



Conversión de la Energía y Equipos Eléctricos

Máquina sincrónica

Profesor: Rodrigo Moreno

Auxiliares: Carlos Alvear y Dasla Pando

Otoño 2020



Agenda

- Introducción
- Principio de funcionamiento
- Aspectos constructivos
- Modelo circuital
- Análisis en estado estacionario



Las máquinas sincrónicas

- Las máquinas sincrónicas o síncronas **son máquinas de corriente alterna que se caracterizan por tener una velocidad del eje relacionado de manera proporcional con la frecuencia de las variables eléctricas**. En aplicaciones de potencia, estas máquinas suelen ser trifásicas. Pueden trabajar como generador, como motor, e incluso como reactor o como condensador.
- Los generadores sincrónicos trifásicos **son los más importantes por su aplicaciones en sistemas eléctricos de potencia**, constituyen el dispositivo fundamental en las centrales generadoras tradicionales, siendo las que dominan los actuales sistemas eléctricos de potencia tradicionales.
- **Los motores sincrónicos por su parte, tienen aplicación en sistemas que requieren una gran potencia**, como los motores usados en molinos SAG en minería, los cuales pueden alcanzar las decenas de MVA de potencia.



Agenda

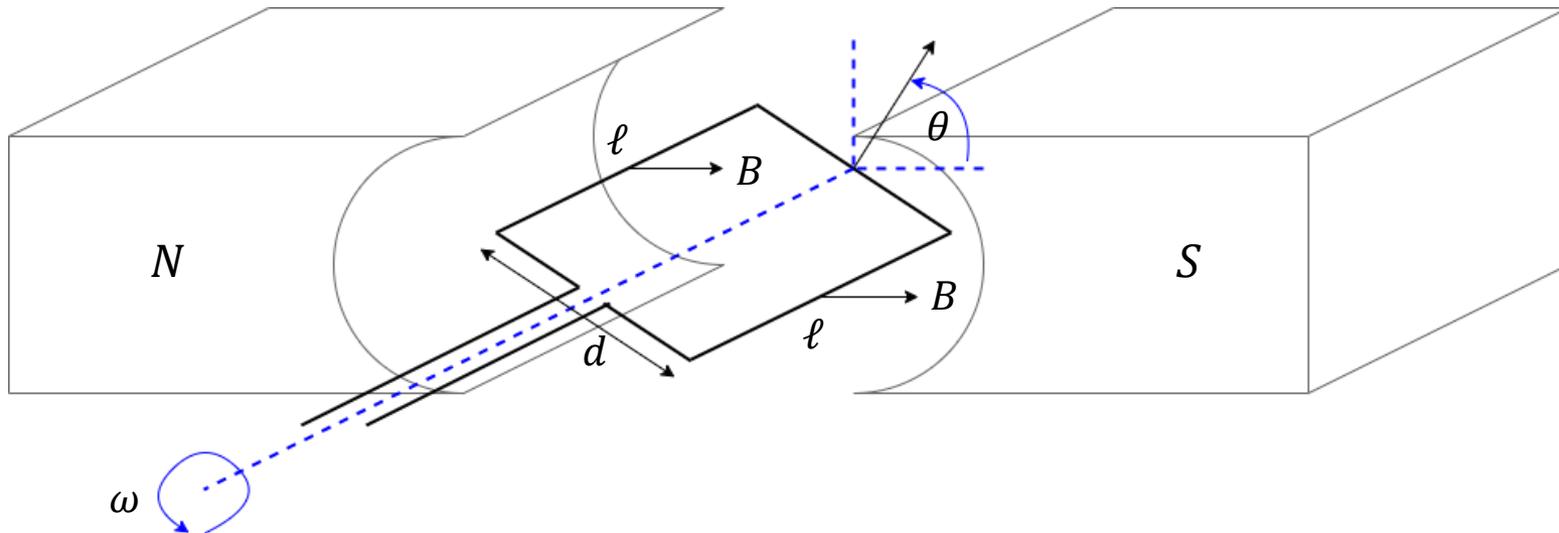
- Introducción
- Principio de funcionamiento
- Aspectos constructivos
- Modelo circuital
- Análisis en estado estacionario

Campo magnético y tensiones inducidas

- Se tiene de la ley de Faraday que para una espira atravesando un flujo magnético variable se induce una fuerza electromotriz:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt}$$

- Considere una espira de largo ℓ y ancho d que gira a velocidad ω en un campo magnético B externo, de tal modo que θ es el ángulo formado entre el vector normal del área que encierra la espira y el vector del campo magnético.





Campo magnético y tensiones inducidas

- En esos términos, el flujo que atraviesa la espira depende del ángulo θ como sigue:

$$\phi(\theta) = B \cdot A(\theta) = B\ell d \cos \theta$$

- Así, la tensión inducida en la espira es:

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(B\ell d \cos \theta) = B\ell d \sin(\theta) \frac{d\theta}{dt}$$

- Como el ángulo θ varía en el tiempo de la forma $\theta = \omega t$, entonces la tensión inducida es de la forma:

$$\varepsilon(t) = \omega B\ell d \sin(\omega t) = \omega \phi_{max} \sin(\omega t) = E_{max} \sin(\omega t)$$

- Del mismo modo, para una bobina de N espiras la tensión inducida es:

$$\varepsilon(t) = N\omega B\ell d \sin(\omega t) = N\omega \phi_{max} \sin(\omega t) = E_{max} \sin(\omega t)$$



Generador sincrónico elemental

- Luego, sin un sistema de conmutación, esta máquina corresponde a un generador de voltaje alterno sinusoidal, cuya frecuencia eléctrica ω es igual a la velocidad mecánica ω_m . Por esta razón se denomina **generador sincrónico**, donde ω es la **velocidad de sincronismo**.
- Si la velocidad angular sincrónica se expresa como n_s [rpm], se tiene que:

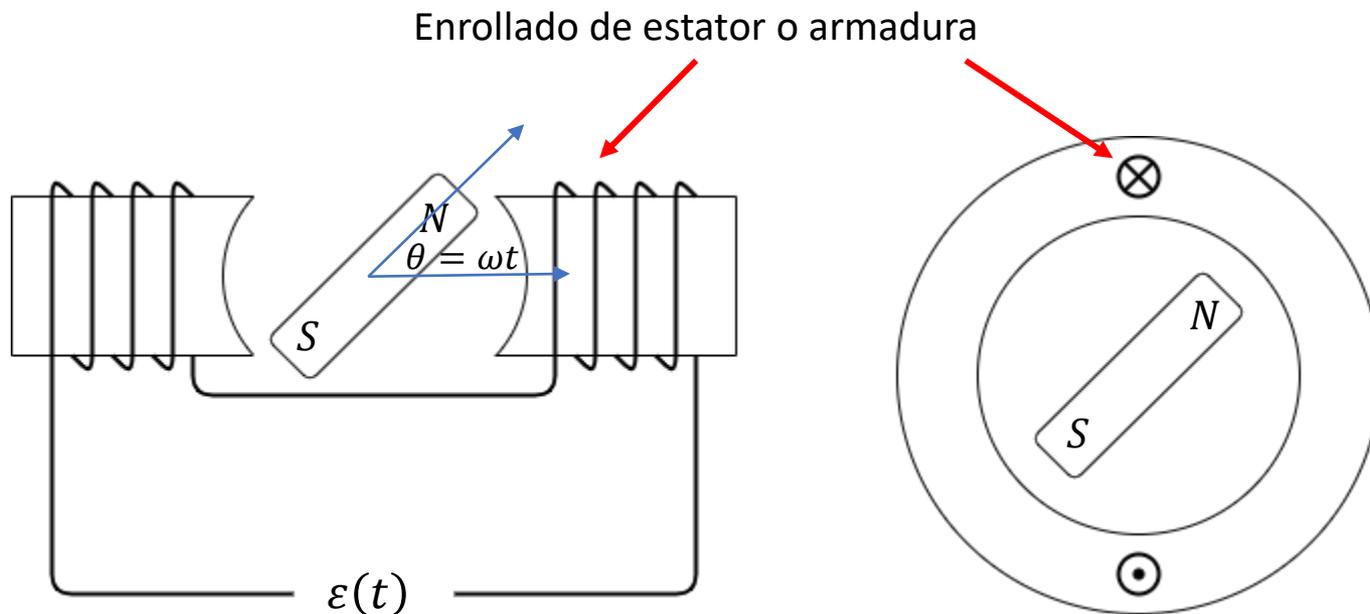
$$\omega = \frac{2\pi n_s}{60}$$

- Y la frecuencia de las variables eléctricas, f , está relacionada con las demás mediante la expresión:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{n_s}{60}$$

Generador sincrónico elemental

- En los diseños prácticos, resulta más conveniente tener el enrollado en el estator, y el campo en el rotor girando a velocidad n_m , según se observa en las figuras:

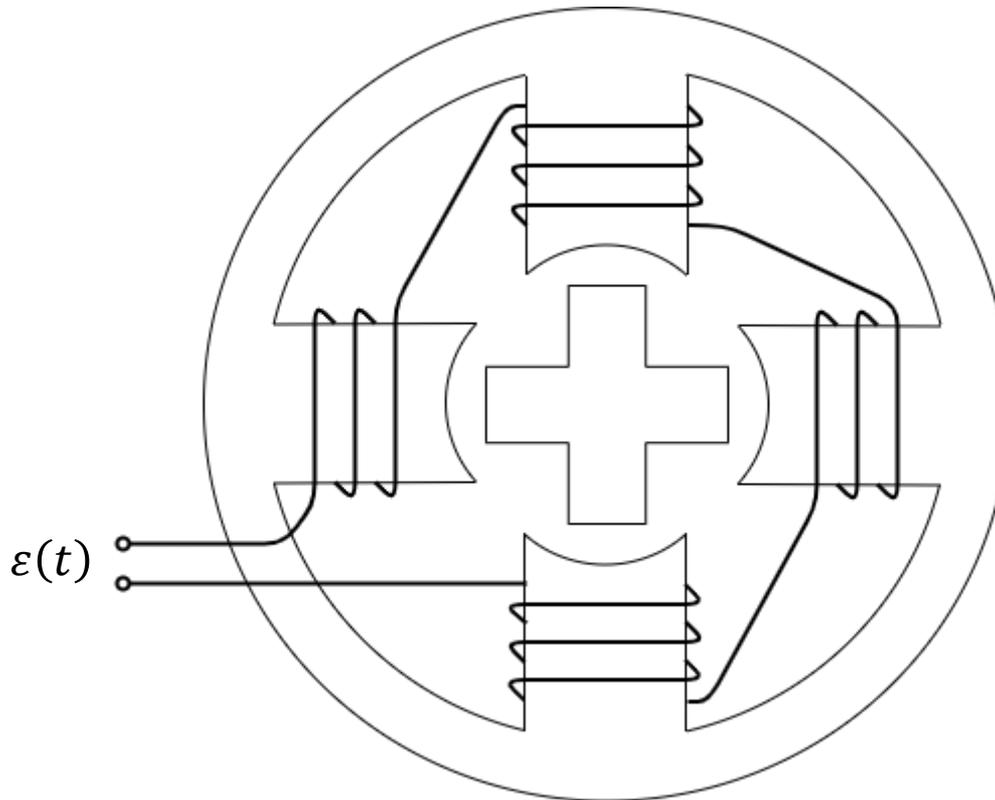


$$\varepsilon(t) = -\frac{d}{dt}(BA \cos \theta) = \omega BA \sin(\omega t)$$

- Esta máquina se denomina de dos polos, debido a los 2 polos magnéticos del campo.

Generador sincrónico elemental

- El enrollado del estator puede corresponder a una configuración de 2 polos, como se mostró en la diapositiva anterior, o más (siempre en números pares). Por ejemplo, en la siguiente figura se muestra una máquina sincrónica de 4 polos.





Generador sincrónico elemental

- Analizando la forma de $\varepsilon(t)$ para las distintas posiciones del rotor, se puede encontrar que en este caso la frecuencia ω de la tensión generada es el doble de la velocidad angular mecánica ω_m .
- En general, para un enrollado de estator de p polos, se tiene que la frecuencia ω del voltaje generador está relacionada con la velocidad angular mecánica ω_m a través de:

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

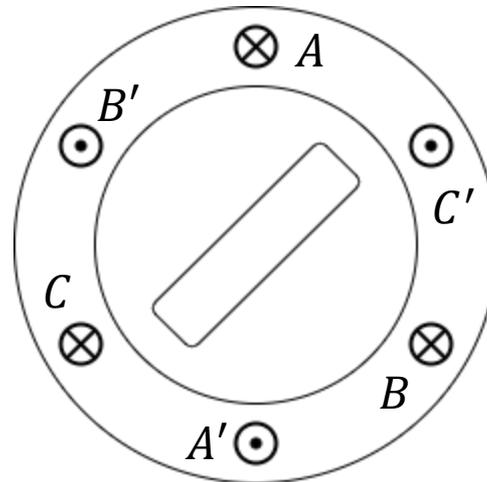
- Es decir:

$$n_s = \frac{120}{p} f$$

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

Generador sincrónico trifásico

- La máquina descrita anteriormente es un generador sincrónico monofásico, de velocidad sincrónica n_s .
- Sin embargo, es fácil comprender que si se ubican bobinas de estator desplazadas en el espacio, los voltajes que se generan resultarán desfasados en el tiempo. En particular, si se emplean 3 enrollados desplazados en el espacio en 120° eléctricos, se tiene un **generador sincrónico trifásico**, como el que se muestra a continuación:



- Se tiene que $\alpha_{\text{eléctricos}} = \frac{p}{2} \alpha_{\text{geométrico}}$ (en el caso de máquinas trifásicas, el número de polos se cuentan por fase; en este caso, por ejemplo, $p=2$)

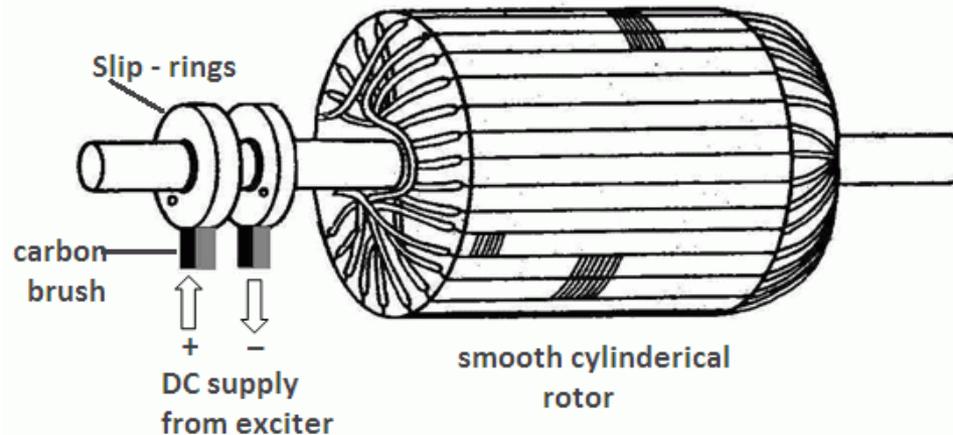


Generador sincrónico trifásico

- Al igual que en el caso monofásico, en un generador sincrónico trifásico la frecuencia de los voltajes generados en cada fase está relacionado con la velocidad mecánica n_m del eje mediante las ecuaciones ya vistas.
- Esta relación directa entre la frecuencia f de las variables eléctricas y la velocidad mecánica n_m , obliga en la práctica a emplear **sistemas de control** apropiados para mantener la velocidad mecánica constante, si se desea que la frecuencia del voltaje del generador no varíe.

Excitación

- El rotor, que proporciona el campo, puede ser un imán permanente. Sin embargo, en la práctica se prefiere emplear un devanado excitado con corriente continua (devanado de campo), alimentado a través de anillos rozantes desde una fuente de CC, que puede ser una batería u otra máquina eléctrica operando como generador, la que se denomina **excitatriz**.



- Como se verá más adelante, la potencia reactiva en los terminales de la máquina se controla actuando sobre la corriente de excitación, por ejemplo por medio de un reóstato o con dispositivos electrónicos.



Campo magnético rotatorio

- Para comprender el funcionamiento del motor sincrónico trifásico, es necesario explicar primero el fenómeno de **campo magnético rotatorio** CMR.
- El campo magnético rotatorio es el campo magnético resultante de la interacción de las fuerzas magnetomotrices de los 3 enrollados del estator de una máquina sincrónica trifásica, cuando éstos son alimentados desde una fuente trifásica de voltaje de CA.
- Se tiene que la fmm resultante es de magnitud constante y gira en el espacio a la velocidad de sincronismo

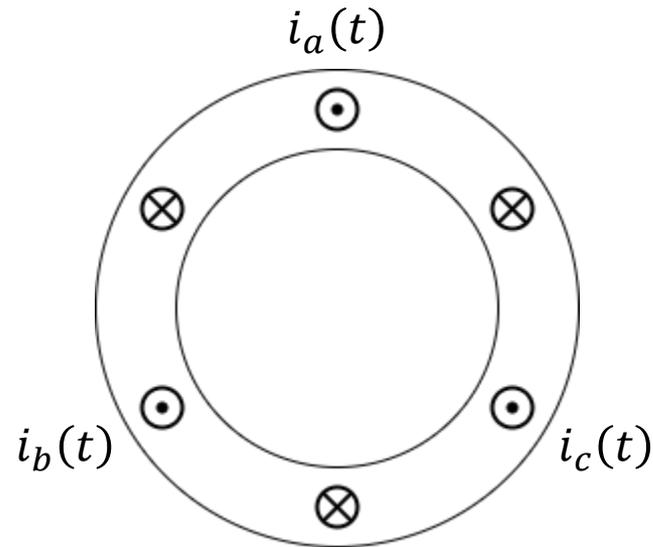
Campo magnético rotatorio

- Sea por ejemplo una máquina síncrona trifásica de dos polos, como la indicada en la figura, **en la que las bobinas del estator se alimentan desde una fuente trifásica.**
- Los tres enrollados están desplazados espacialmente en 120° eléctricos, y las corrientes que por ellos circulan están desfasadas en 120° , es decir:

$$i_a(t) = I_m \cos(\omega_s t)$$

$$i_b(t) = I_m \cos(\omega_s t - 120^\circ)$$

$$i_c(t) = I_m \cos(\omega_s t - 240^\circ)$$



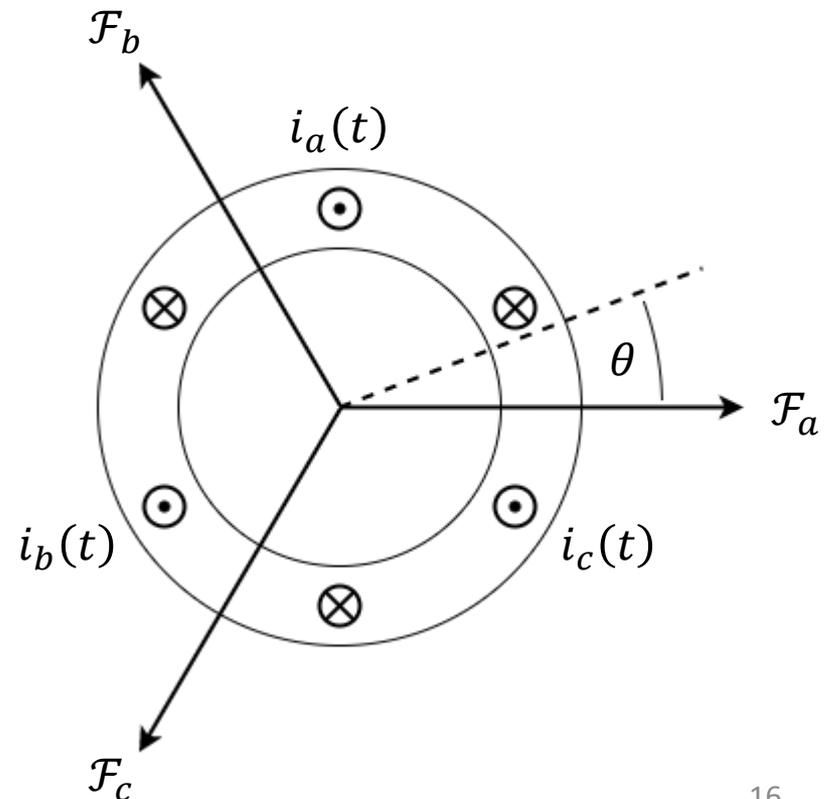
Campo magnético rotatorio

- Las fmm resultantes varían por lo tanto en el tiempo en forma sinusoidal y están desplazadas entre sí en 120° eléctricos tanto en el tiempo como en el espacio.
- Para estudiar el campo resultante en cada punto del entrehierro, se usa un ángulo θ a partir de un punto de referencia (arbitrariamente se designa $\theta = 0^\circ$ para el eje de la fase a)
- Así, las fmm de cada fase son:

$$\mathcal{F}_a = NI_m \cos(\omega_s t)$$

$$\mathcal{F}_b = NI_m \cos(\omega_s t - 120^\circ)$$

$$\mathcal{F}_c = NI_m \cos(\omega_s t - 240^\circ)$$

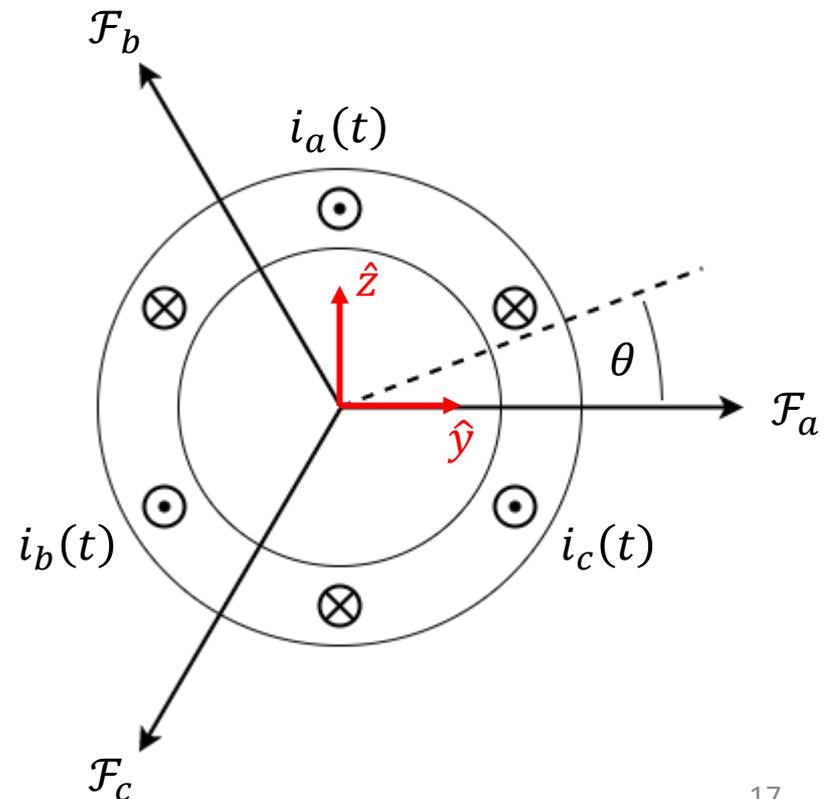


Campo magnético rotatorio

- Llamando $\mathcal{F}_m = NI_m$, la proyección de las fmm en los ejes \hat{y} y \hat{z} es:

$$\mathcal{F}_y = \mathcal{F}_a - \mathcal{F}_b \cos(60^\circ) - \mathcal{F}_c \cos(60^\circ)$$

$$\mathcal{F}_z = \mathcal{F}_b \cos(30^\circ) - \mathcal{F}_c \cos(30^\circ)$$





Campo magnético rotatorio

- Se tiene así que:

$$\mathcal{F}_y = \mathcal{F}_m [\cos(\omega_s t) - \cos(\omega_s t - 120^\circ) \cos(60^\circ) - \cos(\omega_s t - 240^\circ) \cos(60^\circ)]$$

$$\mathcal{F}_z = \mathcal{F}_m [\cos(\omega_s t - 120^\circ) \cos(30^\circ) - \cos(\omega_s t - 240^\circ) \cos(30^\circ)]$$

- Usando transformaciones geométricas se llega a que:

$$\mathcal{F}_y = \frac{3}{2} \mathcal{F}_m \cos(\omega_s t)$$

$$\mathcal{F}_z = \frac{3}{2} \mathcal{F}_m \sin(\omega_s t)$$

- De donde se deduce directamente que el campo magnético resultante de esta interacción rota en el tiempo, razón por la cual se denomina **campo magnético rotatorio**, el cual es de magnitud constante igual a $\frac{3}{2} \mathcal{F}_m$. Este campo magnético rotatorio se mueve a una velocidad llamada **velocidad de sincronismo**.
- Para una máquina que tenga p polos, la velocidad del CMR (o de sincronismo) se relaciona con la frecuencia angular ω de las corrientes similar a la del generador:

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

Teorema de Ferraris

Versus Nikola Tesla

- Cuando por bobinas separadas en 120° circulan corrientes trifásicas equilibradas, cuyo desfase en el tiempo es también de 120° , se induce un campo magnético giratorio que envuelve al rotor.

$$i_a(t) = I_m \cos(\omega_s t)$$

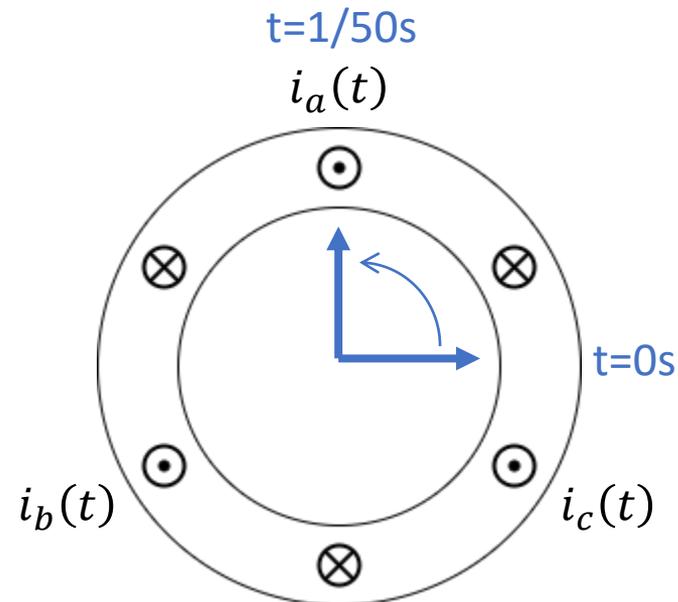
$$i_b(t) = I_m \cos(\omega_s t - 120^\circ)$$

$$i_c(t) = I_m \cos(\omega_s t - 240^\circ)$$



$$\mathcal{F}_y = \frac{3}{2} \mathcal{F}_m \cos(\omega_s t)$$

$$\mathcal{F}_z = \frac{3}{2} \mathcal{F}_m \sin(\omega_s t)$$



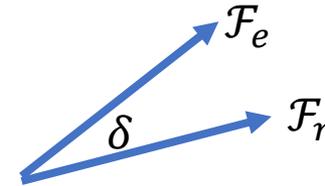
Nótese que módulo del vector azul es constante $\frac{3}{2} \mathcal{F}_m$

Motor sincrónico

- De acuerdo a la expresión general del torque, en el eje del motor se tiene un torque instantáneo dado por:

$$\tau = k \cdot \mathcal{F}_e \cdot \mathcal{F}_r \cdot \sin \delta$$

- Donde:



k es una constante de diseño de la máquina.

\mathcal{F}_e es la fmm que causa el CMR que resulta de las corrientes trifásicas del estator.

\mathcal{F}_r es la fmm que es originada por la corriente de campo del rotor.

δ es el ángulo entre la fmm del estator y la fmm del rotor.

- Si $\delta = \text{cte} \neq 0$, el torque será no nulo y la velocidad del rotor (al cual está fija la fmm \mathcal{F}_r) será igual a la velocidad del CMR (que es dado por \mathcal{F}_e); ésta es la velocidad de sincronismo n_s .



Motor sincrónico

- Lo anterior explica que un motor sincrónico en régimen permanente opere siempre a la misma velocidad (siempre y cuando la frecuencia de la red eléctrica sea constante) y cualquiera sea la carga en el eje.
- El ángulo δ está relacionado con la carga del motor, puesto que mientras mayor carga tenga éste más grande será el valor del ángulo δ . Por esta razón a este ángulo se le denomina **ángulo de carga**.
- El concepto de ángulo de carga también aplica para generadores, pues mientras más potencia estén entregando mayor será el valor de dicho ángulo.



Velocidad de rotación de una máquina sincrónica

- En las máquinas sincrónicas la frecuencia de las variables eléctricas en el estator está relacionada o en sincronía con la velocidad mecánica de giro del rotor, girando el rotor en el mismo sentido que el CMR.
- La velocidad mecánica del rotor n_m es igual a la velocidad sincrónica n_s , es decir:

$$n_s = n_m$$

- Mientras que la frecuencia f de las variables eléctricas en el estator se relaciona con la velocidad síncrona n_s mediante la ecuación anteriormente mencionada, es decir:

$$n_s = \frac{120}{p} f$$

- Donde p es el número de polos de la máquina.
- Debido a que el rotor gira a la misma velocidad que el CMR, estas ecuaciones relacionan de manera directa la velocidad mecánica de rotación del rotor con la frecuencia eléctrica resultante.



Agenda

- Introducción
- Principio de funcionamiento
- Aspectos constructivos
- Modelo circuital
- Análisis en estado estacionario

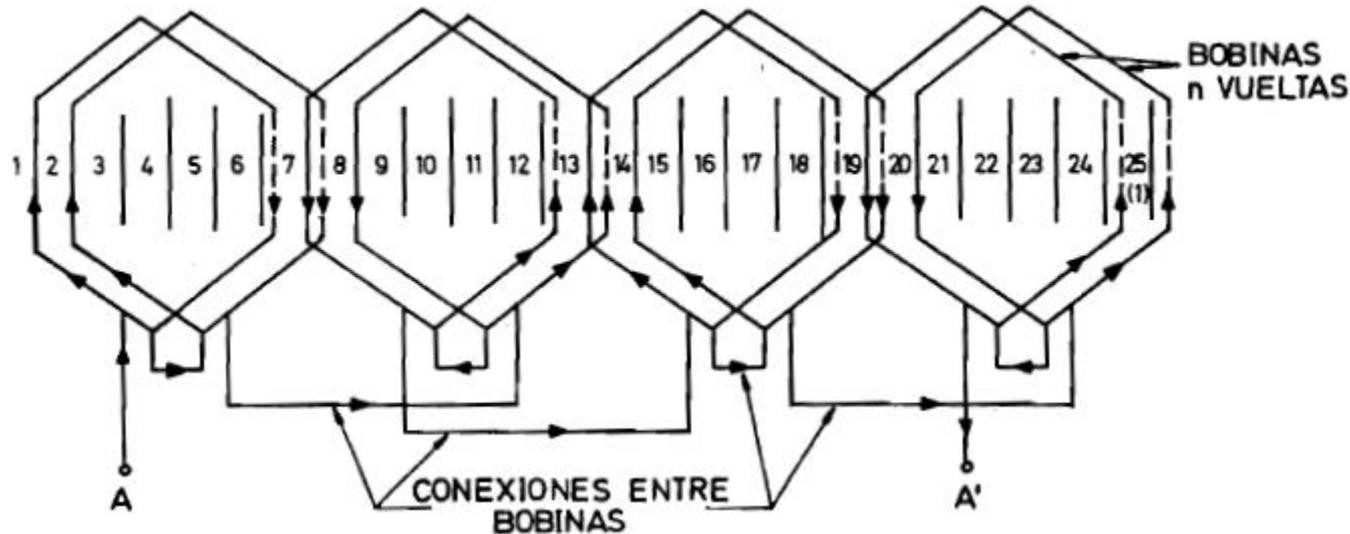


Estator de máquinas sincrónicas

- En las máquinas sincrónicas circulan corrientes alternas en el estator, que corresponde a la armadura, y corriente continua en el rotor, que corresponde al circuito de campo.
- El estator está compuesto por un paquete de láminas de acero, aisladas entre sí, con el propósito de reducir las pérdidas en el núcleo por corrientes parásitas
- El enrollado del estator es trifásico y de dos o más polos, y van alojados en ranuras axiales realizadas en el núcleo, debidamente aisladas.
- Existen varias formas de disponer el enrollado en el estator, siendo el más usual el denominado imbricado.

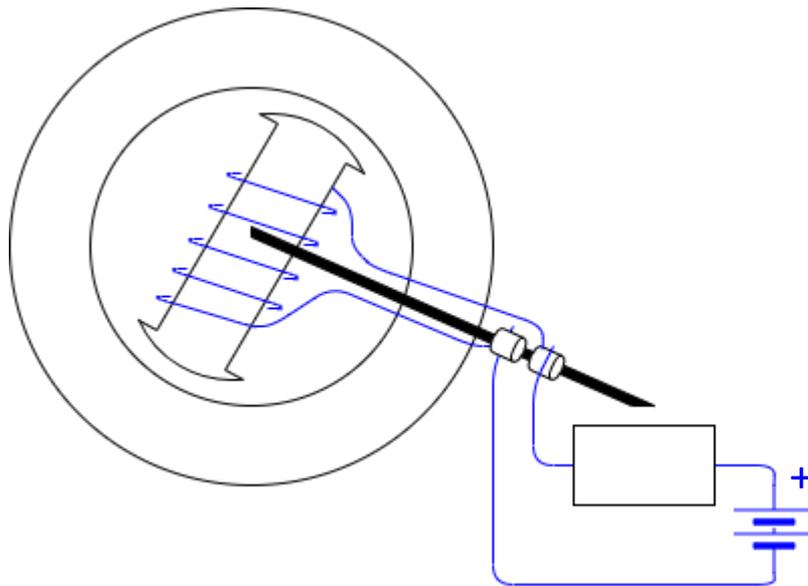
Estator de máquinas sincrónicas

- Por ejemplo, en la figura se muestra un esquema que representa la fase A de un enrollado imbricado trifásico de un estator de 24 ranuras. La configuración del enrollado es de 4 polos. Cada polo abarca $24/4 = 6$ ranuras (paso completo o paso polar).
- En este caso sin embargo, las bobinas tiene un ancho de 5 ranuras, por lo que el enrollado se denomina de paso acortado. También el enrollado es distribuido, pues los polos están formados por más de una bobina (2 en este caso)

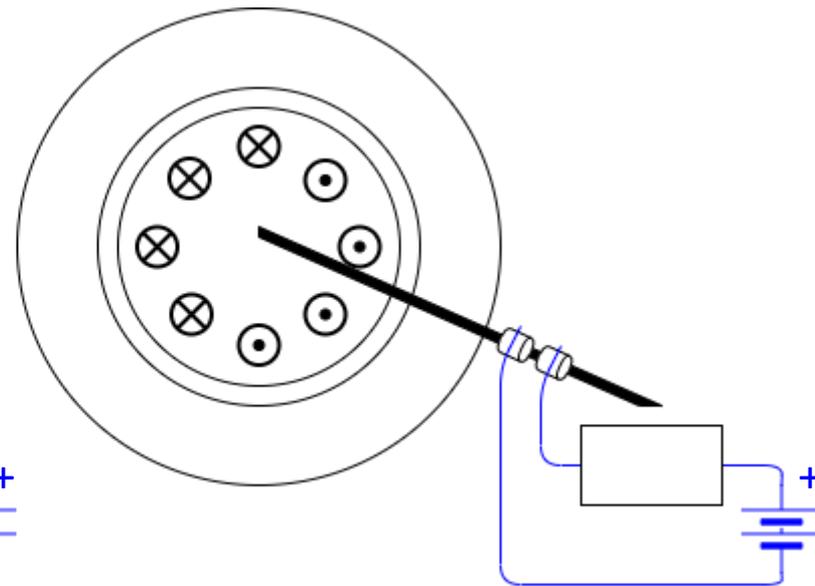


Rotor de máquinas sincrónicas

- En un generador sincrónico se produce un campo magnético en el rotor, ya sea mediante el diseño de éste con un imán permanente o mediante la aplicación de una corriente de CC a su devanado para crear un electroimán.
- Existen dos tipos de rotores con circuito de campo, el rotor de polos salientes y el rotor cilíndrico, como se muestra a continuación:



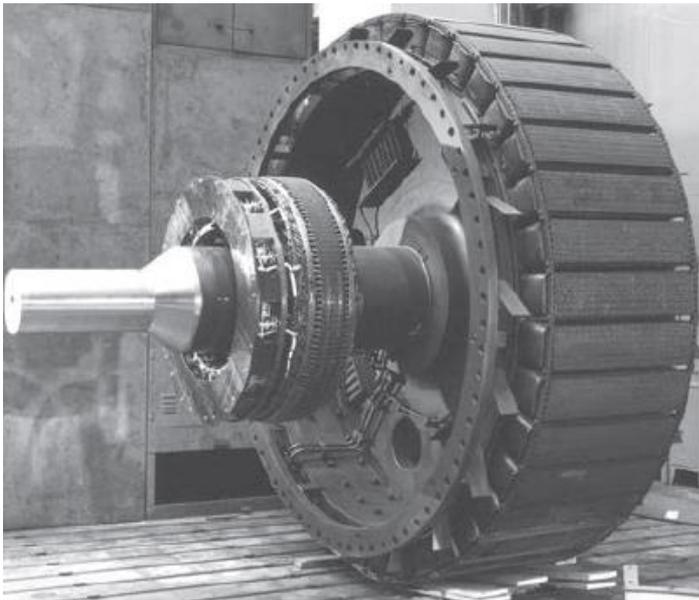
Rotor de polos salientes



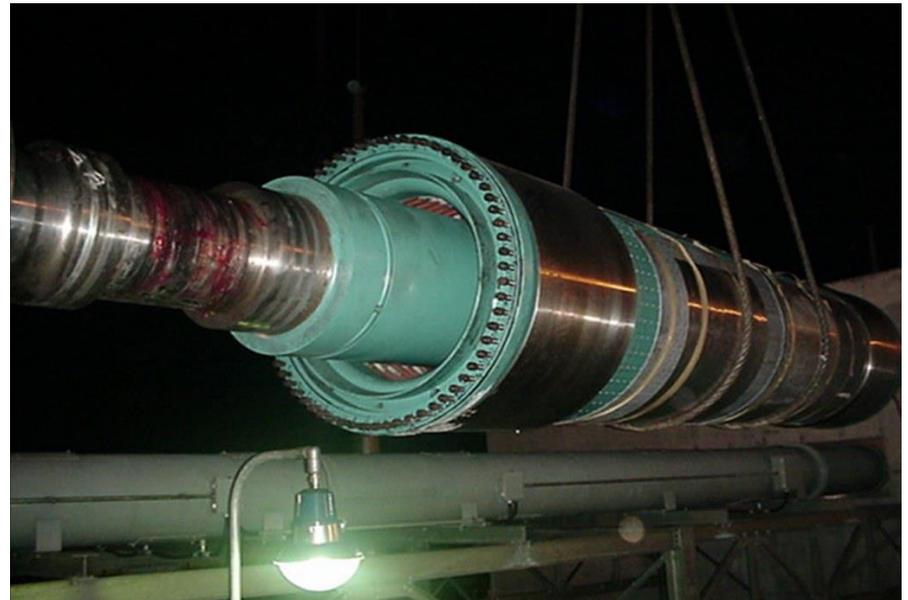
Rotor cilíndrico

Rotor de máquinas sincrónicas

- Por lo general, los rotores cilíndricos se utilizan en máquinas de 2 o 4 polos (máquinas de giro rápido), como los generadores sincrónicos utilizados en centrales termoeléctricas.
- Por otro lado, los rotores de polos salientes se usan en máquinas con 4 o más polos (máquinas de giro lento), como los generadores sincrónicos utilizados en centrales hidroeléctricas y los motores sincrónicos usados en molinos SAG.



Rotor de polos salientes



Rotor cilíndrico



Rotor de máquinas sincrónicas

- Debido a que el rotor está sujeto a campos magnéticos variables, se construye con láminas delgadas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.
- Se debe suministrar una corriente CC al circuito de campo del rotor. Puesto que éste gira, se requiere de un arreglo especial para que la potencia de CC llegue a los devanados de campo. Existen dos formas comunes de suministrar esta potencia:
 - Desde una fuente externa de CC por medio de anillos rozantes y escobillas.
 - Desde una fuente de potencia de CC especial montada directamente en el eje del generador síncrono.



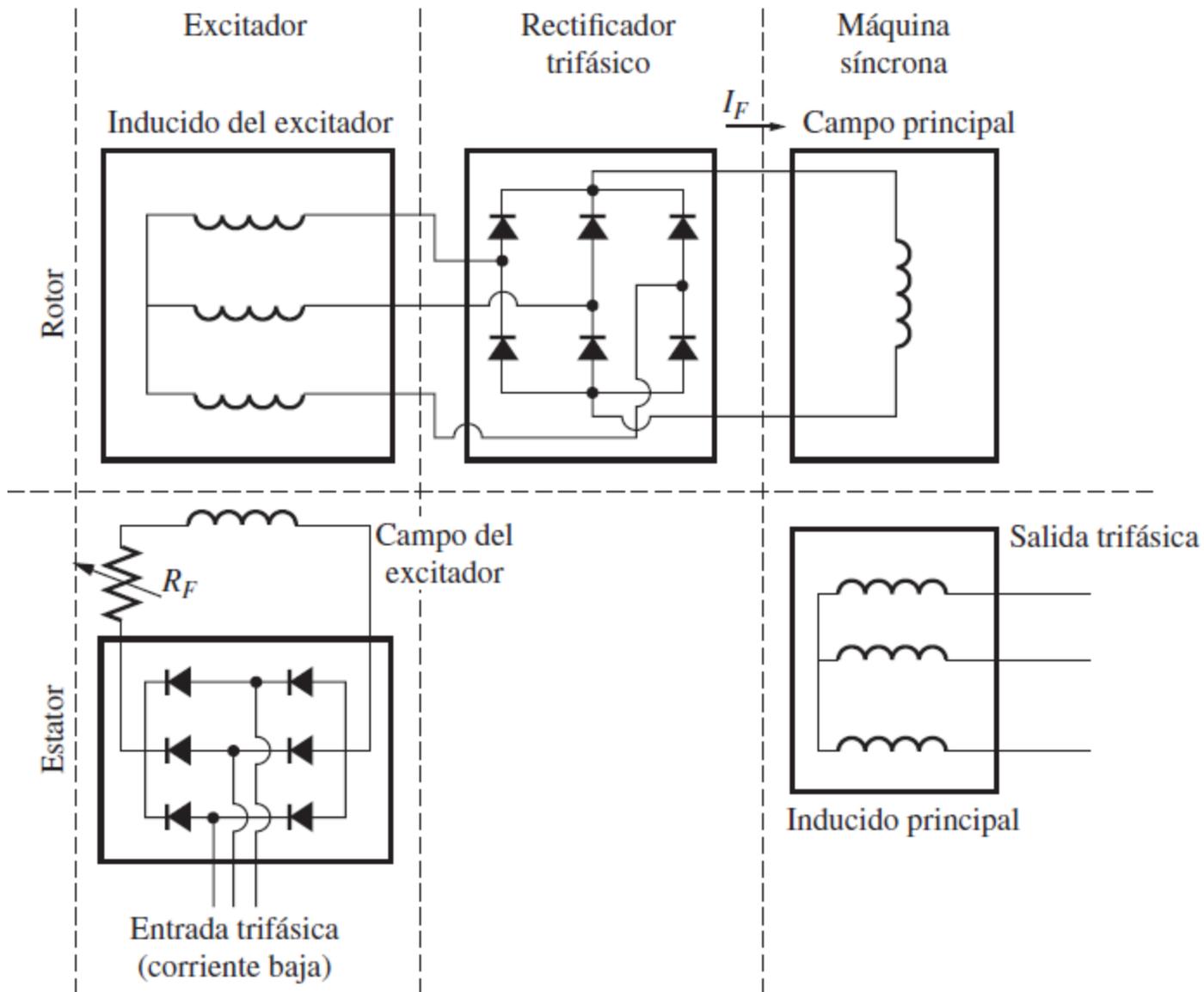
Rotor de máquinas sincrónicas

- Los anillos rozantes son anillos de metal que circundan por completo al eje de la máquina, pero se encuentran aislados de él. Cada extremo del devanado de campo del rotor está unido a uno de estos anillos rozantes del eje de la máquina síncrona.
- Una escobilla estacionaria se desliza sobre cada anillo rozante. Una escobilla es un bloque de un compuesto de carbón parecido a grafito que conduce electricidad libremente y tiene una fricción muy baja, por lo que no desgasta el anillo rozante.
- El sistema de anillos rozantes y escobillas causan ciertos problemas cuando se utilizan para suministrar potencia de CC a los devanados de campo de una máquina síncrona:
 - Incrementa la cantidad de mantenimiento que requiere la máquina debido a que el desgaste de las escobillas debe ser revisado regularmente.
 - La caída de voltaje en las escobillas puede causar pérdidas significativas de potencia en las máquinas que tienen corrientes de campo más grandes.
- A pesar de estos inconvenientes, por razones económicas este es el sistema usado en máquinas síncronas pequeñas.



Rotor de máquinas sincrónicas

- En los generadores y motores más grandes se utilizan excitadores o excitatrices sin escobillas para suministrar la corriente de campo para la máquina.
- Un excitador sin escobilla es un generador de CA pequeño con un circuito de campo montado en el estator y un circuito de armadura acoplado en el eje del rotor. Así la salida trifásica del generador (armadura, ubicada en el rotor) se rectifica a corriente CC por medio de un circuito rectificador trifásico (que también está montado en el eje del generador), que luego alimenta al circuito de campo de CC principal.
- Así, por medio del control de la pequeña corriente de campo de CC del generador excitador (ubicado en el estator) es posible ajustar la corriente de campo en la máquina principal sin anillos rozantes ni escobillas

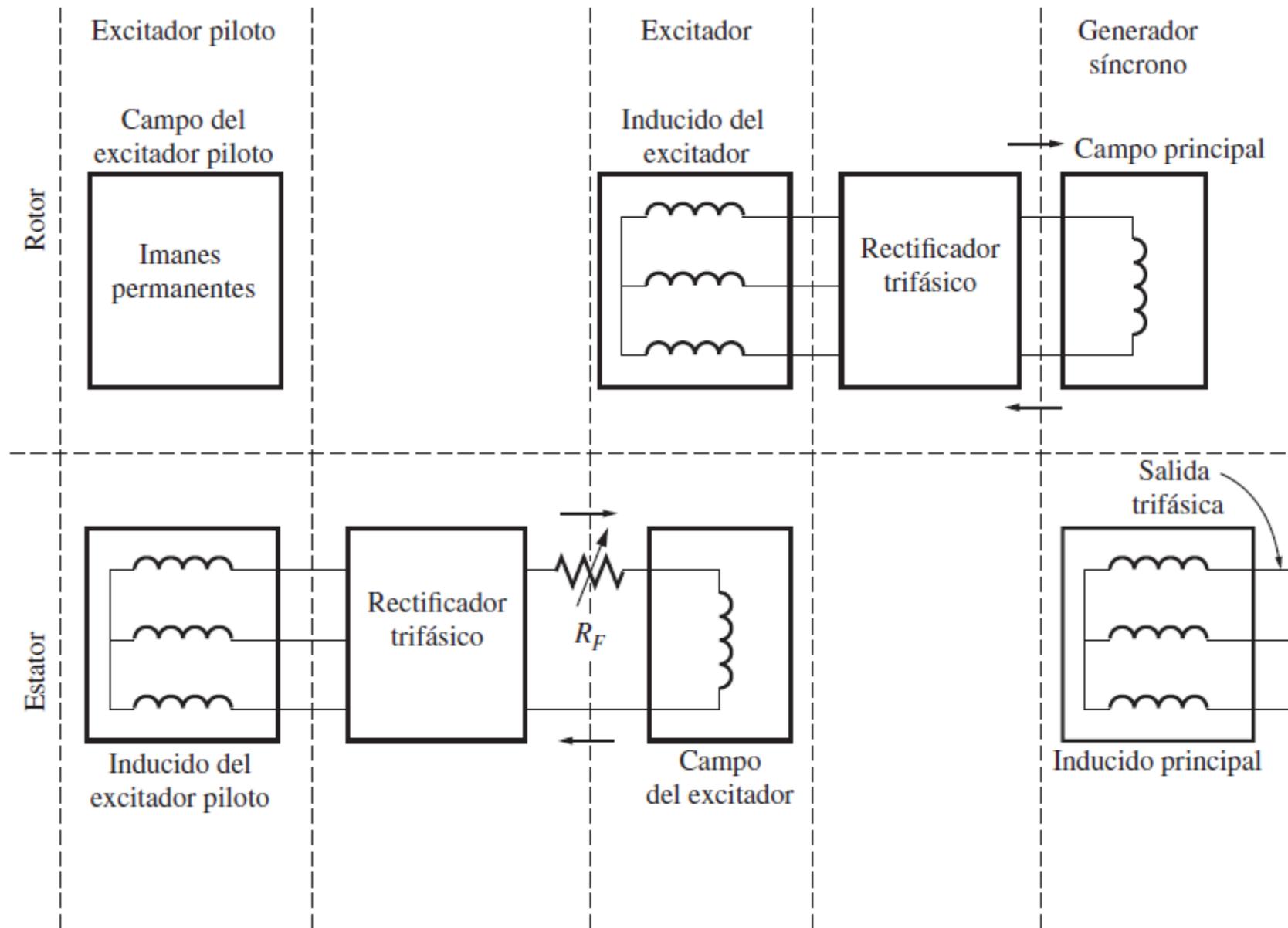


Circuito de excitador sin escobillas



Rotor de máquinas sincrónicas

- Para que la excitación de un generador sea completamente independiente de cualquier fuente de potencia externa, a menudo se incluye un pequeño excitador piloto en el sistema.
- Un excitador piloto es un pequeño generador de CA con imanes permanentes montados en el eje del rotor y un devanado trifásico en el estator. Produce la potencia para el circuito de campo del excitador, que a su vez controla el circuito de campo de la máquina principal. Si se incluye un excitador piloto en el eje del generador, no se requiere de potencia eléctrica externa para accionar el generador.
- Muchos de los generadores síncronos que incluyen excitadores sin escobillas también tienen anillos rozantes y escobillas, pues en caso de emergencia pueden contar con una fuente auxiliar de corriente de campo CC.



Circuito de excitador sin escobillas con excitador piloto



Agenda

- Introducción
- Principio de funcionamiento
- Aspectos constructivos
- Modelo circuital
- Análisis en estado estacionario



Voltaje interno

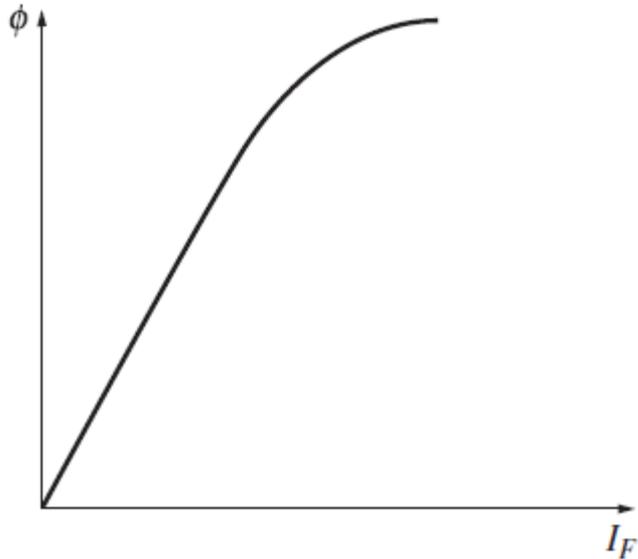
- Como se ha visto, en el estator de una máquina sincrónica se induce una tensión de la forma:

$$E = k\phi\omega$$

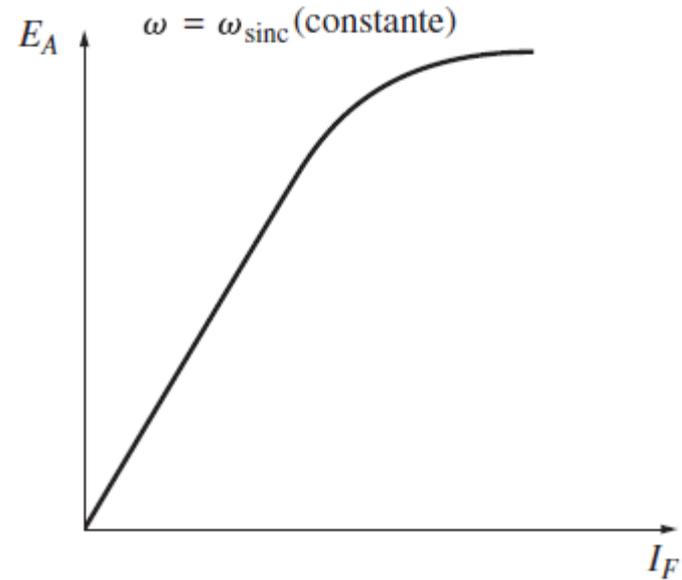
- Donde k es una constante de diseño de la máquina, ϕ es el flujo magnético en el entrehierro y ω es la velocidad de la máquina.
- Recuerde que el flujo depende de la corriente que fluye por el circuito de campo del rotor.

Voltaje interno

- Debido a que E es directamente proporcional al flujo, el voltaje interno E está relacionado con la corriente de campo, como se observa en la **curva de magnetización o característica de circuito abierto** de la siguiente figura:



Flujo v/s corriente de campo



Curva de magnetización de un generador sincrónico



Voltaje interno

- Sin embargo, el voltaje interno \hat{E} que se genera **no** es el voltaje que se presenta en las terminales del generador. De hecho, el único momento en que el voltaje interno \hat{E} es igual al voltaje de salida \hat{V} es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina, es decir, cuando la máquina opera en vacío.
- La relación que existe entre las tensiones \hat{E} y \hat{V} lleva al **modelo circuital equivalente** de un generador sincrónico.
- Hay varios factores que ocasionan la diferencia que hay entre \hat{E} y \hat{V} :
 - La distorsión del campo magnético del entrehierro debido a la corriente que fluye en el estator, llamada **reacción de armadura**.
 - La autoinductancia de las bobinas de la armadura.
 - La resistencia de las bobinas de la armadura.
 - El efecto de la forma del rotor de polos salientes.

Circuito equivalente

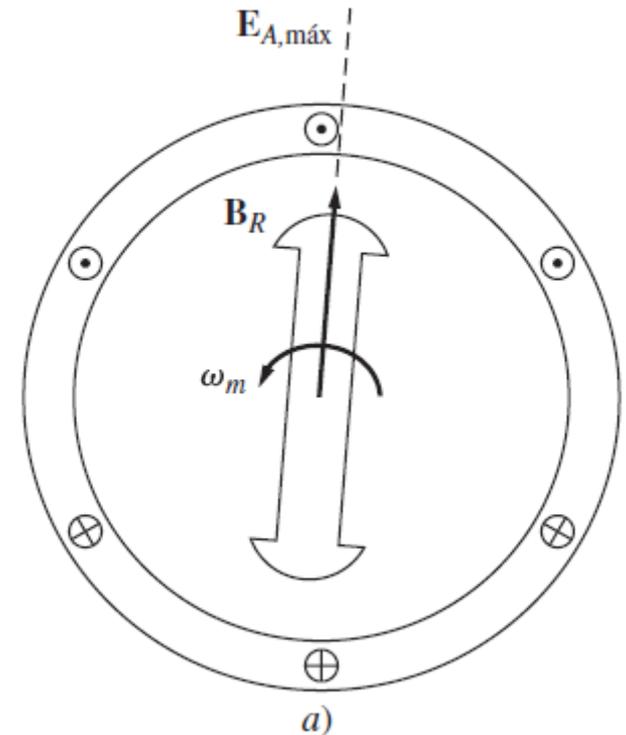


Reacción de armadura

- Como se dijo, cuando el rotor de un generador síncrono gira, se induce una tensión \hat{E} en los devanados del estator. Si se añade una carga a las terminales del generador, la corriente fluye.
- Esta corriente de armadura genera su propio campo magnético en la máquina, el cual distorsiona el campo magnético original del rotor y altera el voltaje de fase resultante.
- A este efecto se le denomina **reacción de armadura o del inducido**, porque la corriente del estator afecta el campo magnético del rotor que lo produjo en primera instancia.
- La reacción de armadura se explica de mejor forma en las diapositivas siguientes.

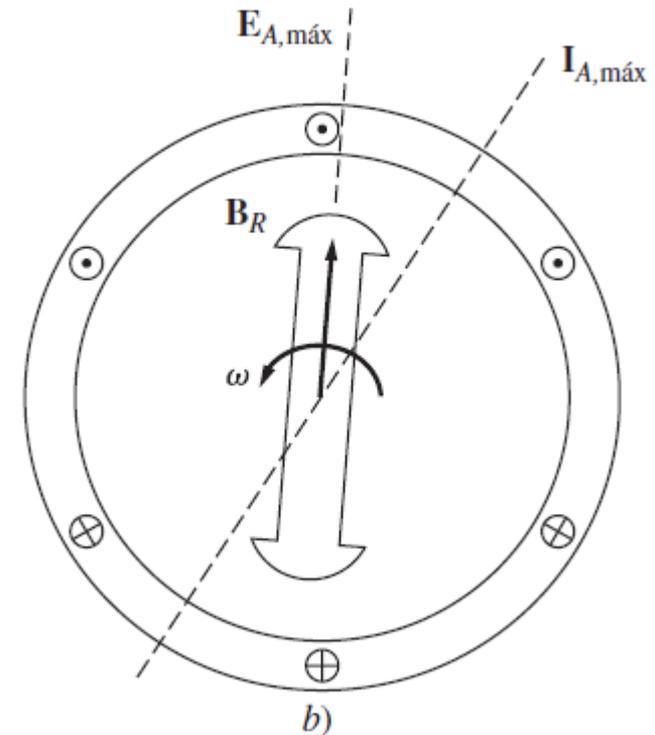
Reacción de armadura

- La figura *a)* muestra un rotor bipolar que gira dentro de un estator trifásico. No hay ninguna carga conectada al estator.
- El campo magnético del rotor \hat{B}_r produce un voltaje interno generado \hat{E} cuyo valor máximo coincide con la dirección de dicho campo.
- Este voltaje es positivo hacia afuera de los conductores en la parte superior de la figura y negativo hacia adentro de los conductores en la parte inferior.
- Si el generador no tiene carga, no hay flujo de corriente en el estator, y por lo tanto, \hat{E} es igual al voltaje en bornes \hat{V}



Reacción de armadura

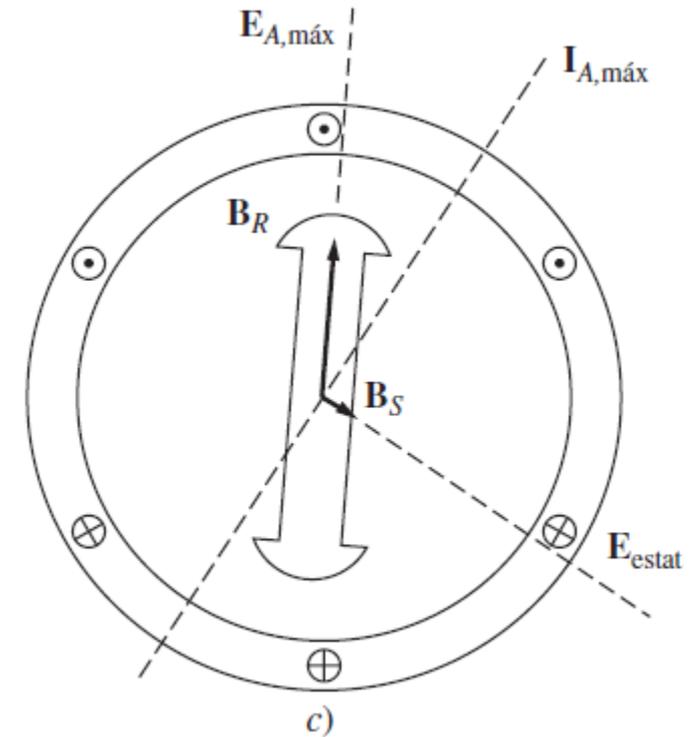
- Ahora, suponga que el generador se conecta a una carga con factor de potencia en retraso.
- Debido a que la carga está en retraso, la corriente máxima se presentará en un ángulo detrás de la tensión máxima. En la figura *b)* se observa este efecto.



Reacción de armadura

- La corriente que fluye en los devanados del estator produce su propio campo magnético. A este campo magnético del estator se le denomina \hat{B}_S , y su dirección se obtiene por medio de la regla de la mano derecha como se observa en la figura c).
- El campo magnético del estator \hat{B}_S produce su propio voltaje en el estator, al cual se le denomina \hat{E}_{estat} .
- Con dos voltajes presentes en los devanados del estator, el voltaje total en una fase es simplemente la suma del voltaje interno generador \hat{E} más el voltaje de reacción de armadura \hat{E}_{estat} :

$$\hat{V} = \hat{E} + \hat{E}_{\text{estat}}$$

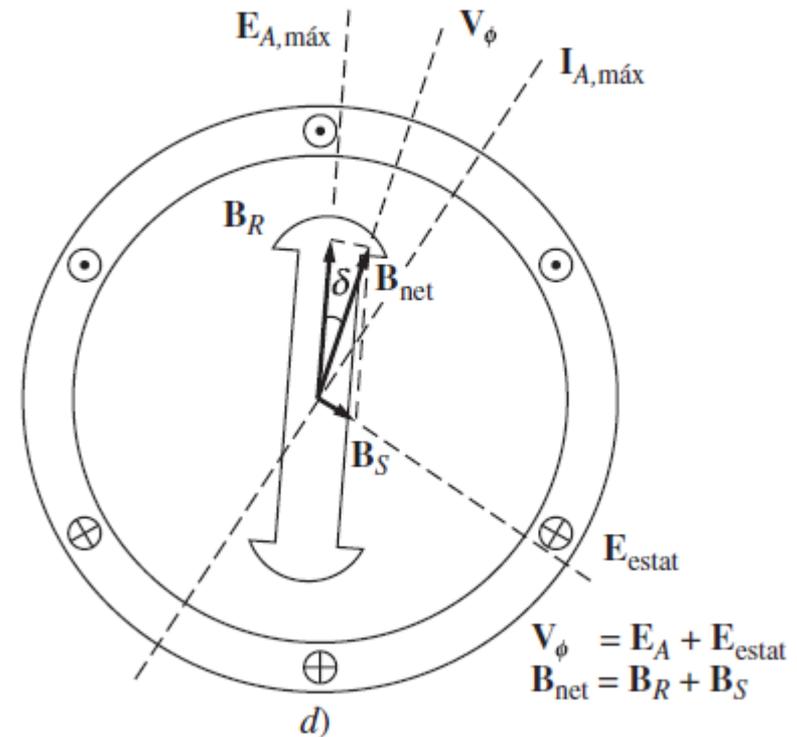


Reacción de armadura

- El campo magnético neto \hat{B}_{net} es simplemente la suma de los campos magnéticos del rotor y del estator:

$$\hat{B}_{net} = \hat{B}_r + \hat{B}_s$$

- Debido a que los ángulos de \hat{E} y \hat{B}_r son iguales y los ángulos de $\hat{E}_{estator}$ y \hat{B}_s también son iguales, el campo magnético resultante \hat{B}_{net} coincide con el voltaje \hat{V} . Los voltajes y corrientes resultantes se muestran en la figura *d*).
- El ángulo entre \hat{B}_r y \hat{B}_{net} se conoce como ángulo interno o ángulo de carga de la máquina. La magnitud de este ángulo es proporcional a la cantidad de potencia que suministra el generador.





Devanados d y q

- Para estudiar el comportamiento de las máquinas sincrónicas, se asumen dos devanados ficticios denominados devanado de eje directo o eje d y devanado de cuadratura o eje q, que reemplazan a los devanados reales del estator.
- Estos devanados ficticios están fijos con el rotor, de modo que giran de forma solidaria con el a velocidad de sincronismo.
 - El eje directo es colineal con el eje magnético del campo en todo momento.
 - El eje de cuadratura es perpendicular al eje d, al cual adelanta en 90° .
- En base a estos devanados ficticios, se definen los siguientes parámetros:
 - r_s : resistencia por fase de estator (corresponde a la de los devanados reales).
 - x_d : reactancia del eje directo.
 - x_q : reactancia de eje en cuadratura.



Ecuaciones de motor y generador

- Las corrientes por ambos devanados ficticios de estator, \hat{i}_d e \hat{i}_q , están desplazadas en 90° , y su suma fasorial corresponde a la corriente por fase de los devanados reales:

$$\hat{i} = \hat{i}_d + \hat{i}_q$$

- Así, la tensión por fase de los devanados reales queda dada por las siguientes expresiones:

Motor:

$$\hat{V} = r_s \hat{i} + jx_d \hat{i}_d + jx_q \hat{i}_q + \hat{E}$$

Generador:

$$\hat{E} = r_s \hat{i} + jx_d \hat{i}_d + jx_q \hat{i}_q + \hat{V}$$

- Donde \hat{E} es la tensión interna de la máquina, y corresponde al voltaje en vacío por fase, el cual depende proporcionalmente (en la zona lineal) de la corriente i_c del rotor y de la velocidad. La tensión interna está ubicada sobre el eje q.

Ecuaciones de motor y generador

- Los diagramas fasoriales correspondientes se ilustran a continuación, donde por convención se le ha asignado a \hat{V} ángulo cero, \hat{E} con ángulo δ e \hat{i} con ángulo ψ .

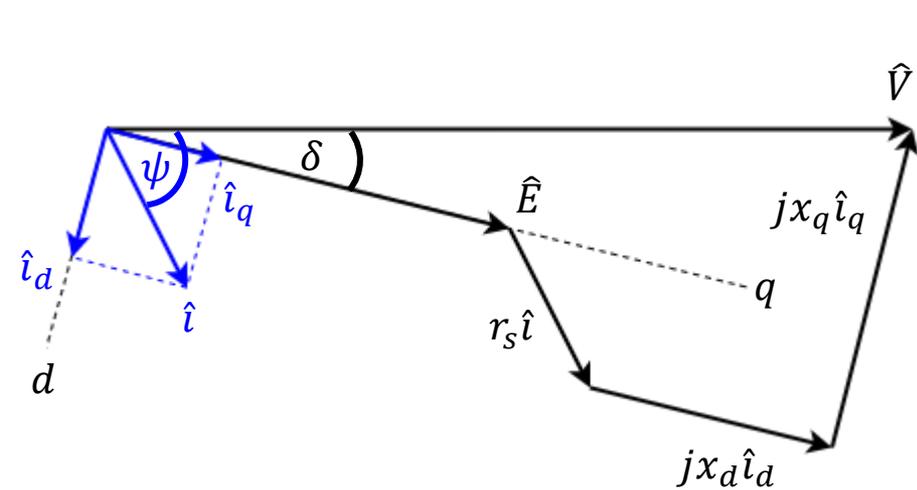


Diagrama fasorial del motor

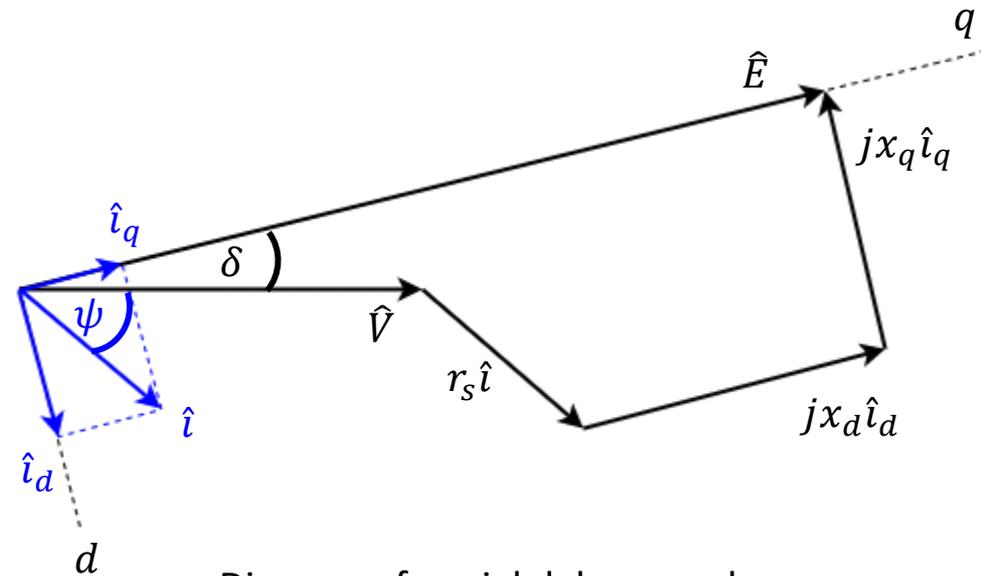


Diagrama fasorial del generador

- Note que el motor se caracteriza por tener $\delta < 0$, y el generador $\delta > 0$. Este ángulo es el mismo de la ecuación de torque y corresponde al ángulo de carga de la máquina.

Ecuaciones de motor y generador

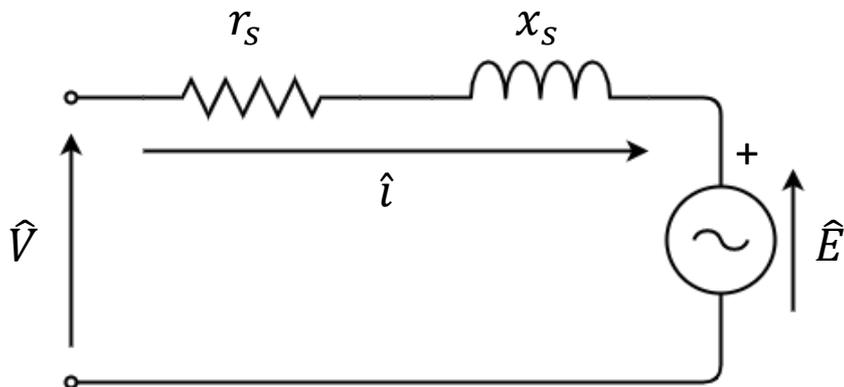
- En general x_d y x_q son diferentes, siendo $x_d > x_q$. Sin embargo, cuando la máquina es de toro cilíndrico, se cumple que $x_d = x_q = x_s$, llamada reactancia sincrónica. En este caso las ecuaciones anteriores se simplifican a:

Motor:

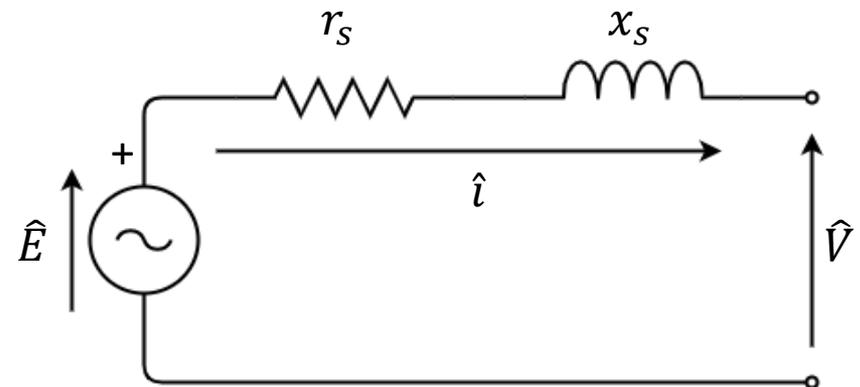
$$\hat{V} = (r_s + jx_s)\hat{i} + \hat{E}$$

Generador:

$$\hat{E} = (r_s + jx_s)\hat{i} + \hat{V}$$



Modelo circuital del motor



Modelo circuital del generador

Ecuaciones de motor y generador

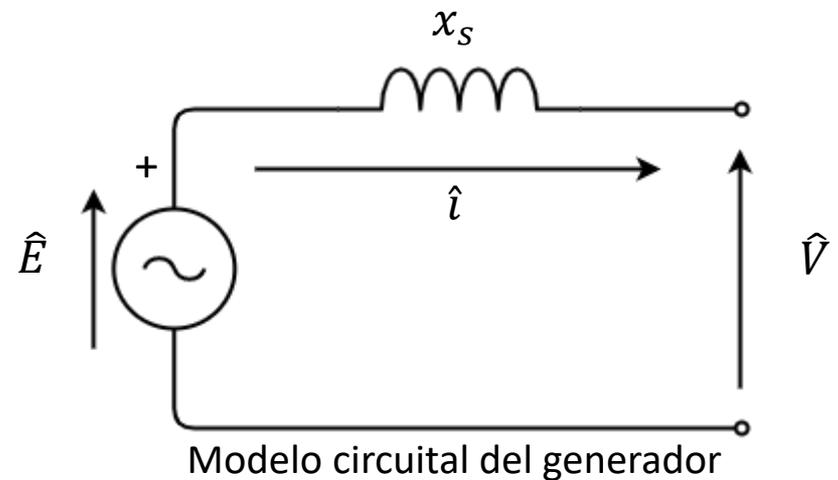
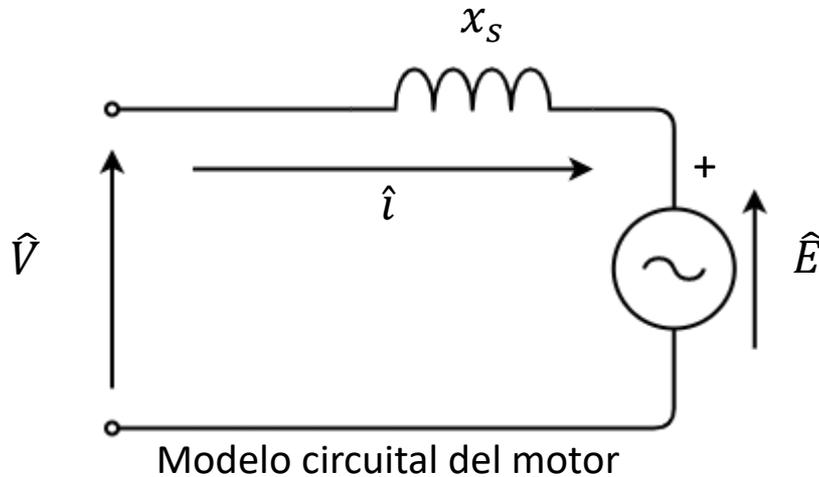
- Con mucha frecuencia, el termino resistivo suele despreciarse con respecto a la reactancia síncrona, y se tienen las ecuaciones:

Motor:

$$\hat{V} = jx_s \hat{i} + \hat{E}$$

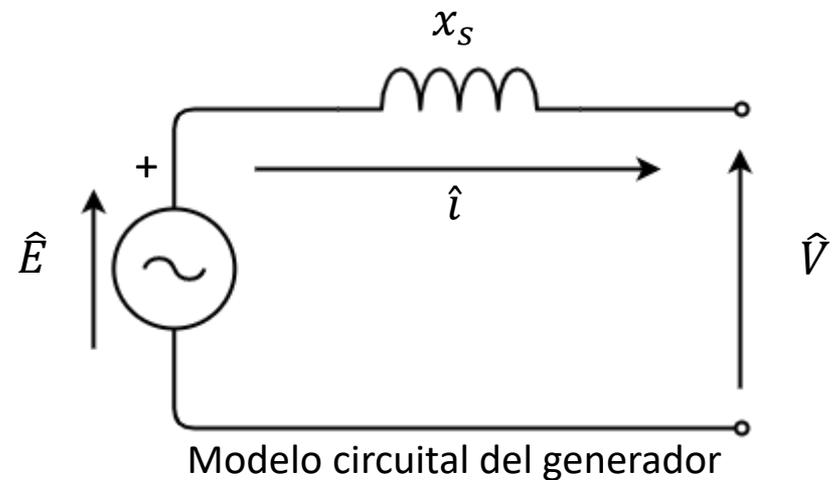
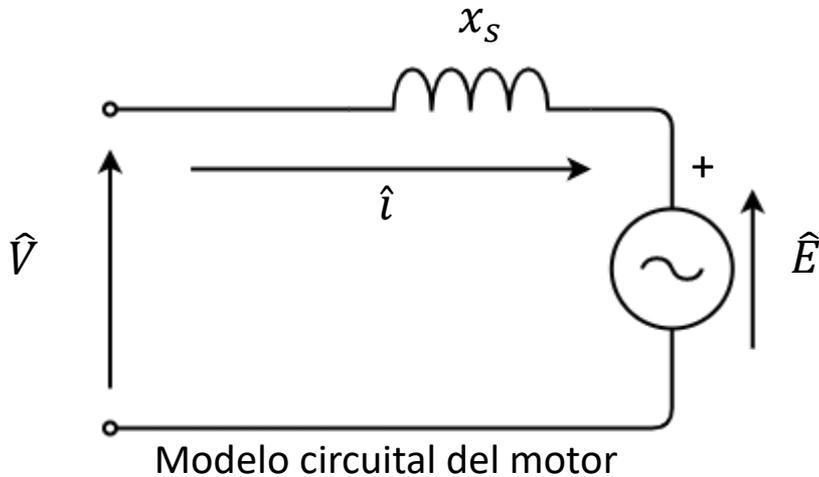
Generador:

$$\hat{E} = jx_s \hat{i} + \hat{V}$$



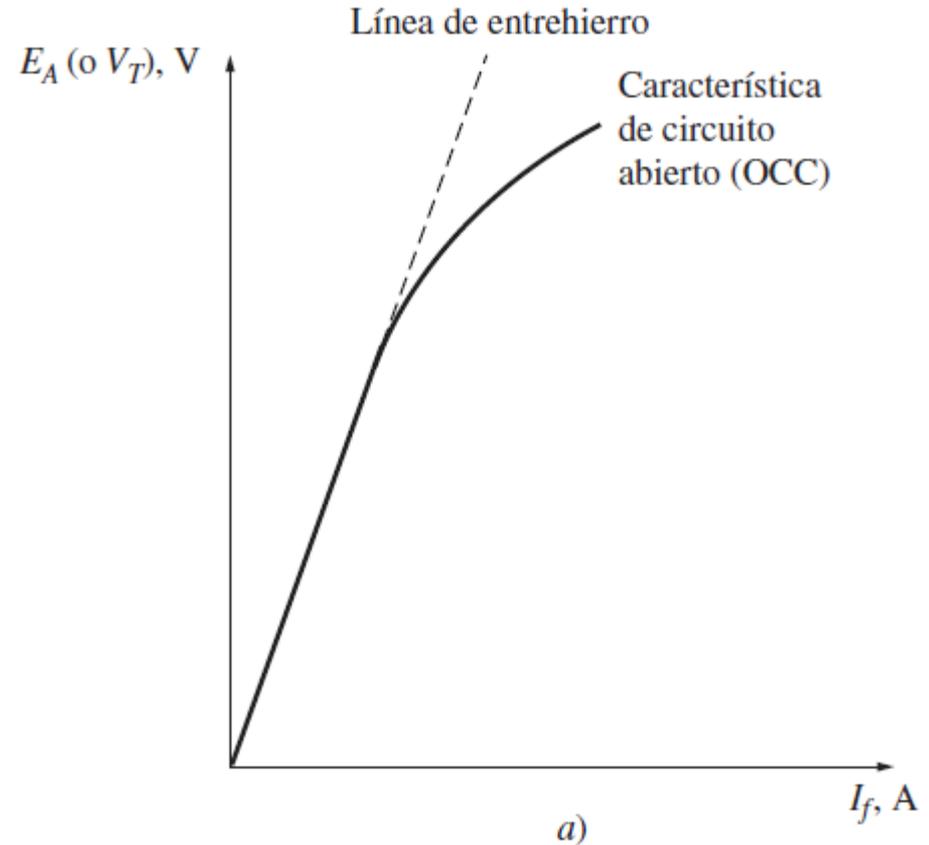
Ecuaciones de motor y generador

- Este modelo corresponde al utilizado en estudios de máquinas síncronas (y estudios sistémicos) en régimen permanente o estado estacionario.
- Como se ve, consta de una fuente de tensión interna y una reactancia serie.



Curva de excitación (prueba en vacío)

- La curva de excitación o de saturación en vacío es la curva que representa la tensión en bornes de la máquina (operando como generador) en vacío, en función de la corriente del rotor (o de campo o de excitación) i_r .
- En vacío, como la corriente de estator es nula ($\hat{i} = 0$), se tiene que el voltaje en bornes es igual a la tensión interna, es decir, $\hat{E} = \hat{V}$, es decir, esta curva es $E = f(i_r)$, y como la fem E es proporcional al flujo, esta característica tendrá la misma forma que la curva $B - H$ del núcleo.





Determinación de la reactancia sincrónica

- Para determinar de manera experimental la reactancia sincrónica de una máquina sincrónica de rotor cilíndrico, se debe determinar de manera experimental las dos curvas siguientes:
 - Curva de circuito abierto o excitación.
 - Curva de cortocircuito.
- Para obtener la **característica de excitación** de forma experimental, se debe hacer variar la corriente de excitación desde cero hasta el valor nominal, estando la máquina **girando a velocidad nominal**, anotando el valor de la corriente de campo y la tensión en bornes $V = E$.
- En esta prueba, se debe tener cuidado de no superar la corriente máxima permitida por el devanado de campo, de no superar por mucho la tensión nominal del estator y de mantener la velocidad constante durante toda la prueba.

Determinación de la reactancia sincrónica

- Por otro lado, para obtener la **curva de cortocircuito** se deben cortocircuitar los terminales del estator de la máquina sincrónica. Luego, la corriente de campo se debe aumentar gradualmente **teniendo cuidado de que la corriente de armadura no alcance valores que puedan ser perjudiciales para la máquina.**
- Esta prueba debe hacerse a una velocidad aproximadamente igual a la nominal. En las condiciones en que se efectúa la prueba, el voltaje en bornes V es cero y la corriente de armadura i se ve limitada únicamente por la impedancia interna de la máquina, o impedancia sincrónica, que para el caso del rotor cilíndrico, es:

$$z_s = r_s + jx_s$$

- La curva de cortocircuito representa la corriente en cada fase de la armadura en función de la corriente de excitación cuando la máquina se hace trabajar a una velocidad aproximadamente igual a la nominal estando sus terminales en cortocircuito.

Determinación de la reactancia sincrónica

- Como en la impedancia sincrónica predomina fuertemente la reactancia sincrónica sobre la resistencia, la corriente de cortocircuito se encontrará atrasada con respecto a la fem \hat{E} en un ángulo cercano a 90° . Así, el diagrama fasorial en este caso es:

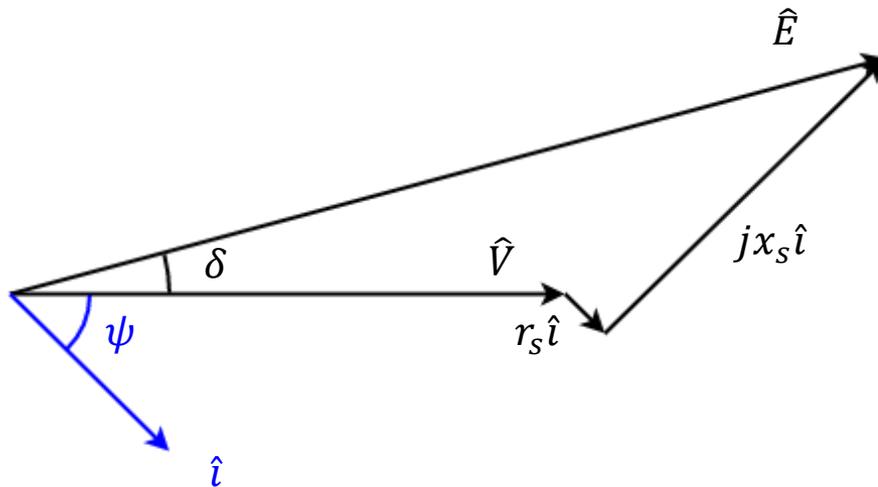


Diagrama fasor general

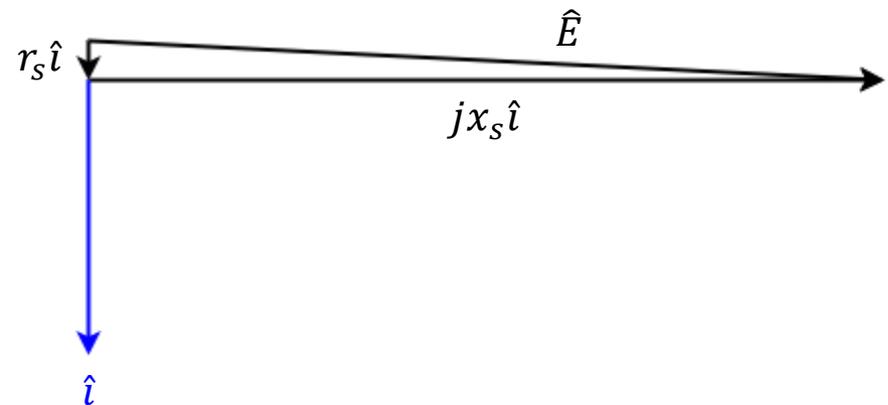
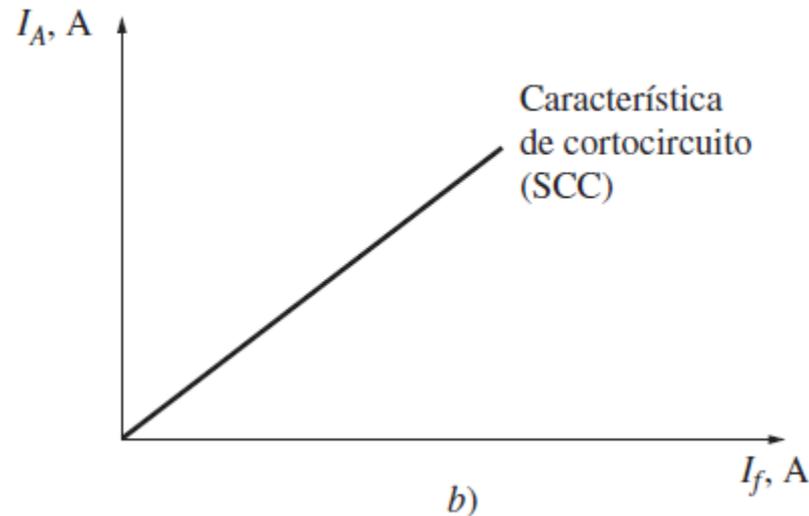


Diagrama fasor de cortocircuito

- Como se trabaja con corrientes de campo reducidas para que la corriente de armadura no exceda el valor nominal a plena carga, el circuito magnético no está saturado

Determinación de la reactancia sincrónica

- La fem \hat{E} será entonces proporcional a la corriente de excitación, como la corriente de armadura es a su vez proporcional a \hat{E} , la característica de cortocircuito es una recta como se ilustra a continuación:



- Las características de circuito abierto, de entrehierro y de cortocircuito, permiten calcular las denominadas **impedancia sincrónica saturada** y la **impedancia sincrónica no saturada**.

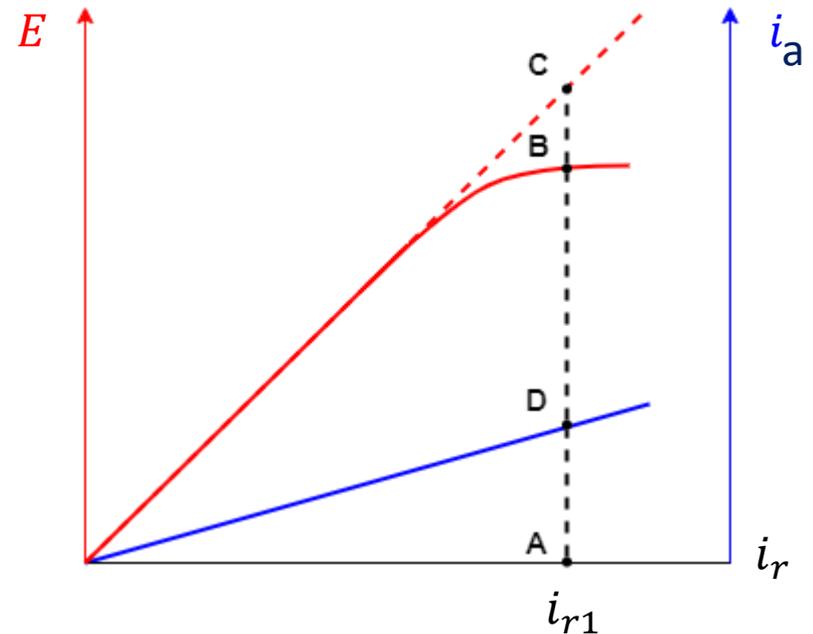
Determinación de la reactancia sincrónica

- En la figura, \overline{AB} representa el voltaje que se obtendría en vacío con la corriente de excitación i_{r1} , \overline{AD} es la corriente de armadura que se obtendría con una corriente de i_{r1} estando la máquina en cortocircuito.
- La impedancia sincrónica saturada queda dada por:

$$z_s = \frac{\overline{AB}[V]}{\overline{AD}[A]}$$

- La impedancia sincrónica no saturada queda expresada por:

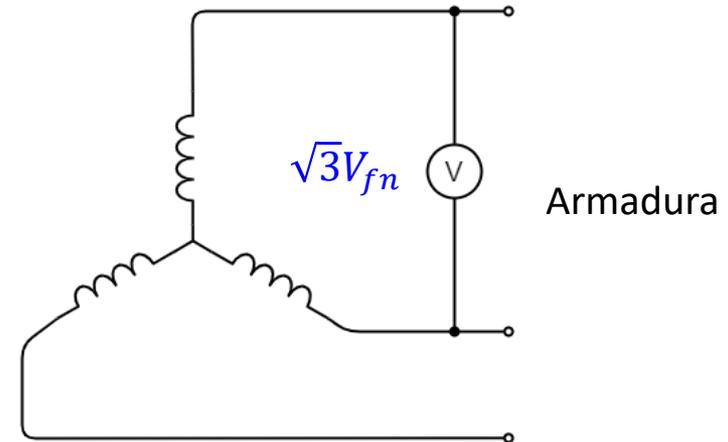
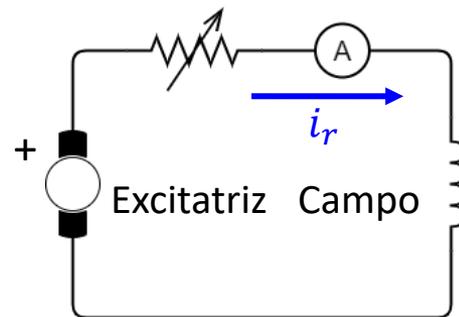
$$z_s = \frac{\overline{AC}[V]}{\overline{AD}[A]}$$



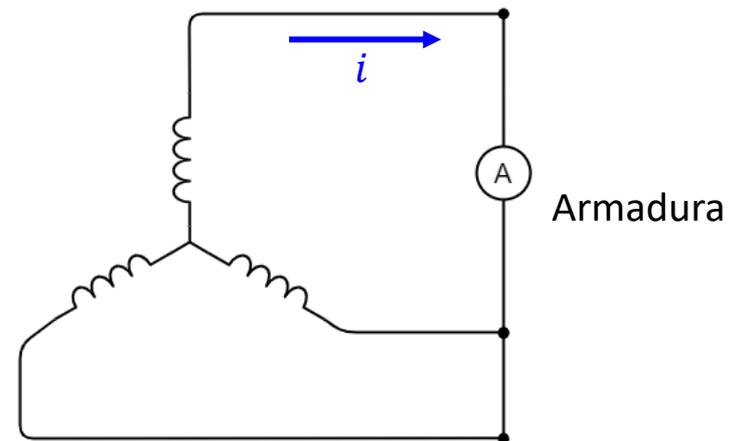
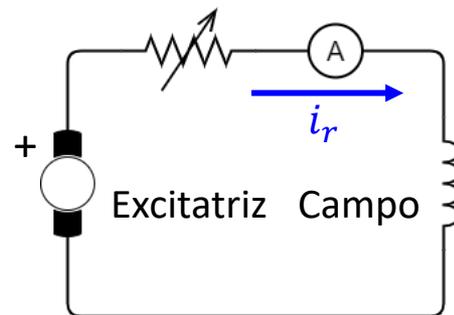
Determinación de la reactancia sincrónica

- Los circuitos para las pruebas de circuito abierto y cortocircuito son los siguientes:

Circuito prueba de circuito abierto



Circuito prueba de cortocircuito





Agenda

- Introducción
- Principio de funcionamiento
- Aspectos constructivos
- Modelo circuital
- Análisis en estado estacionario



Potencias activa y reactiva

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

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

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

- Los signos de P y Q darán cuenta de la dirección en que fluye cada una de las potencias. Valores negativos significan potencia entrando a la máquina, mientras que valores positivos corresponden a potencia saliendo de la máquina.



Potencias activa y reactiva

- Para el caso de rotor cilíndrico, donde $x_d = x_q = x_s$, las expresiones anteriores se reducen a:

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

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

- Siendo además ω_s la velocidad de sincronismo, el torque en el eje es:

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

- Como además $\omega_s = \frac{4\pi}{p} f$, se tiene que:

$$T = \frac{p}{4\pi f} 3P$$

- Note que mientras más polos tiene una máquina (gira más lento), mayor torque realiza para una misma potencia eléctrica (nótese que el factor “3” en la expresión anterior se debe a que la máquina es trifásica).

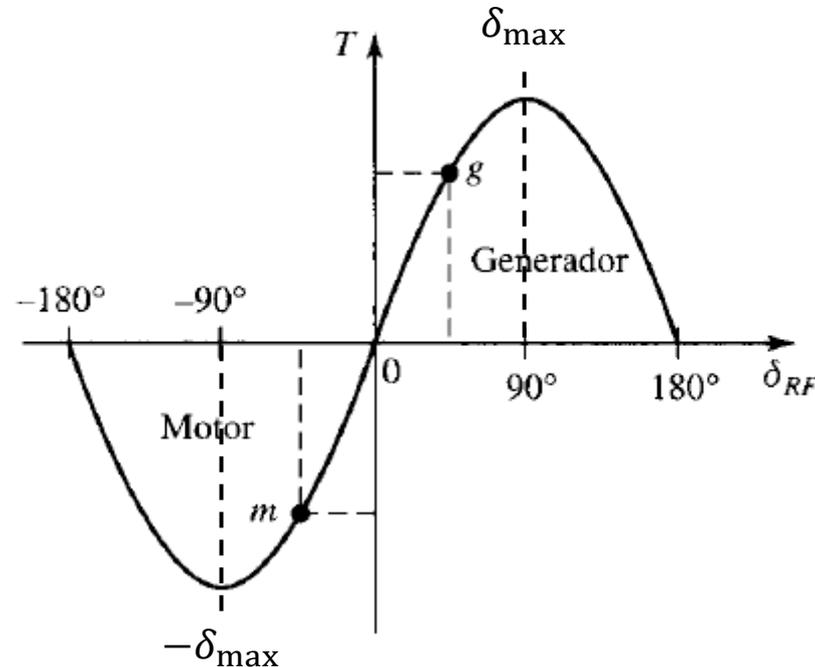


Potencias activa y reactiva

- Así, en un motor, como $\delta < 0$, resulta obviamente que $P < 0$. Por el contrario, en un generador se tiene que $\delta > 0$, por lo que $P > 0$.
- La potencia reactiva Q puede ser mayor, menor o igual a cero en ambos casos (motor o generador), dependiendo de la magnitud de \hat{E} .
 - $E > V$ se denomina operación sobreexcitada, $Q > 0$.
 - $E < V$ se denomina operación subexcitada, $Q < 0$.
- Recuerde que $\hat{E} = (E \angle \delta)$ y $\hat{V} = (V \angle 0)$

Potencias activa y reactiva

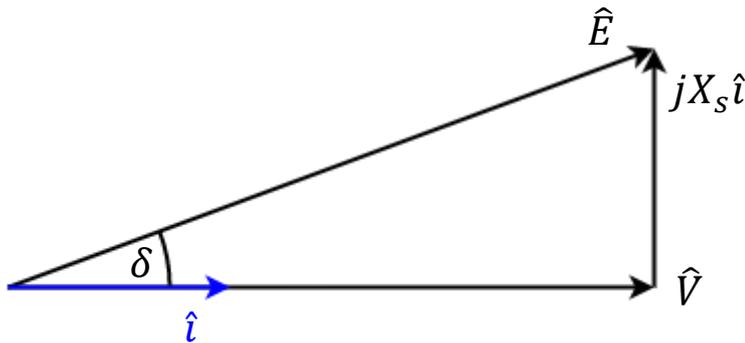
- La característica de potencia (o torque) en función de δ se muestra en la siguiente figura:



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

Diagramas fasoriales

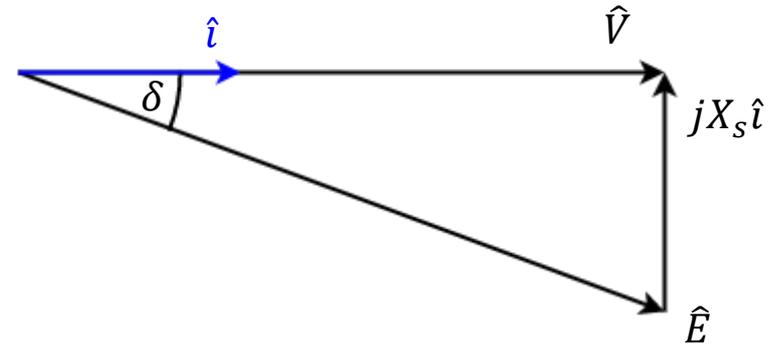
- Una máquina síncrona puede entregar o absorber potencia activa y reactiva desde la red eléctrica a la cual se conecta. Las relaciones de tensión y corriente para distintas formas de operación se muestran en los siguientes diagramas fasoriales.



Generador unitario

$$P > 0$$

$$Q = 0$$



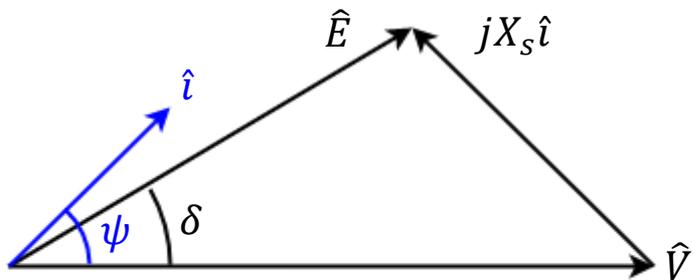
Motor unitario

$$P < 0$$

$$Q = 0$$



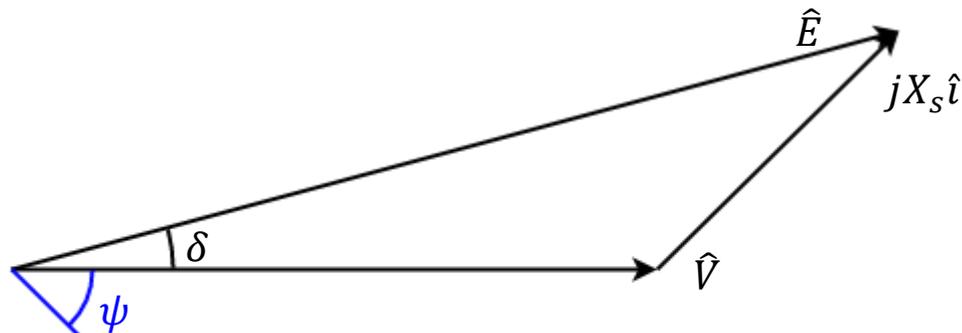
Diagramas fasoriales



Generador subexcitado

$$P > 0$$

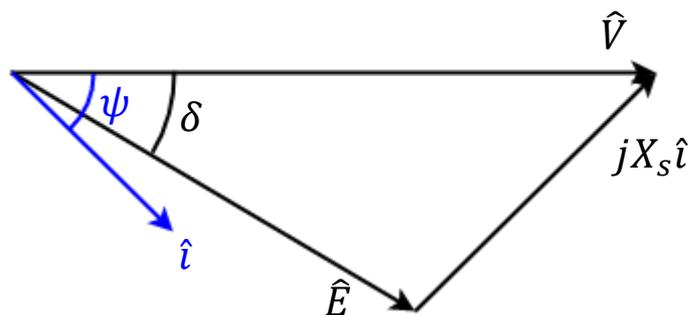
$$Q < 0$$



Generador sobreexcitado

$$P > 0$$

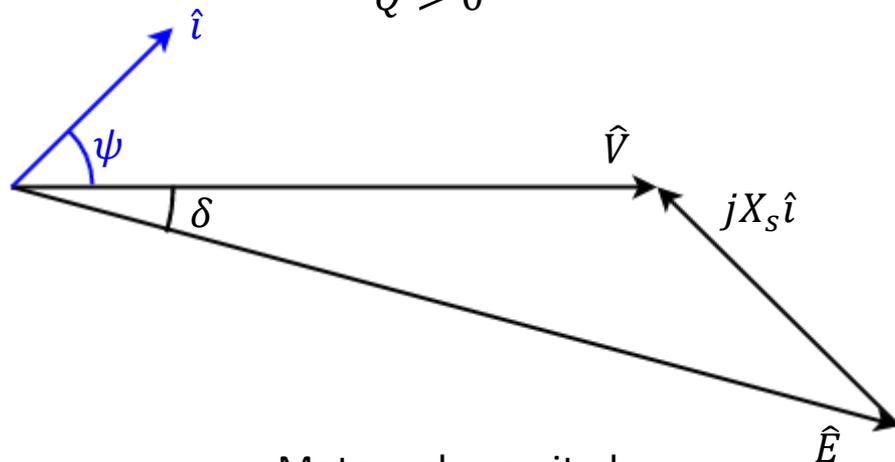
$$Q > 0$$



Motor subexcitado

$$P < 0$$

$$Q < 0$$



Motor sobreexcitado

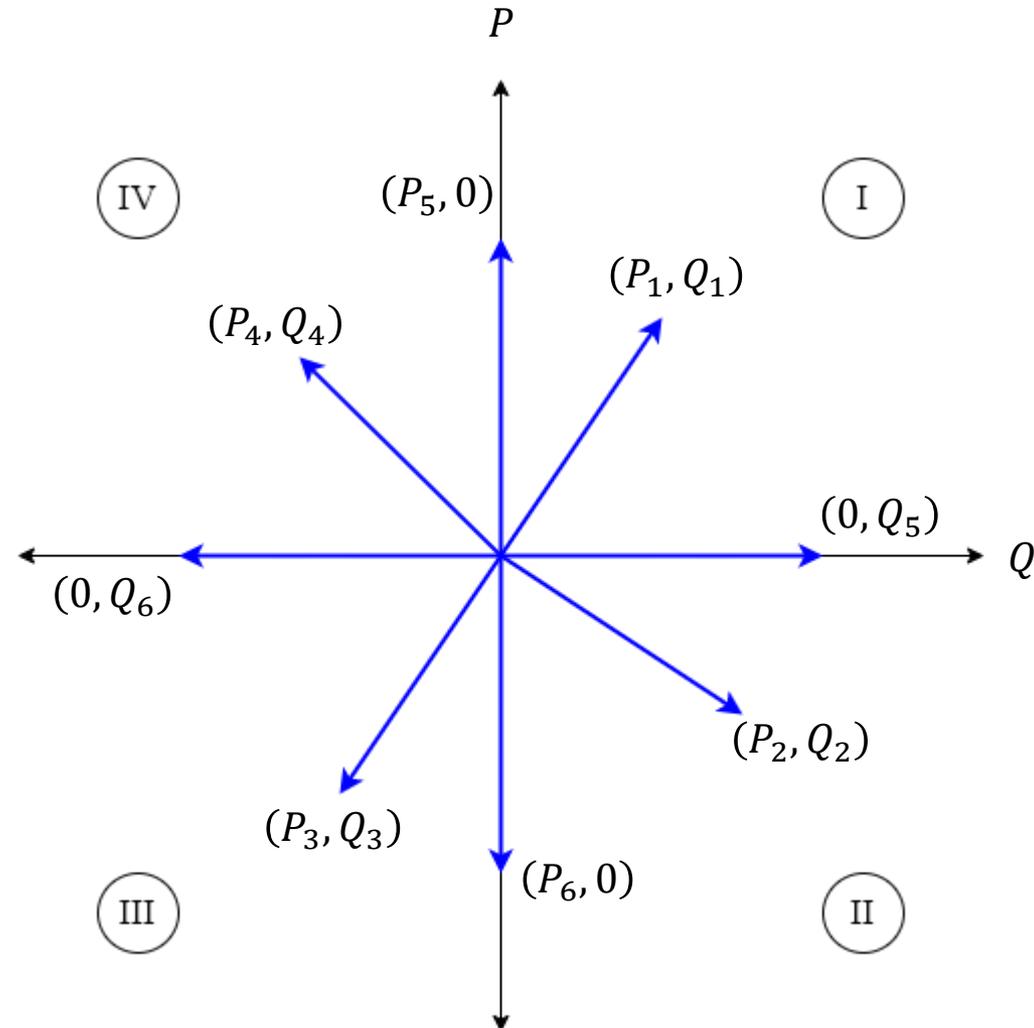
$$P < 0$$

$$Q > 0$$

Cuadrantes de operación

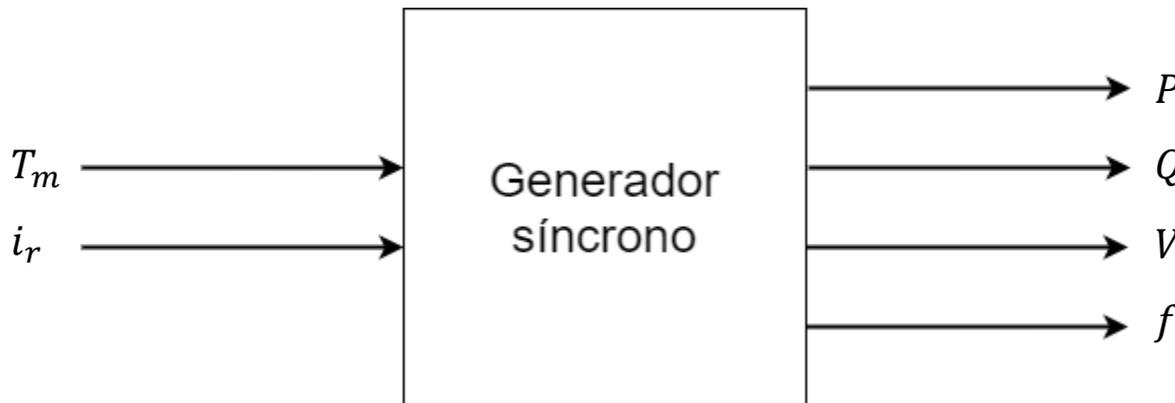
- La figura siguiente muestra la operación de una máquina síncrona en los cuatro cuadrantes de un diagrama P-Q.

Punto	Operación
(P_1, Q_1)	Generador sobreexcitado
(P_2, Q_2)	Motor sobreexcitado
(P_3, Q_3)	Motor subexcitado
(P_4, Q_4)	Generador subexcitado
$(0, Q_5)$	Condensador síncronico
$(0, Q_6)$	Reactor síncronico
$(P_5, 0)$	Generador unitario
$(P_6, 0)$	Motor unitario



Operación de un generador sincrónico

- El comportamiento de un generador sincrónico con una carga varía, lo cual depende del factor de potencia de la carga y de que el generador opere solo o en paralelo con otros generadores sincrónicos.
- Así, un **generador sincrónico** puede verse como un sistema con **dos variables de entrada o de control** (el torque mecánico T_m y la corriente de excitación i_r) y **cuatro variables de salida** (las potencias activa P y reactiva Q , la tensión en bornes V y la frecuencia eléctrica f).



- Se pueden estudiar dos casos extremos, un **generador conectado a una barra infinita** y un **generador operando en isla**.

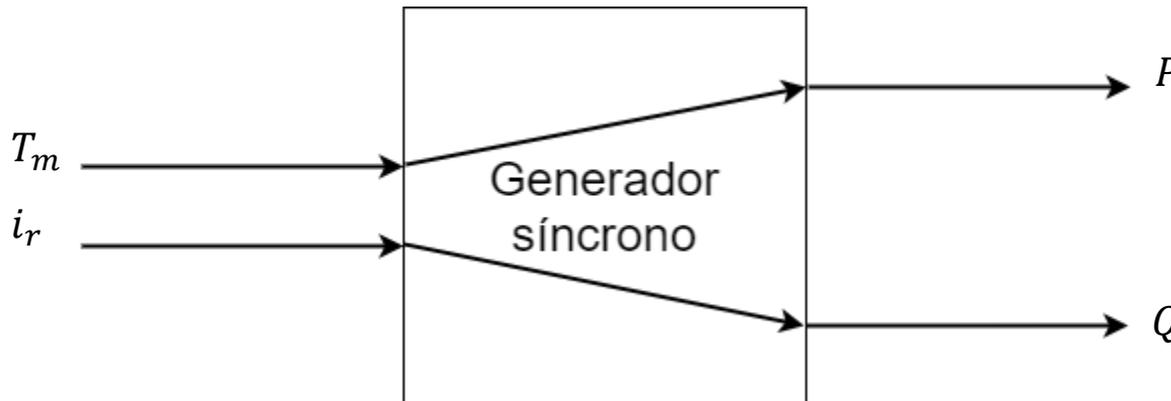


Operación de un generador sincrónico – Barra infinita

- Por el comportamiento físico inherente de las máquinas sincrónicas (ecuaciones de P , Q y T), siempre habrá acoplamiento entre cada una de las dos variables de control y las cuatro variables de salida. Por lo tanto, una variación en el torque o en la excitación implicará un cambio simultáneo en P , Q , V y f . La mayor o menor importancia de estos cambios dependerá del tamaño y estructura del sistema eléctrico completo (es decir, de las otras máquinas), lo que complica bastante el control de cada generador.
- Afortunadamente, el grado de interacción se reduce en la medida en que crece el tamaño del sistema. En el límite, cuando un sistema es muy grande en relación con la máquina en estudio, se habla de una **barra infinita**.
 - La frecuencia se considera fija, ya que no se modifica al variar el torque de una máquina comparativamente pequeña.
 - La tensión se considera constante, y no variará aunque se modifique la excitación de la máquina.
- En estas condiciones, las variables de salida de cada máquina se reducen a solo dos, P y Q .

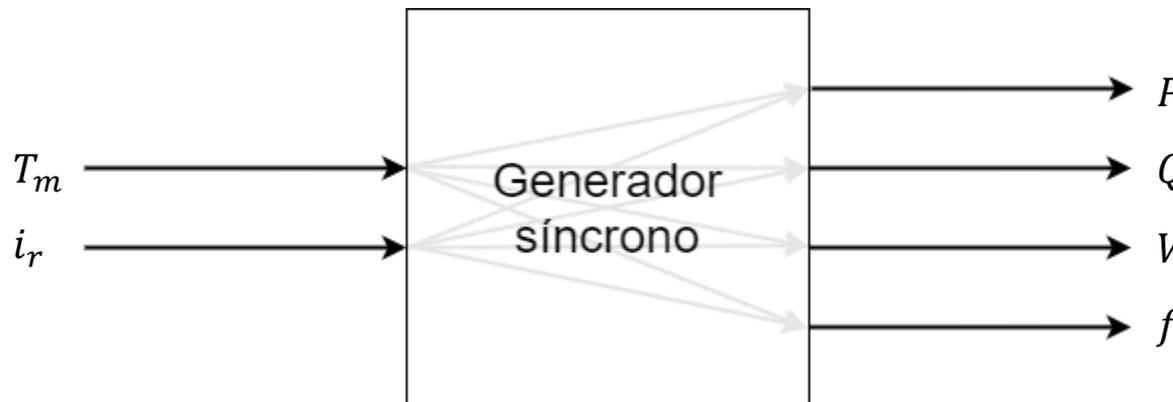
Operación de un generador sincrónico – Barra infinita

- Por otra parte, normalmente ocurre que los ángulos de carga de las máquinas, en régimen permanente, no son superiores a 30° , por lo que se produce un desacople en las variables de entrada y salida como sigue:
 - La potencia activa P se controla variando el torque mecánico de entrada T_m a través del ángulo de carga δ .
 - La potencia reactiva Q se controla variando la corriente de excitación i_r de la máquina.



Operación de un generador sincrónico – Operación en isla

- Si se considera un generador sincrónico alimentando únicamente a una impedancia, lo que se denomina operación en isla, no existen desacoples ni variables que sean constantes. En este caso:
 - Un aumento en el torque mecánico T_m implica una aceleración del rotor, con ello un aumento en la frecuencia eléctrica f y en la tensión inducida E , y por ende en la tensión en bornes V .
 - Un aumento en la corriente de excitación implica un aumento en la tensión inducida E , y por ende en la tensión en bornes V .
 - Si aumenta la tensión en bornes V y/o la frecuencia eléctrica f , aumentan las potencias activa P y reactiva Q .



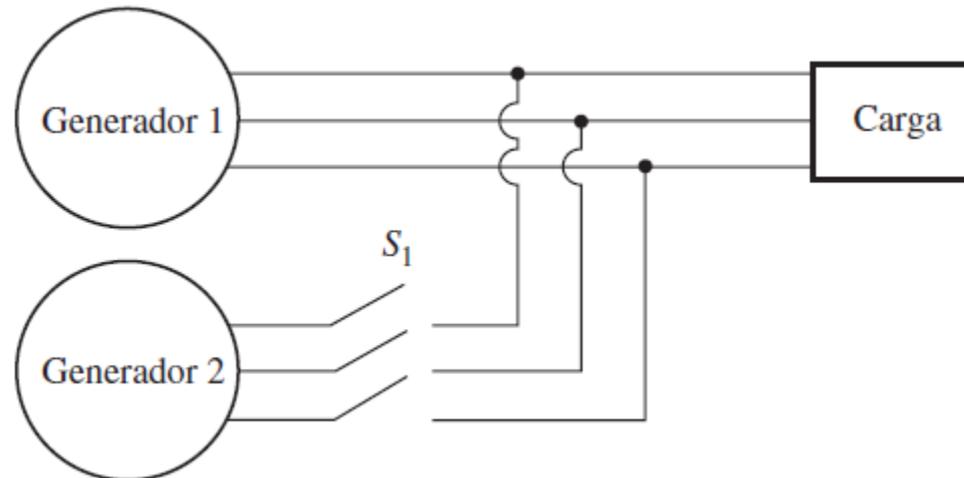


Operación de un generador sincrónico – Operación en paralelo

- Sin embargo, en el mundo actual **convencional** es muy raro encontrar que un generador sincrónico suministre independientemente su propia carga (aunque la operación en isla se está volviendo cada vez más común debido a la proliferación de **microrredes**). En general en los sistemas eléctricos de potencia hay varios generadores operando en paralelo para suministrar la potencia que requieren las cargas. Las ventajas de tener varios generadores operando son:
 - Se puede alimentar una carga más grande que si se tiene una sola máquina.
 - Se incrementa la confiabilidad del sistema de potencia, pues la falla de una máquina no causa la pérdida total de potencia en las cargas.
 - Se permite la remoción de uno o más de ellos para cortes de potencia y mantenimientos preventivos.
 - Si se utiliza un solo generador y éste no opera cerca de plena carga, entonces será relativamente ineficiente. Con varias máquinas más pequeñas que trabajen en paralelo e posible operar solo una fracción de ellas. Las que operan lo hacen casi a plena carga, y por lo tanto, de manera más eficiente.

Operación de un generador síncrono – Operación en paralelo

- En la figura se muestra un generador síncrono G_1 que suministra potencia a una carga con otro generador G_2 a punto de conectarse en paralelo con G_1 por medio del cierre del interruptor S_1 .



- Si el interruptor se cierra de manera arbitraria en cualquier momento, es posible que los generadores se dañen severamente y que la carga pierda potencia.
- Si los voltajes no son exactamente iguales en cada uno de los generadores se conectarán juntos, habrá un flujo de corriente muy grande cuando se cierre el interruptor.



Operación de un generador sincrónico – Operación en paralelo

- Así, para conectar generadores síncronos en paralelo, cada una de las tres fases debe tener **exactamente la misma magnitud de voltaje y ángulo de fase** que el conductor al que se conectará. Para lograr lo anterior, se deben cumplir las siguientes condiciones:
 - Los voltajes de fase de los dos generadores deben ser iguales en magnitud.
 - Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase.
 - Los ángulos de fase de las dos fases a deben ser iguales (no debe existir desfase).
 - La frecuencia del generador nuevo debe ser un poco mayor que la frecuencia del sistema en operación.



Carta de operación

- Las cartas de operación se emplean para determinar gráficamente las condiciones de operación de un generador conectado a un sistema eléctrico comparativamente grande.
- Son curvas de igual excitación, calculadas para una frecuencia y una tensión en bornes constante y dibujadas en un sistema de ejes cartesianos P-Q, en el cual se incluyen también los límites de la zona de operación.
- Por tratarse de generadores, solo se grafica el semiplano $P > 0$. Para fijar una escala en la excitación, se suele adoptar como corriente unitaria aquella que produce tensión nominal en vacío.
- Los factores que limitan la carta de operación son:
 - Máxima y mínima potencia activa.
 - Máxima corriente de armadura.
 - Máxima y mínima corriente de excitación.
 - Límite de estabilidad permanente.



Carta de operación - Máxima y mínima potencia activa

- Tratándose de un generador, $P \geq 0$, de modo que un límite de operación es el eje Q . Sin embargo, en máquinas térmicas, que son de rotor cilíndrico, no pueden operar, por razones de manejo del fuego, por debajo de una potencia mínima P_{\min} , lo que fija este límite inferior más arriba, típicamente en torno a un 30% de la potencia nominal.
- Por otro lado, la máquina motriz (turbina) presenta limitaciones propias, que le impiden entregar más que cierta potencia activa máxima P_{\max} . En consecuencia, habrá un límite de operación para el generador, que será una recta paralela al eje Q , trazada a una distancia P_{\max} del origen.
 - Aunque no debiera ocurrir en una central bien planificada, eventualmente, y por razones del mercado de generadores, se puede dar el caso de que el generador sea algo pequeño para la potencia de la turbina, de modo que el límite P_{\max} quede fuera del diagrama.



Carta de operación - Máxima corriente de armadura

- En las máquinas reales, existe un valor máximo posible de la corriente de armadura, el cual es impuesto por:
 - Calentamiento del estator.
 - Vida útil del aislamiento.
- Esta limitación genera otro límite para la carta de operación, el cual corresponde una circunferencia con centro en el origen y radio $V i_{\max}$.
- Por razones económicas, y puesto que normalmente no se desea operar entregando pura potencia activa, sino una combinación de P y Q , este límite es algo superior al de máxima potencia activa, es decir, $V i_{\max} \geq P_{\max}$. En la intersección de ambos límites se tiene el factor de potencia nominal.
- Cabe mencionar que, al ser este un límite por calentamiento (acumulado), puede ser sobrepasado por breves períodos de tiempo.

Carta de operación - Máxima y mínima corriente de excitación

- Como existe un valor máximo posible para la corriente de excitación, impuesto ya sea por el calentamiento del rotor o por las características propias de la excitatriz, hay un límite para la operación del generador, que es una circunferencia de centro $\left(-\frac{V^2}{x_s}, 0\right)$ y radio $\frac{VE_{\max}}{x_s}$. Debido a las características normales de diseño económico de las excitatrices, este límite resulta inferior al de corriente de armadura solo para factores de potencia inductivos pequeños (cerca del eje $+Q$).
- Por otro lado, en la práctica no es factible alcanzar el límite teórico por mínima excitación ($E = 0$) debido a que no es posible anular los flujos residuales de la excitatriz principal. Aunque se elimine la corriente de excitación, siempre aparecerá una fem E reducida. Lo usual es estimar E_{\min} en un 5 a 10% de la excitación necesaria con carga nominal, es decir, un 10 a 15% de V . Habrá entonces un límite de operación del generador, dado por una circunferencia de radio $\frac{VE_{\min}}{x_s}$ y centro $\left(-\frac{V^2}{x_s}, 0\right)$. En consecuencia, la potencia reactiva que puede absorber el generador no es muy grande.

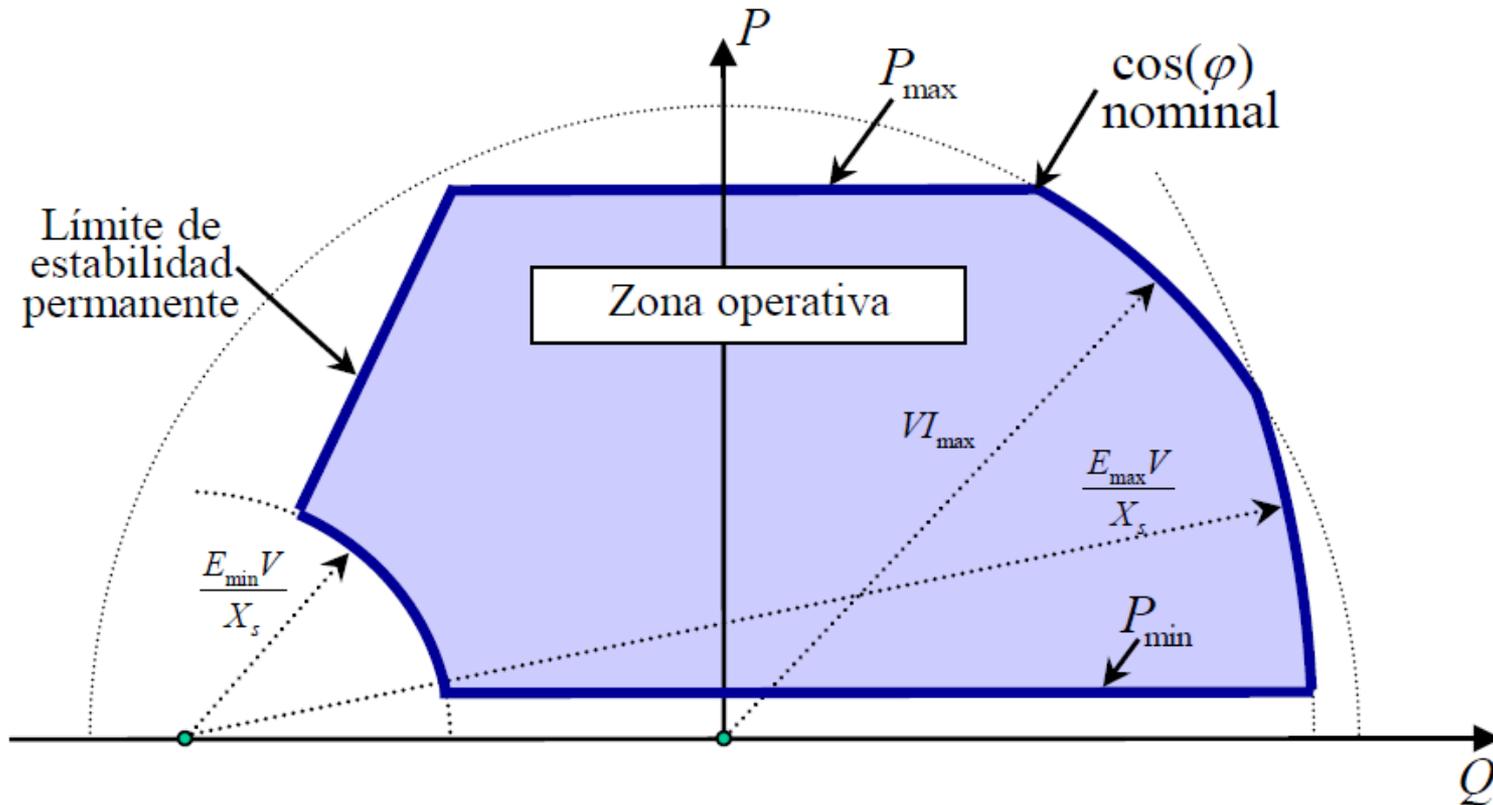


Carta de operación - Límite de estabilidad permanente

- Existe una limitación de operación impuesta por la inestabilidad de la máquina que se produce al alcanzar el ángulo de carga $\delta = 90^\circ$ en las máquinas de rotor cilíndrico. Este límite teórico puede ser representando en términos estáticos, por una recta paralela al eje P que cruza el punto $\left(-\frac{V^2}{x_s}, 0\right)$, recta en cuyos puntos la potencia reactiva Q es negativa.
- Siendo poco aconsejable trabajar en este límite teórico (ya que en la realidad es imposible controlar las variaciones de la carga), se acostumbra a definir un **límite práctico de estabilidad** (que se justifica por experiencias y medidas en máquinas reales). Este límite práctico se suele representar con una recta con origen en el punto $\left(-\frac{V^2}{x_s}, 0\right)$ y un ángulo arbitrario de 70° respecto del eje de la potencia reactiva Q .

Carta de operación

- En la figura se muestra un diagrama de operación típico, que incluye los límites anteriormente mencionados. Cualquier condición operativa situada dentro de estos límites puede ser conseguida, operando adecuadamente los controles de la potencia activa y de la excitación.





Operación de un motor sincrónico

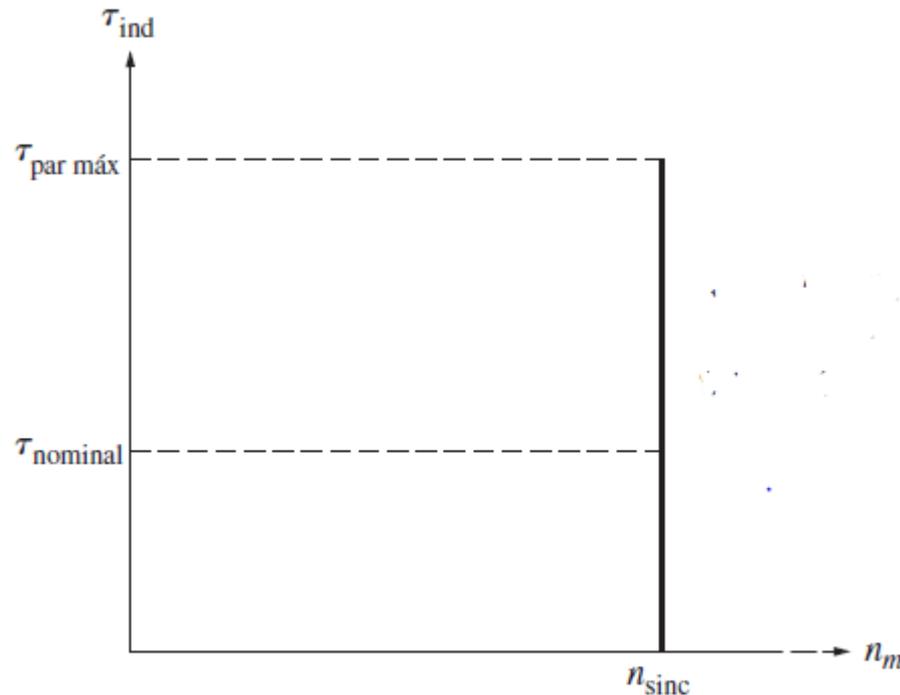
- Los motores síncronos suministran potencia a cargas que son básicamente dispositivos de velocidad constante. Es normal que estén conectados a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales, por lo que los sistemas de potencia parecen barras infinitas. Esto quiere decir que el voltaje en los terminales y la frecuencia del sistema serán casi constantes sin importar la cantidad de potencia consumida por el motor.
- La velocidad de rotación del motor está asociada a la tasa de rotación del CMR, la cual está relacionada con la frecuencia eléctrica f , por lo que la velocidad del motor síncrono será constante sin que importe la carga y será igual a la velocidad de sincronismo, según la ecuación ya vista:

$$n_s = n_m = \frac{120}{p} f$$



Operación de un motor síncrono

- En la figura se muestra la característica torque velocidad de una máquina síncrona. La velocidad en estado estacionario del motor es constante desde el vacío hasta el torque máximo.





Operación de un motor sincrónico

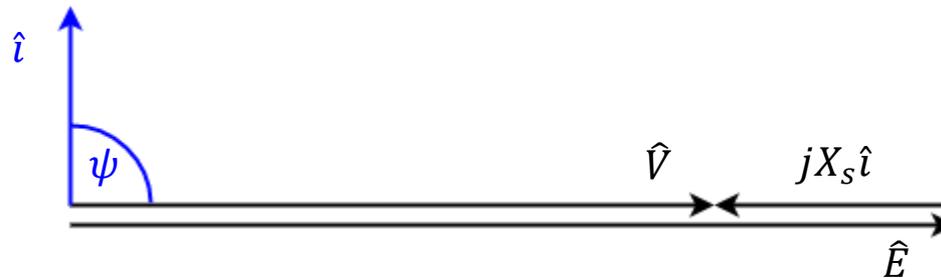
- La ecuación del torque es:

$$T = \frac{3pVE}{4\pi f x_s} \sin \delta$$

- El torque máximo se presenta cuando $\delta = 90^\circ$. Sin embargo, los torques normales a plena carga son mucho menores que éste. De hecho, el torque máximo es por lo regular tres veces el par de la máquina a plena carga.
- Cuando el torque en el eje de un motor síncrono excede el torque máximo, el rotor no puede seguir unido al CMR del estator, sino que comienza a retrasarse en relación con él. Conforme el rotor pierde velocidad, el campo magnético del estator “lo rebasa” varias veces y la dirección del torque inducido en el rotor se invierte con cada rebase. El enorme torque resultante oscila primero hacia un lado y luego hacia el otro y provoca que todo el motor vibre con fuerza. La pérdida de sincronización una vez que se excede el par máximo se conoce como deslizamiento de polos.
- Estas ecuaciones indican que mientras más grande sea la corriente de campo, es decir, la tensión E , más grande será el torque máximo del motor. Por lo tanto, hay una ventaja en la estabilidad cuando se opera el motor con una gran corriente de campo.

Operación de un motor síncrono como condensador

- Un motor síncrono adquirido para accionar una carga puede operar sobreexcitado para suministrar potencia reactiva Q a un sistema de potencia. De hecho, a veces se compra un motor síncrono y se opera en vacío, **simplemente para corregir el factor de potencia**. En este caso el diagrama fasorial es:



- Si se examinan \hat{V} e \hat{i} , la relación voltaje-corriente entre ellos se parece a la de un capacitor. Un motor síncrono sobreexcitado en vacío parece un capacitor grande para el sistema de potencia.



Referencias del capítulo

- S. Chapman, *Máquinas eléctricas*, 5ta edición, capítulos 3, 4 y 5. Mc Graw Hill, 2012.
- A. Fitzgerald, C. Kingsley & S. Umans, *Máquinas eléctricas*, 6ta edición, capítulos 4 y 5. Mc Graw Hill, 2013.
- N. Morales & J: Romo, *Apunte de Máquinas Síncronas*, DIE Universidad de Chile, 1982.
- W. Brokering & R. Palma, *Atrapando el sol en los Sistemas Eléctricos de Potencia*, 1ra edición, capítulo 3. DIE Universidad de Chile, 2018.