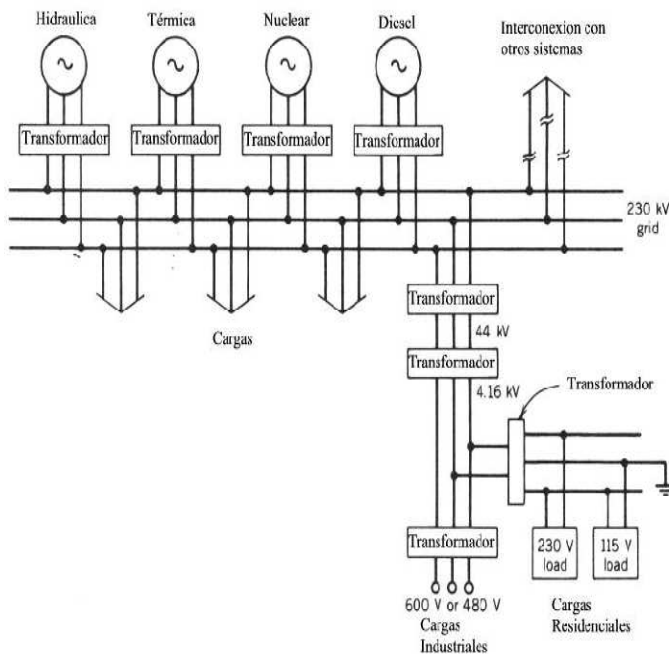


I. MÁQUINA SINCRÓNICA

Estas máquinas operan sólo a la velocidad sincrónica, es decir a la velocidad mecánica equivalente a la velocidad de rotación producida por las corrientes del estator. Utilizadas como generador estas máquinas son utilizadas para generación de energía eléctrica en sistemas interconectados.

En el siguiente esquema se muestra distintas unidades generadoras, las cuales son conectadas a un sistema común el cual alimenta a distintos tipos de usuarios



Sistema interconectado con distintos tipos de generación sincrónica

Estas máquinas pueden cumplir tres diferentes funciones:

- Motor: convierte energía eléctrica en mecánica
- Generador o alternador: convierte energía mecánica en energía eléctrica.
- Condensador Sincrónico: convierte energía eléctrica en eléctrica.
- Reactor Sincrónico

1 Principio de funcionamiento

1.1 Generador

En el caso de las máquinas de inducido rodante (un generador de Corriente Continua induce en el rotor Corriente Alterna cuando se colocan un par de anillos rozantes. La onda obtenida es plana debido a que el entrehierro es constante, pero si se hiciese el entrehierro variable senoidalmente, no se obtendría $e = B * l * v$, sino que $e = B * \text{sen}(wt) * l * v$, es decir Corriente Alterna Senoidal.

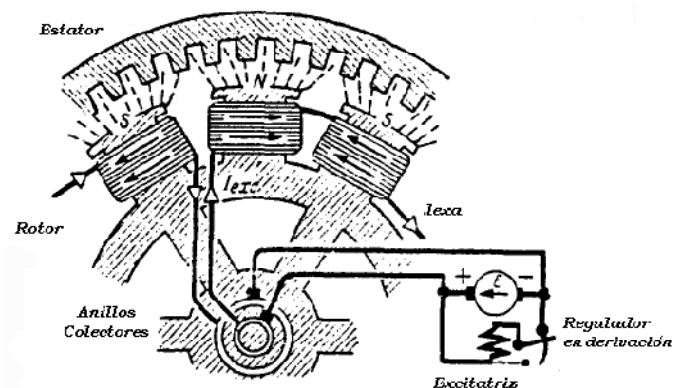
En las otras dos máquinas, el campo magnético de los polos que giran, cortan a los conductores del inducido fijo, y generando $e = -\frac{d\phi}{dt}$, el cual dependiendo de la expansiones polares (rotor de polos salientes) y de la distribución de los conductores del rotor (rotor cilíndrico), obtendremos Corriente Alterna Senoidal.

$$e(t) = k * B * \omega * \text{sen}(wt) = E_{\text{max}} \text{sen}(wt)$$

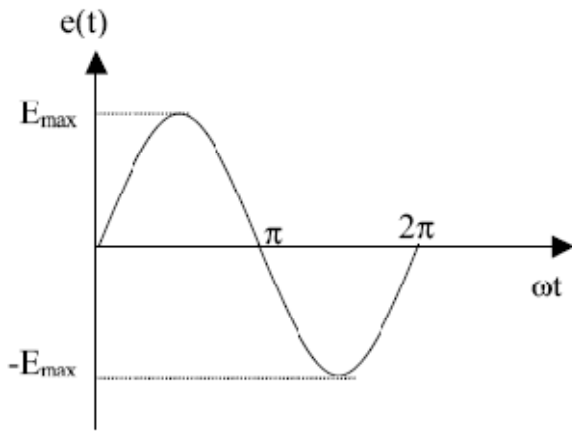
Donde:

- k : constante que depende del diseño de la máquina
- B : densidad de flujo magnético
- ω : velocidad mecánica del rotor

De acuerdo a esto, la tensión inducida en los terminales de la bobina del estator corresponde a una senoide de frecuencia equivalente a la velocidad de giro del eje y magnitud proporcional a la densidad de flujo magnético ω .



Esquema general de excitación de un generador sincrónico



Tensión inducida en un generador sincrónico monofásico

En lugar de tener sólo un devanado de armadura, se pueden ubicar 3 devanados, separados 120° geoméricamente, obteniéndose un generador sincrónico trifásico, cuyas tensiones generadas estarán desfasadas 120° una respecto a otra, cuya frecuencia será equivalente a la velocidad de giro del rotor.

1.2 Motor

A diferencia del generador, el estator se encuentra alimentado con Corriente Alterna, produciéndose un campo magnético rotatorio de la forma:

$$F_e = \frac{3}{2} * F_m * \cos(\omega t - \theta)$$

Donde:

F_e : fuerza magnetomotriz del estator

F_m : fuerza máxima equivalente

ω : velocidad sincrónica

θ : ángulo que determina la posición del punto del entrehierro donde se calcula la fuerza magnetomotriz

De acuerdo a esto la máxima fuerza magnetomotriz, se produce a la velocidad sincrónica ω_s , la cual corresponde a la frecuencia de la red.

El rotor se encuentra alimentado por Corriente Continua, la cual produce una fuerza magnetomotriz constante en el rotor. El campo magnético del rotor tiende a alinearse con el campo magnético rotatorio del estator produciendo que el eje del rotor gire a la velocidad sincrónica.

El torque producido en la máquina es:

$$T(t) = K_T * F_e * F_r * \text{sen}(\delta)$$

Donde:

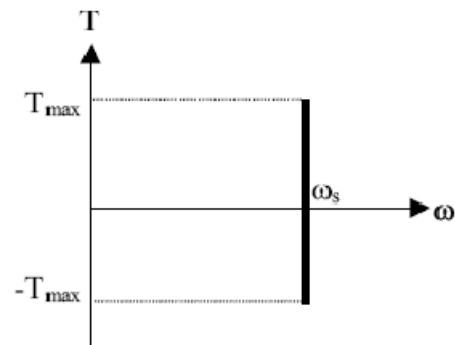
K_T : constante definida por el diseño de la máquina

F_e : fuerza magnetomotriz del estator

F_r : fuerza magnetomotriz del roto

δ : ángulo entre las fuerzas magnetomotrices del estator y rotor

De acuerdo a esto la magnitud del torque queda determinado por el ángulo entre las fuerzas magnetomotrices.



Característica Torque – Velocidad del motor sincrónico

De la figura se puede deducir que el motor sincrónico no posee torque de partida, por lo que se hace necesario de mecanismos externos para llevarlo a la velocidad sincrónica.

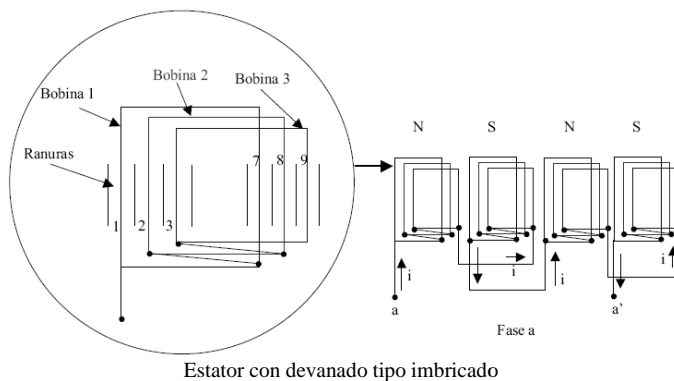
2. Aspectos constructivos

2.1 Estator

Está compuesto por un núcleo laminado, de modo de reducir las pérdidas magnéticas, el cual tiene ranuras axiales donde se ubican los devanados de armadura.

Los devanados de armadura o estator en su mayoría son de tipo imbricado.

En el diagrama se observa la conexión entre bobinas del devanado (bobinas 1, 2 y 3) y como se disponen físicamente en las ranuras axiales del estator. También se puede observar el diagrama de conexión por fase, en este caso la fase *a*, y como circula la corriente en un estator de 2 pares de polos.



Al considerar las 24 ranuras del estator, cada paso polar abarca 6 ranuras, pero debido a que cada bobina tiene 5 ranuras de ancho, esta configuración se denomina como “paso acortado”. Los polos están formados por 3 bobinas por los que se dice que el devanado está distribuido.

Los devanados de las otras 2 fases, *b* y *c*, son iguales que la fase *a*, pero ubicados a 120° y 240° respectivamente. Con esto si tenemos un par de polos, el estator es de 12 ranuras.

Si la bobina 1 de la fase *a* está ubicada en la ranura 1, entonces las bobinas 1 de las fases *b* y *c*, están ubicadas en las ranuras 5 y 9 respectivamente.

Los extremos de las bobinas del estator se encuentran conectados a la placa de terminales ubicada en la carcasa de la máquina, de esta manera los bornes son de fácil acceso para poder configurar una conexión delta o estrella.

2.2 Rotor

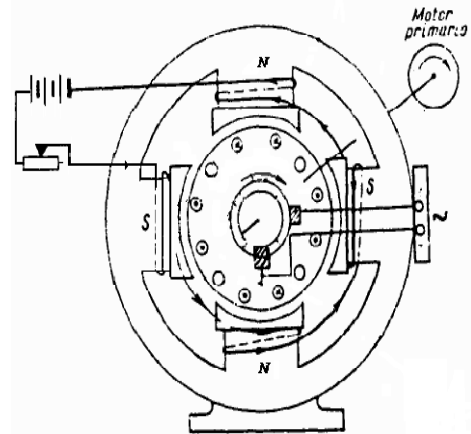
El rotor puede ser de 4 tipos:

2.2.1 Imanes permanentes

La configuración más simple es la que posee imanes permanentes, debido a que se evita el uso de anillos rozantes para alimentar el rotor, sin embargo en potencias altas esta aplicación no es requerida debido a que la densidad de flujo de los imanes no muy altas, además de no poseer un campo magnético controlable.

2.2.2 Rotor con anillos rozantes (inducido rotante)

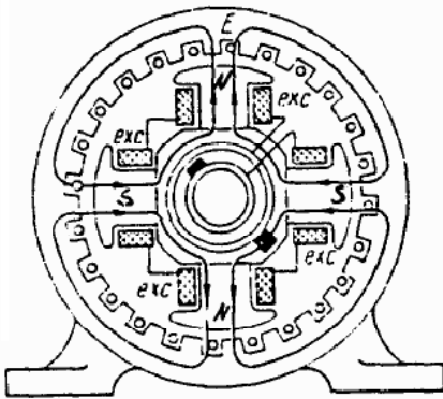
Los polos excitados con Corriente Continua (generador) se encuentran fijos en el estator, además el rotor (devanado monofásico o trifásico) posee salidas de corriente a través de anillos rozantes. Suele ser utilizado en aplicaciones de pequeñas potencias, como grupos electrógenos portátiles, debido a que la salida de corriente a través de elementos móviles no es posible manejar grandes potencias.



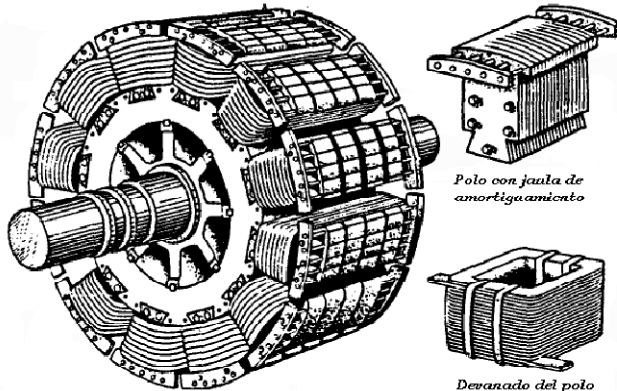
Diseño de un generador de Inducido rotante

2.2.3 Rotor de polos salientes (inducido fijo y rueda polar)

Los polos son alimentados por corriente continua (generador) a través de dos anillos rozantes, que a su vez giran accionados por un motor térmico o hidráulico. El inducido, estático, sede de las corrientes alternas, entrega energía directamente al consumidor. Esta máquina es generalmente usada en aplicaciones hidráulicas donde se necesitan altas potencias y no es requerida tanta velocidad.



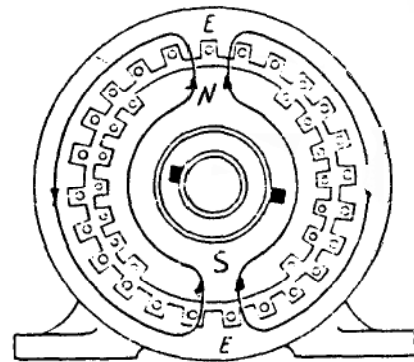
Diseño de un máquina sincrónica de polos salientes



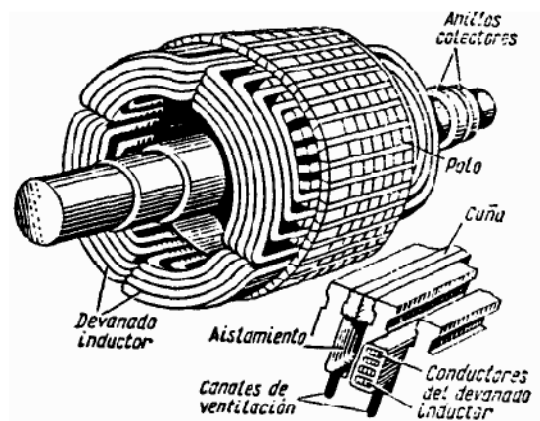
Aspecto exterior de un rotor de polos salientes

2.2.4 Rotor cilíndrico (inducido fijo y rotor cilíndrico)

Al igual que en la máquina de inducido fijo y rueda polar es ranurado exteriormente, donde se encuentran las bobinas alimentadas por Corriente Continua (generador), que generan los polos a través de dos anillos. En general el rotor es de 2 o 4 polos. A diferencia de la máquina con rotor de polos salientes, esta aplicación es utilizada para grandes potencias y velocidades. En general son accionadas por turbinas de gas o vapor.



Diseño de un máquina sincrónica de rotor cilíndrico



Aspecto exterior un rotor cilíndrico

Las ventajas de un rotor con inducido fijo son que posee mejor aislación para alta tensión (13.2 [kV]), la corriente de salida es obtenida de bornes fijos y los enrollamientos de campo se alimentan a través de anillo, pero estos son con potencias bajas.

Desde el punto de vista del modelamiento, el rotor cilíndrico es mucho más simple que el de polos salientes, ya que su geometría es completamente simétrica. Con esto se permite establecer las relaciones para las tensiones generadas con respecto a las inductancias mutuas de rotor y estator, la que son constantes.

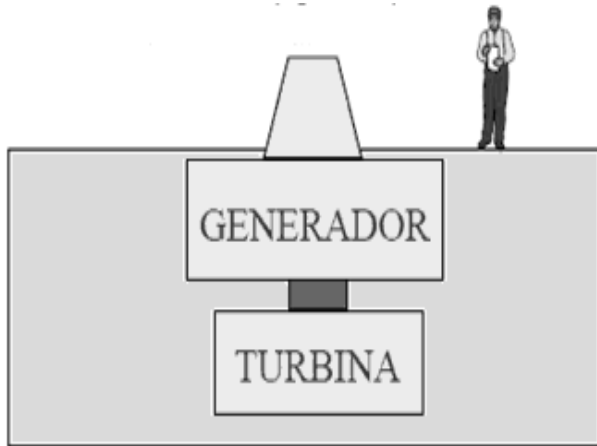
El rotor de polos salientes, presenta el inconveniente de que su geometría asimétrica, impide el modelamiento de las inductancias propias y mutuas de estator y rotor, por lo que no se puede desarrollar analíticamente su estructura se modo sencillo.

2.3. Otros

2.3.1 Generador

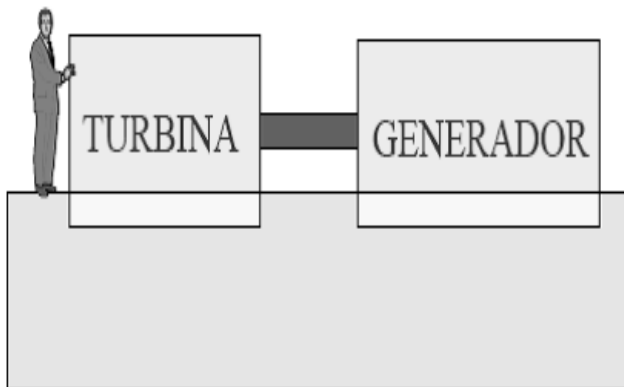
Si la aplicación del generador sincrónico fuera como generador en una central hidroeléctrica, la máquina utilizada es de eje vertical, con rotor de polos salientes corto, pero de gran diámetro.

Esto es producido porque la velocidad de rotación es lenta (300 – 350 [RPM]), por lo que se requiere un rotor con un gran número de polos para efectuar generación.



Esquema de un generador utilizado en aplicaciones hidroeléctricas

Por el contrario si se emplearan generadores sincrónicos en centrales térmicas o de ciclo combinado, la máquina utilizada es de eje horizontal, con un rotor cilíndrico largo pero de poco diámetro, permitiendo que el eje rote a altas velocidades (1500 – 3000 [RPM], depende del número de pares de polos).



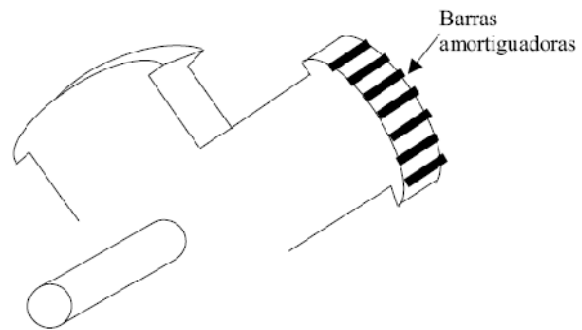
Esquema de un generador utilizado en aplicaciones termoeléctricas

2.3.2 Motor

Debido a que no pueden arrancar de forma automática, se hace necesario de 2 mecanismos extras para la partida, un motor auxiliar y barras amortiguadoras.

Las barras amortiguadoras aprovechan el principio de funcionamiento del motor de inducción (asincrónico) para generar toque de partida.

En cada una de las caras polares del rotor de polos salientes, se realizan calados en los cuales se ubican las barras amortiguadoras, las cuales le dan características similares a las de un rotor jaula de ardilla de un motor de inducción.

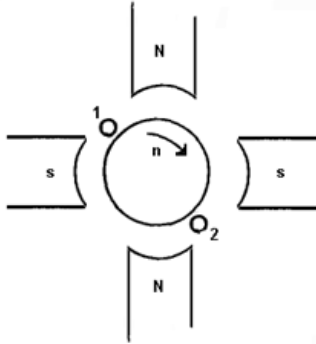


Barras amortiguadoras en un motor sincrónico

Es así como el motor sincrónico se comporta como motor de inducción hasta llegar a la velocidad sincrónica, con la salvedad de que el circuito de compensación se construye de modo de que el campo magnético rotatorio inducido en el rotor sea débil en comparación con el campo magnético fijo del rotor (inducido con Corriente Continua).

3. Velocidad de la máquina sincrónica

Para determinar la velocidad o frecuencia de las ondas generadas un conductor que se desplaza desde la posición (1) a la posición (2), al pasar por un par de polos genera 1 ciclo (1 [Hz]); cuando da una vuelta, genera P ciclos, girando a N vueltas por minuto (RPM), generará $P * N$ ciclos por minutos, que en segundos será $\frac{P * N}{60}$ ciclos/seg. (lo que equivale a la frecuencia en [Hz]).



Determinación de la velocidad sincrónica de una máquina.

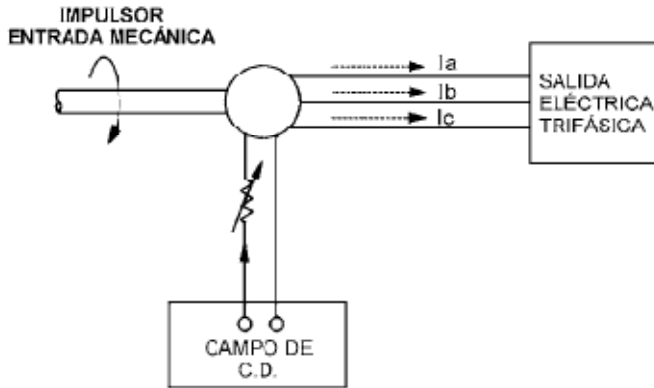
Por lo tanto la ecuación que relaciona Velocidad sincrónica con la frecuencia es:

$$V_{\text{sinc}} = \frac{60 * f}{p}$$

Siendo V_{sinc} la velocidad sincrónica del rotor, f la frecuencia de la red y p los pares de polos del rotor; con lo cual dependiendo de la cantidad de polos del rotor se obtienen las velocidades de sincronismo como 3000, 1500, 1000, 750, etc. [RPM].

II. GENERADOR SINCRÓNICO TRIFÁSICO

Como ya se había señalado convierte energía termomecánica en energía eléctrica. La potencia mecánica del campo gira el eje (rotor) del generador en el cual el campo de Corriente Continua se encuentra instalado.



Generador sincrónico elemental

La energía del impulsor puede ser obtenida de diversas formas, siendo las principales las de quemar combustibles de origen fósil como el carbón, petróleo o gas natural. El vapor producido hace girar el rotor del generador a velocidades de 3000, 1500 o 1000 [RPM] (dependiendo de la cantidad de pares de polos del rotor cilíndrico).

La conversión de energía potencial mecánica del vapor por rotación es realizada en la turbina. En las plantas nucleares, el combustible (uranio) a través de la fusión nuclear, el calor producido genera vapor, el cual es guiado a través de la turbina de vapor para girar el rotor del generador.

También la energía puede ser obtenida por generadores hidráulicos (rotor de polos salientes), los cuales giran con menor velocidad que las turbinas térmicas (entre 300 - 350 [RPM]).

1. Aspectos de diseño

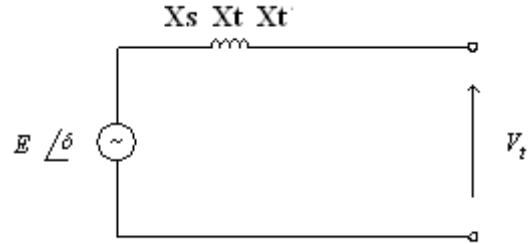
Las partes principales del generador sincrónico trifásico son la parte estacionaria denominada como estator (armadura), es esencialmente un cilindro hueco y tiene ranuras longitudinales en las que se ubican las bobinas del devanado de armadura. , estos devanados de armadura llevan la corriente suministrada a la carga eléctrica por el generador.

Otra parte fundamental del generador es la parte móvil denominada como rotor (campo), el cual se monta sobre un eje y gira dentro del estator, el cual es alimentado con Corriente Continua.

El diseño normal de una máquina sincrónica trifásica consiste en tres devanados (dispuestos geoméricamente) sobre el estator (armadura), más un devanado de campo en el rotor.

2. Modelo del Generador Sincrónico Trifásico

En general para una máquina sin saliencias, es decir sin polos salientes, se puede modelar el circuito trifásico a un equivalente monofásico de la siguiente forma:



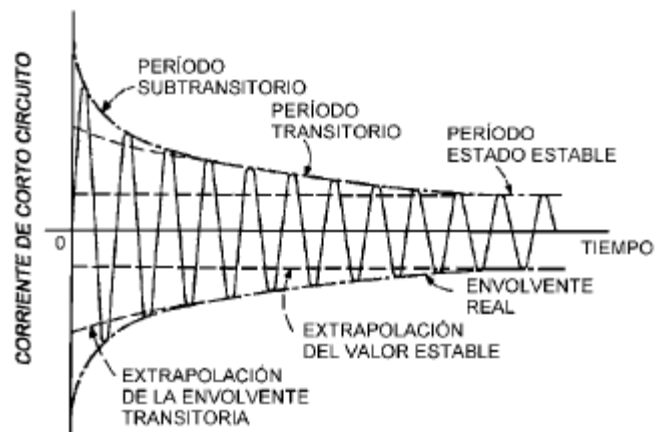
Equivalente monofásico de una máquina sincrónica trifásica

La fuente de tensión interna representa a la tensión inducida por efecto Faraday en los devanados del estator y depende de la velocidad de rotación del rotor y la corriente de excitación.

La reactancia sincrónica X_s , que se presenta en estado estacionario (estable) de la máquina, corresponde a la reactancia entre la fuente interna y los terminales de la máquina.

En los primeros 2 a 3 ciclos después de ocurrida una perturbación en el sistema, en la que está conectada la máquina (cortocircuito monofásico, trifásico, etc.), el efecto transitorio electromagnético es representado por la reactancia subtransitoria X'_s .

En los siguientes ciclos y mientras se mantengan las oscilaciones, el efecto es representado por la reactancia transitoria X''_s .



Corriente de Cortocircuito del generador

3. Funcionamiento

La Fuerza Magnetomotriz (fmm) producida por la Corriente Continua que alimenta el rotor (de alta intensidad), se combina con la fmm producida por las corrientes en los devanados de armadura. El flujo resultante en el entrehierro (espacio entre el estator y rotor), genera tensiones en las bobinas de los devanados de armadura y crea el torque electromagnético entre estator y rotor.

En la figura observamos un generador sincrónico trifásico elemental. El devanado de campo (bobina f), genera los polos norte y sur (N y S, respectivamente), el eje de los polos de campo se denomina eje directo (eje d); mientras que la línea perpendicular en el centro del eje directo se denomina eje de cuadratura (eje q). Como se observa, la dirección positiva del eje d , adelanta en 90° a la dirección positiva del eje q . En la realidad los devanados tienen un número alto de vueltas distribuidas en las ranuras de la circunferencia del rotor. El campo magnético producido enlaza las bobinas del estator para producir una tensión en los devanados de la armadura en la razón que el eje sea impulsado por la fuente de energía mecánica.

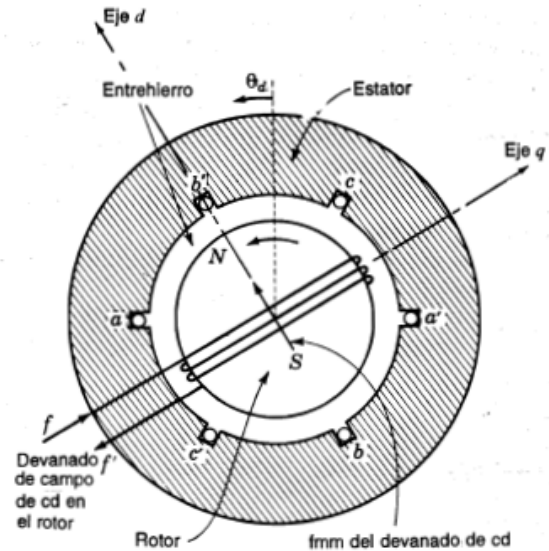
Los lados opuestos de una bobina de la armadura (es casi rectangular) que están en las ranuras a y a' , se encuentran separadas 180° , bobinas iguales se encuentran en las ranuras b y b' , c y c' . Los lados de las bobinas en las ranuras a , b y c , se encuentran separadas 120°

El rotor (parte móvil) es accionado por una máquina motriz (turbina térmica o hidráulica), recibiendo potencia mecánica la cual a través de la interacción entre los campos magnéticos producidos por las corrientes a través de los devanados, se convierte en energía eléctrica.

Los generadores impulsados por turbinas térmicas tienen rotores cilíndricos con ranuras en las cuales son colocados los devanados de campo distribuidos. En general son construidos de acero forjado sólido. Normalmente son de 1 o 2 pares de polos, pero también pueden encontrarse de 3 pares, dependiendo de aplicación y velocidad deseada.

A su vez los generadores impulsados hidráulicamente tienen rotores de polos salientes laminados con devanados de campo concentrados (a diferencia del rotor cilíndrico que los devanados de campo son distribuidos) y un gran número de pares de polos.

Sin importar el tipo de fuente impulsora, la fuente de energía utilizada para girar el rotor es mantenida en un nivel constante por medio de un regulador de velocidad denominado gobernador. La rotación del flujo de Corriente Continua en el campo del generador reacciona con los devanados del estator y debido a la Ley de Faraday se genera tensiones de tipo trifásica.



Disposición esquemática de los devanados de armadura (a , b y c) y el de campo (f) en un generador sincrónico trifásico

4. Generación Trifásica

Los devanados de armadura del estator pueden ser representados por 3 bobinas (a , b y c) y el devanado de campo distribuido por una bobina concentrada f , los tres devanados de armadura son idénticos y cada una tiene uno de sus terminales conectado al punto común o , los otros terminales se designaran como a , b y c .

El eje del devanado a se elije en la posición $\theta_d = 0^\circ$, en sentido antihorario se asigna al devanado b el eje $\theta_d = 120^\circ$ y al devanado c el eje $\theta_d = 240^\circ$.

Los devanados concentrados tienen inductancia propia L_S , la cual es equivalente entre ellas.

$$\boxed{L_S = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc}}$$

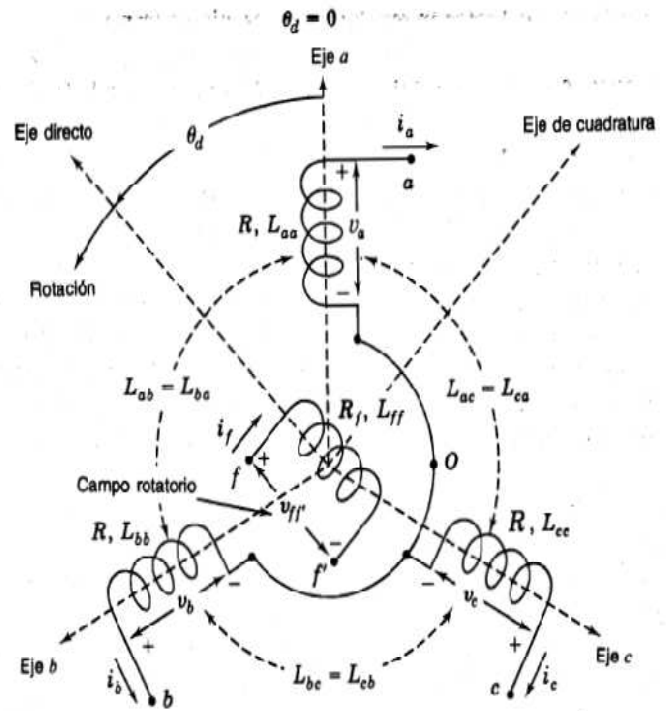
También poseen inductancias mutuas $-M_S$, equivalente entre ellas:

$$\boxed{-M_S = L_{ab} = L_{bc} = L_{ca}}$$

La inductancia mutua entre el devanado de campo y cada uno de los devanados de armadura, varían con respecto a la posición del rotor con un valor máximo M_S .

$$\boxed{\begin{aligned} L_{af} &= M_f \cos(\theta_d) \\ L_{bf} &= M_f \cos(\theta_d - 120^\circ) \\ L_{cf} &= M_f \cos(\theta_d - 240^\circ) \end{aligned}}$$

A su vez el devanado de campo posee una inductancia propia constante L_{ff} , la cual se provoca porque en la máquina de rotor cilíndrico, el devanado de campo produce sobre el eje d , un flujo que circula a través de una trayectoria magnética similar en la armadura, para todas las posiciones del rotor.



Generador trifásico sincrónico idealizado

Los enlaces de flujo de cada devanado se deben a las corrientes propias y a las corrientes de los otros devanados, por lo que las ecuaciones de los enlaces de flujo son las siguientes:

Armadura:

$$\boxed{\begin{aligned} \lambda_a &= L_{aa} * i_a + L_{ab} * i_b + L_{ac} * i_c + L_{af} * i_f \\ \lambda_a &= M_S * (i_b + i_c) + L_{af} * i_f \end{aligned}}$$

Análogamente

$$\boxed{\begin{aligned} \lambda_b &= M_S * (i_a + i_c) + L_{bf} * i_f \\ \lambda_c &= M_S * (i_a + i_b) + L_{cf} * i_f \end{aligned}}$$

Campo:

$$\boxed{\lambda_f = L_{af} * i_a + L_{bf} * i_b + L_{cf} * i_c + L_{ff} * i_f}$$

Si tenemos corrientes trifásicas balanceadas, es decir $i_a + i_b + i_c = 0$, tenemos que:

$$\boxed{\begin{aligned} \lambda_a &= (L_S + M_S) * i_a + L_{af} * i_f \\ \lambda_b &= (L_S + M_S) * i_b + L_{bf} * i_f \\ \lambda_c &= (L_S + M_S) * i_c + L_{cf} * i_f \end{aligned}}$$

En condiciones estables la corriente de campo es continua y constante, además de que el campo gira a una velocidad angular ω constante, de modo que para la máquina sincrónica de dos polos (rotor cilíndrico) tenemos:

$$\left| \begin{array}{l} \frac{d\theta_d}{dt} = \omega \\ \theta_d = \omega t + \theta_{d0} \end{array} \right|$$

Obteniéndose:

$$\left| \begin{array}{l} \lambda_a = (L_S + M_S) * i_a + M_f * I_f \cos(\omega t + \theta_{d0}) \\ \lambda_b = (L_S + M_S) * i_b + M_f * I_f \cos(\omega t + \theta_{d0} - 120^\circ) \\ \lambda_c = (L_S + M_S) * i_c + M_f * I_f \cos(\omega t + \theta_{d0} - 240^\circ) \end{array} \right|$$

Es así que se puede deducir que los enlaces de flujo tienen una componente debida a la corriente de campo y otra a la corriente de armadura.

Si el devanado a tuviese una resistencia R , la caída de tensión v_a a través del devanado de los terminales a y o es:

$$\left| \begin{array}{l} v_a = -R * i_a - \frac{d\lambda_a}{dt} \\ v_a = -R * i_a - (L_S + M_S) * \frac{di_a}{dt} \\ + \omega * M_f * I_f \text{sen}(\omega t + \theta_{d0}) \end{array} \right|$$

El último término representa una fem interna denominada e_a denominado como tensión sin carga o tensión interna sincrónica y puede representarse como:

$$\left| e_a = \sqrt{2} * |E_i| \text{sen}(\omega t + \theta_{d0}) \right|$$

Donde:

$$\left| E_i = \frac{\omega * M_f * I_f}{\sqrt{2}} \right|$$

De este modo la tensión de armadura, está dado por:

$$\left| v_a = -R * i_a - (L_S + M_S) * \frac{di_a}{dt} + \sqrt{2} * |E_i| \text{sen}(\omega t + \theta_{d0}) \right|$$

Por lo tanto e_a , e_b y e_c son un conjunto de fem trifásicas que dan origen a las corrientes de línea trifásicas balanceadas:

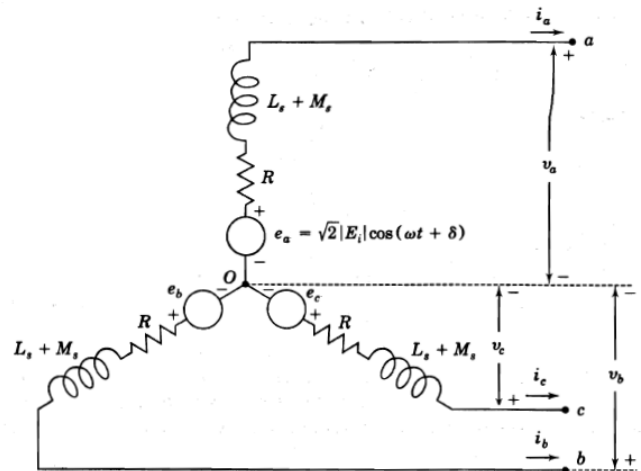
$$\left| \begin{array}{l} i_a = \sqrt{2} |I_a| \cos(\omega t + \delta + \theta_a) \\ i_b = \sqrt{2} |I_a| \cos(\omega t + \delta + \theta_a - 120^\circ) \\ i_c = \sqrt{2} |I_a| \cos(\omega t + \delta + \theta_a - 240^\circ) \end{array} \right|$$

Donde:

$$\delta = \theta_{d0} - 90^\circ$$

θ_a : ángulo de desfase con respecto a e_a

$|I_a|$: valor efectivo de la corriente i_a



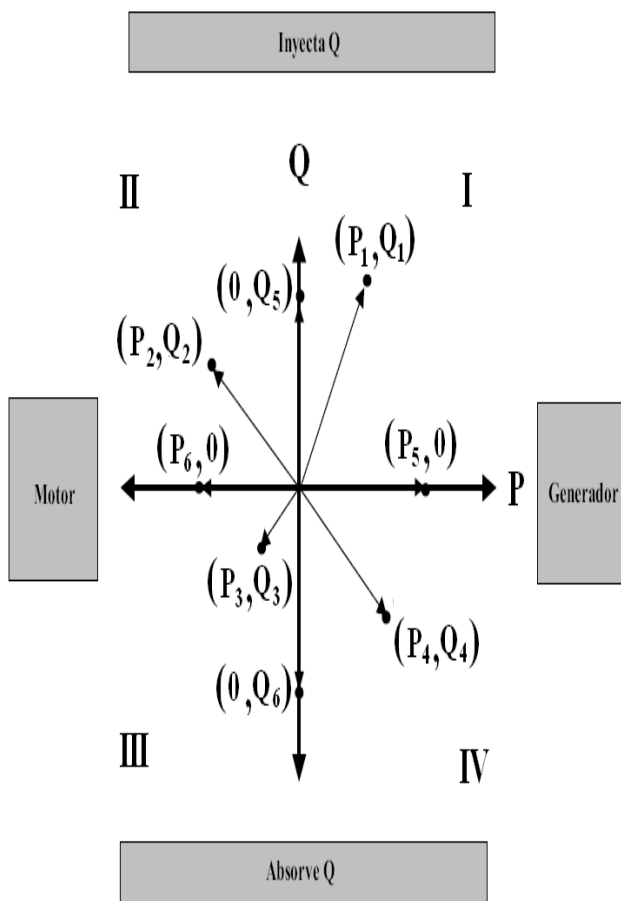
Circuito equivalente de armadura en estado estable

5. Límites operacionales de un generador sincrónico

En general la capacidad de un generador sincrónico se especifica en los términos de la Potencia Real, en MVA, máxima que puede entregar en forma permanente y continuada a la red para un valor de tensión y factor de potencia especificados.

El límite de Potencia Activa, en MW, por lo tanto queda determinado por la capacidad del equipo motriz de manera que su valor esté dentro de los MVA nominales de la máquina.

Los cuadrantes de operación de una máquina sincrónica, están determinados por si suministran o absorben potencias P y Q , generador el diagrama $P-Q$.



Operación de la máquina sincrónica en el diagrama $P-Q$

Según este diagrama las zonas donde la máquina funciona como generador son las I y IV, mientras que en las zonas II y III funcionará como motor.

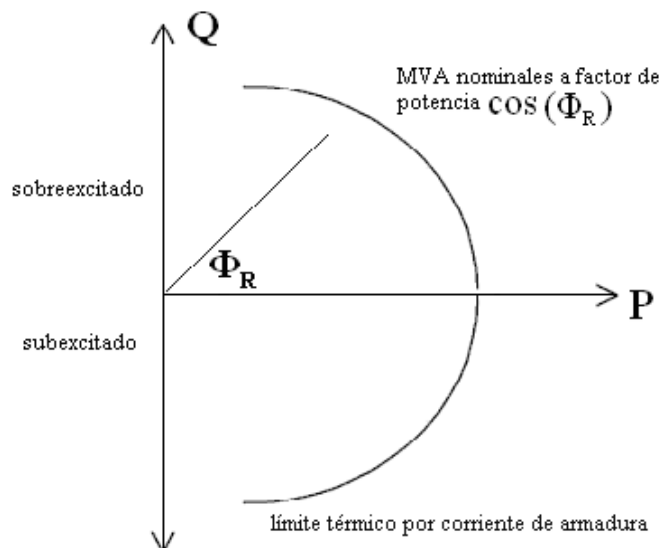
En la siguiente tabla se explica el funcionamiento de la máquina sincrónica de acuerdo a las potencias absorbidas o suministradas P y Q .

| Punto | Operación |
|--------------|---|
| (P_1, Q_1) | Generador Sobreexcitado (generador inductivo) $(P_1 > 0, Q_1 > 0)$ |
| (P_2, Q_2) | Motor Sobreexcitado (motor capacitivo) $(P_2 < 0, Q_2 > 0)$ |
| (P_3, Q_3) | Generador Subexcitado (motor inductivo) $(P_3 < 0, Q_3 < 0)$ |
| (P_4, Q_4) | Generador Subexcitado (generador capacitivo) $(P_4 > 0, Q_4 < 0)$ |
| $(0, Q_5)$ | Condensador Sincrónico $(P = 0, Q_5 > 0)$ |
| $(0, Q_6)$ | Reactor Sincrónico $(P = 0, Q_6 < 0)$ |
| $(P_5, 0)$ | Generador con factor de potencia unitario $(P_5 > 0, Q = 0)$ |
| $(P_6, 0)$ | Motor con factor de potencia unitario $(P_6 < 0, Q = 0)$ |

En el caso de que se trabaje la máquina sincrónica como generador, la capacidad de Potencia Reactiva queda limitada por 4 consideraciones:

5.1. Límite de corriente de armadura

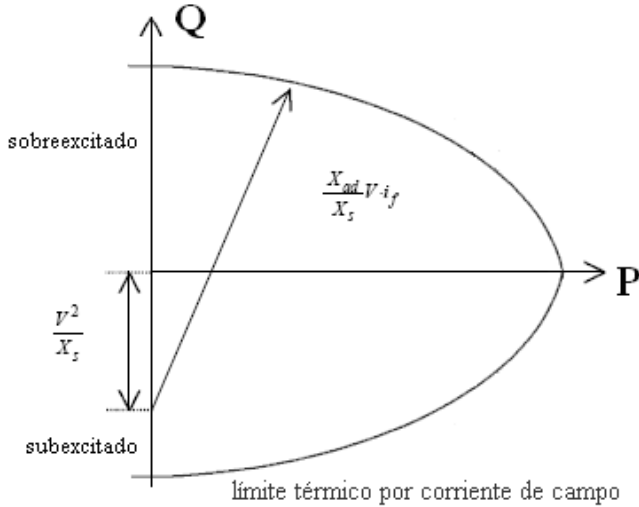
La corriente de armadura en los devanados origina pérdidas resistivas por efecto Joule (I^2R), produciendo elevación de la temperatura en la máquina



Límite de corriente de armadura en el diagrama $P-Q$

5.2 Límite de corriente de campo (tensión generada máxima)

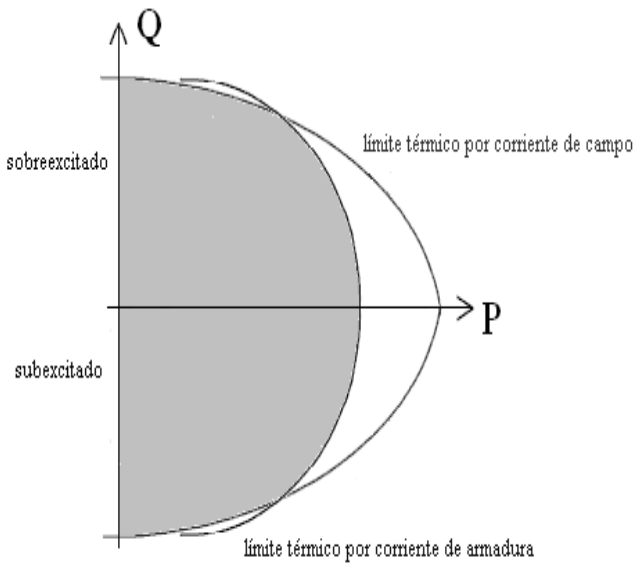
Las pérdidas por efecto Joule (I^2R) en el circuito de campo imponen un segundo límite en los MVA del generador sincrónico.



Límite de corriente de campo en el diagrama $P-Q$

Además existe un límite de excitación mínima en el rotor para poder generar tensión, el cual es denominado tensión generada mínima

Combinados estos 2 límites encontramos la zona mínima de trabajo del generador.



Zona de operación por corrientes de campo y armadura para un generador sincrónico

5.3 Potencia activa máxima

Corresponde al límite máximo de potencia activa que es capaz de entregar la máquina operando en condiciones nominales, normalmente es entregado por el fabricante del generador

5.4 Máximo ángulo entre las fuerzas magnetomotrices

El límite teórico es 90° , pero en la práctica se opera con ángulos menores, debido a que se debe conservar la estabilidad en la operación. Si la máquina sobrepasa los 90° la máquina sale de sincronismo.

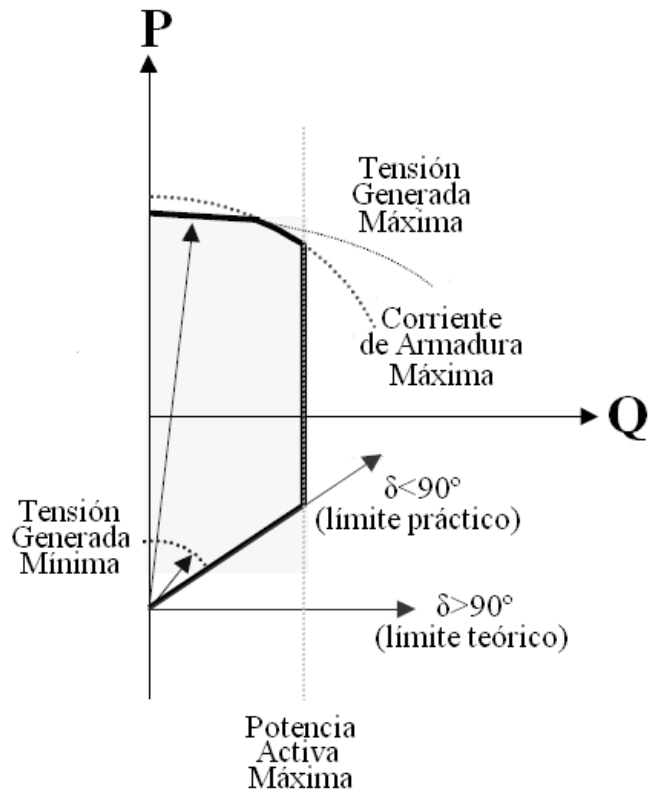


Diagrama de capacidad de carga de un generador sincrónico

6. Diagrama de capacidad de carga

El diagrama obtenido anteriormente es conocido como diagrama de capacidad de carga o carta de operación de la máquina sincrónica y en ella se pueden ver todas las condiciones normales de operación normal de los generadores de rotor cilíndrico conectados a barras infinitas (Sistema Interconectado).

Esta carta es importante para cualquier operador de centrales de potencia, los cuales son responsables de la carga y operación apropiadas de la máquina sincrónica.

La carta es construida bajo la condición de que el generador tiene un voltaje en terminales V_t fijo y que la resistencia de armadura es despreciable por lo tanto nula.

La construcción de la carta se inicia con el diagrama fasorial del generador, donde se tiene a V_t como fador de referencia, como muestra la figura

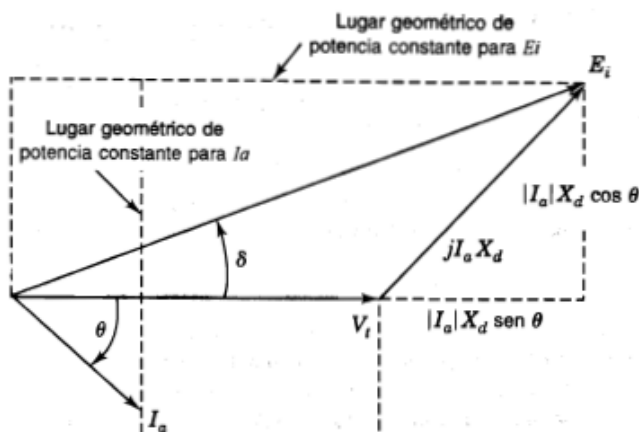


Diagrama fasorial de un generador sincrónico sobrecargado

La imagen reflejada de la figura anterior se puede rotar para dar el diagrama fasorial siguiente, en el cual se muestran cinco lugares geométricos que pasan a través del punto de operación m .

Estos lugares geométricos son los modos de operación en los que solamente un parámetro de la unidad de generación se mantiene constante.

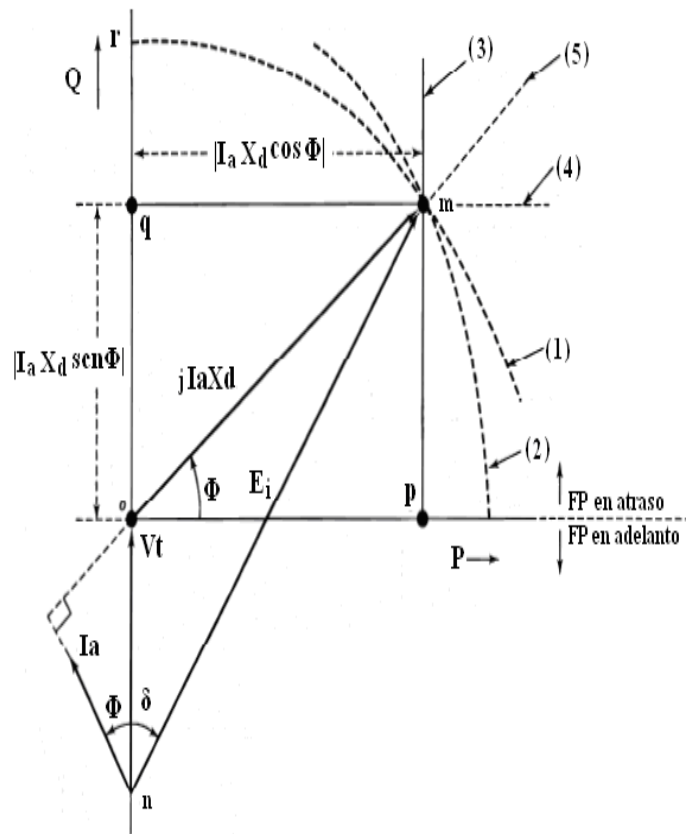


Diagrama fasorial de operación del generador sincrónico

Donde:

(1) *Excitación constante*: el círculo de excitación constante tiene al punto n como centro y radio de longitud $n-m$ igual a la magnitud del voltaje interno $|E_i|$, la cual se puede mantener constante manteniendo la corriente de campo I_f constante en el devanado de campo.

(2) *Corriente de armadura constante* $|I_a|$: el círculo para la corriente de armadura constante tiene al punto o como centro y un radio de longitud $o-m$ proporcional al valor fijo de $|I_a|$. Como $|V_t|$ es constante, los puntos de operación en este lugar corresponden a la salida constante de MVA ($|V_t| * |I_a|$) desde el generador.

(3) *Potencia constante*: la salida de la potencia activa P , esta dada por $|V_t| * |I_a| * \cos(\phi)$ en sistema por unidad. Debido a que $|V_t|$ es constante, la línea vertical $m-p$ a la distancia $|X_d * I_a * \cos(\phi)|$ desde el eje $n-o$ (V_t), representa el lugar geométrico del punto de operación para P constante. La salida en MW del generador sincrónico siempre va a ser positiva (entrega energía) sin importar si es factor de potencia sea capacitivo o inductivo.

(4) *Potencia Reactiva constante*: la salida de la potencia reactiva Q , está dada por $Q = |V_t| * |I_a| * \text{sen}(\phi)$ en sistema por unidad, cuando el ángulo ϕ se define como positivo para factores de potencia en atraso. Cuando $|V_t|$ es constante, la línea horizontal $q-m$ a la distancia $|X_d * I_a * \text{sen}(\phi)|$ desde el eje horizontal representa el lugar geométrico de los puntos de operación para Q constante. Para la operación con factor de potencia unitario (carga resistiva), la salida de Q en MVAR del generador sincrónico es cero, y corresponde a un punto de operación sobre el eje horizontal $o-p$. Para factores de potencia en atraso, la potencia Q de entrada es positiva y el punto de operación está en el semiplano superior de la línea $o-p$.

(5) *Factor de Potencia constante*: la línea $o-m$ ($|j * X_d * I_a|$) corresponde a un valor constante de Factor de Potencia del ángulo de ϕ entre la corriente de armadura I_a y el voltaje en terminales V_t , en la figura anterior el ángulo ϕ es para la carga con Factor de Potencia en atraso (positivo). Cuando $\phi = 0^\circ$, el factor de potencia es unitario y el punto de operación está realmente sobre el eje horizontal $o-p$. El semiplano inferior se aplica a Factores de Potencia en adelanto (negativos).

Regularmente se utiliza el sistema por unidad para construir la carta capacidad del generador sincrónico trifásico, el método de construcción es el siguiente:

- Se considera la tensión $|V_t| = 1.0$ por unidad, como la tensión base nominal de la máquina.
- Por medio de una escala de Potencia Aparente (S), se señala el punto n sobre el eje vertical, de manera que la longitud $n-o$ sea igual a $\frac{1}{X_d}$ en por unidad sobre la base nominal de máquina. Luego la misma escala se aplica a la potencia activa P sobre el eje horizontal.
- A lo largo del eje P se señala la distancia que corresponde a la potencia máxima de salida de la fuente de energía mecánica.
- Se señala la longitud $o-m = 1.0$ sobre la línea radial desde el origen en el ángulo del factor de potencia nominal ϕ , se dibuja el arco circular de [MVA] en por unidad, con como centro y $o-m$ como radio, que corresponde al límite de corriente de armadura.

- Se construye el arco $m-r$ de la corriente de campo máxima permisible y se emplea n como centro y $n-m$ como radio.
- Se aplica un límite de subexcitación cuando los VAR son importados del sistema a la máquina. Lo determina el fabricante.

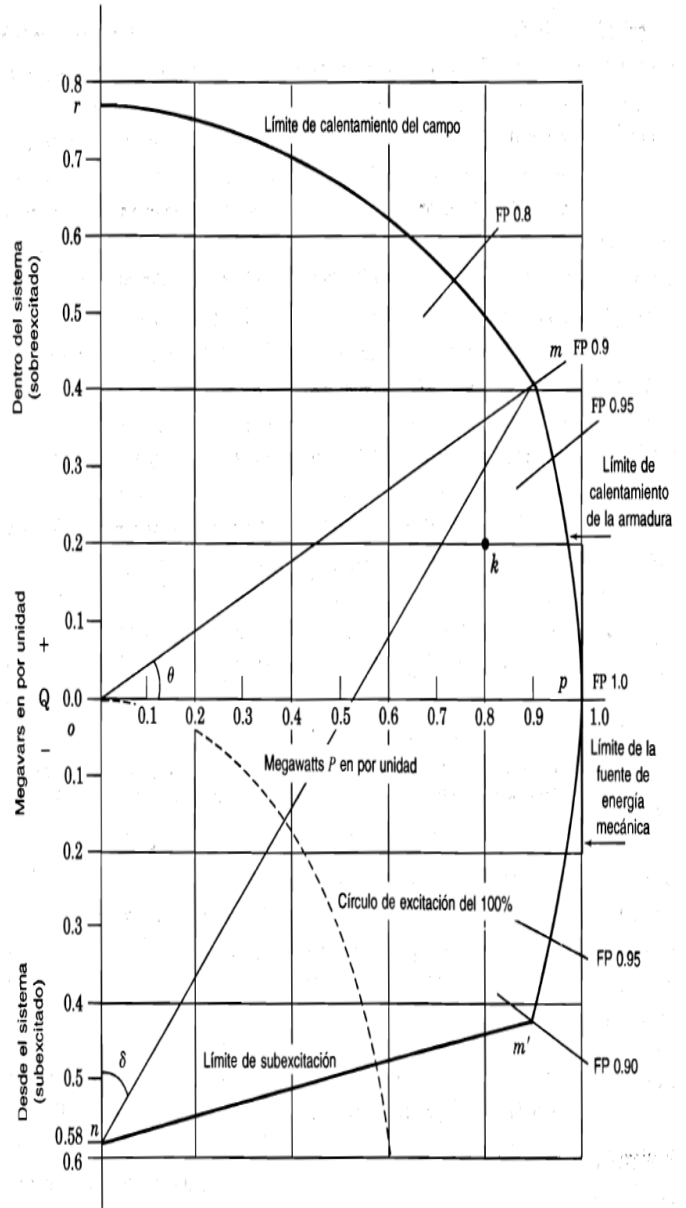


Diagrama fasorial de capacidad de carga de un generador sincrónico de rotor cilíndrico de 653 [MVA], 24 [kV], FP=0.9, $X_d=172.4\%$, con 653 [MW]

III. PROTECCIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO

La protección de los equipos de generación, tanto el generador sincrónico, Corriente Continua y transformador, normalmente incluye todas las condiciones anormales de operación que puedan resultar dañinas a estas máquinas eléctricas y que deben ser aclaradas de forma automática.

El gran inconveniente al insertar todos los sistemas de protección no radica sólo en que operen de forma inadecuada, sino también que fallen al operar en caso de falla.

Para una empresa, el costo del daño a un equipo es alto, no solo por la reparación o reemplazo del equipo, sino también por el costo de indisponibilidad del servicio, que en algunos casos se debe incurrir en gastos extras por compra de energía de reemplazo durante el periodo que se encuentre fuera de servicio la máquina.

1. Generalidades

1.1 Conexión de generadores a un sistema eléctrico de potencia

En sistemas industriales existen 2 tipos de conexión de un generador:

1.1.1 Conexión Directa:

Los generadores son conectados directamente a las barras de carga sin transformar la tensión. Esto se usa generalmente en generadores de pequeño tamaño que no puedan producir grandes pérdidas por efecto Joule en la red.

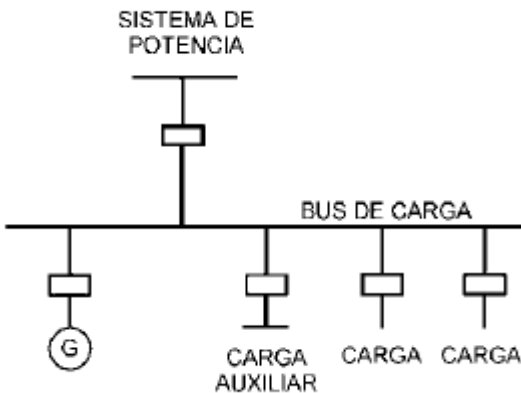


Diagrama de Conexión Directa

1.1.2 Conexión Unitaria

Los generadores son conectados a la red por medio del uso de transformadores elevadores de tensión, una carga auxiliar del generador es suministrada desde un transformador reductor conectado al generador.

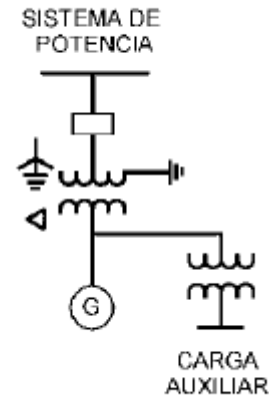


Diagrama de Conexión Unitaria

1.2 Modelo de cortocircuito del generador sincrónico

El equivalente eléctrico de un generador sincrónico es una fuente de tensión en serie con una impedancia, no se considera la componente resistiva, la cual es despreciable con respecto a la reactancia sincrónica, transitoria y subtransitoria, por lo tanto no se considera para el análisis de fallas.

En el análisis de fallas se utiliza el método de las componentes simétricas, método matemático por el cual se pueden calcular las tensiones y corrientes del generador bajo condiciones de falla.

Para esto se deben conocer los diagramas de secuencias, los cuales incluyen tres tipos:

1.2.1 Secuencia Positiva (X_1)

Son utilizados tres valores distintos de reactancia en el diagrama de secuencia positiva, las reactancias subtransitoria X'_1 , transitoria X''_1 y sincrónica X_s . Estos valores son entregados por el fabricante, dentro de las hojas de prueba de la máquina, y son utilizados de acuerdo al tipo de falla que se requiera calcular.

Se deduce que el mayor nivel de corriente se produce con la reactancia subtransitoria, por lo cual se utiliza para el cálculo de los relés de protección requeridos para los cortocircuitos.

La reactancia transitoria es utilizada en cálculos de estabilidad transitoria (si es estable el sistema luego de que se establezca una falla).

La reactancia sincrónica no es utilizada para el estudio de cortocircuitos, debido a que presenta valores de reactancia que producen menores niveles de corriente ante una falla.

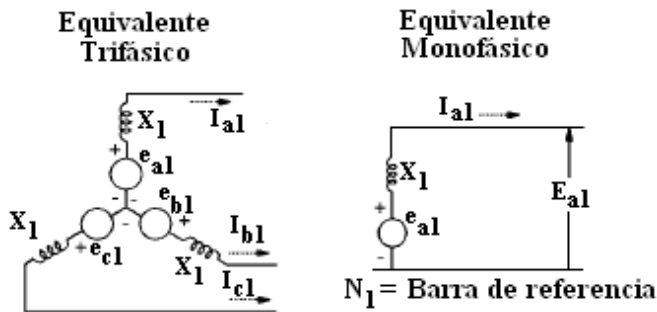


Diagrama de Secuencia Positiva de un Generador Sincrónico Trifásico

1.2.2 Secuencia Negativa (X_2)

El flujo de corriente de secuencia negativa es de rotación de fase opuesta a través de la máquina y aparece como una componente de doble frecuencia en el rotor del generador. Para una máquina con rotor cilíndrico una buena aproximación del valor de la reactancia de secuencia negativa es la reactancia subtransitoria.

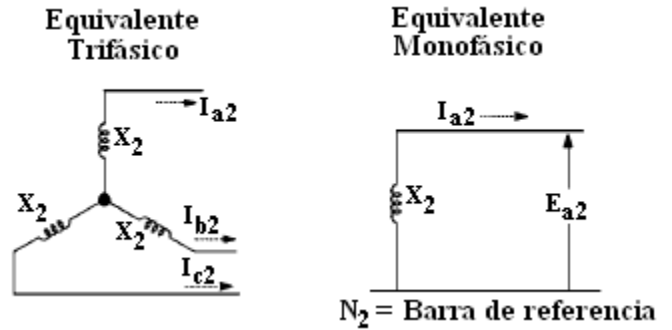


Diagrama de Secuencia Negativa de un Generador Sincrónico Trifásico

1.2.3 Secuencia Cero (X_0)

El valor que tiene esta reactancia es menor a los de secuencias positiva y negativa. Producto de los altos niveles de corriente de falla a tierra para una máquina puesta a tierra, se debe insertar en el diagrama de secuencia una impedancia en serie en la trayectoria de puesta a tierra del neutro (solo en generadores de alto nivel de potencia)

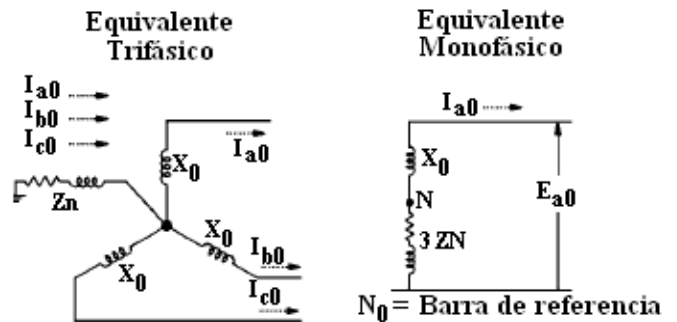


Diagrama de Secuencia Cero de un Generador Sincrónico Trifásico

1.3 Decaimiento de la corriente de falla del generador.

Producto de que el diagrama de secuencia positiva posee tres reactancias con valores que se incrementan con el tiempo, las corrientes de fallas por otro lado disminuyen.

Cuando es detectada una falla por un relé de protección en el generador, este es separado del sistema eléctrico de potencia, accionándose los interruptores del generador, campo e impulsor. Con esto la contribución del sistema a la falla es removida, pero con el inconveniente de que la corriente del generador sigue fluyendo después del disparo de los relés.