

“AÑO DE LA PROMOCIÓN DE LA INDUSTRIA RESPONSABLE Y COMPROMISO CLIMÁTICO”



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRONICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

CURSO: MAQUINAS ELECTRICAS II

TITULO DEL TEMA: 1 TRABAJO DOMICILIARIO (MAQUINAS SINCRONAS-MOTOR SINCRONO)

PROFESOR: Ing. HUBER MURILLO MANRIQUE

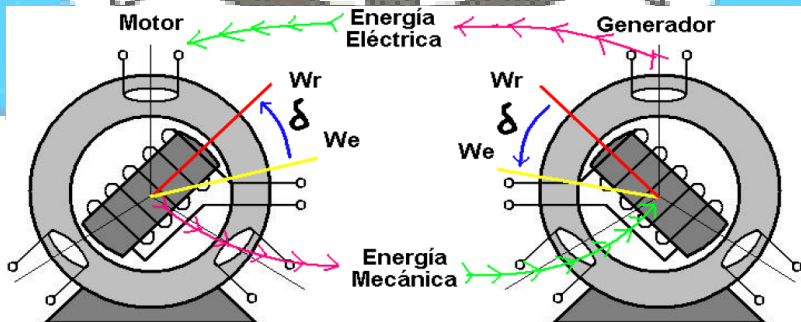
INTEGRANTES

CÓDIGO

-
-
-
-
-
-
-

FECHA DE REALIZACION: 04/09/2014 AL 14/09/2014

FECHA DE ENTREGA: 15/09/2014



BELLAVISTA, 15 DE SEPTIEMBRE DE 2014



PRESENTACIÓN

El desarrollo de este Trabajo Domiciliario “MAQUINAS SINCRONAS Y MOTOR SINCRONO” ,tiene como finalidad concientizar un mejor aprendizaje para el alumno ya que le ayuda a complementar más sus conocimientos y tener un amplio panorama de los que son estos temas, describiremos que componentes y que sistemas de control están enlazados con las maquinas eléctricas, las normas aplicables y enfatizaremos la parte constructiva del motor eléctrico ya que un alumno universitario debe acabar la carrera conociendo las partes de una maquina eléctrica y evitando errores en la parte práctica, estos conocimientos es el cimiento y la pieza fundamental para toda nuestra carrera como ingenieros electricistas ya que amplia mejor nuestro panorama.

Un estudiante universitario debe estar en permanente búsqueda del perfeccionamiento en su formación académica, profesional y social; ser un apasionado por el conocimiento, buscar constantemente la excelencia y su independencia intelectual. El estudiante entonces será el principal responsable de su aprendizaje.

El Trabajo Domiciliario está dirigido en especial a los alumnos de la UNAC y a todas las personas que tienen el deseo de aprender y superarse cada día más nutriéndose de conocimiento, aquí le mostraremos resumidamente los conceptos claros del tema mencionado (MAQUINAS SINCRONAS-MOTOR SINCRONO).



Dedicatoria

Este trabajo se lo dedicamos a todas las generaciones de nuestra facultad de, ingeniería eléctrica y electrónica, que pasaron por los laureles de la misma, en especial por los maestros quienes nos imparten sus conocimientos; que gracias a muchos o pocos de ellos, hoy en día nos forjamos un porvenir benéfico de grandes éxitos, son ellos el pilar fundamental en nuestra formación como profesionales que de aquí a unos pasos lo seremos. Solo esperamos que estas acciones se sigan practicando para nuestro propio bienestar y el de futuras generaciones.



INDICE	PAG
INTRODUCCIÓN.....	4
1.- MÁQUINAS SÍNCRONAS	
1.1.- DEFINICIÓN.....	5
1.2.- CONSTITUCION ELECTROMECHANICA.....	5
1.3.- CLASIFICACION DE LAS MAQUINAS SINCRONAS.....	6
1.4.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	8
1.5.- G.S. COMO ELEMENTO REGULADOR DE POTENCIA.....	10
1.6.- NORMAS QUE DEFINEN PROTOCOLOS Y OPERATIVIDAD.....	11
2.- REGULADORES AUTOMATICOS.	
2.1.- REGULADOR AUTOMATICO DE VELOCIDAD (RAS).....	13
2.2.- REGULADOR AUTOMATICO DE TENSION (AVR).....	14
3.- EFICIENCIA, REGULACION Y TRIANGULO DE POTTIER	
3.1.- EFICIENCIA.....	15
3.2.- REGULACION.....	15
3.3.- CURVAS DE CAPACIDAD.....	16
3.4.- TRIANGULO DE POTTIER REACTANCIA DE PETERSON.....	17
3.5.- REACTANCIA DE PETERSON.....	18
4.- PRINCIPIO DE MILLMAN Y G.S. EN PARALELO	
4.1.- PRINCIPIO DE MILLMAN.....	19
4.2.- TEOREMA DE OUWENHOVEN Y PULLEN.....	19
4.3.- OPERACIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SINCRONOS.....	20
5.- MOTOR SINCRONO	
5.1.- CONSTITUCION ELECTROMECHANICA.....	22
5.2.- CLASIFICACION GENERAL.....	23
5.3.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS NOM.....	23
5.4.- MODELAMIENTO EN EL SEP EN CUATRO CUADRANTES.....	21



5.5.- SISTEMA DE ARRANQUE DE MOTORES SINCRONOS.....	25
5.6.- APLICACIÓN DE M.S. DENTRO DEL SEP.....	26
5.7.- APLICACIÓN DEL M.S. DENTRO DEL SEP EN EL 3 CUADRANTE.....	28
5.8.- NORMAS APLICABLES A M.S.....	29
5.9.- SISTEMAS DE ATERRAMIENTO EN MAQUINAS SINCRONAS.....	31
6.- CONCLUSION	
7.- RECOMENDACIÓN	
8.- BIBLIOGRAFIA	
8.1.- PAGINAS WEB	



INTRODUCCIÓN

Este trabajo domiciliario propone un material interactivo sobre máquinas síncronas y motores síncronos con fines didácticos. Busca mejorar la enseñanza y el aprendizaje en la asignatura de máquinas eléctricas en la Universidad Nacional del Callao.

Las Máquinas Síncronas son máquinas de corriente alterna y están entre los tres tipos más comunes de máquinas eléctricas; se llaman así porque trabajan a velocidad constante y frecuencia constante en condiciones de operación estacionarias; pueden ser monofásicas o trifásicas, especialmente en aplicaciones de potencia; como la mayoría de las máquinas giratorias, una máquina síncrona es capaz de trabajar como motor o generador e incluso como reactor o como condensador.

La operación de un generador síncrono o alternador se basa en la ley de Faraday de inducción electromagnética y un generador síncrono trabaja de manera muy semejante a un generador de corriente continua, en el que la generación de fuerza electromotriz (fem) se logra por medio del movimiento relativo de entre conductores y un flujo magnético. Al colocar una espira dentro de un campo magnético y hacerlo girar, sus lados cortarían las líneas de fuerzas de campo, induciéndose entonces una fem que se puede verificar entre los extremos del conductor de forma de espira. Se comprueba que la fem es alterna. Las dos partes básicas de una máquina síncrona son la estructura del campo magnético, que lleva un devanado excitado por corriente continua y la armadura. La armadura tiene con frecuencia un devanado trifásico en el que se genera la fem de corriente alterna.

Los generadores síncronos pueden operar también como motores. Cuando operan como motores (conectándolos a una fuente trifásica), reciben el nombre de motores síncronos. Como el nombre lo dice, los motores síncronos funcionan en sincronismo con el campo rotatorio. Por consiguiente, la velocidad de rotación está asociada con la velocidad de la fuente. Como la frecuencia es fija, la velocidad del motor permanece constante, independientemente de la carga o voltaje de la línea trifásica. Sin embargo, los motores síncronos se utilizan mucho no sólo porque funcionan a velocidad constante si no porque poseen otras características de operación únicas. En este capítulo se estudiarán estas características.

La capacidad de la mayoría de los motores síncronos oscila entre 150 (200 hp) y 15 MW (20 000 hp) y giran a velocidades que van de 150 a 1800 r/min [1]. Por lo tanto, estas máquinas se utilizan principalmente en la industria pesada. En el otro extremo del espectro de potencia se encuentran los motores síncronos utilizados en dispositivos de control y relojes eléctricos.



1.- MÁQUINAS SÍNCRONAS

1.1.- DEFINICIÓN

Máquina eléctrica es aquella en la cual al menos una de las formas de energía que maneja es de naturaleza eléctrica.

En este tipo de máquinas la primera distinción que se debe hacer se refiere al tipo de corriente eléctrica con la cual operan y que puede ser “corriente continua” o “corriente alterna”; a su vez cuando las máquinas son de corriente alterna pueden ser monofásicas o polifásicas.

1.2.- CONSTITUCIÓN ELECTROMECAÁNICA

Tanto en el motor como en el generador se tiene un movimiento relativo entre un campo magnético y los conductores de la máquina. Esto da lugar a varias posibilidades y alternativas interesantes en el establecimiento de que será el rotor (la parte de la máquina que gira) y que será el estator (la parte de la máquina fija).

Tanto en la máquina síncrona como en la máquina de cd se utiliza el mismo tipo de estator, donde se ubica el devanado de excitación, el cual es alimentado mediante una fuente cd.

- **El rotor de la máquina consiste en:**

- a. Eje de armadura
- b. Núcleos de la armadura
- c. El devanado de la armadura
- d. Anillos rozantes

- **El estator de la máquina consiste en:**

- a. Un yugo o armazón
- b. Núcleo de los polos
- c. Polos de campo
- d. Escobillas y el porta escobillas
- e. Detalles mecánicos--- escudos, tapas

La Figura muestra las partes constructivas de una máquina síncrona:

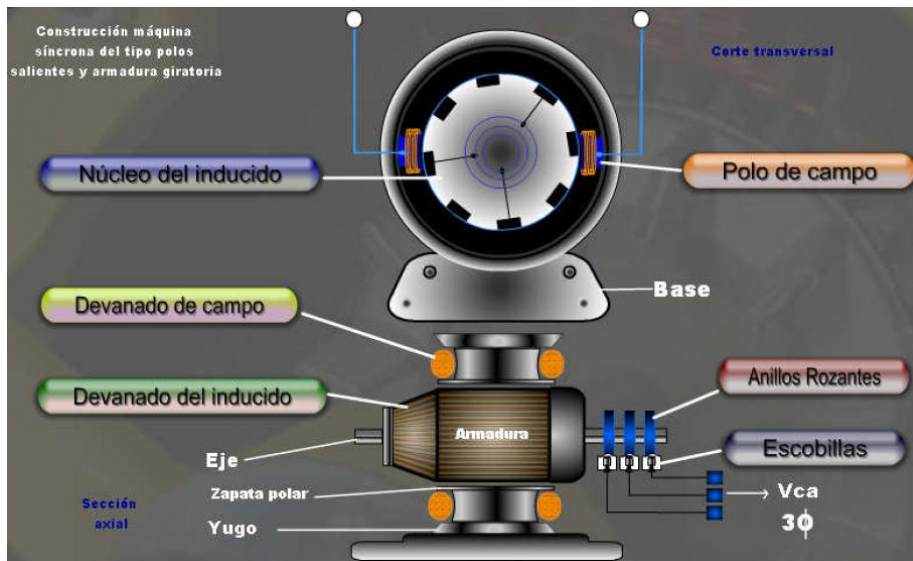


Figura 1. Partes Constructivas de la máquina síncrona

1.3.- CLASIFICACION DE LAS MAQUINAS SINCRONAS

1.3.1.- Según la velocidad de los rotores se pueden clasificar en:

A.- Rápidos.- En turbinas de gas ó vapor que desarrollan velocidades de 2 y 4 polos (velocidades de 1800 y 3600 RPM).

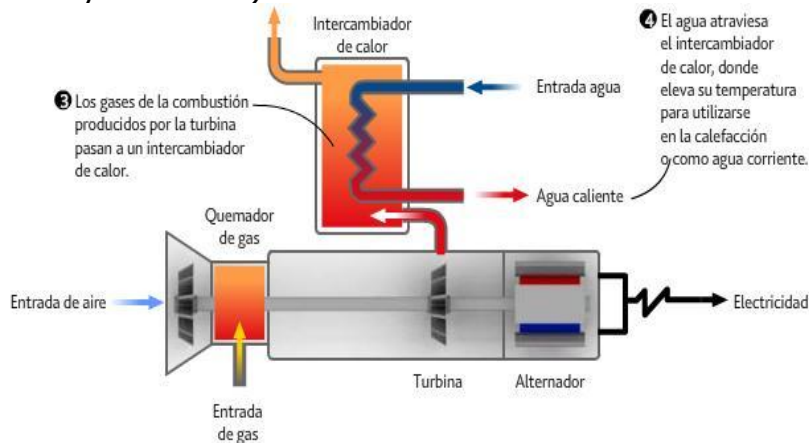


Figura 2.- Turbinas a gas.

B.- Lentos.- Turbinas hidráulicas 60 a 720 RPM. Y motores diésel y combustión interna 720 >RPM > 200.

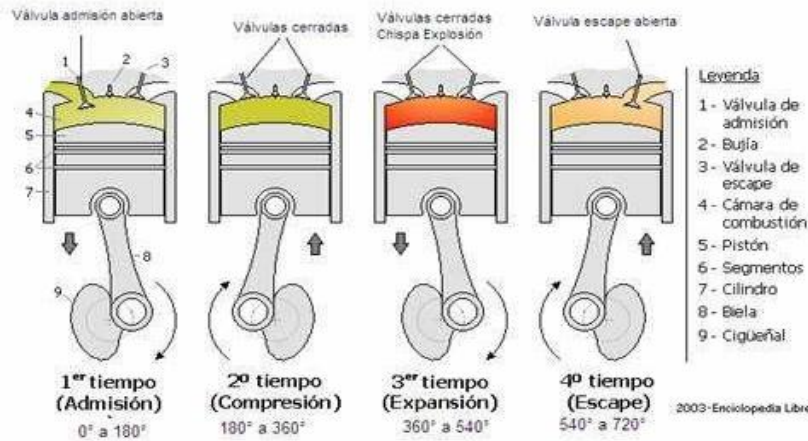


Figura 3.- Tipos de válvulas.

1.3.2.- Según el tipo de rotor se pueden clasificar en:

A.- Rotor cilíndrico.- Se usa en máquinas de alta velocidad (2 a 4 polos). Para lo cual se utilizan turbinas de gas o vapor. (Centrales térmicas).

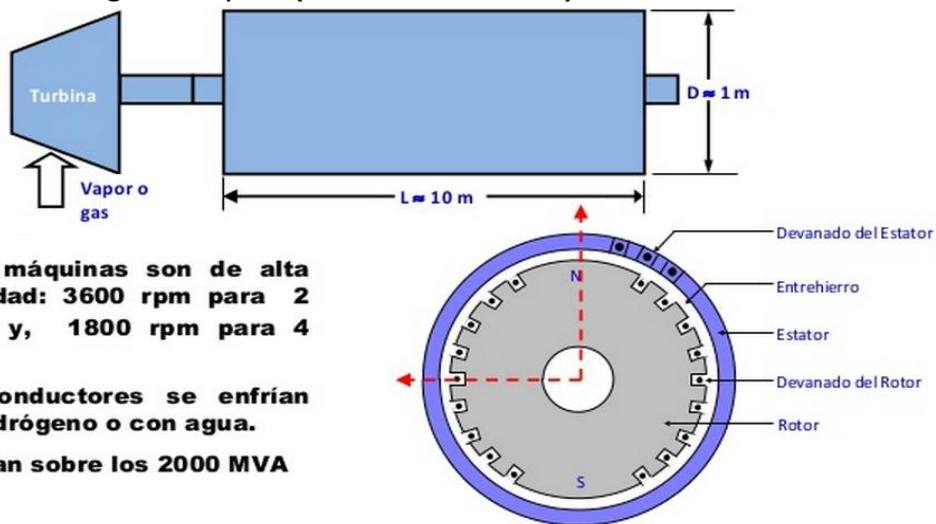


Figura 4.- Maquinas a vapor.

B.- Rotor de polos salientes.- Se usa en máquinas de baja velocidad (gran número de polos). Para lo cual se utilizan turbinas hidráulicas (centrales hidroeléctricas)

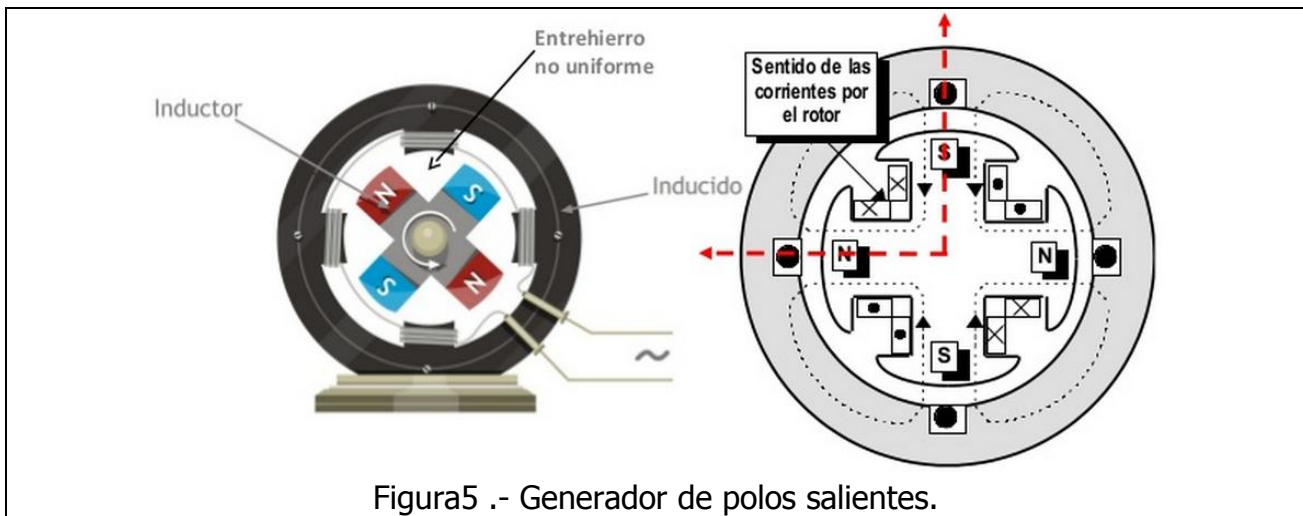


Figura5 .- Generador de polos salientes.

1.3.3.- Según el tipo de excitación se pueden clasificar en dos grandes grupos:

A.- Pequeña potencia (< 20 KW).- Tienen el devanado de excitación en el estator (polos salientes) el mismo que trabaja con DC. El devanado trifásico se ubica en el rotor (polos lizos) trabaja con AC. La energía alterna es conectada hacia la carga mediante un juego de anillos rozantes y un juego de escobillas (este modelo presenta múltiples problemas y desventajas).

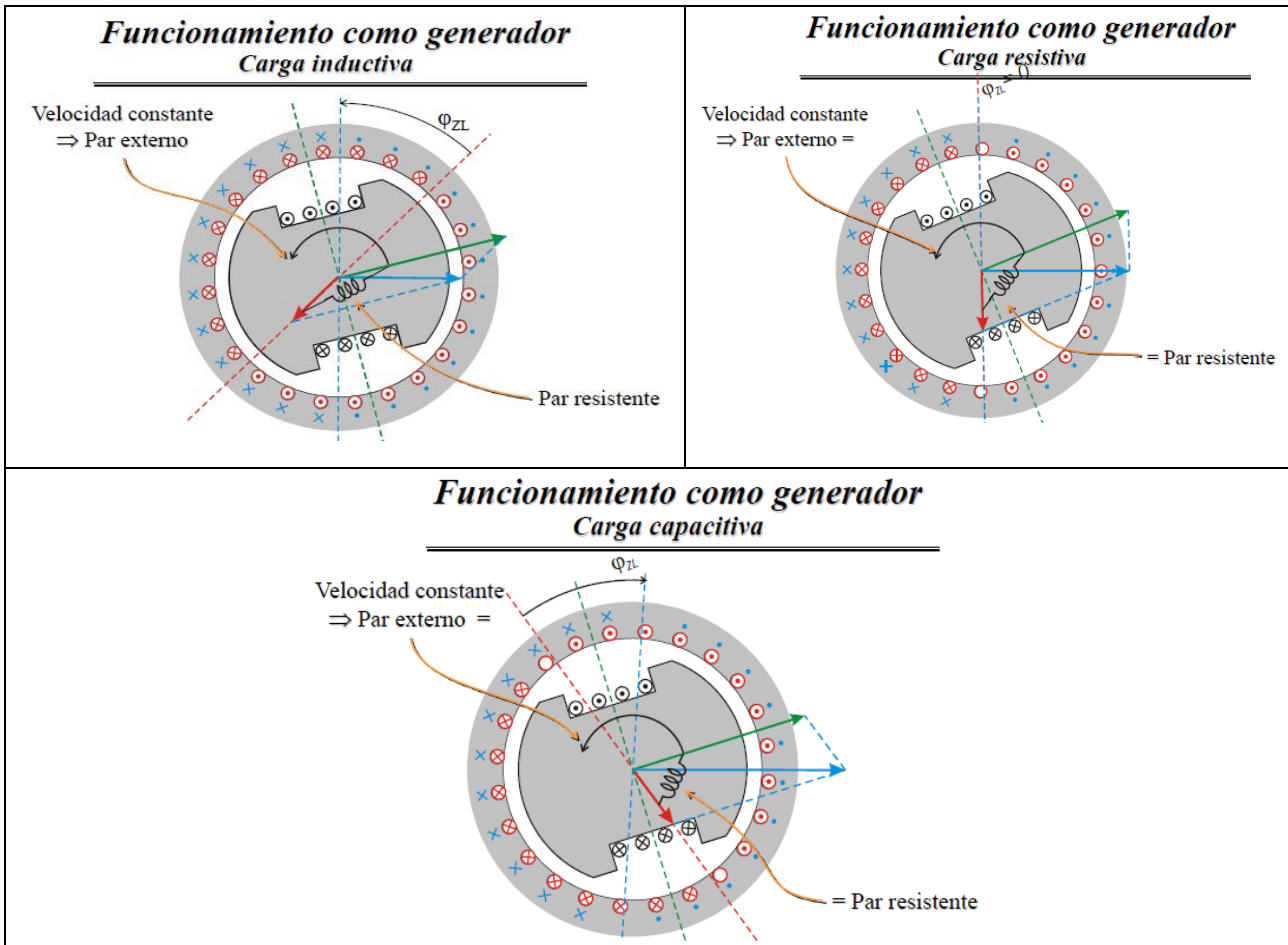
B.- Gran potencia (> 20 KW).- Tiene el devanado de excitación en el rotor (polos salientes), el cual trabajan con DC. El devanado trifásico se ubica en el estator (polos lizos) el cual trabaja con AC. La energía alterna es conectada en forma directa a la carga, esto constituye una gran ventaja frente al primer tipo.

1.4.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

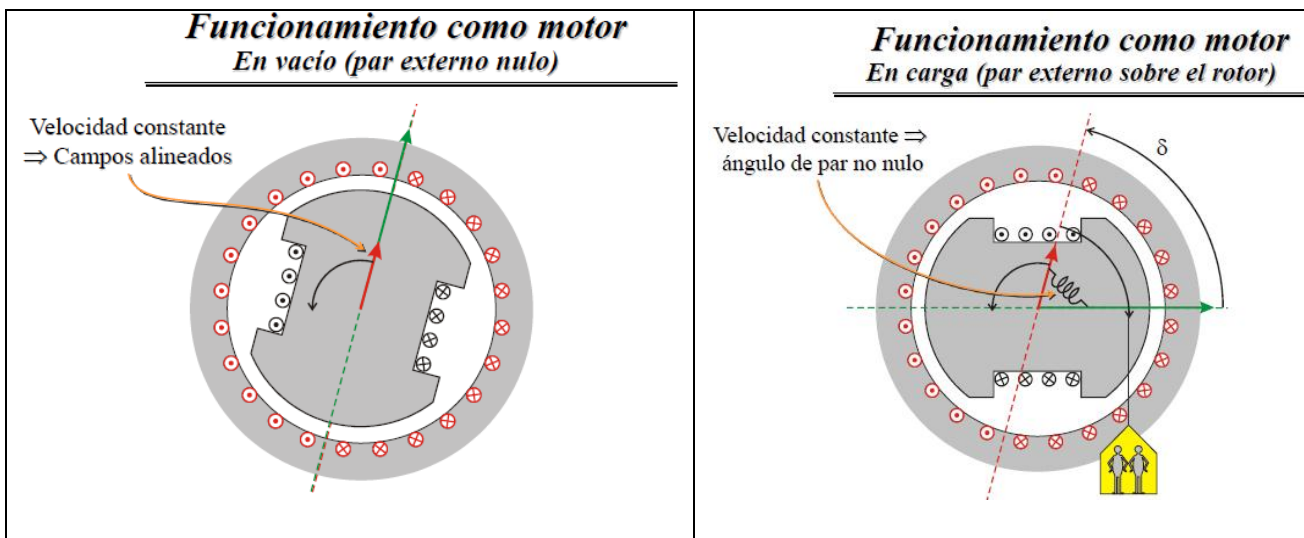
Si a un alternador trifásico se le retira la máquina motriz y se alimenta su estator mediante un sistema trifásico de corriente alterna se genera en el estator un campo magnético giratorio, cuya velocidad sabemos que es $N = 60 f/p$ donde f es la frecuencia de la red, y p es el número de pares de polos del rotor. Si en estas circunstancias, con el rotor parado, se alimenta el devanado del mismo con corriente continua se produce un campo magnético rotórico fijo, delante del cual pasa el campo magnético del estator. Los polos del rotor están sometidos ahora a atracciones y repulsiones en breves periodos de tiempo, por parte de los polos del estator pero el rotor no consigue girar, a lo sumo vibrará.

Al llevar el rotor a la velocidad de sincronismo, haciéndolo girar mediante un motor auxiliar, al enfrentarse polos de signo opuestos se establece un enganche magnético que les obliga a seguir girando juntos, pudiendo ahora retirar el motor auxiliar. Este enganche magnético se produce ya que el campo giratorio estatórico arrastra por atracción magnética al rotor en el mismo sentido y velocidad.

• **Funcionando como Generador**



• **Funcionando como Motor**



1.5.- EL GENERADOR SÍNCRONO COMO ELEMENTO REGULADOR DE POTENCIA

El elemento básico para ejercer el control en una red de potencia en un sistema eléctrico es el generador síncrono. La figura muestra el esquema básico de un generador síncrono con una turbina, que puede ser de vapor, de gas o de agua. La válvula de admisión a la turbina permite regular el flujo entrante a la misma y, por lo tanto, la potencia mecánica aportada al generador síncrono.

La finalidad de la figura es mostrar las principales variables involucradas en el control de frecuencia-potencia, la estructura detallada del sistema de control se explica en las secciones siguientes. Es frecuente emplear como entrada del sistema de control la velocidad de giro del eje, más fácil de procesar que la frecuencia eléctrica. Otra entrada al sistema es la consigna de potencia, recibida desde el exterior de la planta. La variable sobre la que actúa el control es siempre la válvula de admisión a la turbina.

Otros elementos que pueden estar presentes en un sistema eléctrico y contribuir al flujo de potencia activa son los enlaces de corriente continua, los transformadores desfasadores y los sistemas electrónicos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System). Sin embargo son poco frecuentes, y su influencia sobre el control de frecuencia-potencia en la mayoría de los sistemas es reducida en comparación con los generadores síncronos.

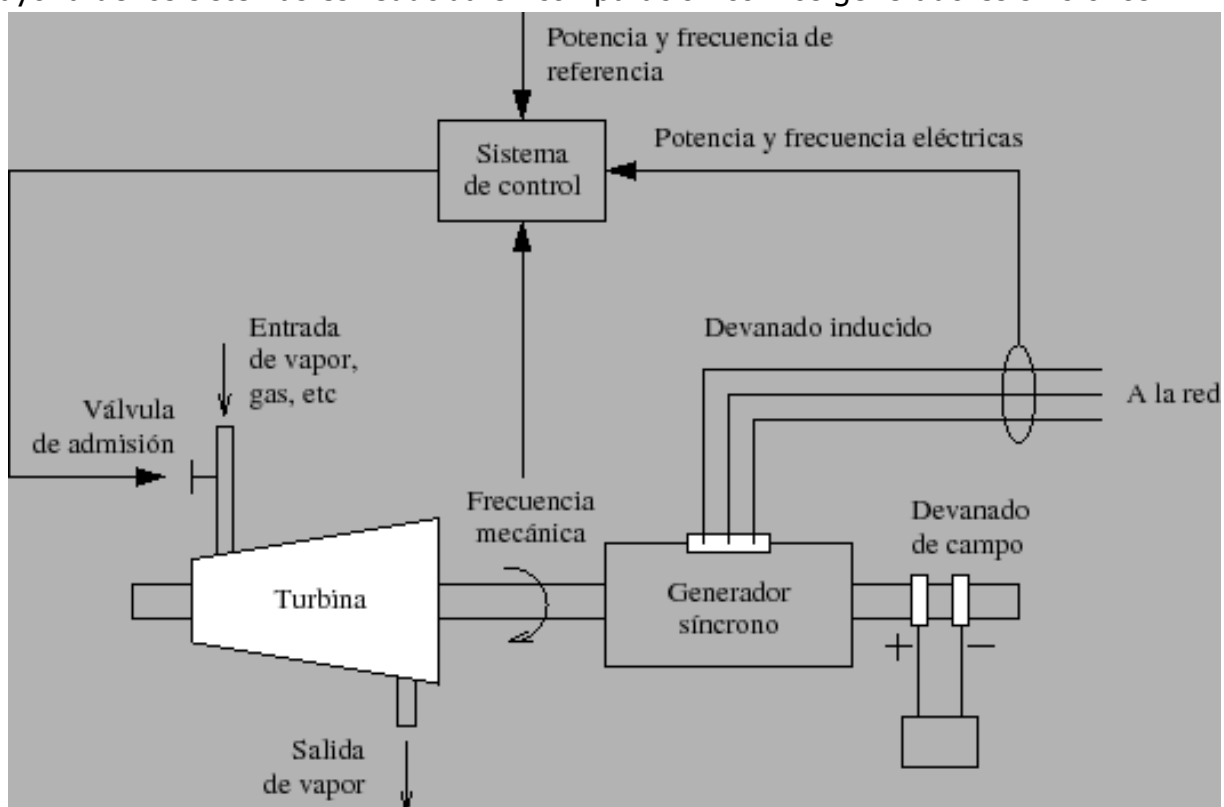


Figura 6.- Generador síncrono con una turbina.

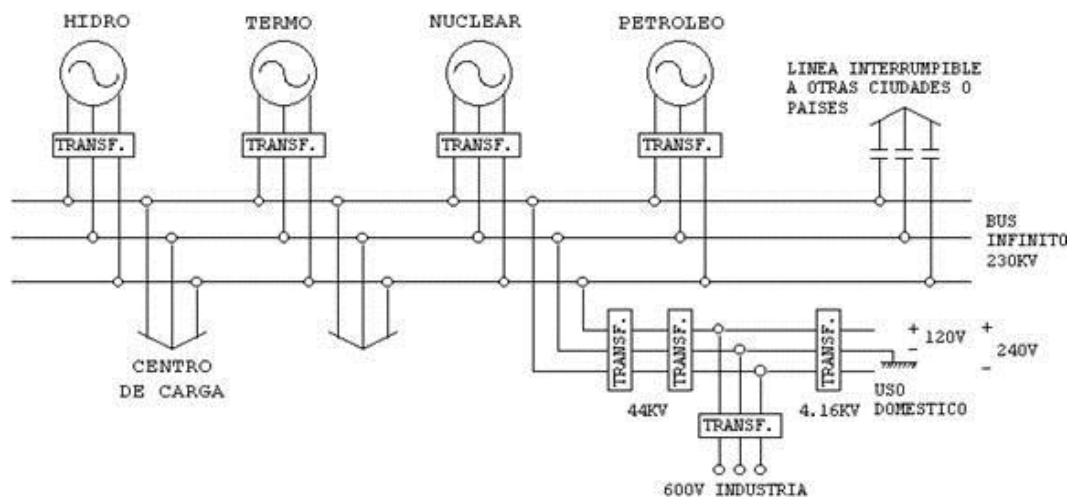


Figura 7.- Sistema de conexión en paralelo de G.S. al SEP.

1.6.- NORMAS INTERNACIONALES QUE DEFINEN LA OPERATIVIDAD, Y PROTOCOLOS DE ENSAYOS

A partir de septiembre de 2007 la eficiencia de las Maquinas Eléctricas (motores) la eficiencia debe ser medida siguiendo la Norma IEC/EN 60034-2-1.

La clasificación de los motores debe hacerse siguiendo la norma IEC/EN 60034-30.

En 2010 se homologaron todos sus motores y generadores síncronos de gran tamaño de acuerdo con las normas internacionales más exigentes (IEC 60079-15:2010 y IEC 60079-7:2006); ahora, toda la gama de motores y generadores de baja y alta tensión de la compañía está homologada para trabajar en zonas peligrosas.

La norma IEC 60079–15:2010 especifica los requisitos de construcción, prueba y marchamos para el material eléctrico del grupo II con tipo de protección “n” (sin chispas), destinado a funcionar en atmósferas explosivas. Esta norma se aplica a equipos eléctricos con una tensión nominal no superior a 15 kV rms en CA o CC.

La norma IEC 60079–7:2006 especifica los requisitos de diseño, construcción, prueba y marchamos para el material eléctrico con protección “e” (seguridad aumentada) destinado a funcionar en atmósferas explosivas de zonas 1 y 2. Esta norma se aplica a equipos eléctricos con una tensión nominal no superior a 11 kV rms en CA o CC.

ANSI C50.41-2000. Polifásicos Motores de Inducción para estaciones generadoras de energía



IEEE 43: 2000 (R2006). Práctica recomendada para la prueba de resistencia de aislamiento de máquinas rotantes (Practica Recomendada párr las Pruebas de Resistencia de Aislamiento de Máquinas rotatorias).

IEC. IEC 60034-2-1: Los métodos estándar para la determinación de pérdidas y del rendimiento de las pruebas (excepto las máquinas para vehículos de tracción). 2007

IEEE. IEEE 112: Procedimiento de ensayos para la inducción polifásicos motores y generadores. Nueva York: IEEE 2004.

NEMA MG 1-2011. Motors and Generators (Motores y Generadores).

UL 674: 2011. Norma UL para la Seguridad Motores Eléctricos y Generadores para uso en la División 1 Peligrosos (Clasificadas) (Estandar UL de piso, párr Motores Eléctricos y Generadores párrafo usarse en Lugares Peligrosos (Clasificados) División 1).

VDE-530 Según Estas normas los alternadores síncronos deben abastecer 1.5 veces la carga nominal durante 15 segundos.

2.2.- REGULADOR AUTOMATICO DE TENSION (AVR)

Un regulador de tensión automático regulador de voltaje es un dispositivo electrónico diseñado para mantener un nivel de tensión constante

La función básica de un regulador automático de tensión (AVR) es la de alimentar al circuito de excitación de tal manera de mantener constante la tensión de salida del generador dentro de ciertos rangos de frecuencia y carga.

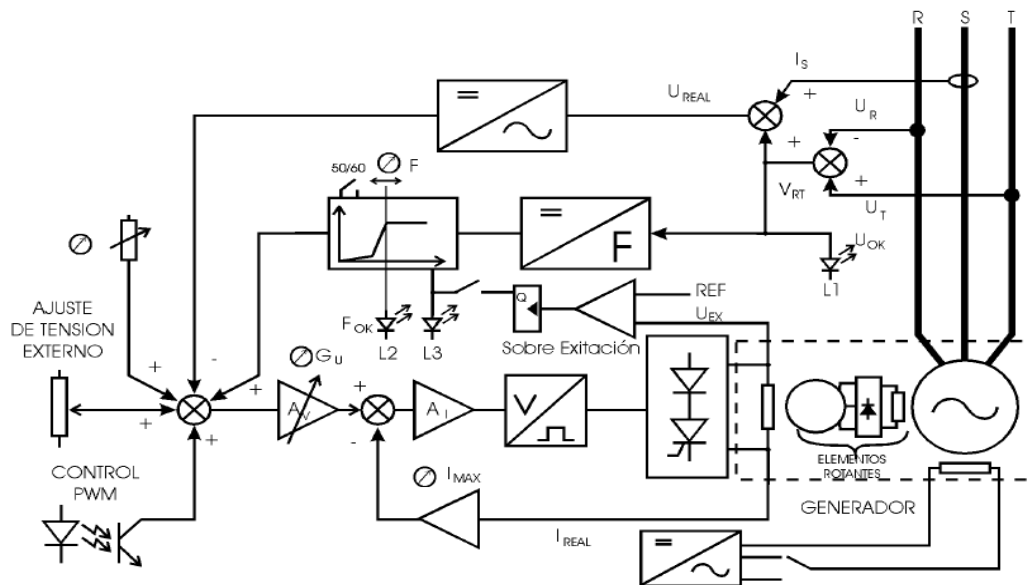


Figura 10.- Diagrama de Regulación de Tensión en la SEP.

En la parte superior se ve el esquema de la medición de tensión y la suma vectorial de la corriente que luego de pasar por un rectificador de precisión nos da como resultado la tensión real en bornes de la máquina.

Debajo de este esquema se ve la Medición de frecuencia y el generador de funciones que es el encargado de controlar la protección por baja frecuencia y la compensación de frecuencia.

La protección por sobre excitación está formada por un comparador de tensión, un integrador y un flipflop que memoriza la falla. En el margen izquierdo el punto de suma donde confluyen todas las referencias externas y las anteriores para entrar al amplificador de tensión, el que cuenta con un preset que le permite ajustar la ganancia.

A continuación está el bucle que controla la corriente de excitación el que está compuesto por un amplificador de corriente, un modulador de ángulo de disparo, puente rectificador de onda completa semicontrolado y las mediciones de corriente y tensión de salida, esta última usadas en la función de parada por sobre excitación.

El bloque inferior es la fuente alimentación con un transformador de aislamiento y salidas reguladas y estabilizadas. En el diagrama de bloques se observan también tres puentes el primero es para la selección de la frecuencia nominal de la maquina 50/60 Hz.

3.- EFICIENCIA Y REGULACION, TRIANGULO DE POTTIER

3.1.- EFICIENCIA

La eficiencia de una máquina de c-a se define a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{UTIL}}{P_{INGRESO}}$$

La diferencia entre potencia de entrada y potencia de salida de la máquina corresponde a las pérdidas que ocurren en el interior.

Las pérdidas que ocurren en las máquinas de a-c se pueden dividir en 4 categorías básicas:

- a) - Pérdidas eléctricas en el cobre
- b) - Pérdidas eléctricas en el núcleo
- c) - Pérdidas mecánicas
- d) - Pérdidas dispersas o adicionales

Una de las técnicas más convenientes de considerar las pérdidas de potencia en una máquina es el diagrama de flujo de potencia

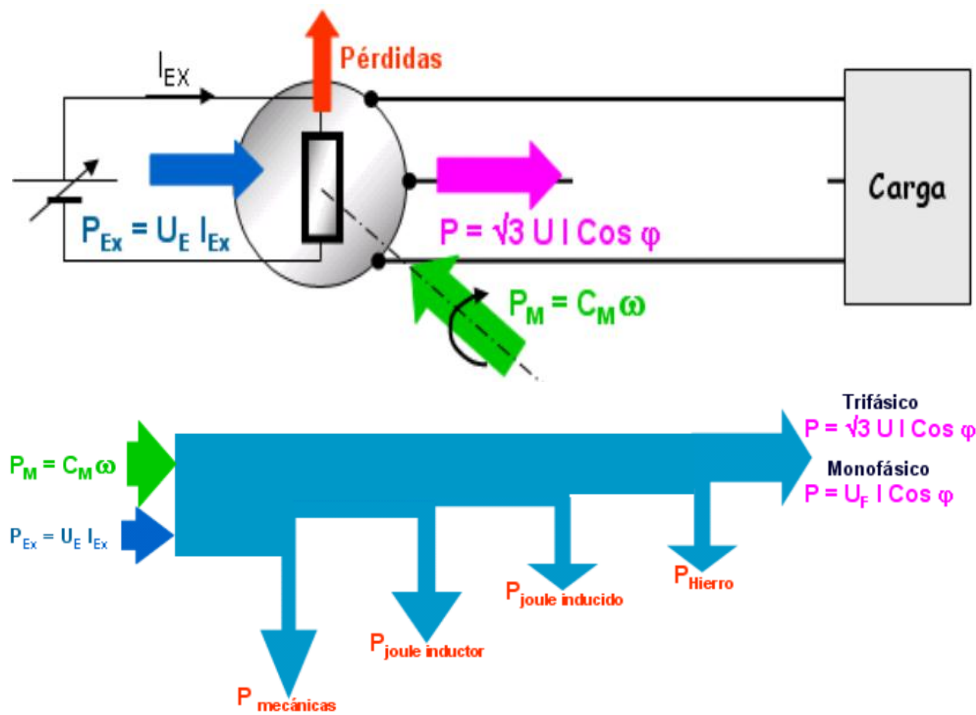


Figura 11.- Pérdidas de potencia en G.S.

3.2.- REGULACION

La regulación de voltaje un generador síncrono se define como la razón de cambio del voltaje en las terminales de la máquina de este el voltaje en vacío hasta plena carga. Así la regulación de voltaje porcentual queda determinada por la siguiente expresión:

$$Reg(\%) = \frac{E_{af} - V}{V}$$

3.3.- CURVAS DE CAPACIDAD

Los límites de calentamiento del estator y rotor, junto con cualquier otro límite de un generador síncrono, se pueden expresar en forma gráfica por medio del diagrama de capacidad también conocido como curva de capacidad del generador.

Límites de capacidad del generador síncrono

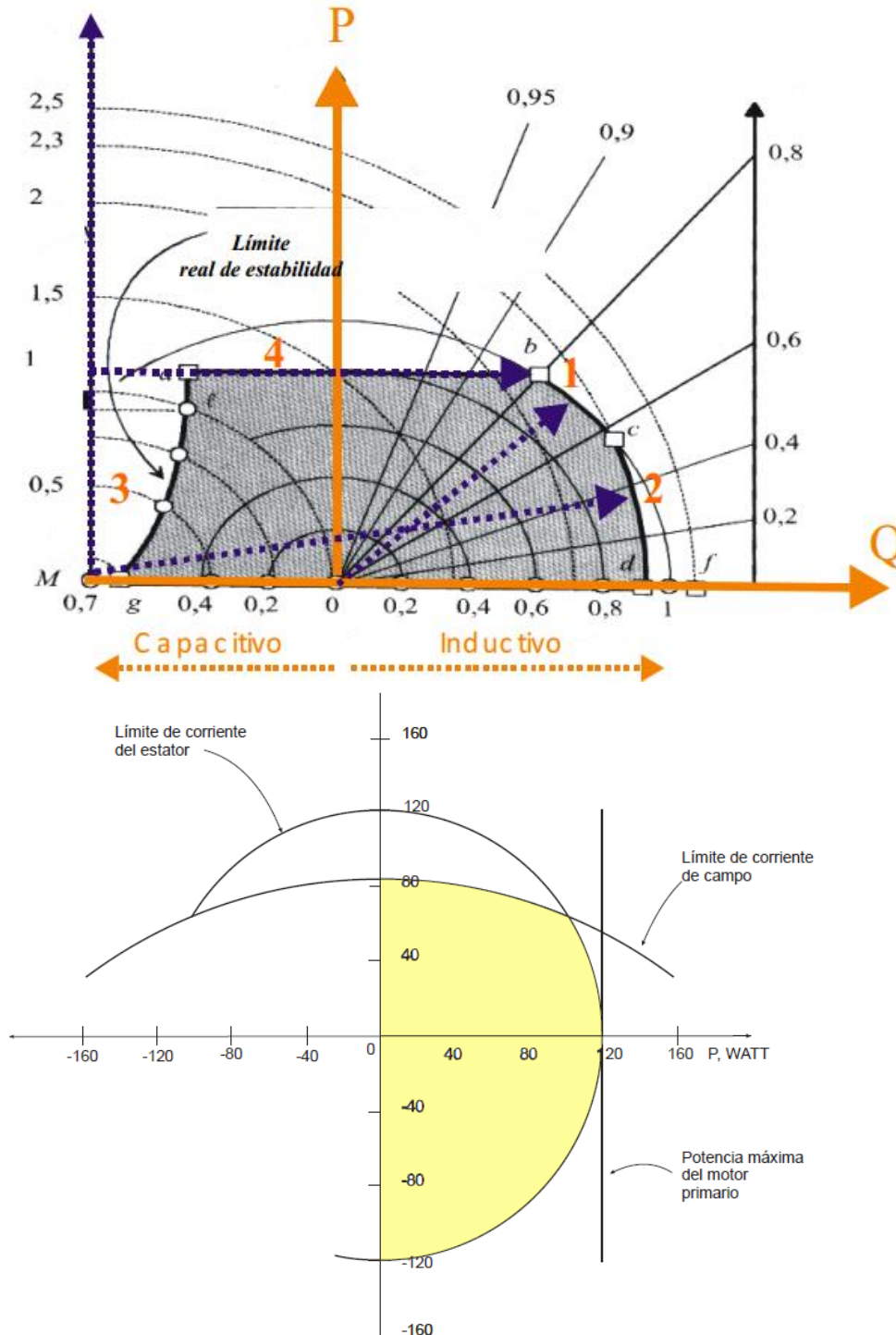


Figura 12.- Curvas de Capacidad.

3.4.- TRIANGULO DE POTTIER Y REACTANCIA DE PETERSON

Cuando la máquina alimenta una carga conectada a los terminales las corrientes inducidas del circuito

Producen un campo magnético giratorio que tiene el mismo número de polos que el campo magnético del rotor y la misma velocidad. Los dos campos magnéticos, que por simplicidad los suponemos sinusoidales, por lo tanto, están fijos entre ellos y tienen la misma longitud de onda "t", que la distancia entre polos, y asumen posiciones mutuas, y luego un cambio de fase, que depende de la naturaleza de la carga. Los dos campos magnéticos se añaden para proporcionar el campo magnético resultante que produce la f.e.m. real de la máquina. Puesto que los dos campos son sinusoidales, su suma es una senoide de la misma longitud de onda, la amplitud de los cuales se determina por una suma vectorial que tiene en cuenta el cambio de fase

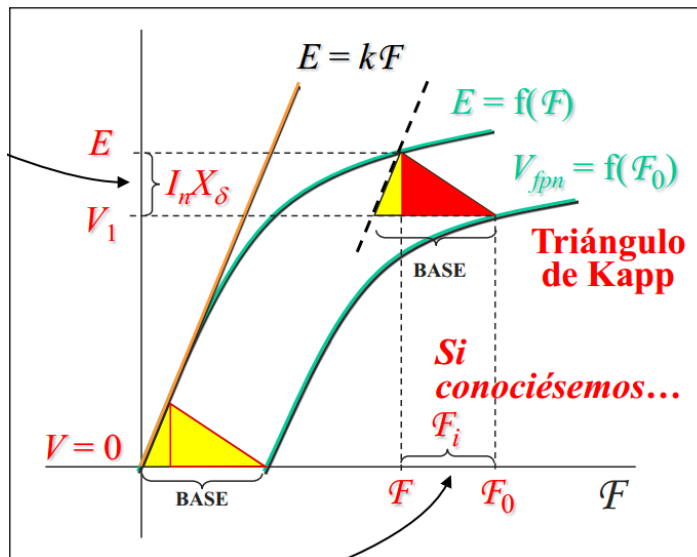


Figura 13.- Triangulo de Pottier.



Figura14.- Diag Pottier- Carga RL.



Figura15.- Diag Pottier- Carga RC.

En las próximas figuras se trazan los diagramas de Potier para cargas puramente inductivas, capacitivas y resistivas respectivamente.

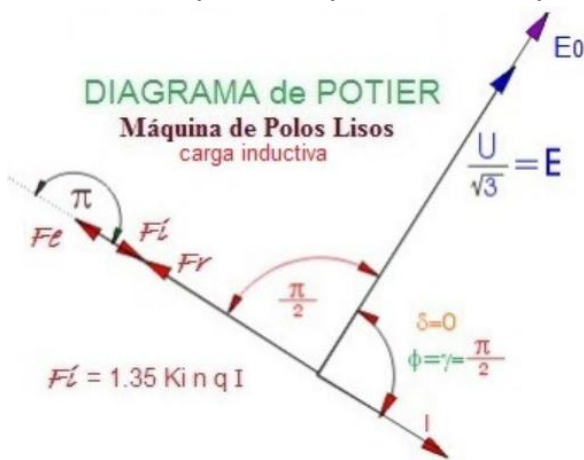


Figura16.- Diag Pottier- Carga inductiva.



Figura16.- Diag Pottier- Carga capacitiva.

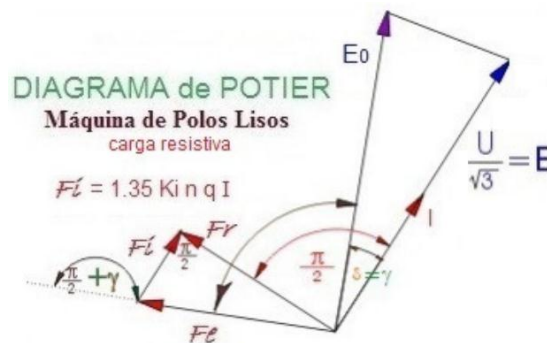


Figura17.- Diag Pottier- Carga resistiva.

3.5.- REACTANCIA DE PETERSON.

Secuencia cero aterrado con una impedancia Z_n .- Generalmente los generadores son aterrados a través de una impedancia Z_n , que es instalada para limitar la corriente de corto circuito monofásico y tierra de los terminales del generador.

A esta reactancia se le conoce con el nombre de reactancia de Peterson. Esta impedancia es conectada entre el punto neutro de la conexión Y y el sistema de aterramiento (malla de puesta a tierra ver figura). La corriente de secuencia cero pasa por cada fase del generador, en consecuencia la corriente que pasa por Z_n es $3 I_o$.

El potencial del punto No y tierra está dado por: $V_{no} - tierra = - Z_n \cdot 3 I_o = - 3 Z_n \cdot I_o$

Como la corriente del modelo es I_{ao} , para simular la caída de tensión entre el neutro y tierra la impedancia aparece como $3 \cdot Z_n$, el circuito equivalente es visualizado en la figura siguiente. La relación entre la tensión de secuencia cero (V_{ao}) y la corriente de secuencia cero (I_{ao}) se presentan en el modelo de la figura siguiente.

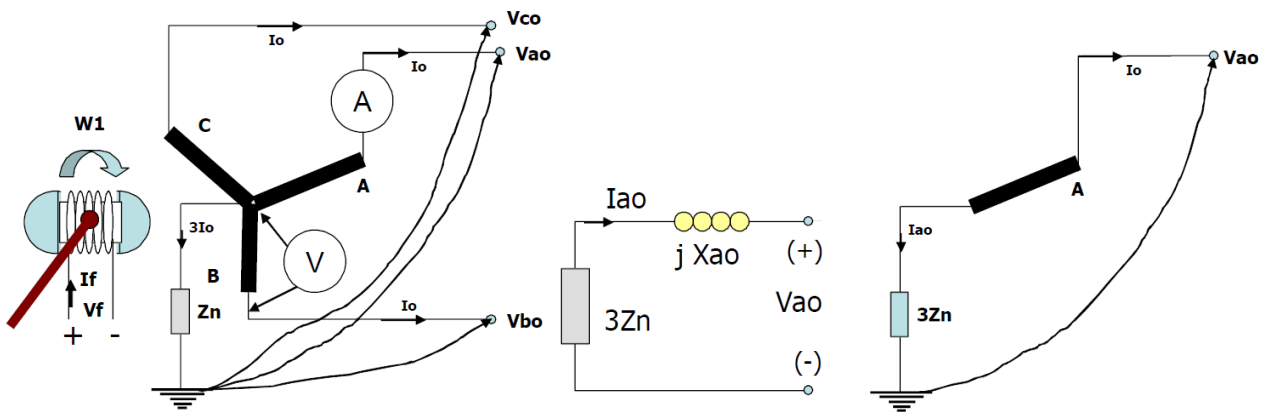


Figura 18.- G.S. sometido al ensayo para obtener la secuencia cero a través de impedancia.

4.- PRINCIPIO DE MILLMAN, G.S. EN PARALELO

4.1.- PRINCIPIO DE MILLMAN

En concreto, establece que

Un circuito eléctrico de ramas en paralelo, cada una compuesta por una fuente de tensión ideal en serie con un elemento lineal, la tensión en los terminales de las ramas es igual a la suma de las fuerzas electromotrices multiplicadas por la admitancia de la rama, dividido por la suma de las admitancias.

$$V_m = \frac{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2} + \frac{F_3}{R_3} + \dots + \frac{F_n}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} = \frac{\sum_{k=1}^N F_k \cdot G_k}{\sum_{k=1}^N G_k} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{F_k}{R_k}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}}$$

Donde F es la fuente de tensión o de corriente según sea el caso y G, es la conductancia.

Observación: Para propósitos del cálculo, el valor de la fuente de tensión o de corriente es igual a cero en un rama que consiste en nada más que una resistencia

4.2.- TEOREMA DE KOUWENHOVEN Y PULLEN

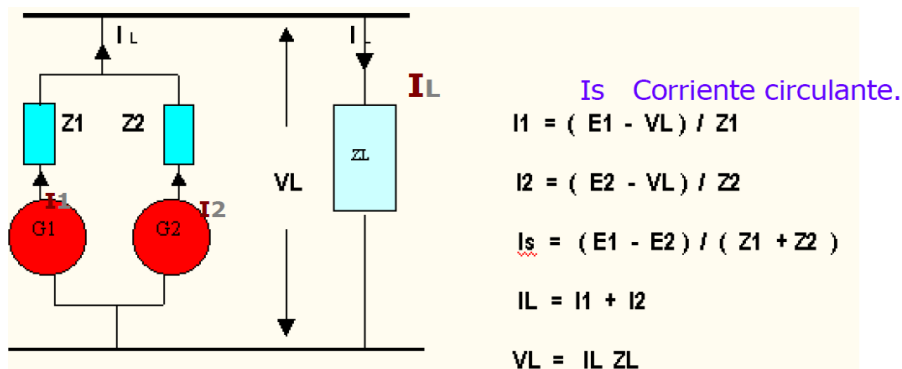


Figura 19.- Fuentes de tensión en paralelo.



De la siguiente figura anterior podemos deducir las siguientes ecuaciones:

$$V_L = I_L Z_L = (I_1 + I_2) Z_L$$

$$V_L = \{ (E_1 - V_L) / Z_1 + (E_2 - V_L) / Z_2 \} Z_L$$

$$V_L = \{ (E_1 / Z_1 + E_2 / Z_2) Z_L - V_L (1 / Z_1 + 1 / Z_2) \} Z_L$$

$$V_L / Z_L = \{ (E_1 / Z_1 + E_2 / Z_2) - V_L (1 / Z_1 + 1 / Z_2) \}$$

$$V_L / Z_L + V_L (1 / Z_1 + 1 / Z_2) = (E_1 / Z_1 + E_2 / Z_2)$$

$$V_L (1 / Z_L + 1 / Z_1 + 1 / Z_2) = (E_1 / Z_1 + E_2 / Z_2)$$

$$V_L (1 / Z_o) = I_{cc1} + I_{cc2} = I_{cc}$$

$$V_L = Z_o \cdot I_{cc}$$

Considerar lo siguiente:

1. $1 / Z_o$ es la combinación de las impedancias de los generadores y la carga.
2. I_{cc1} e I_{cc2} son las corrientes de corto circuito de cada generador.
3. I_{cc} es la corriente de corto circuito total de los generadores.

4.3.- OPERACIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS

En el mundo actual es muy raro encontrar que un generador síncrono suministre energía eléctrica exclusivamente a su propia carga. Esta situación solo se encuentra en algunas aplicaciones, tales como los generadores de emergencia. En todas las demás aplicaciones de generadores hay más de un generador que opera en paralelo para suministrar la potencia que requieren las cargas.

Un sistema eléctrico, generalmente consta de varias centrales generadoras, funcionando todas ellas en paralelo.. Existen numerosas ventajas en la subdivisión de un sistema de generación en varias centrales más pequeñas, tanto desde el punto de vista económico como estratégico. Estas ventajas se aplican también al uso de varios generadores mas pequeños en lugar de una única máquina grande, aunque esta última tiene mejor rendimiento cuando funciona a su carga nominal. Las principales ventajas del sistema en paralelo con respecto a un solo generador son:

1. Si solo hay un grupo generador suministrando potencia y queda por fuera del sistema por cualquier razón, se perdería toda la potencia de la central; mientras que si se necesita reparar una de varias unidades más pequeñas, todavía quedan disponibles las demás unidades generadoras para prestar el servicio según las necesidades.
2. Una sola unidad grande, para conseguir máximo rendimiento, debe funcionar a su carga nominal, pero desde el punto de vista económico hacer funcionar una unidad grande con cargas pequeñas no es viable. En cambio con varias unidades pequeñas funcionando en paralelo puede seguirse la demanda según sea su fluctuación, de

modo que cada máquina puede hacerse funcionar lo más cerca de su capacidad nominal, proporcionando así máximo rendimiento de la central y del sistema.

3. Al aumentar la demanda media del sistema y de la central, pueden instalarse nuevos grupos. La inversión es inicialmente menor y su crecimiento sigue al de la demanda.
4. Existe un límite físico y económico a la posible capacidad de un solo generador.

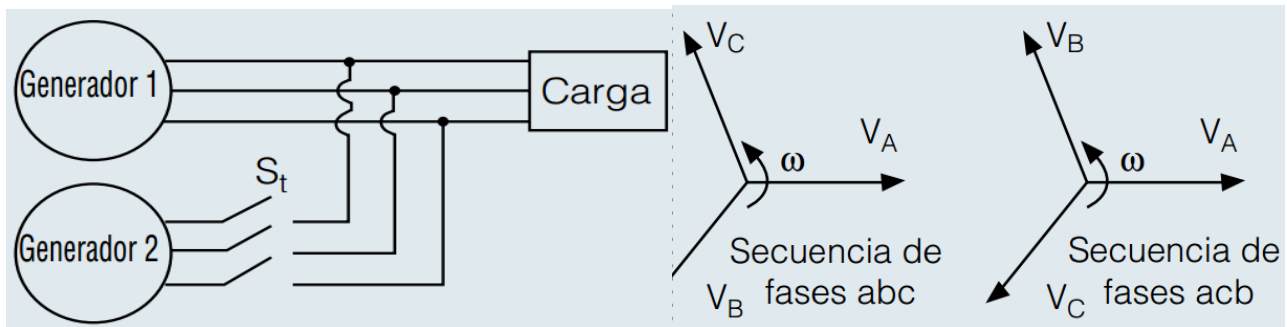


Figura 20.- Generadores en paralelo y secuencia en fases.

Las condiciones requeridas para operar en paralelo

- ✓ Deben de ser iguales los voltajes de línea rms.
- ✓ Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase.
- ✓ Los ángulos de fase de las dos fases deben ser iguales.
- ✓ La frecuencia del generador nuevo, llamado generador en aproximación debe ser un poco mayor que la frecuencia del sistema de operación.

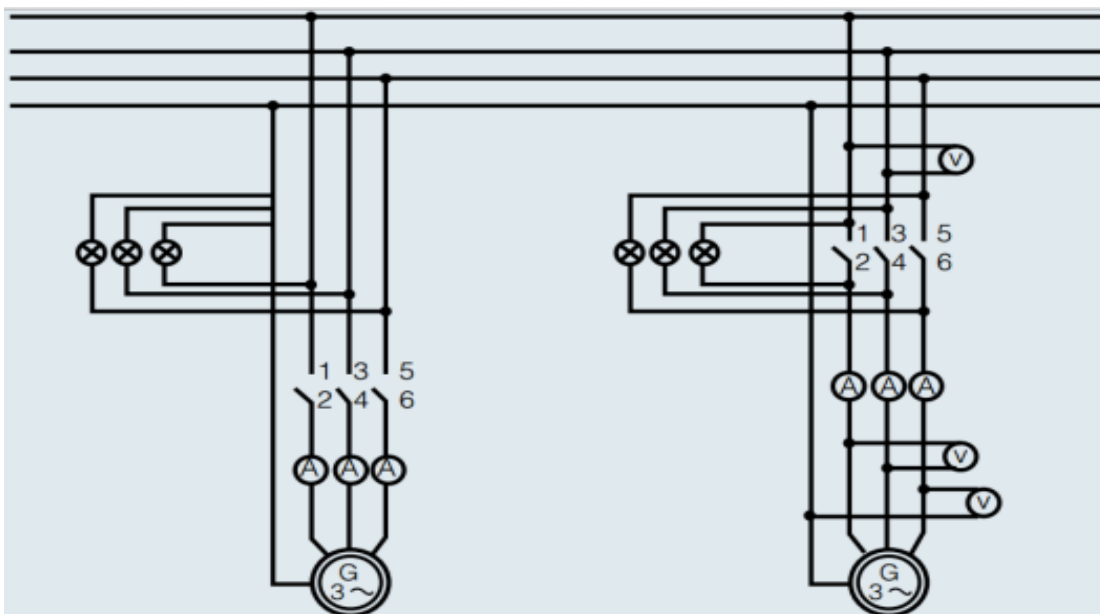


Figura 21.- Generadores síncronos en paralelo.

5.- MOTOR SINCRONO

5.1.- CONSTITUCION ELECTROMECAÁNICA

Los motores síncronos tienen las siguientes características:

Tienen un estator de trifásico similar al de un motor de inducción. Son usados por lo general en instalaciones de voltajes medianos (Ver fig. 3.1).

Tienen un rotor bobinado (campo rotatorio) que tiene el mismo número de polos que el estator, el cual es excitado por medio de una fuente externa de corriente continua (Ver fig. 3.2). El rotor puede ser de polos lisos o polos salientes¹ (Ver fig. 3.3 y 3.4).

Arranca como un motor de inducción. El motor síncrono tiene también un devanado tipo jaula de ardilla conocido como devanado amortiguador que sirve para producir la fuerza de torsión para el arranque del motor.

Los motores síncronos funcionan como se mencionó anteriormente a la velocidad de sincronismo de acuerdo con la fórmula:

$$\text{RPM} = (120 \times \text{frecuencia}) / \text{Número de polos}$$

En la figura 3.5 se pueden apreciar otras partes del motor como son los anillos rozantes y los rodamientos.

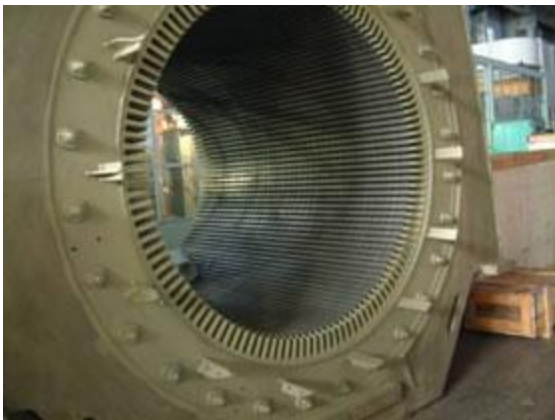


Figura 22.- Estator de un motor síncrono.



Figura 23.- Anillos colectores de excitación.



Figura 24.- Rotor de un motor síncrono.

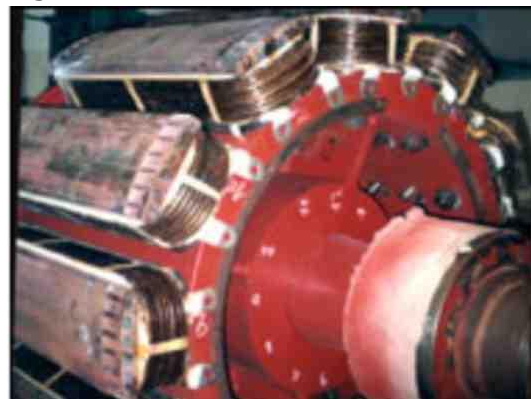


Figura 25.- Rotor de polos salientes.

5.2.- CLASIFICACION GENEAL

La siguiente figura distinguimos la clasificación de motores síncronos según NEMA

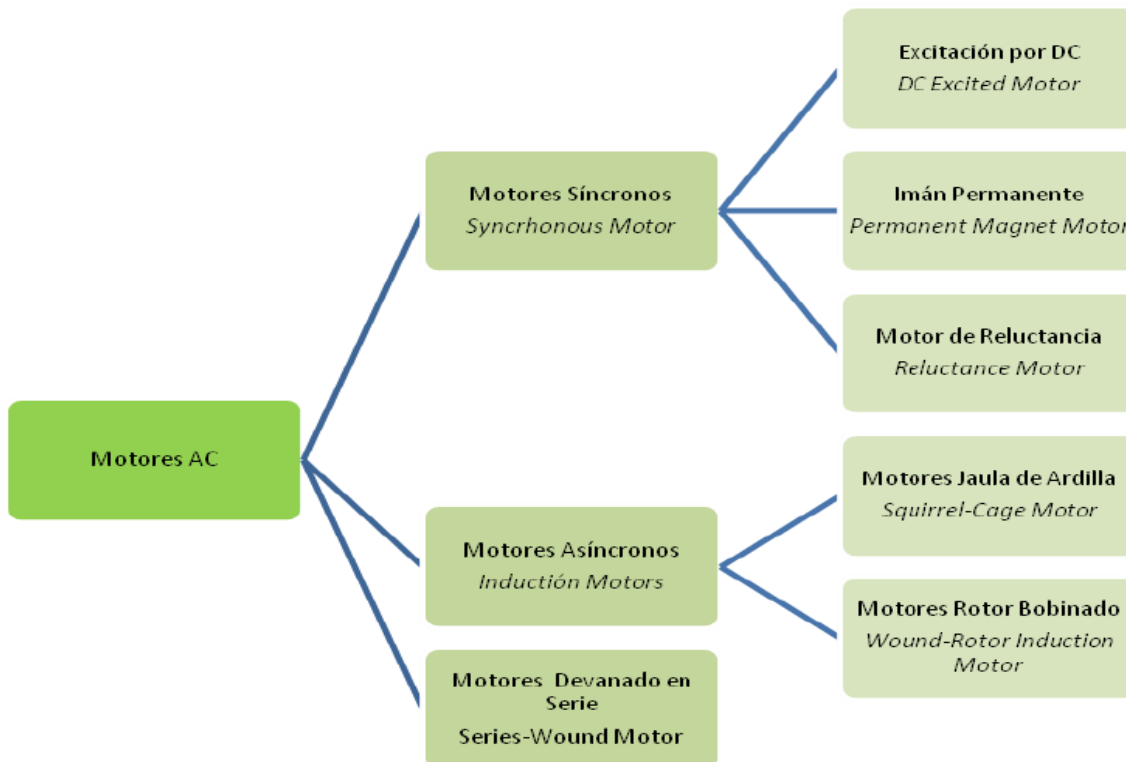


Figura 26.- clasificación de motores eléctricos

5.3.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS NOMINALES.

Si a un alternador trifásico se le retira la máquina motriz y se alimenta su estator mediante un sistema trifásico de corriente alterna se genera en el estator un campo magnético giratorio, cuya velocidad sabemos que es $N = 60 f/p$ donde f es la frecuencia de la red, y p es el número de pares de polos del rotor. Si en estas circunstancias, con el rotor parado, se alimenta el devanado del mismo con corriente continua se produce un campo magnético rotórico fijo, delante del cual pasa el campo magnético del estator.

Los polos del rotor están sometidos ahora a atracciones y repulsiones en breves periodos de tiempo, por parte de los polos del estator pero el rotor no consigue girar, a lo sumo vibrará.

Al llevar el rotor a la velocidad de sincronismo, haciéndolo girar mediante un motor auxiliar, al enfrentarse polos de signo opuestos se establece un enganche magnético que les obliga a seguir girando juntos, pudiendo ahora retirar el motor auxiliar. Este enganche magnético se produce ya que el campo giratorio estatórico arrastra por atracción magnética al rotor en el mismo sentido y velocidad.

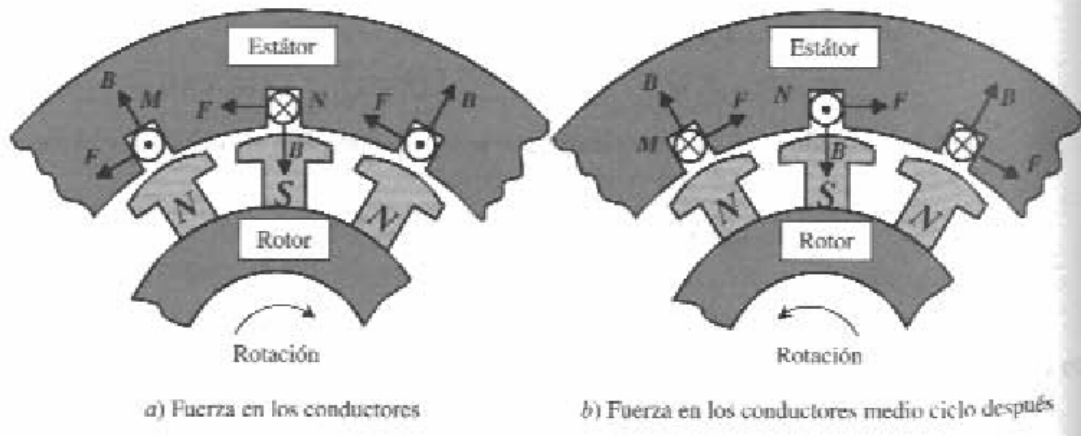


Figura 27: Principio de funcionamiento del motor síncrono

5.4. MODELAMIENTO EN EL SEP EN LOS CUATRO CUADRANTES.

La figura 28 muestra la operación de una máquina síncrona en los cuatro cuadrantes de un diagrama P-Q. En el diagrama se considera potencia activa positiva cuando ésta es suministrada a la red, con lo cual los cuadrantes I y IV corresponden a la máquina operando como generador. En el caso de la potencia reactiva, ésta es positiva si se está inyectando a la red, lo cual se consigue en los cuadrantes I y II.

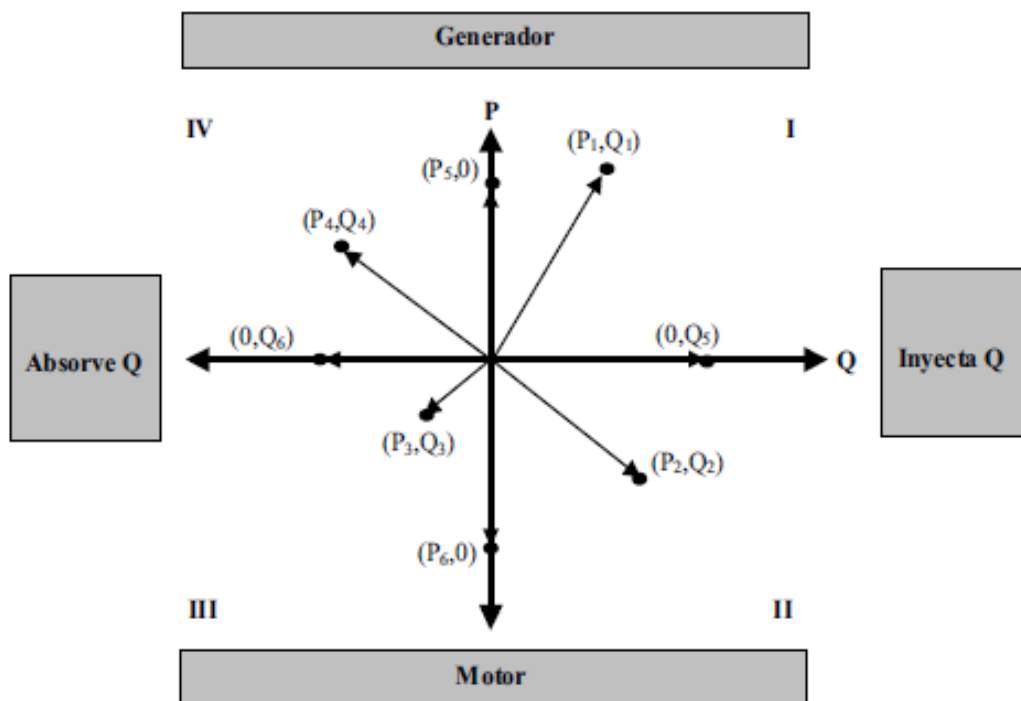


Figura 28. Operación de la máquina síncrona en el diagrama P-Q



5.5.- SISTEMAS DE ARRANQUE DE MOTORES SINCRONOS.

Como se ha indicado en los subtemas anteriores, una de los grandes problemas del motor síncrono es su bajo par de arranque, motivo por el cual se hace necesario llevar al motor a su velocidad síncrona utilizando diferentes métodos. Enseguida se indican los principales métodos de arranque para este tipo de motor:

5.5.1.- Arranque del motor por medio de la reducción de la frecuencia eléctrica.

El propósito de este método es reducir la velocidad del campo magnético del estator de tal manera que el motor por sí mismo. Hasta hace unos años este método era poco usual debido a que como sabemos los sistemas de energía eléctrica tienen frecuencias eléctricas fijas que en el caso de nuestro país es de 60 Hz. Sin embargo, hoy día la situación es diferente debido al gran auge de los dispositivos semiconductores de estado sólido que son los encargados de entregar una salida de frecuencia variable mediante una entrada de frecuencia constante.

5.5.2.- Arranque del motor con un motor primario externo.

En este método se hace uso de un motor externo de cd o ca que permita arrastrar al motor síncrono hasta la velocidad plena, una vez alcanzada esta velocidad, el motor síncrono se puede conectar en paralelo con el sistema de potencia funcionando como generador, después de esto el motor de arranque es desconectado y la máquina síncrona se comporta ahora como un motor, y está preparado para que se le suministre la carga.

5.5.3.- Arranque del motor con devanados de amortiguamiento.

Este es el método más popular para el arranque de los motores síncronos, también es conocido como método de arranque de motor síncrono como motor de inducción. Consiste en colocar devanados de amortiguamiento en unas barras localizadas en la cara del rotor y que están en cortocircuito en cada extremo por medio de un anillo

5.5.4.- Arranque automático

Mediante el siguiente circuito se puede arrancar al motor de forma automática.

Primero se cierra el interruptor 1 que alimenta al estator del motor. En el instante de arranque el rotor tiene la frecuencia de la red (alta frecuencia). En el circuito del rotor, que alimenta la resistencia de arranque, para que ésta absorba la tensión elevada de las bobinas de los polos, aparece una diferencia de potencial a los bornes de la reactancia. Esta diferencia de potencial alimenta una bobina del relé polarizado, que mantiene abierto los contactos del mismo. La máquina arranca como motor asíncrono debido a la jaula de ardilla que poseen los polos del rotor. A medida que aumenta la velocidad, la frecuencia del rotor disminuye, por consiguiente disminuye la diferencia de potencial a los bornes de la reactancia hasta que ésta no puede mantener el yugo del relé, ya cercana a la velocidad de sincronismo, y cierra los contactos de él. Al cerrarse este contacto se alimenta la

bobina del contacto, quien cierra los interruptores 2 y abre el 3 quedando de esta manera alimentado el rotor por corriente continua y funcionando en sincronismo.

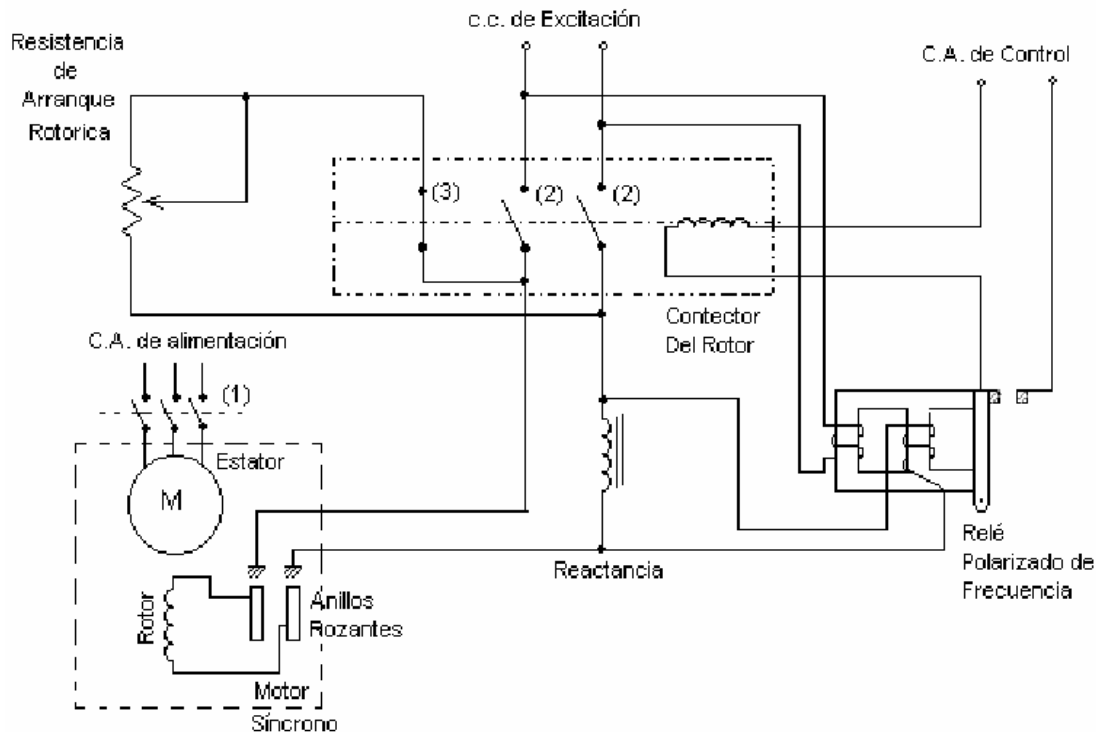


Figura 29.- Principio de Arranque Automático

5.6.- APLICACIÓN DEL M.S. DENTRO DEL SEP.

Si hacemos trabajar el motor a potencia en el eje constante (No se modifica la carga acoplada al mismo), y como la tensión de alimentación de la red de suministro es constante, se cumple:

$$P = 3 \cdot U_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi = 3 \frac{U_F \cdot E_F}{X_S} \sin \delta = \text{Constante}$$

Lo cual nos lleva a que: $I_F \cos \varphi = \text{constante}$ y $E_F \sin \delta = \text{constante}$

Partiendo de estas condiciones, la única posibilidad de modificación en la maquina es su corriente de excitación, y si analizamos el diagrama fasorial correspondiente, vemos que el extremo del fasor que representa E_F se mantiene sobre una recta horizontal y el extremo de la corriente del estator sobre una recta vertical.

Partamos nuestro análisis, tomando una corriente de excitación tal que la fem en el estator tiene el valor **EF** con lo que el motor absorbe corriente en atraso con un ángulo ϕ ,

Si ahora se aumenta dicha corriente de excitación, aumenta la fem al valor E_{F1} , y la caída de tensión en la reactancia sincrónica será $j X_S I_1$, la corriente estatorica debe estar a 90° de esta y pasa a ocupar la posición I_1 (disminuye su valor ya que disminuye la potencia reactiva del motor).

Si ahora pasamos a una corriente de excitación mayor tal que provoque la E_{F2} , haciendo el mismo análisis la corriente estatorica ocupa la posición I_2 , en fase con la tensión, lo cual indica que no hay potencia reactiva en juego, y el valor de la corriente estatorica toma su valor mínimo, para la potencia activa que se analiza. Si volvemos a aumentar la corriente de excitación la fem toma el valor E_{F3} , y en este caso la corriente estatorica vuelve a aumentar su valor (I_3), pero la misma adelanta a la tensión de la red, con lo cual toma potencia reactiva capacitiva.

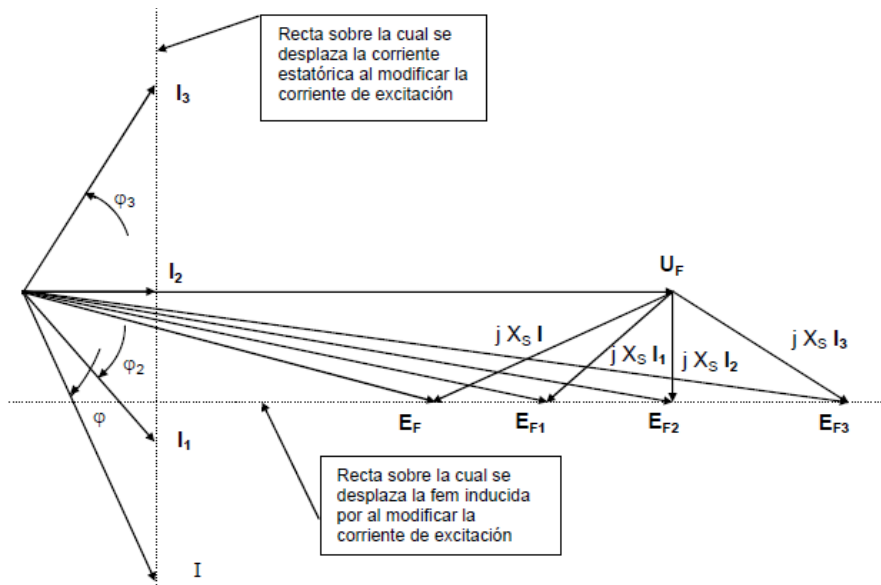


Figura 30.- Diagramas fasoriales para distintas corrientes de excitación a potencia activa y tensión constantes

De aquí se concluye que el motor trabajando a potencia activa constante, o sea a velocidad y carga constante, variando la excitación del mismo se puede hacer que la maquina se comporte como un inductor o un capacitor a los efectos de la red de suministro eléctrico. Debido a eso se puede utilizar la maquina como un compensador de potencia reactiva.

Al contrario del generador, el motor trabajando subexcitado absorbe potencia reactiva inductiva y sobreexcitado potencia reactiva capacitiva. Si efectuamos un gráfico en el cual llevamos en ordenadas la corriente estatorica y en abscisas la corriente de excitación correspondiente, lo que se obtiene es lo que se llama curva "V" de la máquina, lo cual se observa en la figura 8, para distintas potencias activas.

En dicha figura se puede observar que con factor de potencia unitario la corriente que toma el motor es mínima, y ese valor es el que fija si la maquina esta subexcitado o sobreexcitada. Este mínimo se desplaza hacia la derecha a medida que se incrementa la potencia en el eje de la máquina.

Los limites inferiores de la corriente de excitación están determinados por la obtención de un campo magnético muy débil, lo cual hace que la maquina funcione en forma inestable. Los limites superiores están limitados por el valor excesivo de la corriente estatorica, que puede ocasionar calentamiento excesivo.

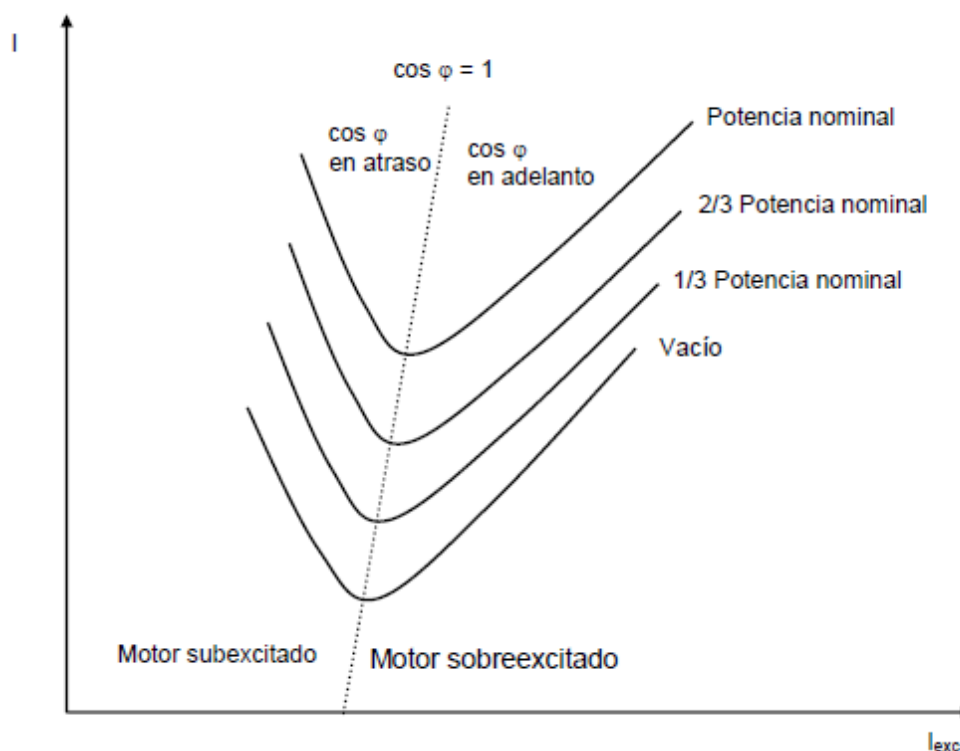


Figura 31.- Curvas características en "V" de un motor síncrono

5.7.- APLICACIÓN DEL M.S. DENTRO DEL SEP EN EL TERCER CUADRANTE.

El motor como condensador síncrono

Es muy común la práctica de conectar un motor síncrono a la línea y operarlo de forma sobreexcitada en vacío para corregir el factor de potencia. Ya que la potencia real suministrada a la máquina es cero (excepto por las pérdidas), con un factor de potencia unitario la corriente es nula. Al incrementar la corriente excitatriz, la corriente en la línea (y la potencia reactiva suministrada por el motor) aumenta de manera lineal hasta llegar hasta el punto de saturación.

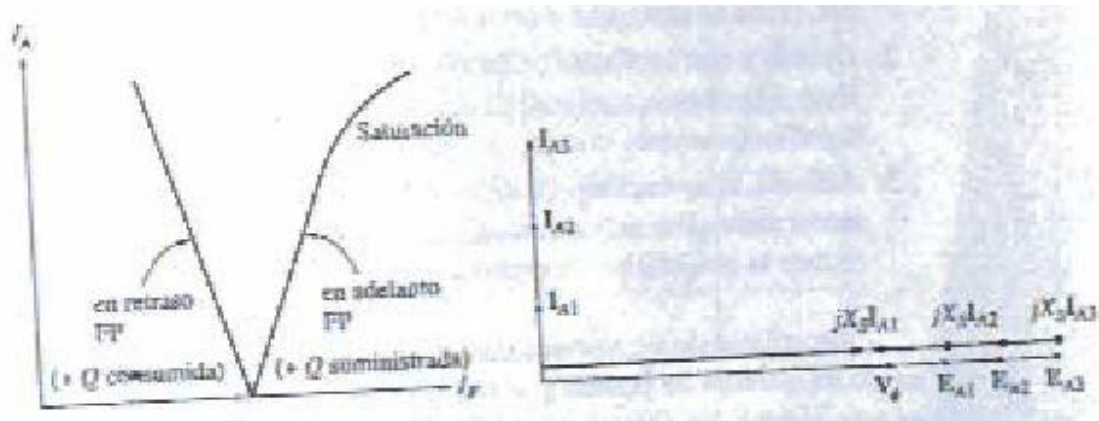


Figura 32.- curva en V de un capacitor sincrónico

En la figura 9 se puede observar el diagrama fasorial de un capacitor síncrono.

Como no hay transferencia de potencia (el motor está en vacío) $\cos\Theta=0$ y la corriente de carga adelanta 90° con respecto a la tensión de línea. El motor es una carga con factor de potencia variable. Al hacer que el motor síncrono trabaje en régimen capacitivo se disminuye el valor de la corriente de línea y del factor de potencia. Esto que hace que disminuyan las pérdidas de transmisión ($P=3RI^2$) y se mejora notablemente la eficiencia de operación del sistema

5.8.-NORMAS APLICABLES EN MOTORES SINCRONOS.

Los motores sincrónicos son ensayados de acuerdo con las normas NBR, IEC, NEMA, IEEE y API en el moderno laboratorio capacitado para testear motores de media y alta tensión con potencia de hasta 20.000 kVA y tensiones hasta 15.000 V, con monitoreo totalmente informatizado y control de alta precisión.

Los ensayos están divididos en tres categorías: ensayos de rutina, tipo y especiales.

Ensayos de rutina

- Inspección visual
- Resistencia óhmica de los devanados
- Inspección en los detectores de temperatura y resistencia de calentamiento

Marcación de los terminales y secuencia de fases

- ✓ Equilibrio entre fases
- ✓ Niveles de vibración
- ✓ Saturación en vacío
- ✓ Cortocircuito trifásico permanente



- ✓ Rotor bloqueado
- ✓ Tensión aplicada
- ✓ Resistencia del aislamiento

Ensayos de tipo

- ❖ Elevación de temperatura.
- ❖ Curva en vacío (curva V).
- ❖ Sobre velocidad.
- ❖ Determinación de pérdidas y rendimiento
- ❖ Determinación de las reactancias
- ❖ Índice de polarización

Ensayos especiales

- Prueba súbita de corto circuito
- Tensión en el eje

IEC 60034-2-1

PÉRDIDAS ADICIONALES: La IEC 60034-2-1 ofrece diferentes métodos de obtención de las pérdidas adicionales:

- A partir de las pérdidas residuales.
- Asignación de pérdidas.
- Ensayo Eh star.
- SVCs dentro del SEP. Sistemas de aterramiento en máquinas síncronas.

IEC 60034-28

DETERMINACION DE PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE: Es una metodología o ensayo propuesto por la norma IEC, para determinar los parámetros del circuito equivalente de los motores de inducción trifásico.

En esta figura se representa el circuito equivalente tipo T para los motores que trata esta norma.

PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS:

- Ensayo con carga
- Ensayo sin carga
- Ensayo del rotor bloqueado

ANSI C50.10

Mediante el uso de los métodos de ensayo de esta norma determinamos:



- ✓ La eficiencia, incluyendo las pérdidas de armadura y campo pérdidas del núcleo, pérdidas por fricción y ventilación y pérdida por corrientes parásitas.
- ✓ El incremento de temperatura incluyendo una corrida de calentamiento con factor de potencia cero o con circuito abierto y corto circuito.
- ✓ Las características de arranque, incluyendo el par y la corriente de arranque y aceleración por medio del método de la tensión reducida.
- ✓ Medición del índice de polarización.

VDE 0170/0171 – MOTORES CONTRA EXPLOSION

Esta norma prevé las siguiente clases de protección :

- Clase de protección "seguridad aumentada" ()
- Clase de protección "blindaje resistente a la presión o antideflagrante"
- Clase de protección "presurada"
- Clase de protección "blindaje de aceite"
- Clase de protección "seguridad propia"
- Clase de protección "protección especial"

5.9.- SISTEMAS DE ATERRAMIENTO EN MAQUINAS SINCRONAS.

Los generadores síncronos se ponen a tierra Principalmente debido a las siguientes necesidades:

- Minimizar el daño de la máquina por fallas a tierra.
- Limitar esfuerzos mecánicos producidos por fallas externas.
- Limitar las sobretensiones y los transitorios presentes en las fallas.
- Proveer un medio para la detección de fallas a tierra en la máquina.
- Coordinar la protección del generador con los requerimientos de otros equipos conectados al mismo nivel de tensión, tales como el transformador elevador.

5.9.1.- Tipos de aterramiento de generadores

Los generadores son los equipos más costosos de un sistema eléctrico a su vez son los que están sujetos a la mayor cantidad de problemas y defectos eléctricos y mecánicos posibles por ende es necesario conocer las diferentes formas de protección con aterramiento a tierra para su protección.

En términos generales (IEEE C62.92.2) hay seis grandes métodos de aterramiento de generadores:

5.9.2.- Efectivamente aterrado (aterramiento con baja inductancia)

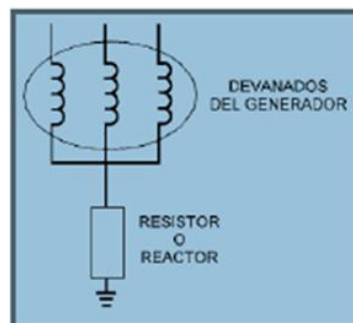
El neutro esta puesto a tierra directamente sin ninguna impedancia.

Las corrientes de falla son de alta magnitud .los relés de sobre corriente de secuencia cero detectan la falla, y se complementan con elementos direccionales.

La detección de fallas a tierra de alta impedancia, es dificultoso con relés no direccionales con sistemas de 4 conductores.

5.9.3.- Puesta a tierra de baja impedancia

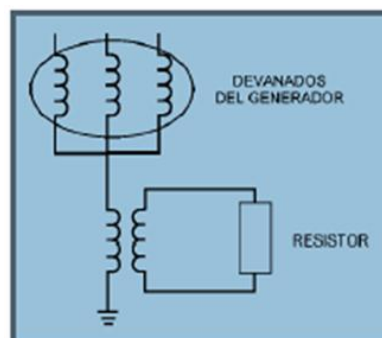
Para el caso de la prueba de puesta a tierra de baja impedancia es utilizada para drenar la corriente de falla a tierra, aproximadamente de 150 a 200% del amperaje de la corriente nominal del generador. Este sistema generalmente es utilizado para los casos en que se cuanta con múltiples unidades generadoras que tienen en común un mismo bus, o para unidades las cuales no incluyen en su configuración un transformador elevador. De esta manera e independientemente de cuál de los dos sea el caso. Con este método se puede suministrar la fuente de tierra para el sistema. En la figura siguiente se muestra el circuito para este caso



Circuito representativo de la prueba de puesta a tierra de baja impedancia

5.9.4.- Puesta a tierra de alta impedancia.

En lo que respecta a la prueba de puesta a tierra de alta impedancia se emplea mediante la colocación de un transformador de distribución con un resistor secundario. Esto permite reducir los valores de la corriente de falla del generador a valores de entre 5 y 25 amperes. Este tipo de configuración es usado para el caso de generadores los cuales estén conectados en forma unitaria. La figura a continuación muestra dicha descripción.



Circuito representativo de la prueba de puesta a tierra de alta impedancia

5.9.5.- Aterramiento resonante

El sistema es llamado también compensado.



El neutro está conectado a tierra a través de un reactor variable de alta impedancia con la finalidad de igualarse automáticamente con la capacitancia fase a tierra del sistema. Este reactor es llamado también bobina Petersen, o bobina supresora de arco, o neutralizador de falla tierra.

Teniéndose la opción de inyectar corriente mediante la impedancia durante la falla a tierra y reducir la corriente de falla a cero.

La detección de fallas a tierra de alta impedancia, requiere sensibilidad a la corriente de secuencia cero y se usan elementos de direccionales vatimétricos.

5.9.6.- No aterrado

El neutro no está conectado a tierra y el sistema presenta suficiente capacitancia a tierra. Los relés tensión de secuencia cero o homopolar detectan la falla a tierra, pero no son selectivos y requieren desconexión secuencial de los circuitos, para determinar el circuito fallado, o se puede usar un elemento direccional varimétrico o vatimétrico alimentado con la corriente y tensión de secuencia cero, luego se ubica el tramo fallado, se desconecta este tramo. Otra manera de ubicar la falla a tierra, es con un elemento direccional que mide la reactancia capacitiva homopolar el cual determina el tramo fallado.



CONCLUSION

Se considera que el objetivo del proyecto se ha cubierto satisfactoriamente, tal que los estudiantes y lectores tienen la capacidad de: describir la estructura, interpretar conceptos fundamentales.

Es de mucho mérito llevar a la práctica lo que se estudia y analiza de forma teórica en el salón de clases. El caso de los ingenieros de cualquier rama, es de vital importancia esta parte de preparación.

Para que la máquina síncrona sea capaz de efectivamente convertir energía mecánica aplicada a su eje, es necesario que el enrollamiento de campo localizado en el rotor de la máquina sea alimentado por una fuente de tensión continua de forma que al girar el campo magnético generado por los polos del rotor tengan un movimiento relativo a los conductores de los enrollamientos del estator.

La máquina sincrónica se puede utilizar como generador, tanto para alimentar cargas aisladas o para entregar potencia a una red eléctrica compleja.

El generador síncrono consta de una igualdad entre la frecuencia eléctrica y la frecuencia angular, es decir, el generador girara a la velocidad del campo magnético a esta igualdad de frecuencias se le denomina sincronismo.

Los generadores son una parte fundamental del sistema eléctrico y, por tanto, las prácticas de puesta a tierra determinan el tipo de protección por utilizar en la máquina y su coordinación con los demás elementos protegidos.

RECOMENDACIÓN

Para seleccionar las máquinas síncronas nos debemos asegurar si esta tendrá una máquina asíncrona como carga. Si fuera nuestro caso aplicaríamos el procedimiento de selección recomendado por los fabricantes y a la vez respetar las recomendaciones de la norma VDE 530.

También es necesario que la selección y dimensionamiento del sistema de protección deba ser diseñado a medida.

La protección de ser realizado por equipos altamente sofisticados que presenta un control y protección optimizados



BIBLIOGRAFÍAS

- ❖ Máquinas Eléctricas Autor; Stephen J. Chapman Editorial; Mc Graw Hill Edición; 4.
- ❖ Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia Autor; Theodore Wildi Editorial; Pearson, Prentice Hall Edición; 6.
- ❖ Máquinas Eléctricas Autor; A. E. Fitzgerald Charles Kingsley, Jr. Stephen D. Umans Editorial; Mc Graw Hill Edición; 5.
- ❖ ACOSTA M, Alvaro, GRANADA G, David, LÓPEZ V, Ricardo. Impedancias de secuencia de la máquina síncrona. Pereira, 1979, 50 p. Trabajo de grado (Ingeniería Eléctrica). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Eléctrica.
- ❖ ORTIZ M, Gustavo Alberto, PIRAQUIVE M, José Fernando. Elementos de diseño de una máquina síncrona, Pereira, 1980, 337 p. Trabajo de grado (ingeniería Eléctrica). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Eléctrica.
- ❖ ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. Curso de máquinas síncronas: la construcción de las máquinas síncronas, los devanados y el voltaje inducido en los generadores síncronos, el generador trifásico, el motor síncrono, operación en paralelo de generadores. Primera Edición.
- ❖ J CHAPMAN, Stephen. Máquinas eléctricas: introducción a los principios de las máquinas, generadores síncronos, motores síncronos. Cuarta edición. México, Mc Graw Hill, 2005.

PAGINA WEB

- ✓ <http://es.slideshare.net/jorgemunozv/maquinas-elctricas-sincronas>.
- ✓ <http://www.ingelec.uns.edu.ar/cee2553/docs/CEE-TPL6-Maquina%20Sincronica-V3.pdf>.
- ✓ http://eii.unex.es/maqelec/C_Clases/3_Rotativa/3_MaqSincrona/3_Analisis.pdf.
- ✓ http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/4_anio/electrotecnia_maquinas_electrica/Maquina_Sincronica_Potier.pdf.
- ✓ <http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/123456789/5117/1/MODOSDE.OPERACIONDELAMAQUINASINCRONAObTENIDOSDEFORMAEXPERIMENTAL.pdf>.
- ✓ <http://www.teausa.net/Portals/0/uploads/TEA-Neckar-Fine-Precision-Motors-and-Gearboxes-Technical.pdf>.