

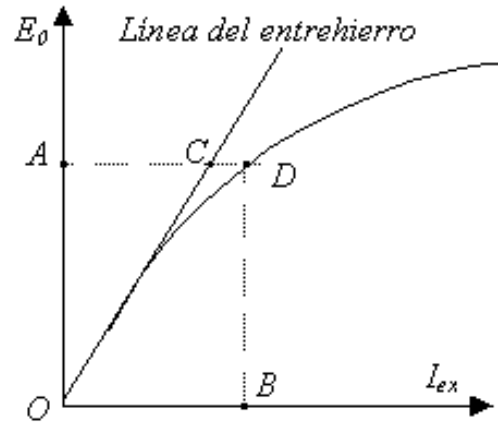
MÁQUINAS SÍNCRONAS

Curvas características

1°) Característica en vacío:  $E_0 = f(I_{ex})$

Estudia la dependencia de la Fem. en función de la corriente de excitación  $I_{ex}$ . Para ello, a la máquina se la tiene girando a la velocidad síncrona  $n_s$  sin carga. Esta curva, para bajos valores de excitación, es relativamente lineal, porque la fmm. necesaria para vencer la reluctancia del hierro es prácticamente despreciable frente al aire del entrehierro.

En cambio, para grandes valores de excitación, el circuito magnético se satura y tiende asintóticamente a un valor constante. Si se traza una recta tangente a la curva en su primer tramo esta representa lo que se llama "línea del entrehierro" y determina su característica (recordar que la característica magnética en el aire es lineal).-



Para inducir una  $E = OA$  es necesario una fmm. =  $OB$ , de la cual  $AC$  es necesaria para hacer circular el  $\Phi$  a través del entrehierro (aire) y  $CD$  en el hierro. Se observa que son mucho más grandes los Amp.vta. necesarios para el entrehierro que para el hierro del circuito magnético.-

Esta curva sirve para:

- 1- Conocer el grado de saturación del circuito magnético.
- 2- Conocer el límite de  $I_{ex}$ . y con ella el posterior dimensionamiento de la excitatriz.-

2°) Característica de cortocircuito (c.c.):  $I = f(I_{ex})$

Estudia la dependencia de la corriente de carga en función de la excitación. Las condiciones son:

- bornes en c.c
- girando a velocidad nominal síncrona ( $n_s$ )
- Corriente nominal  $I_n$

Suponiendo:

- La caída óhmica despreciable ( $R = 0$ ). Como la  $R$  es mucho menor que las reactancias, podemos despreciarla.
- La tensión:  $U = 0$

El circuito equivalente y diagrama vectorial quedan:

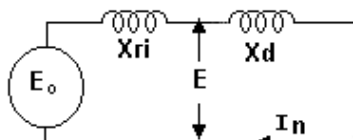


fig. 2

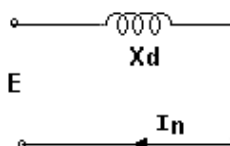


fig. 3

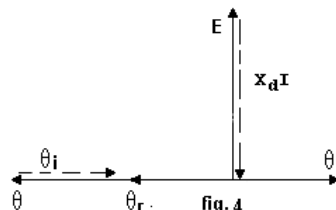


fig. 4

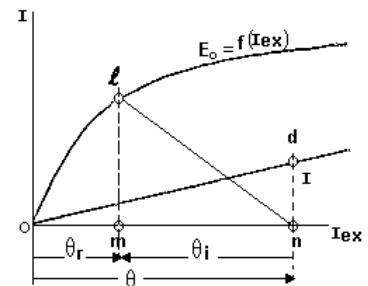


fig. 5

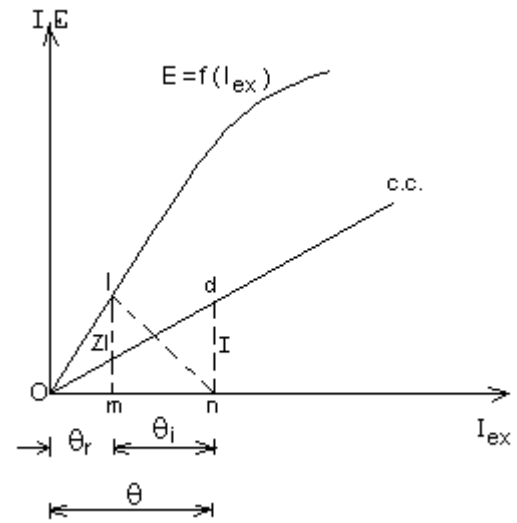
La fmm. por reacción de inducido  $\theta_i$  es opuesta a la principal  $\theta$  por reacción de inducido con carga inductiva pura (Fig. 2).

El campo resultante  $\theta - \theta_i = \theta_r$  (1) induce una Fem.  $E$  que equilibra la caída del circuito

$$\bar{E} = jX_d \bar{I} = Z \bar{I}$$

Si en el sistema de ejes cartesianos (Fig. 3) trazamos la característica en vacío  $E_o = f(I_{ex})$  y en ella tomamos el segmento  $lm = X_d I = ZI$ , el segmento  $Om$  será la fmm. necesaria para inducir  $E$  que equilibre a  $X_d I$ . ó sea  $Om = \theta_r$  (ver diagrama vectorial)

Si hacemos  $On = \theta$ , será:  $mn = \theta - \theta_r = \theta_i$  (según 1). Si a partir de  $n$  elevamos  $I$  obtenemos el punto  $d$ , que unido con  $O$  determina la recta de cortocircuito.



Es una línea recta porque en la máquina Fig. 3 cortocircuitada, la Fem. inducida en el estator y el flujo principal son pequeños, por consiguiente no hay saturación del hierro.-

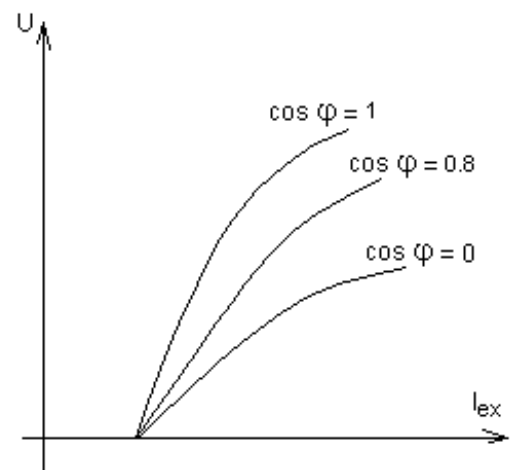
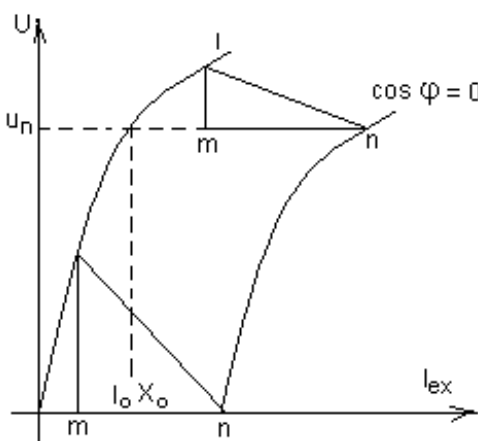
El  $\triangle lmn$  se llama "Triángulo de Potier", y tiene a:  
 $mn =$  fmm por reacción de inducido  
 $X_d = mn / I =$  reactancia de dispersión

Por lo tanto esta curva sirve para determinar la reactancia de dispersión.-

### 3° Característica en carga: $U = f(I_{ex})$

Analiza la dependencia entre la tensión ( $U$ ) y la excitación ( $I_{ex}$ ) para  $\cos\phi$  e  $I$  constante.-

Partiendo de la característica en vacío  $E = f(I_{ex})$ , la de carga se diferencia por las caídas entre  $U$  y  $E$ .



Conociendo la característica en vacío y el triángulo de Potier se puede trazar la característica en carga a  $\cos\phi = 0$ , porque en estas condiciones:

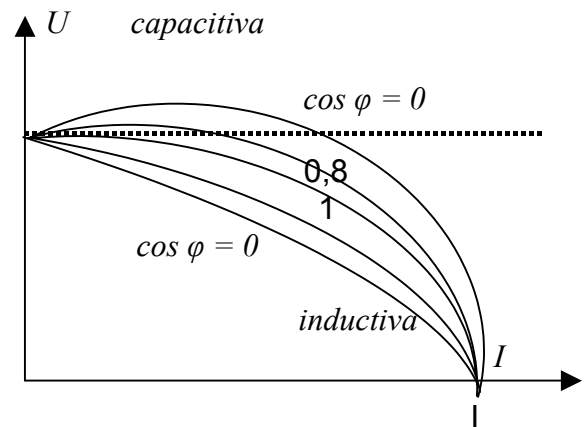
- a) la fmm de inducido es opuesta a la fmm. del campo (reacción de inducido con carga inductiva pura) como en cortocircuito.-
- b) entonces para  $I = cte.$  la caída de tensión es cte. ( $Im$ ) y la reacción de inducido ( $mn$ ) también es cte., luego el triángulo es constante, por consiguiente desplazándolo a lo largo de  $E_o = f(I_{ex})$  obtenemos  $U = f(I_{ex})$  para  $\cos \varphi = 0$ .

Para otros estados de corriente, el triángulo varía y las curvas toman la forma de la figura, debiéndose estas variaciones a que, al aumentar  $I$ , aumenta  $Z.I$  y la reacción de inducido, la  $I_{ex}$  aumenta al disminuir el  $\cos \varphi$  para mantener  $U = cte.$

**4° Característica externa**  $U = f(I)$  ( $I_{exc} = cte.$  ;  $\cos \varphi = cte.$ .)

Nos relaciona la tensión  $U$  en función de la corriente de carga  $I$  para excitación, frecuencia y  $\cos \varphi$  constantes.

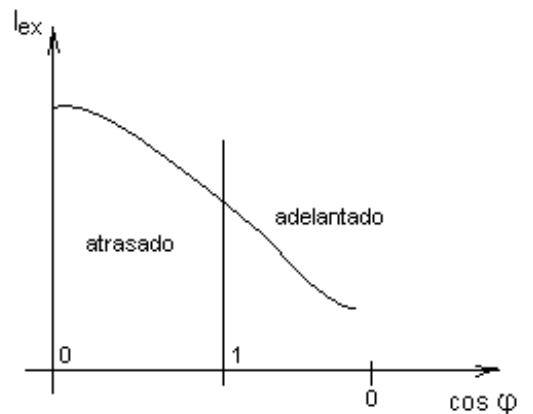
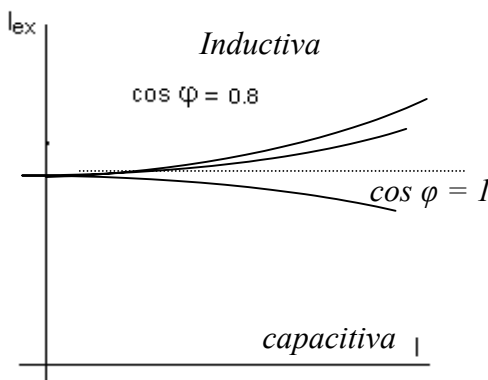
El generador ideal sería aquel tal que, bajo cualquier carga, mantuviese constante la tensión (línea de trazos). Pero en las máquinas síncronas sabemos que con carga capacitiva, por reacción de inducido, los flujos se suman y por consiguiente aumenta la tensión (curvas superiores) hasta el extremo en cortocircuito que la tensión se hace cero



Lo opuesto ocurre con cargas inductivas, en que los flujos se restan y la tensión disminuye (curvas inferiores).

Conclusión: el generador síncrono no genera  $U = cte.$ , ésta depende del tipo de carga que posea.-

**5° Curva de regulación:**  $I_{ex} = f(I)$  ( $U = cte.$  ;  $U = cte.$ )  
 $I_{ex} = f(\cos \varphi)$  ( $I = cte.$  ;  $U = cte.$ )



Estudia Las relaciones entre la excitación y la corriente de carga y  $\cos \varphi$  para  $U$  y  $\cos \varphi$  cte. en el primer caso, e  $I$  y  $U$  cte. para el segundo. Nuevamente la característica ideal es aquella en que no existe, sería necesario variar la excitación cualquiera fuera la carga o  $\cos \varphi$  (línea punteada).

Pero en la máquina síncrona, por reacción de inducido, con carga inductiva es necesaria aumentar la excitación para tener  $U = \text{cte}$ . Y viceversa con carga capacitiva. Lo mismo ocurre al variar el  $\cos \phi$  (ver figuras).

Conclusión: los generadores síncronos deben tener dispositivos que, detectando las variaciones y tipos de carga, actúen sobre la excitación para poder mantener  $U = \text{cte}$ .

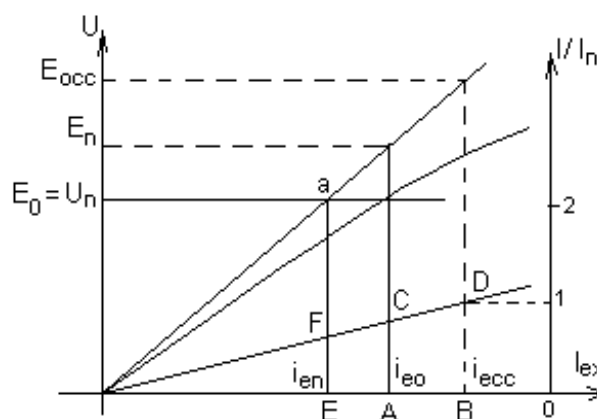
Las tendencias de estas curvas se explican por la reacción de inducido.

**6°) Relación de cortocircuito:**

Caracteriza principalmente la influencia de la reacción de inducido sobre el sistema de excitación. Se define como relación de cortocircuito ( $R_{CC}$ ) al cociente entre la  $I_{ex}$  para obtener  $U_n$  en circuito abierto y la  $I_{ex}$  para obtener la  $I_n$  en cortocircuito.

Refiriéndonos al diagrama en que se han trazado Las características en vacío, la recta del entrehierro y la característica en cortocircuito, la  $R_{CC}$  es:

$$R_{CC} = \frac{I_{ex} \text{ para obtener } U_n \text{ en circuito abierto}}{I_{ex} \text{ para obtener } I_n \text{ en corto circuito}} = \frac{I_{ex.OC}}{I_{ex.CC}}$$



- La  $I$  está expresada en p.u (por unidad)

Por semejanza de triángulos:  $R_{CC} = \frac{\overline{OA}}{\overline{OB}} = \frac{\overline{CA}}{\overline{DB}} = \frac{\overline{CA}}{1} = \overline{CA}$

luego la:  $R_{CC}$  para máquina saturada será el segmento:  $\overline{CA}$

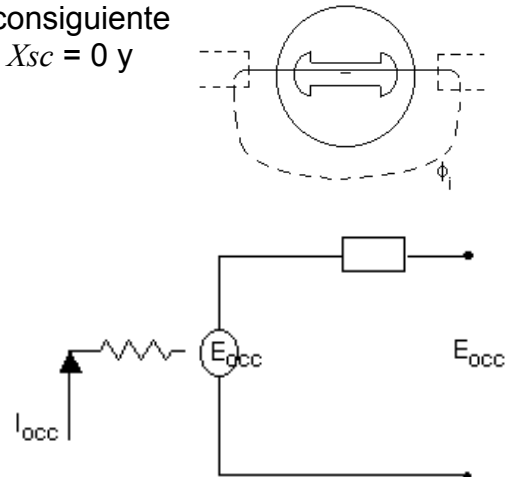
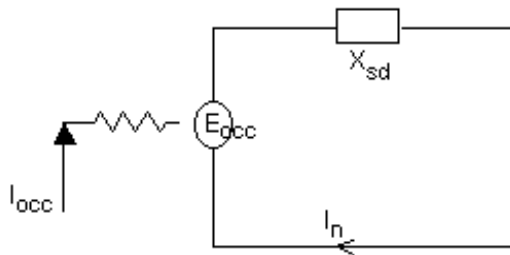
$R_{CC}$  para máquina no saturada (línea del entrehierro) será:  $\overline{FE}$

- Determinación de la reactancia síncrona de eje directo:  $X_{sd}$

Esta puede determinarse a partir de las características en vacío y en cortocircuito.

La corriente de excitación  $\overline{OE}$  induce la f.e.m.  $U_n$  en el estator a circuito abierto. Cuando el estator está en cortocircuito, con la misma excitación  $\overline{OE}$ , la f.e.m inducida en el estator es la misma pero se consume en la caída debida a la impedancia síncrona:

$U_n = Z \cdot I$ . Recordando que  $R \ll X$  y que al estar en cortocircuito corresponde a carga inductiva pura, es decir el  $\Phi_1$  es opuesto al  $\Phi$  y por consiguiente en el eje de los polos, o sea solo existe  $X_{sd}$ , ya que  $X_{sc} = 0$  y corresponde escribir  $U_n = X_{sd} I$ .



Luego:  $X_{sd} = \frac{E_{0cc}}{I_n}$ , despejando  $E_{0cc}$  y dividiendo por  $U_n$ ,

$$\frac{E_{0cc}}{U_n} = \frac{X_{sd} \cdot I_n}{U_n} = \frac{X_{sd}}{U_n / I_n} = \frac{X_{sd}}{Z_n} \text{ que en p.u. será } \frac{E_{0cc}}{U_n} = X_{sd} \text{ por unidad (1)}$$

de la semejanza de triángulos se deduce:  $R_{CC} = \frac{I_{ex.OC}}{I_{ex.CC}} = \frac{E_n}{E_{0.cc}}$

Multiplicando y dividiendo por  $U_n$ , reemplazando (1) y por semejanza de triángulos, **para máquina saturada:**

$$R_{CC} = \frac{E_n \cdot U_n}{E_{0.cc} \cdot U_n} = \frac{E_n}{U_n} \cdot \frac{1}{X_{sd}} = \frac{I_{ex.OC}}{I_{ex.CC}} \cdot \frac{1}{X_{sd}}$$

$$R_{CC} = \frac{I_{ex.OC}}{I_{ex.CC}} \cdot \frac{1}{X_{sd}}$$

Para máquina no saturada:  $I_{ex.OC} = I_{ex.n}$

$$R_{ccn} = 1 / X_{sd}$$

Valores típicos: Turbos: 0.5 a 0.7; polos sal: 1 a 1.4; compens. sincron.: 0.4

- Consecuencias para bajos valores de  $R_{CC}$ :

- 1) Mayores variaciones de tensión con las fluctuaciones de la carga.
- 2) Menor estabilidad para marcha en paralelo.
- 3) Menor tamaño y costo.

7°) **Variación de tensión**

También llamado "regulación", estudia la elevación de tensión cuando la máquina, trabajando a plena carga, se elimina ésta totalmente, en condiciones de excitación, velocidad constantes.



$$(3) CD = U \operatorname{sen} \delta = X_{sc} I_c \quad \therefore I_c = \frac{U}{X_{sc}} \operatorname{sen} \delta$$

$$(4) OC = U \cos \delta = E_0 - X_{sd} I_d \quad \therefore I_d = \frac{E_0 - U \cdot \cos \delta}{X_{sd}}$$

introduciendo (2), (3) y (4) en (1) queda:

$$P_{em} = UI \cos \varphi = U I_d \operatorname{sen} \delta + U I_c \cos \delta =$$

$$= U \cdot \left[ \frac{(E_0 - U \cos \delta)}{X_{sd}} \right] \operatorname{sen} \delta + U \cdot \left( \frac{U}{X_{sc}} \cdot \operatorname{sen} \delta \right) \cos \delta$$

(recordando que  $\operatorname{sen} 2\alpha = 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha$ )

$$P_{em} = \frac{U \cdot E_0}{X_{sd}} \cdot \operatorname{sen} \delta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_{sd} - X_{sc}}{X_{sd} \cdot X_{sc}} \cdot \operatorname{sen} 2\delta$$

Para rotor cilíndrico, como no hay espacio interpolar,

es:  $X_{sd} = X_{sc}$  la potencia será:  $P_{em} = \frac{U \cdot E_0}{X_{sd}} \cdot \operatorname{sen} \delta$

que para excitación constante,  $E_0 = \text{cte.}$  queda:

$$P_{em} = f(\operatorname{sen} \delta)$$

De las ecuaciones se deduce que, cuando  $I_{ex} = 0$  ;  $E_0 = 0$

$M_{em} = 0$  para máquina con rotor cilíndrico y  $M_{em} \neq 0$  para la de polos salientes. Esto nos indica que, como motor, la de polos salientes puede funcionar sin excitación, no así la de rotor liso. Los motores síncronos, sin arrollamiento de excitación, dan origen a los motores de reluctancia, en los que el momento depende de la diferencia de reluctancia en los dos ejes ( $X_{sd} - X_{sc}$ ).

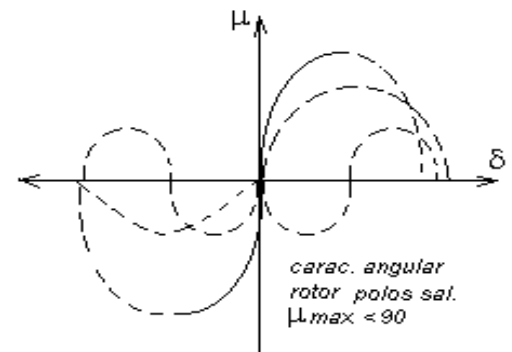
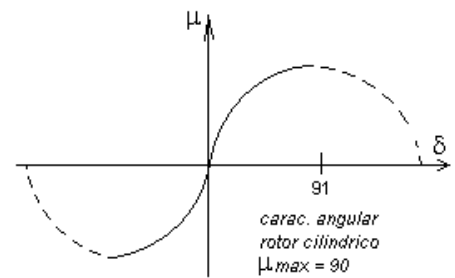
De la fórmula de la  $P_{em}$  se deduce que, el motor síncrono con excitación, tiene más momento que un motor de reluctancia, porque en uno inciden los dos términos del segundo miembro y en el otro solamente el segundo término.-

## GENERADORES AUTOEXCITADOS

### Fundamentos de la autoexcitación compensada

La tendencia actual es la de sustituir las excitatrices convencionales por dispositivos completamente estáticos. A excitación constante, la tensión de un generador síncrono es función de la carga. Esta variación de tensión procede, principalmente, de la reacción de inducido, es decir, que depende del valor de la corriente y del  $\cos \varphi$ .

Partiendo de magnitudes alternas, como son las generadas por la máquina a partir de las tensiones producidas por su magnetismo remanente, necesariamente alto para estos casos, el dispositivo de auto excitación debe producir por adición vectorial de los componentes de tensión y corriente, debidamente rectificadas, la corriente de excitación. Es así como el dispositivo de autoexcitación compensada, utiliza directamente las variaciones de corriente, teniendo en cuenta el  $\cos \varphi$ , para mantener cte.



la tensión. El esquema de principio, de un dispositivo sencillo monofásico de auto excitación compensada, esta representado por el circuito y el diagrama vectorial de la Figura.-

La bobina de reactancia  $X$ , desfasa la corriente  $I_u$  proporcional a la tensión en  $90^\circ$  respecto a  $U$ .-

La corriente  $I_u$  e  $I$ , esta última proporcional a la carga, al pasar a través del transf. de tensión y corriente,  $T_u$  y  $T_i$ , se desfasan  $180^\circ$ , obteniendo  $I'_u$  a  $I'_i$ , siendo su suma vectorial, la corriente de excitación necesaria en módulo y fase según sea la carga:  
 $I_{ex} = I'_u + I'_i$

