

POTENCIA EN LAS MAQUINAS SINCRONAS

1.- COMPORTAMIENTO DE UN GENERADOR EN VACIO

Cuando la máquina está trabajando en vacío (a velocidad constante) la tensión del estator depende del flujo magnético generado por los polos de excitación debido a la presencia de la corriente que circula por los arrollamientos de la armadura (campo). Esto se debe a que el estator no es recorrido por ninguna corriente ($I_L = 0$), por tanto la reacción de la armadura es nula, cuyo efecto es alterar el flujo total.

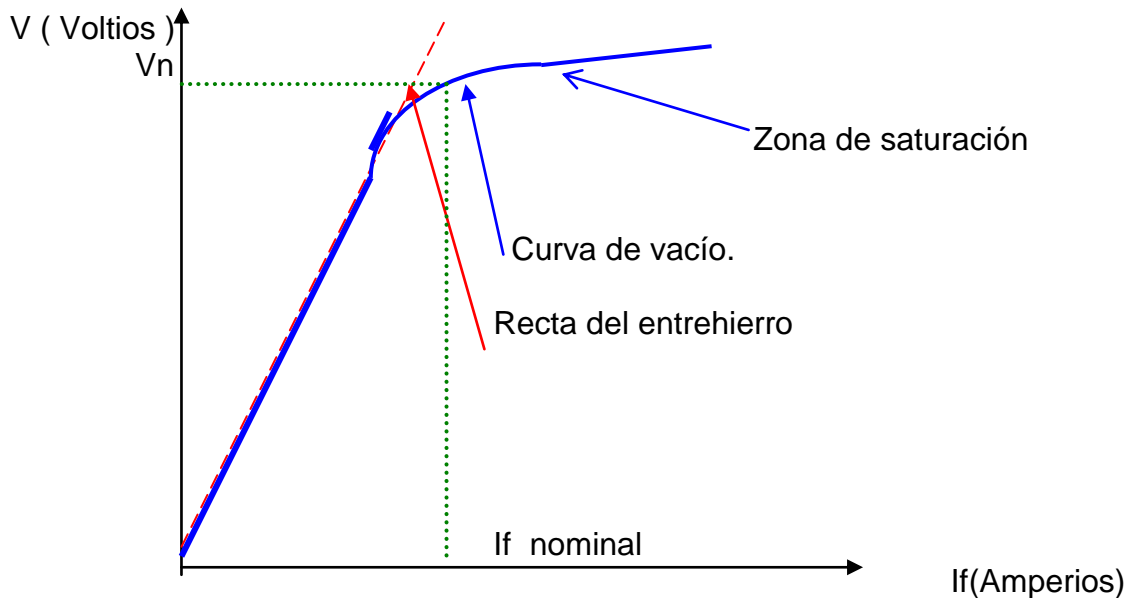


Fig. N° 1.- Características de vacío

La relación entre la tensión generada (V en voltios) y la corriente de excitación (I_f en Amperios) se le denomina característica de vacío, donde podemos observar el estado de saturación del generador síncrono sometido a ésta prueba.

2.- COMPORTAMIENTO DE UN GENERADOR SINCRONO BAJO CARGA

En carga la corriente que atraviesan los conductores del estator crea un campo magnético, causando alteraciones en la intensidad y distribución del campo magnético principal, obteniéndose como resultado una distorsión del campo resultante.

Esta alteración depende de:

- La corriente de la carga.
- Factor de potencia de la carga.

En seguida presentaremos el comportamiento del alternador cuando es sometido a diversas cargas:

2.1.- Carga puramente resistiva.- Si el alternador alimenta un circuito puramente resistivo, la corriente de carga crea un campo magnético propio.

El diagrama (a) muestra la alteración del flujo principal en vacío Φ_0 en relación al flujo de reacción del estator y/o armadura Φ_r .

El campo magnético inducido producido por los dos polos (alternador bipolar) desfasado 90° (en atrazo), en relación a los polos principales y éstos ejercen sobre los polos inducidos una fuerza contraria al movimiento, gastándose potencia mecánica para mantener al rotor girando.

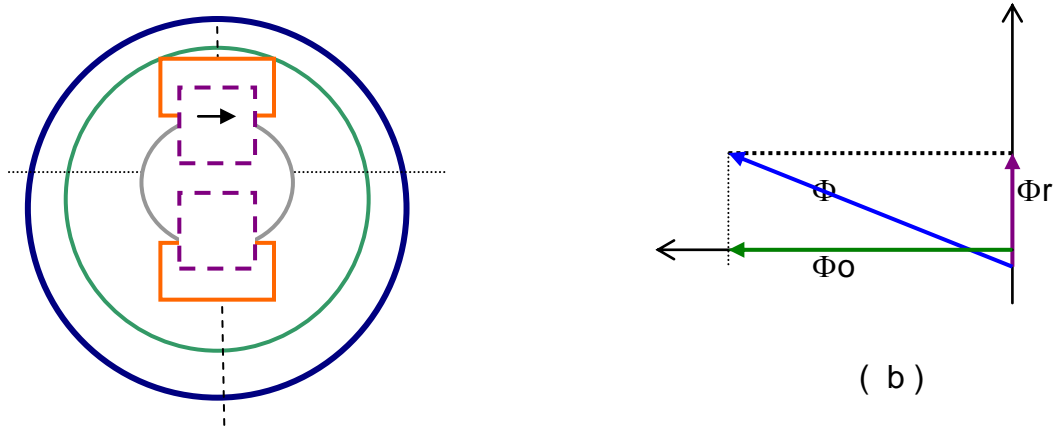


Fig. N° 2 .- Comportamiento del flujo principal en vacío (Φ_0) respecto al flujo producido por la reacción del circuito estático y/o armadura (Φ_r). Cuando la carga es resistiva

La alteración de Φ_0 es pequeña, no produciendo una variación muy grande en relación al flujo resultante (Φ). Debido a la caída de tensión en los arrollamientos de la armadura será necesario aumentar la corriente de excitación para mantener la tensión nominal.

2.2.- Carga puramente inductiva.- En este caso la corriente de carga esta desfasada 90° en **atraso** en relación a la tensión y el campo de reacción de armadura estará consecuen-temente en la misma dirección del campo principal y en polaridad opuesta.

El efecto de la carga inductiva es desmagnetizante ver los esquemas (a) y (b). Las cargas inductivas almacenan energía que pertenece al inductor entonces lo devuelve totalmente al generador no ejerciendo ningún conjugado frenante en el inducido. Las cargas inductivas almacenan energía que pertenece al inductor entonces lo devuelve totalmente al generador no ejerciendo ningún conjugado frenante en el inducido. En este caso solo se producirá un gasto de energía mecánica para compensar las pérdidas. Debido a este efecto desmagnetizante será necesario un gran aumento de corriente de excitación para mantener la tensión nominal.

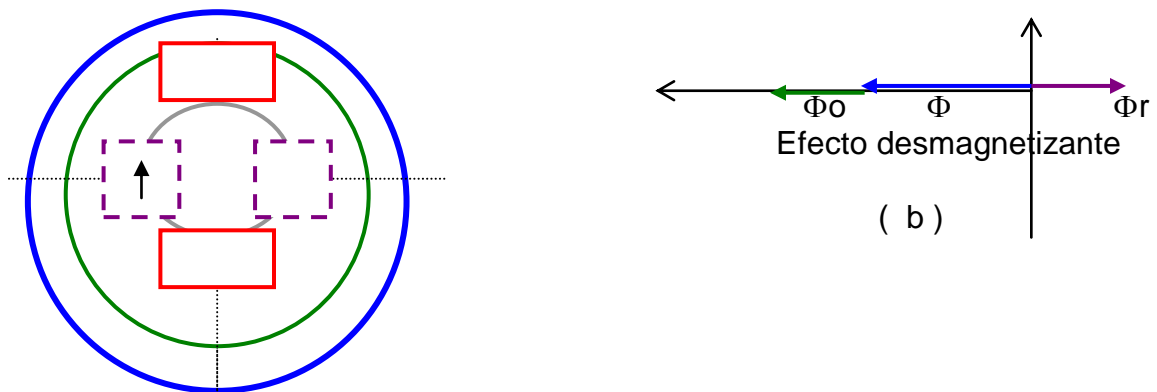


Fig. N° 3 .- Comportamiento del flujo principal en vacío (Φ_0) respecto al flujo producido por la reacción del circuito estático y/o armadura (Φ_r). Cuando la carga es inductiva.

2.3.- Cargas puramente capacitivas.- La corriente del estator para una carga cap[acitiva

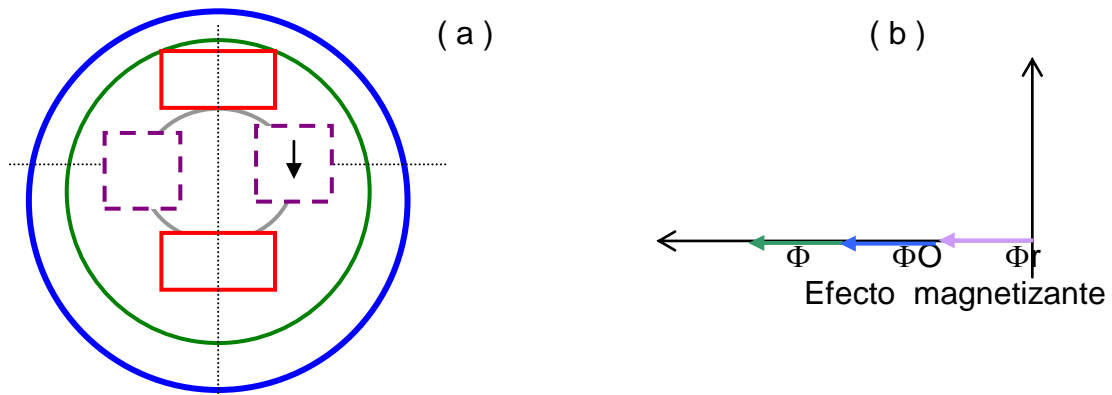


Fig. N° 4 .- Comportamiento del flujo principal en vacío (Φ_0) respecto al flujo producido por la reacción del circuito estatórico y/o armadura (Φ_r). Cuando la carga es capacitiva.

Cuando la carga capacitiva esta desfasada en 90° **en adelante** con relación a la tensión el campo de reacción de armadura consecuentemente se encontrará en la misma dirección del campo principal y con la misma polaridad ver los esquemas (a) y (b).

El campo inducido en este caso tiene un efecto magnetizante.

Las cargas capacitivas almacenan energía en su campo eléctrico y la devuelven totalmente al generador, no ejerciendo como en el caso anterior ningún conjugado frenante sobre el inducido. Debido al efecto magnetizante será necesario reducir la corriente de excitación para mantener la tensión nominal.

2.4.- Cargas intermedias.- En la practica nos encontramos con cargas que presentan desfases intermedios entre totalmente inductiva, capacitiva y resistiva.

En este caso el campo inducido puede ser descompuesto en dos campos: Un transversal y el otro desmagnetizante (inductivo) ó magnetizante (capacitivo).

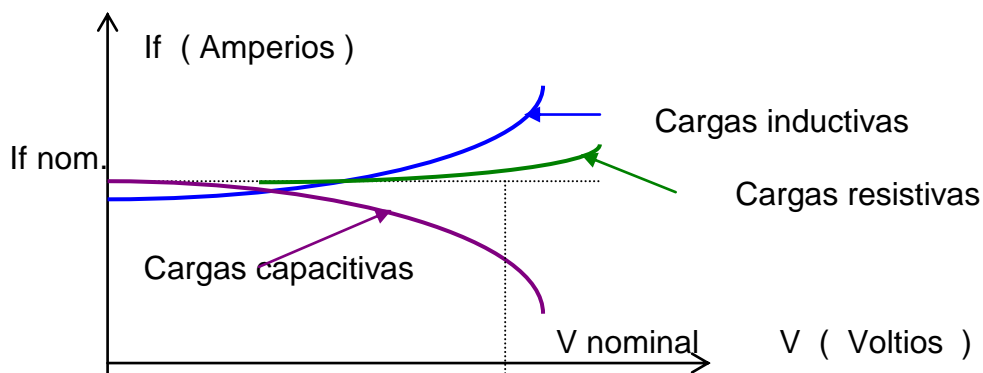


Fig. N° 5.- Variación de la corriente de excitación para mantener la tensión de armadura constante (V en bornes).

Solamente el campo transversal produce su efecto frenante consumiendo potencia mecánica de la máquina accionante. El efecto magnetizante ó desmagnetizante deberá compensarse alterando la corriente de excitación.

3.- POTENCIA EN LAS MAQUINAS SINCRONAS

Para determinar la potencia de una máquina síncrona se utiliza la siguiente expresión:

$$P = m \cdot U \cdot I_e \cdot \cos \phi$$

m = Número de fases.

U = Tensión de fase del estator.

I_e = Corriente de fase del estator.

ϕ = Angulo formado por U e I_e

La potencia eléctrica desarrollada en la máquina de polos salientes también puede ser expresada en función del ángulo de carga que surge entre los fasores U_f (tensión de fase) y E_o (fuerza electromotriz inducida) determinado por la posición del ángulo del rotor en relación al flujo girante del estator. Este efecto se produce cuando existe corriente circulante (absorbida por la carga) en los arrollamientos del estator, debido a que se crea un campo magnético que está en oposición al campo principal.

Formas constructivas del rotor.- La forma de construcción del rotor es muy importante ya que produce características que definen su funcionamiento tales como:

- Impedancia estator – rotor.
- Impedancia rotor estator.
- La variabilidad del entrehierro según su posición.

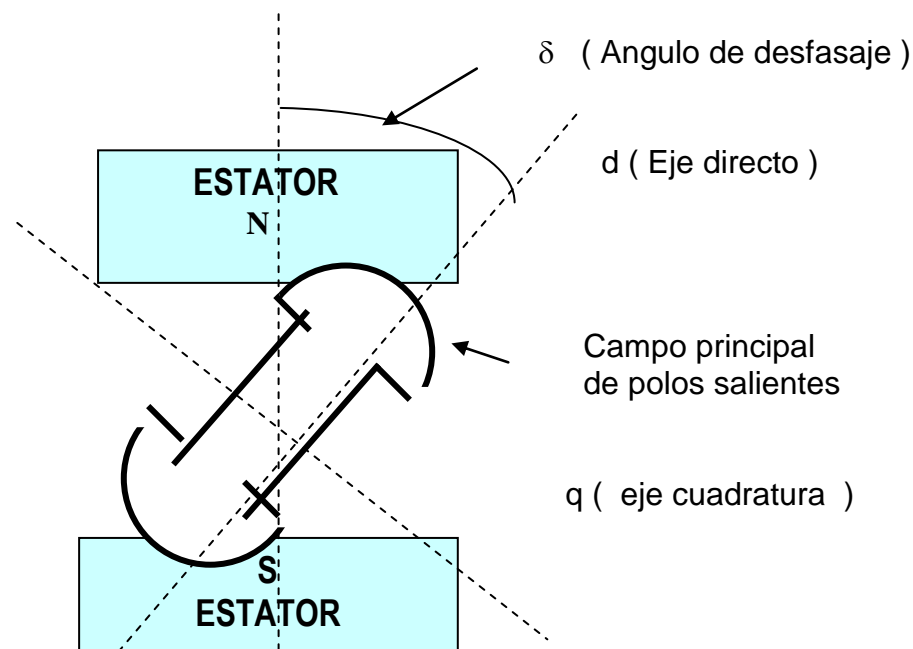
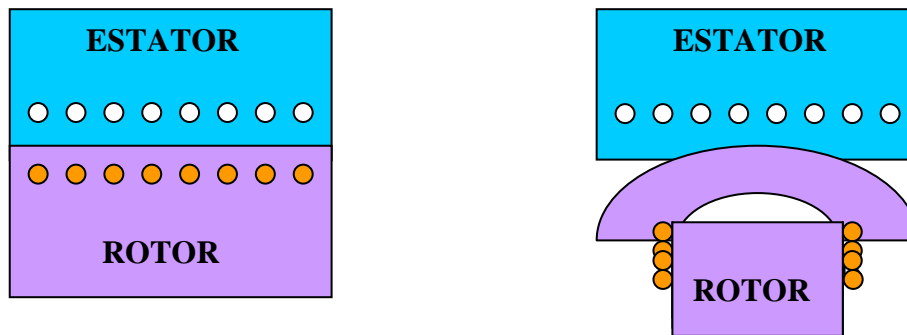


Fig. N° 6.- Comportamiento de la reacción de la armadura con respecto a los ejes d y q.

a.- Rotor de polos lisos (redondo ó cilíndrico).- Es el que cumple las características que a continuación se detallan ver fig. N° 7 (a).



a) Polos lizos

b) Polos salientes

Fig. N° 7.- Clasificación de los rotores según su forma constructiva del rotor

- Arrollamientos de campo situados en las ranuras axiales (a lo largo del rotor).
- Se usan en máquinas que funcionan en altas velocidades accionadas por turbinas de vapor (turbo alternadores, etc.).
- El diámetro del rotor es relativamente pequeño (aprox. 900 mm.).
- Se utilizan en rotores para máquinas síncronas de 2 ó 4 polos (altas velocidades).
- Tiene su entrehierro constante.

b.- Rotor de polos salientes .- Es utilizado en todo tipo de generadores, teniendo las siguientes características principales ver fig. N° 7 (b):

- Presentar un entrehierro variable que depende de su posición respecto al estator.
- Se usa en velocidades bajas (> 4 polos).
- Son utilizadas en máquinas accionadas por turbinas hidráulicas. (hidrogeneradores).

Las máquinas de polos salientes tienen una dirección de magnetización preferente determinada por las expansiones polares. La reluctancia es apreciablemente menor en el eje directo (polar) que en el de cuadratura (neutro). En la siguiente figura pueden verse los flujos longitudinales y transversales en el entrehierro de una máquina síncrona.

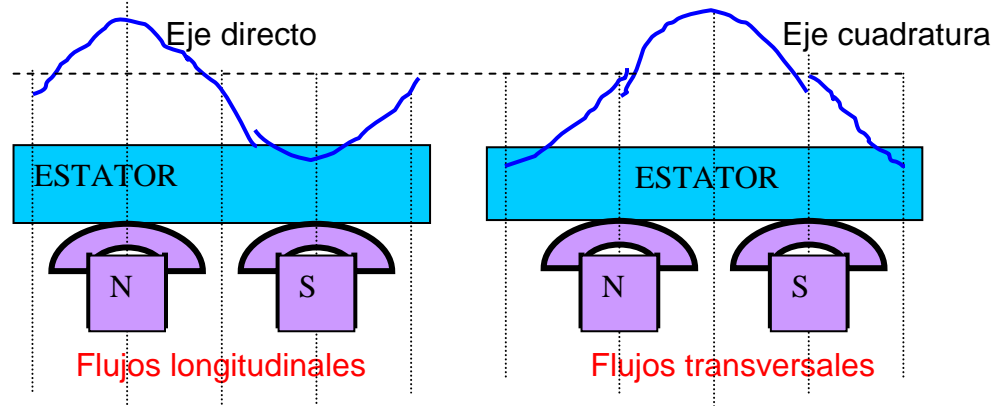


Fig. N° 8.- Flujos en una máquina de polos salientes.

4.- MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES

ME III 10.- POTENCIA EN MAQUINAS SINCRONAS

Para estudiar el efecto de los polos salientes se puede descomponer la corriente estat6rica (I_e), en ambos diagramas, y teniendo como referencia la tensi3n inducida (E) se grafican los flujos de campo y de la reacci3n de la armadura para formar el flujo resultante que se har1 presente en el entrehierro de la m1quina de polos salientes.

Donde:

- Φ_f = Flujo principal producido por el campo (inductor).
- Φ_e = Flujo debido a la reacci3n de la armadura (estator 3 inducido).
- Φ = Flujo resultante existente en el entrehierro.
- I_e = Corriente estat6rica, trabajando con carga.
- I_q = Componente de la corriente estat6rica, en eje cuadratura.
- I_d = Componente de la corriente estat6rica, en eje directo.
- I_e = Corriente estat6rica, trabajando con carga.
- E = Tensi3n inducida interna (fuerza electromotriz), por fase del generador.
- δ = Angulo entre la tensi3n en terminales (V) y la corriente estat6rica (I_e).
- ϕ = Angulo entre la tensi3n en terminales (V) y la tensi3n inducida (E).
- X_q = Componente de la reactancia s6ncrona en eje cuadratura.
- X_d = Componente de la reactancia s6ncrona en eje directo.

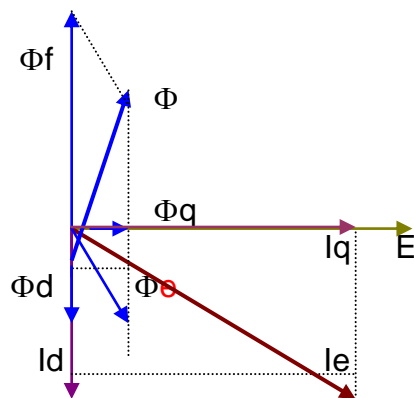


Diagrama de FM en polos salientes

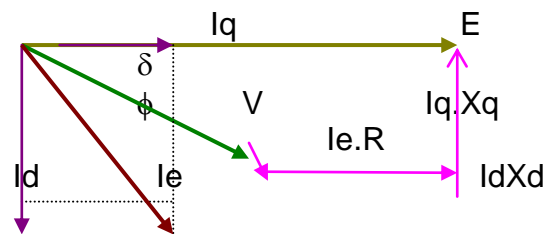


Diagrama fasorial aproximado.

Fig. N° 9.- Diagramas fasoriales de las m1quinas s6ncronas de polos salientes.

Para operaci3n equilibrada en r3gimen permanente I_0 es nula.

- El significado f6sico de las componentes en eje directo y cuadratura es el siguiente:

REACTANCIAS EN LOS EJES DIRECTO Y CUADRATURA	
Eje directo (X_d)	Eje cuadratura (X_q)
Eje del rotor y conductores asociados Al estator.	Espacio interpolar del rotor y conductores asociados del estator.
Reluctancia magn3tica m6nima ($\mathfrak{R}_{min.}$).	Reluctancia magn3tica m1xima ($\mathfrak{R}_{max.}$)
Flujo de enlace m1ximo ($\Phi_{max.}$).	Flujo de enlace m6nimo ($\Phi_{m6n.}$)
$X_d \approx X_q$ En turbo alternadores.	$X_q < X_d$ En hidro alternadores.

- La máquina de polos salientes tiene una dirección preferencial de magnetización determinada por la saliencia de los polos del campo.

La permeancia a lo largo del eje polar ó directo es apreciablemente mayor que la permeancia a lo largo del eje interpolar ó cuadratura.

De la tabla anterior se puede concluir que :

- A mayor reluctancia se obtiene menor flujo.
- A menor inductancia menor reactancia.

⇒ $X_d > X_q$ La reactancia en el eje es mayor que en cuadratura.

Análisis de la potencia en máquinas síncronas de polos salientes.- Para realizar el estudio de las máquinas síncronas de polos salientes es necesario contar con un circuito equivalente (fig.Nº 10 y 11) donde intervengan el modelo y los parámetros mas importantes como son: La reactancia síncrona , conformada por la reactancia de la máquina mas la reactancia correspondiente a la reacción de armadura.

- En la fig. Nº 10 y 11 podemos visualizar el modelo adecuado (a) y el diagrama fasorial (b) que nos van a permitir realizar el análisis de la máquina síncrona de polos salientes. Así mismo se deben tener las siguientes consideraciones :

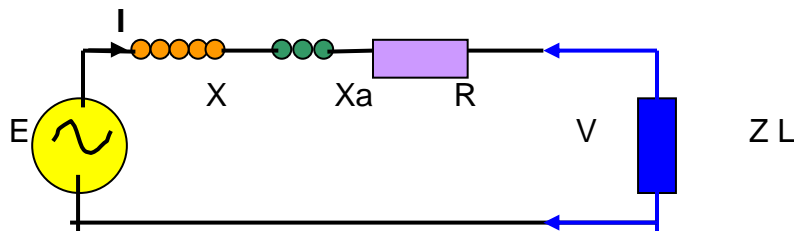


Fig. Nº 10.- Circuito equivalente real por fase de una MRS de polos salientes

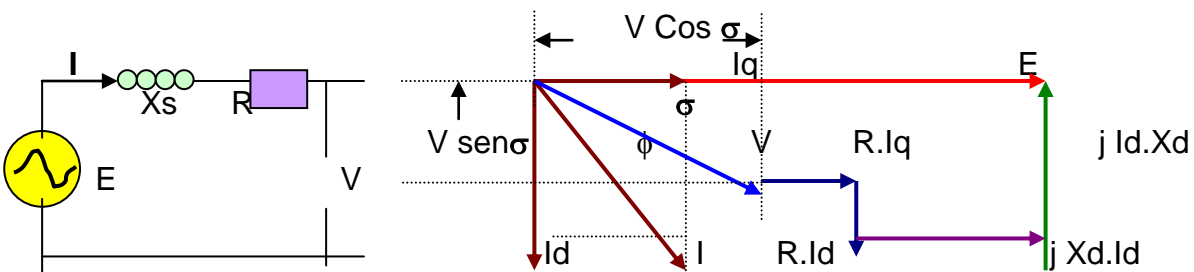


Fig. Nº 11.- Representación del modelo y diagrama fasorial de una máquina síncrona de polos salientes .

- $R \lll X_s \Rightarrow R \approx 0$ (motivo por el cual se desprecia R).
- La $X_s = X_d + X_q$ (Muy importante).
- $E \angle 0^\circ$ es la la tensión inducida interna de referencia del generador.

R = Resistencia de armadura por fase.

$X_s = X_a + X$.

X_a = Reactancia por fase debido a la reacción de la armadura.

X = Reactancia interna por fase de la armadura.

ϕ = Angulo entre V e I.

σ = Angulo entre E y V.

Aplicando la KVL (Kirchooff Voltge Law) en la fig. N° 11.

$$E = V \cos \sigma + R \cdot I_q + X_d \cdot I_d \quad (1)$$

$$E = V \cos \sigma + R \cdot I \cdot \cos (\sigma + \phi) + X_d \cdot I \cdot \sin (\sigma + \phi) \quad (2)$$

$$V \sin \sigma = X_q \cdot I \cdot \cos (\sigma + \phi) - R \cdot I \cdot \sin (\sigma + \phi) \quad (3)$$

$$V \sin \sigma = X_q \cdot I_q - R \cdot I_d \quad (4)$$

De las ecuaciones anteriores y teniendo $E = E \angle 0$ (Tensión inducida de referencia).
Asumiendo que $R \ll X_s \Rightarrow R = 0$

$$E = E \angle 0 = V \cos \sigma + X_d \cdot I_d$$

$$I_d = (E - V \cos \sigma) / X_d, \quad I_q = V \sin \sigma / X_q \quad (5)$$

Pero $I = I_d + jI_q$

$$I = (E - V \cos \sigma) / X_d + j V \sin \sigma / X_q \quad (6)$$

A.- La potencia interna generada por la MRS es:

$$S = E \cdot I^*$$

$$S = E (E - V \cos \sigma) / X_d + j E \cdot V \sin \sigma / X_q \quad (7)$$

$$S = (E^2 - V \cdot E \cos \sigma) / X_d - j E \cdot V \sin \sigma / X_q \quad (8)$$

$$S = P + j Q$$

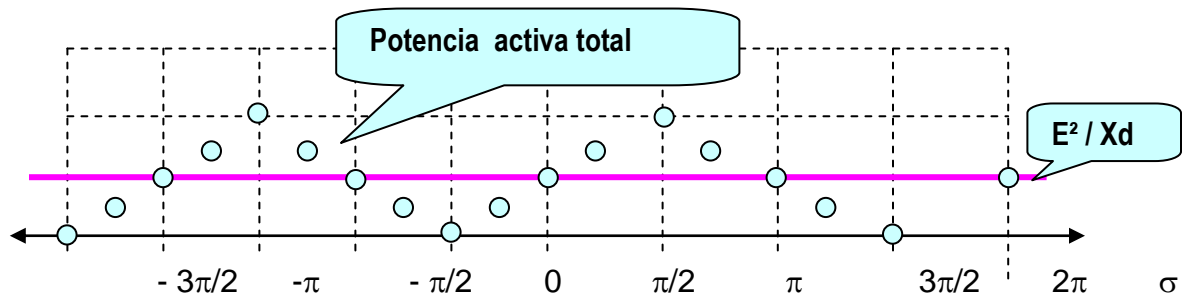


Fig. N° 12.- Curva de la potencia activa en máquinas síncronas de polos salientes

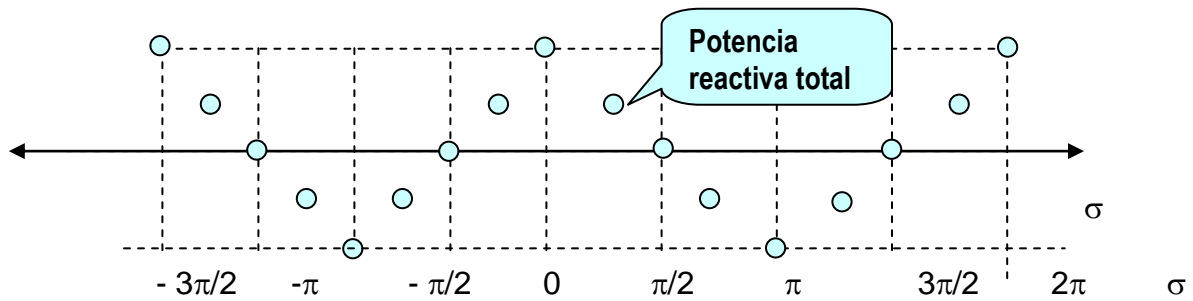


Fig. N° 13.- Curva de la potencia reactiva en máquinas síncronas de polos salientes

B.- La potencia generada en bornes por la MRS es:

$$S = V \cdot I^*$$

$$V = V \sin \sigma + j V \cos \sigma \quad e \quad I = I_d - j I_q$$

$$S = (V \sin \sigma + j V \cos \sigma) (I_d - j I_q)$$

$$S = V \cdot \sin \sigma \cdot I_d + j V \cdot \cos \sigma \cdot I_d - j V \cdot \sin \sigma \cdot I_q + V \cdot \cos \sigma \cdot I_q$$

$$S = V \cdot \sin \sigma \cdot I_d + V \cdot \cos \sigma \cdot I_q + j (V \cdot \cos \sigma \cdot I_d - V \cdot \sin \sigma \cdot I_q)$$

$$S = P + j Q$$

$$P = V \cdot \sin \sigma (E - V \cos \sigma) / X_d + V \cdot \cos \sigma \cdot V \cdot \sin \sigma / X_q$$

$$P = V \cdot E \cdot \sin \sigma / X_d - V^2 \cdot \cos \sigma \cdot \sin \sigma / X_d + V^2 \cdot \sin \sigma \cdot \cos \sigma / X_q$$

$$P = V \cdot E \cdot \sin \sigma / X_d + V^2 \cdot \cos \sigma \cdot \sin \sigma \{ 1 / X_q - 1 / X_d \}$$

$$2 \sin \sigma \cdot \cos \sigma = \sin 2 \sigma \quad \sin \sigma \cdot \cos \sigma = (1 / 2) \sin 2 \sigma$$

$$P = (V \cdot E / X_d) \cdot \sin \sigma + (V^2 / 2) \sin 2 \sigma \{ (X_d - X_q) / X_q \cdot X_d \}$$

Depende de V y la excitación de la máquina

Debido a la diferencia de la reluctancia en g. No depende de la excitación de la máquina.

Cuando $X_d \gg X_q$ (Entonces $X_d - X_q = X_d$). Luego la nueva ecuación es:

$$P = (V \cdot E / X_d) \cdot \sin \sigma + (V^2 / 2 \cdot X_q) \sin 2 \sigma$$

Luego si analizamos las variaciones del ángulo tenemos:

Si $\sigma = 0 \rightarrow P = 0$

Si $\sigma = 90^\circ \rightarrow P_{max} = V \cdot E / X_d$

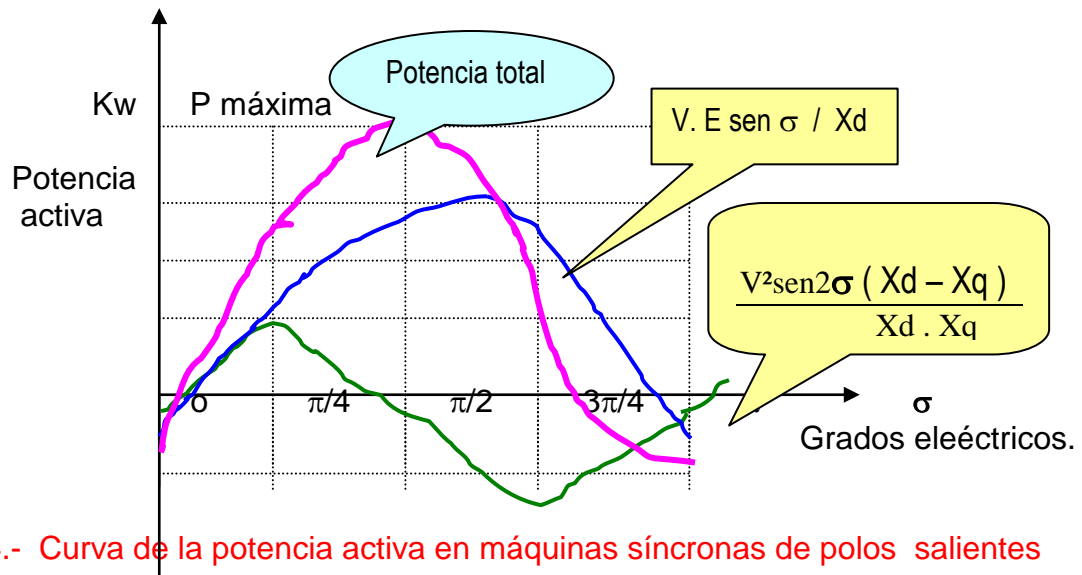


Fig. N° 14.- Curva de la potencia activa en máquinas síncronas de polos salientes

Utilizando un programa computacional para obtener la P total de las máquinas. Además hacer los diagramas fasoriales para cargas puramente inductivas y/o capacitivas.

$$Q = (V \cdot \cos \sigma \cdot I_d - V \cdot \sin \sigma \cdot I_q)$$

$$Q = V \cdot \cos \sigma (E - V \cos \sigma) / X_d + V \cdot \sin \sigma \cdot V \cdot \sin \sigma / X_q$$

$$Q = V \cdot E \cdot \cos \sigma / X_d - V^2 \cdot \cos^2 \sigma / X_d + V^2 \cdot \sin^2 \sigma / X_q$$

$$Q = V \cdot E \cdot \cos \sigma / X_d - V^2 (\cos^2 \sigma / X_d + \sin^2 \sigma / X_q)$$

$$Q = \underbrace{V \cdot E \cdot \cos \sigma / X_d}_{\text{Depende de la excitación de la máquina.}} - \underbrace{V^2 (X_q \cdot \cos^2 \sigma + X_d \cdot \sin^2 \sigma) / X_q \cdot X_d}_{\text{Depende de la saliencia del circuito inductor}}$$

Cuando $X_d \gg X_q$ (Luego $X_q \cdot \cos^2 \sigma + X_d \cdot \sin^2 \sigma = X_d \cdot \sin^2 \sigma$)
Luego la nueva ecuación es:

$$Q = (V \cdot E / X_d) \cdot \cos \sigma - (V^2 / X_q) \text{ Sen}^2 \sigma$$

Luego si analizamos las variaciones del ángulo tenemos:

Si $\sigma = 0 \rightarrow Q = Q_{\max}$ Si $\sigma = 90^\circ \rightarrow Q = -V^2 / X_q$

Haga un programa computacional obtener la Q total de las máquinas. Además hacer los diagramas fasoriales para cargas puramente inductivas y/o capacitivas.

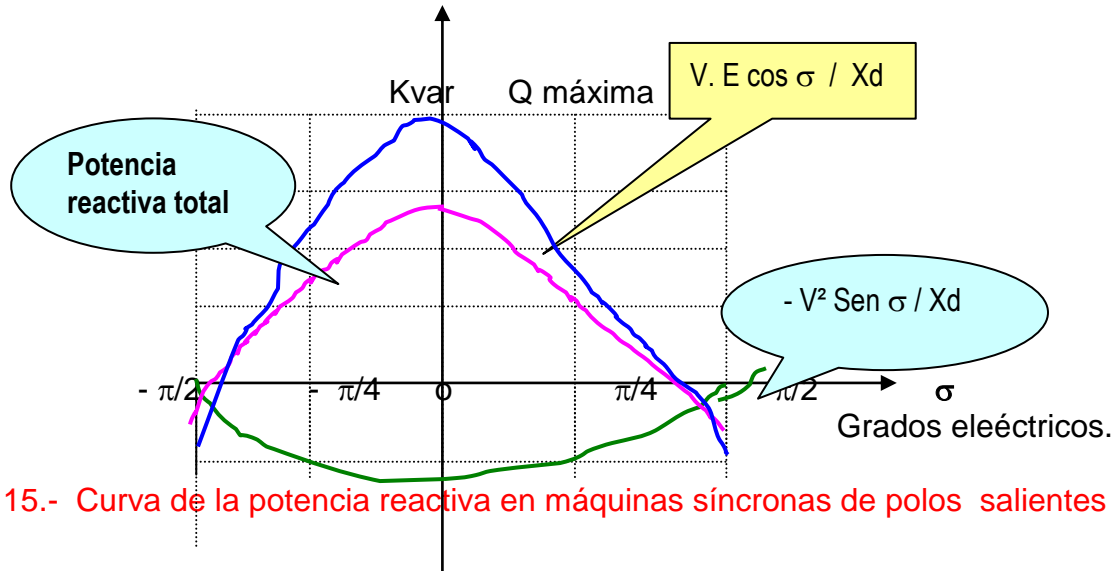


Fig. N° 15.- Curva de la potencia reactiva en máquinas síncronas de polos salientes

Problema .- Un generador de polos salientes de 120 Mva. , 60 Hz. , 13.8 Kv , FP = 0.95
 Con $X_d = 150\%$ y $X_q = 45\%$.

a.- Se le solicita realizar los cálculos en bornes del alternador :

- 1.- La P_{max} , Q_{max} y el σ_{max} .
- 2.- Hallar V y E . Así mismo dibuje el diagrama fasorial.
- 3.- La válvula de agua es abierta hasta que P aumenta un 20 % en estas condiciones se le solicita calcular : P , Q , E , V , σ .

b.- Hacer todos los cálculos realizados en (a) tomados en $E = E_{L0^\circ}$.

Así podemos señalar que la potencia eléctrica que el generador entrega en sus bornes se puede obtener a partir de las ecuaciones siguientes:

$$P = P_d + P_q$$

$$P = I_d \cdot V \text{ Sen } \sigma + I_q \cdot V \text{ Cos } \sigma$$

$$P = \{ (E - V \text{ Cos } \sigma) / X_d \} \cdot V \text{ Sen } \sigma + \{ V \text{ Sen } \sigma / X_q \} V \text{ Cos } \sigma$$

$$P = (E \cdot V \text{ Sen } \sigma - V^2 \text{ Sen } \sigma \text{ Cos } \sigma) / X_d + \{ V^2 \text{ Sen } \sigma \text{ Cos } \sigma / X_q \}$$

La potencia electromagnética que es la potencia transmitida por el rotor de un alternador hacia el estator (potencia en bornes del generador) puede ser expresada por:

$$P_d = m \cdot E \cdot V \text{ sen } \sigma / X_d$$

$$P_q = m \cdot (X_d - X_q) V^2 \text{ sen } \sigma \text{ cos } \sigma / X_q \cdot X_d$$

$$P_q = m \cdot (X_d - X_q) V^2 \text{ sen } 2 \sigma / 2 \cdot X_q \cdot X_d$$

$$P = m \cdot E \cdot V \text{ sen } \sigma / X_d + m \cdot (X_d - X_q) V^2 \text{ sen } 2 \sigma / 2 \cdot X_q \cdot X_d$$

P_d es la potencia que depende de la tensión de la red y de la excitación del campo.
 P_q es la potencia debido a la diferencia en la reluctancia del entrehierro a la cual no depende la excitación de la máquina.

5.- MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS LIZOS

Para realizar el estudio de las máquinas síncronas es necesario contar con un circuito equivalente (fig.N° 14) donde intervengan los parámetros mas importantes como son: La reactancia síncrona , conformada por la reactancia de la máquina mas la reactancia correspondiente a la reacción de armadura. En sistemas de potencia se utilizan modelos del circuito equivalente que represente las características externas del generador con una exactitud suficiente.

En la fig. N° 14 podemos visualizar el modelo adecuado (a) y el diagrama fasorial (b) que nos van a permitir realizar el análisis de la máquina síncrona. Así mismo se deben tener las siguientes consideraciones :

- $R \lll X_s \implies R \approx 0$ (motivo por el cual se desprecia R).
- θ es el ángulo de impedancia entre X_s y R . ($Z \angle \theta$).
- $\theta = \text{arc. tang.} (X_s / R) \approx 90^\circ$.
- La $X_s \approx X_d \approx X_q$ (Muy importante).

$V \angle 0^\circ$ es la la tensión de referencia en los terminales del generador.

Siendo:

- F_f = FMM producida por la corriente de campo I_f .
- F_a = FMM producida por la corriente de armadura I (estator ó inducido) .
- F = FMM resultante en el entrehierro.
- $X_s = X_a + X_r = X_d$
- R = Resistancia de fase de los arrollamientos.
- ϕ = Angulo entre V e I .
- σ = Angulo entre E y V .

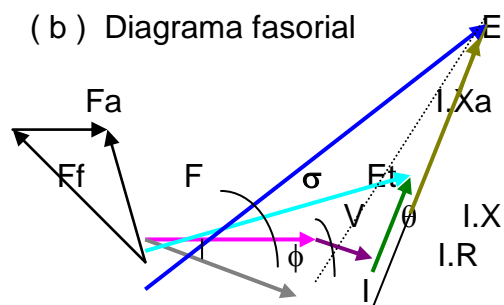
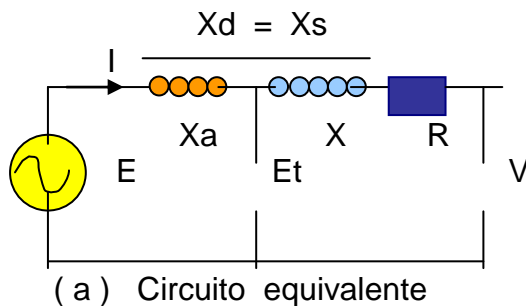


Fig. N° 16.- Representación del circuito equivalente y diagrama fasorial por fase de las máquinas síncronas de polos lisos.

Análisis de la potencia de las máquinas síncronas de polos lisos.- Para hacer la deducción matemática de las ecuaciones de potencia de las máquinas de polos lisos utilizaremos el modelo y diagrama vectorial de la fig. N° 14.

Aplicando la KVL (Kirchooff Voltge Law) en la fig. N° 14.

$$E = V + I \cdot Z_s = V + I \cdot R + j X_s \cdot I \quad (1)$$

$$I = (E - V) / Z_s = (E \angle \sigma - V \angle 0) / Z_s \angle \theta - \phi$$

Pero si $X_s \gg R \Rightarrow \theta = \text{arc. tan} (X_s / R) \approx 90^\circ \Rightarrow \theta - \phi = \theta \quad (\alpha)$

$$I = (E / X_d) \angle \sigma - \theta - (V / X_d) \angle -\theta \quad (2)$$

$$I = (E / X_d) \angle -(\theta - \sigma) - (V / X_d) \angle -\theta$$

Así mismo las componentes de E e I respectivamente son :

$$E = E \cdot \cos \sigma + j E \cdot \sin \sigma \quad (3)$$

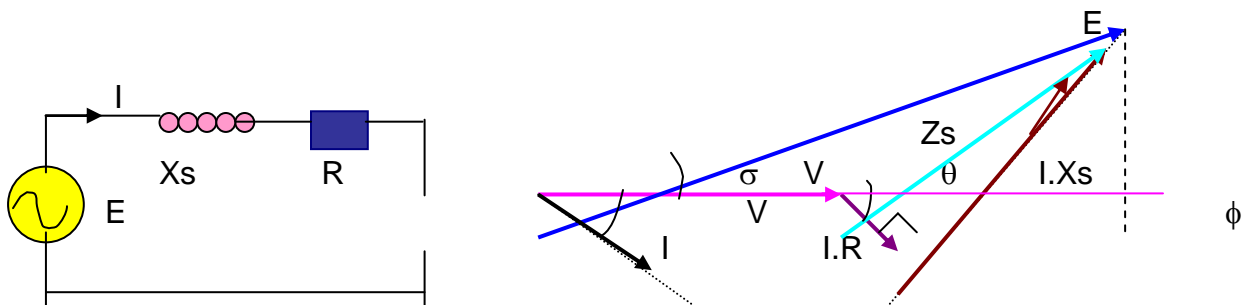


Fig. N° 17.- Representación vectorial de la máquina síncrona de polos lisos.

La ecuación (2) expresada en su forma rectangular es como sigue:

$$I = (E / X_d) \{ \cos (\theta - \sigma) - j \sin (\theta - \sigma) \} - V / X_d \{ \cos \theta - j \sin \theta \}$$

$$I = (E / X_d) \cos (\theta - \sigma) - (V / X_d) \cos \theta + j \{ (E / X_d) \sin (\theta - \sigma) - (V / X_d) \sin \theta \}$$

$$I = I \cdot \cos \phi + j I \cdot \sin \phi$$

Aplicando (α) a las siguientes expresiones tenemos : $\theta \approx 90^\circ$

$$\text{Cos} (\theta - \sigma) = \text{Cos} \theta \cdot \cos \sigma + \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \sigma = \text{Sen} \sigma$$

$$\text{Sen} (\theta - \sigma) = \text{Sen} \theta \cdot \cos \sigma - \text{cos} \theta \cdot \text{sen} \sigma = \text{Cos} \sigma$$

$$I = (E / X_d) \text{sen} \sigma - j \{ (E / X_d) \text{cos} \sigma - (V / X_d) \} \quad (4)$$

A.- Potencia interna generada por la máquina es : $E = E \angle 0$

$$S = E \cdot I^* = P + j Q$$

$$S = [E \cdot \cos \sigma + j E \cdot \text{sen} \sigma] [(E / X_d) \text{sen} \sigma + j \{ (E / X_d) \text{cos} \sigma - (V / X_d) \}]$$

$$S = (E^2 / X_d) \text{sen} \sigma \cos \sigma + j \{ (E^2 / X_d) \text{cos}^2 \sigma - (V \cdot E / X_d) \cos \sigma \}$$

$$+ j (E^2 / X_d) \text{sen}^2 \sigma - [(E^2 / X_d) \text{cos} \sigma \text{sen} \sigma - (V \cdot E / X_d) \text{sen} \sigma]$$

$$S = (V \cdot E / X_d) \text{sen} \sigma] + j \{ (E^2 / X_d) - (V \cdot E / X_d) \text{cos} \sigma \}$$

$$S = P + j Q$$

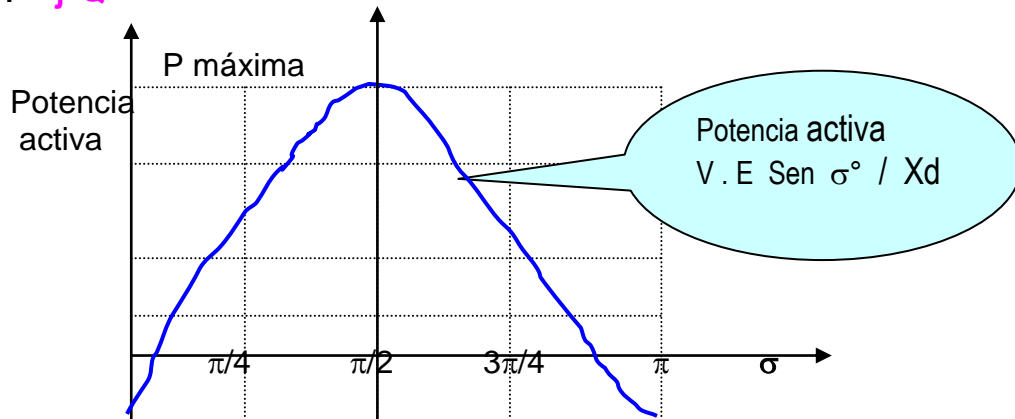


Fig. N° 18.- Curva de la potencia activa en máquinas síncronas de polos lizos.

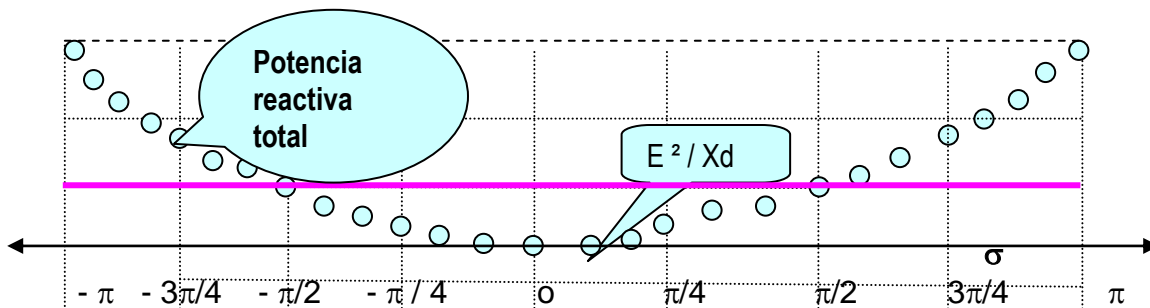


Fig N° 19.- Curva de la potencia reactiva en máquinas síncronas de polos lizos.

B.- Potencia en bornes generada por la máquina es : $V = V L 0$

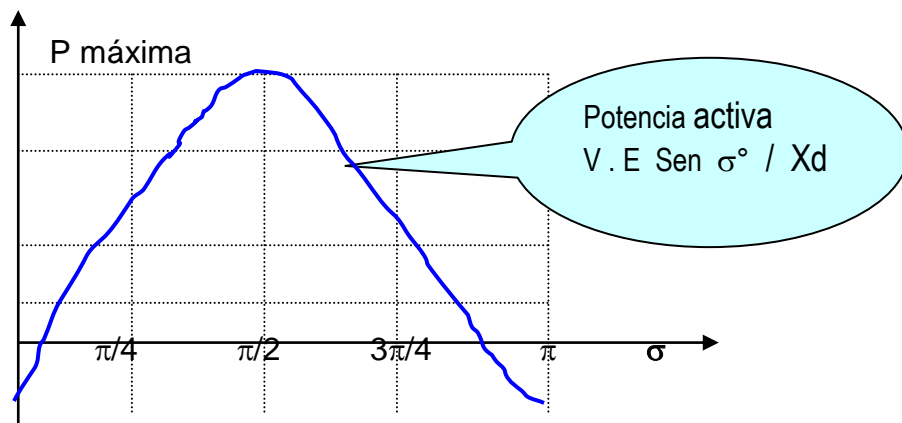


Fig. N° 20.- Curva de la potencia activa en máquinas síncronas de polos lizos.

$$S = E \cdot I^* = P + j Q$$

$$S = V [(E / X_d) \text{sen } \sigma + j \{ (E / X_d) \text{cos } \sigma - (V / X_d) \}]$$

$$S = (V \cdot E / X_d) \text{sen } \sigma + j \{ (V \cdot E / X_d) \text{cos } \sigma - (V^2 / X_d) \}$$

$$S = P + j Q$$

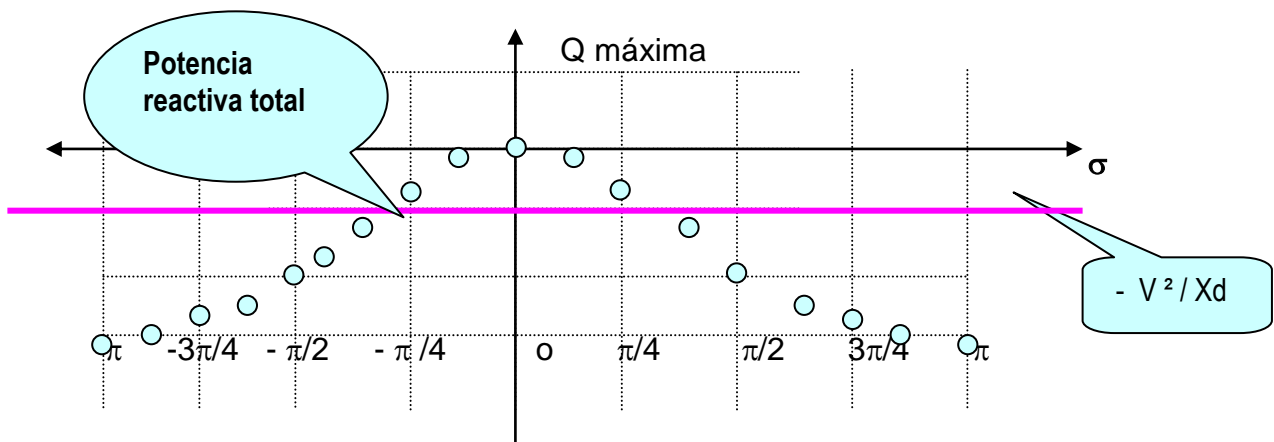
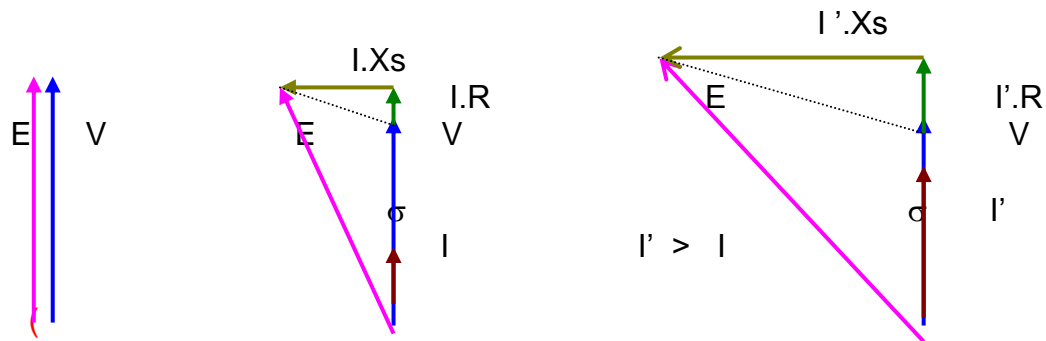


Fig N° 21.- Curva de la potencia reactiva en máquinas síncronas de polos lizos.

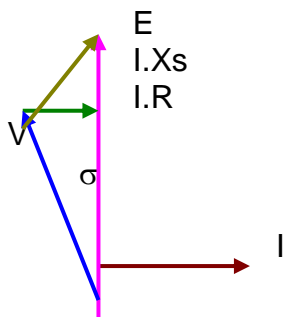
Tarea

- I.- Haga un programa computacional obtener la P y Q totales de las máquinas síncronas de polos lizos en bornes de la máquina y en la tensión inducida interna.
- II.- Además hacer los diagramas fasoriales para cargas puramente inductivas y/o capacitivas.
- III.- **Problema.-** Un generador de polos lizos (central Santa Rosa) esta trabajando en condiciones nominales a un $S = 150 \text{ Mva.}$, 60 Hz , 13.8 Kv , $FP = 0.85$
Con $X_d = 181.29 \%$. La diferencia entre E y V es de 0.09 p.u.
 - a.- Se le solicita realizar los cálculos en bornes del alternador :
 - 1.- La P_{max} , Q_{max} y el σ_{max} .
 - 2.- Hacer las gráficas P y Q vs σ .
 - 3.- Dibuje el diagrama fasorial.
 - b.- Hacer todos los cálculos realizados en (a) tomados en $E = E L0^\circ$.

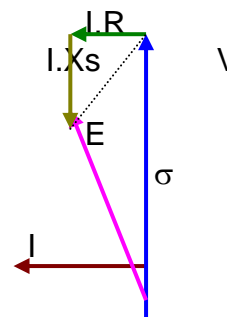
6.- OPERACIÓN DE LA MRS CON REACTANCIA SÍNCRONA CONSTANTE



a) Factor de potencia unitario. Cargas puramente resistivas.



(b) Factor de potencia inductivo atrasado $E > V$



(c) Factor de carga capacitivo adelantado $E < V$.

Fig. N° 22.- Representación fasorial de las variaciones de voltaje con reactancia síncrona constante y diferentes cargas.

La máquina rotativa síncrona (MRS) bajo la suposición de tener una reactancia síncrona constante, la misma que puede ser representada por un circuito equivalente comprendiendo un bobinado estático ideal sometido a una tensión inducida E que es proporcional a la corriente de excitación I_f . A continuación presentaremos tres diagramas vectoriales manteniéndose la reactancia síncrona constante y variaremos tan solamente la corriente de la carga. Estamos presente frente a tres tipos diferentes de cargas.

7.- REGULACION DE VOLTAJE EN UN GENERADOR SINCRONO

La regulación de tensión de un generador síncrono consiste en analizar el desempeño de la máquina cuando se halla trabajando en vacío y a plena carga; cuando la velocidad y la corriente de excitación permanecen constantes. Utilizaremos el modelo de la fig. N°14. Para cuantificarlo se utiliza la siguiente expresión:

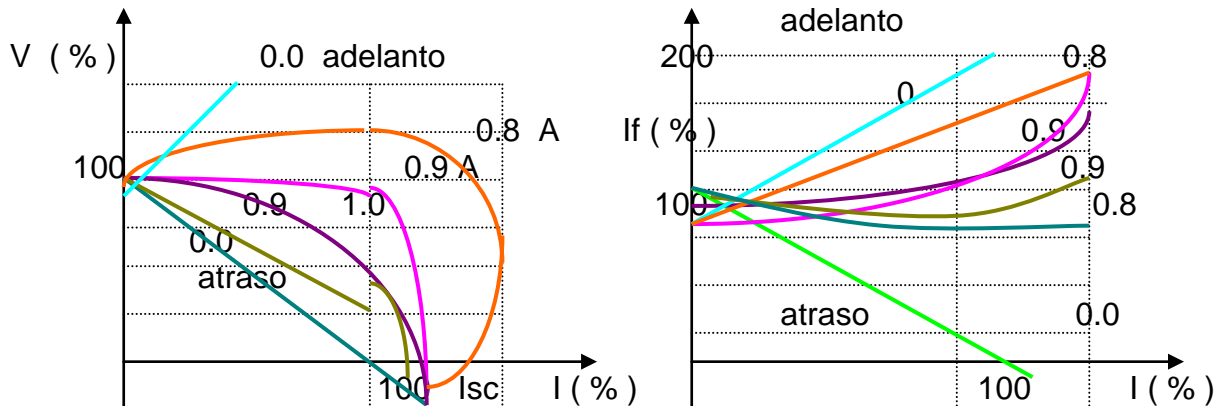
$$\text{Regulación (\%)} = \{ (E - V) / V \} \times 100$$

Los voltajes a plena carga (V) depende mucho del factor de potencia de la carga.

Para un factor de potencia unitario y en atraso se presenta siempre una caída de tensión cuando se incrementa la carga fig.N° 18 (a).

Pero cuando se tiene el factor de potencia en adelanto la regulación es cero y muchas veces cuando se aumentan la carga la regulación resulta ser negativa fig. N° 18 (b).

Finalmente podemos decir que un generador es **ideal** cuando la Regula.(%) ≈ 0.



(a) Tensión (V) vs Amperios (I).

(b).- Amperios (If) vs Amperios (I).

Fig.N°23.- Características del generador síncrono bajo carga con diferente factor de potencia y excitación de un generador para obtener un voltaje constante.

De la fig.N° 17 la regulación para una corriente de carga I a un factor de potencia Cos φ se puede obtener de la siguiente ecuación.

$$E^2 = (V \cdot \text{Cos } \phi + I \cdot R)^2 + (V \cdot \text{Sen } \phi + I \cdot Xs)^2$$

8.- CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA - DEFINICIONES VARIAS

Distorsión armónica.- La forma de onda ideal de tensión de una fuente de corriente alterna es senusoidal. Cualquier forma de onda que contenga cierta distorsión figuras N° 19 y 20. puede ser representada como la equivalente a la suma de la fundamental mas una serie de tensiones AC relacionadas con sus armónicas específicas (5, 7, 11, 13 , etc. armónica).

La distorsión puede ser definida para cada armónica, en relación con su amplitud, como un porcentaje de la fundamental.

En la figura N° 19 se representa la forma de onda tomada entre fase y fase en un generador encontrándose una distorsión calculada de 2.04%.

La distorsión armónica puede ser calculada utilizando la fórmula siguiente:

$$\text{Distorsión} = \left\{ \sum_{m=2}^{m=m} \left(\frac{E_m}{E_1} \right)^2 \right\}$$

Donde E_1 y E_m son las tensiones de las armónicas fundamental y orden m respectivamente.

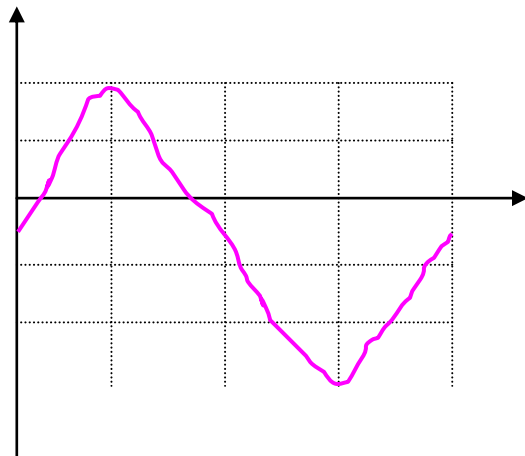


Fig.N° 24 .- Distorsión fase - fase

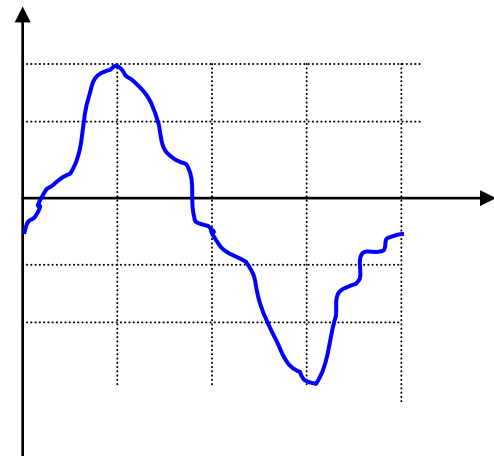


Fig.N° 25.- Distorsión fase - neutro

La figura N° 20 se presenta una forma de onda que corresponde a la tensión fase – neutro donde la distorsión registrada fue de 15.71%.

Modulación de tensión .- Es la cíclica variación de tensión causada por las oscilaciones del regulador o por la variación cíclica de la carga.

Desequilibrio angular.- Las tensiones de un sistema trifásico son desfasadas en 120° , si este desfase fuera diferente a los 120° el referido valor estará en desequilibrio.

Desbalance de tensiones.- El desbalance de tensiones es la diferencia entre la tensión de línea mas elevada y la mas baja, pudiendo ser expresado en porcentaje de la tensión media de fase.

Ejemplo: La fase R y S miden 208 Voltios (1.6% por encima de la media); S y T miden 204 voltios (0.33% por debajo de la media) y finalmente T y R miden 202 Voltios (1.3% por debajo de la media). Entonces : Media = 204,6 Voltios. Variación 6 Voltios (2.9%).

Factor de desvío.- Los desvíos y variaciones de forma de onda pueden ocurrir en cualquier parte de la onda. Pudiendo ser en el semi ciclo: positivo, negativo o cuando cruza por el cero tal como se presenta en la fig.N° 21.

La amplitud de la variación se expresa como un porcentaje del valor de pico de la onda senoidal de referencia y el factor de desvío. El factor de desvío puede ser calculado por :

$$F_{\text{Desvío}} = \text{Desvío} / V_{\text{pico}}$$

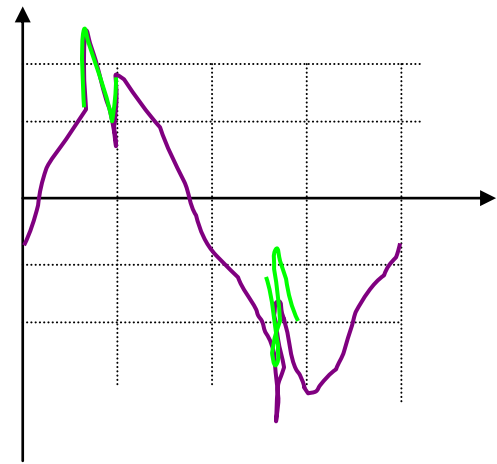
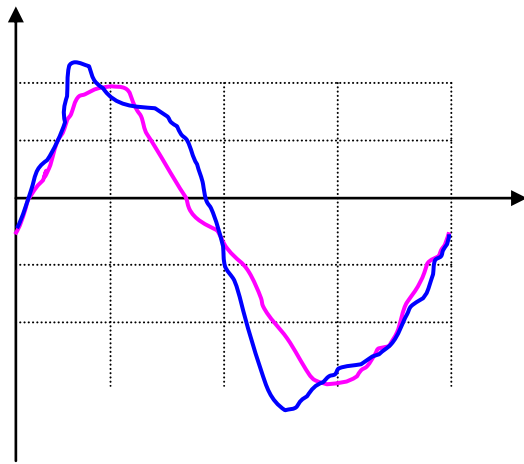


Fig.N° 26 .- Desvío en los dos semiciclos Fig.N° 27.- Desvío de la onda cerca al pico

Tolerancia de tensión.- Los desvíos máximos aceptables de la tensión son generalmente expresados como porcentaje de la tensión nominal por ejemplo:

- + 5.0 % ----- 105 % continuamente.
- - 7.5 % ----- 92.5 % continuamente.

Una serie de equipos que necesitan una tensión nominal de 100 Voltios \pm 10% (esto es entre 90 y 110 Voltios) puede ser conectado a una fuente con una tensión nominal de 105 Voltios solamente cuando la tolerancia de tensión de la fuente es de + 4.7% y - 14% (90 Voltios).

Transitorio de tensión.- Son picos de tensión de corta duración que aparecen esporádicamente y pueden alcanzar centenas de voltios (una tensión muy elevada).



Fig. N° 28.- Transitorios de tensión.