

## MAQUINAS SÍNCRONAS

Estas máquinas pueden cumplir tres diferentes funciones a saber:

- a) Generadores o alternadores
- b) Motores
- c) Condensador rotativo o compensador síncrono

En su construcción física son muy similares, pero en sus prestaciones cambian, según el uso a que se las destina. La conversión de energía es en a) de mecánica a eléctrica; en b) de eléctrica a mecánica y en c) de eléctrica a eléctrica.

### GENERADORES

#### Descripción

Se construyen de tres formas diferentes;

A) de inducido rotante, fig. 1.- Los polos excitados con corriente continua están fijos en el estator, y el rotor, con devanado mono o trifásico, tiene las salidas de corriente a través de anillos rozantes.- Se lo utiliza solo para pequeñas potencias, como ser grupos electrógenos portátiles, porque al ser la salida de corriente a través de elementos móviles no es posible manejar grandes potencias. Otra aplicación: Excitadores sin escobillas.

B) de inducido fijo y rueda polar giratoria, fig. 2 y 4.- Los polos son alimentados por corriente continua a través de dos anillos rozantes, giran accionados por un motor térmico o hidráulico.- El inducido, estático, sede de las corrientes alternas, entrega energía directamente al consumo.- Es la máquina más común en las usinas hidráulicas.

C) de inducido fijo igual que en el caso anterior, y el rotor es ranurado exteriormente, donde se alojan las bobinas que alimentadas por c.c. a través de dos anillos, generan los polos.- También se los denomina "turbo alternadores".- El rotor es generalmente de 2 o 4 polos.- fig. 2 y 5. Se los destina para grandes potencias y velocidades. Generalmente son accionados por turbinas a gas o vapor.

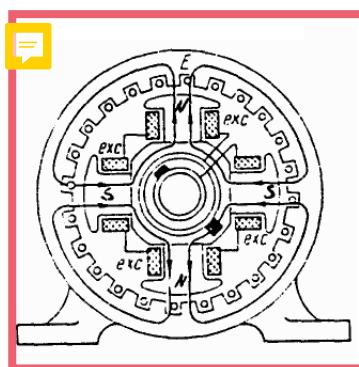
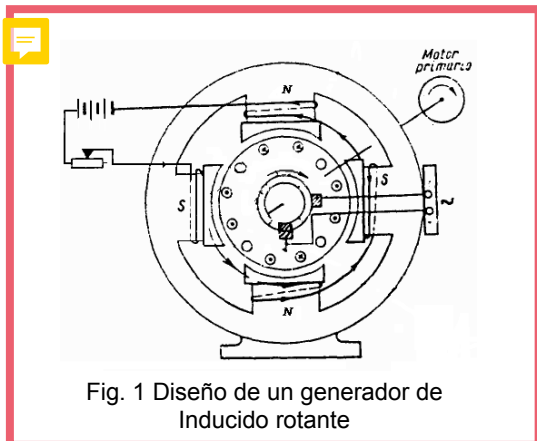
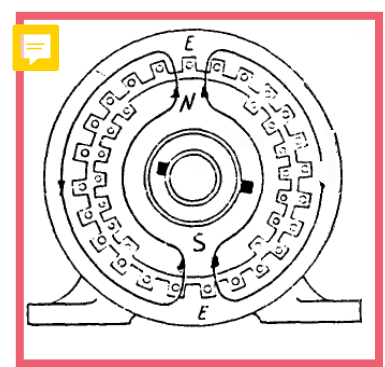


Fig. 2 Esquema de construcción de alternadores sincrónicos con rotores de polos salientes y lisos



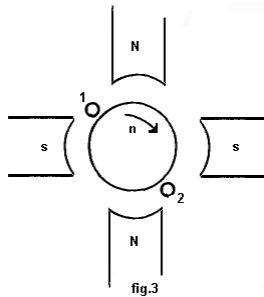
#### Principio de funcionamiento

En el caso de las máquinas de inducido rodante, recordar que un generador de c.c. inducía en su rotor corriente alterna cuando se colocaba un par de anillo rozantes.- También se dijo que la onda obtenida era plana porque se hacía el entrehierro constante. Ahora, si hacemos el entrehierro variable senoidalmente, en vez de obtener  $e = B \cdot \ell \cdot v$ ; obtendremos:  $e = B \cdot \sin \omega t \cdot \ell \cdot v$  es decir c.a. senoidal. En las otras dos máquinas, el campo magnético de los polos que giran, fig. 6 cortan a los conductores del inducido fijo, y generan  $e = -\frac{d\phi}{dt}$ , que con un diseño apropiado de la forma de las expansiones polares para el caso B), y de la distribución de los conductores del rotor, en el caso C), se obtendrá la c.a. senoidal.-

Las ventajas del inducido fijo son: a) mejor aislación para altas tensiones por ej. 13,2 KV. b) la corriente de salida se obtiene de bornes fijos ,c) si bien los arrollamientos de campo se alimentan a través de anillos, lo son con potencias bajas.-

## FRECUENCIA

Para determinar la frecuencia de la onda generada, hacemos la siguiente consideración: un



conductor que se desplaza de la posición (1) a la posición (2) al pasar bajo un par de polos genera: 1 ciclo – fig. 3

cuando da una vuelta, genera: p ciclos  
girando a n vueltas / min., generará: p. n ciclos / min. en

segundos será:  $\frac{p.n}{60}$  ciclos / seg.= frecuencia en HZ por lo

$$\text{tanto: } f = \frac{p.n}{60}$$

De esta expresión, para 50 Hz, se obtienen las velocidades de sincronismo, que en función de los pares de polos, son: 3.000;1.500; 1.000,.....

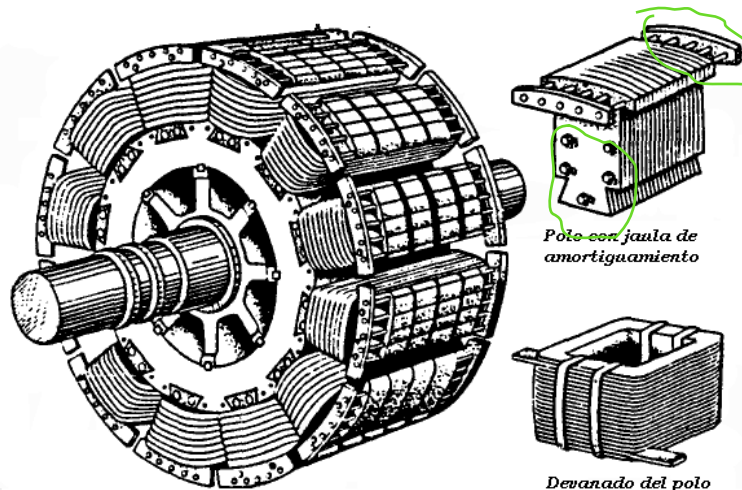


Fig. 4 Aspecto exterior de un rotor con polos salientes

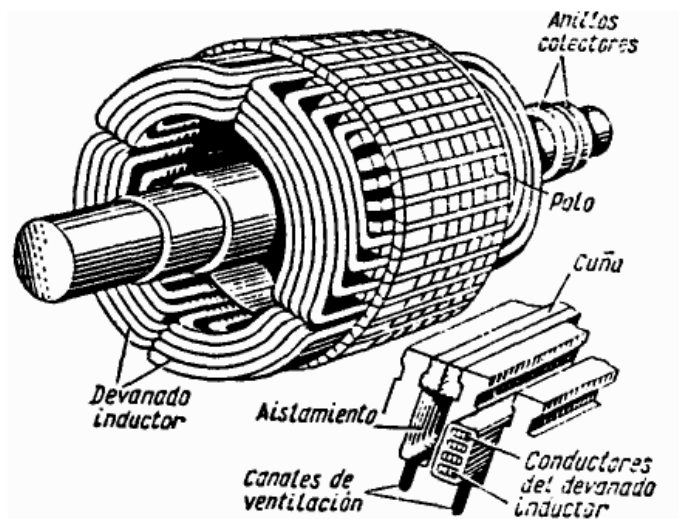
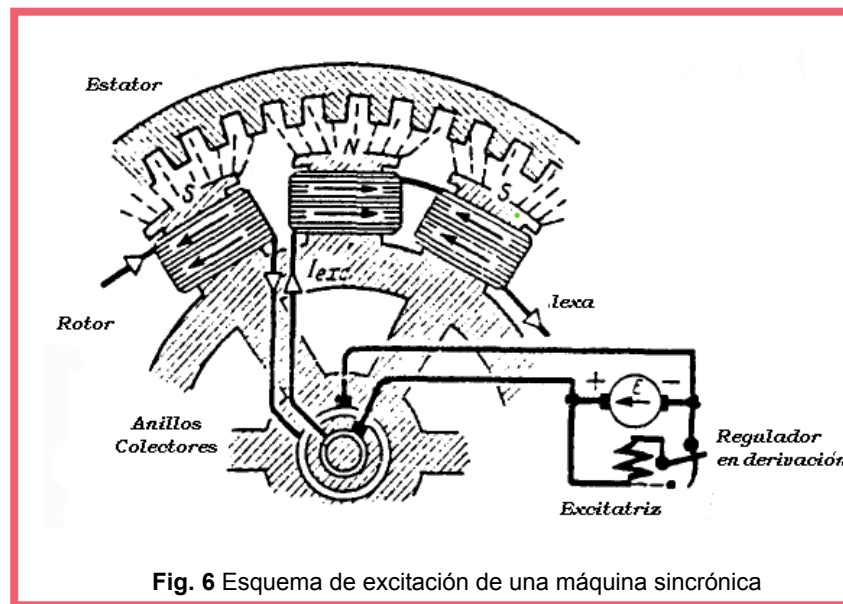


Fig. 5 Aspecto general de un rotor liso montado tetrapolar



### EXPRESIÓN DE LA F.E.M. Forma de onda.

Al girar el rotor, accionado por el motor que lo impulsa, el flujo generado por las bobinas de los polos, corta los conductores del inducido y genera la f.e.m.:  $e = -\frac{d\phi}{dt}$ , fig. 7

en el estator. Con las mismas consideraciones que para el transformador, podemos escribir:  $E = 4,44.f.\phi.N.K$

Pero en este caso, también incide el arrollamiento distribuido en las ranuras que queda manifestado por el llamado "factor de arrollamiento: K"

Para obtener una onda lo más senoidal posible se le da una forma adecuada a las expansiones polares, con entrehierro no constante; o se distribuyen adecuadamente los conductores en las ranuras, en el caso de los turboalternadores.-

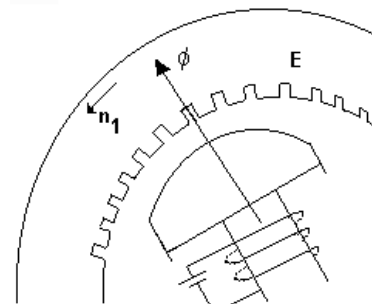


fig. 7

### CONEXIONES

Los generadores se conectan en estrella, con neutro a tierra. -Esto reduce las sobretensiones al mínimo y permite elegir pararrayos de menor tensión. -La puesta a tierra se puede efectuar a través de una resistencia o de una reactancia que limite la corriente en caso un contacto a tierra, pero aumenta la diferencia de potencial entre tierra y los conductores no afectados.- Las resistencias o reactancias, deben tener valores suficientemente bajos para permitir el correcto funcionamiento de los relés y en el caso de las reactancias, evitar la condición de resonancia que produzca sobretensiones. Además, la conexión en Y evita la circulación de la corriente de la tercera armónica en los devanados de la máquina, que estarían presentes si se conectasen en  $\Delta$

### CAMPO RODANTE

Las corrientes que circulan en el inducido, generan su propio campo magnético. Es necesario conocer sus características, porque de ello dependerá la validez de estudiar la máquina a través de un diagrama vectorial estático.

El campo magnético de un devanado queda determinado por su fuerza magnetomotriz (f.m.m.;  $\theta$  o  $F_m$ ):  $F_m = N.I$

En las máquinas eléctricas se pueden crear campos magnéticos pulsatorios en el tiempo y estacionarios en el espacio como en los transformadores, que responden en general a la expresión:  $f_m = F_m \cdot \sin \omega t$ ; y también campos pulsatorios en el tiempo y que se desplazan

en el espacio (x), es decir varían en el espacio y tiempo, que es el caso de la máquinas síncronas y asíncronas .- Responden en general a la expresión :

$$i = I_m \cdot \sin \omega t \cdot \cos \frac{\pi}{t_p} x \quad (t_p = \text{paso polar})$$

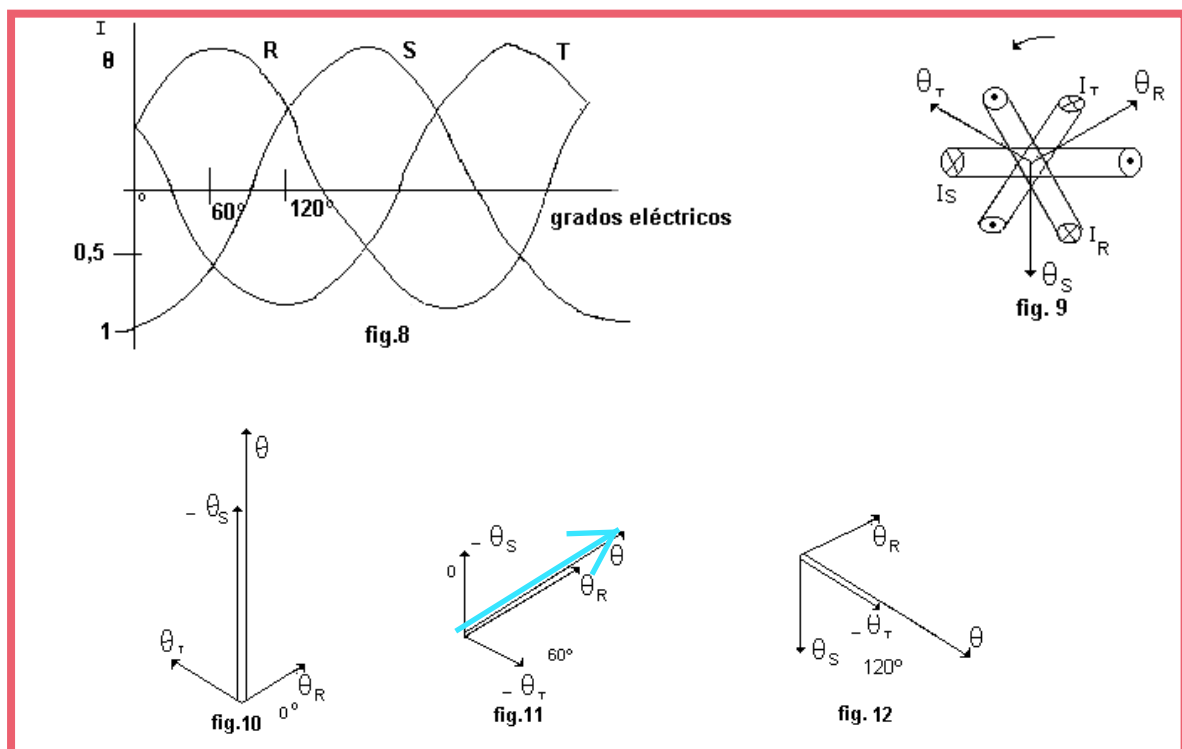
En las máquinas de c.a. rotativas este campo magnético que se desplaza en el espacio y tiempo es el denominado "**campo rodante o giratorio**".

Su velocidad depende directamente de la frecuencia, y su módulo puede ser constante, como en las máquinas síncronas y asíncronas trifásicas; o variable como en los motores asíncronos monofásicos.-

Es condición necesaria para obtenerlo, el que sean aplicadas "n" corrientes desfasadas  $\propto$  grados eléctricos, en "n" bobinas desfasadas  $\propto$  grados eléctricos. Se puede comprobar de la siguiente manera: en fig. 8 representamos tres corrientes desfasadas  $120^\circ$  que circulan en tres espiras desfasadas  $120^\circ$ .

En la fig. 9 se han representado a  $120^\circ$  geométricos para respetar la estrella convencional pero en la práctica están a  $120^\circ$  eléctricos.

Las corrientes  $I_R$ ,  $I_S$  e  $I_T$  que circulan en las espiras generan las f.m.m  $\theta_R$ ,  $\theta_S$ ,  $\theta_T$  .- Analicemos el campo resultante de la 3 f.m.m. en el instante de  $0^\circ$ , fig.10, la corriente  $I_R$  genera la f.e.m.  $\theta_R$  que vale  $0,5 \cdot \theta_R$ , positiva o sea en la dirección de  $\theta_R$  .- La corriente  $I_S$  genera  $\theta_S$  negativa de módulo 1, ó sea en sentido contrario a  $\theta_S$  y la corriente  $I_T$  que genera  $0,5 \cdot \theta_T$  positiva en la dirección de  $\theta_T$  .-



La suma de los 3 campos en dicho instante, da el campo resultante, que vale 1,5 veces el módulo de los componentes:  $\theta = \theta_R + \theta_S + \theta_T = 1,5$

Con el mismo razonamiento se obtienen los diagramas para  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  etc. Fig.11 y 12.-

### Conclusiones

1º) El campo resultante gira en sincronismo con las ondas aplicadas, en las fig. 10- 11- 12 se ve que cada  $60^\circ$  eléctricos de la onda de corriente el campo resultante también se desplaza  $60^\circ$

2ª) En un sistema trifásico, el campo resultante vale 1,5 veces el módulo de los campos componentes. Si fuera un sistema bifásico valdría lo mismo que el de los componentes. De aquí se infiere la ventaja de los sistemas trifásicos.

- 3º) Cambiando la secuencia de las ondas, cambia el sentido de giro del campo.
- 4º) El eje magnético del campo coincide con la corriente máxima en ese instante
- 5º) Como los dos campos, de los polos e inducido, giran a la misma velocidad, se pueden analizar sus efectos como si fueran estáticos.

### REACCIÓN DE INDUCIDO

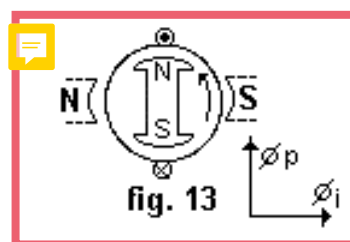
La diferencia de funcionamiento en vacío al de carga es que existe una composición de flujos, debido a las corrientes que circulan en el inducido.- Estas alteran el valor y forma de la E inducida.- Supongamos un alternador reducido a su mínima expresión: monofásico, bipolar, una aspira, y en los siguientes estados de carga: -

#### 1º) carga resistiva fig.13

El flujo producido por los polos del rotor  $\Phi_p$ , y el producido por las corrientes del inducido,  $\Phi_i$ , están desfasadas.- A este último, se lo reemplaza por polos ficticios, como si hubiese sido generados por éstos

Consecuencias: a) distorsión del campo resultante, b) polos inducidos (sombra) a  $90^\circ$ .

Bue re machista



#### 2º) carga inductiva pura, fig.14

En este caso los flujos aparecen en sentido contrario.

Consecuencias: a) efecto desmagnetizante, los flujos se restan,  $< U$ ; b) polos inducidos de igual nombre enfrentados.

#### 3º) carga capacitiva pura, fig.15

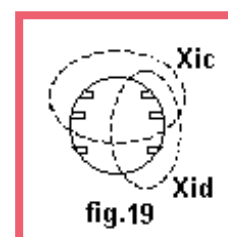
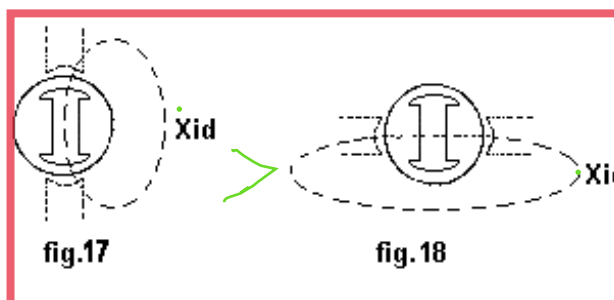
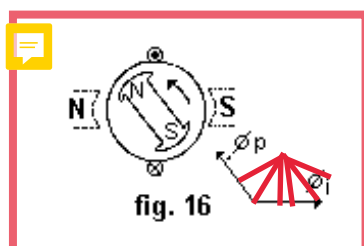
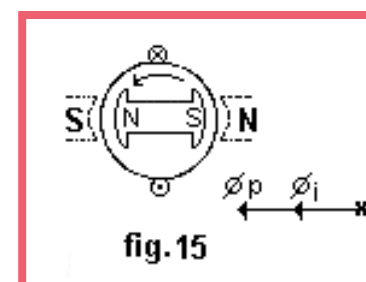
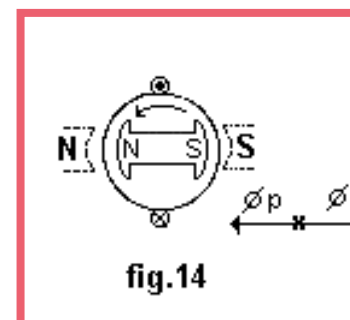
En este caso los flujos tienen igual sentido.

Consecuencias, a) efecto magnetizante, los flujos se suman,  $> U$ ; b) polos inducidos contrarios enfrentados.

#### 4º) carga R-L. fig. 16

En este caso los flujos están desfasados un ángulo que depende de la carga del generador

Consecuencias, a) efecto desmagnetizante, la suma vectorial de los flujos es menor,  $< U$ . b) polos de igual nombre enfrentados, se rechazan, aparece un momento resistente.-



El hecho físico de ser un flujo por reacción de inducido, para poder representarlo como un parámetro eléctrico en un circuito, lo transformamos en una reactancia de la siguiente manera  $\Phi = \Lambda N I$ ;  $L = \frac{N\phi_i}{I}$ ;  $X = \omega L$

En la primera de estas expresiones se aprecia la influencia de la permeancia ( $\Lambda$ ) de los circuitos magnéticos que recorre el  $\phi_i$ , por consiguiente en la máquina de polos salientes, se pueden considerar dos casos, dado que los caminos magnéticos son diferentes según sea la carga fig. 13 y 14, los que dan origen a las “**reactancia por reacción de inducido directa**”,  $X_{id}$  fig. 17 y la “**reactancia por reacción de inducido en cuadratura**”,  $X_{ic}$ , fig. 18.-

En cambio, en la máquina a rotor liso, éstas son aproximadamente iguales, porque así lo son las permeancias en ambos ejes:  $X_{id} \cong X_{ic}$ , fig.19.

**Es importante aclarar el concepto de reactancias en el eje directo y en cuadratura.** Estas no deben considerarse como un simple efecto de una reactancia en un circuito, que produce un caída de tensión, ya que en la máquina no existe un dispositivo físico que las produce, sino lo que realmente existe es un flujo por reacción de inducido. Dicho de otra manera: **estas reactancias representan el efecto magnetizante o desmagnetizante de la reacción de inducido, según sea la carga.-**

En las fórmulas anteriores se observa que, en el caso de una máquina de polos salientes, la permeancia en el eje directo es mayor que en el eje en cuadratura, por consiguiente la reactancia  $X_d$  es mayor en  $X_c$ .-

Otra interpretación sería que en el eje director hay más flujo que en cuadratura. Como valores de referencia mencionamos:

Generadores síncronos, rotor liso:	$X_d \cong X_c = 1,10$ a $1,20$ p.u.
Generadores síncronos polos salientes :	$X_d = 1,10$ a $1,15$ p.u.
	$X_c = 0,65$ a $0,63$ p.u.

### Conclusiones

- 1º) La máquina por sí sola no genera  $U = \text{cte.}$ , ya que esta depende del tipo de carga a que esta sometida, debido a la reacción de inducido,
- 2º) Este fenómeno plantea la necesidad de disponer de un regulador de tensión.

### CIRCUITO EQUIVALENTE

Para el trazado del circuito equivalente, consideramos los parámetros constitutivos de la máquina, a saber:

1º) el rotor o rueda polar, posee un devanado excitado por continua, que crea el flujo principal  $\phi$ ; lo representamos por su resistencia y una fuente Fig. 1.-

2º) la Fem. inducida en estator  $E_0$  por el flujo principal  $\phi$  de la rueda polar.-

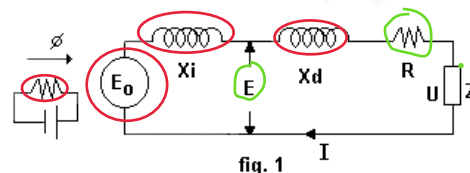
3º) la reacción de inducido: esta es originada por los flujos generados por las corrientes de inducido, flujos éstos que se representan a través de una reactancia.

En las máquinas de polos salientes se deberá hacer la distinción entre la reactancia directa  $X_{id}$  y la en cuadratura  $X_{ic}$ .

4º) los flujos dispersos: existen además campos magnéticos no útiles que afectan a distintas partes de la máquina, que los englobaremos bajo la denominación de “flujos dispersos”  $\phi_d$ , de los cuales podemos mencionar como más importantes a los siguientes:

a) flujos dispersos de ranura, Fig. 2

b) flujos dispersos en el entrehierro también denominado en Zig-Zag





c) flujos dispersos en las cabezas de las bobinas Fig.3

Estos quedan determinados por la permeancia  $\Lambda$ , del circuito magnético que lo forman, que a su vez define la inductancia  $L = \Lambda N^2$  y la reactancia de dispersión  $X_d = \omega L$  que por último representa a este hecho físico.

5º) la resistencia  $R$  de los bobinados de inducido.

6º) una carga cualquiera  $Z$

Con lo expuesto queda completado el circuito equivalente, por fase, de una máquina síncrona.-

### DIAGRAMAS VECTORIALES

Los diagramas vectoriales sirven para analizar las condiciones de trabajo de la máquina ya que permiten apreciar, con suficiente exactitud todas las combinaciones de factores que determinan el funcionamiento.-Consideremos dos casos:

A) diagrama vectorial para máquina de rotor liso

B) diagrama vectorial para máquina de polos salientes

#### DEL ROTOR LISO

Al circular corriente por los devanados del rotor, producen una f.m.m.  $\theta$  y un flujo que, con la máquina en vacío induce en el estator una f.e.m.  $E_0$ , fig.4

Cuando la máquina entra en carga (supongamos esta del tipo R-L) -aparece la corriente atrasada  $I$  que produce la f.m.m.  $\theta_i$ , por reacción de inducido.- La resultante de las dos f.m.m. (puesto que actúan simultáneamente) determina  $\theta_r$ , que produce el flujo resultante  $\phi_r$ .- Este flujo induce la f.e.m.  $E$ , atrasada  $90^\circ$  respecto a  $\phi_r$ .-

La diferencia entre  $E_0$  y  $E$  no es otra cosa que la caída de tensión originada por la reacción de inducido  $X_i I$  perpendicular a  $I$ .- Además, en el

circuito equivalente, tendremos las caídas de tensión debidas al flujo disperso ( $X_d \cdot I$ ), perpendicular a  $I$  y a la resistencia de los devanados ( $R \cdot I$ ) en fase con  $I$ .

Restando estos de  $E$  obtenemos  $U$ .- En el cuadro siguiente se resume lo dicho:

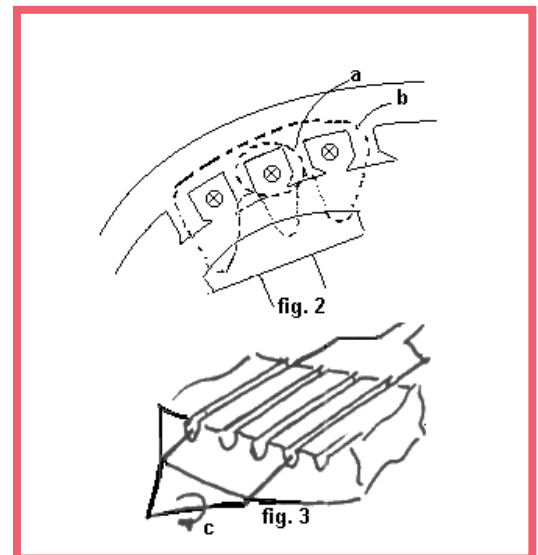
	f.m.m.	flujos	f.e.m.
campo rotor	$\theta$	$\phi$	$E_0$
por reacción de inducido	$\theta_i$	$\phi_i$	$-j X_i I$
campo resultante	$\theta_r = \theta + \theta_i$	$\phi_r$	$E$
flujo disperso	—	$\phi_d$	$-j X_d I$
caída óhmica	—	—	$R \cdot I$

La ecuación de equilibrio del circuito equivalente será:  $\bar{E}_0 - j X_i \bar{I} - j X_d \bar{I} - R \bar{I} = \bar{U}$

escribiéndola así:  $\bar{E}_0 - j (X_i + X_d) \bar{I} - R \bar{I} = \bar{U}$

a  $X_i + X_d = X_s$  se lo denomina "reactancia síncrona" y es uno de los parámetros más importantes que definen a este tipo de máquina.

Se puede definir una "impedancia síncrona"  $R + j X_s$  pero en la práctica solo se recurre a la reactancia, porque la caída óhmica suele ser del 1% al 2% de  $U$ , frente a la caída reactiva



que oscila entre el 12% al 18% de U, .- Esto es así porque los conductores son de gran sección (pequeña R) para tener pocas pérdidas en los devanados, mejor rendimiento y además conviene  $X_s$  grande para tener gran caída reactiva (que no afecta al rendimiento) lo que determina bajas corrientes de cortocircuito y por consiguiente protecciones menores.

Es importante recalcar que  $X_d = cte$  pero no así  $X_i$  pues esta última depende de la  $R$  que encuentra el  $\phi$  la cual es función del grado de saturación del hierro, y por consiguiente del grado de excitación; y en las máquinas de polos salientes de la posición de estos con respecto al  $\phi$  posición que depende del  $\cos \varphi$  y de la carga (ver reacción de inducido)

En la fig. 4 podemos definir los siguientes ángulos:

a) el comprendido entre U e I ( $\varphi$ ), definido por el  $\cos \varphi$  de la carga. . -

b) el comprendido entre  $E_0$  y U: ( $\delta$ ), llamado "ángulo de carga". Es una variable muy importante de las máquinas síncronas, porque da una idea de los momentos y de la potencia a que está sometida

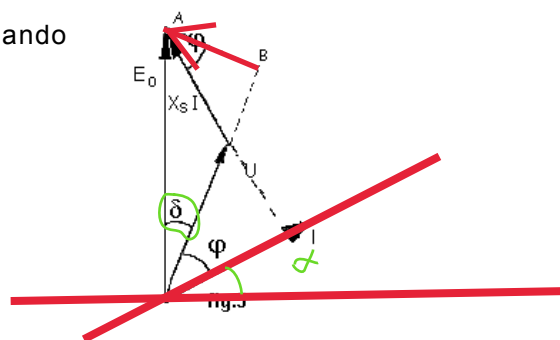
En efecto, del diagrama simplificado, fig..5, despreciando la caída RI, se obtiene:

$$P = UI \cos \varphi = \frac{U}{X_s} X_s I \cos \varphi = K \cdot E_0 \sin \delta$$

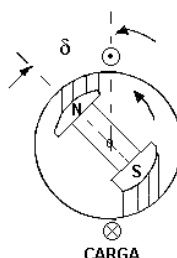
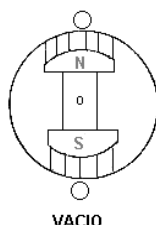
para  $\delta = 0$ ;  $P = 0$

$$\delta = \frac{\pi}{2}; P = MAX$$

de donde deducimos que  $\delta$  puede variar entre 0 y  $\pi/2$ .



**Las Normas A.S.A. lo llama "ángulo de desplazamiento" ( $\delta$ ) y lo define como "el ángulo que se desplaza el rotor entre sus posiciones de marcha en vacío y en carga, relativo a la tensión en los bornes".-En vacío el ángulo  $\delta = 0$ .**



C) el ángulo  $\alpha = 90 - (\varphi + \delta)$

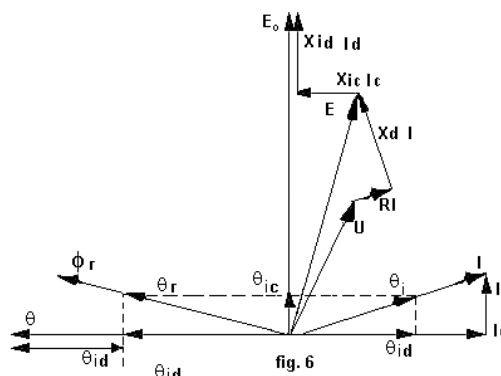
es el formado entre los ejes de los polos del rotor y estator (ver reacción de inducido, 4º caso)

## DE LOS POLOS SALIENTES

Al igual que en el caso anterior  $\theta$ , genera  $\phi$  e induce  $E_0$ , en vacío en el estator fig.6

Cuando toma la carga I (supuesta R-L) aparece  $\theta_i$  en fase con I. Pero ocurre ahora, en este caso, que el camino magnético del flujo resultante no es constante debido a la presencia de un gran espacio de aire interpolar y que además será variable con el tipo de carga.

Para poder trabajar con circuitos magnéticos constantes, cualquiera sea la carga, descomponemos  $\theta_i$  en sus componentes ortogonales, uno en la dirección del eje de la rueda polar  $\theta_{id}$  (también siempre





igual) que denominamos f.m.m. directa y otro perpendicular denominado f.m.m. en cuadratura,  $\theta_{ic}$ . Componiendo las f.m.m. obtenemos la  $\theta_r$  y  $\phi_r$ , que induce E. La diferencia entre  $E_0$  y E es debida a las caídas por reacción de inducido, pero en este caso, por las componentes  $-j X_{id} I_d = -j X_{id} I \sin \Psi$  llamada "reactancia por reacción de inducido en el eje directo" y  $-j X_{ic} I_c = -j X_{ic} I \cos \Psi$  llamada "reactancia por reacción de inducido en el eje en cuadratura", - Restando las caídas por dispersión  $X_{id} I$  y por resistencia  $R.I$  obtenemos finalmente U.-

Para los ángulos valen las mismas consideraciones que para el caso anterior.-

La ecuación de equilibrio será:

$$\vec{E}_0 - jX_{id}\vec{I}_d - jX_{ic}\vec{I}_c - jX_d\vec{I} - R\vec{I} = \vec{U}$$

### EJEMPLO:

Un generador síncrono a polos salientes, trifásico, de 20 KVA, 220 V. Conexión estrella, se encuentra trabajando a plena carga con  $\cos \phi = 0,707$ . Las constantes de la máquina, por fase, son: resistencia de inducido  $R = 0,05\Omega$ : reactancia directa  $X_d = 4\Omega$ : reactancia en cuadratura  $X_c = 2\Omega$ . Calcular la variación de tensión (regulación) y potencia entregada en dicho estado de carga.-

Tensión por fase:

$$u = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$$

Corriente por fase

$$I = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 220} = 52,5 \text{ A}$$

Ángulo  $\phi$

$$\phi = \arccos 0,707 = 45^\circ$$

Del diagrama vectorial  $I_c = I \cos(\delta + \phi)$

$$U \sin \delta = X_c I_c = X_c I \cos(\delta + \phi)$$

$$U \sin \delta = X_c I \cos \delta \cos \phi - X_c I \sin \delta \sin \phi$$

div. por  $\cos \delta$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{X_c I \cos \phi}{U + X_c I \sin \phi} = 0,37; \delta = 20,6^\circ$$

y despejando

$$\begin{aligned} I_d &= I \sin((\delta + \phi)) \\ &= 52,5 \sin(20,6 + 45) = 47,5 \text{ A} \\ X_d I_d &= 4 \cdot 47,5 = 190 \text{ V} \end{aligned}$$

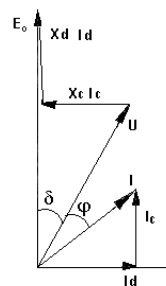
$$E_0 = U \cos \delta + X_d I_d = 308 \text{ V}$$

regulación %

$$\frac{E_0 - U}{U} 100 = \frac{308 - 127}{127} 100 = 142\%$$

potencia

$$P_{em} = m \frac{UE_0}{X_d} \sin \delta + \frac{1}{2} m U^2 \frac{X_d - X_c}{X_d \cdot X_c} \sin 2\delta = 14,46 \text{ KW}$$



### LAS REACTANCIAS DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

La necesidad de considerar varias reactancias en la máquina síncrona obedece a alguna de las siguientes razones:

- 1º) Los circuitos amortiguadores hacen que su modo de funcionar sea distinto durante intervalos de tiempo muy cortos (llamado estado subtransitorio), durante intervalos cortos (llamado estado transitorio) y en estado de régimen permanente,
- 2º) El circuito magnético en el eje de los polos (llamado eje directo) es diferente al de los entropolos (llamado eje en cuadratura) lo que produce la necesidad de designar dos valores distintos de reactancia.
- 3º) Los estudios sobre estabilidad de los sistemas eléctricos o sobre cortocircuitos, requiere el uso de las componentes simétricas, de modo que las reactancias deben separarse en sus componentes directa, inversa y homopolar.
- 4º) La saturación del circuito magnético puede afectar los valores anteriores.

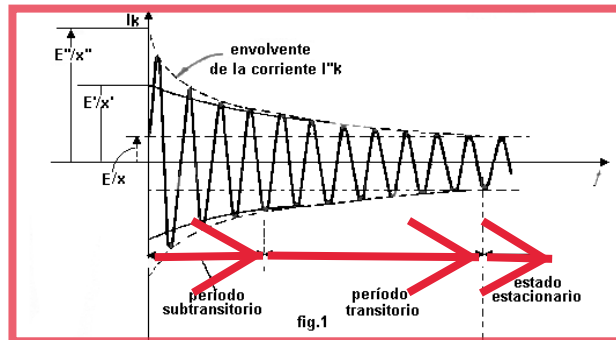
Es decir, las reactancias de las máquinas van a influir en:

- a) tensiones transitorias por conexión y desconexión bajo grandes cargas,

- b) regulación de tensión a régimen permanente,
- c) potencia del sistema bajo condiciones de fallas,

En este tema vamos a estudiar los conceptos básicos de lo que son las distintas reactancias y corrientes de cortocircuito, sus causas físicas y aplicaciones, dejando para un estudio más profundo los distintos tipos de fallas y su cálculo.

Consideremos un caso simple de un cortocircuito trifásico, y de él solamente la componente simétrica de la corriente alterna.- Bajo estas premisas la forma de onda será la de la figura 1



Esta onda puede ser dividida en tres periodos: durante los primeros ciclos después de la falla, la corriente es muy grande y decae con rapidez, a este periodo se lo llama subtransitorio, a sus parámetros se los individualiza con (''). Al finalizar este periodo la corriente disminuye pero con más lentitud hasta alcanzar su estado estacionario, se individualiza con ('), y se lo denomina estado transitorio y el tiempo posterior estado estacionario, Estos periodos determinan las llamadas corrientes de cortocircuito subtransitoria ( $I_k''$ ), transitoria ( $I_k'$ ) y estacionaria ( $I_k$ ) y se miden en el origen de coordenadas extrapolando las envolventes, es decir para  $t = 0$ .

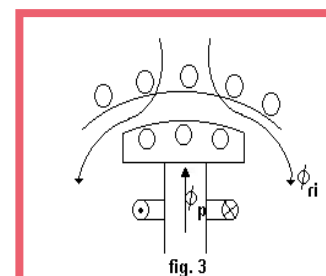
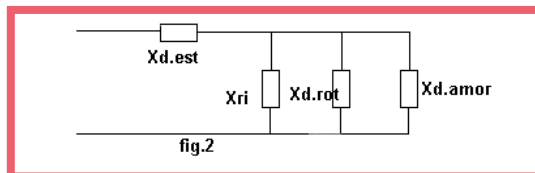
Cada una de estas corrientes determinan una reactancia: reactancia subtransitoria:  $X'' = E'' / I_k''$ ; reactancia transitoria:  $X' = E' / I_k'$  y reactancia del estado estacionario:  $x = E / I_k$ ; siendo E las f.e.m. en el instante  $t = 0$ ; que en turboalternadores puede valer alrededor de  $E'' \cong E' = 1,10U$  y en máquinas de polos salientes  $E'' \cong E' = 1,15U$  .-

### Reactancia subtransitoria; $X''$

Comprende las siguientes reactancias parciales:

- 1) reactancia de dispersión del arrollamiento estatórico:  $X_{d, \text{est}}$
- 2) reactancia por reacción de inducido:  $X_{ri}$
- 3) reactancia de dispersión del arrollamiento rotórico:  $X_{d, \text{rotor}}$
- 4) reactancia de dispersión del arrollamiento amortiguador:  $X_{d, \text{am}}$  (La función del arrollamiento amortiguador se trata en " Motores síncronos " (pag...))

Su circuito equivalente es (fig2 )



Significado físico: el flujo por reacción de inducido atraviesa el entrehierro y penetra en el rotor hasta el devanado amortiguador.(fig. 3 ).-

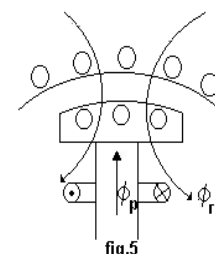
Aplicaciones: Se usa para determinar la corriente de cresta, a fin de poder calcular los esfuerzos electromagnéticos máximos en las barras.

Duración: de 1 a 6 ciclos para 50/60 Hz.

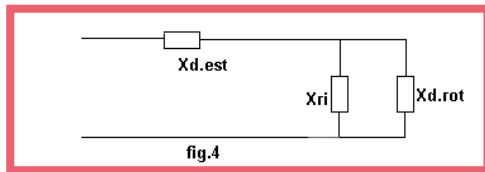
### Reactancia transitoria $X'$

Comprende las siguientes reactancias parciales

- 1) reactancia de dispersión del arrollamiento estatórico:  $X_{d, \text{est}}$ .



- 2) reactancia por reacción de inducido:  $X_{ri}$   
 3) reactancia de dispersión del arrollamiento rotórico:  $X_{d.rot}$   
 Su circuito equivalente es (fig. 4)



Significado físico: El flujo por reacción de inducido penetra en el rotor hasta el devanado inductor (fig.5)

Aplicaciones : determina la corriente que debe cortar el interruptor para eliminar una falla.

Duración: desaparece dentro de 3 a 6 segundos.

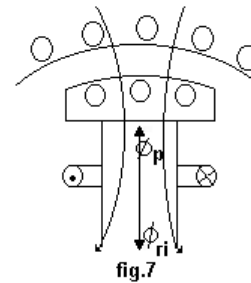
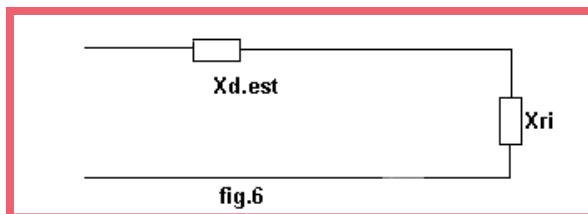
### **Reactancia del estado estacionario (reactancia síncrona): $X_s$**

Comprende las siguientes reactancias parciales:

1) reactancia de dispersión en el arrollamiento estatorico:  $X_{d.est}$ .

2) reactancia por reacción de inducido:  $X_{ri}$

Su circuito equivalente es (fig. 6)



Significado físico: el flujo por reacción de inducido actúa ya netamente con su efecto desmagnetizante, fig. 7.-

Duración: es la reactancia en estado de régimen permanente.

## **REACTANCIA SÍNCRONA**

### **Definición**

La impedancia síncrona se define como la relación entre la tensión a circuito abierto ( $U_0$ ) y la

corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ) para un mismo valor de excitación:  $Z_s = \frac{U_0}{I_{cc}}$

Como la  $R$  es pequeña a los efectos prácticos se considera  $Z_s = X_s$

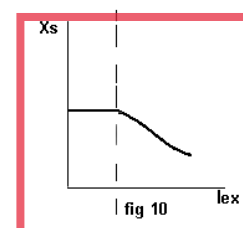
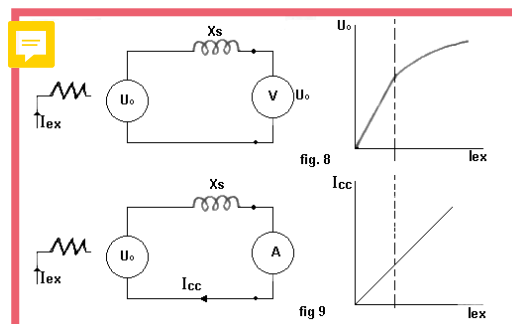
### **Procedimiento**

Para determinar la reactancia síncrona en el eje directo ( $X_{sd}$ ), se procede de la siguiente manera:

1º) se realiza un ensayo en vacío: llevando la máquina a velocidad síncrona, excitando el rotor para obtener una tensión  $U_0$  en el estator (fig. 8) a circuito abierto, menor que la nominal

2º) se realiza un ensayo en cortocircuito: se coloca un amperímetro a los bornes del estator.

Se restituye la excitación al mismo valor anterior y se mide la corriente de c.c., cuidando que sea la corriente nominal (fig.9). Como la corriente de excitación es la misma en ambos ensayos, la tensión interna medida durante el ensayo en vacío está presente durante el ensayo en c.c. pero se utiliza íntegramente en suministrar la corriente



de c.c. a través de la impedancia síncrona.

Entonces: la impedancia síncrona esta dada por la relación de la tensión a circuito abierto, a la corriente de c.c., para el mismo valor de la excitación.

La corriente de c.c. atrasa  $90^\circ$  respecto a la tensión (carga L) entonces la f.m.m. de inducido es opuesta a la f.m.m. del rotor, por consiguiente la  $X_s$  así obtenida es la  $X_{sd}$ , o sea la reactancia síncrona directa.

La reactancia síncrona es constante y máxima para valores no saturados, decreciendo luego con la saturación, porque siendo:  $L = \Lambda N^2$ ;  $X_s = \omega L$

no saturado:  $\Lambda = \text{cte.} \Rightarrow X_s = \text{cte.}$

saturado:  $\Lambda = \text{dism.} \Rightarrow \text{dism. } L. \Rightarrow \text{dism. } X_s$  (fig. 10)