

Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

IEE2273 — Laboratorio de Máquinas Eléctricas

Apuntes de Máquinas Eléctricas

Máquinas Síncronas

Actualización de los profesores
David Watts C. y Juan Dixon

Digitalización a LaTeX el año 2014 por:
Rodrigo Henríquez Auba

Acerca de este documento

Este documento es el resultado del trabajo de distintas personas, cuyo aporte al documento final se describe a continuación:

La primera versión de esta guía fue editada por los señores Jorge Romo L. y Nelson Morales O. en Septiembre de 1982 por la Oficina de Publicaciones Docentes del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile.

Posteriormente, durante el año 2000, el Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, señor David Watts C. trabajó en su digitalización y en la readecuación de sus contenidos para el curso IEE2272 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, labor que desempeñó con la ayuda del ayudante Patricio La Rosa.

Luego, durante el año 2001, gracias al concurso Fondo de Desarrollo de la Docencia FONDEDOC 2001, los profesores David Watts C. y Juan Dixon terminaron la actualización y readecuación de este documento., con la ayuda del ayudante Juan Francisco Araya y de algunos alumnos, ayudantes y profesores del curso.

Finalmente, en el año 2014, el alumno Rodrigo Henríquez Auba, trabajó en la digitalización a LaTeX de los documentos, junto a los profesores del ramo IEE2273 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, don Mario Ricardo Saez S. y don Luis Vergara R.

Índice

Introducción **1**

1. Descripción general y principios básicos **2**
1.1. Generador síncrono monofásico . . . 2
1.2. Generador síncrono trifásico . . . 4
1.3. Motor síncrono trifásico; campo magnético rotatorio . . . 5
1.4. Clasificación de las máquinas síncronas . . . 8

2. Comportamiento electromecánico **9**
2.1. Relaciones de voltajes y corrientes con enrollados ficticios . . . 9
2.2. Potencias activa y reactiva . . . 11

3. Curvas características de generadores **13**
3.1. Curva de excitación . . . 13
3.2. Curva de cortocircuito . . . 13
3.2.1. Determinación de la reactancia síncrona . . . 14
3.3. Regulación de voltaje . . . 15
3.4. Pérdidas . . . 18
3.5. Diagramas PQ para generadores síncronos . . . 19
3.6. Determinación de las reactancias síncronas . . . 21

4. Operación de motores síncronos **23**
4.1. Operación como motor o generador . . . 23
4.2. Métodos de partida de motores síncronos . . . 23
4.2.1. Partida como motor de inducción . . . 23
4.2.2. Partida con enrollado trifásico en el rotor . . . 24
4.2.3. Partida con motor de inducción auxiliar . . . 24
4.3. Curvas en V . . . 24

5. Anexos **26**
5.1. Curva de factor de potencia cero . . . 26
5.2. Triángulo de Potier . . . 28
5.3. Determinación de reactancias transitorias y sub-transitorias . . . 30
5.3.1. Determinación de x'_d y x''_d . . . 30
5.4. Determinación de x'_q y x''_q . . . 32
5.5. Funcionamiento en paralelo de generadores síncronos . . . 34
5.5.1. Puesta en paralelo . . . 34
5.5.2. Repartición de carga activa y reactiva . . . 36

Referencias **37**

Introducción

Las máquinas síncronas son máquinas de corriente alterna que se caracterizan por tener una velocidad del eje dependiente directamente con la frecuencia de las variables eléctricas. Pueden ser monofásicas o polifásicas, y preferentemente trifásicas, especialmente en aplicaciones de potencia. Pueden trabajar como generador, como motor, e incluso como reactor o como condensador. Los generadores síncronos trifásicos son los más importantes por su aplicación en sistemas eléctricos de potencia; constituyen el dispositivo fundamental en cualquier central generadora.

1. Descripción general y principios básicos

1.1. Generador síncrono monofásico

En una máquina rotatoria elemental formada por una bobina plana que gira en un campo magnético fijo con el espacio y constante en el tiempo (ver Figura 1), se induce un voltaje alterno sinusoidal en los terminales (x y) de la bobina debido a la variación en el tiempo del flujo enlazado por ésta (ley de Faraday). Este voltaje es de la forma:

$$e = k \cdot B \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) = E_{max} \sin(\omega t) \tag{1}$$

Donde:

k = Constante que depende de las características de diseño de la máquina.
B = Densidad de flujo del campo magnético.
ω = Velocidad angular mecánica de la bobina.

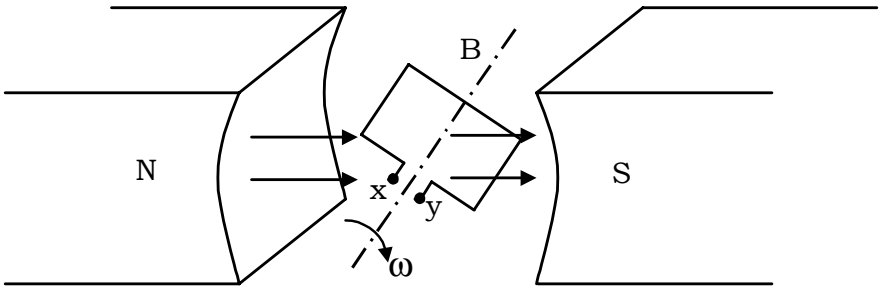


Figura 1: Máquina rotatoria elemental.

Luego, esta máquina es un generador de voltaje alterno sinusoidal, cuya frecuencia eléctrica ω es igual a la velocidad mecánica ω. Por esta razón, se denomina generador "síncrono" (o simplemente alternador), y ω es la "velocidad de sincronismo".

Si la velocidad angular síncrona se expresa como n_s [rpm], se tiene que $\omega = 2\pi n_s/60$ y la frecuencia de las variables eléctricas, $f = \omega/2\pi$ estará relacionada con n_s mediante la expresión:

$$f = \frac{n_s}{60} \quad [\text{Hz}] \tag{2}$$

En los diseños prácticos, resulta más conveniente tener fijo el enrollado en el estator, y el campo en el rotor girando a velocidad n, según se observa en cualquiera de las dos representaciones de la Figura 2

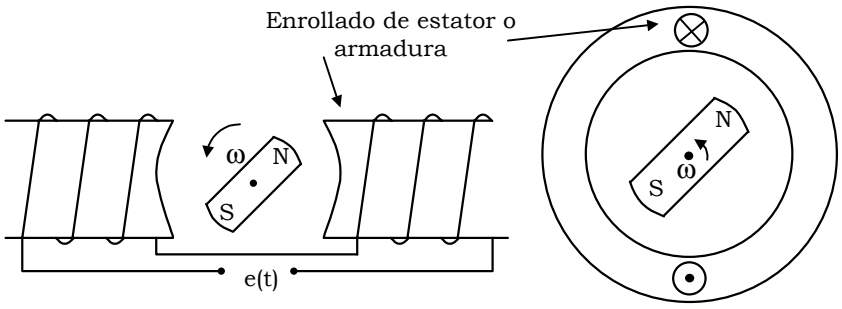


Figura 2: Máquina síncrona monofásica.

Las relaciones (1) y (2) siguen siendo igualmente válidas en este caso.

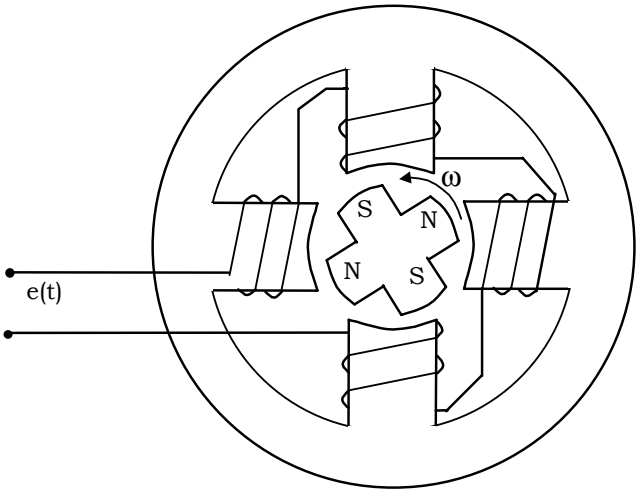


Figura 3: Máquina síncrona de 4 polos.

El enrollado del estator puede corresponder a una configuración de 2 polos, como en la Figura 2, o más. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra el caso de 4 polos. Analizando la forma de $e(t)$ para las distintas posiciones del rotor, se puede encontrar que en este caso la frecuencia ω de la tensión generada es el doble de la velocidad angular mecánica ω_m.

En general para un enrollado de estator de p polos, se encontrará que la frecuencia ω del voltaje generado está relacionada con la velocidad angular mecánica ω_m a través de:

$$\omega = \frac{p}{2}\omega_m \tag{3}$$

O sea:

$$2\pi f = \frac{p}{2}\left(\frac{2\pi n_s}{60}\right) \;\rightarrow\; f = \frac{p n_s}{120} \tag{4}$$

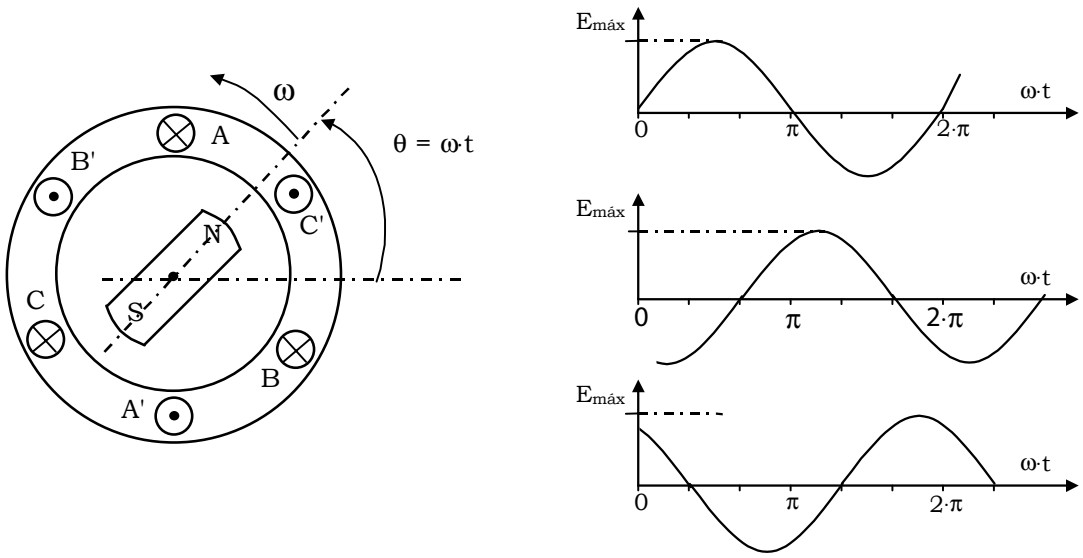
Así por ejemplo, para obtener un voltaje generado de 50 [Hz], se necesitan 3000 [rpm] en un generador de 2 polos; ó 1500 [rpm] en uno de 4 polos, etc.

1.2. Generador síncrono trifásico

La máquina descrita anteriormente es un generador síncrono monofásico, de velocidad síncrona n_s. Sin embargo, es fácil comprender que si se ubican bobinas de estator desplazadas en el espacio, los voltajes que se generan resultarán desfasados en el tiempo.

En particular, si se emplean 3 enrollados desplazados en el espacio en 120º eléctricos ($\angle$eléctrico $= p/2$ $\angle$geométrico) se tiene un generador síncrono trifásico; por ejemplo, en la Figura 4(a) se muestra el esquema de un generador síncrono trifásico de 2 polos, y en la Figura 4(b) las formas de onda de los voltajes generados en las 3 bobinas. Se observa que e_A, e_B y e_C son iguales en magnitud, y están desfasados en 120º.

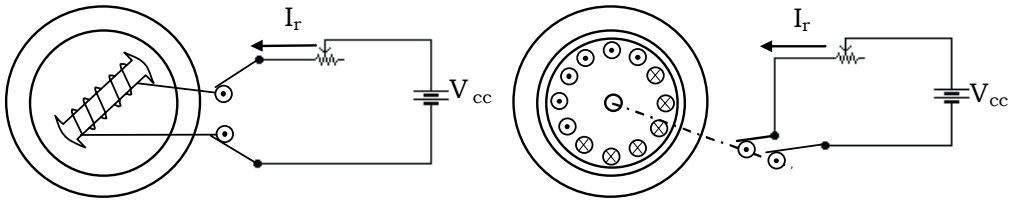
Al igual que en el caso monofásico, en un generador síncrono trifásico la frecuencia de los voltajes generados está relacionada con la velocidad mecánica n del eje mediante la misma ecuación (4). Esta relación directa entre f y n, obliga en la práctica a emplear controles apropiados para mantener la velocidad mecánica constante, si se desea que la frecuencia del voltaje generado no varíe.



a) Esquema de generador b) Formas de Onda

Figura 4: Generador síncrono trifásico de dos polos.

El rotor que proporciona el campo puede ser un imán permanente. Sin embargo, en la práctica se prefiere emplear un enrollado de campo alimentado a través de anillos rozantes desde una fuente de C.C. (ver Figura 5), que puede ser una batería o un generador de C.C. Ello permite controlar la potencia reactiva en los terminales de la máquina actuando sobre la corriente de rotor I_r; por ejemplo por medio de un reóstato (como el indicado en la figura) o con dispositivos electrónicos. En la figura se muestran los dos tipos de rotores existentes, el rotor de polos salientes (Figura 5(a)) y el rotor cilíndrico (Figura 5(b)).



a) Polos salientes b) Rotor cilíndrico

Figura 5: Alimentación del rotor.

1.3. Motor síncrono trifásico; campo magnético rotatorio

Para comprender el funcionamiento del motor síncrono trifásico, es necesario explicar primero el fenómeno de "campo magnético rotatorio" (c.m.r.) Se denomina así al campo magnético resultante de la interacción de las fuerzas magnetomotrices (f.m.m.) de los 3 enrollados del estator de una máquina síncrona trifásica, cuando éstos son alimentados desde una fuente trifásica de voltajes. Se encontrará que la f.m.m. resultante es de magnitud constante, y gira en el espacio a la velocidad de sincronismo. Sea, por ejemplo, una máquina síncrona trifásica de dos polos, como la indicada en la Figura 6, en que las bobinas de estator se alimentan desde una fuente trifásica. Los tres enrollados están desplazados en el espacio en 120º eléctricos, y las corrientes que por ellos circulan están desfasadas en 120º.

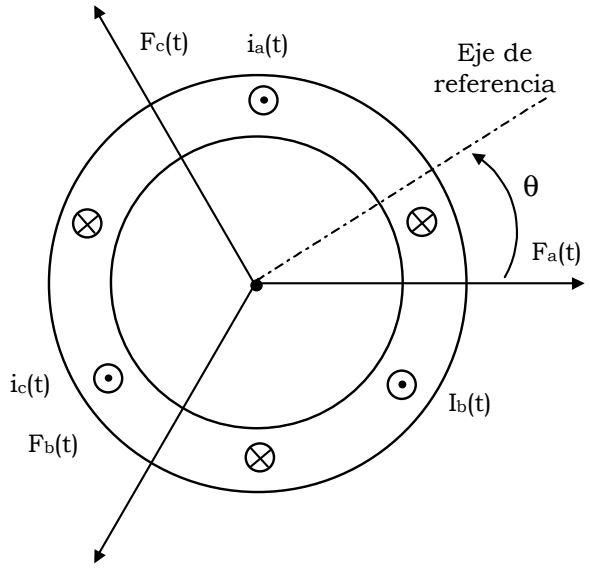


Figura 6: Análisis del campo magnético rotatorio.

O sea:

$$i_a = I_m \cos(\omega t) \tag{5}$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \tag{6}$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \tag{7}$$

I_m es el valor máximo de la corriente en cada fase y el origen de tiempo se ha tomado arbitrariamente en el instante en que la corriente de la fase a pasa por un máximo positivo. Las fuerzas magnetomotrices resultantes varían por lo tanto en el tiempo en forma sinusoidal y están desplazadas entre sí en 120º eléctricos tanto en el tiempo como en el espacio. Para estudiar el campo resultante en cada punto del entrehierro, el que se individualizará por un ángulo θ medido a partir de un punto de referencia, considérese arbitrariamente que $\theta = 0$ para el eje de la fase a.

En todo tiempo t, las tres fases contribuyen a la f.m.m. resultante en un punto definido por el ángulo θ en el entrehierro.

Llamando F_a a la amplitud de la f.m.m. producida por i_a en un instante dado t, la contribución de la fase a en un punto definido por el ángulo de referencia indicado es:

$$\text{proy.}F_a = F_a \cos\theta \tag{8}$$

La contribución de las otras fases es:

$$\text{proy.}F_b = F_b \cos(\theta - 120^\circ) \tag{9}$$
$$\text{proy.}F_c = F_c \cos(\theta - 240^\circ) \tag{10}$$

Los desplazamientos de 120º eléctricos en las expresiones anteriores toman en cuenta que los ejes de los enrollados de las 3 fases están a 120º en el espacio. La f.m.m. resultante en un punto definido por el ángulo θ, o sea la proyección de F_a, F_b y F_c sobre el eje de referencia, es entonces:

$$F(\theta) = F_a \cos\theta + F_b \cos(\theta - 120^\circ) + F_c \cos(\theta - 240^\circ) \tag{11}$$

Además:

$$F_a = N i_a = N I_m \cos(\omega t) = F_m \cos(\omega t) \tag{12}$$

en donde N es el número de vueltas del enrollado en cada fase y F_m la amplitud máxima de la f.m.m. Análogamente se tiene:

$$F_b = F_m \cos(\omega t - 120^\circ) \tag{13}$$
$$F_c = F_m \cos(\omega t - 240^\circ) \tag{14}$$

Reemplazando en (11), se tiene que en un punto determinado por el ángulo θ y en un instante t, la proyección de la f.m.m. resultante vale:

$$\begin{aligned} F(\theta, t) = {} & F_m \cos\theta \cos(\omega t) + F_m \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \\ & + F_m \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \tag{15}$$

Cada término del segundo miembro es una onda estacionaria pulsante. La función trigonométrica de θ indica cómo varía la distribución espacial de dicha onda para un instante dado. La función trigonométrica de t indica cómo varía dicha onda en el tiempo para cada punto del entrehierro. Usando transformaciones trigonométricas, la expresión anterior se puede reducir a:

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\theta - \omega t) \tag{16}$$

Esto significa que la f.m.m. de estator F_e resultante debe ser una f.m.m. rotatoria, a velocidad ω (velocidad de sincronismo), y de magnitud constante e igual a $3/2\ F_m$ (ver Figura 7). Sólo en esta forma su proyección sobre el eje de referencia queda dada por la ecuación (16).

La expresión (16) indica también que para un instante dado t cualquiera, la distribución espacial de la f.m.m. resultante en el entrehierro es sinusoidal.

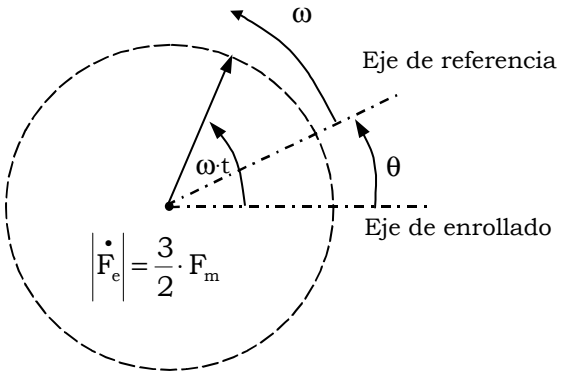


Figura 7: Campo magnético rotatorio.

Para una máquina que tenga p polos, se puede encontrar que la velocidad del c.m.r. (velocidad de sincronismo) es $2/p$ veces la frecuencia angular ω de las corrientes; y se puede obtener la misma expresión que en el generador:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad [\text{rpm}] \tag{17}$$

donde n_s es la velocidad del c.m.r, y f [Hz] la frecuencia de las corrientes.

En resumen, si una máquina síncrona trifásica se alimenta desde una fuente trifásica, se establece una f.m.m. de estator F_e rotatoria a velocidad n_s, y de magnitud constante. Por otra parte, si el rotor se alimenta con corriente continua (igual que en la operación como generador) se establece una f.m.m. F_r fija al rotor y de magnitud constante. De acuerdo a la expresión general de torque, en el eje del motor se tendrá un torque instantáneo dado por:

$$T(t) = KF_eF_r \sin\delta \tag{18}$$

donde:

K = Constante que depende de las características de diseño de la máquina.
ω = Ángulo entre las f.m.m. del estator y rotor.

Se puede observar que la única forma en que el torque medio no sea nulo, es que δ sea constante. Es decir, que la velocidad del rotor (al cual está fija la f.m.m. F_r) sea igual a la velocidad de la f.m.m. F_e, o sea, la velocidad de sincronismo n_s.

Esto explica que un motor síncrono opere en régimen permanente siempre a la misma velocidad, dada por (17), cuando f = cte. y cualquiera sea la carga en el eje.

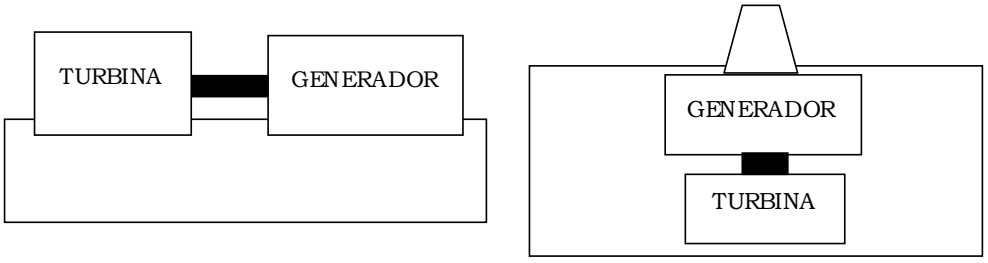
1.4. Clasificación de las máquinas síncronas

Existen principalmente dos tipos de máquinas síncronas: máquinas de rotor cilíndrico y de rotor de polos salientes. En la Tabla 1 se presentan las principales características de cada una de las máquinas.

Rotor cilíndrico	**Rotor de polos salientes**
1 par de polos (máx 2)	Muchos polos
3000 rpm (50 Hz)	Bajas rpm
Rotor largo	Rotor corto
Rotor poco diámetro	Rotor gran diámetro
Eje horizontal (en general)	Eje vertical (en general)
Uso en centrales térmicas	Centrales hidráulicas

Tabla 1: Clasificación de máquinas síncronas

En la Figura 8 se muestra una representación esquemática de la disposición física del grupo formado por turbina–generador en centrales generadoras.



a) Rotor Cilíndrico b) Rotor de Polos Salientes

Figura 8: Disposición física de los distintos tipos de generadores.

2. Comportamiento electromecánico

2.1. Relaciones de voltajes y corrientes con enrollados ficticios

Para estudiar el comportamiento de las máquinas síncronas, resulta conveniente definir ciertos parámetros de dos enrollados ficticios denominados enrollado de eje directo (d) y enrollado de eje en cuadratura (q), que reemplazan a los enrollados reales de estator. Estos enrollados, sin embargo, tienen sus ejes fijos al rotor, de modo que giran a velocidad de sincronismo (ver Figura 9).

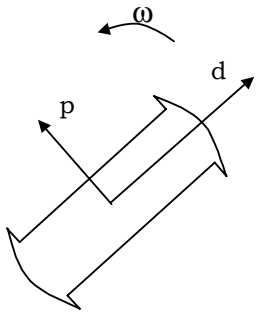


Figura 9: Ejes de enrollados ficticios de estator, fijos al rotor.

Los parámetros que se definen son:

r_s = Resistencia por fase de estator (corresponde a la de los enrollados reales.
x_d = Reactancia de eje directo.
x_q = Reactancia de eje en cuadratura.

Las corrientes por ambos enrollados ficticios de estator, I_d e I_q están desplazadas en 90º, y su suma vectorial corresponde a la corriente por fase de los enrollados reales:

$$\mathring{I} = \mathring{I}_d + \mathring{I}_q \tag{19}$$

El voltaje por fase de los enrollados reales queda dado por las siguientes relaciones:

- Caso motor:

$$\mathring{V} = r_s\mathring{I} + jx_d\mathring{I}_d + jx_q\mathring{I}_q + \mathring{E} \tag{20}$$

- Caso generador:

$$\mathring{E} = r_s\mathring{I} + jx_d\mathring{I}_d + jx_q\mathring{I}_q + \mathring{V} \tag{21}$$

en que E es el voltaje en vacío por fase, que depende proporcionalmente (en la zona lineal) de la corriente I_r del rotor y de la velocidad, y está ubicado sobre el eje q.

Los diagramas fasoriales correspondientes se ilustran en la Figura 10, donde por convención se ha considerado V con ángulo cero, E con ángulo δ e I con ángulo ψ. Se observa que el motor se

caracteriza por tener $\delta < 0$, y el generador $\delta > 0$.

En general x_d y x_q son diferentes, siendo $x_d > x_q$. Sin embargo, cuando la máquina es de rotor cilíndrico, se cumple que $x_d = x_q = x_s$, llamada reactancia síncrona. En este caso las ecuaciones (20) y (21) se simplifican a:

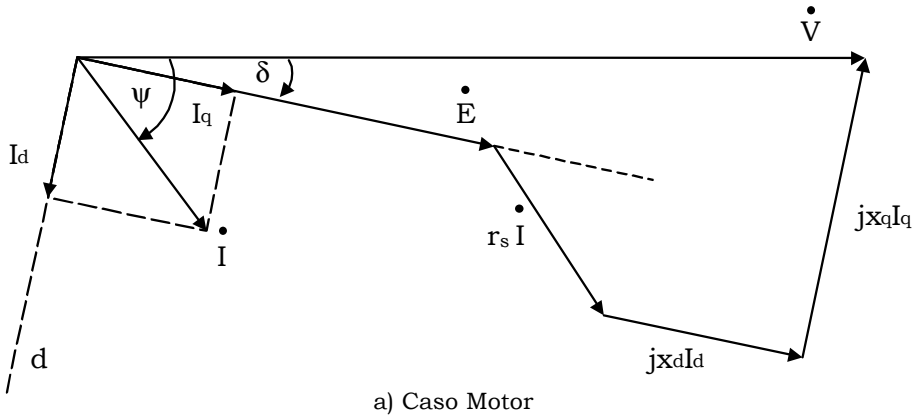
- Motor:

$$\mathring{V} = (r_s + jx_s)\mathring{I} + \mathring{E} \tag{22}$$

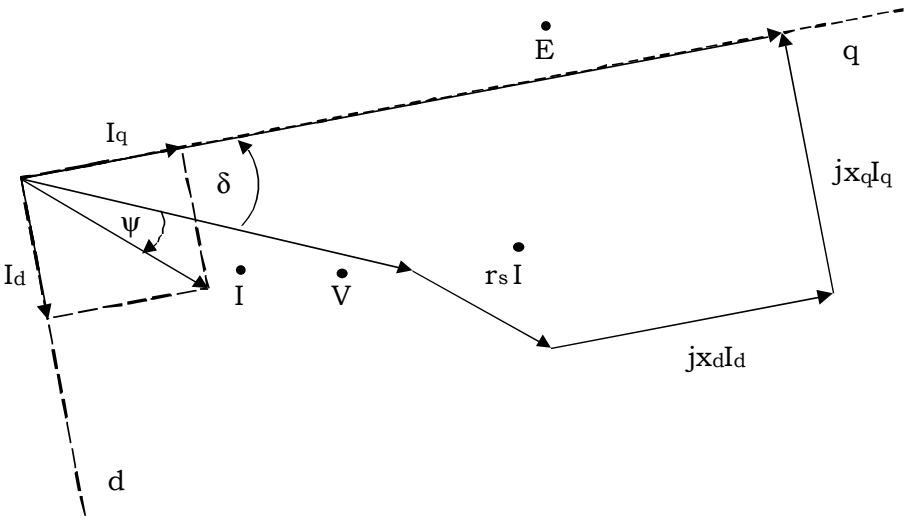
- Generador:

$$\mathring{E} = (r_s + jx_s)\mathring{I} + \mathring{V} \tag{23}$$

Pudiendo establecerse un circuito equivalente por fase como el de Figura 11. En general, r_s podrá despreciarse frente a x_s.

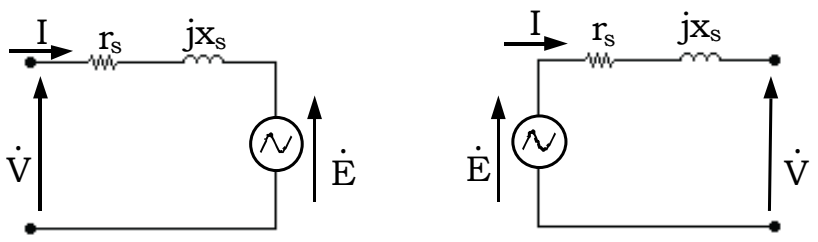


a) Caso Motor



b) Caso Generador

Figura 10: Diagramas fasoriales de operación.



a) Caso Motor b) Caso Generador

Figura 11: Circuitos equivalentes monofásicos para el caso de rotor cilíndrico.

2.2. Potencias activa y reactiva

Tanto para la operación como motor o generador, puede demostrarse que las potencias activa y reactiva en los terminales de la máquina, cuando se desprecia r_s, quedan dadas por:

$$P = \frac{VE}{x_d}\sin\delta + \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q}V^2\sin(2\delta) \tag{24}$$

$$Q = \frac{VE}{x_d}\cos\delta - V^2\left(\frac{\sin^2\delta}{x_q} + \frac{\cos^2\delta}{x_d}\right) \tag{25}$$

Los signos de P y Q darán cuenta de la dirección en que fluye cada una de las potencias. Valores negativos significan potencia entrando a la máquina; valores positivos corresponden a potencia saliendo de la máquina. Así por ejemplo en un motor, como $\delta < 0$, resulta obviamente $P < 0$; y en un generador $P > 0$. La potencia reactiva Q puede ser mayor, menor o igual a cero en ambos casos (motor o generador), dependiendo de la magnitud de E. Si $|E| > |V|$ se denomina operación sobreexcitada, y si $|E| < |V|$ se denomina subexcitada.

Para el caso de rotor cilíndrico, las expresiones anteriores se reducen a:

$$P = \frac{VE}{x_s}\sin\delta \tag{26}$$

$$Q = \frac{V}{x_s}(E\cos\delta - V) \tag{27}$$

Si ω_s es la velocidad de sincronismo, el torque en el eje es:

$$T = \frac{P}{\omega_s} \tag{28}$$

La característica de potencia (o torque) en función de δ (ángulo de torque) es la indicada en la Figura 12.

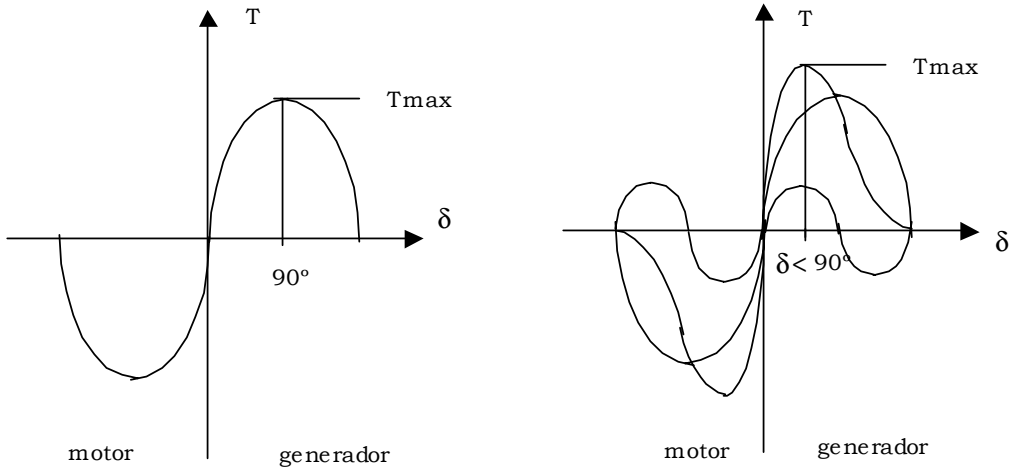


Figura 12: Características potencia–ángulo δ.

Usualmente en régimen permanente la magnitud del ángulo δ es inferior a δ_{max}, ya que el funcionamiento es estable cuando $dP/d\delta > 0$. Si la magnitud del ángulo δ excede este valor, la máquina "sale de sincronismo" y se frena.

3. Curvas características de generadores

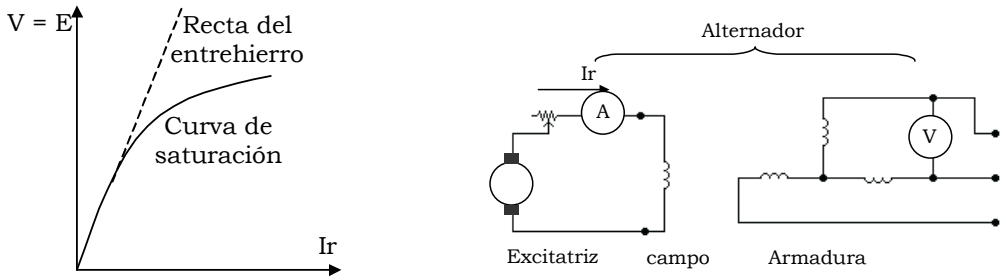
Este capítulo trata de la determinación experimental de las curvas características de generadores síncronos. Se explicara la obtención de la curva de excitación, de cortocircuito, junto con temas como la regulación de voltaje, perdidas, diagramas PQ de generadores y la determinación experimental de reactancias de ejes en una máquina síncrona.

3.1. Curva de excitación

La curva de excitación o de saturación en vacío es la curva que representa el voltaje en bornes de la máquina (generador) en vacío, en función de la corriente de rotor I_r o corriente de excitación. En vacío, como la corriente de estator $I = 0$, se tiene que el voltaje en bornes $V = E$ (ver ecuación (21)). Es decir, la característica de excitación es $E = f(I_r)$. Y como la f.e.m. E es proporcional al flujo, la característica E vs. I tendrá la misma forma de la curva $B - H$ del núcleo, como se ilustra en la Figura 13(a).

Para trazar esta característica basta con hacer variar la corriente de excitación siempre en el mismo sentido, estando la máquina girando a velocidad nominal, y anotar el voltaje $V = E$ que se obtiene en los terminales de salida.

Hay que tener especial cuidado de mantener la velocidad constante durante la prueba puesto que el voltaje en vacío es proporcional a ella. En la Figura 13(b) se indica el circuito a emplear. Se denomina "recta de entrehierra" a la recta trazada por el origen, tangente a la parte lineal de la curva de saturación en vacío (ver Figura 13(a)), y representa el voltaje en bornes en función de la corriente de excitación, que existiría en la máquina si no hubiera saturación.



a) Característica V vs Ir b) Configuración Experimental

Figura 13: Determinación de la curva de excitación.

3.2. Curva de cortocircuito

La curva de cortocircuito es la curva que representa la corriente en cada fase de la armadura en función de la corriente de excitación cuando la máquina se hace trabajar a una velocidad aproximadamente igual a la nominal estando sus terminales en cortocircuito (ver Figura 14(b)). La corriente de campo se aumenta gradualmente teniendo cuidado de que la corriente de armadura no

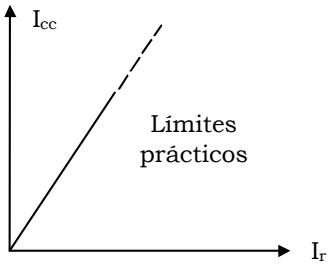
alcance valores que puedan ser perjudiciales para la máquina.

En las condiciones que se efectúa la prueba, el voltaje en bornes V es cero y la corriente de armadura I se ve limitada únicamente por la impedancia interna de la máquina, o impedancia síncrona, que para el caso de rotor cilíndrico es $Z_s = r_s + jx_s$ (ver ecuación (23)).

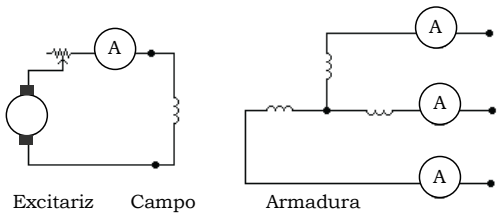
3.2.1. Determinación de la reactancia síncrona

La reactancia síncrona por fase, x_s, a su vez se puede descomponer en dos partes: la reactancia de fuga de la armadura por fase x_a y una reactancia que considera el efecto que produce la corriente de armadura llamado "reacción de armadura" y que consiste en la alteración del flujo en el entrehierro producido por el campo, alterando también el voltaje interno generado en la armadura.

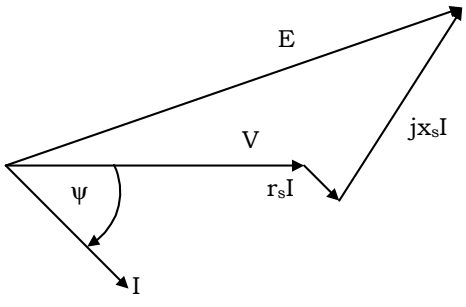
Como en la impedancia síncrona predomina fuertemente la reactancia síncrona sobre la resistencia, la corriente de cortocircuito se encontrará atrasada con respecto a la f.e.m. E en un ángulo cercano a 90°. Según la ecuación (23), el diagrama vectorial general de la Figura 14(c) se transforma en el diagrama de la Figura 14(d). Como se trabaja con corrientes de campo reducidas para que la corriente de armadura no exceda el valor nominal a plena carga, el circuito magnético no está saturado. La f.e.m. E será entonces proporcional a la corriente de excitación; como la corriente de armadura es a su vez proporcional a E, ($I_{cc} = E/z_s$) la característica de cortocircuito será una recta (por lo menos dentro de los límites que se pueda alcanzar dentro de la práctica) como se ilustra en la Figura 14(a).



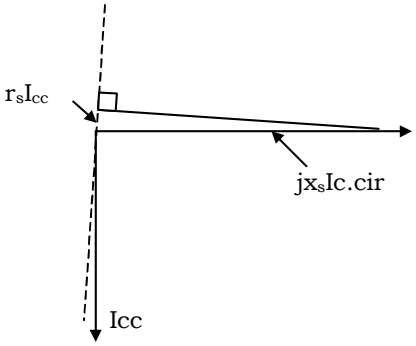
(a) Característica Icc vs Ir



(b) Configuración Experimental



c) Diagrama Fasorial



d) Detalle de Fasores de Corriente

Figura 14: Prueba de cortocircuito.

No es necesario que este ensayo se realice exactamente a la velocidad nominal. Como la resistencia es prácticamente despreciable frente a la reactancia, $I_{cc} = E/x_s$ y como tanto E como x_s son proporcionales a la velocidad, se deduce que I_{cc} será independiente de ésta. Sin embargo, la velocidad no puede ser excesivamente baja ya que x_s disminuye proporcionalmente con ésta y por lo tanto la resistencia dejaría de ser despreciable frente a la reactancia. Por lo tanto, la corriente de cortocircuito dejaría de ser independiente de la velocidad.

Las características de saturación en vacío, de entrehierro y de cortocircuito, permiten calcular las denominadas impedancia síncrona saturada y la impedancia síncrona no saturada.

En la Figura 15, AB representa el voltaje que se obtendría en vacío con la corriente de excitación I_{r1}, AD representa la corriente de armadura que se obtendría con una corriente de I_{r1} estando la máquina en cortocircuito. La impedancia síncrona saturada, para una corriente de excitación I_{r1} queda dada por:

$$Z_s = \frac{\overline{\text{AB}}\ [\text{Volts}]}{\overline{\text{AD}}\ [\text{Amp}]} \tag{29}$$

La impedancia síncrona no saturada queda expresada por:

$$Z_s = \frac{\overline{\text{AC}}\ [\text{Volts}]}{\overline{\text{AD}}\ [\text{Amp}]} \tag{30}$$

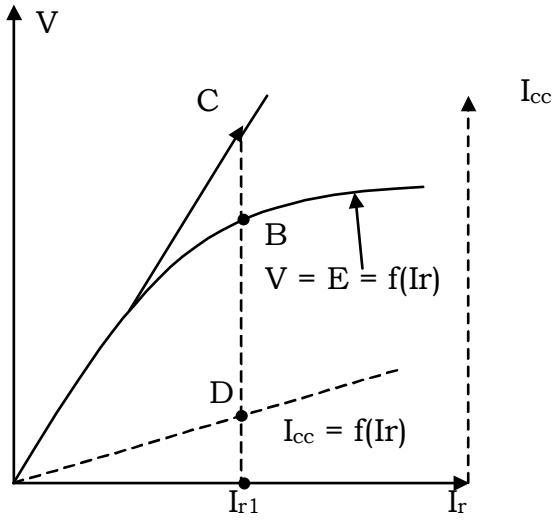


Figura 15: Determinación de la impedancia síncrona.

3.3. Regulación de voltaje

La regulación es una medida porcentual de la caída de tensión interna del generador cuando está alimentando una carga dada. A continuación se explicará el método recomendado para las normas A.S.A. para la determinación experimental de la regulación.

La regulación de un alternador puede determinarse mediante la curva de saturación en vacío, la curva de factor de potencia cero (o bien un punto de estas características en cortocircuito) y la altura V_x del triángulo de Potier.

La regulación del voltaje para una carga determinada, con un cierto factor de potencia y voltaje nominal, se determina entonces de la siguiente forma (ver Figura 16):

- Se traza el vector OB igual en magnitud a OV (voltaje nominal), formando el ángulo ψ del factor de potencia de la carga, con el eje de las abscisas.
- Se suma a OB la caída de tensión V_r en la resistencia de armadura y la caída $V'_x = V_N I_A / I_N$ en la reactancia de Potier producida por la corriente de carga I_A obteniéndose así el vector OC.
- El vector OC, suma de V'_x, OB y V_r representa el voltaje interno generado para la carga I_A.
- Se traza un arco de circunferencia de radio OC que corte al eje de ordenadas en E_r. Se dibuja la recta de entrehierro.
- Por el punto E_r se traza la paralela al eje de abscisas; entre recta de entrehierro y la característica de saturación en vacío se traza sobre dicha paralela el trazo $I_{F'S}$ que representa la corriente de excitación necesaria para compensar la saturación.
- A continuación se construye el diagrama vectorial de corrientes de la Figura 16. Se traza I_{FG}, que representa la corriente de campo que se necesitaría si no hubiese saturación para producir el voltaje nominal en vacío; luego, se suma vectorialmente a $I_F G$ la corriente de campo I'_{FSI} necesaria para vencer la caída en la reactancia síncrona producida por la corriente de armadura I_A.

El ángulo que forman entre sí I_{FG} e I'_{FSI} es igual a $90^o + \psi$ (despreciando el efecto de la resistencia de armadura). I_{FSI} es proporcional a la magnitud I_{FSI} que representa la corriente de campo necesaria para vencer la caída en la reactancia síncrona al circular por ella la corriente nominal.

Luego,

$$I'_{FSI} = I_{FSI} \frac{I_A}{I_N} \tag{31}$$

Finalmente, al vector suma de I_{FG} e I'_{FSI} se le agrega la corriente I_{FS} de saturación, obteniéndose la corriente I_{FL}. El voltaje E, correspondiente a la corriente de excitación I_{FL} en la curva de saturación en vacío (Figura 16) representa el voltaje que aparecería en bornes de la máquina si su carga se reduce a cero.

Por consiguiente, la regulación será:

$$\text{Reg}\,\% = \frac{E - V}{V} \cdot 100 \tag{32}$$

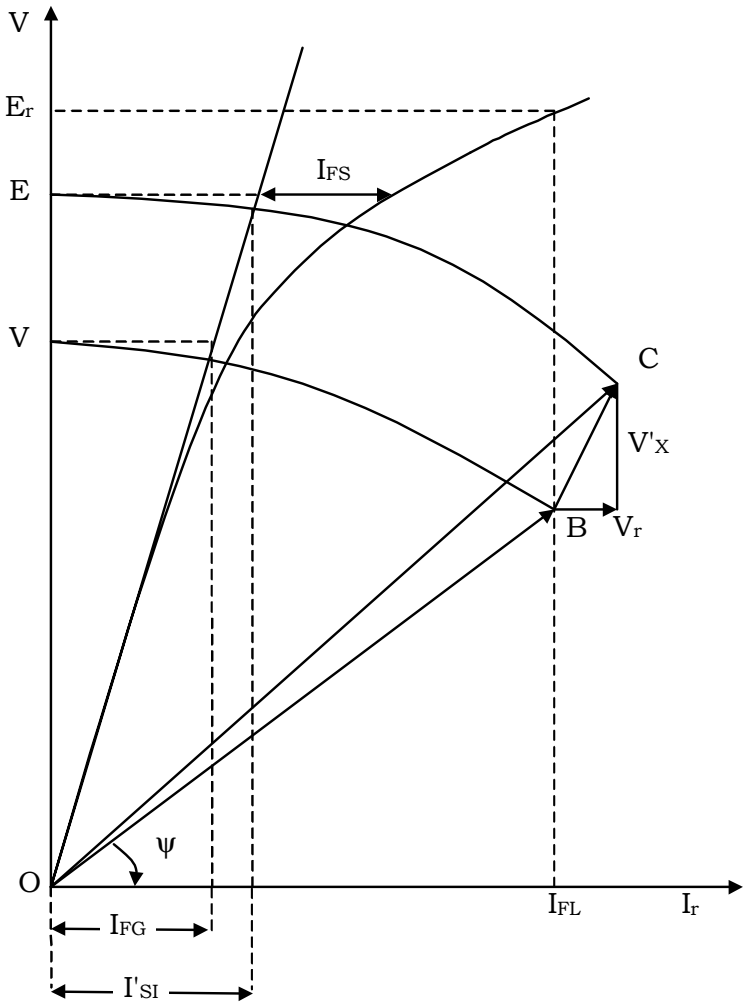


Figura 16: Método A.S.A: para determinación de la regulación.

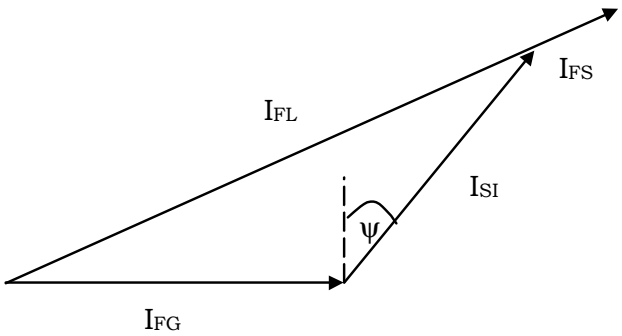


Figura 17: Diagrama vectorial de corrientes.

3.4. Pérdidas

Si al hacer la prueba de cortocircuito de la máquina, se mide la potencia mecánica requerida para mover la máquina, se puede obtener información sobre las pérdidas producidas por la corriente de armadura.

La potencia mecánica requerida para mover la máquina síncrona durante la prueba de cortocircuito es igual a la suma de las pérdidas de fricción y ventilación, más las pérdidas causadas por la corriente de armadura.

Estas últimas pueden encontrarse entonces restando las pérdidas de fricción y ventilación de la potencia mecánica. Las pérdidas en el fierro en general podrán despreciarse: éstas son pérdidas locales en el núcleo causadas por el flujo de fuga de la armadura y también las pérdidas en el núcleo causadas por el flujo resultante.

La pérdida correspondiente a la resistencia para corriente continua del enrollado de armadura puede calcularse si la resistencia para C.C. se mide y corrige, cuando es necesario, para la temperatura de los enrollados durante la prueba de cortocircuito. Para conductores de cobre:

$$\frac{r_{t1}}{r_{t2}} = \frac{234.5 + t_1}{234.5 + t_2} \tag{33}$$

en donde r_{t1} y r_{t2} son las resistencias a las temperaturas t_1 y t_2 [°C] respectivamente.

Si se resta esta pérdida en la resistencia para corriente continua de las pérdidas totales producidas por la corriente de armadura, la diferencia será la pérdida debida al efecto pelicular y corrientes parásitas en los conductores de la armadura más las pérdidas locales en el núcleo causadas por el flujo de fuga de la armadura (la pérdida en el núcleo causada por el flujo resultante se desprecia normalmente).

Esta diferencia es por lo tanto la pérdida adicional causada por corriente alterna en la armadura (adicional con respecto a la pérdida producida por corriente continua). Normalmente se considera que tiene igual valor para condiciones de carga normales y para el cortocircuito. Es función de la corriente de armadura.

Como en todo dispositivo de corriente alterna, la resistencia efectiva de la armadura es la razón entre la pérdida de potencia producida por la corriente de armadura y el cuadrado de dicha corriente. La resistencia efectiva $r_{s(eff)}$ de la armadura puede determinarse aproximadamente de la relación:

$$r_{s(eff)} = \frac{\text{Pérdidas producidas por la corriente de armadura en la prueba de cortocircuito}}{(\text{Corriente de armadura en la prueba de cortocircuito})^2} \tag{34}$$

Normalmente se calcula dicha resistencia para el valor nominal de la corriente de armadura y se supone que es constante. La razón entre la resistencia efectiva y la resistencia para corriente continua es variable según el tipo de máquina. Un valor típico es 1.25.

Las pérdidas por fricción y ventilación son iguales a la potencia mecánica requerida para mover la máquina síncrona a velocidad de sincronismo desexcitada y en vacío (sin carga). Las pérdidas en el núcleo de la máquina en circuito abierto comprenden las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault. Pueden determinarse experimentalmente midiendo la entrada a la máquina cuando opera sin carga (en vacío) a la velocidad nominal y con voltajes y flujos normales, deduciendo de eso las pérdidas por fricción y ventilación.

3.5. Diagramas PQ para generadores síncronos

En la Figura 18 se muestra la característica de operación de un generador síncrono conectado a una barra infinita, en donde la magnitud del voltaje, la frecuencia y la secuencia de fases es impuesta por la barra infinita.

$$\text{Barra infinita} \rightarrow V = \text{constante}$$

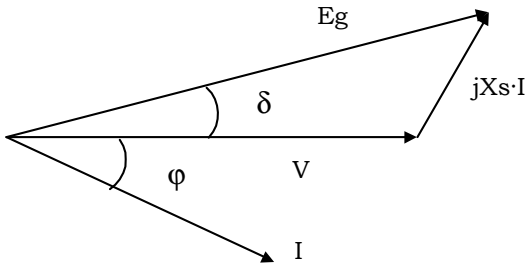


Figura 18: Diagrama fasorial de un generador.

Multiplicando cada uno de los fasores del diagrama de la Figura 18 por V/X_s , y siendo V constante, entonces V^2/X_s también será constante. Así se obtiene el diagrama fasorial de la Figura 19, en donde el punto $(P_0,\ Q_0)$ es el llamado punto de operación del generador.

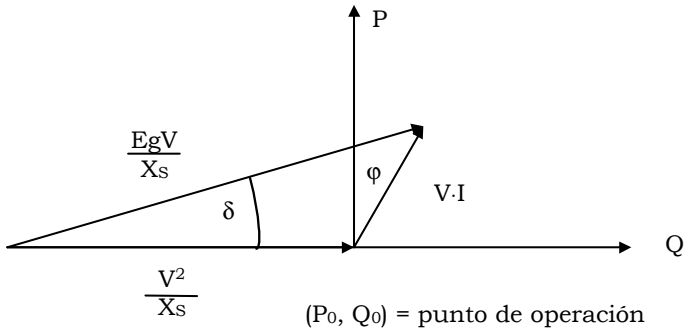


Figura 19: Diagrama fasorial de un generador conectado a una barra infinita.

En el diagrama $P-Q$ anterior, las variables que pueden manipularse en la máquina son E_g y $P_{turbina}$. E_g se modifica a través de la corriente continua de excitación del rotor ($E_{gMAX} = I_r \cdot L \cdot \omega$) en tanto que $P_{turbina}$ se controla en el eje del motor cambiando el torque aplicado. Dado lo anterior es que pueden presentarse dos situaciones:

- **Funcionamiento con potencia de la turbina constante y excitación controlable.** Al modificar la excitación se modifica la generación de reactivos, lo cual implica modificación en el factor de potencia. También, al modificar la excitación se modifica φ (desfase entre tensión en bornes y corriente de línea), lo cual modifica el ángulo de torque δ. Si la f.e.m. decrece mucho la máquina puede salirse de sincronismo.

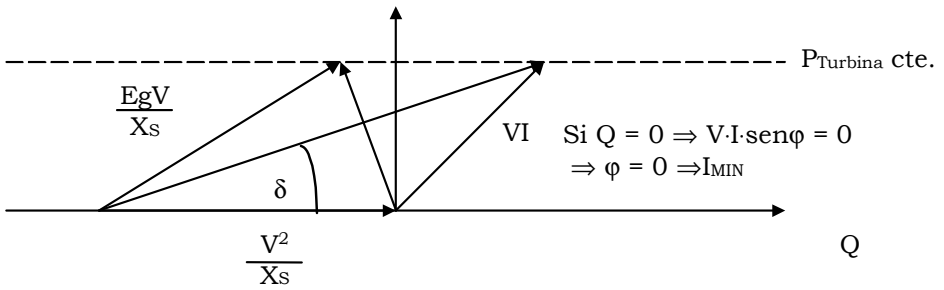


Figura 20: Diagrama $P-Q$ con potencia constante y excitación controlable.

En la Figura 20 se muestra el diagrama $P-Q$ de la situación anteriormente descrita, en donde los puntos de operación están limitados a la potencia de la turbina, la cual se ha mantenido constante, con lo cual el lugar geométrico de los puntos de operación es una recta horizontal.

- **Funcionamiento con excitación constante y potencia controlable.** Al mantener la magnitud de la f.e.m. constante el lugar geométrico de los puntos de operación es una circunferencia de radio E_gV/X_s , como se muestra en la Figura 21.

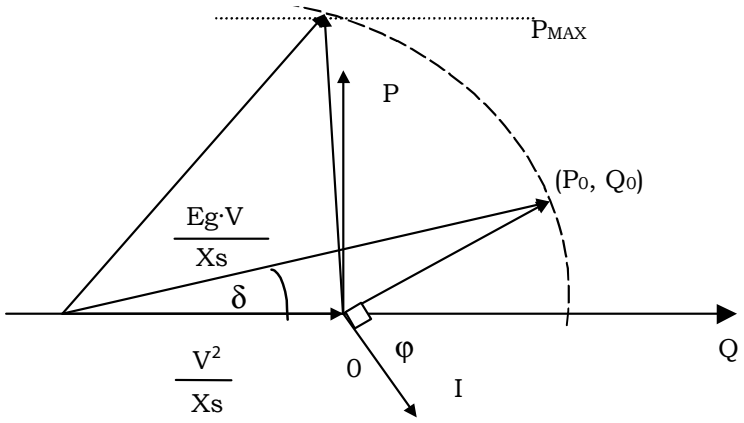


Figura 21: Diagrama $P-Q$ con potencia controlable y excitación constante.

En la Figura 22 se muestra el diagrama $P-Q$ de operación de un generador síncrono. En la figura el área achurada representa el área de operación del generador, área que está limitada por las distintas restricciones de operación como se indican en la figura.

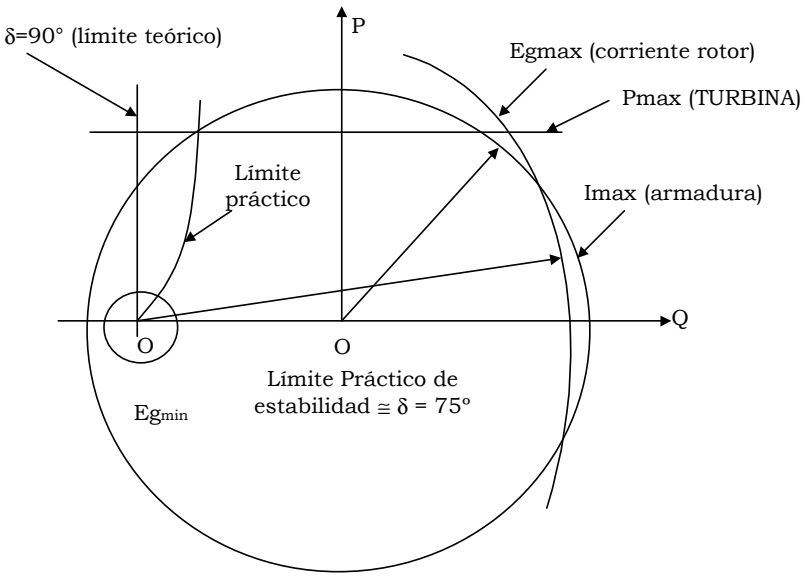


Figura 22: Diagrama $P - Q$ de un generador.

3.6. Determinación de las reactancias síncronas

Las reactancias de los ejes directo y en cuadratura que se emplean típicamente en el análisis del comportamiento en régimen permanente, y que se analizaran a continuación, son los parámetros x_d y x_q.

En el estudio del período transitorio posterior a un cortocircuito, debe trabajarse además con las denominadas reactancias transitorias (x'_d y x'_q) y sub-transitorias (x''_d y x''_q) cuyo cálculo se detallará en el anexo.

El parámetro x_d se puede obtener de la característica no saturada en circuito abierto y de la característica en cortocircuito de la máquina (Figura 23) siendo O'B la corriente nominal de la máquina y OA la excitación correspondiente.

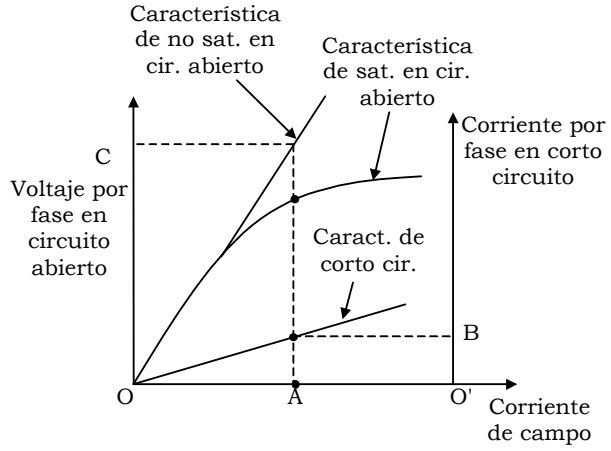


Figura 23: Determinación de x_d.

La reactancia se puede obtener también de la prueba de deslizamiento. En ella se hace rotar la máquina mecánicamente a una velocidad ligeramente diferente de la velocidad de sincronismo, con su campo abierto y con voltajes equilibrados aplicados a sus fases. En estas condiciones la onda de f.e.m. de armadura se desliza lentamente con respecto a los polos. En la Figura 24 se muestran diagramas de la corriente de armadura del voltaje aplicado a las fases del generador y del voltaje inducido en el campo. Cuando la onda de f.m.m. de armadura está alineada con los ejes de los polos, la impedancia de la máquina es igual a x_d (despreciando la resistencia). Un cuarto de ciclo de frecuencia de deslizamiento más tarde, la onda de f.m.m. está alineada con el eje q y la impedancia de la máquina es igual a $x_d \cdot x_q$, resulta entonces igual al valor máximo del cuociente entre el voltaje por fase aplicado a la armadura y la corriente por fase en la armadura. Ello ocurre para voltaje inducido en el campo igual a cero. x_q por otra parte es el valor mínimo de dicha razón y ocurre cuando el voltaje inducido en el campo es máximo.

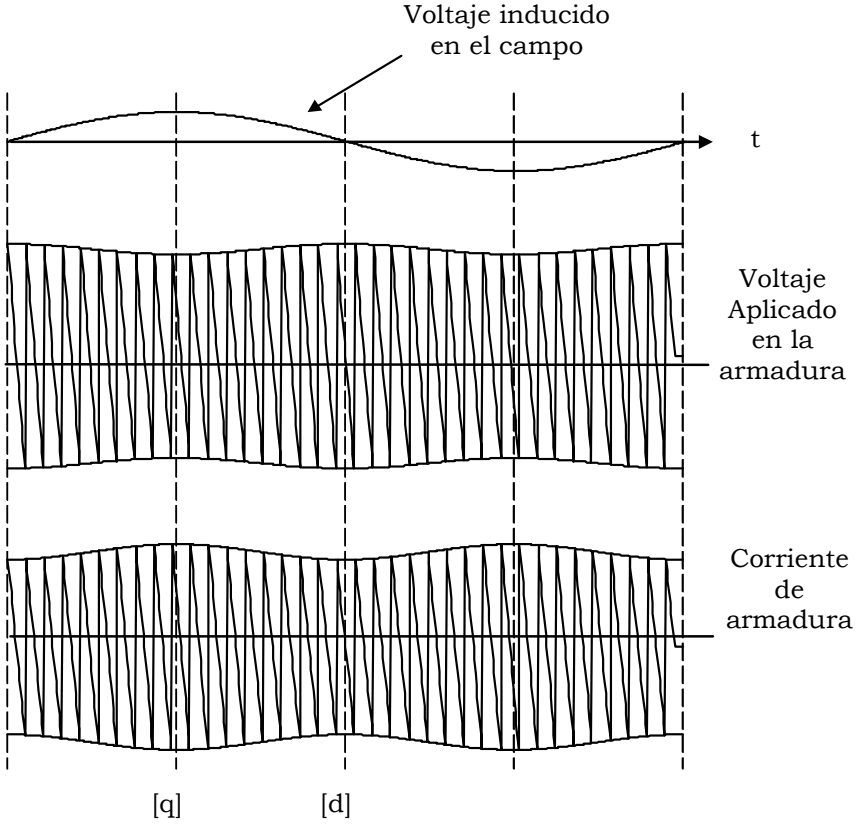


Figura 24: Diagramas de prueba de deslizamiento.

La prueba de deslizamiento permite entonces determinar tanto x_d como x_q. Sin embargo, es preferible usar esta prueba para determinar la razón x_q/x_d solamente. x_q se obtiene entonces de aquí y del valor de x_d determinado de las curvas en cortocircuito y circuito abierto, según lo indicado anteriormente.

4. Operación de motores síncronos

4.1. Operación como motor o generador

Una máquina síncrona puede trabajar como generador o como motor, dependiendo del sentido del flujo de potencia activa en sus terminales. Esto puede apreciarse experimentalmente asi: la máquina síncrona se mueve mediante un motor de corriente continua con campo paralelo, de modo de operar como generador síncrono; éste se sincroniza con la red en la manera usual (ver Figura 25) y las corrientes de excitación de ambas máquinas se ajustan para que el alternador no entregue prácticamente corriente a la línea.

Si la corriente de campo del motor de C.C. se reduce, el conjunto tiende a acelerarse y la máquina síncrona operará como generador entregando potencia a la red. Si la corriente de campo del motor de continua se aumenta, el conjunto tiende a frenarse y la máquina síncrona toma potencia de la red actuando entonces como motor.

En esta última condición, el motor de corriente continua se transforma en generador y entrega potencia a la red de corriente continua.

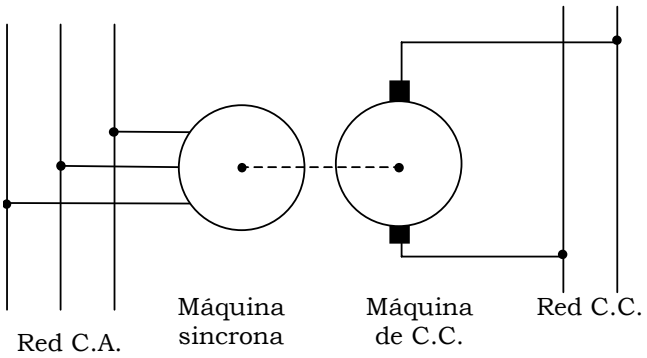


Figura 25: Operación de la máquina síncrona como motor y como generador.

4.2. Métodos de partida de motores síncronos

Un motor síncrono no puede partir por si mismo, ya que cuando el rotor está detenido el torque instantáneo producido es alterno (ver ecuación (18)), dando un torque medio igual a cero. El motor síncrono debe hacerse partir de alguna otra manera, como se verá a continuación.

4.2.1. Partida como motor de inducción

En general los motores síncronos se construyen con un enrollado amortiguador, formado por barras conductoras embutidas en ranuras en las zapatas polares, y cortocircuitadas en ambos extremos mediante anillos conductores. Este enrollado sirve no sólo para amortiguar las oscilaciones de velocidad durante la operación normal del motor, sino también como enrollado de jaula de ardilla para la partida.

En el momento de la partida, el campo magnético rotatorio síncrono producido por la corriente de armadura induce en las barras de la jaula de ardilla voltajes y corrientes de frecuencia igual a la de la red de alimentación de la armadura, y la reacción entre estas corrientes inducidas y el campo magnético rotatorio produce un torque que acelera el rotor en la dirección del campo magnético rotatorio.

A medida que el rotor se acelera, su velocidad relativa al campo magnético rotatorio disminuye, con lo cual los voltajes inducidos en el rotor, y por lo tanto las corrientes resultantes, son menores en magnitud y frecuencia. A velocidad de sincronismo, el torque producido por este efecto sería cero. La máquina no se acelera hasta la velocidad síncrona ya que el torque decae mucho al acercarse a dicha velocidad.

En el momento en que la velocidad es próxima a la de sincronismo, conviene excitar el campo, con lo cual el rotor se "enclava" con el campo magnético rotatorio y la velocidad alcanza el valor síncrono.

Los voltajes inducidos en el campo cuando el rotor está detenido, o a baja velocidad, pueden ser muy altos. Normalmente se reducen, reduciendo el voltaje aplicado a la armadura, por ejemplo mediante autotransformadores. Esto tiene el inconveniente que simultáneamente se reduce el torque de partida. Deberá así optarse por una solución de compromiso.

El torque puede aumentarse cerrando el enrollado de campo a través de una resistencia alta, y reduciéndola a medida que el motor se acelera.

4.2.2. Partida con enrollado trifásico en el rotor

Para motores que requieren torque de partida mucho mayores que el torque de plena carga, las barras del enrollado amortiguador vienen diseñadas como un enrollado trifásico conectado en Y con los tres terminales accesibles a través de anillos rozantes. Ahí puede conectarse un reóstato de modo que la resistencia externa (del reóstato) se puede reducir a medida que la máquina se acelera (por ejemplo utilizando un dispositivo centrífugo) hasta que dicho enrollado quede cortocircuitado, para la velocidad de sincronismo.

4.2.3. Partida con motor de inducción auxiliar

Un motor síncrono también se puede llevar a la velocidad de sincronismo utilizando un motor de inducción auxiliar. Una vez alcanzada dicha velocidad, se excita el campo del motor síncrono, el que queda funcionando entonces a esa velocidad fija y el motor auxiliar se puede desconectar.

4.3. Curvas en V

El factor de potencia con el cual un motor síncrono opera, y por lo tanto su corriente de armadura, puede controlarse ajustando la corriente de excitación o de campo. La curva que muestra la relación entre la corriente de armadura y la corriente de campo para voltaje de alimentación de la armadura constante y con una carga constante en el eje, se conoce como curva en V, debido a su forma característica. Una familia de dichas curvas se muestra en la Figura 26.

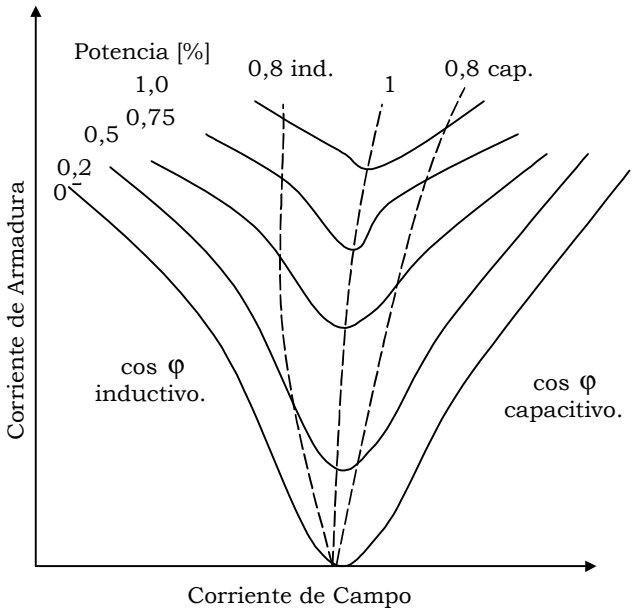


Figura 26: Curvas en V.

Para potencia de salida constante, la corriente de armadura es, por supuesto, mínima para un factor de potencia igual a uno y crece a medida que el factor de potencia decrece. Cada línea de segmento en la Figura 26 corresponde a un factor de potencia constante, e indica cómo debe variarse la corriente de campo al variar la carga para mantener esta condición.

Puntos a la derecha de la curva de factor de potencia 1.0 corresponden a "sobreexcitación" y a corriente de entrada en adelanto con respecto al voltaje de la fase respectiva. En estas condiciones el motor síncrono se comporta como un condensador, llamado también condensador síncrono, ya que entrega potencia reactiva a la red; se utiliza para mejorar el factor de potencia de un sistema dado.

Puntos a la izquierda de la curva de factor de potencia 1.0 corresponden a sub-excitación y corriente de entrada en atraso con respecto al voltaje correspondiente. Estas curvas son muy similares a las de un generador síncrono. Si se desprecia el pequeño efecto de la resistencia de armadura, las curvas para motor y generador son idénticas intercambiando entre sí las curvas para factor de potencia en adelanto y para factor de potencia en atraso.

5. Anexos

5.1. Curva de factor de potencia cero

Es la curva que representa el voltaje en bornes de la máquina en función de la corriente de excitación, cuando la máquina se encuentra trabajando con corriente nominal y factor de potencia cero inductivo.

En la Figura 27 se representa la curva de factor de potencia cero. En esta figura se incluye, además, la curva de saturación en vacío y el diagrama vectorial correspondiente a las condiciones de carga bajo las cuales se obtiene la curva de factor de potencia cero. En la figura se observa que, para una excitación dada, la diferencia de ordenadas entre ambas curvas es prácticamente igual a la caída de tensión en la reactancia síncrona.

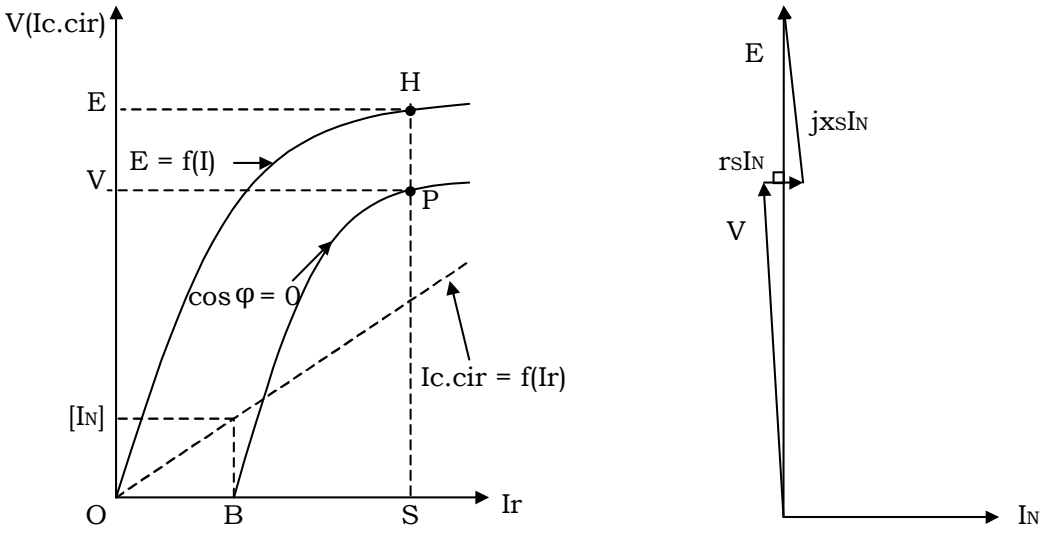


Figura 27: Curva de factor de potencia cero.

La curva de factor de potencia cero es paralela a la de saturación en vacío. Para trazarla basta conocer dos puntos de ella. La manera como se procede a efectuar la traslación paralela de la curva de saturación en vacío para obtener la de factor de potencia cero se verá más adelante, cuando se hable del triángulo de Potier.

En la Figura 28 , el trazo OB representa la corriente de excitación necesaria para hacer circular la corriente nominal con voltaje en bornes cero; pero también es igual a la abscisa del punto correspondiente a corriente nominal sobre la recta de cortocircuito. Por lo tanto, teniendo la característica de cortocircuito queda determinado el punto inicial de la curva de $\cos\varphi = 0$.

El ensayo para determinar esta curva debe realizarse a velocidad nominal. No es indispensable que el factor de potencia sea exactamente igual a cero, pues para factores de potencia del orden de 0.1 ó 0.2 los resultados son prácticamente iguales a los obtenidos con $\cos\varphi = 0$.

Puede conseguirse que el generador trabaje con corriente nominal y factor de potencia prácticamente cero de dos maneras: a) conectando un generador en paralelo con la red; b) usando un motor síncrono

en vacío como carga.

En el primer procedimiento (ver Figura 28) una vez conectado el generador en paralelo con la red (más adelante se explica cómo realizar esta operación), se regula la máquina motriz de modo que el generador no entregue ni reciba potencia activa de la red. El generador se sobreexcita hasta que circule la corriente nominal IN por la armadura. Con este procedimiento sólo puede determinarse el punto P de la curva correspondiente al voltaje de barras. Sin embargo, es suficiente para poder dibujar la curva ya que, como se ha dicho, el punto inicial de ésta puede determinarse mediante la recta de cortocircuito y basta dos puntos para poder trazarla en forma completa.

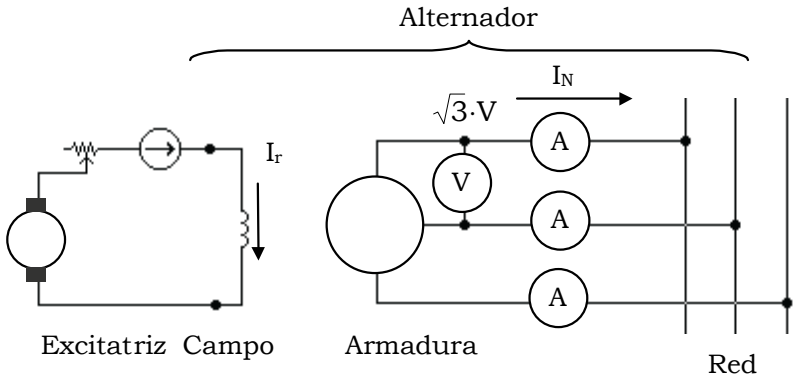


Figura 28: Generador trabajando a $\cos\varphi = 0$, conectado a la red.

En el segundo procedimiento (ver Figura 29) debe sobreexcitarse el generador y des-excitarse el motor síncrono hasta que la corriente alcance el valor nominal. Este método permite determinar varios puntos de la curva.

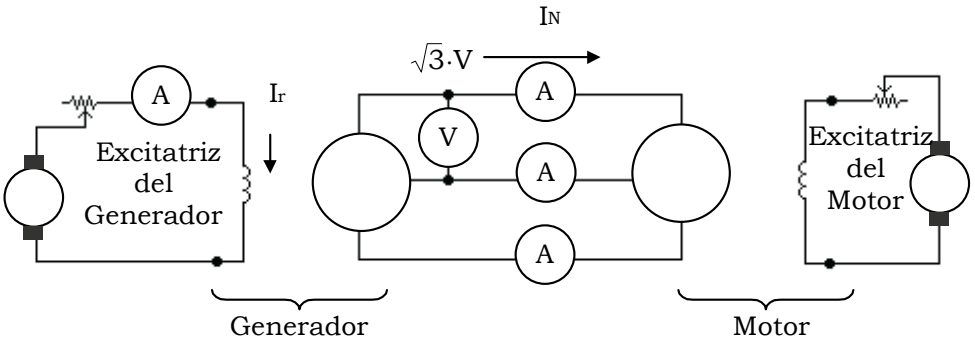


Figura 29: Generador trabajando a $\cos\varphi = 0$, alimentando a un motor.

5.2. Triángulo de Potier

Mediante las curvas de saturación en vacío y de factor de potencia cero, es posible determinar el valor de la reactancia de fuga de la armadura y el efecto de la reacción de armadura a plena carga.

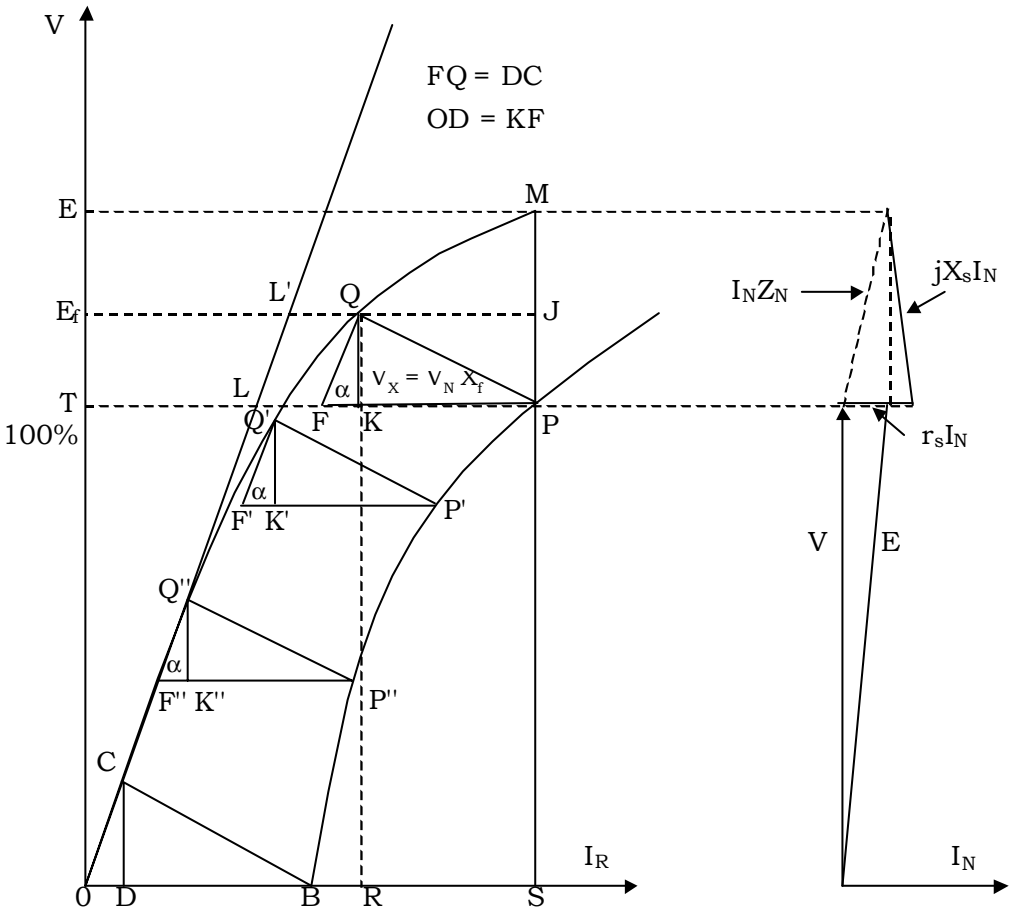


Figura 30: Triángulo de Potier.

Supóngase que en las curvas de la Figura 30, dibujadas para valores de voltaje entre fase y neutro, el voltaje nominal al neutro OT sea producido por una excitación OS. La corriente de campo necesaria para hacer circular la corriente nominal en cortocircuito es OB. Una parte de esta excitación OD contrarresta el efecto de la reactancia de fuga y la otra, DB, el efecto de la reacción de armadura.

Cuando la máquina opera en el punto P, con la excitación OS, y dado que la corriente es nominal, puede suponerse que la excitación necesaria para contrarrestar el efecto de reacción de armadura es igual DB[1]. La disminución de excitación por efecto de la reacción de armadura es

[1]Para factor de potencia cero, el efecto de la reacción de armadura es directamente opuesto al de la corriente de excitación del campo.

entonces DB = EP y para otros puntos de operación, P', P" como la corriente es siempre la nominal, dicho efecto se mantiene. Se tiene así:

$$\overline{\mathrm{DB}} = \overline{\mathrm{FP}} = \overline{\mathrm{F'P'}} = \overline{\mathrm{F"P"}} \tag{35}$$

La excitación OD produce un voltaje, DC, que es aproximadamente igual a la caída en la reactancia de fuga, en condiciones de cortocircuito y carga nominal.

Cuando la máquina opera en el punto P, también puede suponerse que dicha caída es igual a DC, dado que la corriente es siempre la nominal (se supone que la reactancia de fuga no varía)[2]. Se tiene entonces:

$$\overline{\mathrm{FQ}} = \overline{\mathrm{DC}} \tag{36}$$

$$\overline{\mathrm{OD}} = \overline{\mathrm{KF}} \tag{37}$$

Para otros puntos de operación, P', P", etc, la caída en la reactancia de fuga y la excitación correspondiente se conservan. Resulta así:

$$\overline{\mathrm{DC}} = \overline{\mathrm{FQ}} = \overline{\mathrm{F'Q'}} = \overline{\mathrm{F"Q"}} = \ldots \tag{38}$$

$$\overline{\mathrm{OD}} = \overline{\mathrm{KF}} = \overline{\mathrm{K'F'}} = \overline{\mathrm{K"F"}} = \ldots \tag{39}$$

Luego:

$$\overline{\mathrm{BC}} = \overline{\mathrm{PQ}} = \overline{\mathrm{P'Q'}} = \overline{\mathrm{P"Q"}} \tag{40}$$

y los triángulos DBC, FPQ, F'P'Q', F"P"Q", etc, resultan ser congruentes. El triángulo FPQ se llama "triángulo de Potier".

Además los triángulos OBC, KPQ, K'P'Q', K"P"Q", etc, son congruentes. El triángulo KPQ se construye entonces copiando a partir de P sobre PT, el trazo KP = OB y trazando por K la paralela a la recta de entrehierro. La intersección de esa última con la curva de saturación en vacío determina el vértice Q del triángulo. La perpendicular trazada por Q a TP determina el punto F y las magnitudes de PF y QF (QF = JP = VX) es aproximadamente la caída de voltaje en la reactancia de fuga. Esta vale por lo tanto:

$$X_f = \frac{V_x}{I_N} \text{ [Ohms/fase]} \tag{41}$$

donde I_N es la corriente nominal por fase.

JP no es estrictamente igual a la caída en la reactancia de fuga debido a la variación que experimenta el flujo de fuga con la carga. Para máquinas de rotor cilíndrico, este procedimiento permite determinar con bastante exactitud el valor de X_f . En máquinas de polos salientes resulta JP $> I_N X_f = V_x$. La reactancia de fuga determinada por este procedimiento recibe el nombre de

[2]Cuando la máquina opera con factor de potencia cero, la caída en la reactancia de fuga se encuentra en fase con el voltaje SP = RF en bornes. Por lo tanto, dicha caída se podrá agregar verticalmente al voltaje para obtener la f.e.m. E_r generada realmente en la armadura.

reactancia de Potier.

Obsérvese que si a la excitación OS se le descuenta OB, que es la parte necesaria para contrarrestar la reacción de armadura, y la caída en X_f queda TK = TP − KP = OS − OB. Habiendo descontado los efectos anteriores, la excitación necesaria para producir el voltaje OT = SP, en bornes de la máquina, sería TL si no hubiera saturación. LK es la componente de la excitación que contrarresta la saturación LK = L'Q, pues el grado de saturación depende de la f.e.m. realmente generada, E_r , y no del voltaje en bornes V = OT. Obsérvese también que si no hubiera caída en la reactancia de fuga (y una reducción de la excitación efectiva por la reacción de armadura), con la excitación OS se tendría un voltaje generado SM el que aparecería si se desprecia la caída en la resistencia rs en bornes de la máquina (ver diagrama fasorial dibujando de la Figura 30). PM es, entonces, la caída de voltaje producida por los dos efectos combinados: reactancia de fuga (PJ) y reducción de excitación neta por efecto de la reacción de armadura (JM).

Resumiendo, en la Figura 30 se tiene:

SM	=	voltaje generado en la armadura, en vacío, con excitación OS en el campo. Aparece en los bornes de la máquina.
SP	=	voltaje en bornes (entre fase y neutro) de la armadura a plena carga y $\cos\varphi = 0$ con excitación OS.
PM	=	caída en la reactancia síncrona.
JP	=	caída en la reactancia de fuga.
JM	=	caída de voltaje que toma en cuenta la reacción de armadura.

La recta de entrehierro intercepta a TP en L. Cuando la máquina opera en el punto P la corriente de excitación OS = TP se utiliza en:

TL	=	producir el voltaje SP si no existe saturación.
KF	=	contrarrestar el efecto de la reactancia de fuga.
FP	=	contrarrestar el efecto de la reacción de armadura.
LK	=	contrarrestar el efecto de saturación.

El triángulo de Potier permite además dibujar la curva de factor de potencia cero con sólo dos puntos de ella determinados en forma experimental: el punto B correspondiente a $V = 0$, y el punto P correspondiente al voltaje de la red (ver lo dicho en el punto 4.3) Conocidos esos puntos se puede determinar el triángulo de Potier, el que luego se desplaza paralelamente manteniendo el vértice Q sobre la curva de saturación en vacío. Se obtiene así la curva completa de factor de potencia cero y carga nominal.

5.3. Determinación de reactancias transitorias y sub-transitorias

5.3.1. Determinación de x'_d y x''_d

Las reactancias transitoria y sub-transitoria x'_d y x''_d respectivamente se determinan haciendo un cortocircuito trifásico brusco en la máquina (a voltaje en bornes reducido para que la corriente de cortocircuito no sobrepase en cada fase el valor nominal) e inscribiendo oscilogramas de las corrientes de las fases de la armadura (estator). Los diagramas en general presentan una componente unidireccional sumada a la componente sinusoidal de amplitud decreciente (Figura 31). Removiendo

la componente continua, de manera de dejar la onda restante simétrica con respecto al eje de abscisas, los diagramas tienen la forma ilustrada en la Figura 32(a).

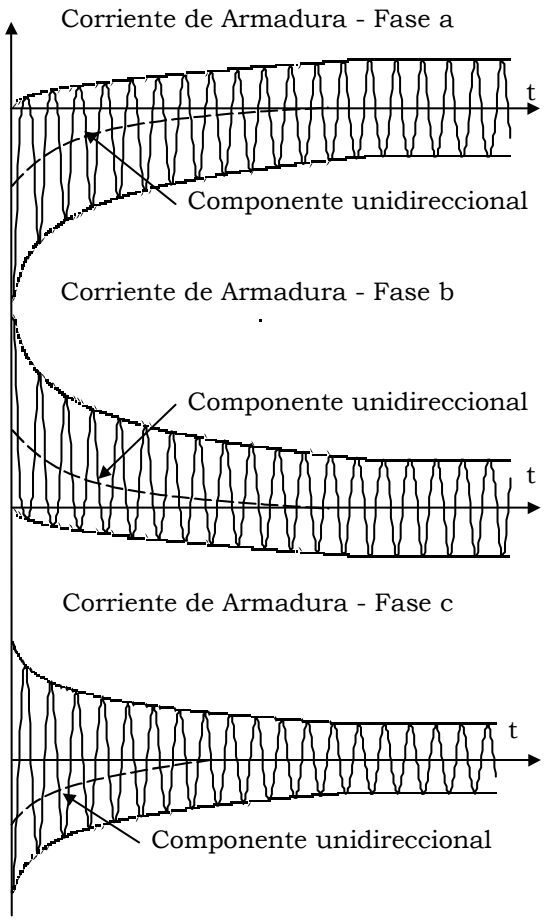


Figura 31: Oscilogramas de cortocircuito trifásico.

La ordenada inicial de la envolvente es igual a E_m/x''_d siendo E_m el máximo del voltaje que existe en cada fase antes de aplicar el cortocircuito brusco. Midiendo entonces E_m y dicha ordenada inicial, OB en la Figura 32(a), se puede determinar:

$$x''_d = \frac{E_m}{\overline{OB}} \tag{42}$$

Si se extrapola la envolvente de la corriente en el período transitorio (ver Figura 32(a)), la ordenada inicial OA es igual a E_m/x'_d de donde:

$$x'_d = \frac{E_m}{\overline{OA}} \tag{43}$$

Dicha extrapolación se facilita empleando papel semi-logarítmico, y dibujando allí (Figura 32(c)) las sobre corrientes $\Delta I'$ y $\Delta I''$ en función de tiempo, extraídas de las envolventes transitoria y sub-transitoria (Figura 32(b)) respectivamente.

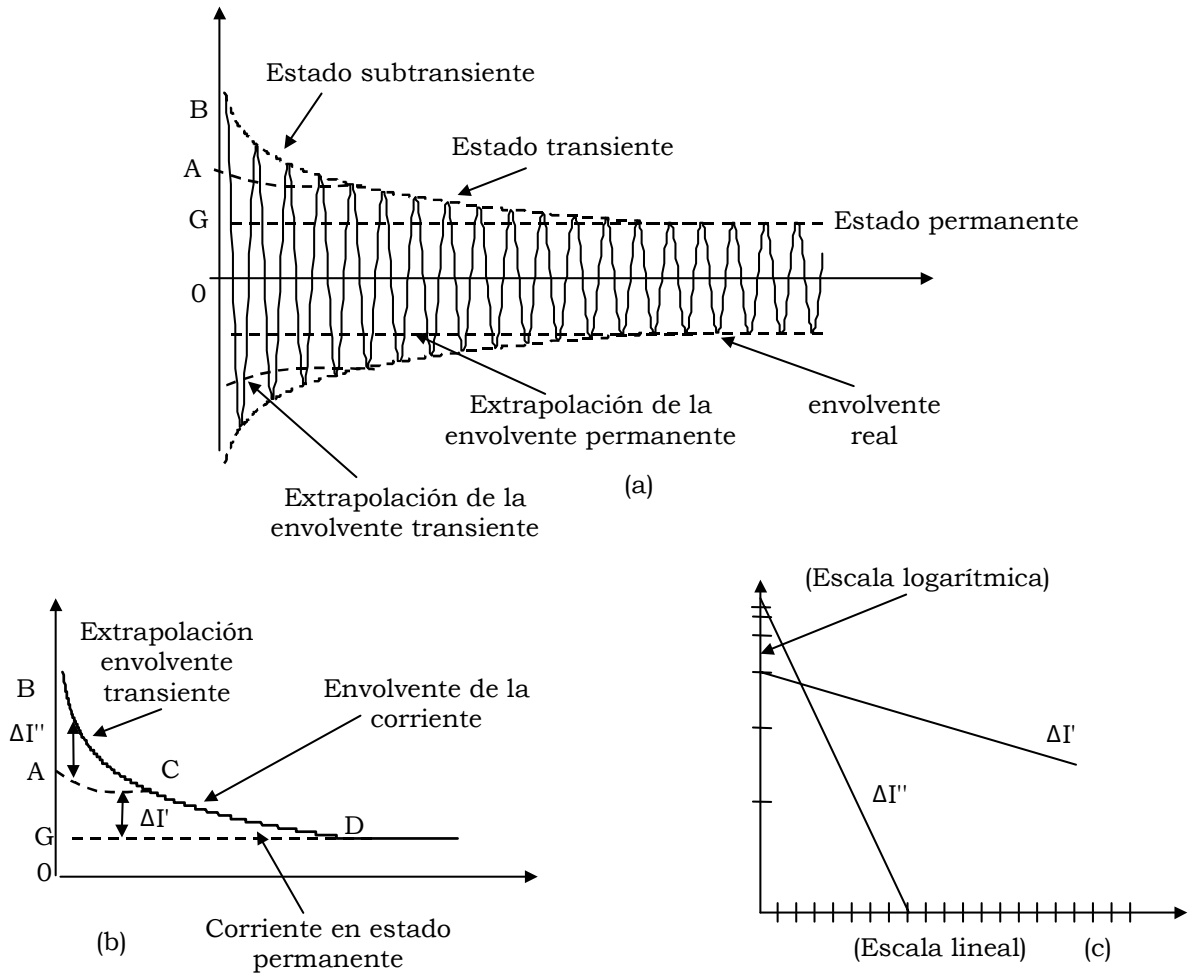


Figura 32: Determinación de x'_d y x_d".

5.4. Determinación de x'_q y x''_q

Normalmente $x'_q = x_q$. Cuando no es así (como por ejemplo en los turbogeneradores) x'_q se puede determinar usando una modificación de la prueba de deslizamiento. Con el rotor magnetizado según el eje q (o sea en el instante de voltaje máximo positivo o negativo del campo), el voltaje aplicado a la armadura se desconecta bruscamente y se registra en un oscilógrafo la caída de voltaje en los terminales de la máquina. Esta caída se extrapola a cero, despreciando los primeros ciclos de decremento rápido. La extrapolación se hace en forma análoga a la indicada para determinar x'_d y x''_d. Si V' es el voltaje extrapolado y V el voltaje terminal inmediatamente antes de abrir el circuito de armadura:

$$x'_q = \frac{V - V'}{V} \tag{44}$$

Para determinar x''_q se puede hacer una prueba con el rotor bloqueado y el enrollado de campo cortocircuitado. Se aplica un voltaje monofásico entre dos terminales de la armadura. Cuando

la posición del rotor se ajusta para que la corriente inducida en el campo sea mínima, el eje de la f.m.m. pulsante de armadura está alineado con el eje q. Un medio de la razón entre el voltaje aplicado y la corriente de armadura da entonces x''_q para una fase.

En la Tabla 2 se indica los valores típicos de reactancias de generadores y motores síncronos diversos.

	Generador rotor cilíndrico		Generador polos salientes	Motor polos salientes
	Rotor macizo	Rotor laminado		
x_d	1.10	1.10	1.00	1.10
x'_d	0.2	0.2	0.35	0.50
x''_d	0.10	0.10	0.23	0.35
x_q	1.00	1.00	0.65	0.80
x'_q	0.20	1.00	0.65	0.80
x''_q	0.15	0.25	0.65	0.40

Tabla 2: Reactancias típicas de máquinas síncronas (p.u.).

5.5. Funcionamiento en paralelo de generadores síncronos

5.5.1. Puesta en paralelo

Para poner en paralelo dos generadores síncronos es necesario que:

1) Sus velocidades correspondan exactamente a la misma frecuencia (si se pone una máquina síncrona en paralelo con la red, la frecuencia del voltaje generado debe ser 50 Hz);

2) Sus voltajes generados deben ser numéricamente iguales;

3) Los voltajes generados en la fase del mismo nombre en uno y otro generador, deben estar en fase. Esto implica que los dos generadores tienen la misma secuencia.

En la Figura 33(a), cuando se cierra el interruptor, G_1 queda en paralelo con G_2; del mismo modo, en la Figura 33(b), al cerrar el interruptor, G queda en paralelo con la red.

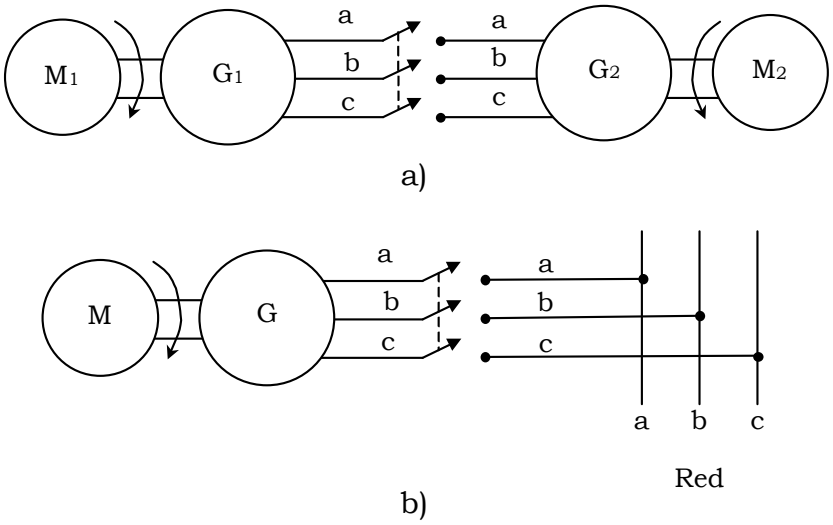


Figura 33: Conexión en paralelo de (a) dos alternadores y (b) de un alternador con la red.

La velocidad y excitación del generador que se va a poner en paralelo con otro que ya está funcionando (por ejemplo: la red) debe ajustarse hasta que se cumplan las condiciones ya mencionadas. El interruptor trifásico debe disponerse de modo que una vez cerrado queden conectadas las fases respectivas de los generadores, correspondiendo a la misma secuencia (por ejemplo $a-b-c$) en ambas máquinas.

Un frecuencíometro permite controlar la condición 1), un voltímetro la 2) y un secuencíometro comprobar que la secuencia a uno y otro lado del interruptor es la misma. Sin embargo, puede subsistir un desfase entre los voltajes de las fases correspondientes, lo que da origen a un voltaje entre dichas fases. Comprobada entonces la secuencia a ambos lados del interruptor, hay que llevar los voltajes de las fases correspondientes al mismo valor con la misma frecuencia y con desfase cero entre ellos. Es necesario entonces tener un indicador que no sólo verifique el voltaje y la frecuencia a uno y otro lado, sino también el desfase entre fases correspondientes (por ejemplo a_1 y a_2), de modo que cuando el desfase sea nulo se pueda cerrar el interruptor completando la operación de

puesta en paralelo.

Es posible construir un indicador de este tipo con ampolletas. Hay también indicadores de aguja, llamados sincronoscopios. Finalmente, hay dispositivos que sincronizan en forma automática, comandando el cierre del interruptor en el momento oportuno, es decir, cuando las condiciones anteriores se satisfacen.

Las ampolletas se pueden conectar como se indica en la Figura 34. Previamente se comprueba la secuencia para conectar entre fases correspondientes. Mientras los voltajes a uno y otro lado del interruptor no sean iguales, las ampolletas estarán siempre prendidas con mayor o menor intensidad.

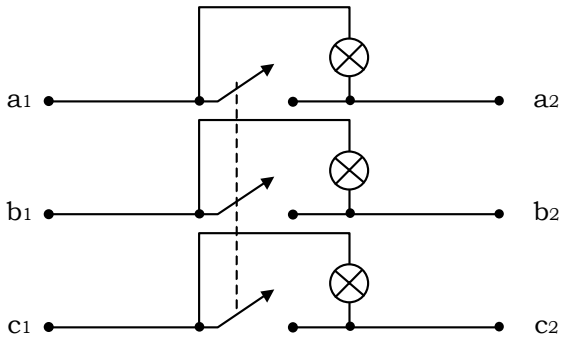


Figura 34: Sincronización con ampolletas.

Ajustados los voltajes en magnitud, si no tuvieran la misma frecuencia, las ampolletas se encenderían y se apagarían con una frecuencia igual a la diferencia de frecuencias. Si se ajustaran exactamente las velocidades de las máquinas, para tener igual frecuencias. Las ampolletas quedarían apagadas si el desfase entre voltajes de fases correspondientes fuera de cero, o encendidas (parcial o totalmente) si el desfase fuera distinto de cero. En el primer caso se podría cerrar el interruptor, completando la operación. En el segundo caso habría que llevar el desfase a cero (ampolletas apagadas). Esto se consigue teniendo velocidades ligeramente diferentes de modo que las ampolletas se prendan y apaguen muy lentamente. En el momento en que están apagadas se conecta. Esto debe hacerse en forma rápida y decidida. Las velocidades se ajustan en forma automática para dar una frecuencia común en ambas máquinas. El ideal es conseguir la igualdad de velocidades justamente cuando las ampolletas están apagadas (desfase cero). En esas condiciones, las ampolletas siguen apagadas indefinidamente y se pueden conectar las dos máquinas. Sin embargo, es preferible no esperar demasiado a conectarlas, pues, por ligeras modificaciones de velocidades puede perderse la condición alcanzada previamente al cierre. En la práctica no se espera conseguir esta situación ideal y la conexión se hace cuando las ampolletas, que se están prendiendo y apagando en forma muy lenta, están apagadas.

En instalaciones grandes, se utilizan los indicadores de sincronismo o sincronoscopio. Este instrumento tiene una aguja que puede rotar en uno u otro sentido según sea la velocidad del generador que se va a poner en paralelo con la red u otro generador de referencia. Si la velocidad es mayor que la debida, girará en un sentido; si es menor, girará en el otro sentido. La aguja se detiene cuando dicha velocidad es la correcta y se detiene en cero cuando la máquina está “en fase” con el

sistema o la otra máquina de referencia; es decir, los voltajes de las fases respectivas de la máquina y del sistema de referencia, están en fase. Comprobada entonces la secuencia y la magnitud de dichos voltajes, el interruptor se cierra cuando el sincronoscopio indica cero. Prácticamente esto se obtiene llevando el alternador que se va a poner en paralelo con el sistema a una velocidad muy próxima a la de sincronismo, de modo que el sincronoscopio gire muy lentamente. Cuando la aguja está muy próxima a cero, se conecta (debe tomarse en cuenta el pequeño retardo que introduce la operación de cierre. Teóricamente debe cerrarse cuando la aguja está en cero).

5.5.2. Repartición de carga activa y reactiva

La potencia activa que puede entregar en bornes un alternador, depende prácticamente de la potencia mecánica que se le proporciona a éste por el eje. La potencia reactiva depende de la magnitud de la excitación.

La repartición de cargas activas entre dos máquinas en paralelo se realiza según las potencias mecánicas que cada máquina recibe en su eje. Si la suma de estas potencias mecánicas es menor que la potencia requerida eléctricamente más las pérdidas de las dos máquinas, las máquinas se frenarán hasta igualar la potencia mecánica total que entra, con la potencia eléctrica total que sale más las pérdidas. En caso contrario, las máquinas se acelerarán. Para una carga dada y una velocidad dada (f dada) debe entonces ajustarse la potencia mecánica que entra, por lo menos a una de las dos máquinas, hasta conseguir que la suma de las potencias mecánicas que entran sea igual a la potencia eléctrica total entregada más las pérdidas de las dos máquinas. El ajuste puede ser manual o automático. Variaciones de la excitación de una máquina síncrona prácticamente no tienen efecto en la potencia activa que la máquina puede entregar ya que las pérdidas se alteran poco y la ecuación de equilibrio de potencias activas se tiene que seguir cumpliendo:

$$\text{Potencia de salida} = \text{Potencia mecánica} - \text{Potencia pérdidas}$$

Fijada la potencia que cada una de las máquinas puede entregar, habiendo fijado las potencias mecánicas entregadas por las máquinas motrices respectivas, variaciones de excitación sólo afectan al factor de potencia y por lo tanto, la potencia reactiva que cada máquina puede entregar. Variando la excitación de una máquina en paralelo con otras se puede hacer que dicha máquina entregue una corriente de cualquier magnitud dentro de los límites que soporte la máquina, en adelanto o atraso con respecto al voltaje en los terminales, sin cambiar apreciablemente la componente activa de la corriente. La corriente reactiva total en el sistema depende del carácter y magnitud de la carga, y está fijada para una carga dada. Así cuando se reduce la corriente reactiva entregada por uno de los generadores, la componente reactiva entregada por la o las otras máquinas crece en la misma magnitud.

Referencias

[1] A. E. Fitzgerald, C. Kinsley Jr., A. Kusko: *Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas*, Editorial Hispano Europea, 1975.

[2] Langsdorf: *Teoría de las máquinas de corriente alterna*, Mc Graw-Hill, 1971.

[3] V. Gourishankar: *Conversión de Energía Electromecánica*, México, 1975.