráulico) y como compensador de fdp (compensador síncrono).

Existen máquinas de polos salientes (hidráulica, lentas) y rotor liso (térmicas y nucleares, rápidas).

Ventajas

- Control de potencia activa y reactiva en redes c.a.
- Sistema de excitación de fácil control (c.c.)

Inconvenientes

- Voluminosas y caras
- La unión rígida a la frecuencia de la red puede ser un inconveniente



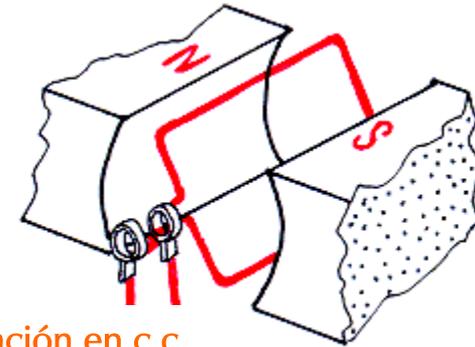
Introducción

Habitualmente (máquinas grandes):

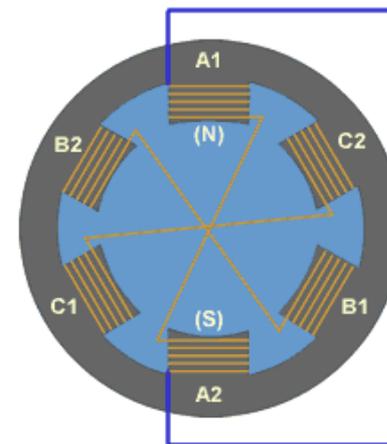
- Excitación: Rotor (c.c.)
- Armadura: Estator (trifásica c.a.)

Conceptualmente, semejante al generador de CC, sin escobillas

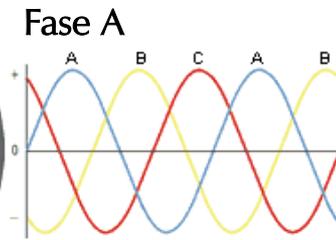
No existe deslizamiento (síncrono)



Excitación en c.c.



Estator trifásico
conectado a la red



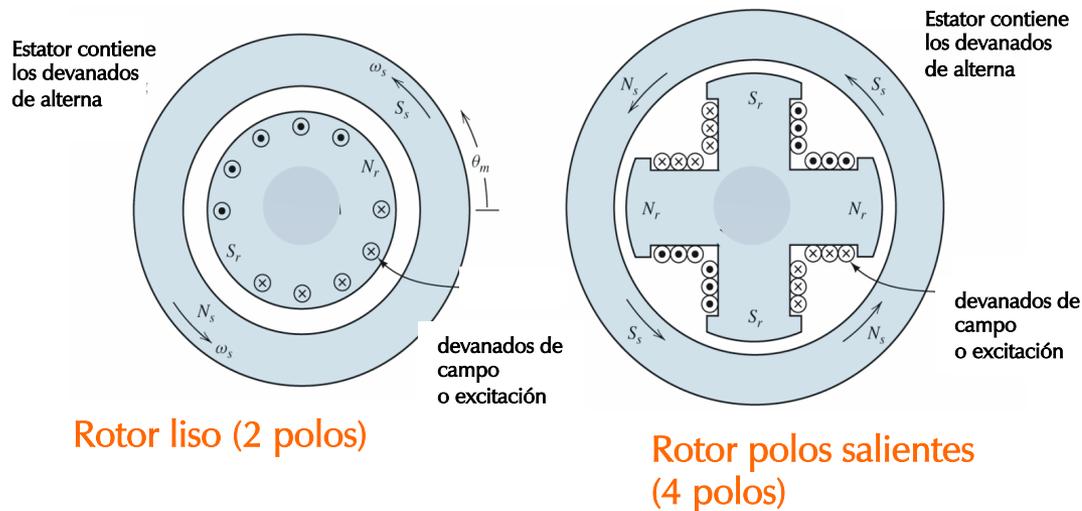
Fase A

B1-B2: Fase B
C1-C2: Fase C



Introducción

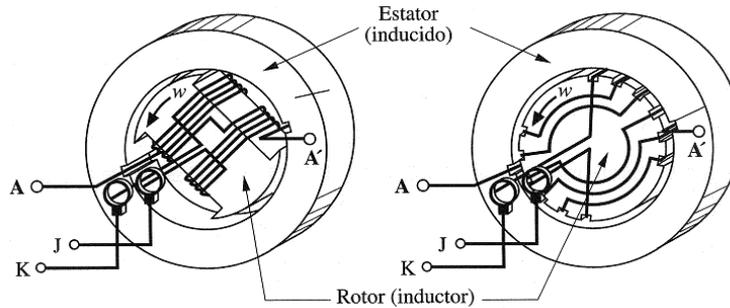
- El rotor puede ser de polos salientes (velocidades lentas, C.hidroeléctricas) o liso (rápidas, C.térmicas o nucleares).
- Capacidad para regular la tensión y reactiva.
- Generadores más eficientes que los de inducción.





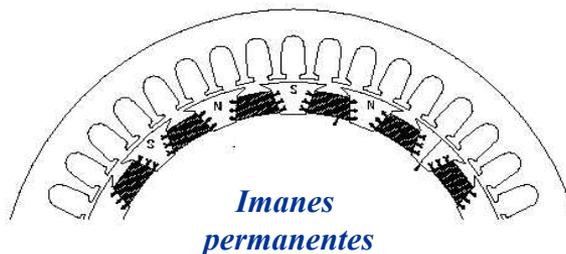
Operación del generador síncrono

Excitación
independiente



- Regulación de Q mediante la tensión de excitación
- Existencia de pérdidas en el rotor
- Devanados de amortiguamiento

Imanes
permanentes



- El volumen reducido
- Flujo prácticamente constante
- Elimina la necesidad de anillos rozantes
- Inexistencia de pérdidas en el rotor
- Desaparece la refrigeración del rotor



Operación del generador síncrono

- Funcionamiento en vacío: Antes de la sincronización y tras un rechazo de carga
- Funcionamiento en isla
- Funcionamiento en red interconectada



CAPÍTULO 3 Máquina Síncrona



3.2 Sistemas de Excitación



Sistemas de excitación

Excitación Estática
(excitación directa)

Sistema autoexcitado

Excitación independiente

Excitación Rotativa
(excitación indirecta)

Excitatriz CA diodos rotativos

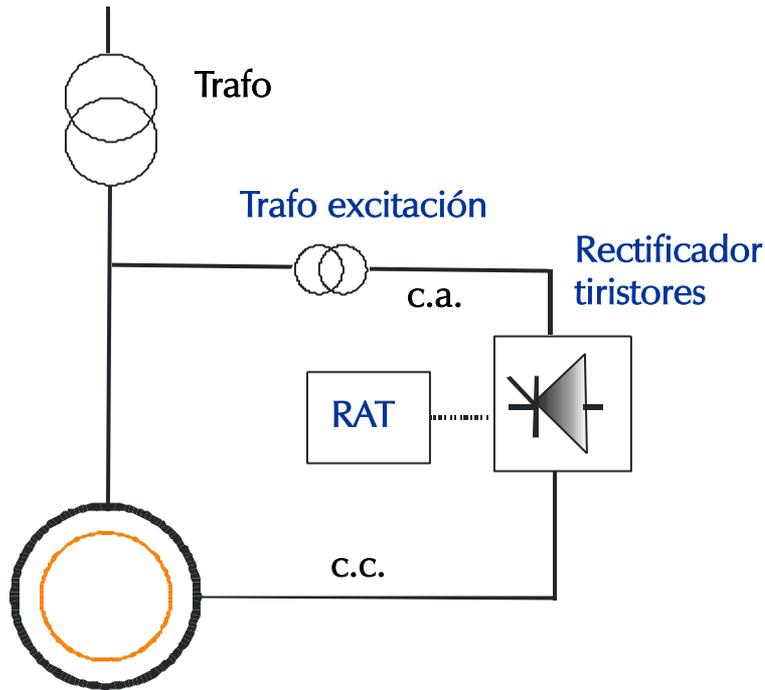
Excitatriz CC

Autoexcitada o excitación independiente

Chopper o rectificador de alterna (tiristores)



Excitación estática (o directa) autoexcitada



Generador
síncrono

- Muy habitual en grandes generadores
- Sistema de respuesta más rápida
- Sistema de excitación completamente autónomo, salvo en el arranque
- Solución estándar para excitaciones estáticas
- Desventaja: En generadores pequeños, en el caso de cortocircuitos cercanos.

RAT: Regulador Automático de Tensión

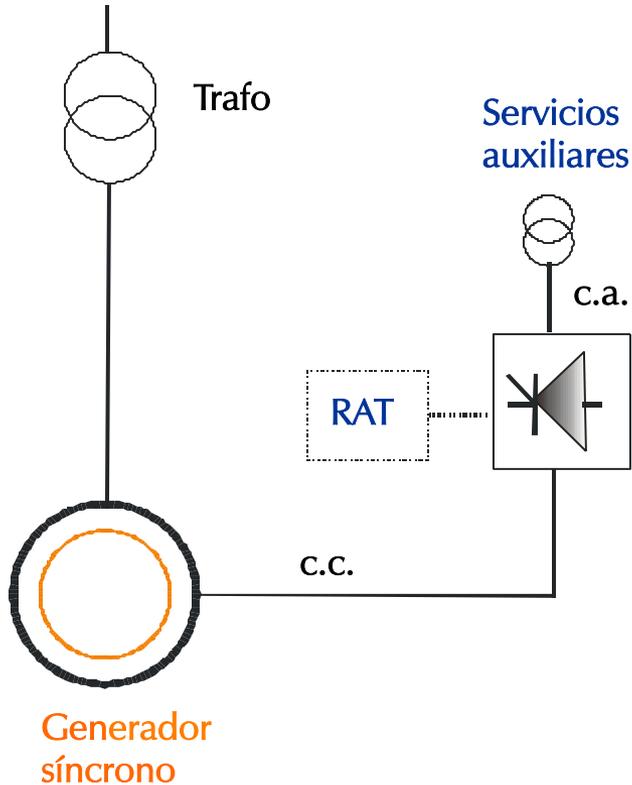


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.2 Sistemas de excitación



Excitación estática (o directa) independiente



- Alimentación de una fuente de tensión independiente. Tiene que tratarse de una barra segura

RAT: Regulador Automático de Tensión

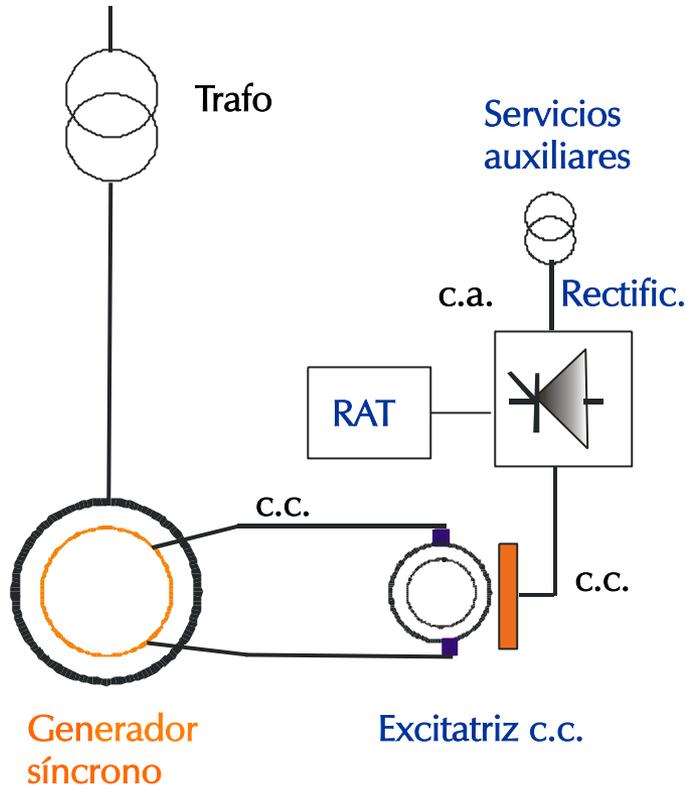


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.2 Sistemas de excitación



Excitación rotativa con excitatriz de c.c.

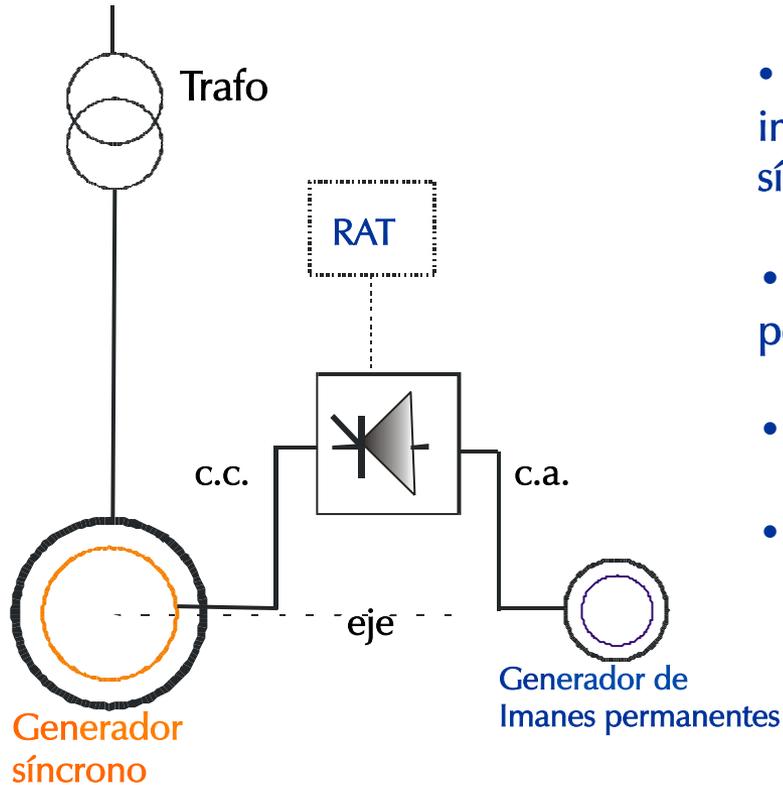


- Excitatriz CC. Excitación en su estator. Delgas y escobillas.
- Rectificador: Tiristores o transistores IGBT
- Generador síncrono con escobillas.
- Alimentación: SS. AA o excitatriz autoexcitada
- Potencia rectificador: 20-50 veces menor que en estática directa
- Aplicación: Generadores hidráulicos hasta 50 MVA. Máquinas antiguas.

RAT: Regulador Automático de Tensión



Excitación rotativa con con generador auxiliar en el mismo eje



- Alimentación proveniente de un generador de imanes permanentes acoplado en el mismo eje que el síncrono.
- Normalmente en excitaciones rotativas (poca potencia).
- Generador síncrono con escobillas.
- No necesario sistema de “compoundaje”

RAT: Regulador Automático de Tensión

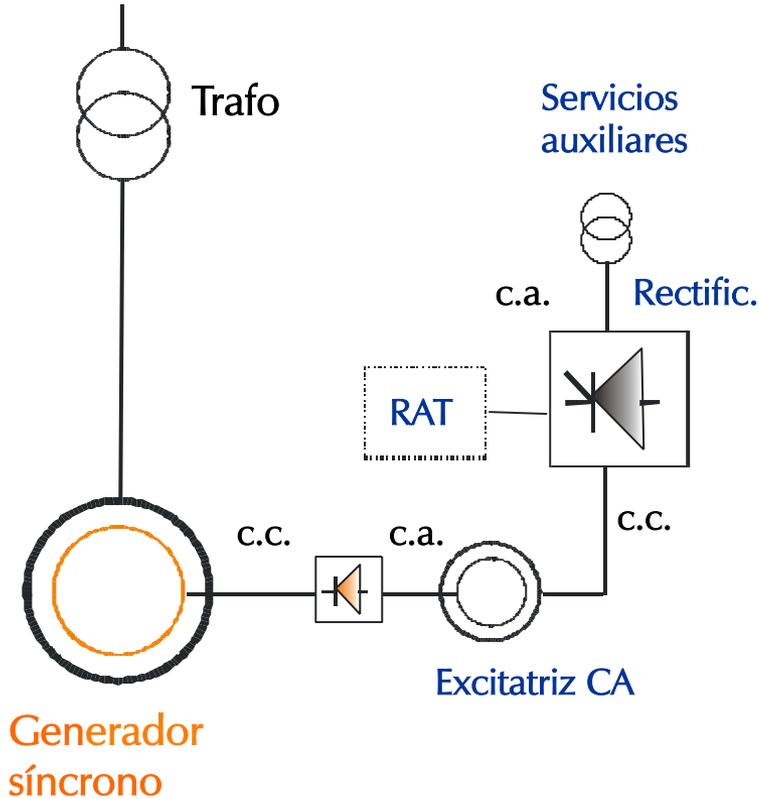


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.2 Sistemas de excitación



Excitación rotativa sin escobillas (brushless)



- Excitatriz CA. Excitación en estator. No se necesitan anillos rozantes en rotor ni escobillas en la excitatriz.
- El rotor de las 2 máquinas está montado en el mismo eje.
- Rectificador: Tiristores o transistores IGBT
- Alimentación: Trafo autoexcitación, SS. AA.
- Potencia rectificador: 20-50 veces menor que en estática directa
- Aplicación: Turboalternadores y generadores hidráulicos hasta 50 MVA

RAT: Regulador Automático de Tensión

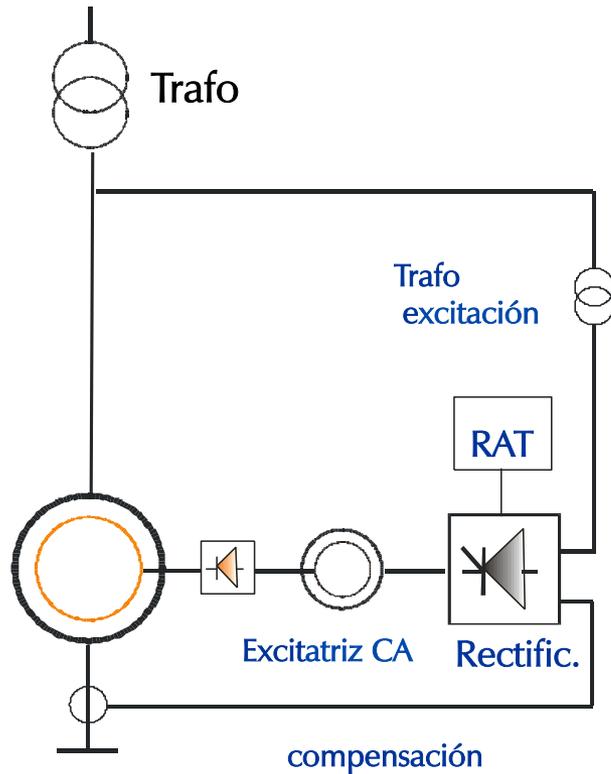


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.2 Sistemas de excitación



Excitación autoexcitada con compensación



Generador
síncrono

- Se añade un circuito de “compoundaje”.
Suministra una excitación proporcional a la corriente del generador
- Sostiene el flujo magnético del generador en el caso de un cortocircuito próximo
- Método habitual en excitaciones rotativas.
Raramente en excitaciones estáticas.

RAT: Regulador Automático de Tensión

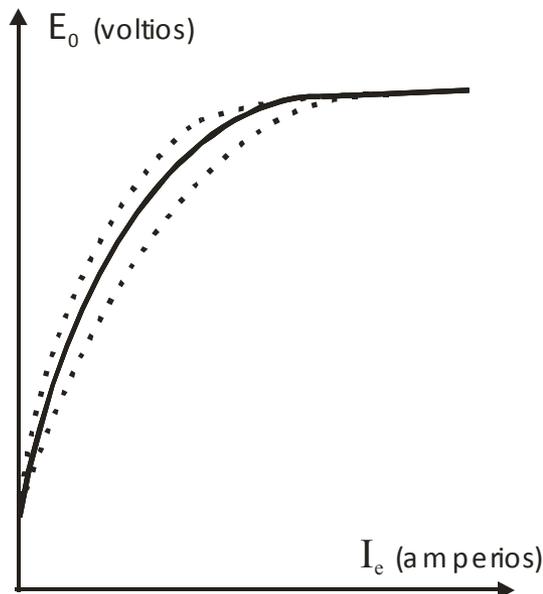


3.3 Principio de Funcionamiento



Principio de funcionamiento: en vacío y en carga

Característica de vacío $E = f(I_e)$: que representa la relación entre la f.e.m generada y la corriente de excitación, cuando la máquina funciona en vacío (el inducido no tiene corriente)



N: número de espiras

f: frecuencia de la fem inducida

Factor de forma

$$E_0 = 4.44 N f \Phi_m k_f$$

Es función de la corriente de excitación I_e



Principio de funcionamiento: en vacío y en carga

Característica en carga : Se produce una caída de tensión de salida del generador debida a la aparición de una corriente en el inducido que provoca:

- una **caída de tensión** en este circuito
- a la par que produce una f.m.m. que **reacciona con la del inductor** modificando el flujo del entrehierro.

1- **caída de tensión en el circuito**: Se produce en la resistencia y la inductancia de dispersión del estator

2- **reacción del inducido**: depende de la magnitud y de la fase de la corriente.

Carga resistiva: la reacción del inducido se suma en cuadratura a la f.m.m inducida

Carga inductiva: la reacción del inducido es desmagnetizante (se opone al inductor)

Carga capacitiva: la reacción del inducido es magnetizante (se suma al inductor)



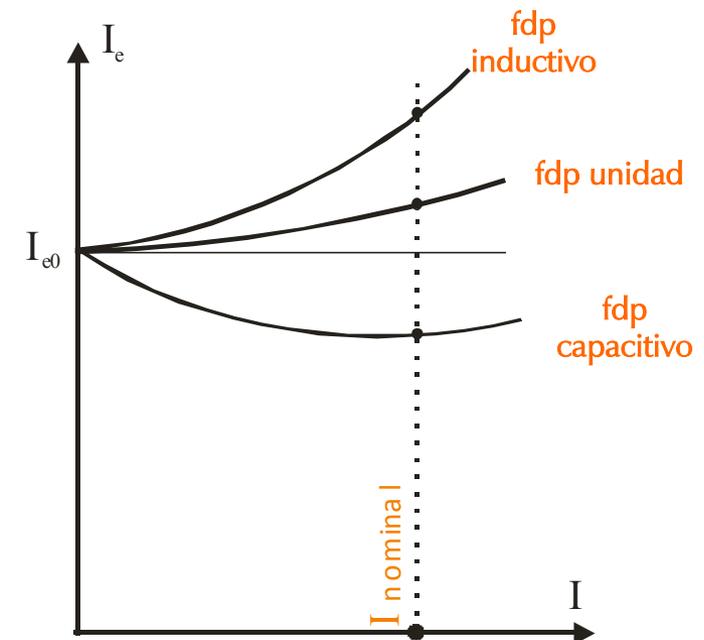
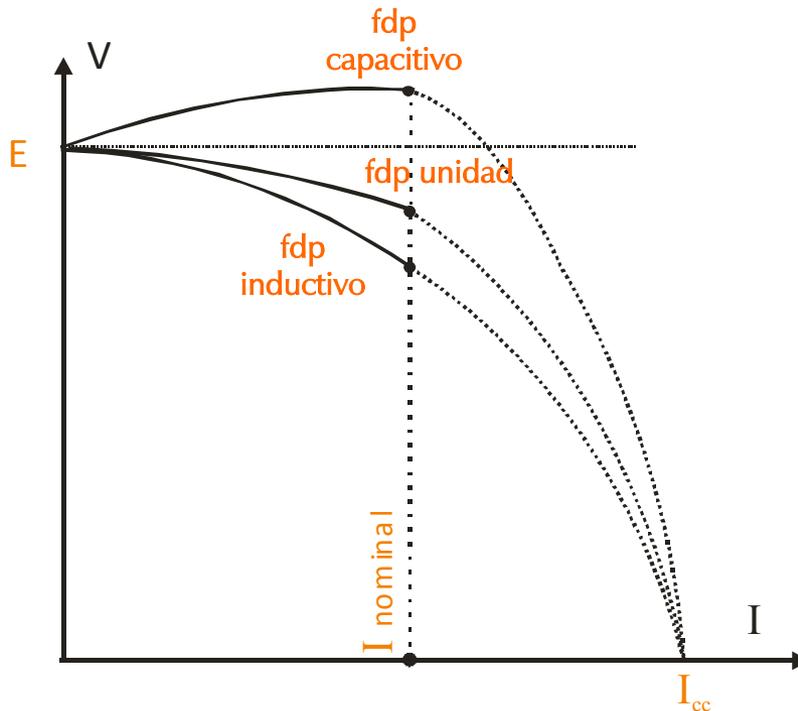
CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.3 Principio de funcionamiento



Principio de funcionamiento: en vacío y en carga

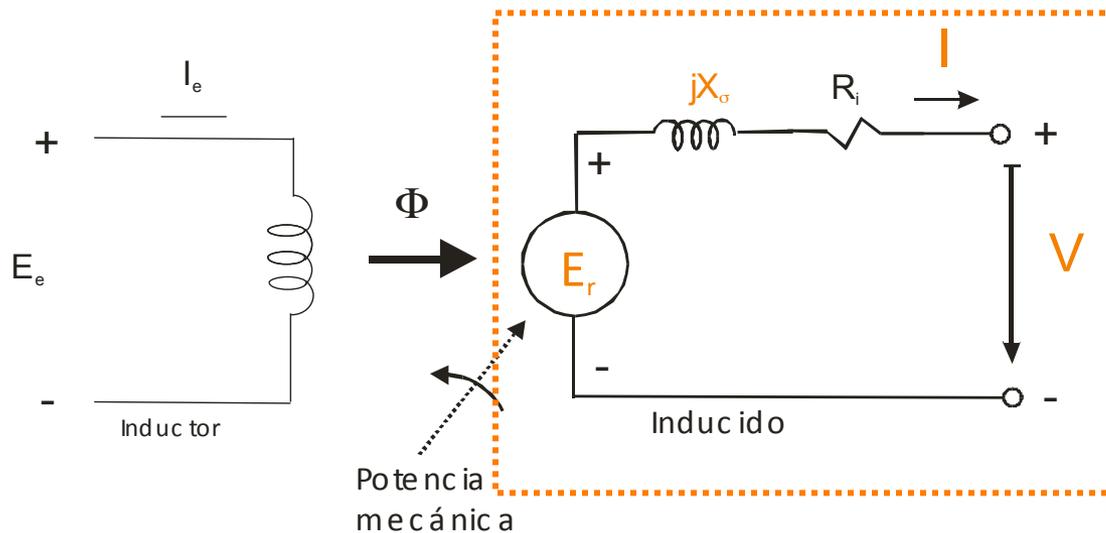
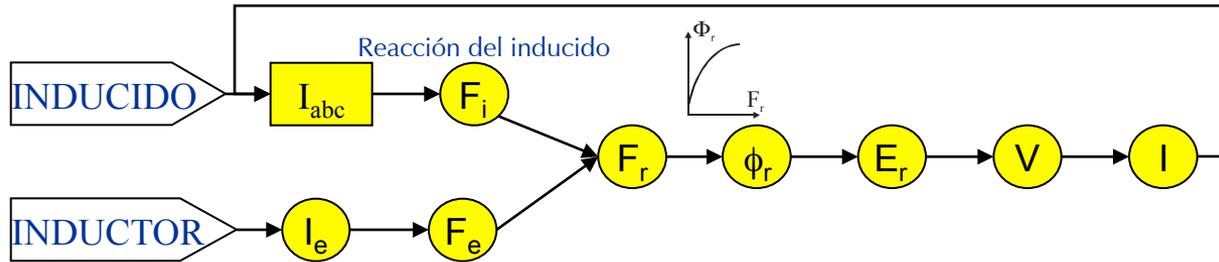
Característica externa $V=f(I)$: que representa la tensión en bornes en función de la corriente de carga, para una intensidad de excitación constante.



Si se desea mantener constante la tensión en bornas de la máquina será preciso variar de forma adecuada la correspondiente excitación



Relaciones funcionales y ecuación del diagrama fasorial



$$E_r = V + R_i I + j X_\sigma I$$

La fmm resultante F_r es la suma de la del inductor F_e y de la reacción del inducido F_i
 F_i y X_σ son desconocidos a priori (inconveniente)

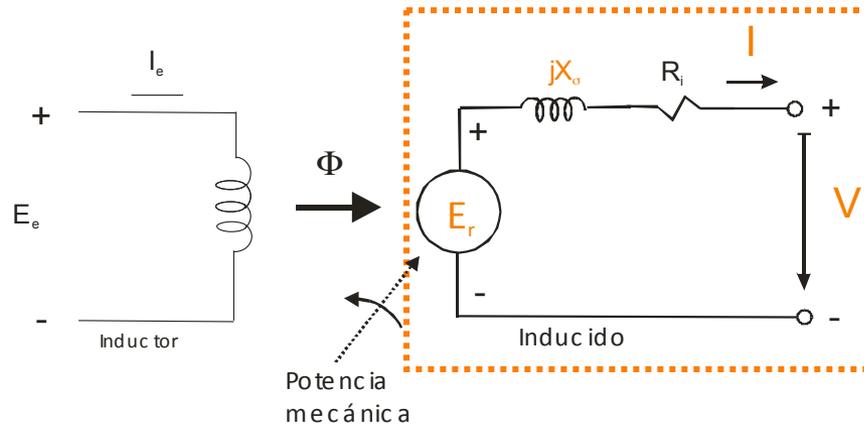


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.3 Principio de funcionamiento



Problema 2.9 (Generador síncrono)



$$E_r = V + R_i I_i + j X_{\sigma} I$$

Datos

Generador síncrono
3000 kVA, 6.600 V, 50 Hz y 2 polos
 $R_i = 0.07 \Omega$
 $X_{\sigma} = 0.7 \Omega/\text{fase}$
Curva de vacío: $E = 5800 F_e / (F_e + 9300)$
 $F_i = 13000 \text{ Av/polo}$ (plena carga)
Pto trabajo: plena carga y $\text{fdp} = 0.8 \text{ ind}$



Calcular

- Fem resultante E_r
- fmm total F_e necesaria en la excitación
- Si manteniendo fija la fmm anterior se desconecta la carga, ¿Qué fem E_0 aparecerá en la carga?



3.4 Circuito Equivalente

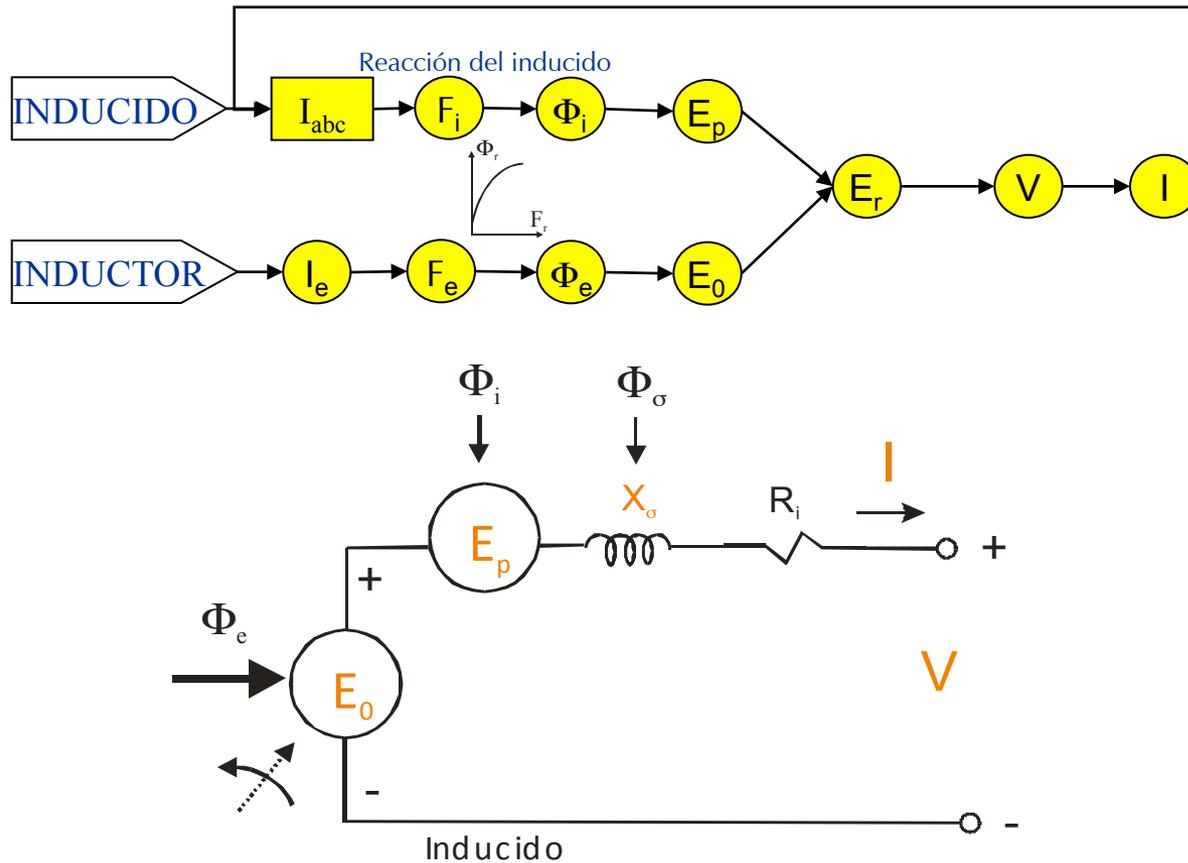


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.4 Circuito Equivalente



Análisis lineal: circuito equivalente (rotor liso)



Se busca poder calcular la regulación de tensión para diferentes cargas y diseñar el RAT
La máquina y el ajuste de regulación determina la I_{cc} y el ajuste de protecciones

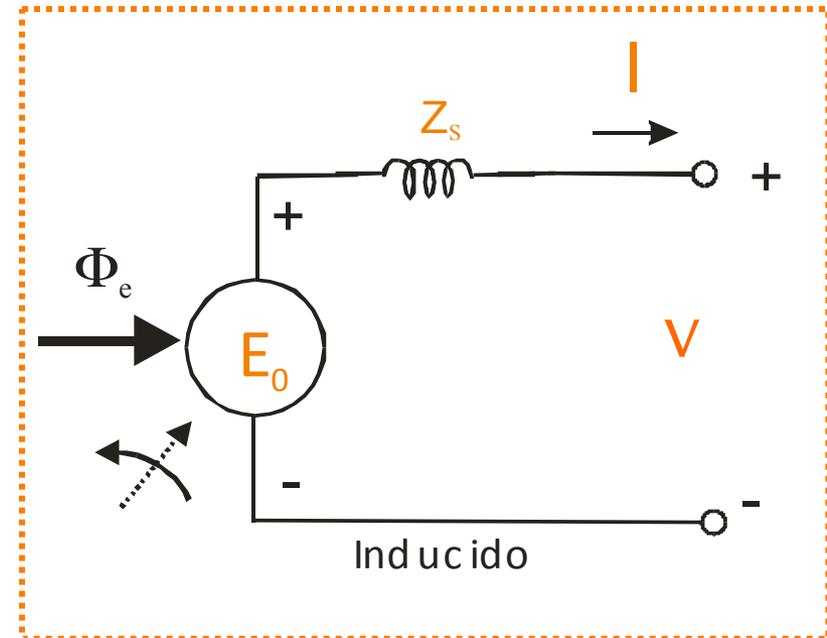
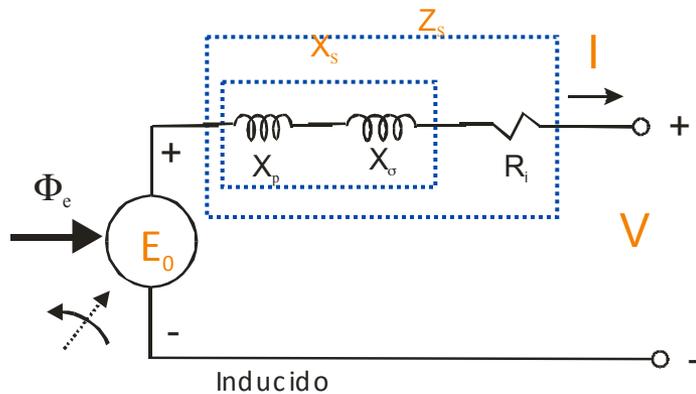


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.4 Circuito Equivalente



Análisis lineal: circuito equivalente (rotor liso)

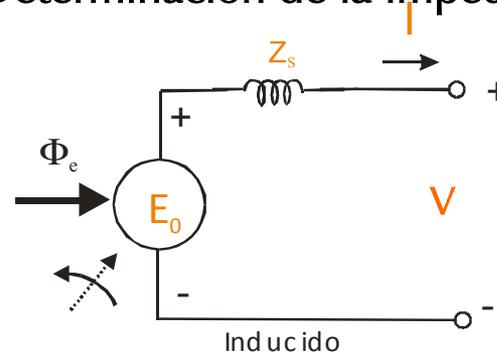


La reactancia síncrona X_s es una magnitud ficticia que representa en un único término los efectos combinados de dispersión y de reacción de inducido



3.4 Circuito Equivalente

Característica de vacío y cortocircuito de la máquina síncrona.
Determinación de la impedancia síncrona



Ensayo de vacío : Si se abre el circuito ($I=0$) la tensión medida V corresponderá a E_0 ($E_0=V$)

Ensayo de cortocircuito : Si se cortocircuita el modelo Thevenin ($V=0$) la impedancia síncrona se puede calcular en función de E_0 y de la corriente de cortocircuito (I_{cc})

$$Z_s = E_0 / I_{cc}$$

Nota: todas las magnitudes son por fase y todas dependen de la corriente de excitación I_e

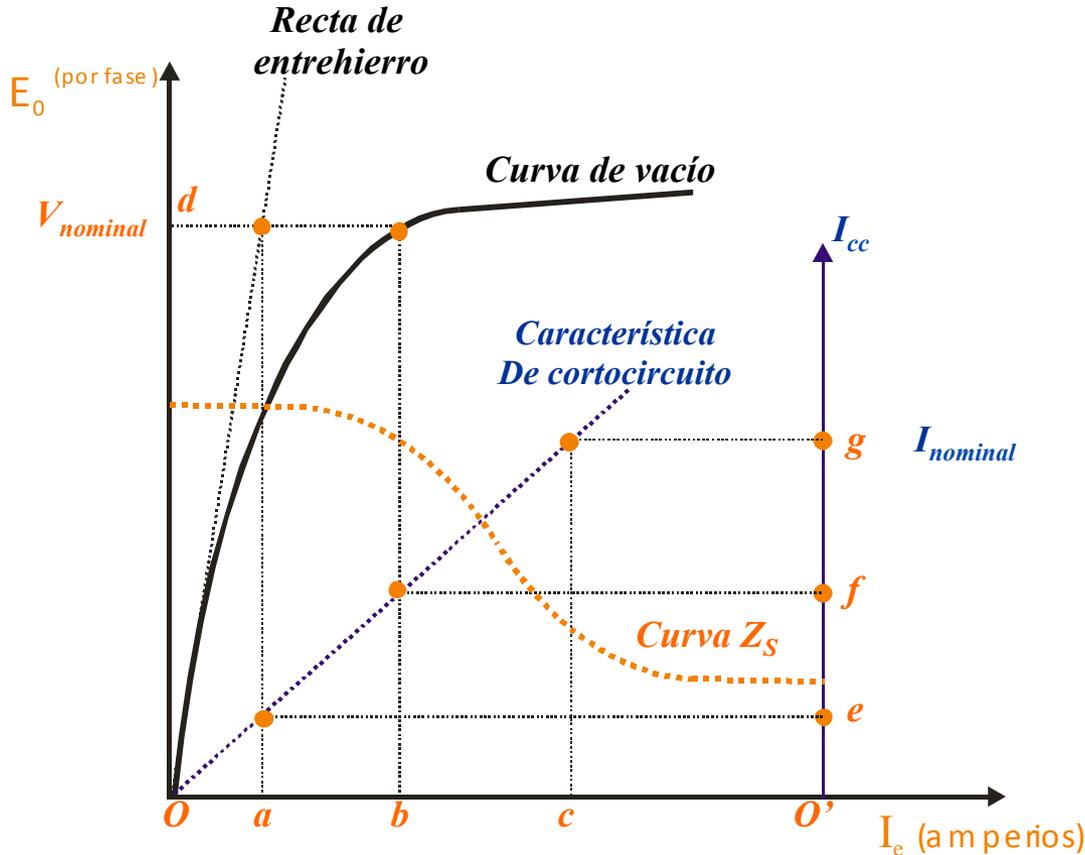
Para estudiar el comportamiento de la máquina es necesario determinar los parámetros E_0 y Z_s de su circuito equivalente



3.4 Circuito Equivalente

Característica de vacío y cortocircuito de la máquina síncrona.

Determinación de la impedancia síncrona $Z_s = E_0 / I_{cc}$



$$Z_s^{no_saturada} = Od / O'e$$

$$Z_s^{saturada} = Od / O'f$$

Nota: a veces se usa la relación de cortocircuito
SCR (short-circuit ratio) $SCR = 1/Z_s$ (p.u.)
Rotor cilíndrico $SCR = 0.5-0.8$
Polos salientes $SCR = 1.5$

El uso de la impedancia saturada da resultados más precisos que la no saturada

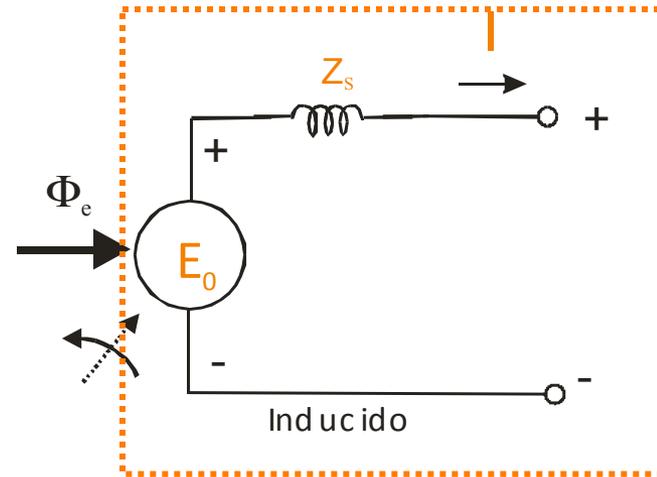


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.4 Circuito Equivalente



Problema 2.10 (Generador síncrono)



Datos

Generador síncrono en estrella
165 kVA, 950 V, 50 Hz

$R_i = 0.3 \Omega$

$I_e = 15 \text{ A}$ produce $I_{cc} = 200 \text{ A}$ y $E_0^{\text{línea}} = 780 \text{ V}$

Calcular

- Impedancia y reactancia síncrona
- Regulación a plena carga con $\text{fdp} = 0.8$ inductivo



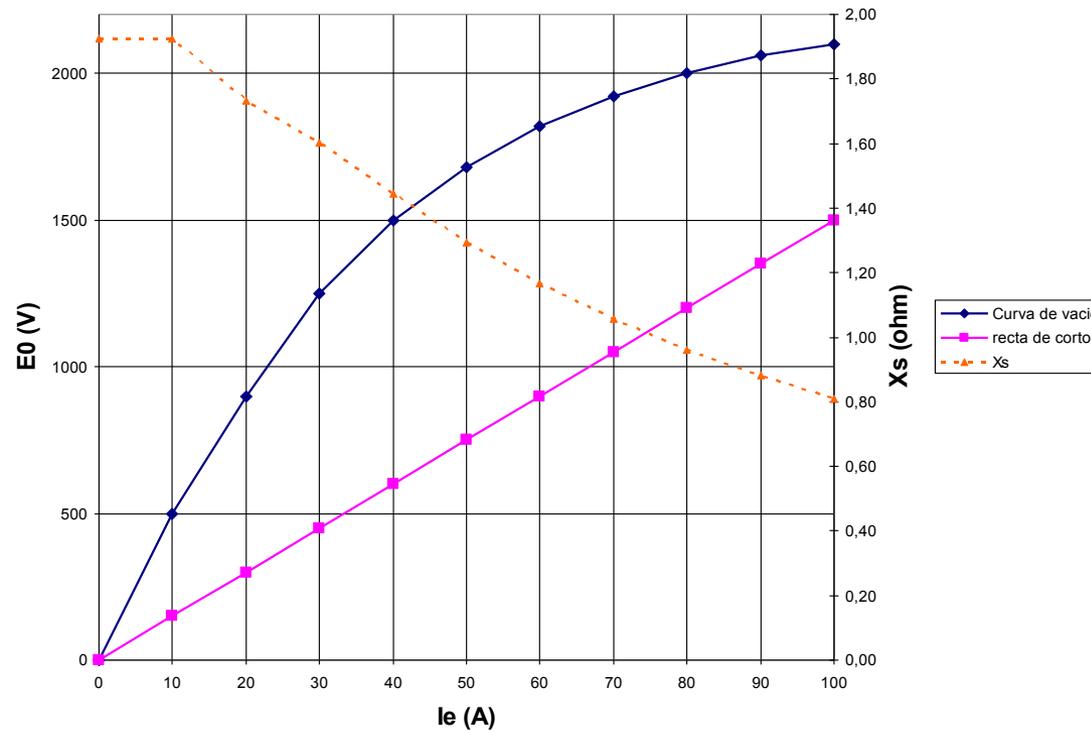
CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.4 Circuito Equivalente



Solución al problema 2.10 (Generador síncrono)

Características de vacío y cortocircuito



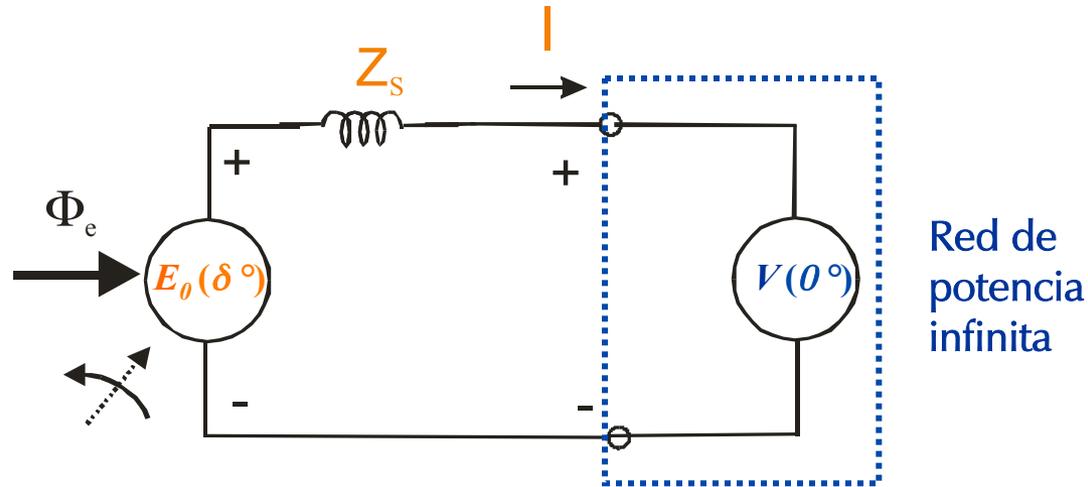


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.4 Circuito Equivalente



Potencia activa y reactiva



$$E_0 = V + j X_S I$$

$$S = 3 V I^* = P + jQ$$

$$P = \frac{3 E_0 V}{X_S} \text{sen } \delta$$

$$Q = 3 \frac{V (E_0 \text{cos } \delta - V)}{X_S}$$

P es proporcional al ángulo de carga (δ) y Q es proporcional a la “diferencia” de tensiones



3.5 Potencias de la Máquina



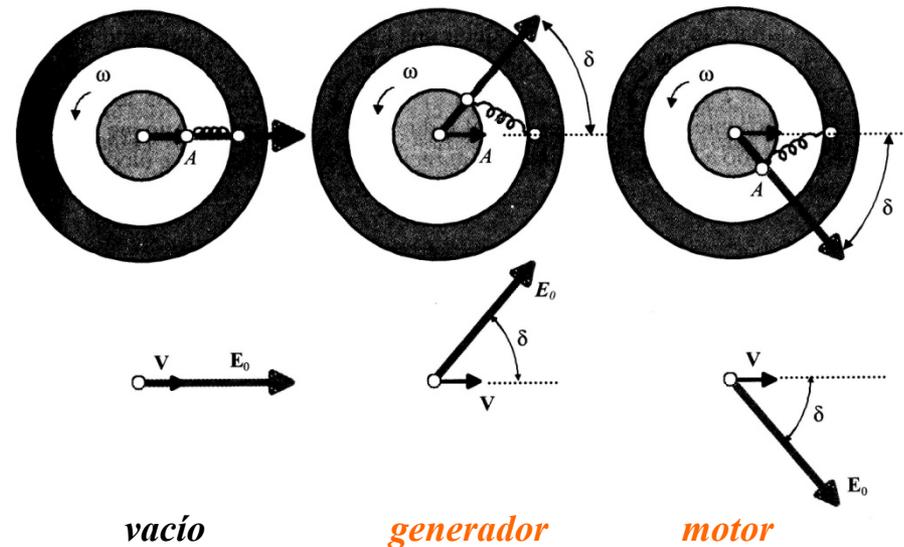
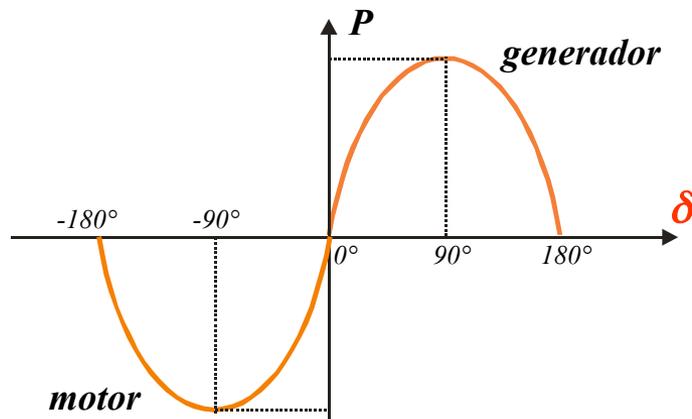
CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.5 Potencias de la máquina



Potencia activa y reactiva

$$P = \frac{3 E_0 V}{X_S} \text{sen } \delta$$



Analogía mecánica del funcionamiento de la máquina síncrona usando el ángulo de carga δ



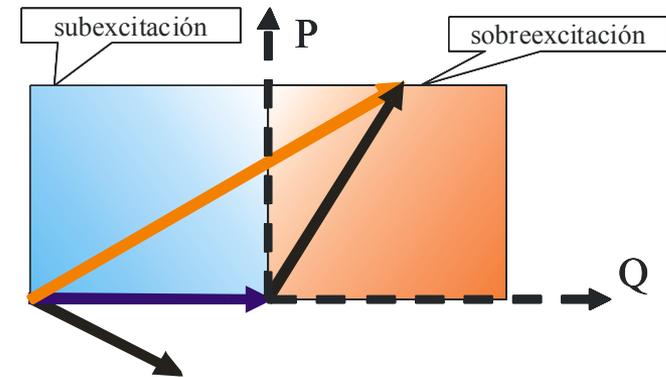
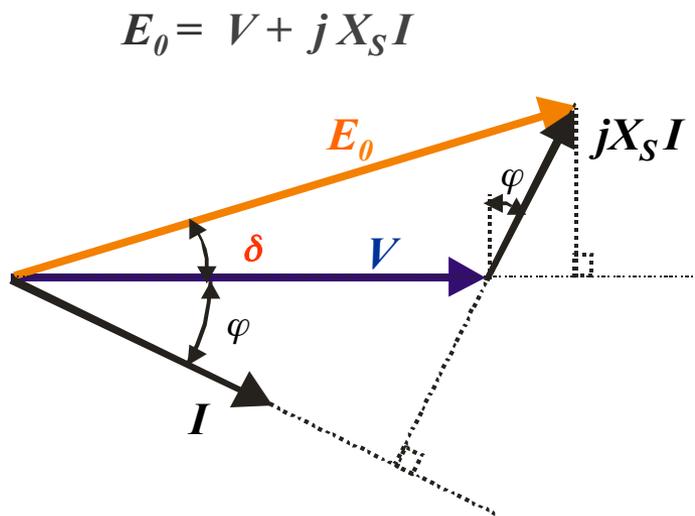
CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.5 Potencias de la máquina



Potencia activa y reactiva

$$Q = 3 \frac{V(E_0 \cos \delta - V)}{X_S}$$



Si la proyección de E_0 sobre V es mayor que ésta el generador está sobreexcitado y genera Q
en caso contrario está subexcitado y absorbe Q

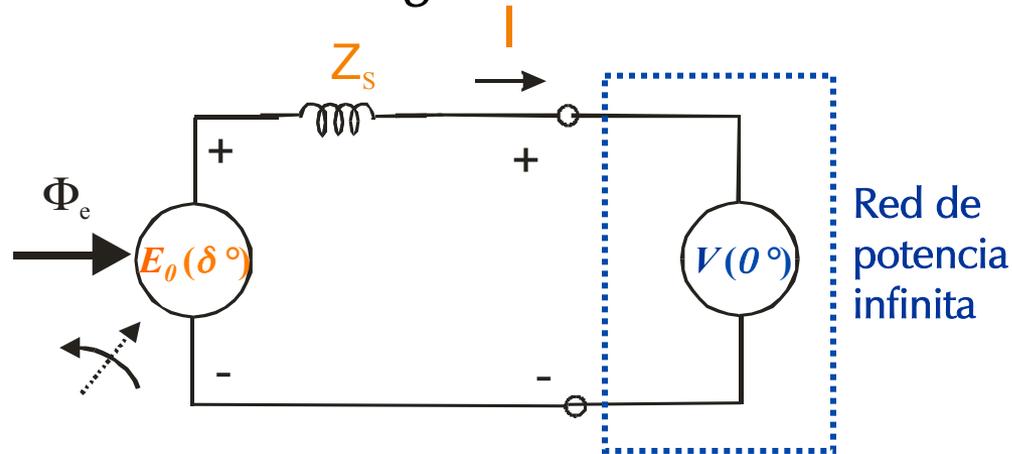


CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.5 Potencias de la máquina



Problema 2.11 (Potencia del generador síncrono)



Datos

Generador trifásico síncrono en estrella
 $V^l=11$ kV, 50 Hz
 $Z_s=0+j 10$ Ω /fase
Para una determinada excitación produce
 $I=250$ A y $\text{fdp}=1$
Posteriormente manteniendo P constante se
eleva la excitación hasta que $I=300$ A

Calcular

- fdp cuando suministra $I=300$ A
- fems y ángulos de carga en ambas situaciones
- Potencias activa y reactiva suministradas



3.6 Límites de Capacidad



CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.6 Límites de Capacidad



Límites de capacidad del generador síncrono

1- Límite de corriente de estator

$$S \cdot S^* \longrightarrow$$

$$(3 V I)^2 = P^2 + Q^2$$

$$S = 3 V I^* = P + jQ$$

2- Límite de corriente de rotor

$$\overset{\wedge 2 \text{ y sumar}}{\longrightarrow}$$

$$\left(Q - \frac{3V^2}{X_S} \right)^2 + P^2 = \left(\frac{3E_0 V}{X_S} \right)^2$$

$$Q = 3 \frac{V(E_0 \cos \delta - V)}{X_S}$$

$$P = \frac{3E_0 V}{X_S} \sin \delta$$

Son los límites de calentamiento del estator, del rotor y de los límites de estabilidad de la máquina



CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.6 Límites de Capacidad



Límites de capacidad del generador síncrono

3- Límite de estabilidad
teórico



$$P = \frac{3 E_0 V}{X_s} \text{sen } \delta$$

4- Límite máximo
de la turbina



$$P_{max} = P_{turbina}$$

Son los límites de calentamiento del estator, del rotor y
de los límites de estabilidad de la máquina



CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.6 Límites de Capacidad



Límites de capacidad del generador síncrono (en p.u.)

1- Límite de corriente
de estator



$$(VI)^2 = P^2 + Q^2$$

2- Límite de corriente
de rotor



$$\left(\frac{Q - I}{X_S} \right)^2 + P^2 = \left(\frac{E_0}{X_S} \right)^2$$

3- Límite de estabilidad
teórico



$$P = \frac{E_0}{X_S} \text{ sen } \delta$$

4- Límite máximo
de la turbina



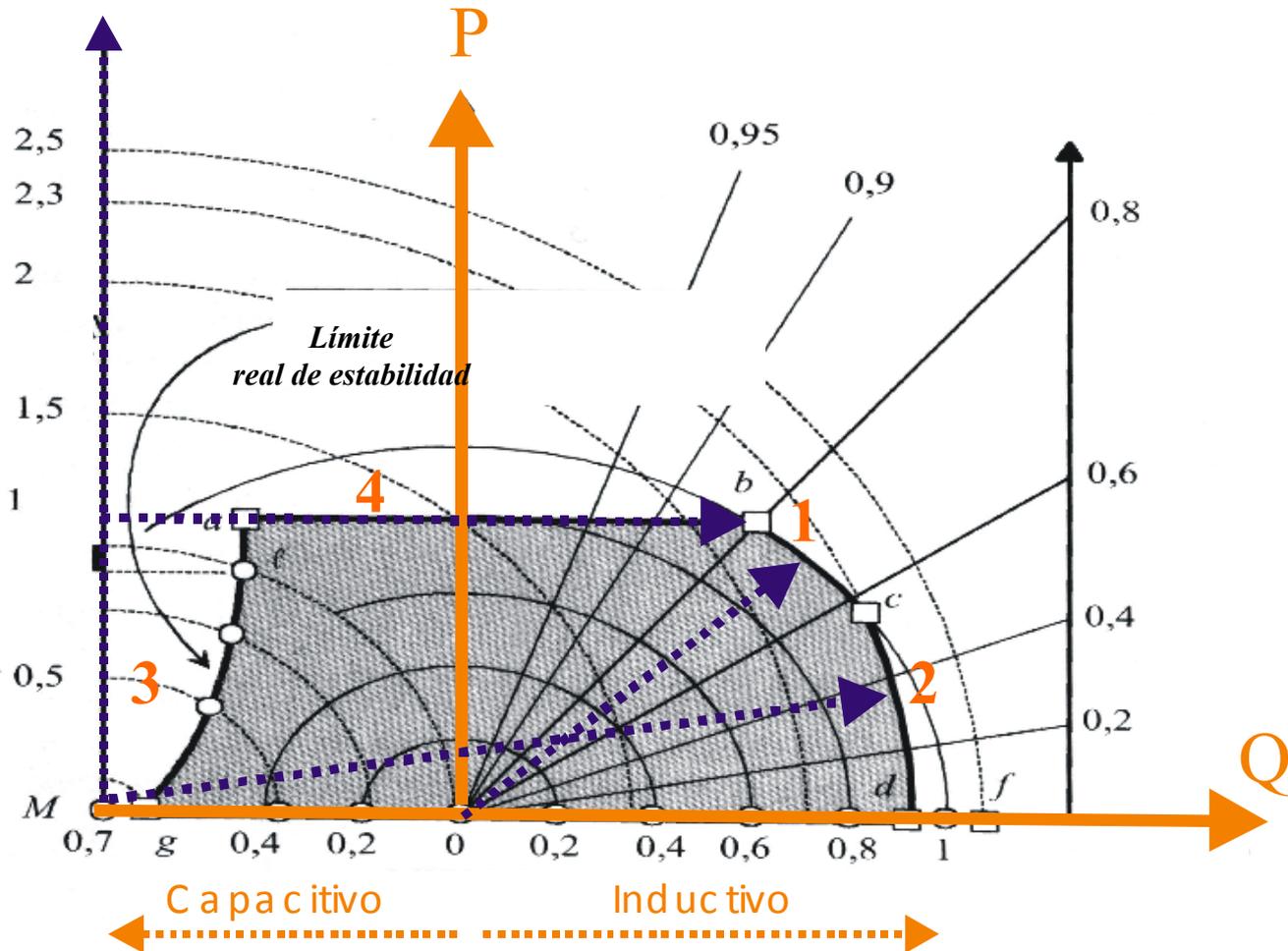
$$P_{max} = P_{turbina}$$

Todas las variables están en p.u



3.6 Límites de Capacidad

Límites de capacidad del generador síncrono (en p.u.)



Todas las variables están en p.u

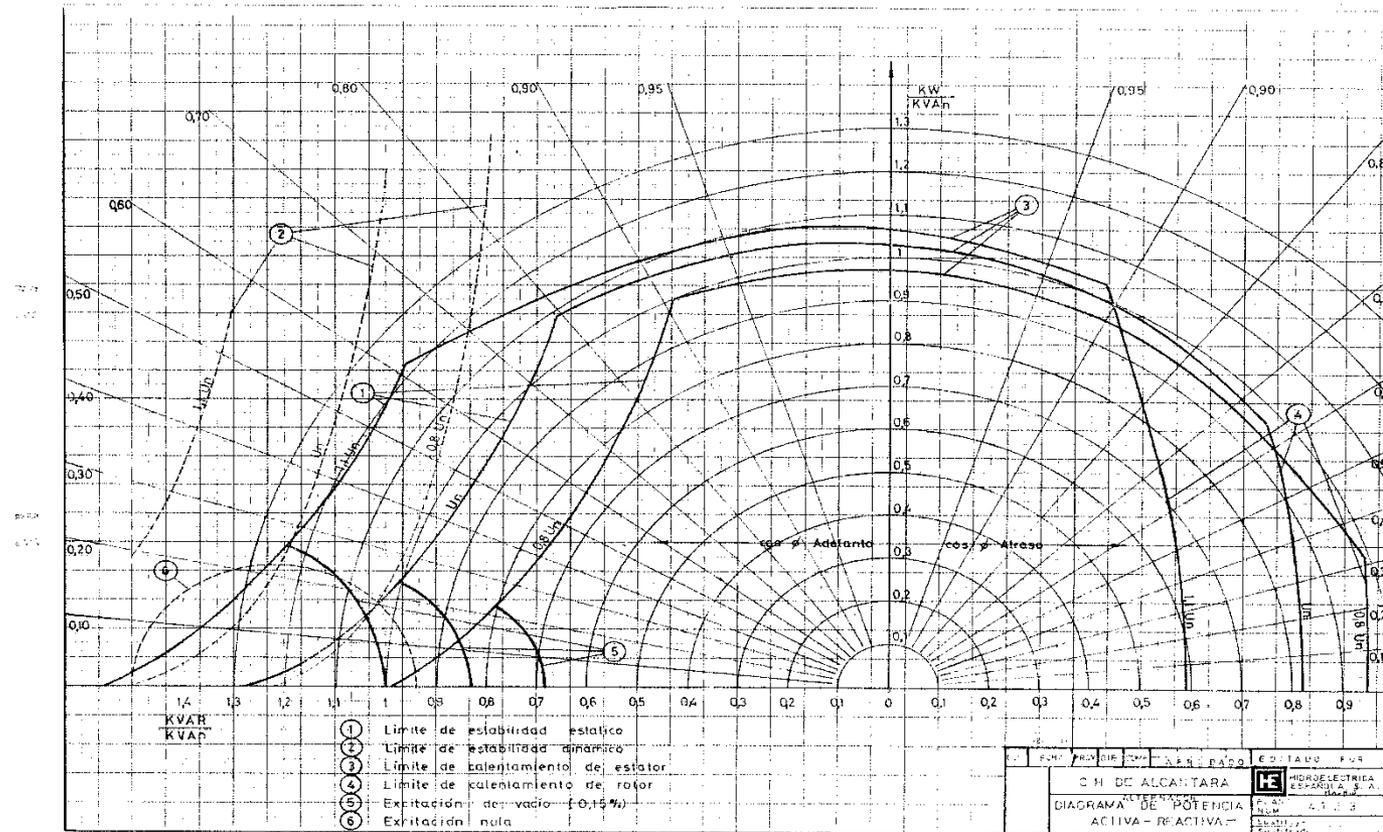


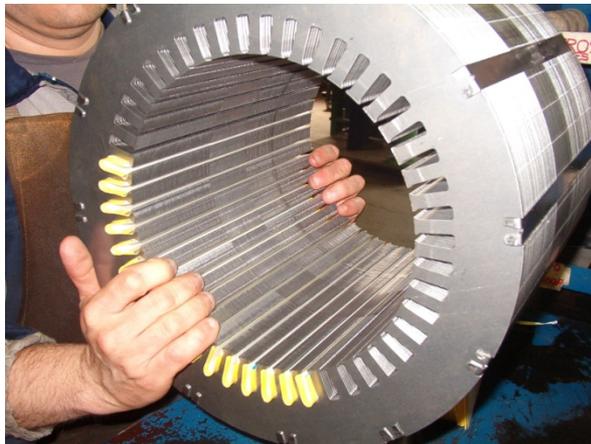
CAPÍTULO 3 Máquinas Síncronas

3.6 Límites de Capacidad



Límites de capacidad del generador síncrono (límites de un generador en activo)





Máquinas Eléctricas de Corriente Alterna | David Santos