



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA



LA MÁQUINA SÍNCRONA
FUNCIONANDO EN RED DE
POTENCIA INFINITA Y EN
PARALELO CON OTRAS.
MOTOR SÍNCRONO

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

© 2014, Miguel Angel Rodríguez Pozueta
Universidad de Cantabria (España)
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/> or send a letter to Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, USA.



Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.

Este documento puede descargarse gratuitamente desde esta Web:
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

LA MÁQUINA SÍNCRONA FUNCIONANDO EN RED DE POTENCIA INFINITA Y EN PARALELO CON OTRAS. MOTOR SÍNCRONO

- 1.** Acoplamiento de un alternador síncrono a una red de potencia infinita
- 2.** Potencias activa y reactiva. Pares Estabilidad estática
- 3.** Comportamiento de una máquina síncrona en red de potencia infinita. Motor síncrono
- 4.** Máquinas síncronas conectadas en paralelo

MÁQUINAS SÍNCRONAS. ACOPLAMIENTO A UNA RED DE POTENCIA INFINITA

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Red de potencia infinita

- Se dice que un alternador está acoplado a una **red de potencia infinita** cuando la potencia de nuestro alternador es muy pequeña comparada del conjunto de los alternadores de la red. Esto significa que los ajustes que se hagan sobre los reguladores de nuestro alternador no van a modificar las características de la red.
- Por lo tanto, el valor eficaz de la tensión y la frecuencia en la red de potencia infinita van a permanecer inmutables, no se modificarán aunque se cambien los ajustes de nuestro alternador.
- Además, la red de potencia infinita va a ser capaz de absorber o suministrar toda la potencia –tanto activa como reactiva– que nuestro alternador quiera enviarle o demandarle, respectivamente.

Condiciones de acoplamiento a una red de potencia infinita

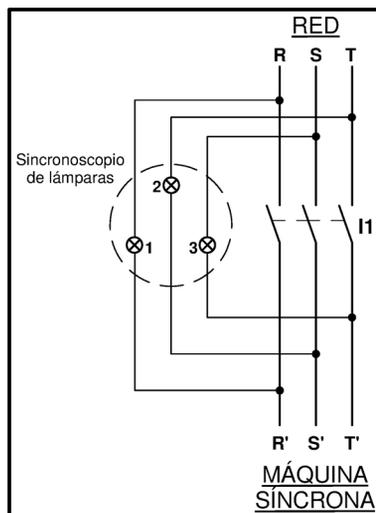
En el momento del acoplamiento a la red de potencia infinita los valores instantáneos de las tensiones del generador y de la red deben ser iguales. Esto conlleva que entre las tensiones del alternador y de la red se cumplan estas **condiciones**:

- 1) Igualdad de valores eficaces
- 2) Igualdad de frecuencias
- 3) Igualdad de ángulos de fase
- 4) Igualdad en la secuencia de fases

La última condición se verifica cuando se pone en marcha el alternador por primera vez y no hace falta volver a comprobarla.

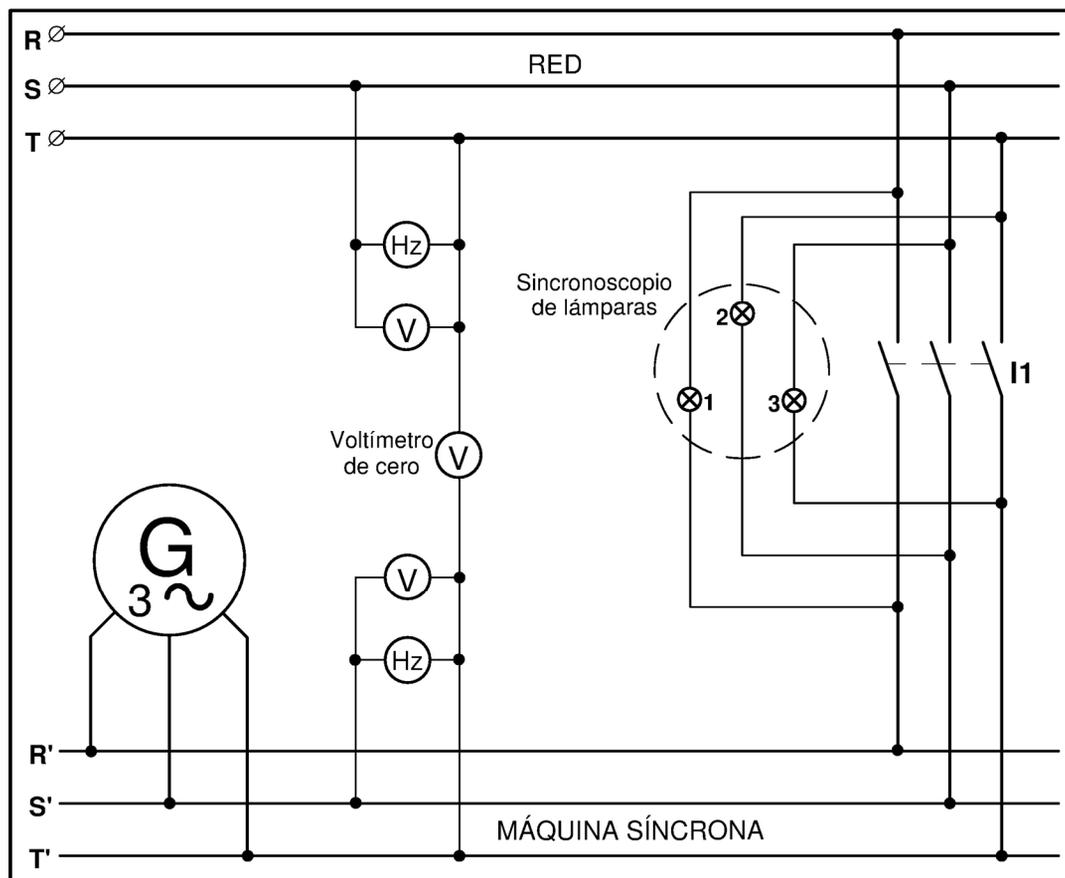
Las demás condiciones hay que verificarlas cada vez que se realiza la maniobra de acoplamiento del alternador a la red -denominada **sincronización**- y para ello se necesitan una serie de aparatos de medida. Entre estos están los **sincronoscopios**.

Sincronoscopio de lámparas



- Las tres lámparas, colocadas en los vértices de un triángulo equilátero, lucen de forma consecutiva, lo que provoca la ilusión de una luz giratoria.
- La velocidad de giro de la luz es tanto más lenta cuanto más iguales son las frecuencias del alternador y la red. La luz se detiene cuando ambas frecuencias son iguales. El sentido de giro de la luz indica cual de estas frecuencias es mayor.
- El interruptor I1 de acoplamiento a la red se debe cerrar cuando la lámpara de la fase R está apagada y las otras dos lucen al máximo. Este instante se detecta mejor con un **voltímetro de cero**.

Equipo de sincronización



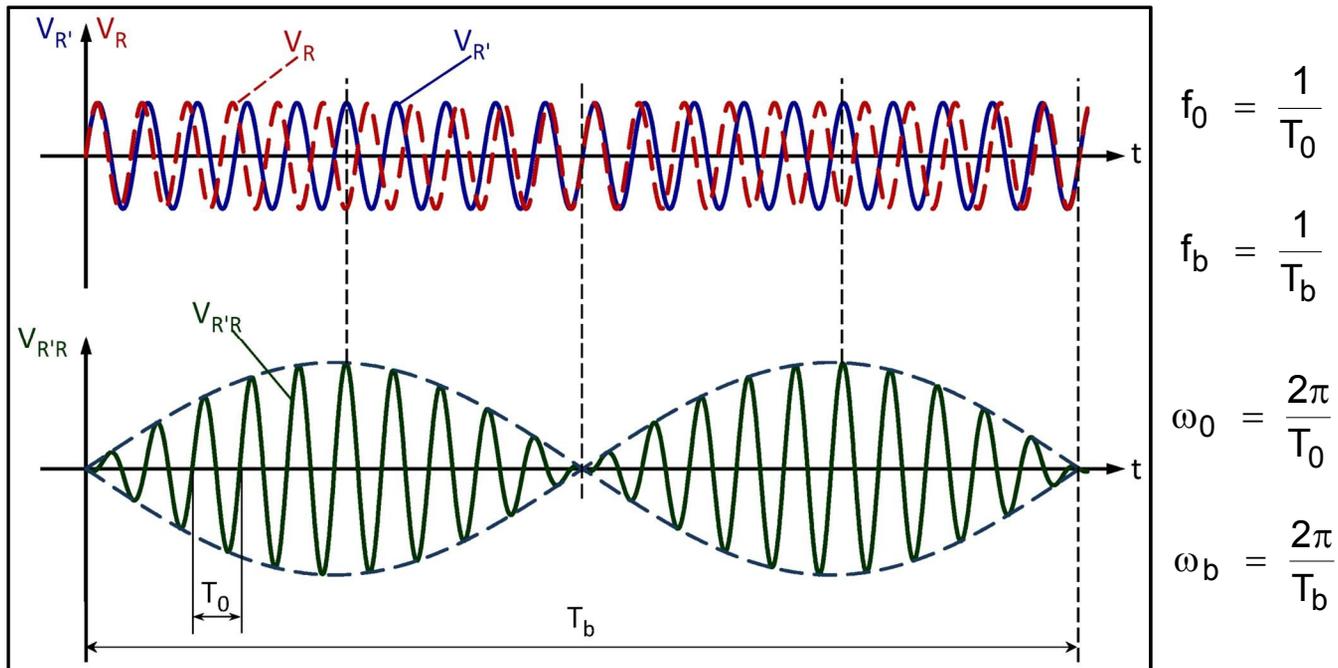
El **voltímetro de cero** se conecta entre una fase del alternador (**T'** en la figura anterior) y la fase homóloga de la red de potencia infinita (**T**). Cuando se haya conseguido la igualdad de tensiones del alternador y de la red este voltímetro indicará una tensión nula, entonces se podrá cerrar el interruptor **I1** de acoplamiento y terminar así la maniobra de sincronización.

Nótese que antes de que se consiga sincronizar el alternador con la red puede suceder que en algún momento las tensiones del alternador y de la red estén justo en oposición de fase. En estas circunstancias la tensión en bornes del voltímetro de cero es la suma de ambas tensiones; es decir, del orden del doble de la asignada del alternador.

Esto significa que el voltímetro de cero debe ser capaz de soportar tensiones del orden del doble de la asignada del alternador.

Lo mismo sucede con las lámparas del sincronoscopio que también deben poder soportar el doble de la tensión asignada del alternador.

Tensiones en la lámpara de cero (lámpara 1)



Pulsación fundamental: $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{\omega + \omega'}{2} \approx \omega$

Pulsación de batido: $\omega_b = 2\pi f_b = \frac{\omega - \omega'}{2}$

ω : Pulsación de la red

ω' : Pulsación del generador

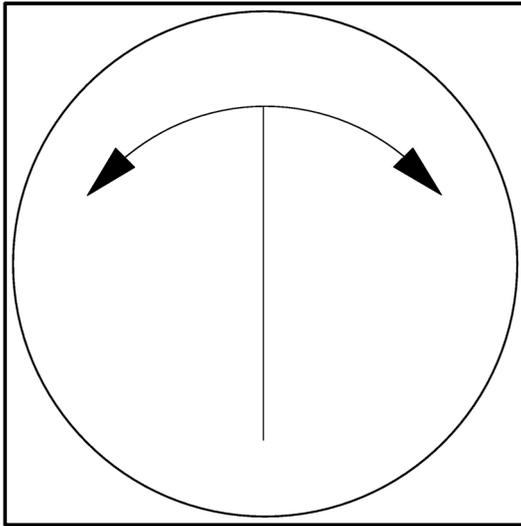
La figura anterior muestra la tensión a la que se ve sometida la lámpara 1 del sincronoscopio -que está conectada a las mismas fases (fases homólogas) del alternador y de la red- cuando ya se ha conseguido que estas tensiones tengan el mismo valor eficaz, pero aún sus frecuencias (y sus pulsaciones, ω y ω') no son totalmente iguales, aunque la diferencia entre ellas es pequeña. La velocidad a la que se ve girar la luz de las lámparas es proporcional a la pulsación de batido ω_b .

El **sincronoscopio de aguja** (ver la figura siguiente) consta básicamente de un motor que hace girar a una aguja indicadora y que tiene sendos devanados en el estator y en el rotor. Uno de estos devanados se conecta a una tensión del alternador y el otro a la tensión homóloga de la red de potencia infinita.

Modernamente se usan **columnas de sincronización** donde los aparatos de medida necesarios para la maniobra de sincronización están montados sobre un brazo saliente y giratorio.

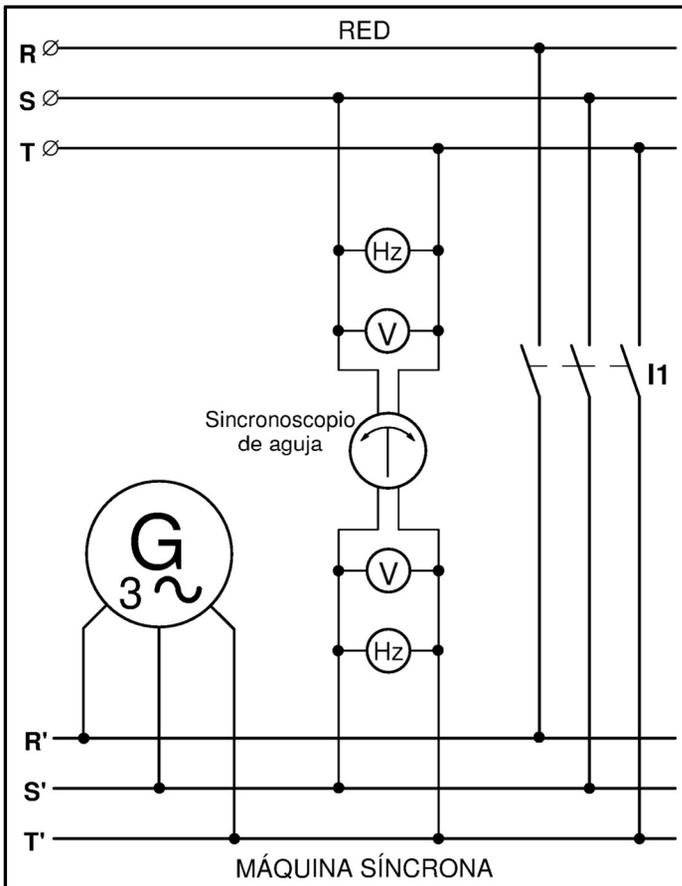
También existen instalaciones en las que la sincronización se realiza de forma automática mediante equipos electrónicos.

Sincronoscopio de aguja



- Tiene una aguja indicadora que gira en un sentido u otro dependiendo de si la frecuencia del alternador es mayor o menor que la de la red.
- La velocidad de la aguja es tanto más lenta cuanto más iguales son ambas frecuencias, ya que esta velocidad es proporcional a la pulsación de batido ω_b . La aguja se detiene cuando ambas frecuencias son iguales.
- El interruptor de acoplamiento a la red **I1** se debe cerrar cuando la aguja apunte a la señal superior, ya que entonces las tensiones del alternador y de la red están en fase.

Columna de sincronización



Fuente: Wikimedia Commons. Autor: DarkMoon

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
Y ENERGÉTICA**

MÁQUINAS SÍNCRONAS:

POTENCIAS ACTIVA Y REACTIVA.

PARES. ESTABILIDAD ESTÁTICA

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

1.- POTENCIAS Y PARES EN MÁQUINAS SÍNCRONAS

1.1.- Convenios de signos

Consideremos un generador de c.a. alimentando una carga (Fig. 1). Lo normal es tomar como sentidos positivos los indicados en la Fig. 1. Es decir, se considera positiva la corriente que sale del lado positivo del generador y la tensión positiva tiene su polaridad coincidente con la del generador.

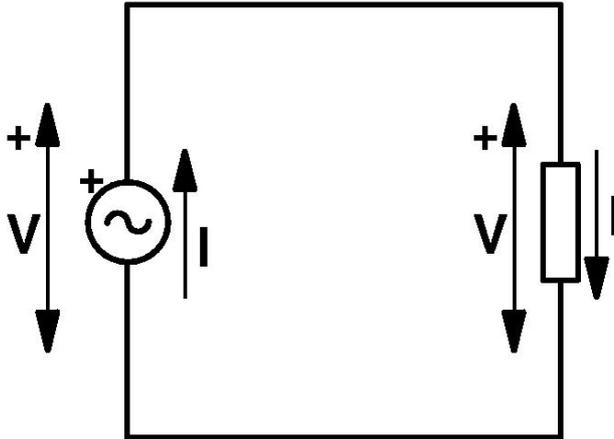


Fig. 1: Convenio de signos en un circuito con un generador y una carga.

De una manera implícita en la Fig. 1 se están considerando estos dos convenios de signos para la corriente en un generador y en una carga (Ver las Figs. 2 y 3):

- Dentro de un generador la flecha que representa la corriente tiene su punta hacia el lado de mayor tensión.
- Dentro de una carga o, lo que es lo mismo, de un receptor la flecha que representa la corriente tiene su punta hacia el lado de menor tensión.

Recordemos que la potencia reactiva no representa a una potencia realmente consumida. Cuando existen elementos capaces de almacenar energía (inductancias y condensadores), durante medio ciclo la energía fluye del generador hacia la carga, donde queda almacenada en forma de campo magnético (inductancias) o de campo eléctrico (condensadores). Durante el medio ciclo restante, la energía previamente almacenada es devuelta al generador. Por lo tanto, la potencia reactiva proviene de una energía que va y viene del generador hacia la carga y viceversa y cuyo valor medio es nulo.

El comportamiento frente a la potencia reactiva de las inductancias y de los condensadores es diferente. En el medio periodo en el que una inductancia está recibiendo energía desde el generador, un condensador está devolviendo al generador la energía que había almacenado previamente y viceversa.

Por convenio establecemos que una carga inductiva *consume* energía reactiva y un condensador la *genera*. Realmente ambos consumen por término medio una potencia nula, pero de esta manera distinguimos las dos formas diferentes de actuar de bobinas y de condensadores.

Así pues, en un circuito con factor de potencia inductivo la carga *consume* potencia reactiva y, por tanto, el generador estará *generando* potencia reactiva. Análogamente, en un circuito con factor de potencia capacitivo la carga *genera* potencia reactiva y, por tanto, el generador la estará *consumiendo*.

Por lo tanto, podemos resumir estos convenios de signos así:

CARGAS (MOTORES):

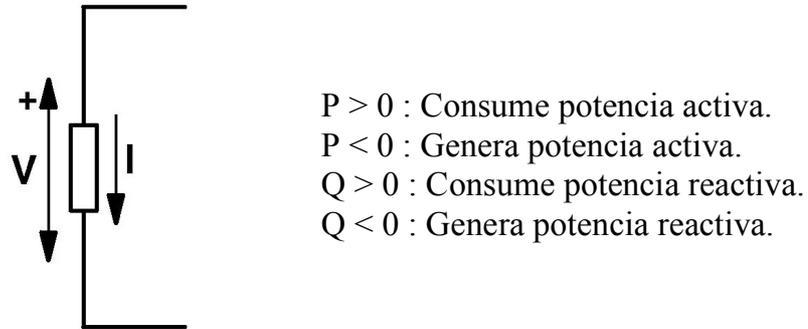


Fig. 2: Convenios de signos para una carga.

GENERADORES:

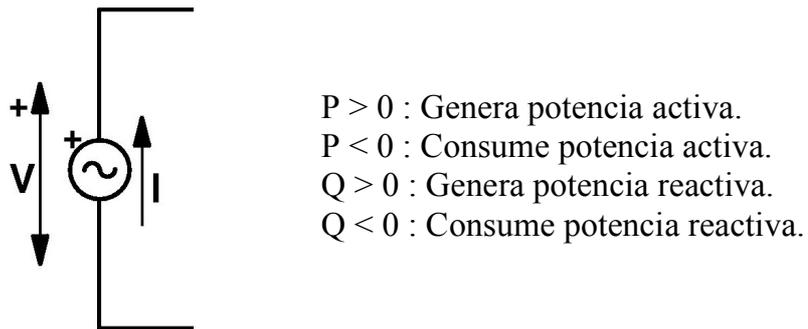


Fig. 3: Convenios de signos para un generador.

Consideremos una máquina síncrona que creíamos que iba a funcionar como generador, por lo que le aplicamos el convenio de signos de la Fig. 3 y se obtuvo que su potencia activa es negativa ($P < 0$) mientras que la reactiva es positiva ($Q > 0$). Esto significa, que

$$\cos \varphi < 0 \quad \text{sen } \varphi > 0$$

$P < 0$: Consume potencia activa.

$Q > 0$: Genera potencia reactiva.

Por lo tanto, el diagrama fasorial será el representado en la Fig. 4.

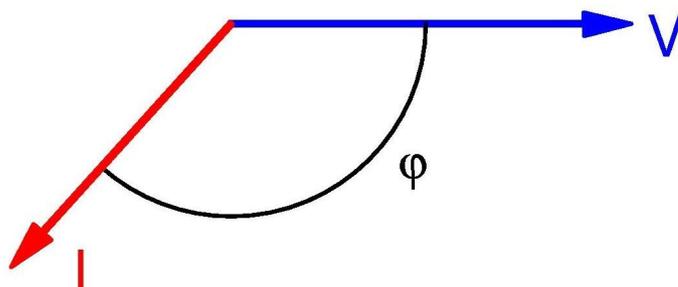
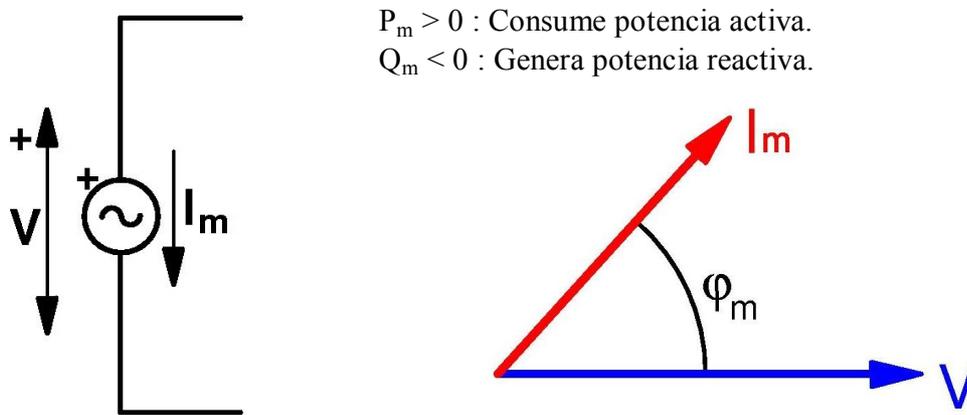


Fig. 4: Diagrama fasorial de un generador con $P < 0$ y $Q > 0$.

En la Fig. 4 el ángulo φ es superior a 90° , sin embargo, no es habitual el trabajar con ángulos de desfase mayores de 90° . El que haya salido un ángulo φ de esta manera es debido a que la máquina síncrona está consumiendo potencia activa P y, en realidad, está actuando como un motor (y, por lo tanto, es una carga) y no como un generador. Lo lógico sería haber utilizado en este caso el convenio de signos para motor (es decir, el convenio de signos de carga) que se muestra en la Fig. 5. Con este convenio el diagrama fasorial pasa a ser el de la Fig. 6.



Figs. 5 y 6: Convenio de signos motor para una máquina eléctrica.

El convenio de signos motor, representado en la Fig. 5, es el mismo que para las cargas (Fig. 2). La diferencia entre las Figs. 2 y 5 es que, para distinguir este convenio del utilizado cuando la máquina se la considera generador, se ha colocado el subíndice m a la corriente y al ángulo φ . Comparando las Figs. 3 y 5 y las Figs. 4 y 6, se observa que las corrientes I e I_m son opuestas y que los ángulos φ y φ_m deben sumar 180° (Fig. 7).

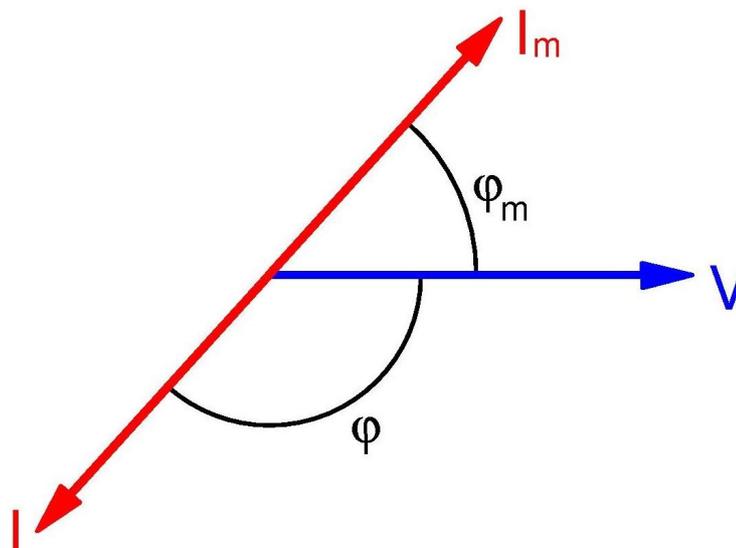


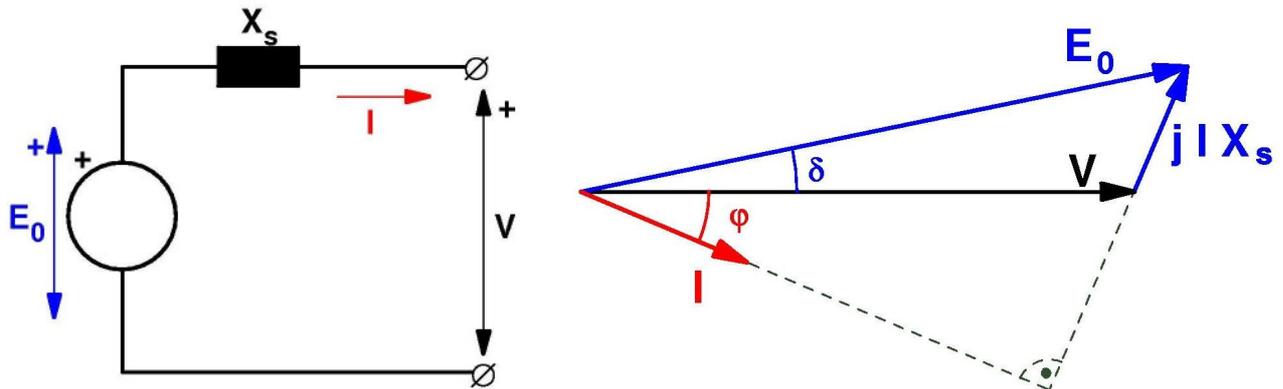
Fig. 7: Convenios de signos generador y motor.

Evidentemente, tanto con un convenio como con el otro se obtiene que la máquina está consumiendo potencia activa y generando potencia reactiva. Esto es debido a que en ambas situaciones la máquina está funcionando de igual manera, sólo cambia la forma en que la consideramos.

Nótese que si la máquina tiene un factor de potencia inductivo cuando se analiza con el convenio de signos de generador, debe pasar a tener un factor de potencia capacitivo con el convenio de signos motor y viceversa.

1.2.- Potencia y par en una máquina síncrona cilíndrica

Consideremos una máquina síncrona cilíndrica actuando como generador. Supondremos que la resistencia de las fases del estator es despreciable ($R \approx 0$) y que su reactancia síncrona X_s se la puede considerar constante. En estas condiciones y aplicando el convenio de signos de generador se puede utilizar el circuito equivalente de la Fig. 8, que da lugar al diagrama fasorial de la Fig. 9 y a las ecuaciones (1) y (2).



Figs. 8 y 9: Circuito equivalente y diagrama fasorial de un generador síncrono cilíndrico.

$$\bar{E}_0 = \bar{V} + j X_s \bar{I} \quad (1)$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_0 - \bar{V}}{j X_s} \quad (2)$$

Si se adopta como referencia del diagrama fasorial el fasor de tensión, como se ha hecho en la Fig. 9, se tiene que:

$$\bar{V} = V \underline{|0} \quad \bar{I} = I \underline{|-\varphi} \quad \bar{E}_0 = E_0 \underline{|\delta}$$

Luego:

$$\bar{I} = \frac{E_0 \underline{|\delta} - V \underline{|0}}{j X_s} = \frac{(E_0 \cos \delta - V) + j E_0 \operatorname{sen} \delta}{j X_s}$$

La conjugada del cociente de dos números complejos es igual al cociente de sus conjugadas. Por lo tanto:

$$\bar{I}^* = \frac{(E_0 \cos \delta - V) - j E_0 \operatorname{sen} \delta}{-j X_s} \quad (3)$$

En un sistema trifásico equilibrado la potencia compleja \bar{S} se puede obtener así:

$$\bar{S} = P + jQ = 3 \bar{V} \bar{I}^* \quad (4)$$

De (3) y (4) se deduce lo siguiente:

$$\bar{S} = 3 V \frac{(E_0 \cos \delta - V) - j E_0 \sin \delta}{-j X_s} = \frac{3 V E_0}{X_s} \sin \delta + j \left(\frac{3 V E_0}{X_s} \cos \delta - \frac{3 V^2}{X_s} \right) \quad (5)$$

Luego, separando las partes real e imaginaria de \bar{S} se llega a las siguientes expresiones de las potencias activa P y reactiva Q de una máquina síncrona cilíndrica:

$$P = \frac{3 V E_0}{X_s} \sin \delta \quad (6)$$

$$Q = \frac{3 V E_0}{X_s} \cos \delta - \frac{3 V^2}{X_s} \quad (7)$$

El primer término a la derecha del signo = en la fórmula (7) es la potencia reactiva total generada internamente en la máquina y el segundo término es la potencia reactiva que la máquina consume para su funcionamiento. La diferencia entre estos dos términos es la potencia reactiva que la máquina síncrona suministra al exterior.

De la relación (7) se deduce que en una máquina síncrona de rotor cilíndrico la potencia reactiva tiene estos signos:

- $Q > 0$: la máquina genera potencia reactiva si se verifica que $E_0 \cos \delta > V$
- $Q < 0$: la máquina consume potencia reactiva si se verifica que $E_0 \cos \delta < V$

Es decir, el hecho de que la proyección de E_0 sobre V sea mayor o menor que V determinará el que se genere o se consuma potencia reactiva Q, respectivamente.

La máquina síncrona es una de las máquinas eléctricas de mayor rendimiento. Aceptaremos que sus pérdidas son despreciables (es decir, supondremos que su rendimiento es del 100%), lo que significa que la potencia activa P en bornes del inducido es igual a la potencia mecánica en el eje. Como, además, esta máquina siempre funciona con la misma velocidad (la de sincronismo, Ω_1), se deduce que el par en el eje M es así:

$$M = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{3 V E_0}{X_s \Omega_1} \sin \delta \quad (8)$$

1.3.- Potencia y par en una máquina síncrona de polos salientes

En una máquina de polos salientes se obtiene que la potencia activa P viene dada por esta relación:

$$P = \frac{3 V E_0}{X_d} \operatorname{sen} \delta + \frac{3 V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \operatorname{sen} (2\delta) \quad (9)$$

Lo que significa que el par M es así:

$$M = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{3 V E_0}{X_d \Omega_1} \operatorname{sen} \delta + \frac{3 V^2}{2 \Omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \operatorname{sen} (2\delta) \quad (10)$$

Comparando el par de una máquina de polos salientes (10) con el de la de rotor cilíndrico (8) se deduce que:

- La máquina cilíndrica equivale a una máquina de polos salientes donde las reactancias síncronas longitudinal X_d y transversal X_q son iguales ($X_d = X_q (= X_s)$).
- En la máquina de polos salientes aparece un par adicional denominado par de reluctancia, que es función de $\operatorname{sen} (2\delta)$.

Este par no depende de E_0 (ni, por consiguiente, de la corriente de excitación I_e). Por lo tanto, existe aunque el inductor esté desconectado y es debido a la menor reluctancia magnética que presenta el rotor en los polos salientes comparada con la de las zonas entre los polos (obsérvese en la relación (10) que este par es debido a la diferencia que existe entre las reactancias X_d (en la dirección de los polos) y X_q (en la dirección de las zonas interpolares)). Esto provoca que el rotor tienda a orientar sus polos salientes en la dirección que en cada momento tenga el campo magnético para intentar que el flujo magnético sea el máximo posible, originando así un par sobre el rotor.

La potencia reactiva Q de una máquina síncrona de polos salientes viene dada por:

$$Q = \frac{3 V E_0}{X_d} \cos \delta - \frac{3 V^2}{X_d} \cos^2 \delta - \frac{3 V^2}{X_q} \operatorname{sen}^2 \delta \quad (11)$$

El primer término a la derecha del signo = en la fórmula (11) es la potencia reactiva total generada internamente en la máquina, el segundo término es la potencia reactiva que la máquina consume en el eje longitudinal (eje d) y el tercer término es la potencia reactiva que la máquina consume en el eje transversal (eje q) para su funcionamiento. La diferencia entre el primero y los dos términos restantes es la potencia reactiva que la máquina síncrona suministra al exterior.

En las Figs. 10 y 11 se muestra de una manera intuitiva la diferencia entre los dos pares que hay en una máquina síncrona de polos salientes, que son los dos sumandos de la relación (10): el par electromagnético M_e , que es función de $\sin \delta$, y el par de reluctancia $M_{\mathcal{R}}$, que es función de $\sin 2\delta$.

En estas figuras se representa de forma esquemática una máquina de dos polos salientes, en la que el rotor posee dos expansiones polares (A y B) con sus respectivos devanados polares alimentados con corriente continua, de forma que por la expansión A salen las líneas del campo magnético hacia el entrehierro, por lo que se convierte en un polo norte del rotor, mientras que por la expansión B entran al rotor las líneas de campo magnético procedentes del entrehierro, por lo que se trata de un polo sur del rotor.

La Fig. 10 muestra el sentido del par electromagnético M_e en cuatro situaciones diferentes: a, b, c y d. En todas ellas se muestra el momento en que el devanado del estator origina un campo magnético dirigido verticalmente de forma que las líneas de este campo magnético salen al entrehierro por la parte inferior donde, por lo tanto, habrá un polo norte del estator, y entran al estator desde el entrehierro por la parte superior, donde se encontrará, entonces, un polo sur del estator. Este campo magnético del estator, al igual que el rotor, gira a la velocidad de sincronismo; por consiguiente, en otro instante de tiempo diferente al mostrado en la Fig. 10 tanto el campo magnético estatórico como el rotor y, consiguientemente, su campo magnético rotórico habrán girado el mismo ángulo y guardarán la misma posición relativa entre ellos. Nótese que las figuras 10a, 10b, 10c y 10d representan, respectivamente, un instante de cuatro estados de funcionamiento diferentes de una máquina síncrona, no cuatro instantes de tiempo de un mismo estado de la máquina.

En el estado a (Fig. 10a), el rotor forma un ángulo eléctrico γ con el campo magnético del estator comprendido entre 0 y 90° (al tratarse en este caso de una máquina de dos polos ($p = 1$ par de polos), en ella los ángulos eléctricos son iguales a los ángulos geométricos) y vemos que el polo norte del rotor es atraído por el polo sur del estator y el sur del rotor es atraído por el norte del estator, lo que da lugar a que aparezca sobre el rotor un par M_e de sentido antihorario.

En el estado b (Fig. 10b), el rotor forma un ángulo eléctrico γ con el campo magnético del estator comprendido entre 90 y 180° y vemos que el polo norte del rotor es repelido por el polo norte del estator y el sur del rotor es repelido por el sur del estator, lo que da lugar a que siga apareciendo sobre el rotor un par M_e de sentido antihorario.

En el estado c (Fig. 10c), el rotor forma un ángulo eléctrico γ con el campo magnético del estator comprendido entre 180 y 270° y vemos que el polo norte del rotor es repelido por el polo norte del estator y el sur del rotor es repelido por el sur del estator, lo que da lugar a que se ejerza sobre el rotor un par M_e de sentido horario.

Finalmente, en el estado d (Fig. 10d), el rotor forma un ángulo eléctrico γ con el campo magnético del estator comprendido entre 270 y 360° y vemos que el polo norte del rotor es atraído por el polo sur del estator y el sur del rotor es atraído por el norte del estator, lo que da lugar a que siga ejerciéndose sobre el rotor un par M_e de sentido horario.

Por consiguiente, al variar el ángulo γ desde 0 a 360° el par tiene sentido antihorario en los primeros 180° y sentido contrario en los 180° restantes.

El ángulo de par δ está relacionado con el ángulo γ , de forma que si γ varía de 0 a 360° , también lo hará el ángulo de par δ . Luego, al variar δ entre 0 y 360° el par M_e cambia de signo cada 180° eléctricos, lo que es coherente con que el par electromagnético M_e sea función de $\sin \delta$.

En la Fig. 11 se han representado otra vez los mismos cuatro estados que en la Fig. 10 cuando la corriente del rotor se anula. En este caso desaparece el campo magnético del rotor y el par que existe es el par de reluctancia (en la Fig. 10 en realidad, además del par electromagnético M_e que se ha explicado anteriormente, también existirá el par de reluctancia, que al ser mucho menor que el electromagnético hemos despreciado hasta ahora).

El par de reluctancia aparece por la tendencia que tienen las piezas de hierro de ser atraídas por los polos magnéticos, de forma que el campo magnético busca siempre el circular por el camino de mínima reluctancia magnética.

En la Fig. 11a la pieza polar A es atraída por el polo sur del estator y la pieza polar B es atraída por el polo norte del estator. Esto da lugar a la aparición de un par de reluctancia $M_{\mathcal{R}}$ de sentido antihorario.

En la Fig. 11b la pieza polar A es atraída por el polo norte del estator y la pieza polar B es atraída por el polo sur del estator. Esto da lugar a la aparición de un par de reluctancia $M_{\mathcal{R}}$ de sentido horario.

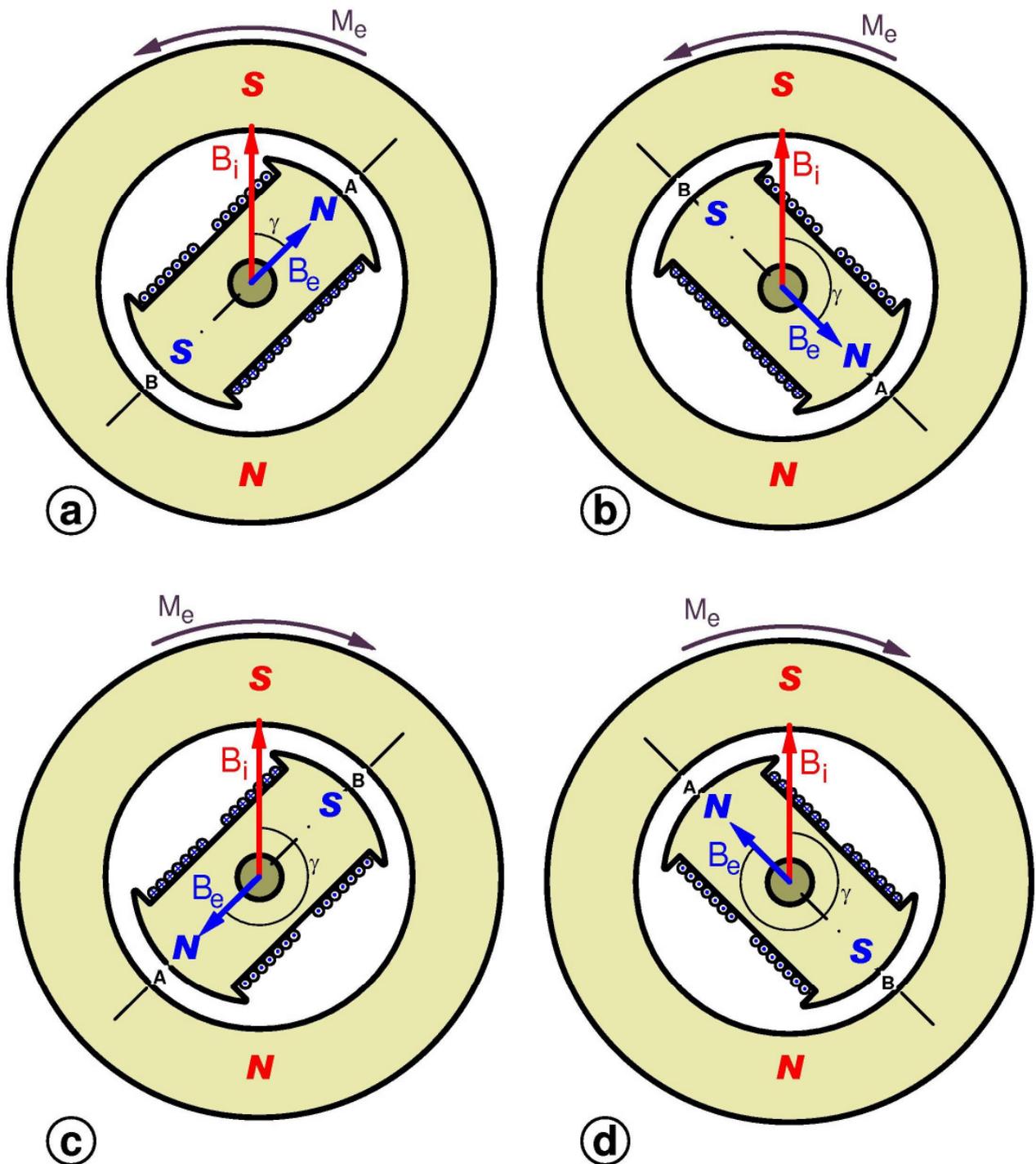


Fig. 10: Par electromagnético.

En la Fig. 11c la pieza polar A es atraída por el polo norte del estator y la pieza polar B es atraída por el polo sur del estator. Esto da lugar a la aparición de un par de reluctancia $M_{\mathcal{R}}$ de sentido antihorario.

Finalmente, en la Fig. 11d la pieza polar A es atraída por el polo sur del estator y la pieza polar B es atraída por el polo norte del estator. Esto da lugar a un par de reluctancia $M_{\mathcal{R}}$ de sentido horario.

Luego, cuando el ángulo γ varía de 0 a 360° eléctricos y, consecuentemente, el ángulo de par δ también varía de 0 a 360°, el par de reluctancia $M_{\mathcal{R}}$ cambia de signo cada 90°; lo que es coherente con que dicho par sea función de $\sin(2\delta)$.

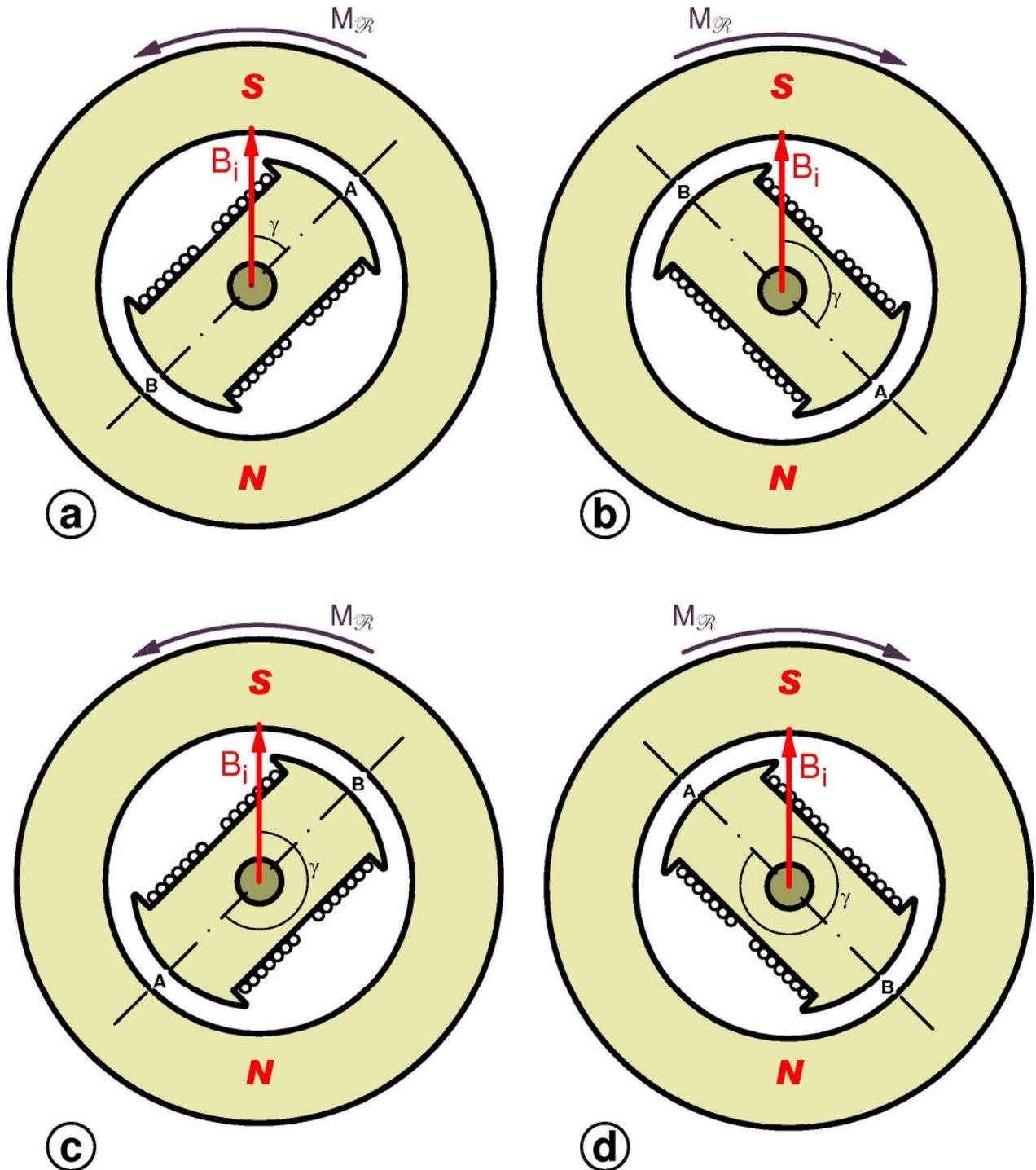


Fig. 11: Par de reluctancia.

1.4.- Característica Par - ángulo de par (M - δ)

Supongamos una máquina síncrona cilíndrica de resistencia del estator R despreciable, corriente de excitación I_e constante (luego, E_0 permanece constante) y reactancia síncrona X_s constante que está conectada a una red de potencia infinita.

El hecho de que se trate de una red de potencia infinita significa que la tensión V y la frecuencia f en bornes del inducido serán constantes. Esto, a su vez, conlleva que la velocidad de sincronismo Ω_1 permanecerá invariable.

En esta situación se deduce de las expresiones (6) y (8) que tanto la potencia activa como el par variarán solamente en función del ángulo de par δ (de ahí el nombre que se da a este ángulo):

$$P = \frac{3 V E_0}{X_s} \sin \delta = P_{\text{máx}} \sin \delta ; \quad P_{\text{máx}} = \hat{P} = \frac{3 V E_0}{X_s} \quad (12)$$

$$M = \frac{3 V E_0}{X_s \Omega_1} \sin \delta = M_{\text{máx}} \sin \delta ; \quad M_{\text{máx}} = \hat{M} = \frac{P_{\text{máx}}}{\Omega_1} = \frac{3 V E_0}{X_s \Omega_1} \quad (13)$$

Por lo tanto, las características P - δ y M - δ son sinusoidales y los valores máximos de estas magnitudes se producen cuando el ángulo de par δ vale 90° (Fig. 12).

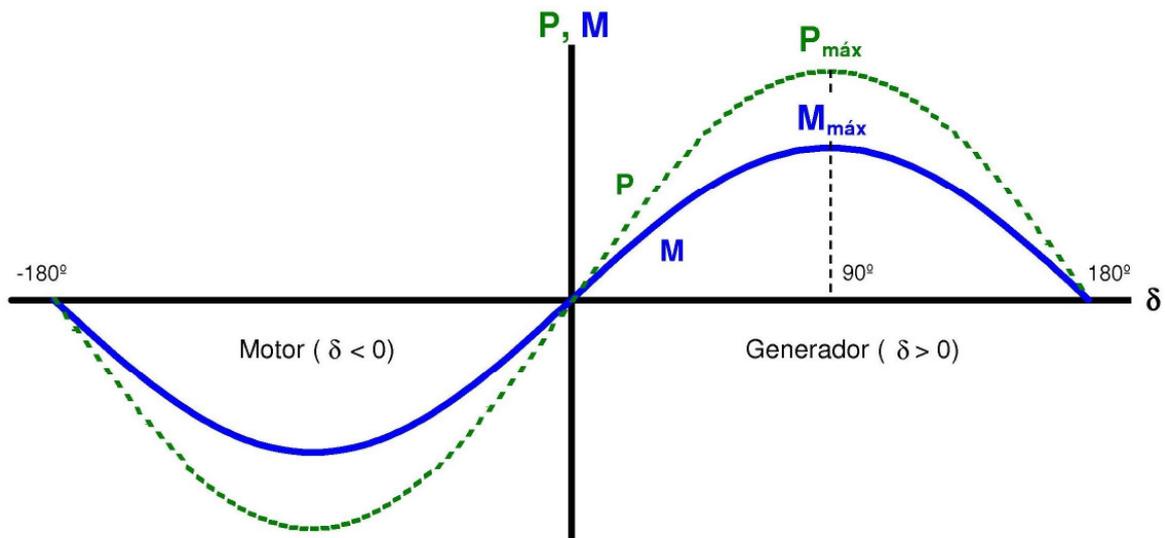


Fig. 12: Características P - δ y M - δ en una máquina síncrona de rotor cilíndrico.

Cuando se considera que el ángulo δ varía entre -180° y $+180^\circ$ y se emplea el convenio de signos generador, se deduce que:

- Si $\delta > 0$, resulta que $P > 0$ y la máquina actúa como generador.
 Si $\delta < 0$, resulta que $P < 0$ y la máquina actúa como motor.
- Luego:
 Si el fasor E_0 está adelantado con respecto a V (Fig. 9), la máquina actúa como generador.
 Si el fasor E_0 está retrasado con respecto a V (Fig. 13), la máquina actúa como motor.

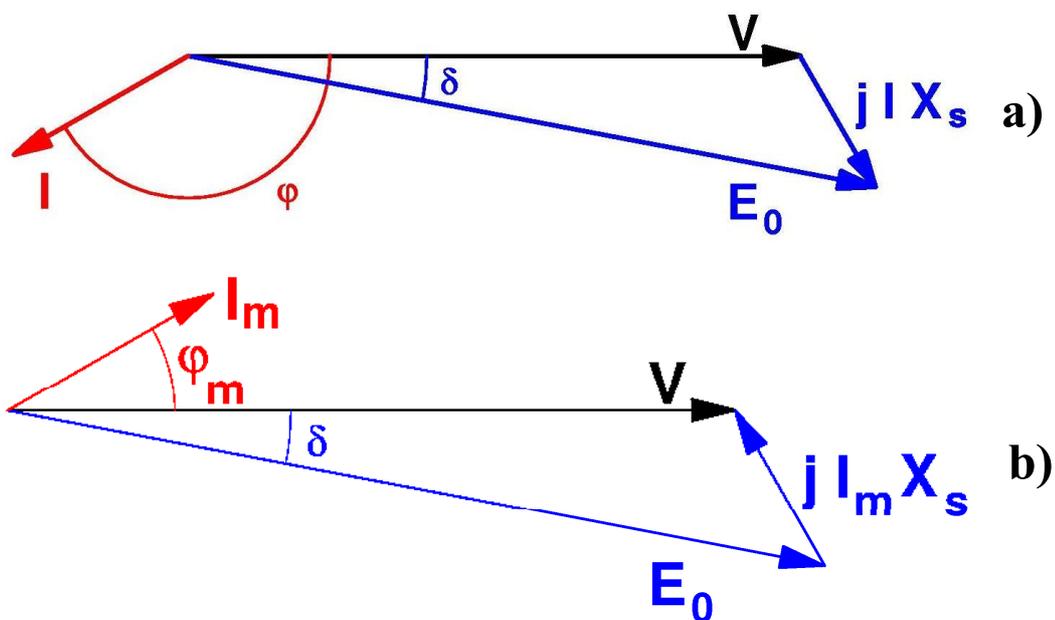


Fig. 13: Diagramas fasoriales de una máquina síncrona de rotor cilíndrico actuando como motor:
 a) Convenio de signos generador; b) Convenio de signos motor

En las máquinas de polos salientes conectadas a una red de potencia infinita el par M (ecuación (10)) es la suma de dos senoides: el *par electromagnético*, función de $\sin \delta$ y el *par de reluctancia*, función de $\sin 2\delta$ (Fig. 14). La potencia activa P también será igual a la suma de dos senoides de este tipo. Por lo tanto, al igual que cuando el rotor es cilíndrico, el par y la potencia activa de una máquina síncrona de polos salientes en una red de potencia infinita dependen sólo de δ . En este caso, la potencia y el par máximos se producirán para un valor del ángulo de par δ ligeramente inferior a 90° .

Normalmente el par de reluctancia se puede despreciar frente al par electromagnético y la máquina síncrona de polos salientes se analiza con las mismas curvas de par y de potencia (Fig. 12) que la máquina de rotor cilíndrico.

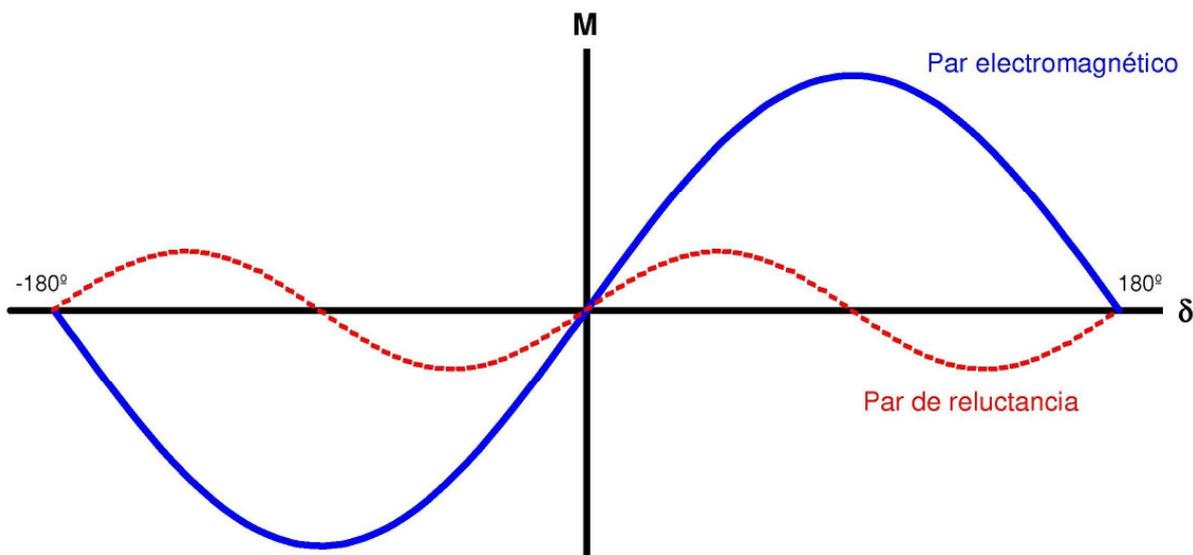


Fig. 14: Característica $M - \delta$ en una máquina síncrona de polos salientes.

2.- ESTABILIDAD ESTÁTICA EN MÁQUINAS SÍNCRONAS

2.1.- Analogía mecánica del ángulo de par δ

En los apartados anteriores se ha visto como una máquina síncrona cilíndrica en red de potencia infinita tiene un par que sólo depende del ángulo δ . Este ángulo es el que forman los fasores de f.e.m. de vacío E_0 y de tensión en bornes V .

La f.e.m. E_0 es originada por la acción del campo magnético inductor, es decir, por el campo generado por el bobinado del rotor. La tensión V viene impuesta por la red de potencia infinita, la cual también impone la frecuencia f y la velocidad de sincronismo Ω_1 . Los fasores de ambas magnitudes están alineados cuando el par es nulo (y, en consecuencia, $\delta = 0$). Por lo tanto, el desfase δ entre ambos fasores se corresponde con el desfase que físicamente existe entre la posición del rotor en un momento dado con respecto a un punto que gire siempre a la velocidad de sincronismo.

Esto permite establecer una *analogía mecánica* (Fig. 15) del par de una máquina síncrona, la cual facilita la comprensión de este fenómeno.

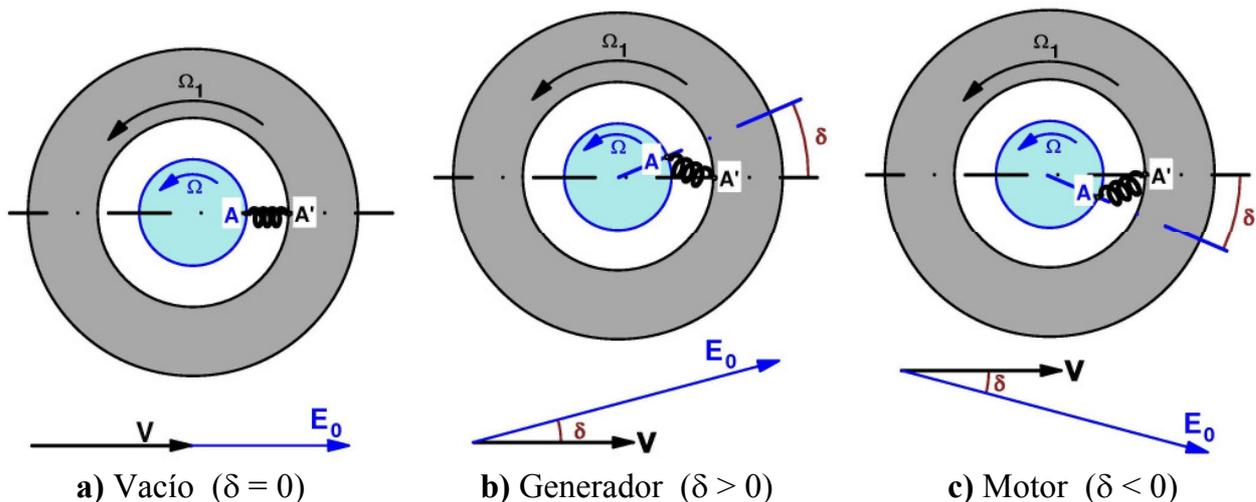


Fig. 15: Analogía mecánica del funcionamiento de una máquina síncrona en red de potencia infinita.

Consideremos dos puntos imaginarios en el entrehierro de la máquina. Uno, el A, está fijo al rotor y gira, por tanto, a la velocidad Ω de la máquina. El otro punto, el A', está en el lado del estator, pero no está inmóvil sino que gira siempre a la velocidad de sincronismo Ω_1 , constante e impuesta por la red de potencia infinita. Ambos puntos se encuentran enfrentados cuando la máquina está en vacío, es decir, cuando el par es nulo y $\delta = 0$ (Fig. 15a). El efecto del par es equivalente a que entre A y A' hubiera un resorte de forma que no ejerce ninguna fuerza cuando A y A' están enfrentados, pero que comienza a tensarse (y a ejercer fuerza y, por lo tanto, también par) cuando A y A' se separan entre sí.

Con la máquina en *vacío* (Fig. 15a), ambos puntos giran siempre a igual velocidad ($\Omega = \Omega_1$) y el resorte no se tensa y no se transmite par entre ambos puntos. Para un observador que estuviera situado en A', girando siempre a la velocidad de sincronismo, el punto A permanecería inmóvil frente a él.

Si, partiendo de esta situación de vacío, el motor que mueve a la máquina síncrona aumenta su par, de momento nos encontramos en una situación de desequilibrio de pares. El par motor aumenta, pero el par de la máquina síncrona todavía es nulo, pues sigue sucediendo que $\delta = 0$. Esto origina que el rotor se acelere ligeramente, aumentando su velocidad y provocando que el punto A se adelante con respecto a A' (Fig. 15b). Por lo tanto, el resorte se tensa hasta que origine un par similar y opuesto al del motor, obligando al rotor a volver a girar a la velocidad de sincronismo. El par se transmite desde el rotor hacia el estator, pues es el punto A el que "tira" de A', y la máquina síncrona empieza a actuar como *generador* ejerciendo, en consecuencia, un par de frenado opuesto al del motor que la mueve.

En la realidad, físicamente aparece este movimiento de adelanto del rotor hasta que el desfase entre los puntos A y A' dé lugar a un ángulo δ que origine un par igual y opuesto al del motor. Así, un observador situado sobre A' vería como el punto A se adelanta hasta que el ángulo de par δ es el adecuado para contrarrestar el par motor.

De forma análoga, si partiendo de la situación de vacío, se introduce una carga mecánica (por ejemplo, una bomba) en el eje de la máquina síncrona, el rotor se ve sometido a un par de frenado (el de la carga) que reduce su velocidad. Esto provoca que el punto A se retrase con respecto a A' (Fig. 15c) haciendo que la máquina síncrona empiece a funcionar como *motor*. Ahora el resorte se tensa en sentido contrario, es el punto A' el que arrastra al A (par transmitido desde el estator hacia el rotor) para obligar al rotor a que vuelva a girar a la velocidad de sincronismo. Al final el desfase entre A y A' será tal que el par debido al resorte equilibre al par de la carga.

Físicamente veríamos este movimiento de retraso del rotor hasta que el desfase entre los puntos A y A' dé lugar a un ángulo δ que origine un par motor igual y opuesto al de la carga. Así, un observador situado sobre A' vería como el punto A se atrasa hasta que el ángulo de par δ es el adecuado para contrarrestar el par de carga.

Por lo tanto, las variaciones del par repercuten en movimientos del rotor, hacia delante o hacia atrás, superpuestos al movimiento de giro con la velocidad de sincronismo. Es decir, el ángulo de par δ es también el ángulo que físicamente forman entre sí un punto del rotor y otro que girase a la velocidad de sincronismo. En todos estos movimientos la velocidad del rotor Ω apenas se aparta de la velocidad de sincronismo Ω_1 y, al final, se estabiliza manteniendo un valor constante e igual a Ω_1 .

2.2.- Estabilidad estática

Consideremos una máquina síncrona cilíndrica de resistencia de estator R despreciable e intensidad de excitación I_e y reactancia síncrona X_s constantes que está funcionando como generador acoplada a una red de potencia infinita.

En estas condiciones la curva de par de esta máquina, restringida a la zona de funcionamiento como generador, es la representada en la Fig. 16.

Observemos en la Fig. 16 que si el motor de accionamiento está proporcionando un par constante M_m , la máquina en régimen permanente puede estar funcionando en dos puntos, A y B, de la curva de par. Vamos a estudiar la estabilidad de la máquina en ambos puntos.

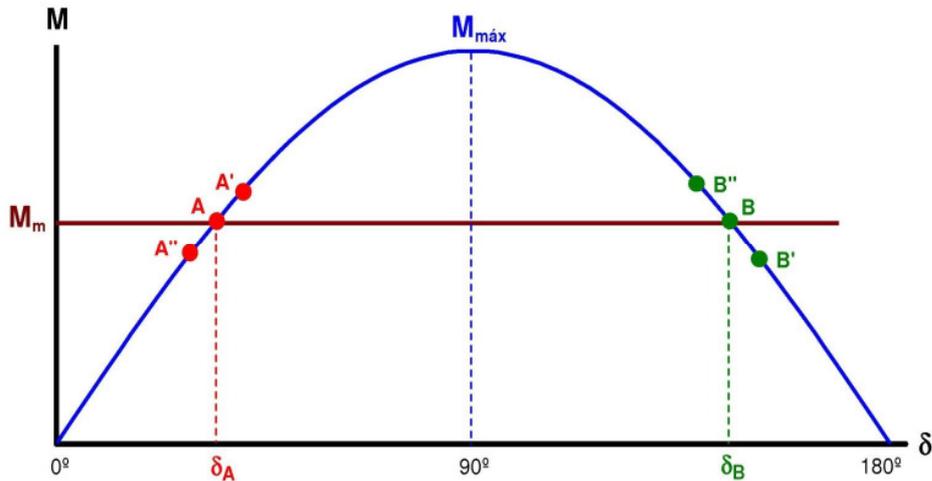


Fig. 16: Estudio de la estabilidad estática de un generador síncrono en red de potencia infinita.

Evidentemente, se cumplirá que los ángulos de par δ_A y δ_B verifican que

$$M_m = M_A = M_{m\acute{a}x} \text{ sen } \delta_A \quad M_m = M_B = M_{m\acute{a}x} \text{ sen } \delta_B \quad (14)$$

Supongamos que la máquina funciona en el punto A, con el ángulo de par δ_A , y se produce una pequeña perturbación transitoria (por ejemplo, un aumento transitorio del par motor) que provoca un ligero aumento del par, con lo cual el ángulo de par pasa a ser $\delta_{A'}$. La máquina síncrona pasa, entonces, a colocarse en el punto A'. En cuanto cese esta perturbación, el par motor vuelve a ser M_m pero la inercia mecánica de la máquina impide que el ángulo de par vuelva instantáneamente a valer δ_A (recordemos que las variaciones del ángulo de par repercuten en movimientos reales del rotor que se suman al giro a la velocidad de sincronismo). La máquina se encuentra, pues, en un estado de desequilibrio de pares: el par motor es $M_m = M_A$, pero el par de la máquina es mayor, pues es el que corresponde al punto A' (Fig. 16). La máquina síncrona está actuando como generador, lo que significa que ejerce un par de frenado. Luego, tenemos un par de frenado, $M_{A'}$, superior al par motor, M_A , por lo que la máquina reduce entonces su velocidad. Esto, como se vio al estudiar la analogía mecánica del par, provoca que el ángulo de par vaya disminuyendo hasta que, al final, acabe valiendo δ_A y se alcancen otra vez el punto de equilibrio A y la velocidad de sincronismo Ω_1 .

Si la perturbación transitoria desde el punto A produjo una disminución del par, la máquina pasará al punto A'', cuyo ángulo de par es $\delta_{A''}$. Al desaparecer la perturbación el par motor sigue siendo $M_m = M_A$, pero el par de la máquina es inferior (es $M_{A''}$ (ver la Fig. 16)). Luego, el par motor es mayor que el par de frenado y la máquina aumentará su velocidad. Esto hace que el ángulo de par aumente hasta que vuelva a valer δ_A y se alcancen otra vez el punto de equilibrio A y la velocidad de sincronismo Ω_1 .

En resumen, aunque aparezcan perturbaciones transitorias que desvíen, tanto en sentido positivo como negativo, el ángulo de par con respecto al punto de equilibrio inicial A; la máquina vuelve a recuperar el equilibrio en el punto A. Por lo tanto, el punto A es un punto de funcionamiento estable del generador síncrono.

Supongamos que ahora la máquina se encuentra inicialmente en el punto de equilibrio B y que se produce una pequeña perturbación transitoria que provoca una ligera disminución del par con lo que el ángulo del par pasa a ser $\delta_{B'}$. La máquina síncrona se coloca, entonces, en el punto

B'. En el momento de desaparecer la perturbación el par motor sigue siendo $M_m = M_B$, pero el par de la máquina es inferior (es M_B , ver la Fig. 16)). Luego, el par motor es mayor que el par de frenado y la máquina aumentará su velocidad. Esto hace que el ángulo de par aumente, separándose cada vez más de δ_B hasta que la máquina pierda el sincronismo con la red.

Si la perturbación transitoria desde el punto B produjo un aumento del par, la máquina pasará al punto B'', cuyo ángulo de par es $\delta_{B''}$. Al desaparecer la perturbación el par motor sigue siendo $M_m = M_B$, pero el par de la máquina es mayor (es $M_{B''}$ correspondiente a $\delta_{B''}$ ver la Fig. 16)). Luego, el par motor es inferior que el par de frenado y la máquina reducirá su velocidad. Esto hace que el ángulo de par disminuya, alejándose cada vez más de δ_B hasta que alcance un nuevo equilibrio en el punto A.

En resumen, si aparecen perturbaciones transitorias que desvíen, tanto en sentido positivo como negativo, el ángulo de par con respecto al punto de equilibrio inicial B; la máquina es incapaz de recuperar el equilibrio en el punto B. Por lo tanto, el punto B es un punto de funcionamiento inestable del generador síncrono.

Se deduce, entonces, que los puntos de funcionamiento del generador síncrono cuyos ángulos de par δ estén comprendidos entre 0 y 90° son estables, mientras que si están comprendidos entre 90 y 180° son inestables. Luego, el ángulo de par $\delta = 90^\circ$ es el límite de estabilidad estática.

En el punto de equilibrio estable A, la máquina recupera el equilibrio porque al apartarla de A aparece una diferencia de pares entre el generador síncrono y el motor que obliga al sistema al volver al punto de equilibrio A. Esta diferencia de pares se denomina par sincronizante M_s .

En esta explicación no se ha tenido en cuenta la energía cinética que el sistema acumula cuando se aparta del punto de equilibrio inicial A, la cual origina que la vuelta al punto de equilibrio no se realice directamente. Se producen una serie de oscilaciones -superpuestas al movimiento de giro con la velocidad de sincronismo- alrededor de A hasta que, finalmente, la máquina se estabiliza en dicho punto. Este fenómeno hace que el estudio de la estabilidad sea algo más complicado, lo que se tratará más adelante al estudiar las oscilaciones pendulares y la estabilidad dinámica.

2.3.- Par sincronizante M_s para pequeños desvíos δ_d del ángulo de par

Supongamos que el generador síncrono estaba funcionando en el punto de equilibrio estable A (Fig. 16) y se produjo una pequeña perturbación que lo apartó transitoriamente de dicho punto. Al desaparecer la perturbación los pares de la máquina M y del motor M_m son distintos. Su diferencia es el *par sincronizante* M_s que devuelve la máquina al punto de equilibrio A:

$$M_s = M - M_m = M - M_A \quad (15)$$

Durante la vuelta al estado de equilibrio A, el ángulo de par δ va cambiando hasta que, finalmente, vale δ_A . Llamaremos ángulo de desvío δ_d a la diferencia que en cada momento tiene el ángulo de par con respecto a su valor en el punto de equilibrio A:

$$\delta_d = \delta - \delta_A \rightarrow \delta = \delta_A + \delta_d \quad (16)$$

Si el ángulo de desvío δ_d es pequeño (menor de 20°), se cumple que:

$$\delta_d \ll 1 \rightarrow \text{sen } \delta_d \approx \delta_d; \quad \text{cos } \delta_d \approx 1 \quad (17)$$

Luego, partiendo de las relaciones (13), (15) y (16) se deduce lo siguiente:

$$M_s = M - M_A = M_{\text{máx}} [\text{sen } \delta - \text{sen } \delta_A] = M_{\text{máx}} [\text{sen } (\delta_A + \delta_d) - \text{sen } \delta_A] \quad (18)$$

Teniendo en cuenta esta propiedad trigonométrica

$$\text{sen } (\delta_A + \delta_d) = \text{sen } \delta_A \cos \delta_d + \cos \delta_A \text{sen } \delta_d$$

que, con las relaciones (17) se convierte en

$$\text{sen } (\delta_A + \delta_d) \approx \text{sen } \delta_A + \delta_d \cos \delta_A \quad (19)$$

se obtiene de (18) que

$$M_s \approx M_{\text{máx}} [(\text{sen } \delta_A + \delta_d \cos \delta_A) - \text{sen } \delta_A] = (M_{\text{máx}} \cos \delta_A) \delta_d \quad (20)$$

Se denomina par sincronizante específico K_s para el punto de equilibrio A a esta magnitud

$$K_s = M_{\text{máx}} \cos \delta_A = \frac{3 V E_0}{X_s \Omega_1} \cos \delta_A \quad (21)$$

K_s depende del punto de equilibrio A en el que se encuentre la máquina. A igualdad de valores de V , E_0 y X_s , el par sincronizante específico K_s es máximo en vacío ($\delta_A = 0$) y nulo en el límite de estabilidad estática ($\delta_A = 90^\circ$). Por lo tanto, cuanto mayor es K_s mayor es la estabilidad estática de la máquina y, consecuentemente, el valor de K_s en un punto de equilibrio A es una medida de la estabilidad estática de la máquina en dicho punto. Nótese, además, que el par sincronizante específico K_s es igual al valor en el punto A de la derivada del par sincronizante M_s con respecto al ángulo de par δ .

Por otra parte, el par sincronizante específico K_s es mayor cuanto menor es la reactancia síncrona X_s . Por esta razón, el entrehierro de las máquinas síncronas suele ser relativamente grande para así aumentar su estabilidad estática.

De (20) y (21) se deduce lo siguiente:

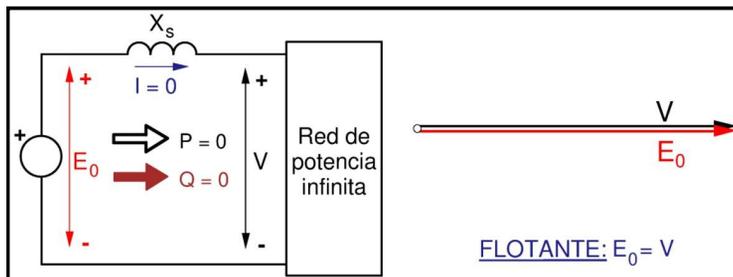
$$M_s = K_s \cdot \delta_d \quad (22)$$

La expresión (22) para el par sincronizante M_s es similar a la del par de un resorte en espiral. Cuando la máquina está en el punto de equilibrio A, el par sincronizante es cero. Pero cuando una perturbación la aparta de este punto de equilibrio, es como si se tensara un resorte que produjera el par M_s -tanto mayor cuanto mayor es el desvío δ_d respecto al punto de equilibrio- que tiende a volver al generador síncrono al punto A.

MÁQUINAS SÍNCRONAS EN RED DE POTENCIA INFINITA. MOTORES SÍNCRONOS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

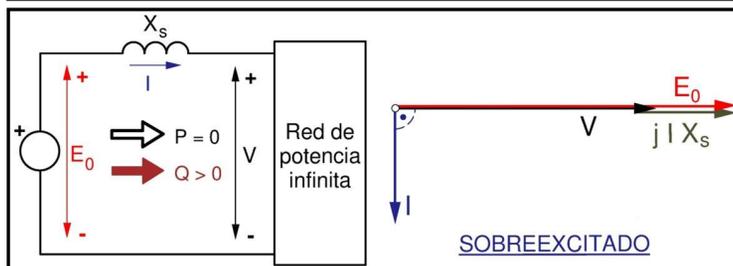
Compensador síncrono



Compensador síncrono:

$$P = 0 \rightarrow \delta = 0; Q = S$$

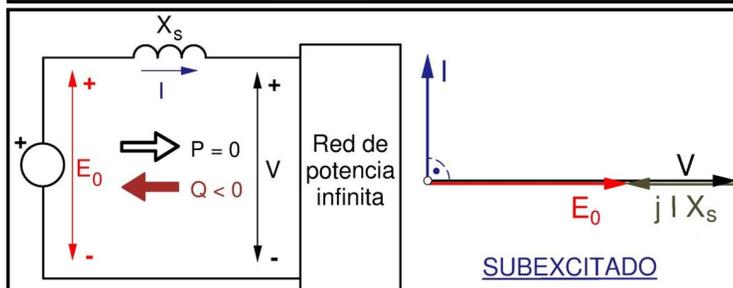
Modo flotante



Sobreexcitado

$Q > 0$; f.d.p. inductivo

(f.d.p. = Factor de potencia)



Subexcitado

$Q < 0$; f.d.p. capacitivo

(Convenio de signos generador)

$$\left(P = \frac{3 V E_0}{X_s} \sin \delta \right)$$

Compensador síncrono

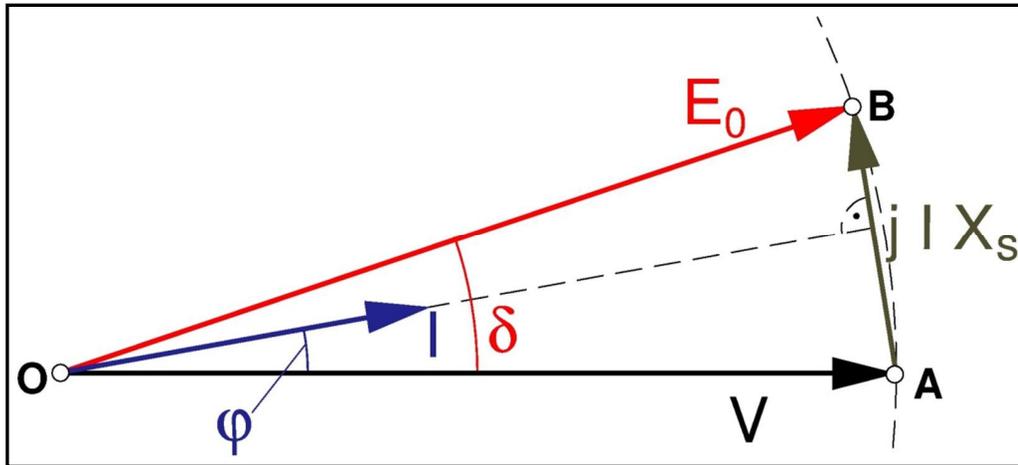
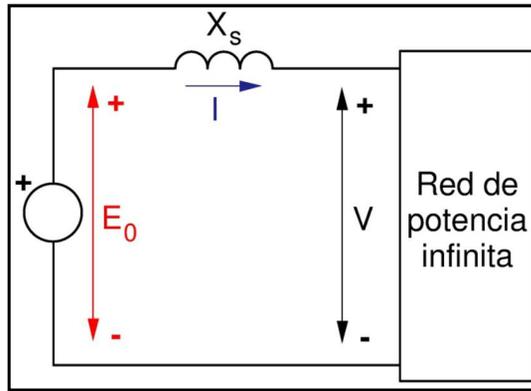
- Supóngase una máquina síncrona de rotor cilíndrico conectada a una red de potencia infinita y cuya resistencia de inducido es despreciable.
- Se supondrá que la máquina actúa como generador y, por ello, se usará el convenio de signos de generador.
- También se supondrá que las pérdidas en la máquina son despreciables. Luego, se aceptará que la potencia mecánica absorbida por el eje de la máquina es igual a la potencia activa suministrada a la red.
- Justo antes de conectar esta máquina a la red; es decir, durante la maniobra de sincronización, el alternador está en vacío. Por lo tanto su f.e.m. de vacío E_0 es igual a su tensión en bornes V .
- En consecuencia, justo después de terminar la maniobra de sincronización la f.e.m. E_0 es igual, tanto en módulo como en ángulo, a la tensión V en bornes del inducido que le impone la red de potencia infinita. Se dice entonces que la máquina trabaja en **modo flotante** y sucede que:

$$E_0 = V \quad I = 0 \quad P = 0 \quad Q = 0$$

- Si ahora se sigue manteniendo nula la potencia en el eje sucederá que la potencia activa P sigue siendo nula (se desprecian las pérdidas) y, por lo tanto, el ángulo de par es nulo: $\delta = 0$ (ya que $P = (3VE_0/X_s) \sin \delta$).
- Si manteniendo nula la potencia P (y por lo tanto, también el ángulo de par δ es nulo) se modifica la corriente de excitación I_e , ocurre que la potencia reactiva Q se puede regular mediante I_e (ver la figura anterior):
 - Cuando aumenta la corriente de excitación I_e –es decir, cuando la máquina está **sobreexcitada**– la f.e.m. de vacío tiene un valor eficaz mayor que la tensión en bornes ($E_0 > V$) y la corriente del inducido I forma un ángulo de 90° en retraso con la tensión V . Esto hace que se mantenga $P = 0$ y se genere potencia reactiva ($Q > 0$). Luego, la máquina (con convenio generador) tiene un f.d.p. inductivo.
 - Cuando disminuye la corriente de excitación I_e –es decir, cuando la máquina está **subexcitada**– la f.e.m. de vacío tiene un valor eficaz menor que la tensión en bornes ($E_0 < V$) y la corriente del inducido I forma un ángulo de 90° en adelante con la tensión V . Esto hace que se mantenga $P = 0$ y se consume potencia reactiva ($Q < 0$). Luego, la máquina (con convenio generador) tiene un f.d.p. capacitivo.
- Un **compensador síncrono** es una máquina síncrona que funciona siempre con potencia activa nula ($P = 0$) y que sirve para proporcionar (o absorber) la potencia reactiva que se desee hasta un valor igual a su potencia asignada S_N . En efecto, como $P = 0$ sucede que $Q = S$.

Hace años estas máquinas eran usadas para mejorar el f.d.p. de la red.

Variación de la potencia con I_e constante

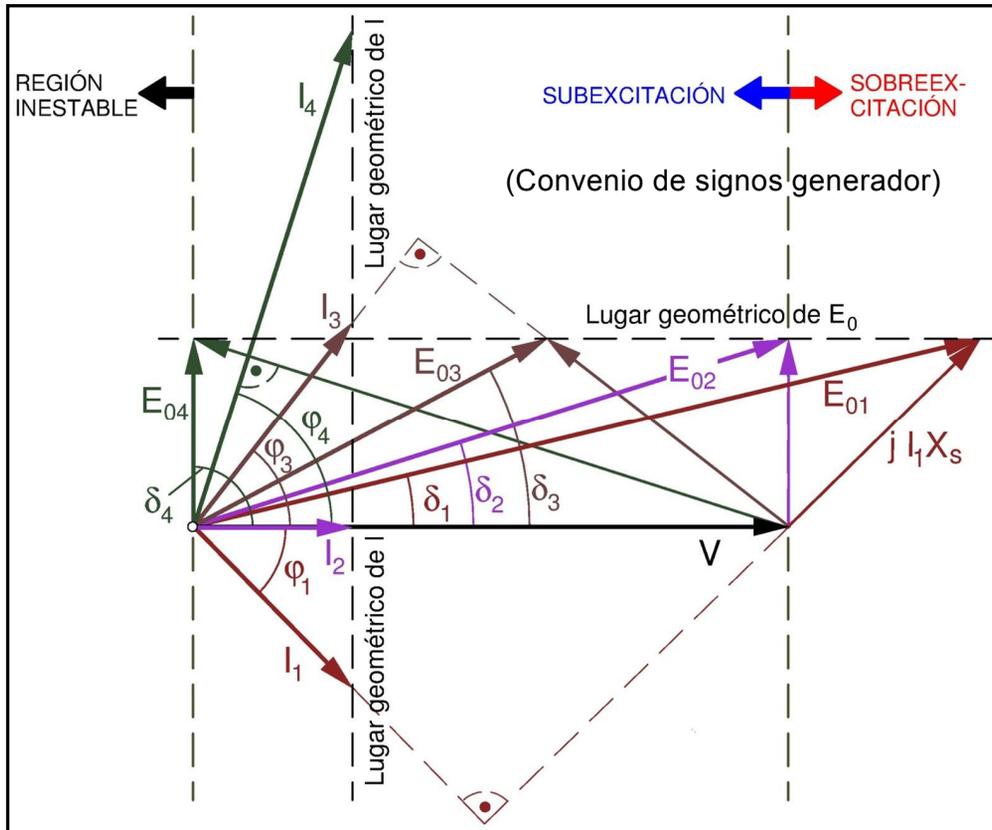


- Ahora se supone que a un alternador síncrono, que estaba en *modo flotante* (y por lo tanto, su f.e.m. de vacío E_0 y la tensión V tienen iguales valores eficaces), se le empieza a suministrar potencia mecánica por su eje manteniendo constante su corriente de excitación I_e .
- Al mantener constante su corriente de excitación I_e , el valor eficaz de E_0 no varía y sigue siendo igual al de la tensión V . Por lo tanto, el nuevo fasor de E_0 tendrá su extremo sobre la circunferencia de centro O y radio V .
- Si la máquina recibe potencia mecánica empieza a suministrar una potencia activa P , que se puede calcular así:

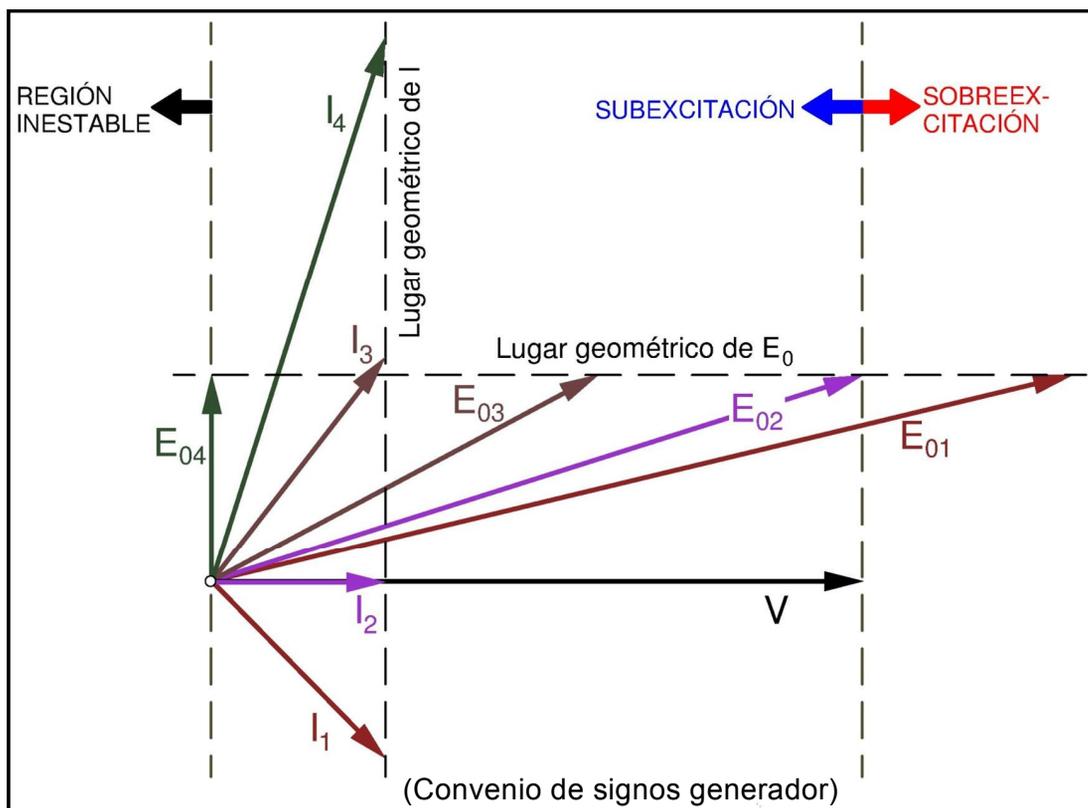
$$P = \frac{3 V E_0}{X_s} \text{sen } \delta$$

- Luego, ahora el ángulo de par δ deja tener un valor nulo y toma el valor que se obtiene al despejarlo de la expresión anterior.
- La tener E_0 y V la misma longitud y formar entre sí un ángulo δ no nulo, la proyección de E_0 sobre V es más pequeña que V ($E_0 \cos \delta < V$) y la máquina está subexcitada. Luego consume potencia reactiva ($Q < 0$) y el factor de potencia es capacitivo.

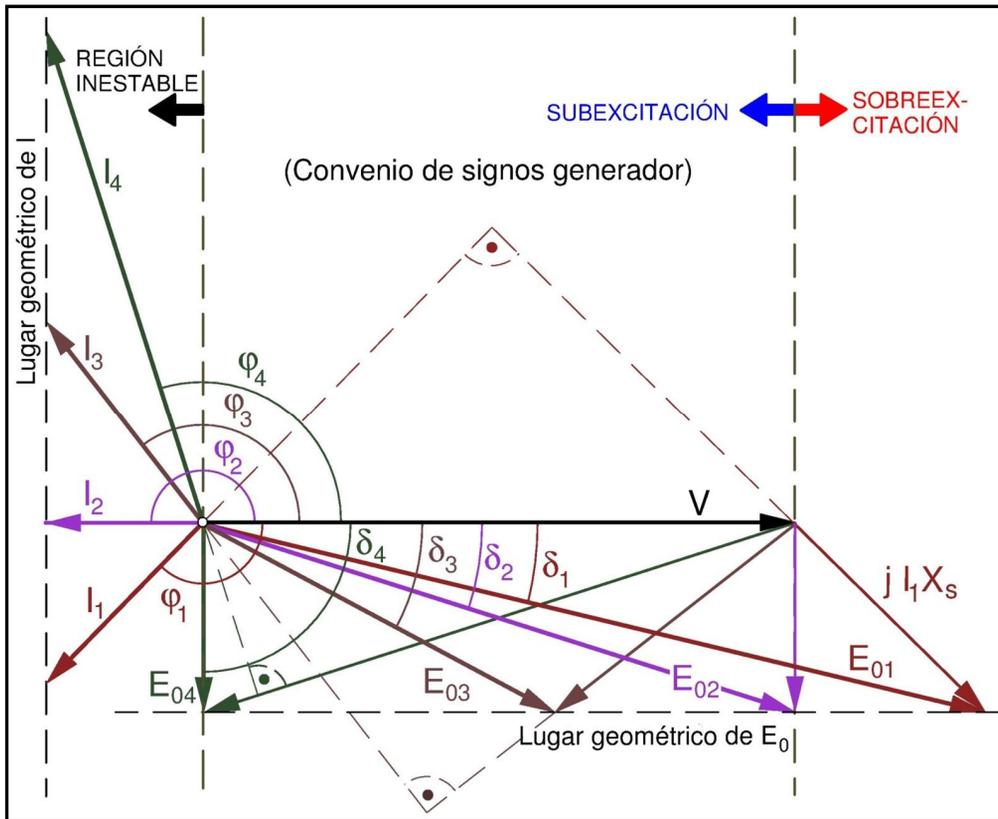
Variación de I_e con potencia constante. Funcionamiento como generador (1)



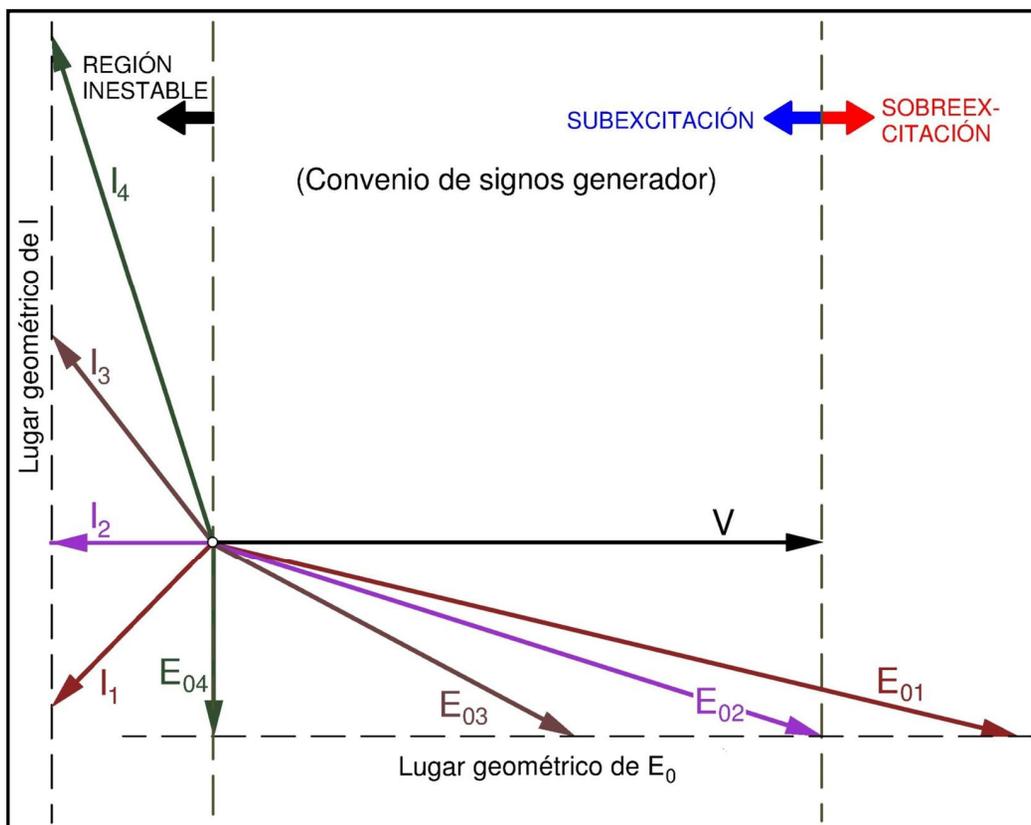
Variación de I_e con potencia constante. Funcionamiento como generador (2)



Variación de I_e con potencia constante. Funcionamiento como motor (1)

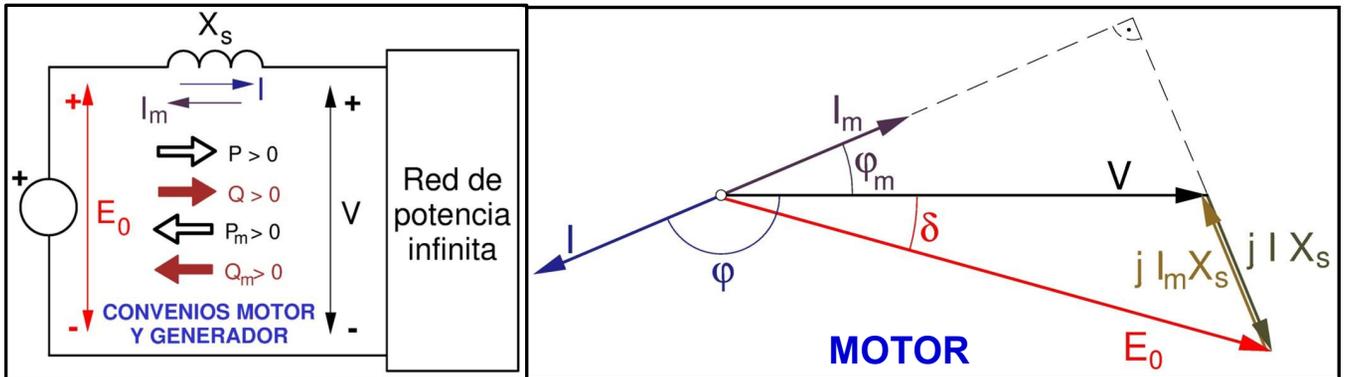
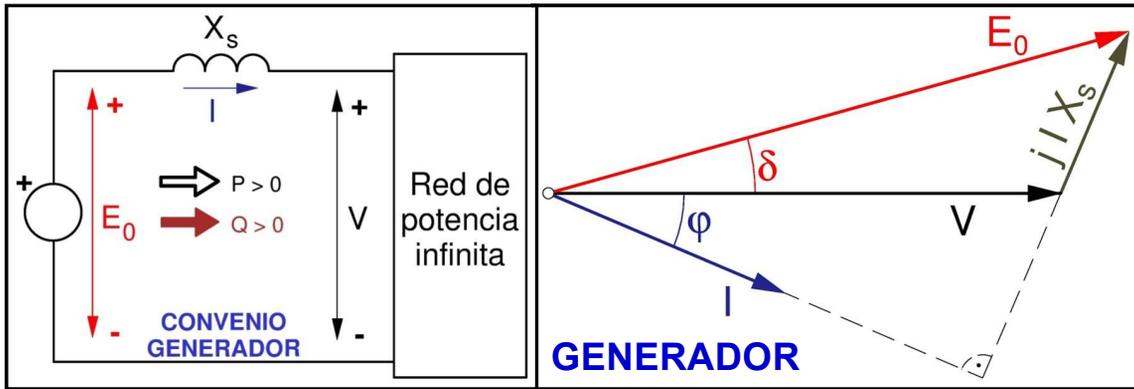


Variación de I_e con potencia constante. Funcionamiento como motor (2)

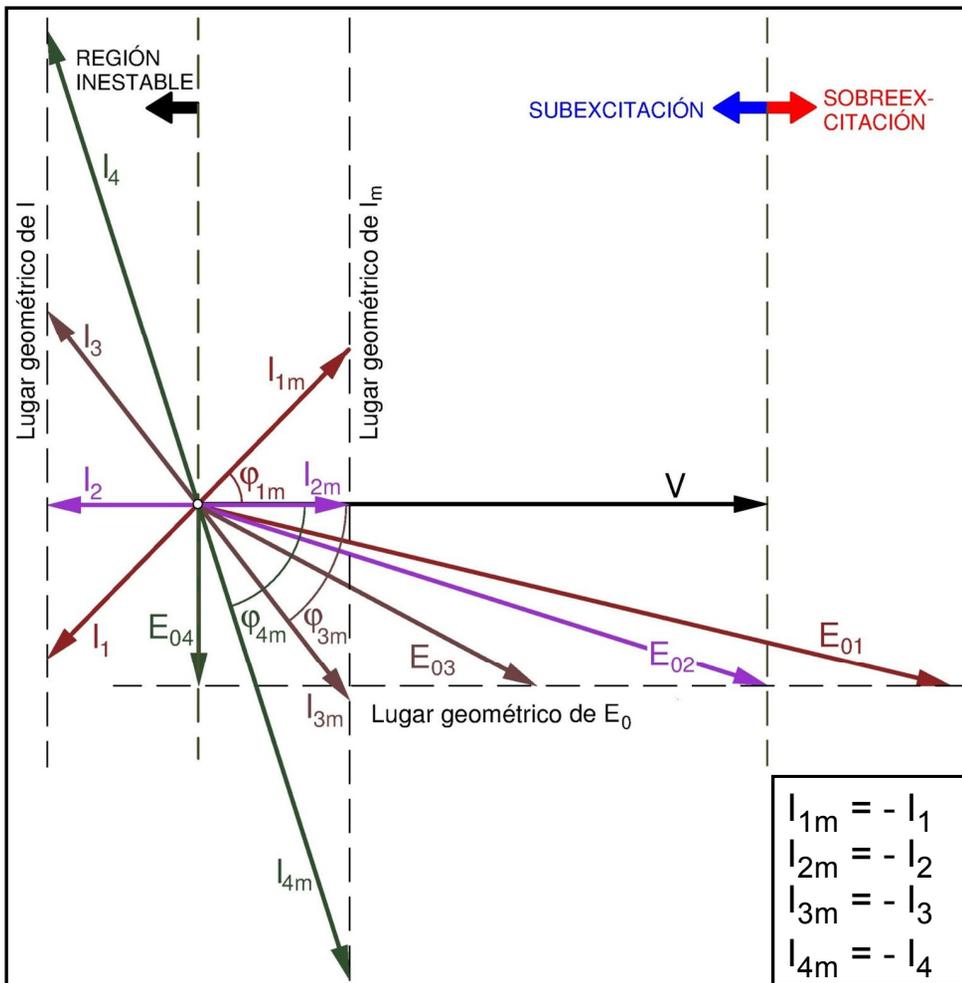


- En las diapositivas anteriores se muestran dos parejas de figuras con los diagramas fasoriales cuando la máquina varía su excitación I_e manteniendo constante la potencia en el eje. Una pareja de figuras representa lo que pasa cuando la máquina actúa como generador y la otra pareja cuando actúa de motor. La segunda figura de cada pareja es una versión simplificada de la primera. En todas las figuras se ha empleado el convenio de signos de generador (incluso para el motor).
- De las figuras anteriores se deduce que, tanto en funcionamiento generador como motor y de manera similar al funcionamiento como compensador síncrono, la corriente de excitación I_e permite regular la potencia reactiva Q de la máquina:
 - Cuando se aumenta la corriente de excitación I_e de tal forma que la proyección del fasor E_0 sobre V es mayor que V ($E_0 \cos \delta > V$) la máquina está **sobreexcitada**. Entonces, se genera potencia reactiva ($Q > 0$) y la máquina (con convenio generador) tiene un f.d.p. inductivo.
 - Cuando se disminuye la corriente de excitación I_e de tal forma que la proyección del fasor E_0 sobre V es menor que V ($E_0 \cos \delta < V$) la máquina está **subexcitada**. Entonces, se consume potencia reactiva ($Q < 0$) y la máquina (con convenio generador) tiene un f.d.p. capacitivo.
- Actuando tanto como motor como generador, cuando la corriente de excitación I_e se reduce mucho, la f.e.m. E_0 se hace tan pequeña que ni siquiera con $\delta = 90^\circ$ ($\sin \delta = 1$) la máquina puede producir una potencia activa igual a la potencia mecánica en su eje. La máquina pierde entonces la estabilidad. Por esta razón en los diagramas anteriores hay una **región inestable** a la izquierda. El fasor de f.e.m. E_0 no puede estar en esta región.
- Con funcionamiento como motor y convenio de signos generador la potencia activa es negativa ($P < 0$), pues se trata de una potencia consumida. Esto hace que $\cos \varphi$ deba ser negativo, por lo que los ángulos de desfase φ son mayores de 90° . Ahora, al ser motor, el fasor E_0 está retrasado respecto al V .
- En las diapositivas siguientes se muestran los convenios de signos de generador y de motor y cómo queda el diagrama fasorial del motor cuando se usan ambos convenios de signos, lo que permite compararlos.
- Se observa que en un motor con convenio motor los ángulos de desfase φ_m son menores que 90° , son inductivos cuando se consume potencia reactiva ($Q_m > 0$) y son capacitivos cuando se genera potencia reactiva ($Q_m < 0$).
- Evidentemente, es preferible que cuando la máquina actúe como motor se use el convenio de signos de motor.
- Aunque el análisis de la máquina síncrona en red de potencia infinita se ha realizado sobre máquinas de rotor cilíndrico, los resultados obtenidos también son aplicables a las máquinas síncronas de polos salientes.

Generador y motor. Convenios de signos

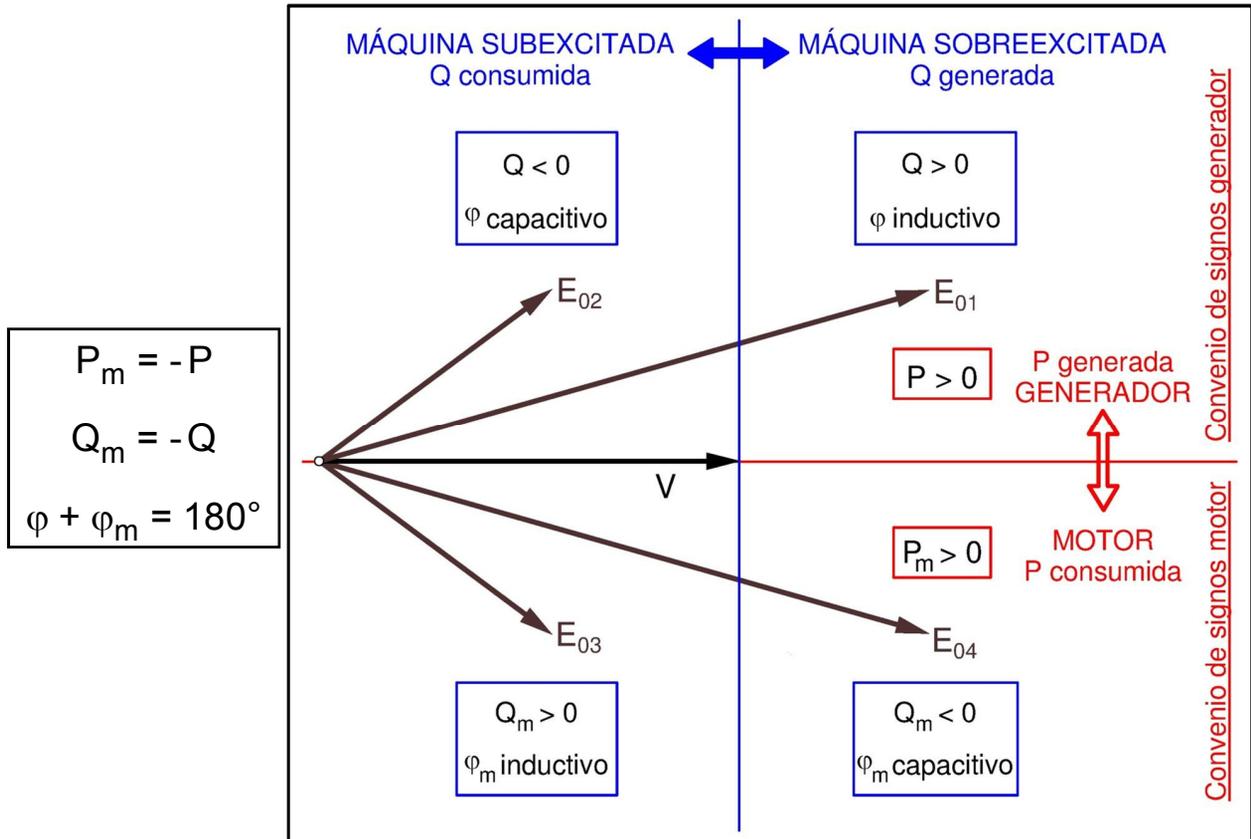


$$I_m = -I \quad P_m = -P \quad Q_m = -Q \quad \varphi + \varphi_m = 180^\circ$$



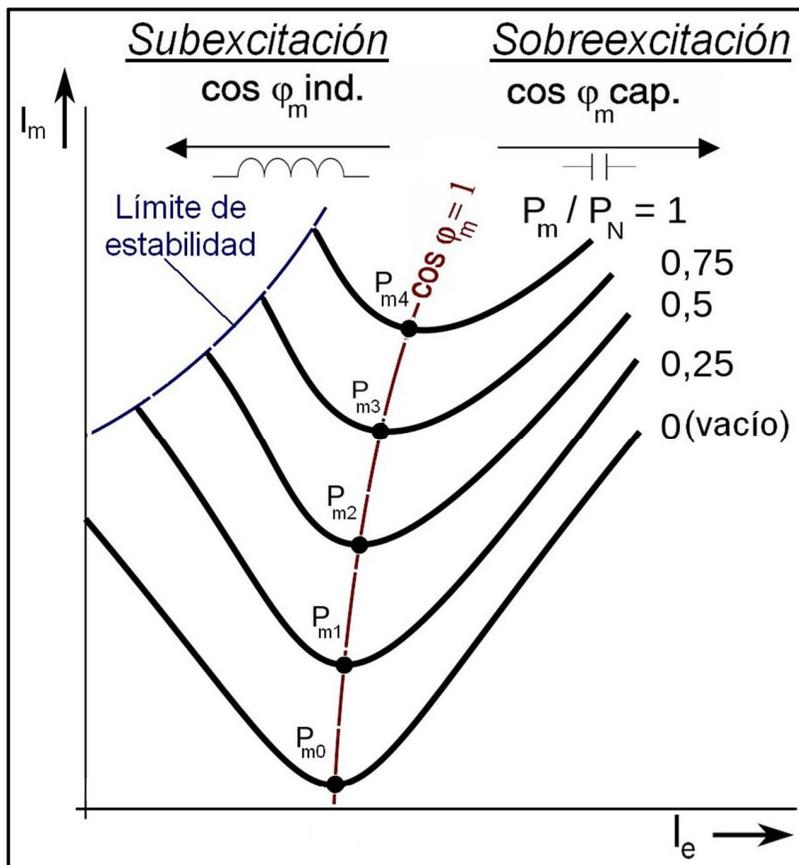
Variación de I_e con potencia constante. Funcionamiento como motor. Convenios de signos generador y motor

Resumen de máquina síncrona en red de potencia infinita



Signos de las potencias activa y reactiva y del factor de potencia en función del módulo del fasor E_0 y de su desfase respecto al fasor V

Curvas de Mordey de un motor síncrono



Curvas en V de Mordey

- Motor síncrono conectado a una red de potencia infinita.
- Estas curvas relacionan la corriente del inducido con la del inductor cuando se mantiene constante la potencia mecánica suministrada por el motor síncrono.
- Cada curva corresponde a una potencia mecánica diferente.

Fuente. Wikimedia Commons
 Autor: Wdwd
 Figura modificada del original

Par de arranque nulo de un motor síncrono

- Consideremos un motor síncrono en reposo al que se alimenta con tensión continua a su devanado inductor, situado en el rotor, y con tensión alterna trifásica al devanado inducido, situado en el estator.
- El campo magnético inductor está fijo al rotor y girará a la misma velocidad que gire el rotor. El campo del inducido es un campo giratorio que gira a la velocidad de sincronismo (Teorema de Ferraris).
- Supóngase que inicialmente un polo norte del rotor está enfrenteado a un polo sur del campo giratorio del estator. Ambos polos se atraen y el rotor quiere empezar a girar a la velocidad de sincronismo. Pero el rotor tiene una inercia mecánica que impide que pueda variar su velocidad de forma brusca.

- Cuando el rotor quiere empezar a moverse el campo giratorio ha avanzado un paso polar y ahora el polo norte del rotor se encuentra frente a un polo norte del campo giratorio del estator y ambos se repelen. El rotor quiere empezar a girar en sentido opuesto a la velocidad síncrona; pero antes de que su inercia le permita empezar a moverse el polo norte del rotor vuelve a estar enfrenteado a un polo sur del estator.
- Ahora el rotor quiere volver a girar en el mismo sentido que la velocidad de sincronismo, pero antes de pueda moverse el campo giratorio avanza otro paso polar. Y así sucesivamente.
- Se observa que la máquina no consigue moverse; no se produce el arranque. Un motor síncrono tiene un par de arranque nulo.
- Sólo cuando la velocidad de sincronismo sea extraordinariamente pequeña el rotor puede seguir al campo giratorio, autosincronizarse (ver la siguiente diapositiva) y empezar a girar a esta pequeña velocidad síncrona.

Motor síncrono. Métodos de arranque

- Un motor síncrono no tiene par de arranque. Luego, no puede arrancar por sí mismo y necesita algún método de arranque que lo lleve a la velocidad de sincronismo o a una velocidad muy cercana a la de sincronismo.
En este último caso, una vez que la máquina ya casi gira a la velocidad síncrona se excita su inductor, lo que da lugar al par electromagnético (más el par de reluctancia, si la máquina es de polos salientes) que consigue que alcance la velocidad de sincronismo. Este proceso se denomina **autosincronización**.
- Los **métodos de arranque** más empleados son:
 - 1) **Arranque mediante un variador de frecuencias**
 - 2) **Arranque por motor auxiliar (motor pony)**.
 - 3) **Arranque como motor asíncrono**.
- En el segundo método, para reducir el tamaño del motor auxiliar, el arranque se realiza con el motor síncrono en vacío. La carga mecánica se acopla al eje del motor síncrono cuando éste ya ha alcanzado la velocidad de sincronismo.

Arranque mediante un variador de frecuencias

- Este método de arranque se emplea cuando se utiliza el variador para regular la velocidad. No tiene justificación económica el usar un variador de frecuencias sólo para el arranque.
- Se arranca el motor con una frecuencia muy baja, a la que corresponde una velocidad síncrona lo suficientemente pequeña como para que el rotor –a pesar de su inercia mecánica– sea capaz de empezar a girar a dicha velocidad.
- Luego se aumenta progresivamente la frecuencia, y con ella la velocidad síncrona, de forma que el rotor sea capaz de seguir este aumento gradual de la velocidad hasta alcanzar la velocidad normal de funcionamiento y completar así el proceso de arranque.

Arranque mediante un motor auxiliar

- **Arranque mediante un motor auxiliar de corriente continua**

Se pueden usar dos tipos de máquinas de c.c. como motor de arranque:

- Motor independiente de corriente continua
- Usar la excitatriz de c.c como motor durante el arranque

- **Arranque mediante un motor auxiliar asíncrono**

Se pueden usar dos tipos de máquinas asíncronas:

- Motor de arranque del mismo número de polos que el motor síncrono

Los motores síncrono y de arranque tienen la misma velocidad síncrona. El motor de arranque no alcanza la velocidad de sincronismo, pero sí una lo suficientemente cercana a ella como para que se produzca la autosincronización del motor síncrono.

- Motor de arranque con un par de polos menos que el motor síncrono

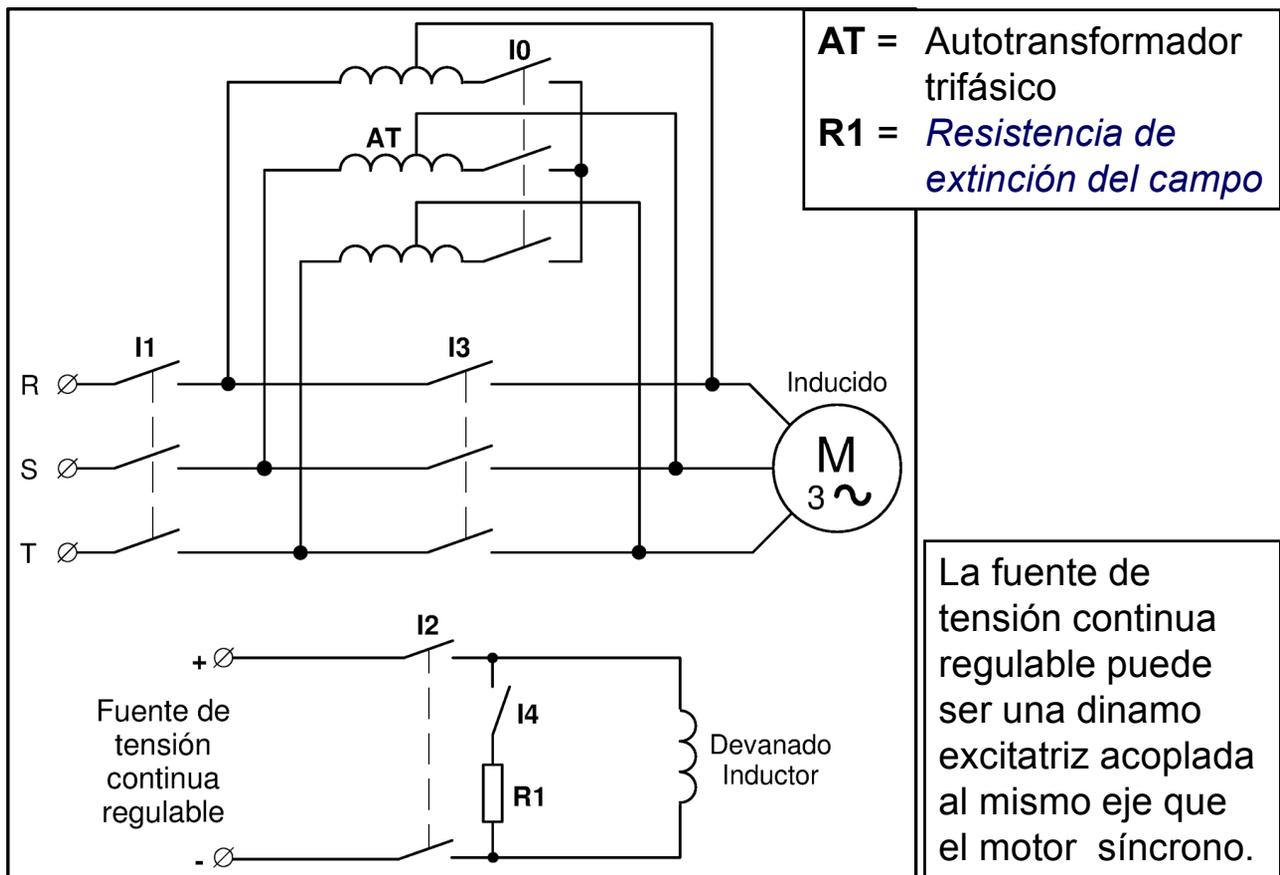
El motor de arranque tiene una velocidad de sincronismo superior a la del motor síncrono. Se puede regular su velocidad para que iguale a la síncrona del motor síncrono o llevarle a una velocidad superior, desconectarle -con lo que la velocidad empieza a bajar- y conectar el motor síncrono en el momento en el que la velocidad iguale a su velocidad síncrona.

Arranque como asíncrono

- El motor síncrono arranca como motor asíncrono gracias a las corrientes que se inducen en el devanado amortiguador y en las masas macizas del rotor cuando la velocidad de la máquina todavía no es igual a la síncrona.
- Mediante este método la máquina alcanza una velocidad algo inferior a la síncrona, pero muy cercana a ella. En este momento se alimenta el inductor con corriente continua y se produce la autosincronización de la máquina.
- Para reducir la corriente de arranque se usan los mismos métodos que en las máquinas asíncronas: estrella-triángulo, autotransformador, ...
- Mientras la máquina está girando a una velocidad diferente a la de sincronismo su rotor se ve sometido a la acción de un campo magnético variable con el tiempo que induce una f.e.m. elevada en el devanado inductor. No conviene que este devanado permanezca en circuito abierto, porque esta f.e.m. podría dañar sus aislamientos o los del colector. Tampoco conviene ponerlo en cortocircuito porque circularía una corriente alterna elevada.

Por esta razón, durante el arranque el devanado inductor se conecta a la **resistencia de extinción del campo**, cuyo valor óhmico es igual a unas 10 veces la resistencia del devanado inductor.

Arranque de un motor síncrono como asíncrono con autotransformador



- 1) Teniendo previamente cerrados los interruptores **I0** e **I4** y abiertos los interruptores **I2** e **I3**, se cierra el interruptor **I1**. La máquina arranca como asíncrona a la tensión reducida que le proporciona el autotransformador trifásico **AT** y con el inductor conectado a la resistencia de extinción del campo **R1**.
- 2) Se abre el interruptor **I0**. El autotransformador **AT** deja de funcionar como tal y ahora se convierte en unas reactancias puestas en serie con cada fase del inducido. Las caídas de tensión en estas reactancias dan lugar a que el motor tenga mayor tensión que antes, pero aún está a una tensión inferior a la de la red.
- 3) Se cierra el interruptor **I3** (dejando abierto a **I0**). La máquina recibe la totalidad de la tensión de la red y acaba su arranque como asíncrono, alcanzando una velocidad cercana a la de sincronismo.
- 4) Se cierra el interruptor **I2**, con lo que el inductor queda alimentado con una tensión continua y la máquina empieza a funcionar como síncrona. El motor se autosincroniza y consigue alcanzar la velocidad síncrona.
- 5) Con el interruptor **I2** cerrado y la máquina ya a la velocidad síncrona, se desconecta la resistencia de extinción del campo **R1** abriendo el interruptor **I4**. Con esta maniobra termina el arranque del motor síncrono.

Motor síncrono versus motor asíncrono

- El motor síncrono tiene una velocidad estrictamente constante, mientras que el asíncrono tiene una velocidad ligeramente variable con la carga (pues su par varía con el deslizamiento).
- El motor síncrono es menos sensible a las variaciones en la tensión de alimentación porque su par es proporcional al valor eficaz de la tensión (V), mientras que el asíncrono tiene un par proporcional al cuadrado de la tensión (V^2).
- El motor síncrono tiene un f.d.p. regulable. Se puede usar como motor y, a la vez, para mejorar el f.d.p. de una instalación.
- La máquina síncrona tiene mayor entrehierro que la asíncrona, lo que le da una mayor seguridad mecánica para evitar el roce del rotor con el estator.
- El motor síncrono, además de ser más caro que el de motor de jaula de ardilla, requiere una fuente de tensión continua y los reguladores correspondientes. Por esta razón el motor síncrono es más caro que el asíncrono.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

MÁQUINAS SÍNCRONAS CONECTADAS EN PARALELO

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Regulador de velocidad (*governor*)

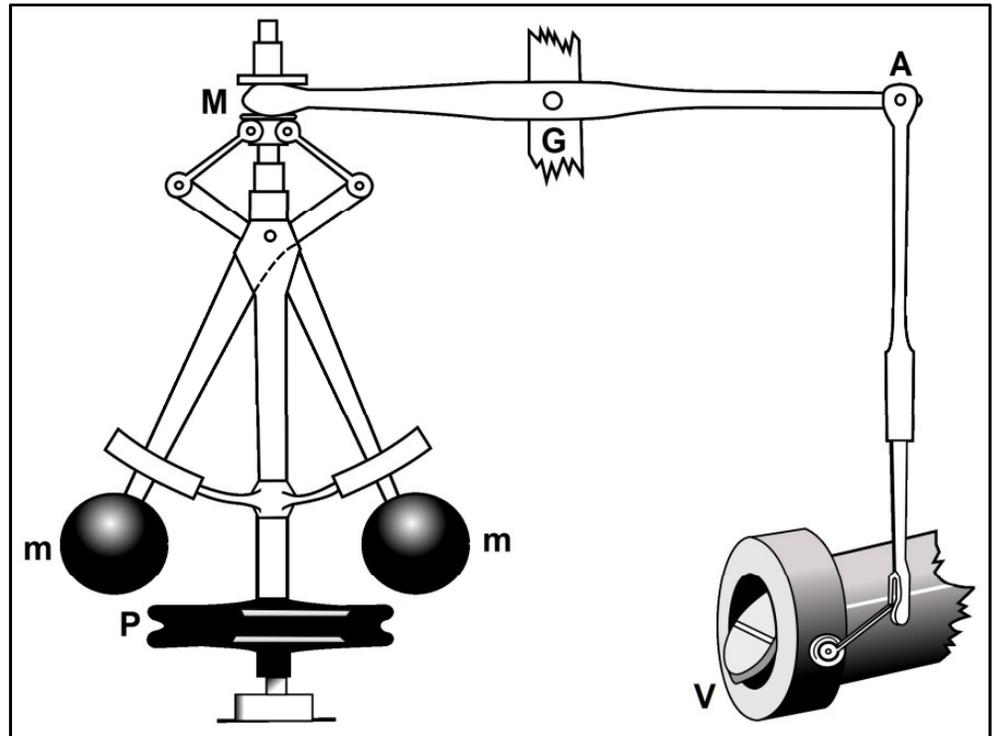
- El motor (turbina de gas, de vapor, hidráulica, motor Diesel, etc.) que acciona al alternador síncrono debe disponer de un regulador de velocidad que modifique la potencia suministrada por el motor para adaptarla a la que le demanda el alternador en función de la carga eléctrica conectada a sus bornes.
- Cuando se produce un aumento de la carga eléctrica, inicialmente el motor de accionamiento sigue proporcionando la misma potencia que estaba dando previamente (que ahora es inferior a la que le pide el alternador). Esto provoca que la velocidad empiece a disminuir, lo cual es detectado por el regulador de velocidad que aumenta la potencia del motor con lo que se vuelve a alcanzar el equilibrio entre las potencias suministrada por el motor y demandada por el alternador. Entonces la velocidad deja de variar y se estabiliza en un valor constante.
- A la inversa, cuando la carga eléctrica disminuye el sistema se acelera y aumenta su velocidad. El regulador de velocidad reacciona entonces reduciendo la potencia del motor de accionamiento y volviendo a equilibrar las potencias suministrada y demandada, lo que hace que la velocidad vuelva a estabilizarse en un valor constante.

Regulador centrífugo de Watt



*(Fuente: Wikimedia Commons.
Foto tomada en el "Science
Museum" de Londres por
Mirko Junge)*

Regulador centrífugo de Watt



(Fuente: Wikimedia Commons. Autor: M de Vicente)

(Fuente: Wikimedia Commons. Autor: Andy Dingley)

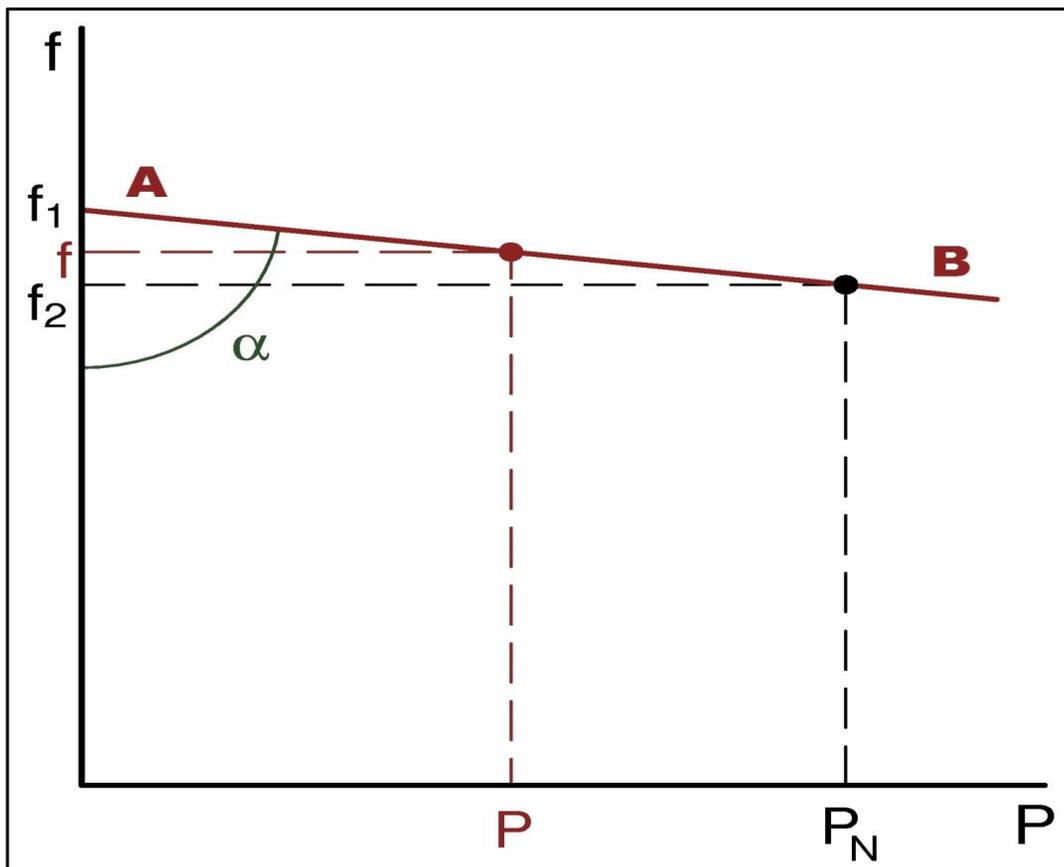
Regulador de Watt

- Uno de los reguladores de velocidad más conocidos es el **regulador de Watt**. En las figuras anteriores se muestran dos variantes de este regulador.
- En el regulador de Watt hay un cuadrilátero articulado con dos masas m que está girando a la misma velocidad que el sistema motor-alternador.
- La válvula V es la que suministra combustible, vapor, agua, etc. (según sea el caso) al motor de accionamiento y, por lo tanto, sirve para controlar la potencia de dicho motor.
- La fuerza centrífuga separa las dos masas m . Si la velocidad aumenta, las masas m se separan más, el punto M baja y mueve a la barra $M-A$, la cuál acciona la válvula V para que reduzca su paso. Esto disminuye la potencia suministrada por el motor.
- Si la velocidad se reduce las dos masas m se acercan y el extremo M sube y la barra $M-A$ hace que la válvula V aumente su paso. Esto incrementa la potencia suministrada por el motor.

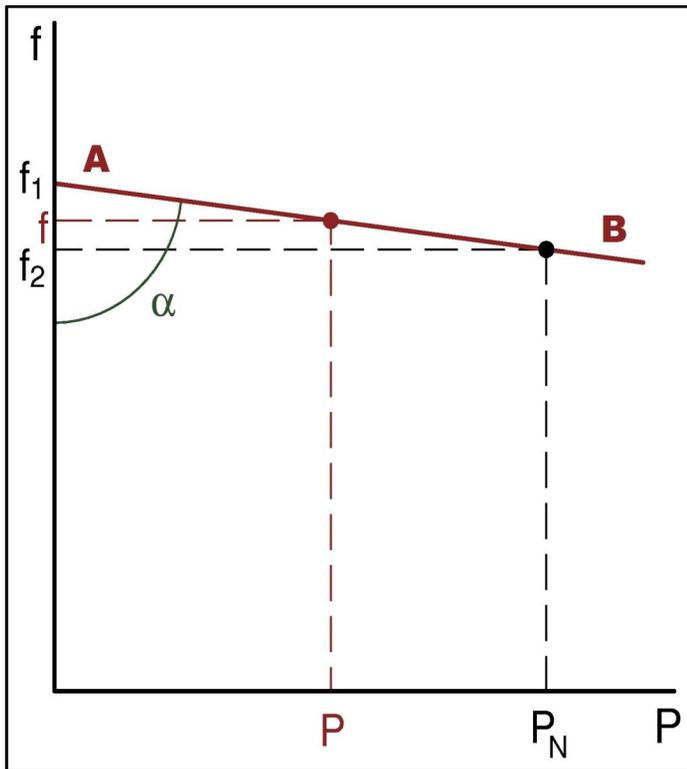
Curva de estatismo

- El comportamiento de un regulador de velocidad se puede representar mediante una gráfica que exprese la velocidad en función de la potencia en el eje.
- Para el análisis de máquinas síncronas interesa representar el comportamiento del regulador utilizando magnitudes eléctricas. En lugar de la velocidad se usa una magnitud que es proporcional a ella: la frecuencia f . En lugar de la potencia mecánica en el eje se utiliza la potencia activa suministrada P ya que son proporcionales y prácticamente tienen el mismo valor, pues la máquina síncrona tiene un rendimiento muy alto.
- Así pues, la **curva de estatismo** muestra el comportamiento de un regulador de velocidad indicando como varía la frecuencia en función de la potencia activa.
- La curva de estatismo es prácticamente lineal.

Curva de estatismo



Curva de estatismo de un regulador



Frecuencia asignada: $f_N = \frac{f_1 + f_2}{2}$

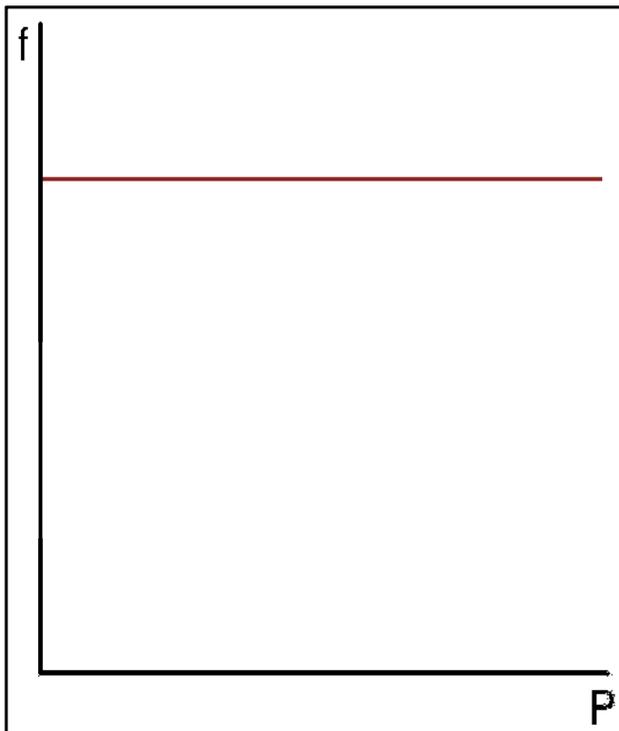
Estatismo: $\delta_r = \frac{f_1 - f_2}{f_N} = 2 \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}$

Constante del regulador o potencia regulante:

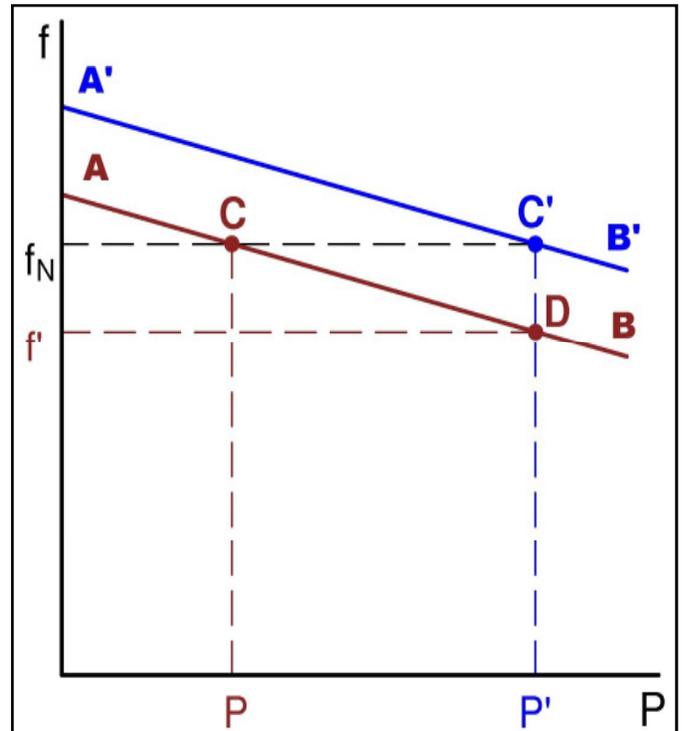
$$K = \operatorname{tg} \alpha = \frac{P_N}{f_1 - f_2} = \frac{P_N}{\delta_r f_N}$$

$$f = f_1 - \frac{1}{K} P$$

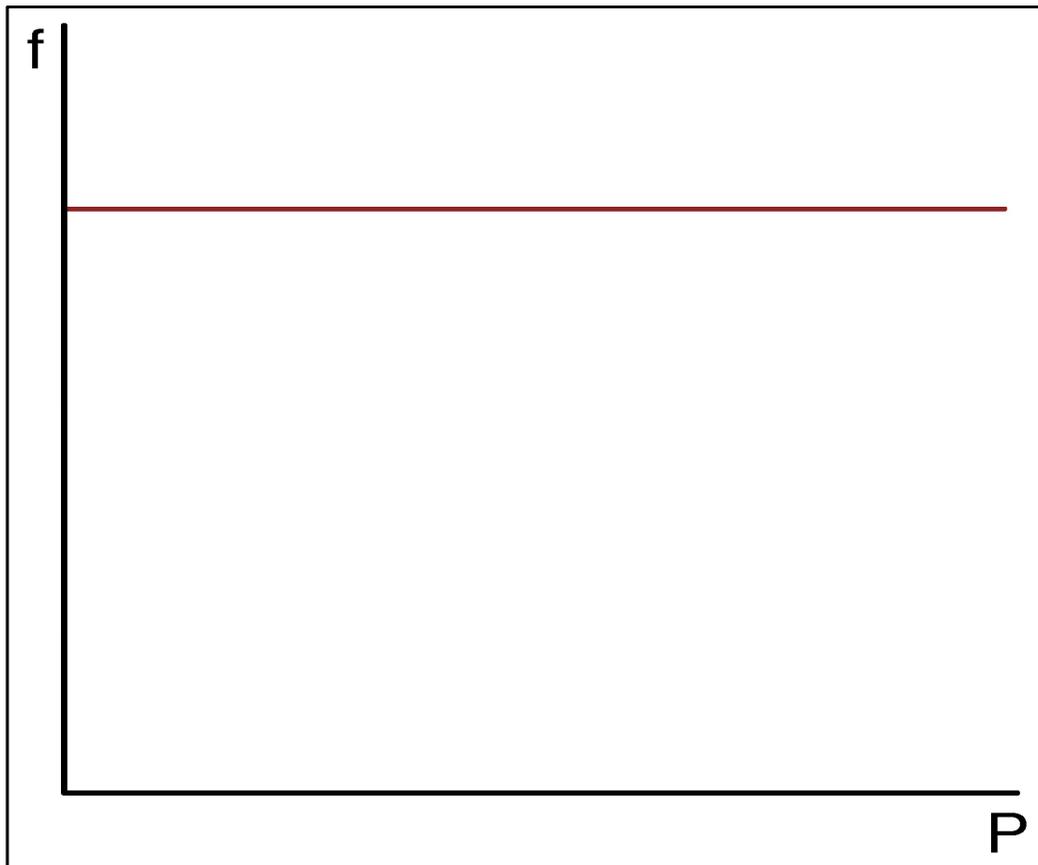
Regulador astático



Regulación secundaria



Regulador astático



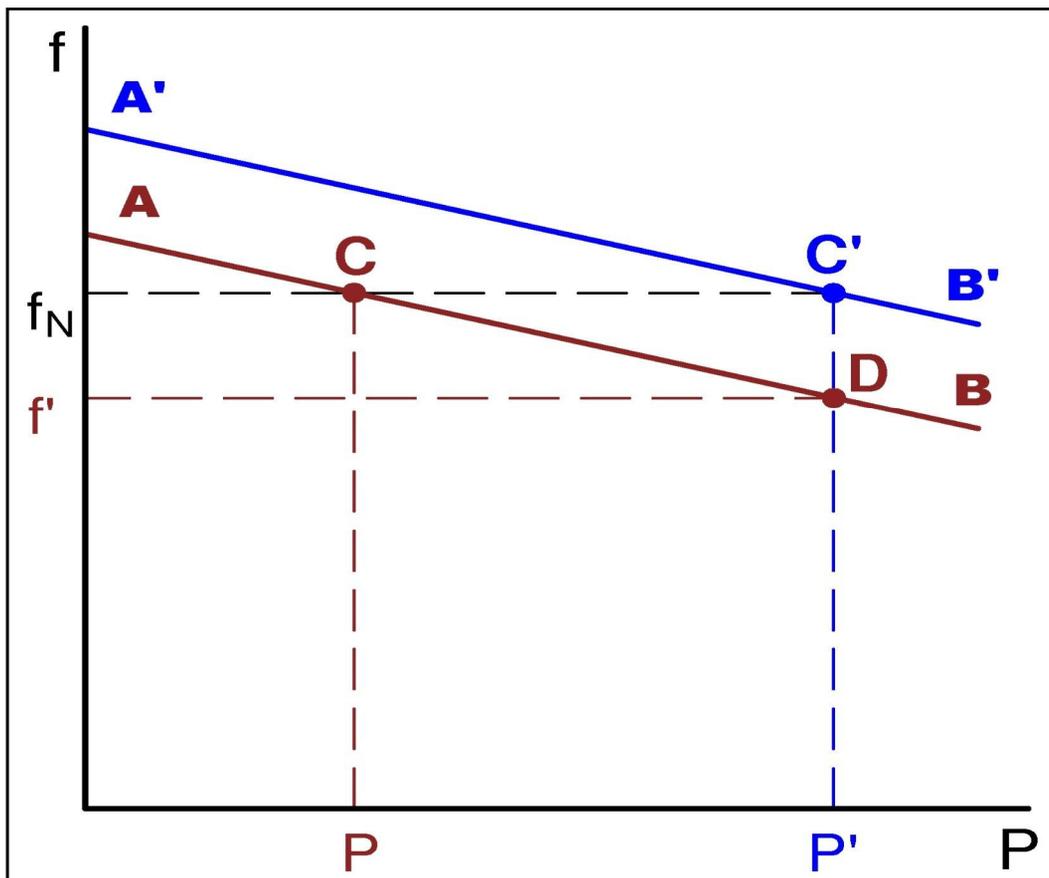
Regulador astático

- Cuando la máquina síncrona funciona como alternador aislado interesa que proporcione una tensión con siempre la misma frecuencia; es decir, interesa mantener la velocidad constante.
- Parece, pues, que en funcionamiento aislado interesa utilizar un regulador de velocidad **astático**; esto es, un regulador cuya curva de estatismo es horizontal.
- Sin embargo, como se estudiará más adelante, un regulador astático no permite un funcionamiento correcto de la máquina síncrona cuando funciona en paralelo con otros alternadores. Por eso se utilizan reguladores con algo de estatismo (usualmente $\delta_r < 4\%$).

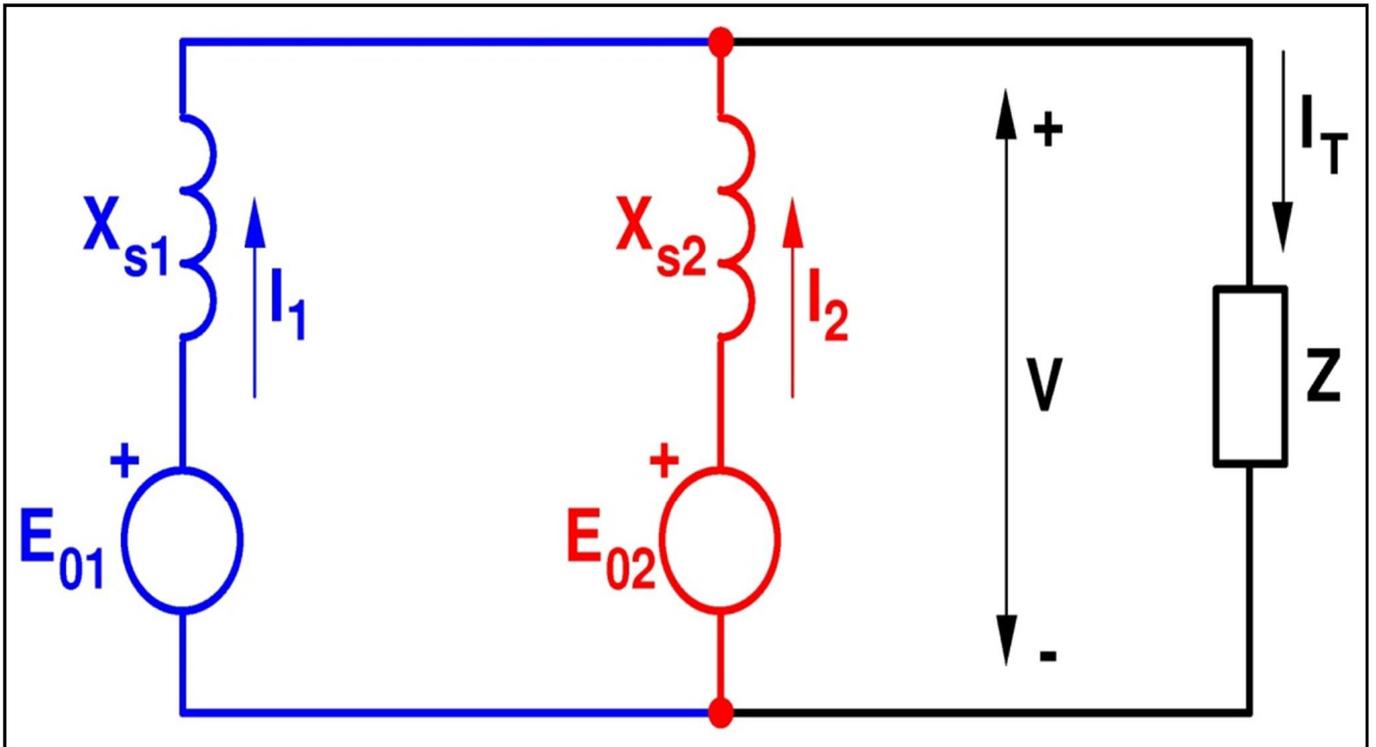
Regulación secundaria

- Para un correcto funcionamiento de un alternador aislado con un regulador con estatismo se introduce una **regulación secundaria** que permite desplazar verticalmente la curva de estatismo y así mantener la frecuencia constante.
- Por ejemplo, inicialmente el regulador funciona con la curva **AB** y el sistema está en el punto **C** dando la potencia P a la frecuencia asignada f_N . Si la potencia aumenta a P' , la regulación primaria llevará al sistema al punto **D** con la frecuencia f' . Ahora interviene la regulación secundaria que desplaza paralelamente la curva de estatismo y esta pasa a ser la curva **A'B'**. El sistema termina en el punto **C'** suministrando la potencia P' a la frecuencia asignada f_N .

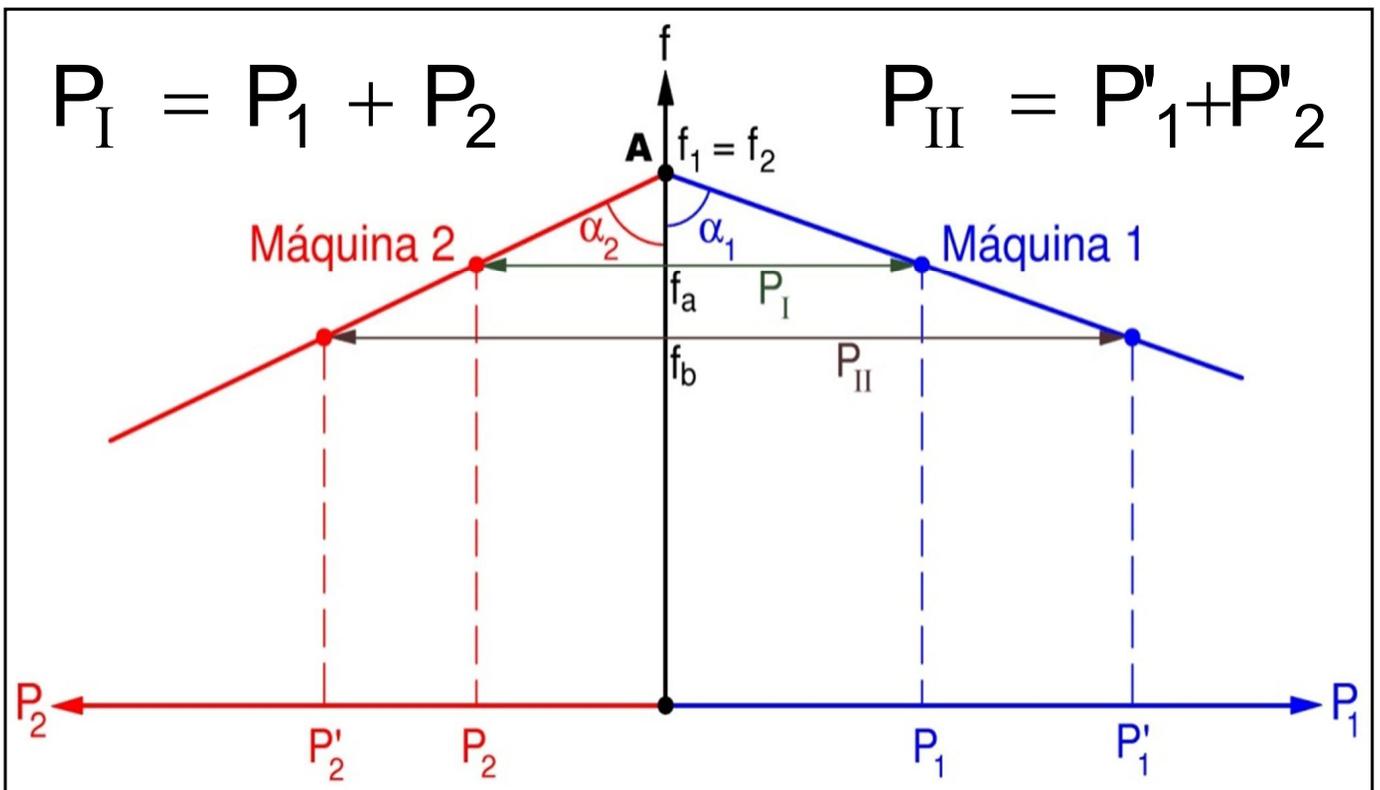
Regulación secundaria



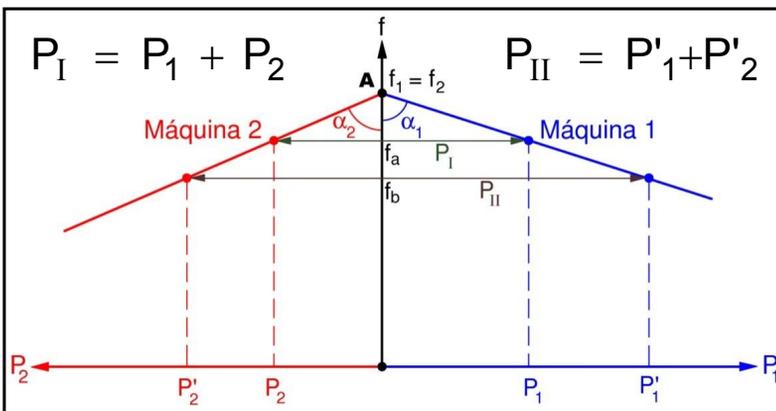
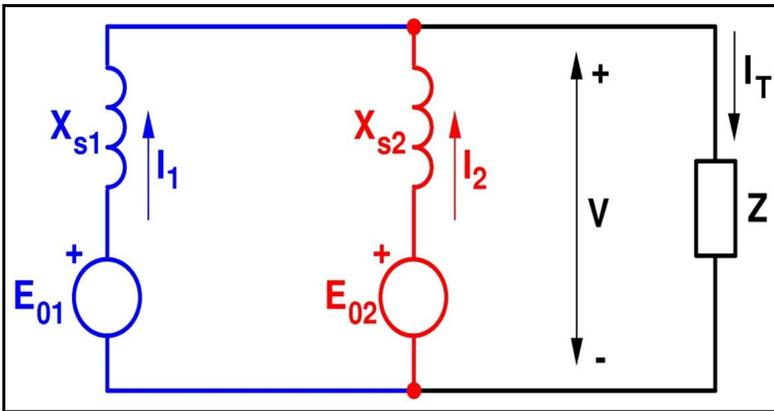
Alternadores en paralelo



Dos alternadores en paralelo de potencias similares. Curvas de estatismo.



Dos alternadores en paralelo de potencias similares



$$f_a = f_1 - \frac{1}{K_1} P_1 = f_2 - \frac{1}{K_2} P_2$$

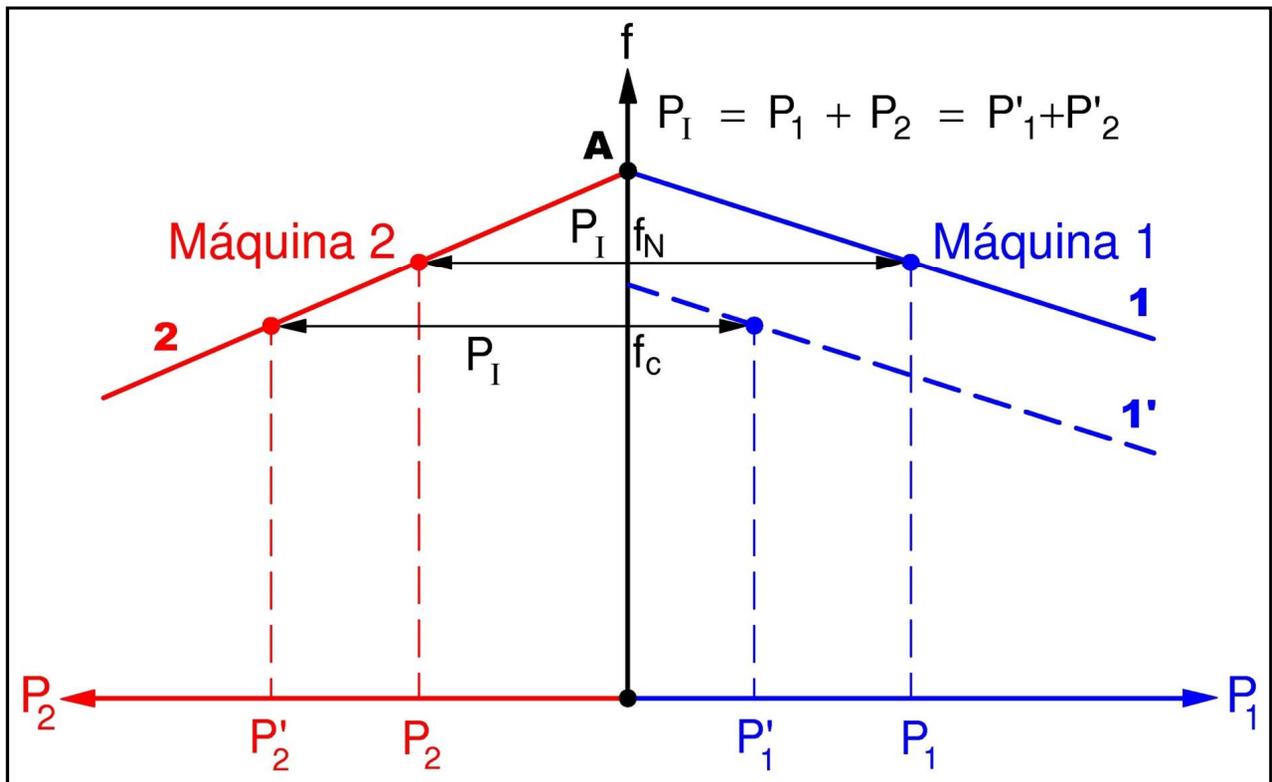
Si ambos alternadores tienen la misma frecuencia de vacío ($f_1 = f_2$):

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{\text{tg } \alpha_1}{\text{tg } \alpha_2}$$

Alternadores en paralelo

- El reparto de la potencia activa entre dos alternadores en paralelo se estudia mediante las **curvas de estatismo** de los reguladores de velocidad de sus motores de accionamiento.
- Se colocan ambas curvas de estatismo sobre la misma gráfica de forma que el eje vertical muestra la frecuencia, común a ambas máquinas, y en el eje horizontal se indican las potencias de las dos máquinas; una de estas potencias (P_1) se mide desde el origen del eje hacia la derecha y la otra potencia (P_2) se mide desde el origen del eje horizontal hacia la izquierda.
- En esta gráfica la potencia activa total suministrada por ambas máquinas en paralelo cuando la frecuencia tiene un valor f dado es igual a la distancia entre ambas curvas de estatismo medida sobre la recta horizontal trazada a la altura f . Así, para la frecuencia f_a la potencia activa total es P_I y para la frecuencia f_b la potencia activa total es P_{II} .
- Si ambas curvas de estatismo tienen la misma frecuencia en vacío ($f_1 = f_2$) se deduce que el reparto de potencias activas entre ambas máquinas es proporcional a las constantes (K_1 y K_2) de sus reguladores. Queda más cargado aquel alternador cuya curva de estatismo es más horizontal.

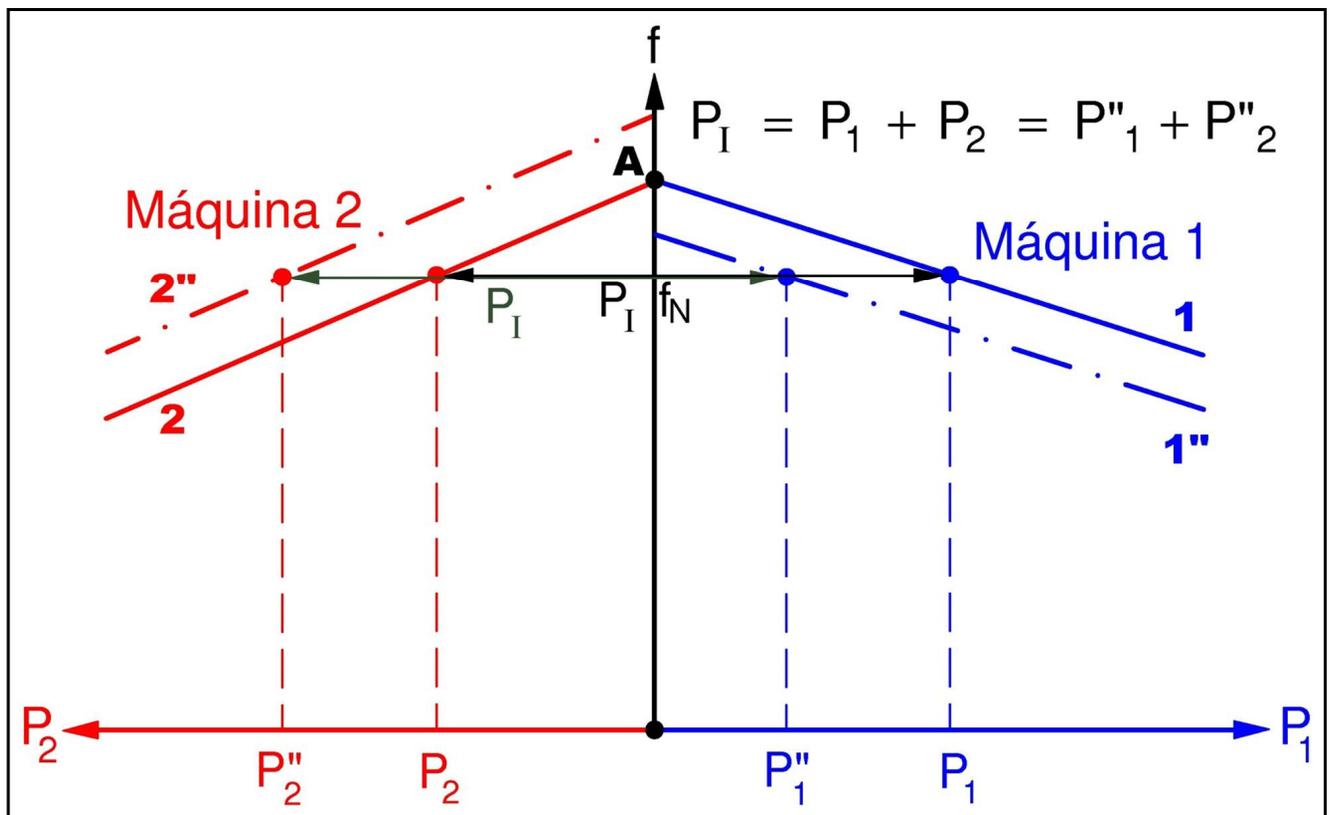
Reparto de potencia activa entre dos alternadores en paralelo (1)



Reparto de potencia activa entre alternadores en paralelo (1')

- Se puede modificar el reparto de la potencia activa entre ambos alternadores desplazando verticalmente sus curvas de estatismo mediante la regulación secundaria de los reguladores.
- Supongamos que inicialmente los alternadores tienen iguales frecuencias de vacío y suministran la potencia activa total P_I a la frecuencia asignada f_N . Las potencias activas de los alternadores son, respectivamente, P_1 y P_2 y sus curvas de estatismo son **1** y **2**.
- Manteniendo la potencia total P_I se quiere modificar el reparto de potencias activas de ambos alternadores de forma que disminuya la potencia del alternador 1 y aumente la del alternador 2.
- El primer intento para este cambio del reparto de las potencias activas se muestra en la figura superior, en la que se desplaza verticalmente hacia abajo la curva del estatismo del alternador 1, que pasa a ser la curva **1'**, y se mantiene la curva **2** del otro alternador. De esta manera, la potencia activa total P_I se divide ahora en las potencias P'_1 y P'_2 . Pero la frecuencia no mantiene su valor asignado y ahora vale f_c .

Reparto de potencia activa entre dos alternadores en paralelo (2)



Reparto de potencia activa entre alternadores en paralelo (2')

- En esta figura se modifica el reparto de potencia activa entre los dos generadores desplazando verticalmente ambas curvas de estatismo mediante la regulación secundaria de los reguladores de velocidad. La curva del alternador 1 desciende y pasa a ser la curva 1'' y la del alternador 2 asciende y pasa a ser la curva 2''. Trabajando adecuadamente se consigue que la potencia activa total P_I se reparta de la forma deseada entre ambos alternadores (que ahora suministran, respectivamente, las potencias activas P_1'' y P_2'' ; las cuales, si se desea, pueden ser iguales a las potencias P_1' y P_2' del caso anterior) y se mantenga la frecuencia en el valor asignado f_N .
- El proceso para llegar a esta situación puede consistir en primero bajar la curva de estatismo 1 a 1' (ver la figura del caso anterior) -con lo que se consigue que el nuevo reparto de potencias activas sea el deseado, pero la frecuencia cambia a f_c - y luego, mediante la regulación secundaria de ambas máquinas, subir simultáneamente las curvas de estatismo 1' y 2 (así se conserva el reparto de potencias activas entre los alternadores) hasta que la frecuencia sea f_N , con lo que estas curvas pasan a ser la 1'' y la 2''. Evidentemente, en este caso sucederá que $P_1'' = P_1'$ y $P_2'' = P_2'$.

Reparto de potencia reactiva entre alternadores en paralelo

- Empleando un procedimiento análogo al seguido con los reguladores de velocidad para repartir la potencia activa, se pueden utilizar los reguladores de la corriente de excitación de los alternadores para repartir entre ambas máquinas la potencia reactiva total de la manera que se desee y, además, mantener la tensión del inducido en el valor adecuado.

Funcionamiento de un alternador síncrono acoplado en paralelo con otro alternador de potencia similar

En este tipo de funcionamiento el ajuste de los reguladores de los motores de accionamiento de los alternadores permite controlar la frecuencia y el reparto de potencia activa entre ambas máquinas.

Análogamente, los reguladores de la corriente de excitación de las máquinas síncronas permiten ajustar el valor eficaz de la tensión suministrada y el reparto de potencia reactiva entre ambas máquinas.

Las potencias activa y reactiva totales a proporcionar por ambos alternadores conjuntamente no se pueden controlar, ya que son las que demanda la carga eléctrica a la que alimentan. Es el reparto de estas potencias entre ambos generadores lo que se puede ajustar mediante sus reguladores.