

CAPITULO 1

LA MÁQUINA SÍNCRONA

1.1. Generalidades

Desde el punto de vista del comportamiento de un generador sincrónico en un SEP se pueden identificar las variables mostradas en la Figura 1.1. En general, el cambio de cualquiera de las variables de control, afecta a las cuatro variables de salidas.

En un sistema de potencia, la actuación sobre el torque de la máquina motriz hace posible mantener un balance exacto entre la potencia activa generada en el sistema y la potencia activa consumida por las cargas más las pérdidas. Este balance permite que el sistema trabaje a una frecuencia constante.

Por otra parte, actuando sobre la corriente de excitación de cada generador, es posible mantener un balance exacto entre las potencias reactivas generadas y las del consumo y pérdidas. Este balance permite mantener una tensión constante (en módulo) en las barras del sistema.

a. Generador conectado a una barra infinita: La tendencia actual es trabajar con un sistema eléctrico de transmisión y distribución que interconecte las diferentes centrales generadoras y los puntos de consumo, de modo que una sola central y más aún, una sola máquina representa un pequeño porcentaje de la potencia total del sistema. Evidentemente esta máquina no estará capacitada para alterar ni el voltaje ni la frecuencia del sistema eléctrico. En el límite se puede considerar que el sistema mantiene el voltaje y la frecuencia invariables, lo que se puede asimilar a una máquina que tiene cero impedancia interna e inercia rotacional infinita. Se habla entonces de una “barra infinita” (Figura 1.2).

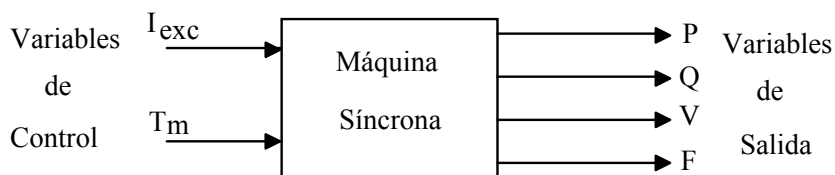


Figura 1.1.- Representación esquemática de una Máquina Síncrona

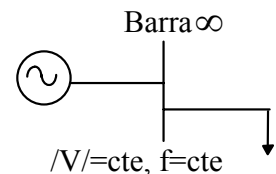


Figura 1.2.- Barra infinita

Un gran SEP puede considerarse como una barra infinita para muchos fines prácticos. En este caso entonces, dado que el voltaje y la frecuencia se mantienen constantes, las variables de salida se reducen a las potencias activa P y reactiva Q donde la corriente de excitación I_{exc} influye fundamentalmente en Q y el torque motriz T_m influye básicamente en P ; es decir, hay un acoplamiento débil entre I_{exc} y P y entre T_m y Q .

b. Condiciones de puesta en paralelo: Para operar dentro de un sistema eléctrico, un generador síncrono debe trabajar normalmente en paralelo con otros generadores, unidos a una barra de generación común, si pertenecen a una misma central o separados por alguna impedancia (líneas, transformadores) si pertenecen a centrales diferentes. Tratándose de alternadores polifásicos, las condiciones de puesta en paralelo son las siguientes:

- ♦ Módulo de la tensión en bornes igual al existente en la barra. Se actúa sobre la corriente de excitación
- ♦ Frecuencia igual a la de la barra. Se actúa sobre el torque motriz
- ♦ Igual secuencia de fases
- ♦ Igualdad en la forma de onda

c. **Generador alimentando una carga individual:** Supongamos por simplicidad que la carga es de tipo impedancia estática y se aumenta T_m . En este caso, al aumentar T_m , aumenta la velocidad y por lo tanto varían tanto la frecuencia como el voltaje y en consecuencia, varían también P y Q .

1.2. Parámetros de la máquina síncrona

a. De régimen permanente

Rotor cilíndrico: Impedancia síncrona $Z_s = R_s + jX_s$, habitualmente $Z_s = jX_s$

Rotor de polos salientes: Reactancia de eje directo: X_d

Reactancia de eje en cuadratura: X_q

b. De régimen transitorio (sin considerar enrollados amortiguadores)

Reactancia transiente de eje directo: X'_d

Constante transiente de tiempo: τ'_d

Adicionalmente, para el estudio del comportamiento de la máquina síncrona en régimen desbalanceado es necesario introducir los parámetros impedancia de secuencia cero (Z_0), positiva (Z_1) y negativa (Z_2) que se estudiarán posteriormente, así como la reactancia subtransiente (X''_d)

1.3. Circuitos equivalentes de la máquina síncrona

Los circuitos equivalentes dependen del tipo de máquina (rotor cilíndrico o de polos salientes), del tipo de estudio que se desea realizar y del grado de precisión deseada. Se pueden clasificar en dos grupos: aquellos utilizados en los estudios de régimen permanente (balanceado o desbalanceado) y los utilizados en los estudios de régimen transitorio, particularmente cortocircuitos y estabilidad. Las Figuras 1.3. a) y b) muestran los circuitos equivalentes de una máquina síncrona de rotor cilíndrico, usuales en los estudios de régimen permanente. En a) se considera la resistencia síncrona y en b) se desprecia. Para una máquina de polos salientes no es posible establecer un circuito equivalente simple y su comportamiento se estudia en base a su diagrama fasorial d-q.



Figura 1.3.- Circuitos equivalentes de una máquina síncrona para estudios de régimen permanente

Los circuitos de la Figura 1.4. a) y b) se usan en los estudios de cortocircuitos simétricos: a) se emplea en aquellos casos en que se supone la máquina en vacío antes de producirse el cortocircuito. La tensión E , en este caso, es la de vacío en los terminales de la máquina. Si la corriente antes de producirse el cortocircuito es significativa, se emplea el circuito de la Figura 1.4.b). La elección de E' y E'' así como X'_d y X''_d en ambos casos, depende del instante de tiempo en que se evalúa la corriente después de ocurrida la falla.

Es conveniente hacer notar que los circuitos de la Figura 1.4 se emplean tanto para máquinas de rotor cilíndrico como de polos salientes. Esto se debe a que en condiciones de cortocircuito, las corrientes son prácticamente reactivas y en consecuencia la componente en cuadratura de la corriente (I_q) en las máquinas de polos salientes se puede despreciar sin cometer gran error.

En los estudios simplificados de estabilidad transitoria, una máquina síncrona de rotor cilíndrico o de polos salientes, se representa por el circuito equivalente mostrado en la Figura 1.4 b), considerando E' y X'_d .



Figura 1.4.- Circuitos equivalentes de una máquina síncrona para estudios de fallas simétricas

1.4. Ecuaciones de Potencia

a. Generador de rotor cilíndrico: Consideremos un generador suministrando potencia directamente a un consumo. El circuito equivalente por fase y el diagrama fasorial se muestran en la Figura 1.5.

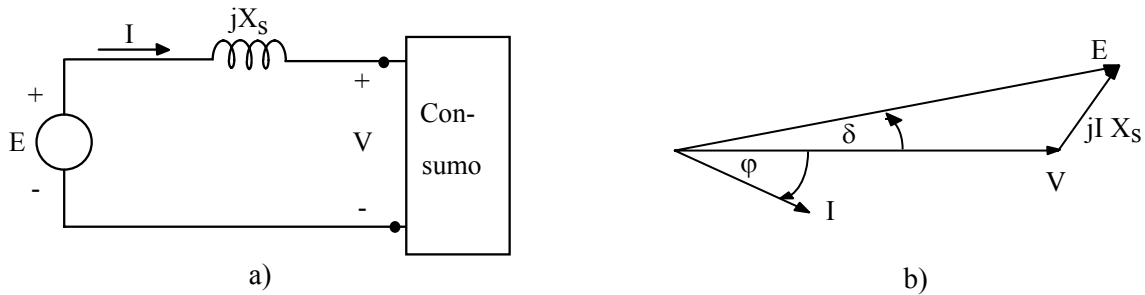


Figura 1.5.- Generador síncrono de rotor cilíndrico: a) Circuito equivalente; b) Diagrama fasorial

La potencia suministrada por el generador al consumo es:

$$\dot{S}_g = P_g + jQ_g = \dot{V} I^* \quad (1.1)$$

Si $\dot{V} = V \angle 0^\circ$ y $\dot{E} = E \angle \delta$; del circuito se tiene que:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{V}}{jX_s} = j \frac{V - E \angle \delta}{X_s} \quad (1.2)$$

Expresando la corriente en la forma rectangular, reemplazando en (1.1) y separando en sus partes real e imaginaria se obtiene:

$$P_g = \frac{E V}{X_s} \sin \delta \quad Q_g = \frac{E V}{X_s} \cos \delta - \frac{V^2}{X_s} \quad (1.3)$$

Que corresponden a las potencias activa y reactiva, respectivamente.

♦ Potencia activa

La primera ecuación de (1.3) se denomina Ecuación Potencia Activa-Angulo y se puede visualizar en la Figura 1.6, para E y V constantes. Como en estas condiciones, P_g es sólo función de δ , significa que si se supone velocidad constante y T_m aumenta, el rotor avanza un cierto ángulo respecto a su posición original, lo que implica que el fasor E se aparta del fasor V , ya que su fase depende de la posición del rotor. En consecuencia δ aumenta y P_g aumenta. En el gráfico se puede apreciar también que en el caso en que la máquina funcione como motor, el ángulo δ es negativo, es decir la potencia activa es negativa (según la referencia considerada), esto es, la potencia activa llega a la máquina.

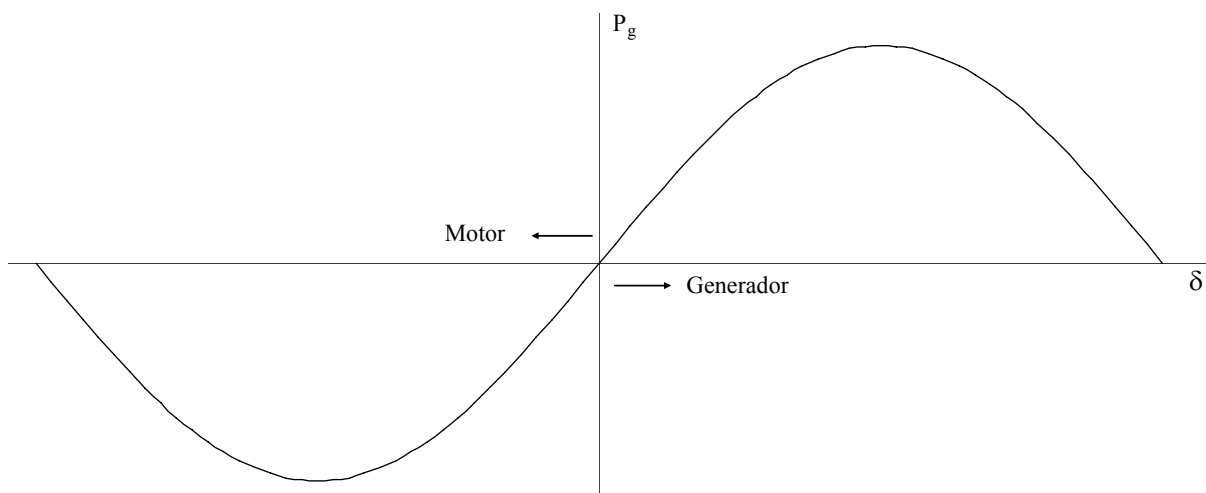


Figura 1.6.- Gráfico Potencia Activa-Angulo para una máquina síncrona

Por otra parte, para E y V constantes, la máxima potencia activa que el generador puede entregar se tiene cuando el ángulo δ es de 90° , lo que representa el límite de estabilidad permanente de la máquina. Si el ángulo sigue aumentando, la potencia activa disminuye y el generador pierde el sincronismo.

Ejemplo 1.1. Un generador de rotor cilíndrico que tiene una reactancia síncrona del 50%, está conectado a una barra infinita a través de una línea corta de transmisión cuya reactancia es del 25%. La tensión en bornes de la máquina es la nominal, cuando la potencia recibida por la barra infinita es de $(90+j40)$ MVA. Datos en base común 100 MVA. Determinar:

- La potencia activa máxima que el generador le puede entregar a la barra infinita.
- La potencia reactiva que el generador entrega en las condiciones anteriores.

Solución:

a) Potencia activa máxima

En el circuito de la Figura 1.7 se tiene:

$$\dot{V}_\infty = V_\infty \angle 0^\circ; \quad \dot{V} = 1 \angle \alpha$$

La corriente queda:

$$\dot{I} = \left(\frac{S}{V_\infty} \right)^* = \frac{0,9 - j0,4}{V_\infty \angle 0^\circ}$$

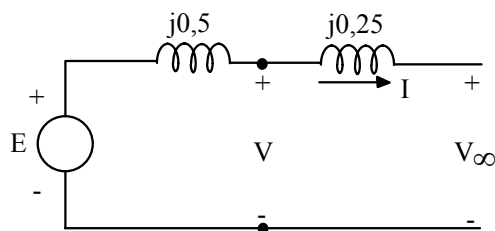


Figura 1.7

Para calcular P_g se debe conocer E y V_∞ . A partir del circuito se puede plantear la siguiente ecuación:

$$\dot{V} = j0,25 * \frac{(0,9 - j0,4)}{\dot{V}_\infty} + \dot{V}_\infty; \text{ reemplazando valores y amplificando por } \dot{V}_\infty \text{ se puede escribir:}$$

$1 \angle \delta * V_\infty = 0,1 + j0,225 + V_\infty^2$; separando en parte real e imaginaria quedan las dos ecuaciones siguientes:

$$\begin{cases} V_\infty * \cos \alpha = 0,1 + V_\infty^2 \\ V_\infty * \sin \alpha = 0,225 \end{cases}$$

elevando al cuadrado ambas ecuaciones y sumando se tiene:

$$V_{\infty}^4 - 0,8 * V_{\infty}^2 + 0,0606 = 0; \text{ cuyas soluciones son: } V_{\infty} = \left\{ \begin{matrix} \pm 0,2911 \\ \pm 0,8457 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \dot{V}_{\infty} = 0,8457 \angle 0^{\circ}$$

A partir del valor de $\dot{V}_{\infty}$ y del circuito se puede determinar $\dot{E}$ y luego $P_{g\text{máx}}$ como sigue:

$$\dot{E} = j0,75 * \frac{0,9 - j0,4}{0,8457 \angle 0^{\circ}} + 0,8457 \angle 0^{\circ} = 1,4416 \angle 33,62^{\circ}$$

$$P_{g\text{máx}} = \frac{E * V_{\infty}}{X_T} * \sin 90^{\circ} = \frac{1,4416 * 0,8457}{0,75} \Rightarrow P_{g\text{máx}} = 1,6255 \text{ (pu)}$$

b) Potencia reactiva

$$Q_g = \frac{E V}{X_T} * \cos 90^{\circ} - \frac{V^2}{X_T} = -\frac{0,8457^2}{0,75} \Rightarrow Q_g = -0,9536 \text{ (pu)}$$

♦ Potencia Reactiva

La segunda ecuación de (1.3) representa la potencia reactiva que la máquina puede generar (consumir), y se puede escribir como sigue:

$$Q_g = \frac{V}{X_s} (E \cos \delta - V) \quad (1.4)$$

Respecto a esta ecuación, se puede observar que:

- Si $E \cos \delta > V$, entonces $Q_g > 0$. Esto significa que la máquina genera potencia reactiva y actúa desde el punto de vista de la red, como un condensador. Generalmente, la desigualdad anterior se cumple cuando el generador trabaja sobreexcitado (Figura 1.5.b); y por lo tanto, la carga servida por el generador es inductiva.

- Si $E \cos \delta < V$, entonces $Q_g < 0$. Esto significa que el generador consume potencia reactiva "desde la red" y actúa como una reactancia shunt vista desde ésta. Esta condición se cumple cuando la máquina trabaja subexcitada y tal como se muestra en el diagrama fasorial de la Figura 1.8, la corriente adelanta al voltaje, lo que significa que la carga servida por el generador es de tipo capacitivo

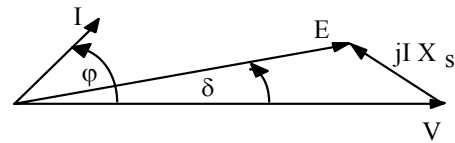


Figura 1.8.- Diagrama fasorial de un generador subexcitado

- Si $\delta=0$, significa que la potencia activa es cero y en la expresión (1.4) se tiene:

$$Q_g = \frac{V}{X_s} (E - V) \quad (1.5)$$

Ecuación que en el caso en que la tensión V del sistema es constante, depende sólo de la corriente de excitación, lo que da origen a los "condensadores síncronos" ($E > V$) o "reactores síncronos" ($E < V$).

b. Motor de rotor cilíndrico: Tal como se indicó anteriormente, en el caso en que $\delta < 0$, la máquina absorbe potencia activa. La potencia reactiva en cambio, es independiente del signo de δ y por lo tanto, para ella se cumplen las mismas condiciones dadas para el generador, esto es:

- El motor entrega potencia reactiva si está sobreexcitado, pero consume corriente en adelanto (Figura 1.9. b); esto es, se comporta como un consumo capacitivo.
- El motor absorbe potencia reactiva si está subexcitado, pero consume corriente en atraso (Figura 1.9.c); o sea se comporta como un consumo inductivo.

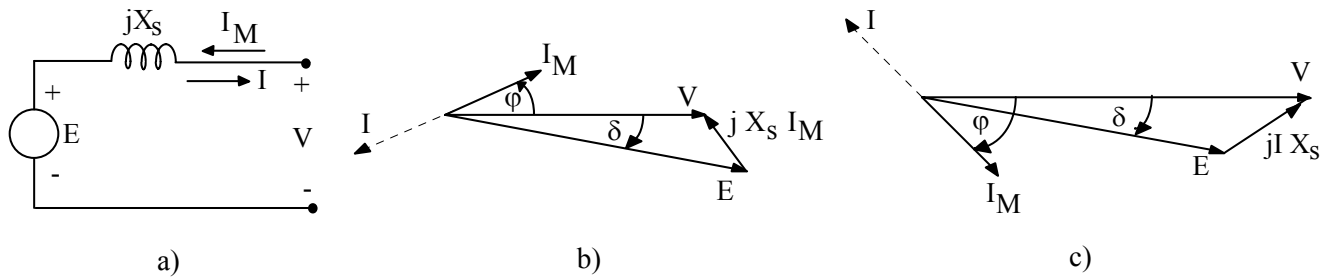


Figura 1.9.- Motor síncrono de rotor cilíndrico: a) Circuito equivalente, b) Diagrama Fasorial sobreexcitado, c) Diagrama Fasorial subexcitado

La Figura 1.10 muestra un diagrama con la posición de la corriente para las cuatro condiciones de operación descritas anteriormente. **En todas ellas se supone que la corriente sale de la máquina.**

De acuerdo con las convenciones más usadas, cuando la corriente tiene una proyección positiva sobre el voltaje, la máquina entrega energía (generador) y viceversa. Si se conectara un fasímetro, éste indicaría los ángulos mostrados en la figura, suponiendo siempre que la corriente sale de la máquina. Sin embargo, las designaciones mostradas para el trabajo como motor (atraso o adelanto) corresponden más exactamente a estas corriente giradas 180° .

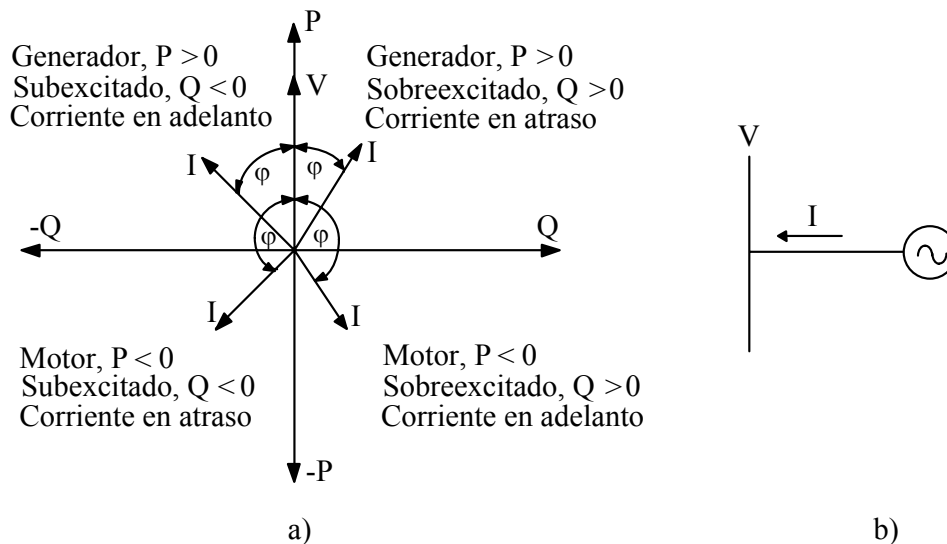


Figura 1.10.- a) Diagrama que muestra las cuatro condiciones de operación de una máquina síncrona, b) Diagrama unilineal con el sentido adoptado para la corriente

Otra forma de representar las condiciones de operación de una máquina síncrona, considera al voltaje V positivo en el eje de abscisas, lo que es equivalente a girar en 90° hacia la derecha el diagrama mostrado en la Figura 1.10.

c. Generador de polos salientes: Como ya se dijo, no es posible representar el generador de polos salientes a través de un circuito equivalente. Por ello, se trabaja con su diagrama fasorial. La Figura 1.11

muestra el diagrama fasorial de un generador de polos salientes, a partir del cual se pueden obtener las ecuaciones de potencia activa y reactiva.

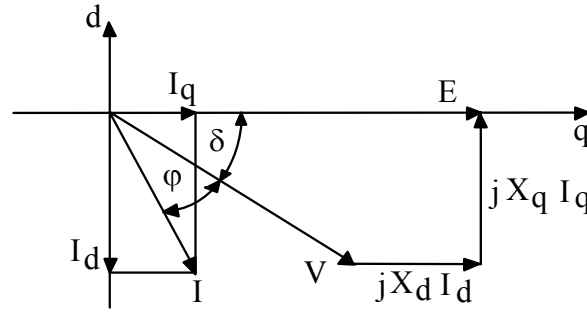


Figura 1.11.- Diagrama fasorial de un generador de polos salientes

♦ Potencia activa

La potencia activa es de la forma $P_g = V I \cos \varphi$ es decir V multiplicado por la proyección de I sobre V . Por lo tanto, proyectando las componentes de la corriente, se tiene:

$$I \cos \varphi = I_q \cos \delta + I_d \sin \delta \quad (1.6)$$

Por otra parte, del mismo diagrama se puede escribir:

$$I_d = \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \quad I_q = \frac{V \sin \delta}{X_q} \quad (1.7)$$

Por lo que la potencia activa P_g queda de la forma:

$$P_g = \frac{V E}{X_d} \sin \delta + \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} V^2 \sin 2\delta \quad (1.8)$$

La Figura 1.12 muestra la curva de $P_g = P_g(\delta)$ dada por la ecuación (1.8), incluyendo también las curvas correspondientes al primer término (la fundamental) y al segundo término (segunda armónica). El segundo término de (1.8) se denomina componente de reluctancia o de saliencia y es pequeño comparado con el primero (10 a 20% usualmente). No depende de la excitación E y por ello existe aunque la corriente de excitación sea nula. Para corrientes de excitación grandes no se comete un error importante al despreciarlo.

Si la máquina está conectada a un sistema relativamente grande (barra infinita), como ocurre en la mayoría de los casos, V será constante o tendrá un rango de variaciones posibles bastante estrecho; E , que depende de la corriente de excitación, también se mantendrá constante. Por lo tanto, para fines prácticos se puede afirmar que P_g depende sólo de δ . Si $\delta > 0$, P_g es positiva, es decir, la máquina genera potencia activa si E adelanta a V . A un aumento de δ corresponde un aumento no proporcional de la potencia, ya que el denominado “coeficiente de sincronización” $dP_g/d\delta$ no es constante.

Existe un δ , para el que, $dP_g/d\delta = 0$, o sea para el cual se obtiene la máxima potencia activa compatible con los valores de V y E adoptados. Si δ sigue aumentando, P_g se reducirá y la máquina perderá el sincronismo.

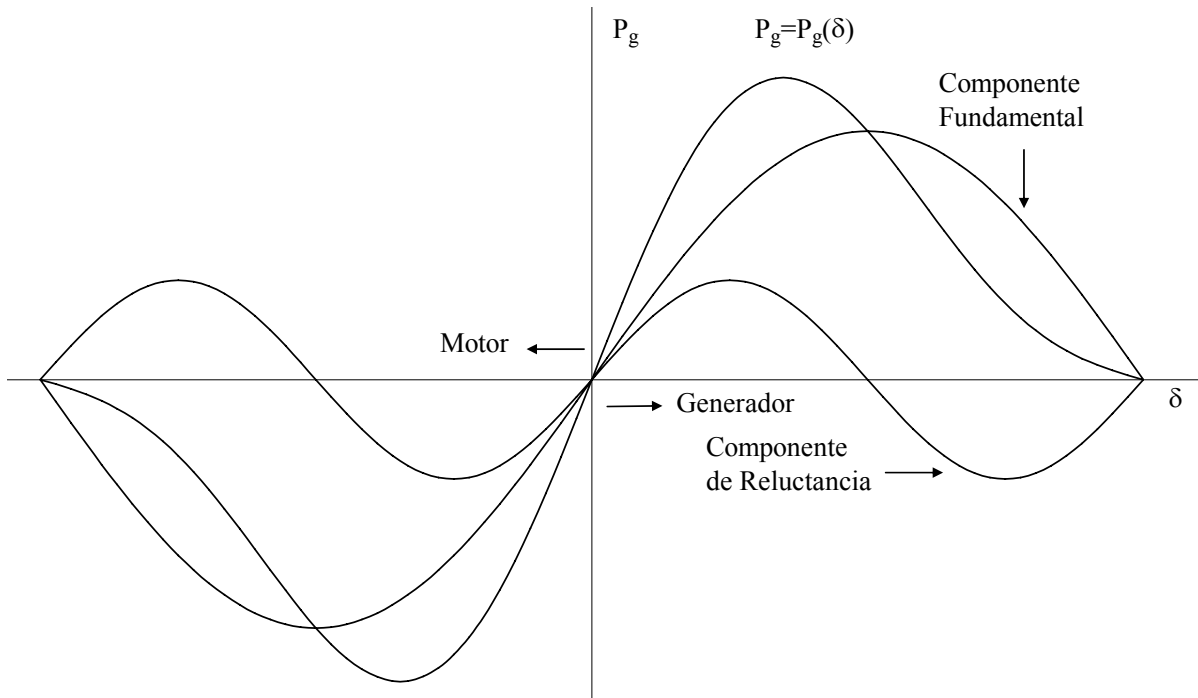


Figura 1.12.- Curva Potencia-ángulo para una máquina de polos salientes

♦ Potencia Reactiva

Recordemos que $Q_g = V I \sin \varphi$; es decir, es el producto del voltaje por la componente de la corriente, en cuadratura con él. Por lo tanto, a partir del diagrama fasorial y considerando las ecuaciones (1.7), la potencia reactiva queda de la forma:

$$Q_g = \frac{V E}{X_d} \cos \delta + \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} V^2 \cos 2\delta - \frac{X_d + X_q}{2 X_d X_q} V^2 \quad (1.9)$$

Ejemplo 1.2. Un motor síncrono de polos salientes con $X_d=80\%$ y $X_q=50\%$, está conectado a una barra infinita cuyo voltaje es el nominal. Los datos están en la base propia de la máquina. Despreciando las pérdidas calcular:

- El valor mínimo de E para que la máquina permanezca en sincronismo a carga nominal.
- La potencia reactiva (consumida o generada).

Solución:

a1) Límite de estabilidad: $\Rightarrow dP_g/d\delta = 0$; es decir:

$$\frac{dP_g}{d\delta} = \frac{V E}{X_d} \cos \delta + \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} V^2 \cos 2\delta = \frac{1 * E}{0,8} * \cos \delta + \frac{0,8 - 0,5}{0,8 * 0,5} * 1^2 * \cos (2 * \delta) = 0$$

Despejando E de la ecuación anterior se tiene: $E = -0,6 * \frac{\cos (2 * \delta)}{\cos \delta} \quad (a)$

a2) Carga nominal: $\Rightarrow P_g = -1$ en ecuación (1.8), de donde se obtiene:

$$-1 = \frac{1 * E}{0,8} * \sin \delta + \frac{0,8 - 0,5}{2 * 0,8 * 0,5} * 1^2 * \sin (2 * \delta) = 0; \text{ es decir:}$$

$$-1 = 1,25 * E * \sin \delta + 0,375 * \sin (2 * \delta) \quad (b)$$

Introduciendo (a) en (b) y ordenando se puede escribir:

$$F(\delta) = 0,75 * \operatorname{tg} \delta - 0,375 * \operatorname{tg} (2 * \delta) - \frac{1}{\cos (2 * \delta)} = 0$$

Empleando un método iterativo (Newton-Raphson, por ejemplo), se obtiene que con $\delta = -60,5^\circ$; $F(\delta) = -0,008$.

Reemplazando δ en la ecuación (a) se obtiene finalmente: **$E = 0,6276$ (pu)**

b) Potencia reactiva: Reemplazando valores en la ecuación (1.9), se tiene:

$$Q_M = \frac{1 * 0,6276}{0,8} * \cos (-60,5^\circ) + \frac{0,8 - 0,5}{2 * 0,8 * 0,5} * 1^2 * \cos (-2 * 60,5^\circ) - \frac{0,8 + 0,5}{2 * 0,8 * 0,5} * 1^2 \Rightarrow \mathbf{Q_M = -1,4318 \text{ (pu)}}$$

Problemas propuestos

1.1. Un generador síncrono tiene una impedancia síncrona de 10Ω y una resistencia síncrona de $1,2 \Omega$ (Valores por fase). La tensión generada es $1,1 \text{ kV}$ (por fase) y se conecta a una barra infinita de 1 kV (por fase). Determinar la corriente y factor de potencia cuando se tiene la máxima potencia activa generada.

1.2. Un generador síncrono de polos salientes con $X_d = 1,5$ (pu) y $X_q = 1$ (pu) y resistencia despreciable, se conecta a una barra infinita cuyo voltaje es el nominal, a través de una línea que tiene una reactancia de $0,3$ (pu). Determinar la potencia activa de salida para un ángulo de torque de 30° , si E es 1,4 veces el voltaje nominal terminal del generador. Calcular además, el coeficiente de sincronización en estas condiciones. Todos los valores en (pu) están en base 75 MVA . El generador es de 75 MVA , 11 kV .

1.3. En el problema 1.2 determinar el valor máximo de la potencia activa que el generador le pueda entregar a la barra infinita. En estas condiciones, ¿cuál es el valor de la potencia reactiva?

1.4. ¿Qué porcentaje de su potencia nominal podrá desarrollar sin pérdida de sincronismo un motor síncrono de polos salientes cuando se le aplica su tensión nominal siendo la corriente de excitación igual a cero?. $X_d = 0,8$; $X_q = 0,5$, ambos en por unidad en base propia. Determine también, la corriente en el inducido a la potencia máxima.

1.5. Un motor síncrono, de polos salientes, tiene $X_d = 0,8$; $X_q = 0,5$; en tanto por unidad base propia y está conectado a una red de potencia infinita cuyo voltaje es el nominal. Depreciando las pérdidas, determine la excitación mínima, para que la máquina se mantenga en sincronismo con el torque de plena carga.

1.6. Un motor shunt de corriente continua está acoplado mecánicamente a un generador trifásico síncrono de rotor cilíndrico. El motor se conecta a una red de tensión continua constante de 230 V y el generador a una red trifásica de frecuencia y tensión constantes, siendo ésta de 230 V entre fases. La máquina síncrona, de cuatro polos, conectada en Y, es de 25 kVA a 230 V , y su reactancia síncrona es de $1,6 \text{ ohm/fase}$. La máquina

de continua, también de cuatro polos, tiene los valores nominales de 25 kW y 230 V. Se desprecian todas las pérdidas.

- a. Si el conjunto de ambas máquinas trabaja como un grupo motor-generator recibiendo potencia de la red de continua y suministrándola a la de alterna, ¿cuál es la tensión simple (entre fases y neutro) inducida por el campo inductor de la máquina de alterna cuando trabaja a sus kVA nominales y factor de potencia unitario?
- b. Dejando la excitación de la máquina de alterna como en el apartado anterior, ¿qué ajustes deberán realizarse para reducir a cero la transferencia de potencia entre los sistemas de alterna y de continua? En estas condiciones de transferencia nula, ¿cuál es la corriente en el inducido de la máquina de continua y en el inducido de la de alterna?
- c. Dejando la excitación de la máquina de alterna como en los dos apartados anteriores, ¿cómo podrá regularse para transferir 25 kW de la red alterna a la de continua? En estas condiciones ¿cuál es la corriente en el inducido de la máquina de continua? ¿Cuáles son la magnitud y fase de la corriente en la máquina alterna?