

MÁQUINA SINCRÓNICA

Norberto A. Lemozy

1 INTRODUCCIÓN

Las máquinas sincrónicas son las principales fuentes de energía eléctrica de la humanidad y, por tal motivo, son las máquinas rotantes más grandes que se han construido. Hay generadores sincrónicos, también denominados *alternadores*, con potencias superiores a los 1000 MVA; en la Argentina el generador más grande que está en funcionamiento es el de la central nuclear de Embalse de Río III que tiene 720 MVA a 22 kV, pero también se fabrican pequeñas máquinas para grupos electrógenos y generadores eólicos desde potencias de unos pocos kVA; los automóviles poseen alternadores trifásicos que pueden entregar alrededor de 800 a 1000 VA, que luego se rectifica a corriente continua.

Si bien los alternadores son las máquinas rotantes de mayor importancia económica, también los motores sincrónicos tienen aplicaciones muy particulares en la industria, ya que como se verá más adelante, tienen la característica única de poder variar la potencia reactiva y controlar el factor de potencia de toda una instalación. Por ese motivo también son de potencia en general, grande.

En la última década aparecieron en el mercado imanes permanentes de neodimio-hierro-boro que poseen características sobresalientes y permitieron construir máquinas sincrónicas, alternadores y motores, de potencias elevadas, de 1 ó más MVA, y con grandes posibilidades de aplicación en generadores eólicos y motores de gran velocidad y reducido volumen.

2 FORMAS CONSTRUCTIVAS

Las máquinas sincrónicas convencionales tienen dos circuitos: uno de *corriente continua* que cumple la función de *excitación*, normalmente en el rotor, y otro de corriente alterna que es el *inducido* o *armadura*, normalmente en el estator. La potencia que maneja el inducido es muy superior a la consumida por la excitación.

El inducido es de forma *cilíndrica*, está *laminado* y tiene un arrollamiento trifásico *distribuido*, alojado en *ranuras*.

La *excitación* está producida por un arrollamiento monofásico, recorrido por corriente continua, conectado a través de *anillos rozantes* y *escobillas*. Algunas máquinas poseen un sistema de excitación que permite eliminar los anillos rozantes y las escobillas, se las conoce por su nombre en inglés: “brush less”

En las máquinas de alta velocidad, de uno o dos pares de polos, que a 50 Hz giran a 3.000 ó 1.500 rpm; por razones de resistencia mecánica a las fuerzas centrífugas, se utilizan rotores *cilíndricos* y *macizos*, figura 1, de acero forjado, con un arrollamiento de excitación *distribuido*.

En las máquinas de baja velocidad, de dos o más pares de polos, que a 50 Hz giran a 1500 ó menos rpm, donde las fuerzas centrífugas son menores, se pueden utilizar rotores contruidos a partir de distintas piezas que se ensamblan entre sí.

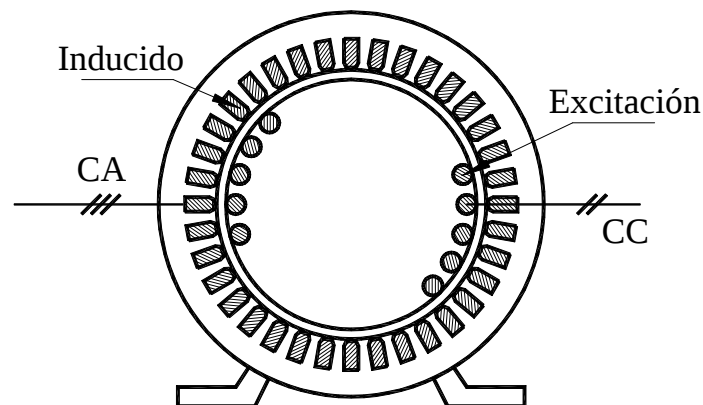


Fig. 1. Corte de una máquina síncrona con rotor cilíndrico.

Los arrollamientos de excitación de estas máquinas son *concentrados* y se colocan en *polos salientes* que por razones de facilidad constructiva, son *laminados*. Figura 2.

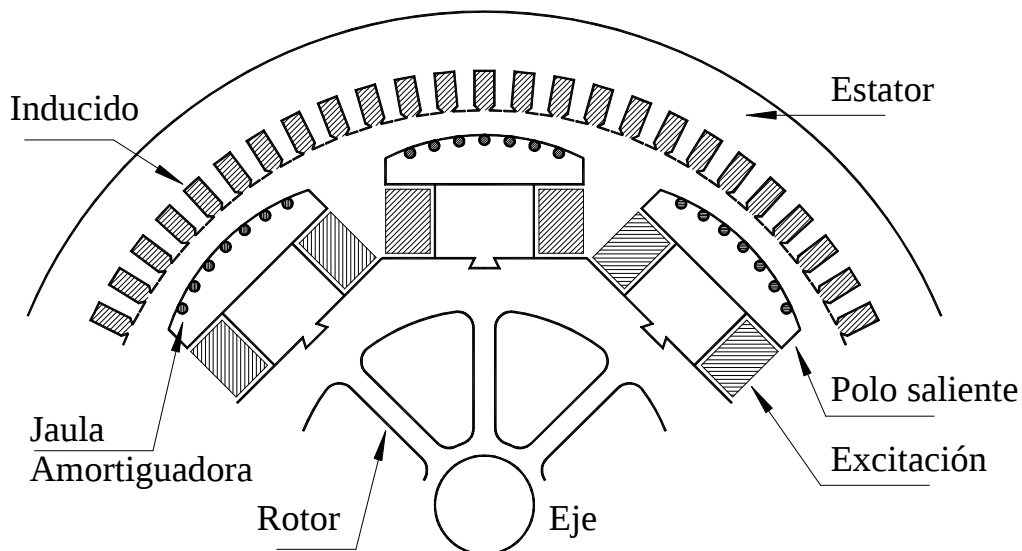


Fig. 2. Corte parcial de una máquina síncrona con rotor de polos salientes.

Los alternadores de alta velocidad, con rotor cilíndrico, están movidos por turbinas de vapor o de gas y por ese motivo se los suele denominar *turboalternadores*; por otro lado los de baja velocidad están accionados por turbinas hidráulicas o motores diesel.

En algunos alternadores de baja velocidad y potencia, utilizados en grupos electrógenos, se coloca la excitación de polos salientes en el estator y un inducido cilíndrico en el rotor. Esta forma constructiva permite hacer una máquina más compacta; pero tiene el inconveniente que toda la potencia generada debe pasar a través de tres anillos rozantes y escobillas, lo que para grandes potencias es inadmisibles.

3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento de un generador sincrónico es el siguiente: si se alimenta el rotor con corriente continua y se lo hace girar, el campo magnético producido cortará a las espiras del estator induciendo tensiones alternas. Si en el estator está formado por un arrollamiento trifásico, se inducirán tres tensiones a 120° entre sí. Figura 3.

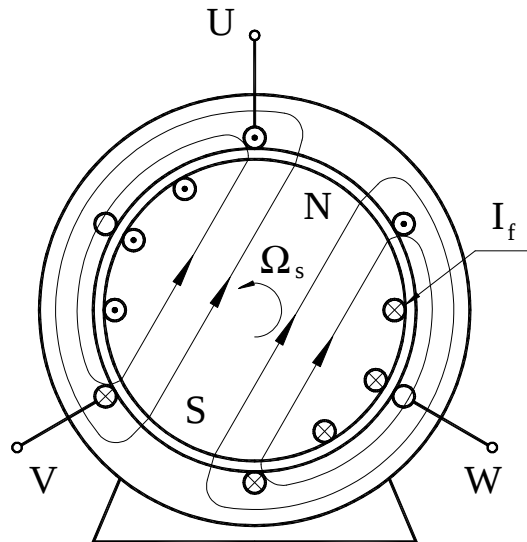


Fig. 3. Alternador elemental.

Tanto el valor de la tensión inducida como su frecuencia dependerán de la velocidad de giro:

$$f = \frac{pn}{60} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

Donde:

- p : Número de pares de polos
- n : Velocidad de rotación en rpm.

En el alternador elemental de la figura 3, la excitación podría estar provista por un imán permanente, pero en ese caso no se podría controlar la tensión inducida.

Por el contrario, si se conecta el arrollamiento estatórico a una red trifásica, circulará un sistema trifásico de corrientes el que producirá un campo rotante de velocidad sincrónica; si además por el rotor circula corriente continua los polos N y S de ambos campos se atraerán y buscarán alinearse, figura 4 y, si la cupla de carga lo permite, el rotor girará a la misma velocidad sincrónica del campo giratorio. Este es el principio de funcionamiento de un motor sincrónico.

Igual que en el caso anterior el rotor podría ser un imán permanente.

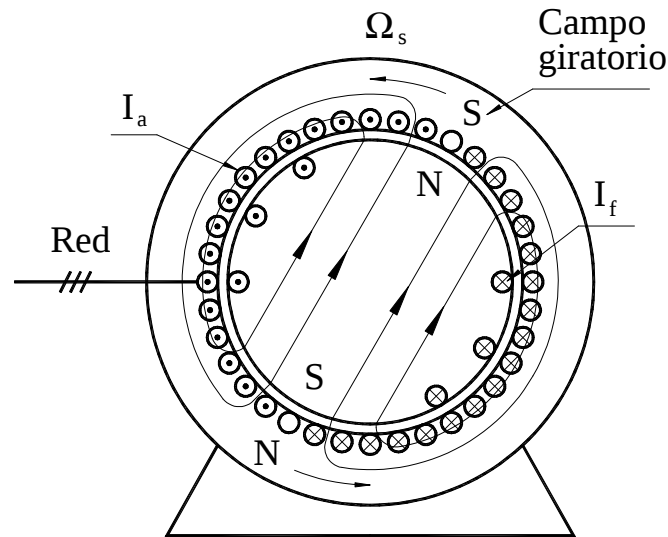


Fig. 4. Motor síncrono elemental.

4 CIRCUITO EQUIVALENTE

En el presente apunte se estudiarán solamente a las máquinas con rotor cilíndrico. Las de polos salientes tienen un comportamiento ligeramente distinto y requieren un enfoque teórico distinto y más complejo.

Para las máquinas de rotor cilíndrico se han desarrollado varios modelos circuitales, pero el más empleado por su sencillez, es el denominado de *reactancia síncrona* cuyo circuito equivalente es el mostrado en la figura 5, donde se muestra una fase en convención generadora.

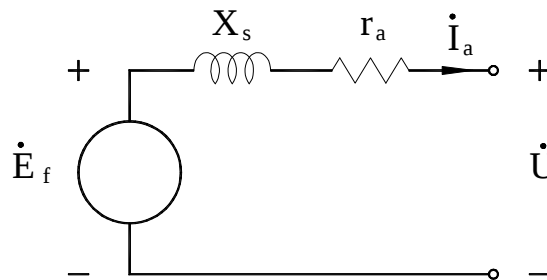


Fig. 5. Circuito equivalente de reactancia síncrona.

Donde:

- r_a : Resistencia de armadura. [Ω]
- X_s : Reactancia síncrona. [Ω]
- E_f : Fuerza electromotriz inducida de excitación. [V]
- I_a : Corriente de armadura. [A]
- U : Tensión de armadura. [V]

Todos los valores anteriores son por fase. Como la reactancia síncrona es mucho mayor que la resistencia de armadura, la mayoría de las veces se desprecia a esta última.

$$\boxed{X_s \gg r_a} \quad (2)$$

5 FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR INDEPENDIENTE

Un generador independiente es uno que no está conectado a una red ni a otro generador, por ejemplo el caso de un grupo electrógeno que alimenta a una carga, figura 6.

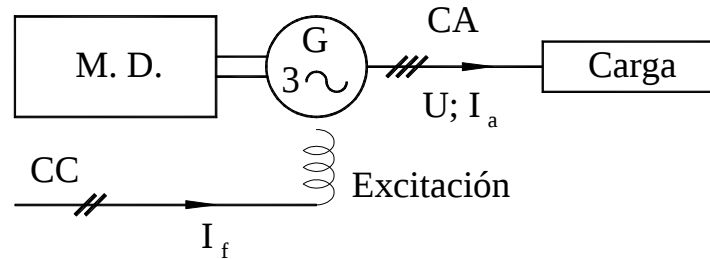


Fig. 6. Generador independiente.

En este caso la frecuencia está determinada por la velocidad de giro del motor de impulso, el que normalmente posee un regulador de velocidad para garantizar los 50 Hz frente a las variaciones de carga.

La tensión inducida E_f y en consecuencia la tensión en bornes U depende de la velocidad de giro y de la corriente de excitación I_f . Si el regulador del motor mantiene constante la velocidad, se debe colocar un regulador de tensión que ajuste la corriente de excitación para mantener constante la tensión en bornes del alternador. O sea que el grupo electrógeno debe tener dos sistemas realimentados: uno para mantener constante la velocidad y otro para mantener constante la tensión de salida.

Del circuito equivalente de la figura 5 se obtiene la tensión en bornes del generador, que resulta:

$$\dot{U} = \dot{E}_f - (r_a + jX_s) \cdot \dot{I}_a \quad (3)$$

La relación entre la tensión inducida E_f y la corriente de excitación I_f es la denominada *característica en vacío*, figura 7, ya que para determinarla se hace funcionar al generador en vacío $I_a = 0$, a velocidad sincrónica, se varía I_f y se mide $U_0 = E_f$.

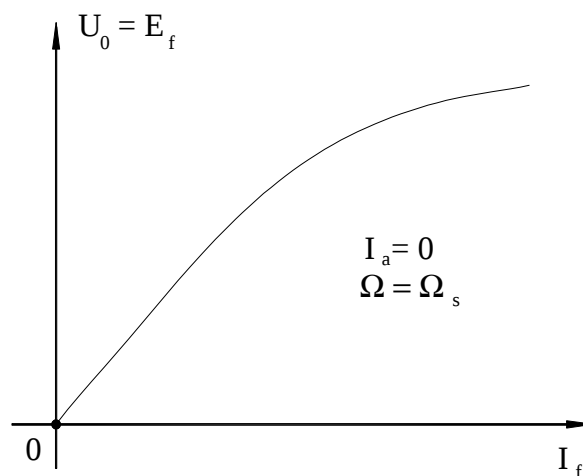


Fig. 7. Característica en vacío.

Ésta es una curva muy importante de las máquinas sincrónicas, ya que en otra escala representa la característica $B - H$ del circuito magnético de la máquina. Al principio es lineal y luego se curva por la saturación del hierro.

5.1 Características Externas

Las curvas características externas de los generadores sincrónicos se trazan a velocidad sincrónica, corriente de excitación $I_f = \text{constante}$ y carga de factor de potencia $\cos \varphi = \text{constante}$. Debido al gran valor de la reactancia sincrónica se producen grandes variaciones de la tensión de salida, es decir los generadores sincrónicos tienen una *mala regulación* de la tensión y por eso necesitan de un regulador que ajuste la corriente de excitación para mantener constante la tensión de salida. En la figura 8 se muestran las características externas para varios factores de potencia.

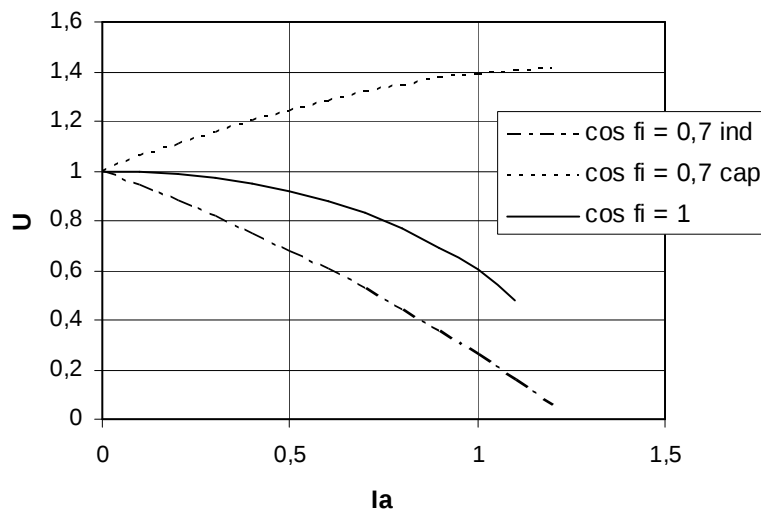


Fig. 8. Características externas.

6 MÁQUINA CONECTADA A UNA RED

En la mayoría de los casos los grandes generadores funcionan todos conectados entre sí, formando un gran *sistema interconectado*, el que puede abarcar más de un país e incluir muchas máquinas. Esta forma de operar brinda una mayor seguridad en la prestación del servicio eléctrico, ya que en el caso de falla de una máquina, las restantes pueden suministrar la potencia faltante. Pero también es cierto que se complican los sistemas de protecciones a fin de evitar que la salida de servicio de una máquina de gran porte, no arrastre a otras y produzca un problema mucho mayor (gran apagón).

En un sistema interconectado la tensión en un punto del mismo y particularmente la frecuencia son prácticamente constantes. Para variar la frecuencia habría que acelerar o frenar a todas las máquinas del sistema, lo que requiere de una potencia enorme, muy superior a la de una sola máquina, y que no sería permitida por las protecciones del sistema. Por lo tanto a la red se la puede considerar como *ideal* es decir de *tensión y frecuencia constantes*.

A una red ideal se la suele llamar de *potencia infinita*, ya que podría suministrar o absorber cualquier potencia.

Cuando se conecta una máquina sincrónica, motor o generador, a una red de potencia infinita, *la red le impone condiciones a la máquina* esas condiciones son precisamente la tensión en bornes y la frecuencia. Al estar impuesta la frecuencia, queda impuesta la velocidad en su valor sincrónico.

Conectada a la red, la máquina puede funcionar tanto como generador, aportando energía a la misma, como lo hacen las centrales eléctricas; o como motor tomando energía de la red para mover una carga mecánica.

Como las máquinas sincrónicas *solamente* convierten energía a la velocidad sincrónica, no se las puede conectar directamente a una red, de alguna forma se debe hacer que, en el momento de la conexión, se encuentren girando a la velocidad sincrónica o a una velocidad muy próxima.

6.1 Conexión de un Generador Sincrónico a la Red

Los generadores son un caso particular, porque todos ellos tienen un motor de impulso que los puede llevar a la velocidad sincrónica. La conexión de los generadores se llama *puesta en paralelo* y antes de hacer la conexión, se debe cumplir que los valores instantáneos de las tensiones de la red y de la máquina sean iguales. Lo anterior se verifica controlando cuatro condiciones, figura 9. Las tensiones de la red y de la máquina deben:

1. Tener la misma secuencia.
2. Tener la misma frecuencia.
3. Tener el mismo módulo.
4. Estar en fase.

La primera condición es *sine qua non*, si no se cumple se hace un cortocircuito. Se verifica con *secuencímetros*. Si no se cumple se deben permutar dos fases de la conexión de la máquina con la red. En las instalaciones fijas, como ser una central eléctrica, una vez que se ha comprobado la igualdad de secuencia, ya no se vuelve a verificar, ya que la red no puede cambiar su secuencia ni la máquina su sentido de giro.

La segunda condición se verifica con un *frecuencímetro doble*, y se ajusta con la velocidad del motor de impulso.

La tercera condición se verifica con un *voltímetro doble*, y se ajusta con la corriente de excitación.

La cuarta condición se verifica con un instrumento especial, denominado *sincronoscopio*, que en su cuadrante un índice muestra la diferencia de fase que hay entre las tensiones de la red y de la máquina. Se ajusta haciendo pequeñas variaciones en la velocidad de rotación.

En las condiciones segunda a cuarta se admiten pequeñas diferencia, tanto más pequeñas cuanto más grande es la máquina.

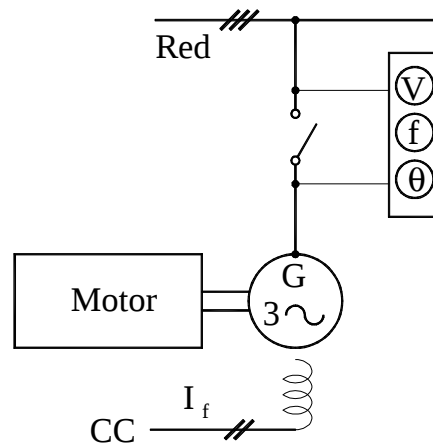


Fig. 9. Puesta en paralelo.

En la actualidad, y para evitar errores humanos, existen *sincronizadores automáticos* que hacen todos los ajustes automáticamente y con máxima precisión.

6.2 Puesta en Marcha de un Motor Síncronico

Para la conexión de un motor síncrono a la red se pueden seguir tres procedimientos de arranque:

1. Como asincrónico.
2. Con motor auxiliar.
3. Con variador de frecuencia.

En todos los casos conviene que el motor arranque *sin carga*, lo que en muchos casos se puede realizar.

En la superficie de los polos de los motores síncronos se coloca una *jaula amortiguadora*, figura 2, semejante a la de los rotores en cortocircuito de los motores asincrónicos. El principal objetivo de esa jaula es amortiguar oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio, entre el rotor y el campo giratorio, producidas por variaciones en la carga. Esas oscilaciones se denominan *penduleo* del motor síncronico.

La jaula amortiguadora se puede aprovechar para poner en marcha el motor síncrono de la misma forma que se hace con un motor asincrónico con rotor en cortocircuito, generalmente a tensión reducida. Si el motor está en vacío alcanzará una velocidad muy próxima a la sincrónica, por ejemplo 0,99 de Ω_s , si en esas condiciones se conecta la corriente continua de excitación,

luego de un penduleo el motor se sincronizará, luego de lo cual se le puede aplicar la carga. Durante el proceso de aceleración el arrollamiento de excitación debe estar conectado a una *resistencia de descarga* para evitar que las tensiones inducidas puedan dañar la aislación del mismo.

En motores de gran potencia se puede colocar un motor auxiliar, generalmente asíncrono, que acelere al rotor hasta una velocidad muy próxima o ligeramente superior a la sincrónica. Alcanzadas esas condiciones se desconecta el motor de impulso y se conectan el inducido y la excitación del motor sincrónico, que luego de un transitorio y un penduleo se sincroniza.

Si se dispone de un variador de velocidad se lo puede aprovechar para acelerar gradualmente al motor sincrónico, aumentando la frecuencia, hasta llevarlo a una velocidad ligeramente superior a la sincrónica, donde se lo desconecta del variador y se lo conecta directamente a la red. Durante todo el proceso el motor sincrónico debe estar excitado.

6.3 Variación de las Potencias Activa y Reactiva

En un generador independiente, al variar la cupla en el eje, varían la velocidad, la frecuencia y la tensión inducida; y por otro lado, al variar la corriente de excitación varía la tensión inducida. Cuando la máquina, motor o generador, está conectado a la red, la tensión en bornes, la frecuencia y la velocidad de giro están impuestas por la red y la máquina no podrá cambiarlas. Por lo tanto al variar la cupla en el eje o la corriente de excitación, el resultado es otro.

La potencia mecánica en el eje vale:

$$P_m = \Omega_s \cdot T \quad (4)$$

En el caso de un motor la cupla T la determina la carga y en el caso de un generador la determina el motor de impulso: si se le da más combustible, vapor, agua, etc. aumentará la cupla desarrollada y en consecuencia la potencia mecánica y la cupla en el eje.

Suponiendo una máquina sincrónica ideal, es decir sin pérdidas, al variar la potencia mecánica en el eje, que es activa, debe variar la potencia activa P que la máquina intercambia con la red. O sea que cuando una máquina sincrónica, motor o generador, está conectada a la red, al variar la cupla en el eje, se modifica la potencia activa que la máquina toma o entrega a la red. Figura 10.

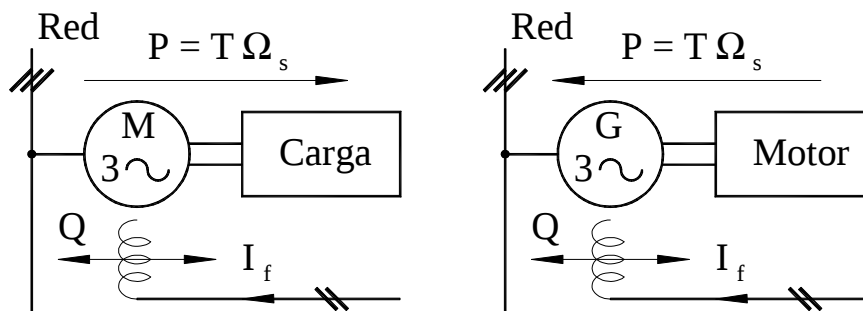


Fig. 10. Control de P y Q .

Si se modifica la corriente de excitación I_f cambia la fuerza electromotriz inducida E_f y como la tensión en bornes es constante debe cambiar la caída de tensión interna de la máquina y consecuentemente la corriente de armadura I_a . Para mostrar lo anterior se considera un motor sincrónico sin pérdidas y que opera a potencia activa P constante.

$$\left. \begin{aligned} P &= UI_a \cos \varphi = \text{cte.} \\ U &= \text{cte.} \end{aligned} \right\} I_a \cos \varphi = \text{cte.} \quad (5)$$

Los valores anteriores son por fase. Expresando la ecuación (3) en convención consumidora y despreciando r_a , resulta:

$$\dot{U} = \dot{E}_f + jX_s \cdot \dot{I}_a \quad (3)$$

La que se puede mostrar fasorialmente para distintos valores de I_f es decir de E_f , figura 11.

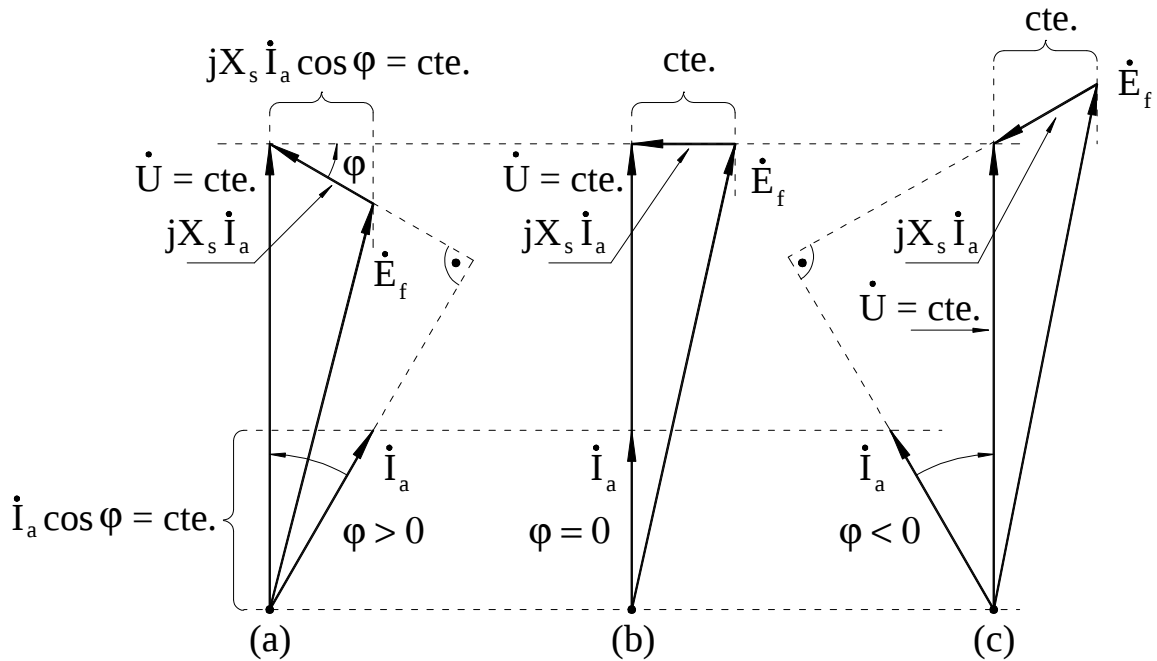


Fig. 11. Diagramas fasoriales para distintas excitaciones.

En el diagrama (a) de la figura 11, el motor trabaja con una corriente de excitación y desarrolla un valor de E_f . En el diagrama (b) se aumento al corriente de excitación y E_f y en el (c) esos valores son aún más altos.

En los tres diagramas fasoriales de la figura 11, la tensión en bornes U y la proyección de la corriente sobre la misma son constantes. También se muestra que la proyección horizontal de la caída de tensión en la reactancia sincrónica es constante.

En esos diagramas se observa que para cumplir las condiciones (5), la corriente de armadura debe cambiar su *ángulo de fase* lo produce un cambio de la potencia reactiva que intercambia la máquina con la red.

En la figura 11, diagrama (a), el ángulo de fase φ , que se mide de la corriente hacia la tensión, es positivo, lo que da una *potencia reactiva inductiva positiva*, es decir *absorbida* por la convención adoptada y corresponde a la máquina *subexcitada*. Desde el punto de vista de la potencia reactiva, esta situación equivale a tener un *circuito inductivo* conectado a la red.

En el diagrama (c), que corresponde a la máquina *sobreexcitada*, el ángulo de fase φ , es *negativo* y también lo será la potencia reactiva que depende de su seno. O sea que la máquina

entrega potencia reactiva inductiva a la red, que equivale a decir *absorbe potencia reactiva capacitiva*, como si se tratase de un *circuito capacitivo*.

El diagrama (b) corresponde a la condición límite donde la máquina se comporta *resistivamente*, sin intercambiar potencia reactiva con la red.

Si bien la demostración anterior se hizo para un motor tomado en convención consumidora, es general y vale para motores y generadores, e independientemente de la convención de signos considerada.

Esta característica, única de la máquina síncrona, es la que permite controlar el balance de potencia reactiva en las redes, mantener constante la tensión y compensar el factor de potencia de una industria. Esta última aplicación, y no la constancia de la velocidad, es la principal razón del uso de motores síncronos, que son más caros que los asíncronos y que también mantienen la velocidad casi constante.

Si se representa el módulo de la corriente de armadura en función de la corriente de excitación, para potencia mecánica constante, se obtienen curvas, que por su forma, se denominan *curvas "V"*, figura 12.

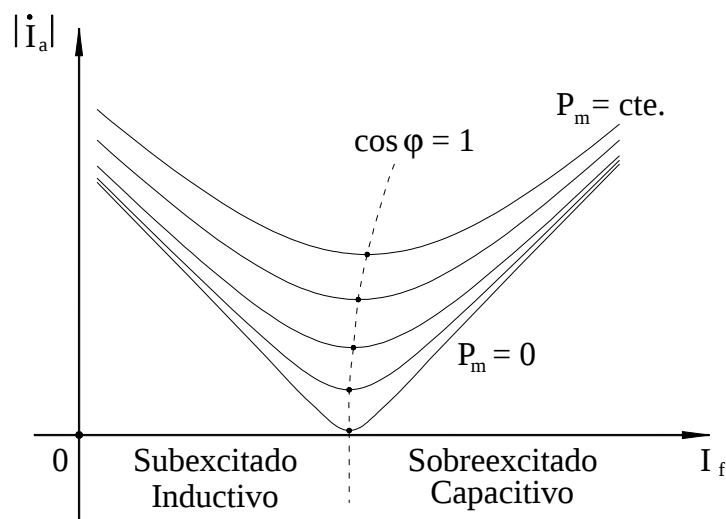


Fig. 12. Curvas "V".

7 BIBLIOGRAFÍA

Stephen J. Chapman: "*Máquinas Eléctricas*" Editorial Mac Graw Hill, 2005.

B. S. Guru y H. R. Hiziroğlu: "*Máquinas Eléctricas y Transformadores*" Editorial Oxford University Press, 2003.

Ing. Norberto A. Lemozy
2010