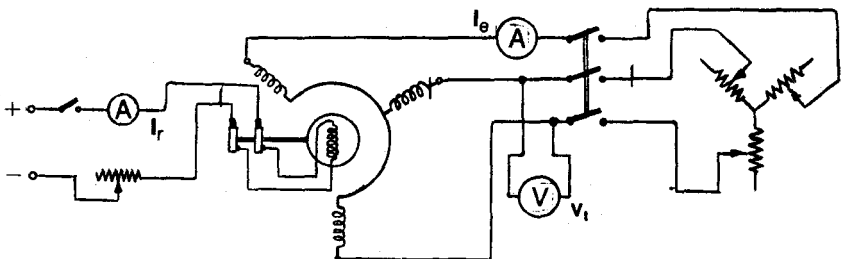


# Capítulo 7

## LA MAQUINA SINCRONA EN REGIMEN ESTABLE

- 7.1 La máquina de rotor cilíndrico
- 7.2 Circuito equivalente
- 7.3 Reactancia síncrona
- 7.4 La regulación
- 7.5 Características internas: curvas de vacío y de cortocircuito
- 7.6 Las reactancias síncronas no saturada y saturada
- 7.7 Ecuación potencia-ángulo
- 7.8 La máquina de polos salientes  
Reactancias de ejes directo y cuadratura  
Ecuación potencia-ángulo
- 7.9 Potencia, pérdidas y eficiencia
- 7.10 Curvas de características exteriores, de carga y de regulación
- 7.11 El motor síncrono. Mejora del factor de potencia
- 7.12 Generadores en paralelo
- 7.13 Datos de placa





# LA MAQUINA SINCRONA EN REGIMEN ESTABLE

## 7.1 LA MAQUINA DE ROTOR CILINDRICO

El entrehierro de la máquina sincrona de rotor cilíndrico es constante. Esto simplifica bastante su análisis por cuanto el circuito magnético será el mismo tanto en el eje directo (eje principal) como en el eje en cuadratura (eje neutro).

En la figura 7.1 se muestra el esquema eléctrico simple correspondiente a una máquina sincrona de rotor cilíndrico con el bobinado del estator conectado en estrella, por ejemplo, el de un generador conectado a una carga trifásica balanceada.

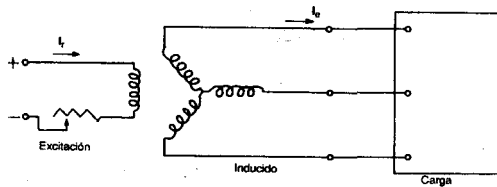


Fig. 7.1 Generador trifásico conectado a una carga

Las tres corrientes distribuidas simétricamente en el tiempo y circulando por las tres bobinas distribuidas simétricamente en el espacio dan lugar a la aparición de un campo magnético giratorio que se distribuye senoidalmente en la periferia. Este campo es de amplitud constante y velocidad también constante e igual a la velocidad de sincronismo.

En la figura 7.2 se representa el diagrama de vectores de campo de un generador donde se cumple:

$$\vec{F}_{er} = \vec{F}_e + \vec{F}_r$$

Estos tres diagramas son proporcionales debido a que el entrehierro es constante:

$$\phi = \frac{F}{R} = \left( \frac{1}{R} \right) F \quad \text{y} \quad \lambda = N \phi$$

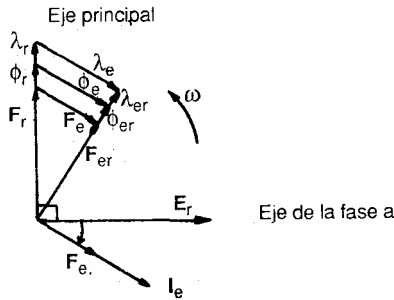


Fig. 7.2 Diagramas vectoriales de las f.m.m.s., flujos y flujos concatenados del estator, rotor y resultante.

Al mismo tiempo, los flujos concatenados con la armadura  $\lambda_e$ ,  $\lambda_r$  y  $\lambda_{er}$  dan lugar a las f.e.m.s.  $E_e$ ,  $E_r$  y  $E_{er}$  respectivamente cuyos fasores aparecen atrasados  $90^\circ$  de los flujos concatenados respectivos tal como se muestra en la figura 7.3.

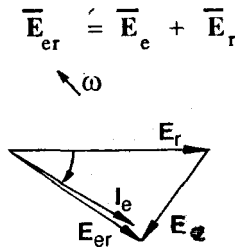


Fig. 7.3 Diagrama fasorial de f.e.m.s. en un generador.

## 7.2 CIRCUITO EQUIVALENTE

El diagrama fasorial de las f.e.m.s. inducidas en la armadura es equivalente al de la figura 7.4, donde se muestra también el diagrama circuital equivalente donde se considera que en el componente serie del circuito se produce una caída de tensión igual a  $(-E_e)$ .

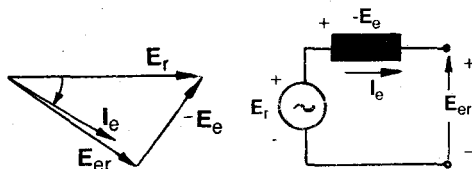


Fig. 7.4 Diagramas fasorial y circuital equivalentes de las f.e.m.s. inducidas.

Partiendo del circuito equivalente de la figura 7.4, se cumple:

$$\bar{E}_r = \bar{E}_{er} + (-\bar{E}_e)$$

Como la corriente de armadura  $I_e$  está en fase con el flujo concatenado  $\lambda_e$ , la f.e.m.  $E_e$  está a  $90^\circ$  de  $I_e$ .

En el diagrama fasorial de la figura 7.4 se ve que la corriente de armadura  $I_e$  atrasa  $90^\circ$  a la tensión  $-E_e$ , lo cual se cumple en elementos inductivos por lo que dicho elemento en serie se considera como una reactancia que se conoce con el nombre de reactancia magnetizante o reactancia de reacción de armadura  $X_m$ . Véase la figura 7.5.

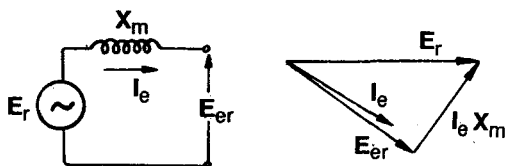


Fig. 7.5 Diagramas circuital y fasorial equivalentes del generador.

Aquí se cumple lo siguiente:

$$\begin{aligned}\bar{E}_r &= \bar{E}_{er} + \bar{I}_e \times \bar{X}_m \\ &= \bar{E}_{er} + \bar{I}_e (X_m \underline{90^\circ})\end{aligned}$$

### 7.3 REACTANCIA SINCRONA

Aunque las configuraciones de los embobinados y de los circuitos magnéticos en máquinas rotativas son más complejos que aquéllos en transformadores convencionales, la naturaleza de los flujos de dispersión en ambos es similar.

La reactancia de dispersión en una máquina de rotor cilíndrico varía entre 0.09 y 0.2 veces la reactancia magnetizante y es prácticamente constante por cuanto su circuito magnético es de aire.

El flujo de dispersión equivalente  $\phi_d$  y el flujo  $\phi_e$  de la reacción de armadura están en fase con la corriente en una fase dada del embobinado de armadura.

La inductancia magnetizante  $L_m$  y la inductancia de dispersión  $L_d$  pueden, por lo tanto, ser sumadas, como también las respectivas reactancias  $X_m$  y  $X_d$  para dar lugar a la reactancia sincrónica  $X_s$ :

$$\begin{aligned}L_s &= L_m + L_d \\ \omega L_s &= \omega L_m + \omega L_d \\ X_s &= X_m + X_d\end{aligned}$$

La reactancia magnetizante depende de la reluctancia  $R$  del circuito magnético compuesto por el rotor, el estator y el entrehierro ( $L = N^2 / R$ ). Debido al entrehierro esta reluctancia es relativamente alta y se mantiene constante mientras no se sature el circuito magnético, por lo que la reactancia síncrona no saturada  $X_s$  (NS) es prácticamente constante.

Quando el circuito magnético se satura, la reluctancia aumenta por lo que la reactancia síncrona disminuye de valor conforme aumenta la saturación. Entonces, recibe el nombre de reactancia síncrona saturada  $X_s$  (S) y es variable.

Por su parte, cada fase de la máquina presenta una resistencia interna capaz de medirse con un ohmímetro y que se denomina resistencia de armadura  $r_a$ , cuyo valor es bastante pequeño y que en máquinas grandes es despreciable comparado con  $X_d$ . Esta resistencia produce pérdida de potencia y caída de tensión cuando circula la corriente de armadura.

### 7.4 LA REGULACION

Si la resistencia de armadura  $r_a$  y la reactancia de dispersión  $X_d$  fueran cero, entonces, la f.e.m. resultante  $E_{er}$  sería igual a la tensión en bornes  $V_t$ . Sin embargo, ya que éste no es el caso, véase la figura 7.6:

$$\bar{E}_{er} = \bar{V}_t + \bar{I}_e (r_a + j X_d)$$

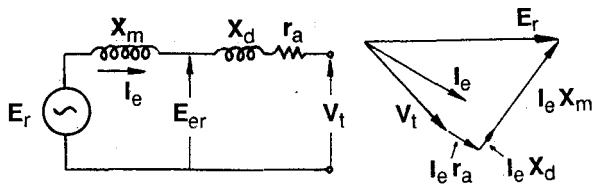


Fig. 7.6 Circuito equivalente completo.

Igual que en el caso de un transformador o de un generador de corriente continua, se define la **regulación de tensión** de un generador síncrono a una carga determinada, como:

$$\text{Reg}(\%) = \frac{V_o - V_t}{V_t} \times 100$$

donde:

- $V_t$ , tensión terminal por fase con carga,
- $V_o$ , tensión terminal por fase en vacío.

Conociendo  $X_s$  (para un generador de rotor cilíndrico) y  $V_t$  se puede encontrar  $E_r$  igual a  $V_o$  y, en consecuencia, determinar la regulación de tensión.

A diferencia de lo que ocurre con un generador de corriente continua, la re-

gulación de tensión de un generador síncrono puede llegar a ser negativa, dependiendo del factor de potencia y de la carga.

En la figura 7.7 se muestra el diagrama fasorial para factores de potencia en adelanto y en atraso.

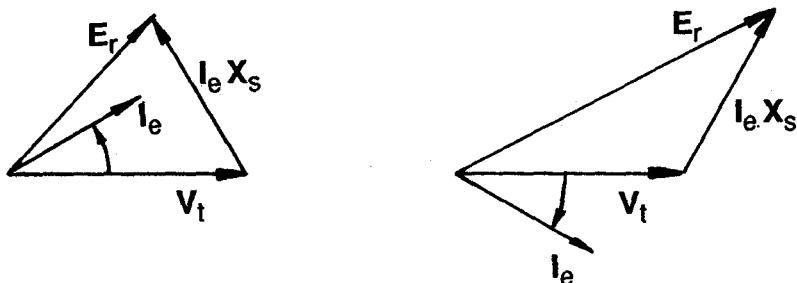


Fig. 7.7 Diagrama fasorial de un generador síncrono.

## 7.5 CARACTERÍSTICAS INTERNAS: CURVA DE VACIO Y DE CORTOCIRCUITO

Las pruebas se llevan a cabo principalmente por dos razones. La primera es para demostrar que las especificaciones del contrato se han llenado; y la segunda, para obtener los parámetros pertinentes para la evaluación del comportamiento. Cuando se prueba para llenar las especificaciones, se deberá seguir procedimientos normalizados, por ejemplo, los aprobados por la IEEE, y modificados por el contrato. Las pruebas, como se describe, son para obtener los parámetros necesarios en la evaluación del comportamiento.

Sometiendo la máquina a las pruebas de circuito abierto o vacío y de cortocircuito se obtienen las respectivas curvas, las cuales permitirán determinar, entre otras cosas, la reactancia síncrona saturada aproximada y la no saturada.

La reactancia síncrona no saturada es constante debido a que la reluctancia del hierro no saturada es despreciable.

### 7.5.1 Característica de vacío

Puesto que el circuito magnético en una máquina síncrona contiene materiales ferromagnéticos, la primera prueba es para determinar la característica en vacío o de circuito abierto (llamada también de excitación o de magnetización de la máquina).

El circuito equivalente monofásico de un generador síncrono trifásico para las condiciones de vacío se muestra en la figura 7.8. La ausencia de carga en los bornes del generador hace que la corriente de armadura  $I_e$  sea igual a cero.

Para obtener la característica de vacío, la máquina se hace girar sin carga a la velocidad de sincronismo por medio de un motor primo.

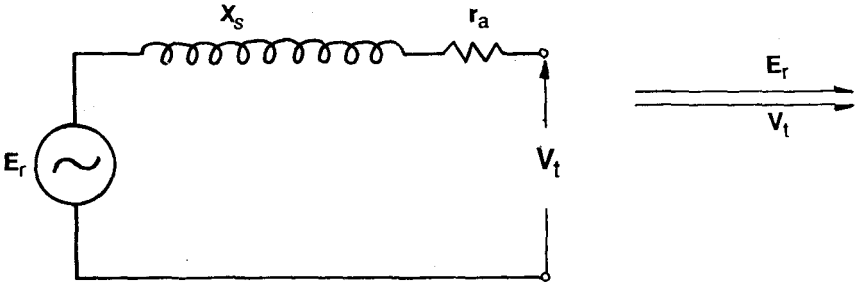


Fig. 7.8 Generador sincrónico en vacío.

Se toma lecturas de tensión en los bornes de la armadura para diversos valores de la corriente de excitación o de campo. La curva resultante se muestra en la figura 7.9, en la que se prefiere graficar usando los valores de la tensión en bornes del equivalente monofásico.

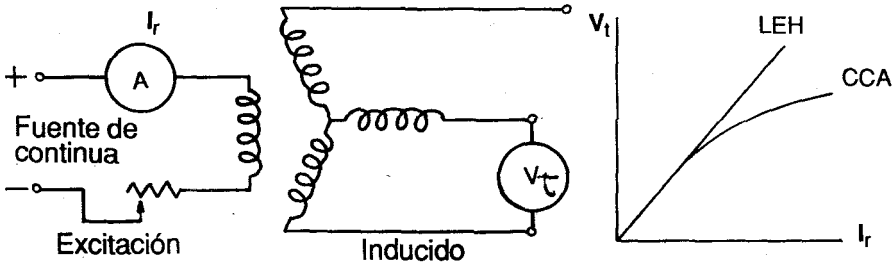


Fig. 7.9 Característica de vacío.

Si se registra la potencia mecánica de entrada se obtienen las pérdidas rotacionales en vacío. Estas son las pérdidas por fricción mecánica y por ventilación, que son constantes, y las pérdidas en el núcleo, de circuito abierto, que son proporcionales al flujo y, por tanto, a la tensión inducida.

Si la saturación no ocurriera en las partes del acero, la característica de vacío sería una línea recta denominada la línea de entrehierro LEH, puesto que queda determinada primordialmente por el entrehierro.

Se supone que la curva CCA de circuito abierto es la curva de magnetización bajo las condiciones de saturación.

→ Esta curva proporciona información de saturación que puede usarse para obtener los valores correctos de las reactancias afectadas por la saturación.

Esto se puede lograr por medio de un factor de saturación  $k$  que es la relación entre la corriente de campo requerida para una determinada tensión en la CCA y la corriente de campo que se requiere para la misma tensión en la LEH. Véase la figura 7.10. El uso del factor  $k$  se presentará después de que se haya explicado la prueba de cortocircuito.

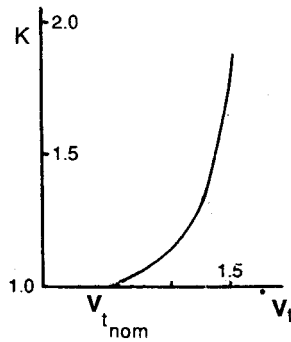


Fig. 7.10 El factor de saturación  $k$ .

### 7.5.2 Característica de cortocircuito

La prueba de cortocircuito, como su nombre lo indica, se lleva a cabo cortocircuitando los tres terminales del bobinado de la armadura tal como se ve en la figura 7.11. Durante el ensayo se miden la corriente de armadura  $I_e$  y la corriente de excitación  $I_r$ , mientras que la velocidad del generador se mantiene prácticamente constante.

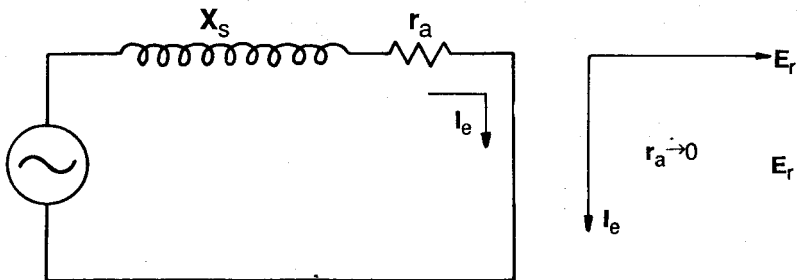


Fig. 7.11 Ensayo de cortocircuito del generador.

En la figura 7.12 se presenta la gráfica de la característica de cortocircuito CCC con la corriente de armadura  $I_e$  en función de la corriente de excitación  $I_r$ . Es interesante observar que esta gráfica es una línea recta. Esto se debe al

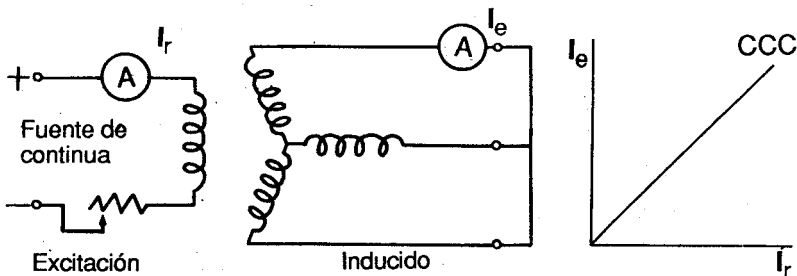


Fig. 7.12 Característica de cortocircuito.

efecto de la reacción de armadura el cual da lugar a un flujo resultante muy pequeño tal como puede observarse en el diagrama vectorial de la figura 7.13. Esto trae como consecuencia que la máquina no se sature y que su comportamiento sea lineal.

Durante la ejecución de la prueba de cortocircuito, el circuito equivalente de la figura 7.11 se aplica para  $V_t$  igual a cero. Esto indica explícitamente que la f.e.m.  $E_r$  debida al campo inductor debe ser igual a la caída de tensión en la impedancia sincrónica  $Z_s$ :

$$\bar{E}_r = \bar{I}_e (r_a + j X_s)$$

El valor de la corriente de cortocircuito  $I_e$  se mide durante la prueba, mientras que el valor de  $E_r$  se puede determinar de la CCA para la correspondiente corriente de excitación  $I_r$ .

Durante la prueba de cortocircuito, la corriente de armadura  $I_e$  se atrasa de la f.e.m.  $E_r$  por un ángulo de cerca de  $90^\circ$  eléctricos como resultado de que  $X_s$  es mucho mayor que  $r_a$ .

En la figura 7.13 se observa la posición relativa de los vectores de campo y de los fasores de f.e.m. cuando el generador trabaja cortocircuitado.

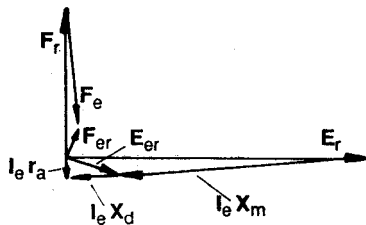


Fig. 7.13 Diagrama vectorial de campos y f.e.m.s.

Como se puede ver en el diagrama, el campo del rotor  $F_r$  es mucho menor que el campo del estator  $F_e$  y, en general, es aproximadamente el 15% de éste.

## 7.6 LAS REACTANCIAS SINCRONAS NO SATURADA Y SATURADA

Las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto permiten determinar las reactancias sincrónicas no saturada y saturada de la máquina.

Para esto se grafica las dos curvas CCA y CCC en un mismo plano cartesiano tal como se ve en la figura 7.14, en el que se ha tomado como abscisas la corriente de excitación  $I_r$  y como ordenadas, la tensión de circuito abierto  $V_t$  y la corriente de cortocircuito  $I_e$ , respectivamente.

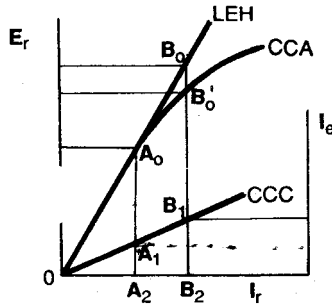


Fig. 7.14 Características de circuito abierto y de cortocircuito.

En cortocircuito, si se desprecia la resistencia de armadura  $r_a$ , la máquina puede representarse como se muestra en la figura 7.15.

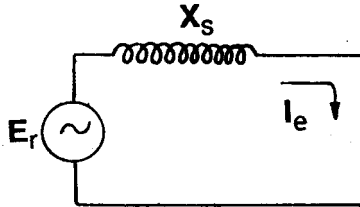


Fig. 7.15 Diagrama circuital equivalente del generador cortocircuitado.

Se puede escribir, entonces, que la reactancia síncrona  $X_s$ , para una determinada corriente de excitación  $I_r$ , es igual a:

$$X_s = \frac{E_r \text{ (CCA)}}{I_e \text{ (CCC)}} \quad (7.1)$$

Entonces, el gráfico de la figura 7.14 proporciona los valores de  $E_r$  y de  $I_e$ , y bastará con aplicar la Ec. (7.1) para determinar la reactancia síncrona.

En el tramo recto de la CCA, desde 0 hasta  $A_0$ , se obtendrá siempre el mismo valor para  $X_s$ , ya que ambas curvas son rectas en ese tramo.

La reactancia, así determinada, se denomina **reactancia síncrona no saturada**  $X_s$  (NS) y corresponde al funcionamiento de la máquina en régimen no saturado:

$$X_s \text{ (NS)} = \frac{A_0 - A_2}{A_1 - A_2} = \frac{B_0 - B_2}{B_1 - B_2} \quad (7.2)$$

A partir del punto  $A_0$ , la reactancia síncrona empieza a variar y tendrá un valor diferente en cada punto de la curva CCA. A este valor se le denomina el de la **reactancia síncrona saturada**  $X_s$  (S). Se acostumbra dar este valor para la tensión nominal del generador.

Así, por ejemplo, si el punto  $B'_0$  corresponde a la tensión nominal, la reactancia síncrona se determinaría del siguiente modo:

$$X_s(S) = \frac{B'_0 - B_2}{B_1 - B_2} = \frac{V_t(n)}{B_1 - B_2} \quad (7.3)$$

Comparando las ecuaciones (7.2) y (7.3) se puede ver que la reactancia síncrona no saturada  $X_s(NS)$  es mayor que la saturada  $X_s(S)$ . En la figura 7.16 se ha graficado la curva de la reactancia síncrona  $X_s$  en función de la corriente de excitación  $I_r$ .

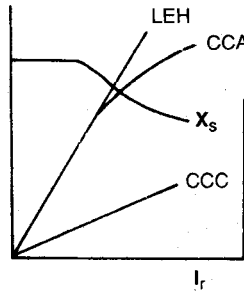


Fig. 7.16 Gráfica de la reactancia síncrona.

Este procedimiento hace lineal la CCA de la máquina a través del punto  $B'_0$  y los cálculos se efectúan como si ésta fuera la característica real de circuito abierto CCA. Esta nueva recta recibe el nombre de **CCA linealizada** y se usa para determinar la corriente de excitación requerida  $I_r$  para la condición de carga dada ( $V_t, I_e, f.p.$ ). Véase la figura 7.17.

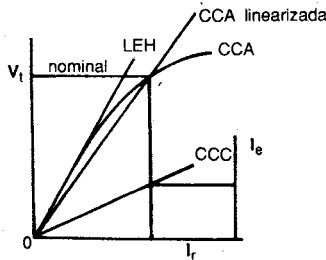


Fig. 7.17 Uso de la CCA linealizada.

La tensión terminal  $V_t$  sin carga, igual a la f.e.m.  $E_r$ , se determina posteriormente en la característica real de circuito abierto CCA para el mismo valor de la corriente de excitación  $I_r$ .

En la solución de problemas relacionados con la operación de los generadores síncronos trifásicos se toma como una primera aproximación del valor de la reactancia síncrona el de la  $X_s$  (NS) lo cual da resultados poco satisfactorios pues equivale a suponer que la CCA es la LEH, lo cual no es cierto.

En condiciones normales de operación, la máquina síncrona opera en condiciones de saturación y el uso de la  $X_s$  (NS) no es válido.

Como una segunda aproximación, se utiliza el método de la CCA linealizada, el cual, si se aplica con cuidado, da resultados de exactitud razonable.

Cuando se requiere una mayor exactitud que la que se obtiene por los métodos anteriores, el método siguiente, que usa el factor de saturación  $k$  y que se ilustra en la figura 7.18, da resultados satisfactorios:

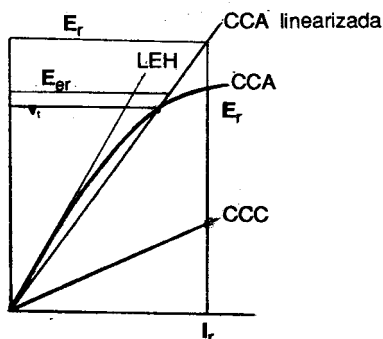


Fig. 7.18 Método del factor de saturación.

La reactancia síncrona  $X_s$  consta de dos componentes. Uno es la reactancia magnetizante de la reacción de la armadura  $X_m$  y el otro es la reactancia de dispersión  $X_d$ .

El flujo de dispersión tiene trayectorias en aire de longitud suficiente como para que la inductancia de dispersión sea independiente virtualmente de cualquier efecto de saturación.

La técnica de linealización usada en el segundo método, cambia implícitamente el valor de las reactancias de dispersión.

El factor de saturación  $k$  no debe aplicarse a la reactancia de dispersión, puesto que el flujo de la reacción de armadura se establece a través de la serie total del circuito magnético.

El valor de la  $X_s$  (NS) se puede encontrar por la expresión:

$$X_s \text{ (NS)} = \frac{E_r \text{ (LEH)}}{I_e \text{ (CCC)}}$$

Suponiendo, por ahora, que el valor de la reactancia de dispersión  $X_d$  es conocido, el valor de la reactancia magnetizante en condiciones de no saturación  $X_m$  (NS) se puede determinar:

$$X_m(NS) = X_s(NS) - X_d$$

La magnitud del factor de saturación  $k$  se determina para el valor de la f.e.m. resultante  $E_{cr}$ .

El valor de la reactancia magnetizante en condiciones de saturación  $X_m(S)$  se determina por la expresión:

$$X_m(S) = \frac{X_m(NS)}{k}$$

El valor de la  $X_s(S)$  es, por tanto, la suma de  $X_m$  y  $X_d$ :

$$X_s(S) = X_m(S) + X_d$$

Este método, aunque relativamente sencillo, también da resultados satisfactorios cuando se aplica a la máquina síncrona de polos salientes.

## 7.7 ECUACION POTENCIA-ANGULO

Supóngase que una máquina síncrona está conectada a una red de potencia infinita, es decir, una red cuya tensión y frecuencia permanecen invariables sea cual fuere la carga conectada. Véase la figura 7.19.

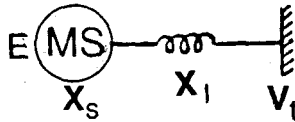


Fig. 7.19 Generador síncrono en una red de potencia infinita.

Despreciando la resistencia de armadura  $r_a$  y suponiendo que la línea de conexión tiene una reactancia  $X_1$ , el circuito equivalente será el que se muestra en la figura 7.20

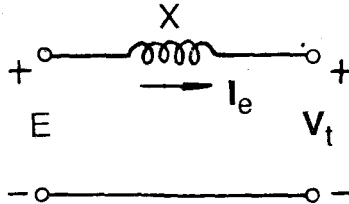


Fig. 7.20 Circuito equivalente simplificado.

Remplazando las reactancias  $X_1$  y  $X_s$  por una sola reactancia  $X$  y suponiendo que la corriente  $I_e$  que entrega la máquina está atrasada un ángulo  $\phi$  con respecto a  $V_t$ , o sea, que la máquina funciona como generador con f.p. inductivo, se puede construir el diagrama fasorial de la figura 7.21.

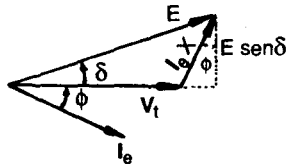


Fig. 7.21 Diagrama fasorial.

La potencia activa  $P$  trifásica es igual a:

$$P = 3 V_t \cdot I_e \cdot \cos \phi$$

Pero, de la figura 7.21, se deduce que:

$$E \text{ sen } \delta = X \cdot I_e \cdot \cos \phi$$

Por lo tanto:

$$\frac{E \text{ sen } \delta}{X \cos \phi} = I_e$$

Luego, remplazando el valor de  $I_e$  en la expresión de  $P$ , se tiene:

$$P = \frac{3 V_t \cdot E}{X} \text{ sen } \delta$$

Esta ecuación se llama **ecuación potencia-ángulo** de la máquina e indica que la potencia  $P$  depende del ángulo de potencia. Véase la figura 7.22.

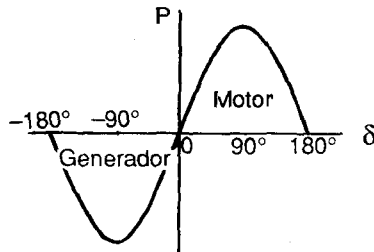


Fig. 7.22 Curva  $P - \delta$  de una máquina síncrona.

Para la potencia reactiva  $Q$  también se puede encontrar una expresión interesante.

La potencia reactiva  $Q$  trifásica es igual a:

$$Q = 3 V_t \cdot I_e \cdot \text{sen } \phi$$

De la figura 7.21 se deduce que:

$$E \cos \delta = V_t + X \cdot I_e \cdot \text{sen } \phi$$

Despejando  $I_e$  en esta última expresión, se obtiene:

$$I_e = \frac{E \cos \delta - V_t}{X \text{ sen } \phi}$$

Reemplazando el valor de  $I_e$  en la expresión de  $Q$  se obtiene:

$$Q = \frac{V_t \cdot E \cdot \cos \delta - V_t^2}{X}$$

## 7.8 LA MAQUINA DE POLOS SALIENTES

El flujo engendrado por la onda de f.m.m. en una máquina de entrehierro uniforme (o de rotor cilíndrico) es independiente de la posición espacial de la onda respecto al campo inductor.

Pero, en las máquinas de polos salientes existe una dirección de magnetización preferente determinada por las expansiones polares.

La reluctancia es apreciablemente menor en el sentido del eje directo (o polar o principal) que en el del eje en cuadratura (o neutro).

En la figura 7.23 puede verse los flujos longitudinal y transversal en el entrehierro de una máquina síncrona.

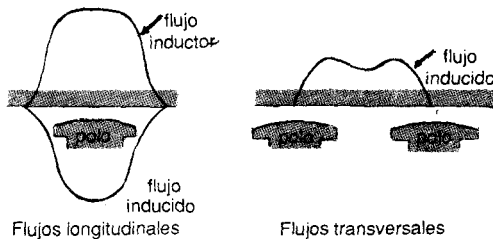


Fig. 7.23 Flujos longitudinal y transversal.

Para estudiar el efecto de los polos salientes se puede descomponer la corriente inducida  $I_e$  en dos componentes, una de ellas en cuadratura con la f.e.m.  $E_r$  y la otra en fase con la misma, tal como se representa en el diagrama

ma fasorial de la figura 7.24, que corresponde a un generador síncrono de polos salientes, no saturado, trabajando con f.p. en retraso.

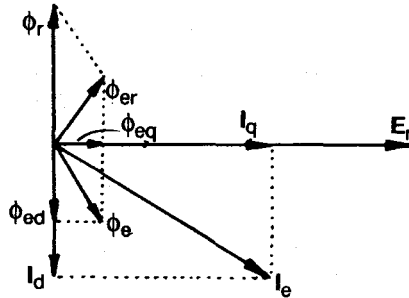


Fig. 7.24 Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes.

### 7.8.1 Reactancias de ejes directo y cuadratura

Cada una de las componentes  $I_d$  e  $I_q$  de la intensidad lleva aparejada una componente de la caída de tensión en la reactancia síncrona, de valor  $jI_d \cdot x_d$  y  $jI_q \cdot x_q$  respectivamente.

Las reactancias  $x_d$  y  $x_q$  son las reactancias síncronas directa o longitudinal y en cuadratura o transversal.

Como se puede ver en el diagrama fasorial de un generador en la figura 7.25, la f.e.m.  $E_r$  inducida por el campo de excitación es igual a la suma fasorial de la tensión en bornes  $V_t$  más la caída de tensión en la resistencia del devanado del inducido  $I_e \cdot r_a$ , más las componentes de la caída de tensión en la reactancia síncrona  $jI_d \cdot x_d + jI_q \cdot x_q$ .

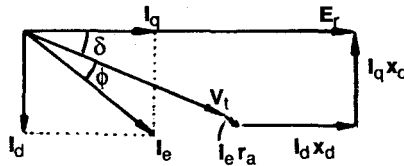


Fig. 7.25 Diagrama fasorial de un generador síncrono.

La reactancia  $x_q$  es menor que la  $x_d$  debido a la mayor reluctancia del entrehierro en la dirección del eje transversal: corrientemente,  $x_q$  está comprendido entre 0.6 y 0.7  $x_d$ .

En la figura 7.26 se repite, con trazo lleno, el diagrama fasorial de la figura 7.25.

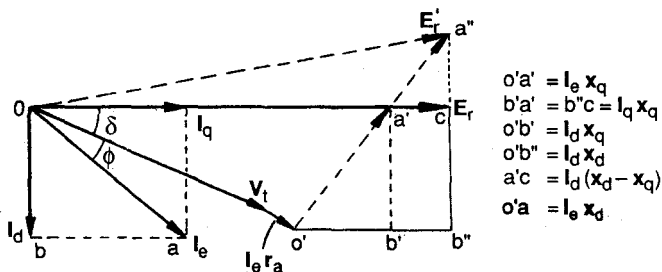


Fig. 7.26 Relaciones entre las componentes de tensión en el diagrama fasorial.

Se observa que:

$$\bar{E}' = \bar{V}_t + \bar{I}_e \cdot \bar{x}_q$$

$$E_r = E' + I_d (x_d - x_q)$$

### 7.8.2 Ecuación potencia-ángulo

En la figura 7.26a se representa el esquema simple formado por una máquina síncrona de polos salientes conectada a una red de potencia infinita de tensión  $E_1$  a través de una impedancia en serie de reactancia por fase igual a  $x_1$  (se despreciará la resistencia por ser normalmente muy pequeña).

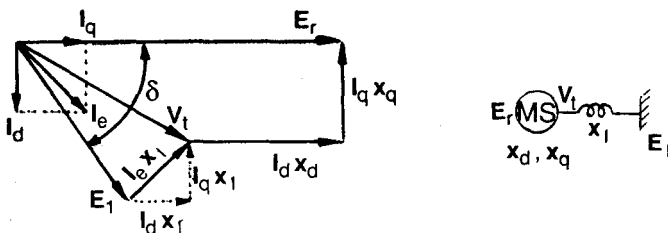


Fig. 7.26a Máquina síncrona de polos salientes e impedancia en serie.

Se considera que la máquina síncrona actúa de generador y el diagrama fasorial será el dibujado a la derecha en la figura 7.26a.

El efecto de la impedancia exterior es simplemente el de añadir su valor a las reactancias de la máquina, es decir, el valor total de la reactancia interpuesta entre la tensión  $E_r$  inducida por el campo inductor y la tensión  $E_1$  en la red es:

$$X_d = x_d + x_1$$

$$X_q = x_q + x_1$$

Si la tensión  $E_1$  de la red se descompone en las dos componentes  $E_1 \cdot \sin \delta$  y  $E_1 \cdot \cos \delta$  en fase con  $I_d$  y con  $I_q$  respectivamente, la potencia  $P$  suministrada a la red será:

$$P = I_d \cdot E_1 \cdot \sin \delta + I_q \cdot E_1 \cdot \cos \delta$$

De la figura 7.26a se tiene también que:

$$I_d = \frac{E_r - E_1 \cos \delta}{X_d}$$

$$I_q = \frac{E_1 \sin \delta}{X_q}$$

Sustituyendo estas dos últimas ecuaciones en la ecuación anterior de  $P$  se tiene:

$$P = \frac{E_r \cdot E_1}{X_d} \sin \delta + E_1^2 \cdot \frac{X_d - X_q}{2 X_d \cdot X_q} \sin 2 \delta$$

En la figura 7.26b se representa la curva característica de potencia-ángulo.

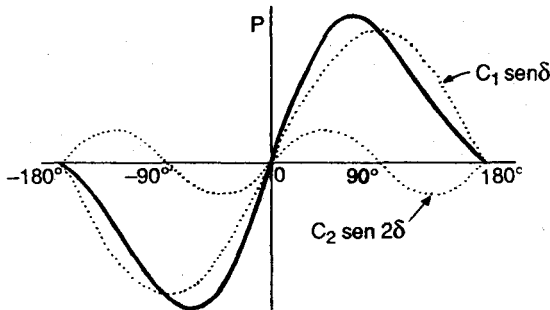


Fig. 7.26b Característica potencia-ángulo de una máquina síncrona de polos salientes.

En la figura 7.26b se muestra la componente fundamental debida al campo inductor y la segunda armónica debida al par de reluctancia.

El primer término es igual a lo obtenido para una máquina de rotor cilíndrico.

El segundo término es el que introduce el efecto de los polos salientes, y

representa el hecho de que la onda de flujo en el entrehierro crea un par (llamado par de reluctancia) que tiende a alinear los polos inductores en la posición de mínima reluctancia.

Obsérvese que el par de reluctancia es independiente del campo de excitación.

## 7.9 POTENCIA, PERDIDAS Y EFICIENCIA

La potencia mecánica entregada por el motor primo al eje del generador se convertirá finalmente en la potencia activa o potencia útil que el generador entregará a la red eléctrica trifásica.

Sin embargo, esta conversión no es ideal sino que se realiza a costa de una serie de pérdidas de potencia  $P_{\text{perd}}$ .

Todas las pérdidas que surgen en una máquina síncrona se pueden dividir en dos grupos:

a) Las pérdidas principales o pérdidas que surgen como resultado de los procesos electromagnéticos y mecánicos que ocurren en la máquina durante su funcionamiento.

A estas pérdidas pertenecen:

- las pérdidas en el cobre del devanado del estator
- las pérdidas en el cobre del devanado de excitación
- las pérdidas en el hierro activo del estator.
- las pérdidas por rozamiento en los cojinetes y entre las escobillas y los anillos deslizantes
- las pérdidas por ventilación

b) Las pérdidas adicionales o pérdidas que surgen como resultado de los procesos secundarios de carácter electromagnético, algunas de las cuales se presentan en vacío y otras, en carga.

Las pérdidas adicionales son provocadas por los flujos de dispersión del estator, por los armónicos superiores de la f.m.m. del estator y del rotor, y por los dientes del estator y del rotor.

El rendimiento de un generador síncrono se determina como la relación entre la potencia útil  $P$  o potencia activa entregada por el generador a la red y la potencia mecánica  $P_{\text{mec}}$  recibida por el generador de parte del motor primo:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{mec}}} = \frac{P}{P + P_{\text{perd}}}$$

El rendimiento de los turboalternadores es aproximadamente igual que el de los alternadores hidráulicos.

El rendimiento de estos varía entre 0.92 y 0.98 a plena carga y con un f.p. de 0.8, por ejemplo.

## 7.10 CURVAS CARACTERISTICAS

Las propiedades de los generadores se analizan con ayuda de las características que establecen la dependencia entre las magnitudes principales que determinan el funcionamiento del generador.

Tales magnitudes son:

- la tensión en los terminales del generador  $V_t$
- la corriente de excitación  $I_f$
- la corriente de armadura  $I_a$  y
- la velocidad de rotación  $\omega$ .

Puesto que los generadores síncronos funcionan con velocidad de rotación constante, el grupo fundamental de características se obtiene para  $\omega$  constante.

De las otras tres magnitudes, la que mayor importancia tiene es la tensión  $V_t$ , por cuanto determina las cualidades del generador respecto a la red para la cual éste funciona.

En la figura 7.27 puede verse un esquema para ensayar un generador síncrono.

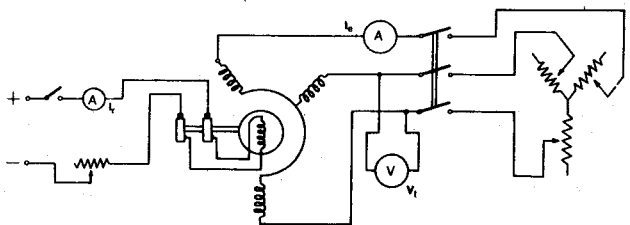


Fig. 7.27 Ensayo del generador síncrono.

Las características principales son:

1. La curva de carga  $V_t - I_a$ , para  $I_f$  constante y  $\cos \phi$  constante. Véase la figura 7.28.

En el caso particular, cuando  $I_f = 0$ , la curva de carga pasa a ser la curva de vacío, que tiene gran importancia en la evaluación del generador.

Las características en carga para  $\cos \phi = 0.8$  inductivo y  $\cos \phi = 1$  pasan por encima de las características para  $\cos \phi = 0$  y no son paralelas con respecto a la característica en vacío.

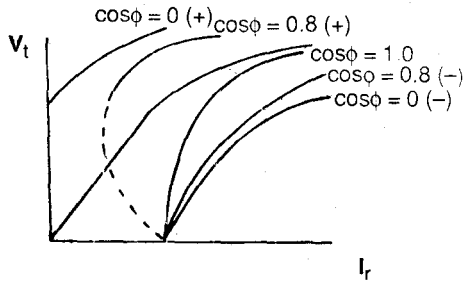


Fig. 7.28 Características en carga de un generador síncrono.

Las características si  $\cos \phi = 0.8$  y  $\cos \phi = 0$ , capacitivos, pasan por encima de la característica en vacío.

2. La curva de características exteriores  $V_t - I_e$ , para  $I_r$  constante y  $\cos \phi$  constante. Véase la figura 7.29.

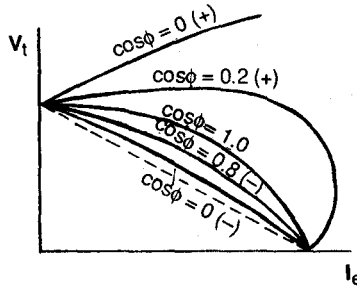


Fig. 7.29 Características exteriores de un generador síncrono.

Cuando  $V_t = 0$  (cortocircuito) todas las características se cruzan en un mismo punto que corresponde al valor de la corriente de cortocircuito trifásico.

3. La curva de regulación  $I_r - I_e$ , para  $V_t$  constante y  $\cos \phi$  constante. Véase la figura 7.30.

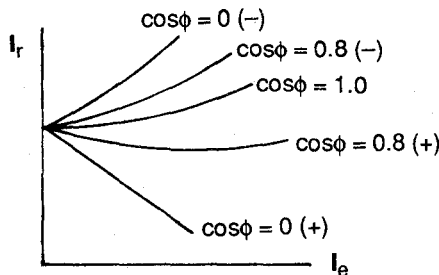


Fig. 7.30 Características de regulación de un generador síncrono.

En el caso particular, cuando  $V_t = 0$ , la curva de regulación pasa a ser la **curva de cortocircuito**.

Para mantener la tensión  $V_t$  constante cuando crece la carga inductiva, se necesita el aumento de la corriente de excitación  $I_r$  y cuando la carga es capacitiva, la reducción de la corriente de excitación, como se deduce del análisis de las características exteriores.

La reducción del  $\cos \phi$  exige respectivamente una mayor variación de la corriente de excitación; por eso, las características de regulación para diferentes valores de  $\cos \phi$  constante tienen el carácter representado en la figura 7.30.

### 7.11 EL MOTOR SINCRONO

Este motor es de poco uso en nuestro medio aparte que no se fabrica en el país por lo que su estudio se realizará de un modo muy general.

En la figura 7.31 se muestra el diagrama circuital equivalente de un motor síncrono con su correspondiente diagrama fasorial.

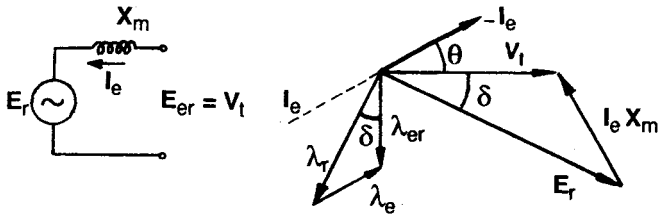


Fig. 7.31 Diagramas circuital y fasorial de un motor síncrono.

Un motor síncrono puede trabajar subexcitado si  $E_r < V_t$  en cuyo caso se comporta como una carga inductiva, o sobrexcitado, si  $E_r > V_t$  en cuyo caso actúa como si se tratase de una carga capacitiva. Véase la figura 7.32.

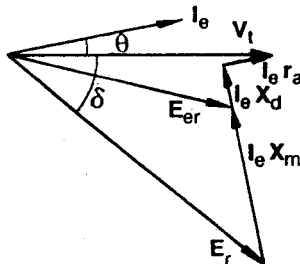


Fig. 7.32 Diagrama de tensiones de un motor síncrono.

El motor síncrono se caracteriza porque no posee par de arranque debiéndosele poner en marcha por medio de algún motor auxiliar o valiéndose de un rotor especial con una jaula de ardilla adicional que sólo sirve para el arranque.

### 7.11.1 Mejora del factor de potencia

El motor síncrono funcionando sin carga y sobrexcitado se puede utilizar para mejorar el f.p. de una red o de una instalación.

En este caso el motor recibe el nombre de compensador síncrono.

Trabajando así, el motor síncrono "consume" de la red una corriente capacitiva que compensa la corriente retrasada de los motores asíncronos y de los transformadores.

Esto permite descargar las líneas de alimentación de las corrientes inductivas retrasadas, lo cual disminuye las pérdidas en la red y mejora la utilización de los generadores síncronos de las centrales eléctricas.

En la figura 7.33 se muestra en forma esquemática el trabajo de un motor síncrono como mejorador del f.p.

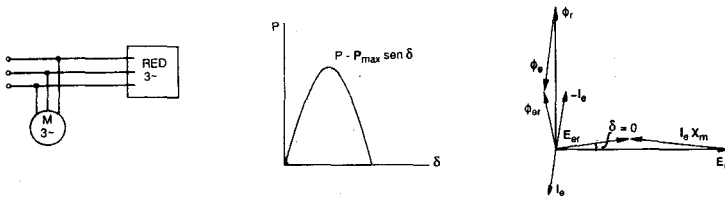


Fig. 7.33 El motor síncrono como mejorador del f.p.

En vacío la potencia  $P = 0$  y, por lo tanto, el  $\sin \delta = 0$ .

La expresión de  $Q$  queda como sigue:

$$Q = \frac{V_t \cdot E - V_t^2}{X}$$

Obsérvese que con sólo variar  $E$ , lo cual se consigue variando la corriente de excitación  $I_r$  se puede variar la potencia reactiva del motor pudiendo permitir una regulación continua de la misma.

## 7.12 GENERADORES EN PARALELO

Los generadores síncronos se pueden acoplar en paralelo, y de hecho los sistemas de suministro de energía eléctrica a los grandes centros industriales pueden tener decenas de generadores trabajando en paralelo interconectados en-

tre si a través de líneas de centenares de kilómetros, que alimentan cargas diseminadas sobre millares de kilómetros cuadrados.

Estos vastos sistemas se han ido desarrollando a pesar de los problemas que representa proyectarlos de forma que se mantenga el sincronismo incluso en el caso que se produzca disturbios y las complicaciones tanto técnicas como administrativas que hay que solventar para coordinar el trabajo de máquinas y de personal en un sistema tan complejo.

Las razones principales a favor de la interconexión de sistemas son las de asegurar la continuidad del servicio y las economías que se consiguen en los costes de instalación y de ejercicio.

El funcionamiento fiable de los generadores síncronos en paralelo exige el cumplimiento de una serie de requisitos.

Para el funcionamiento en paralelo de los generadores síncronos conectados a una red común, todos ellos deben tener rigurosamente una misma frecuencia, es decir, tienen que girar sincrónicamente.

Debido a que los motores mecánicos que ponen en rotación a los generadores síncronos no poseen la capacidad de mantener exactamente una misma velocidad de rotación, entonces el funcionamiento síncrono de varios alternadores sería imposible si en estas condiciones no se mantuvieran automáticamente por medio del así llamado momento de rotación sincronizador que surge durante el funcionamiento en paralelo.

Uno de los problemas esenciales para el funcionamiento en paralelo es la operación de acomplamiento de un nuevo generador a las barras de la central que alimentan la red, a las cuales ya estaban anteriormente conectados otros alternadores.

Para conectar en paralelo un alternador hay que observar ante todo las mismas condiciones que se exigen para conectar un nuevo generador de corriente continua a un sistema en funcionamiento, es decir, que en el instante de la conexión:

- 1) la f.e.m. del generador a conectar sea igual a la tensión de la red,
- 2) que la polaridad del generador a conectar corresponda a la polaridad de la red.

Puesto que en el caso de corriente alterna la polaridad varía con la frecuencia de la red, entonces es preciso elegir la polaridad correspondiente para el instante de conexión del generador.

- 3) las frecuencias de los sistemas que se conecta deben ser prácticamente iguales. Esto se consigue con el auxilio de sincronizadores especiales.
- 4) el orden de secuencia de las fases en los puntos que se conectan debe ser igual.

## **7.13 DATOS DE PLACA**

Los datos de placa de un generador síncrono trifásico son normalmente los siguientes:

- **la potencia aparente en KVA o carga máxima**
- **la tensión de línea en KV**
- **la corriente de línea en A o en KA**
- **la forma de conexión: estrella o triángulo**
- **el f.p. (0.8, 0.85 ó 0.9)**
- **la frecuencia de la red**
- **la velocidad de sincronismo**
- **la tensión de excitación en V**
- **la corriente de excitación en A**