

CAPITULO 1 GENERADOR SÍNCRONO

1.1 Particularidades constructivas

A lo largo de los años las máquinas eléctricas han tenido diferentes aplicaciones, todas ellas en beneficio del ser humano, las cuales han dependido de las necesidades que se han presentado.

A lo largo del último siglo, la energía eléctrica ha representado una de las necesidades más grandes a satisfacer. En particular, para los sistemas eléctricos de potencia, el generador síncrono es parte fundamental en las plantas de generación de energía eléctrica. Por lo tanto es menester tener conocimiento de los principios básicos de su conformación y operación.

1.1.1 Rotor

El generador síncrono es un convertidor de energía electromecánico constituido de una parte móvil (rotor o inductor) y una parte fija (estator o inducido) las cuales están separadas por un entrehierro. El sistema inductor contiene los polos magnéticos los cuales son excitados con corriente continua y están destinados para crear el flujo inductor. El sistema comúnmente utilizado cuenta con un circuito de excitación el cual alimenta los polos del rotor mediante unos anillos colectores que giran con el rotor y a los cuales llega la corriente proporcionada por la excitación de la máquina. Los sistemas de excitación serán presentados más adelante en este capítulo.

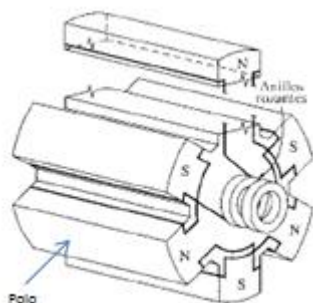
Esencialmente existen dos tipos de generadores y estos dependen del tipo de rotor que los conforma, ya sea de polos salientes o de polos lisos. La aplicación de uno u otro está en función de diferentes variables como el tipo de planta generadora, la velocidad síncrona, etc. Por ejemplo para una planta hidroeléctrica debido a la baja velocidad, lo más adecuado es un generador de polos salientes, mientras que en plantas termoeléctricas, se ha optado por generadores de polos lisos debido a que se logran alcanzar velocidades de 3600 rpm.

Rotor de polos salientes

En el rotor de polos salientes se cuenta con una estructura soporte en la cual se alojan los polos. La forma de dicha estructura depende de diferentes factores entre los cuales el más importante es el número de polos a ser colocados, lo cual se debe a que este tipo de rotores es aplicado en turbinas hidráulicas, las cuales alcanzan velocidades hasta 1200 rpm y se tiene la necesidad de una frecuencia de 50 ó 60 Hz.

Los polos regularmente son insertados sobre una masa sólida que tiene una superficie externa formada por tantas superficies elementales como polos tiene el rotor (fig. 1.1), de tal forma que el núcleo tiene forma de un prisma. En el caso de rotores de diámetros grandes la franja superficial del rotor se construye de paquete de laminaciones con una debida distribución para fijarse al núcleo.

Es notable el hecho de que las bobinas de excitación van alrededor de los núcleos polares y las bobinas se conectan en serie con el polo adyacente teniendo polaridad opuesta. Conjuntamente se utiliza un devanado de jaula de ardilla o expansiones polares. En condiciones normales este devanado no lleva ninguna corriente debido a que el rotor gira a la velocidad de sincronismo. Sin embargo, cuando la carga en el generador cambia repentinamente la velocidad del rotor empieza a fluctuar, produciendo variaciones momentáneas de velocidad por arriba o por debajo de la velocidad síncrona. Esto induce voltaje en el devanado de jaula de ardilla y a su vez una corriente la cual interacciona con el campo magnético rotatorio del estator que es traducido en corrientes parasitas.



Rotor de polos salientes

Figura 1.1 Rotor de polos salientes

Rotor de polos lisos

Es bien sabido que la eficiencia en turbinas de vapor de gran velocidad es mayor que las turbinas hidráulicas, lo cual se hace extensivo en los generadores. La velocidad centrífuga ejercida en los rotores de polos lisos es la limitante en el diámetro máximo permitido. Otra limitante que se tiene es la velocidad máxima debido a que para un sistema de 60 Hz, no se puede utilizar menos de 2 polos por lo que la velocidad máxima puede ser 3600 rpm ó 1800 rpm para rotores de 4 polos. Es por eso que para máquinas de gran capacidad los rotores deben tener una longitud muy grande (fig. 1.2).

Con este tipo de construcción el entrehierro cuenta con un espesor constante a lo largo de toda la circunferencia de tal forma que para que el campo magnético sea de forma senoidal, la distribución de las ranuras no es uniforme.

En este tipo de rotores las bobinas se colocan en forma radial lo cual permite una mayor distribución de la fuerza magnetomotriz (fmm) en cada polo consiguiendo una mejor onda senoidal en la fuerza electromotriz generada (fem).

En este tipo de rotores las bobinas de excitación son conductores de cobre de sección rectangular, colocadas a presión en las ranuras del rotor, las cuales cuentan con mica micarta con fibra de vidrio como aislamiento.

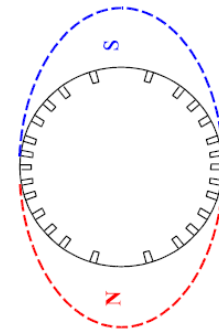
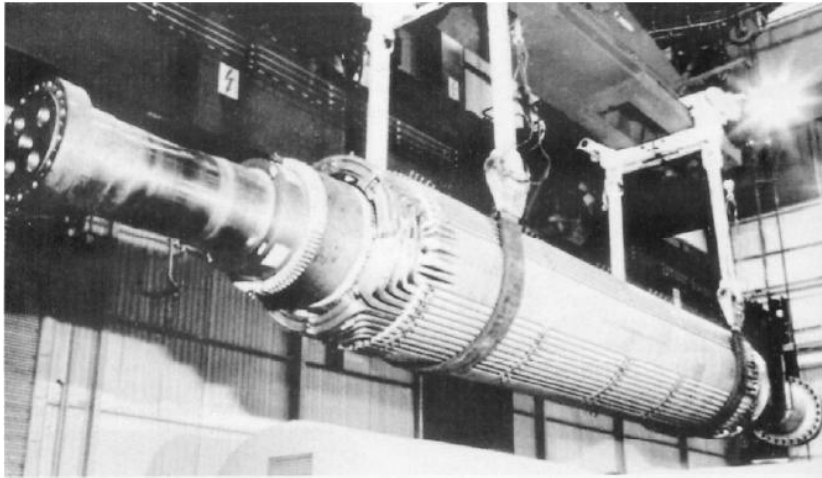


Figura 1.2 Rotor de polos lisos

1.1.2 Estator

Hasta estos momentos solo se ha hecho mención a la parte móvil del generador, por lo que la parte fija es el estator o inducido, el cual está constituido, principalmente de las siguientes partes:

- Carcasa
- Núcleo magnético
- Devanados
- Accesorios mecánicos y eléctricos

La carcasa (fig.1.3) es la estructura metálica la cual tiene como función sostener y centrar el núcleo magnético del estator.

Para centrales hidroeléctricas el montaje se hace en forma vertical mientras que para centrales termoeléctricas el montaje es horizontal.

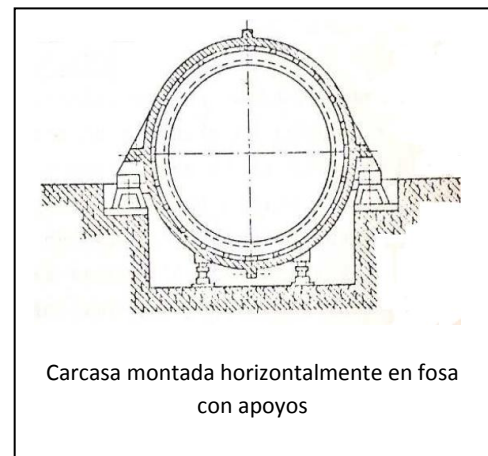
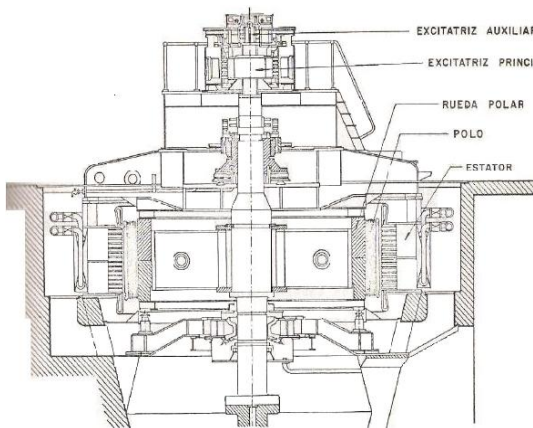


Figura 1.3 Carcasa del Estator

Debido a las grandes velocidades a las que giran los generadores en las plantas termoeléctricas, se busca que los generadores estén fijos, para poder evitar vibraciones por lo que la sección de la carcasa puede adoptar diferentes formas dependiendo las dimensiones de la máquina, el material empleado y el sistema de ventilación que se adopte.

Núcleo magnético del Estator

El núcleo magnético, mostrado en la figura 1.4, está constituido por un conjunto de coronas circulares de laminación y que cuenta con ranuras que contendrán los devanados del estator. Este conjunto de laminaciones se encuentra centrado en la carcasa. Para formar este conjunto de laminaciones se puede utilizar laminas de acero al silicio de 0.35 a 0.5 mm de espesor ya que presenta pérdidas bajas.

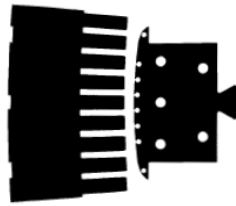


Figura 1.4 Ranuras en una fase del estator

Para disminuir el efecto de las corrientes que circulan por las laminaciones se aíslan, ya sea con una capa de papel muy delgado y una capa delgada de barniz aislante.

Las ranuras del núcleo del estator en donde se alojan los conductores del devanado pueden ser de dos tipos fundamentalmente: abierto y semi cerradas.

Las ranuras del tipo abierto presentan la ventaja de que las bobinas pueden ser prefabricadas y después ser instaladas en el núcleo y permite simplificar la reparación de bobinas dañadas. Para las ranuras de tipo semi cerradas no permiten prácticamente el uso de bobinas prefabricadas, pero permite una perfecta ejecución del aislamiento por lo que las máquinas pueden operar a tensiones mayores.

- **Devanados**

Los devanados siempre son conectados en estrella y el neutro es conectado a tierra. La conexión en estrella es preferible por los siguientes motivos:

1. El voltaje por fase es solo $1/\sqrt{3}$ ó 58% del voltaje entre líneas, lo que significa que el voltaje mayor entre un conductor del estator y el núcleo del estator aterrizado es solo 58% del voltaje de línea. Por lo que se puede reducir el nivel de aislamiento entre las ranuras, por lo que nos permite incrementar la sección transversal de los conductores. Un conductor mayor nos permite incrementar la corriente y por ende permite aumentar la potencia de la máquina.
2. Cuando un generador está bajo carga, el voltaje inducido en cada fase tiende a distorsionarse y la forma de onda no es del todo senoidal. La distorsión es debido al voltaje de tercera armónica. Con la conexión en estrella la distorsión por armónicas

de línea a neutro no aparece entre las líneas porque ellas se cancelan. Consecuentemente, los voltajes de línea permanece senoidal bajo cualquier condición de carga.

1.1.3 Sistemas de excitación

Debido a que los generadores síncronos tienen su salida de voltaje en media tensión es necesario hacer uso de un sistema de excitación en el campo para alcanzar el voltaje de salida.

El diseño del sistema de excitación es parte sustancial del generador debido a que además de mantener el voltaje de salida estable, debe tener una respuesta rápida ante cambios repentinos de carga de tal manera que no altere la estabilidad del sistema.

En términos generales los sistemas de excitación se clasifican de acuerdo a la fuente de poder que se utiliza en la excitación de los cuales se derivan los siguientes:

- Corriente Continua (DC)
- Corriente Alterna (AC)
- Estática

• Excitación de DC

En este tipo de excitación se hace uso de generadores de DC que proporcionan la corriente al rotor por medio de escobillas y anillos deslizantes. Generalmente el excitador es impulsado por el mismo eje del generador. Debido al constante mantenimiento y reemplazo de escobillas y anillos, causado por el desgaste de las escobillas o al polvo del carbón, estos sistemas de excitación han sido reemplazados por sistemas de excitación brushless (sin escobillas). Aun así sistemas de excitación de DC se encuentran en servicio. La figura no. 1.5 muestra un sistema de excitación de DC típico, el cual cuenta con un conmutador el cual abastece de corriente continua al campo del generador principal. El excitador es controlado por un amplidina. Una Amplidina es una máquina de DC de construcción especial que tiene un conjunto de escobillas separadas en 90° eléctricos, uno sobre el eje directo (d) u otro sobre su eje de cuadratura.

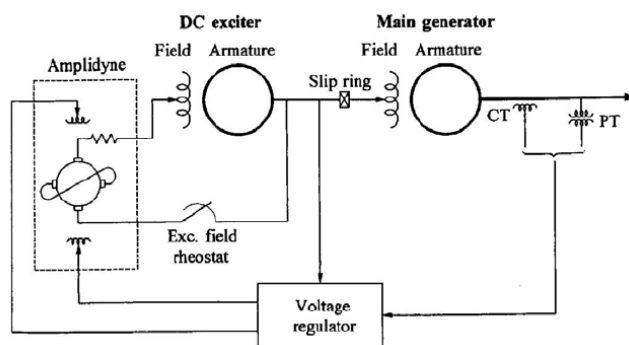


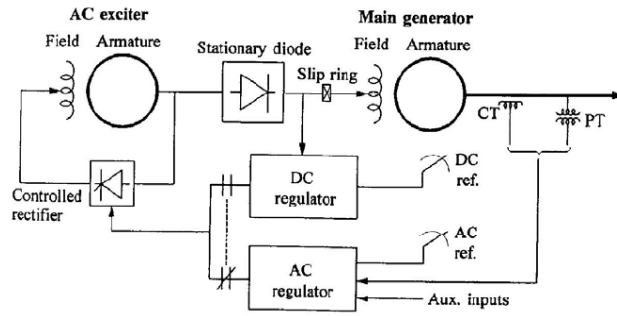
Figura 1.5 Sistema de Excitación de Corriente Continua

- **Excitación de AC**

Este tipo de excitación utiliza alternadores como fuentes para la excitación del generador de poder o principal. Generalmente los dos generadores están montados sobre el mismo eje. La salida del primer generador es rectificada por un grupo de rectificadores. La salida de DC es alimentada directamente al rotor del generador síncrono. La armadura del excitador de AC y los rectificadores giran sobre el mismo eje. En este tipo de sistemas el rectificador trifásico reemplaza al conmutador, los anillos rosantes y las escobillas. A continuación se explicarán brevemente las formas de excitación en AC.

- Rectificación Estacionaria

En este tipo de sistemas la rectificación se realiza mediante rectificadores estacionarios, por lo cual la excitación se hace a través de anillos deslizantes. El excitador se presenta en modo auto excitado, por lo que su campo se obtiene a través de un rectificador con tiristores que toma la energía a la salida del alternador excitador, con lo que se logra tener un control sobre el mismo, el cual puede modificar el voltaje a su salida y por extensión al voltaje de campo del alternador de potencia o principal. Cabe mencionar que en este arreglo no se tiene control sobre los diodos rectificadores.



Sistema de Rectificación Estacionario

Cuando se usan rectificadores controlados, los diodos estacionarios cambian por rectificadores controlados estacionarios, de tal manera que el regulador de voltaje controla el encendido de los tiristores, adicionando un regulador independiente para el encendido de los rectificadores del alternador excitador.

Lo anterior constata que existen dos modos independientes de regulación: el primero por un regulador de AC que mantiene el voltaje en los bornes del estator del alternador principal a un voltaje de referencia de AC, y otro el cual con un regulador de DC mantiene constante el voltaje en el campo del generador principal de acuerdo a una referencia determinada.

- **Estática**

En estos sistemas de excitación todos los componentes son estáticos, desde los rectificadores ya sean controlados o no, como la fuente de excitación de DC para el campo del generador. Aquí la fuente de alimentación se obtiene desde del mismo generador, a través de un transformador reductor conectado al mismo bus de fase aislada al que están conectadas las terminales del estator del generador.

Dentro de las características de este tipo de sistemas de excitación se encuentra que debido a que el transformador está conectado al mismo bus del generador, en caso de que exista una falla externa, provocará una reducción de voltaje en el generador, por lo que el transformador también disminuirá la tensión de alimentación al campo del generador. En la figura 1.6 se ejemplifica un sistema estático de excitación.

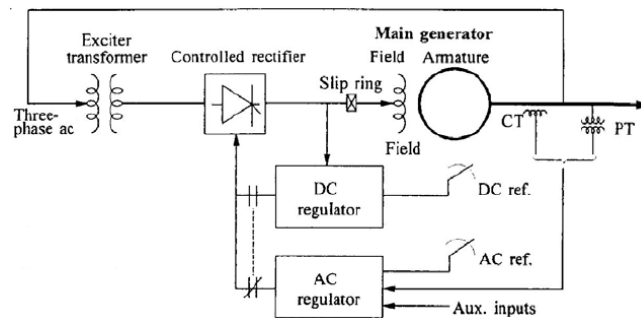


Figura 1.6 Sistema de Excitación Estático

1.2 Circuito equivalente y Diagrama Fasorial

Debido a las condiciones de operación de un generador síncrono se puede clasificar en operación en vacío u operación con carga, a lo cual se tomará en consideración si se tiene un generador de polos lisos o polos salientes. Derivado de las condiciones anteriores se puede obtener dos circuitos equivalentes distintos. La primera condición, generador en vacío mostrado en la figura 1.7, dependerá sólo de la excitación aplicada al devanado excitador, por lo que en el devanado inducido se podría interpretar como una fuente de tensión alterna E , la cual tendrá una magnitud de relación lineal a la magnitud del campo.

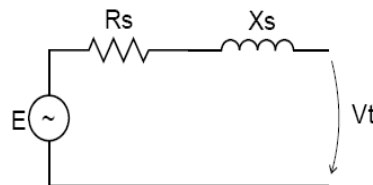


Figura 1.7 Circuito equivalente monofásico

Si el circuito del inducido es cerrado por una carga, la cual causará la circulación de una corriente que será responsable de las pérdidas por efecto Joule en el propio devanado, así como por la existencia de fugas magnéticas en los conductores, serán consideradas en el modelo del circuito equivalente.

Este modelo es usado para analizar el funcionamiento en régimen permanente de un generador. Debido a que se hace el análisis en régimen permanente los transitorios que se presenta en el circuito de inducción pueden ser despreciados.

Tomando el caso en que el generador tiene conectada una carga en las terminales, la corriente que circula en el devanado del inductor (I_f) genera un flujo Φ_f en el entrehierro. Del mismo modo la corriente I_i a través de los devanados del inducido genera un flujo opuesto Φ_i , del cual una parte de este flujo corresponde un flujo de fugas. A pesar de que existen fugas, la mayor parte del flujo atraviesa el entrehierro, y este flujo es conocido como flujo de reacción inducido Φ_{ri} , el cual está acoplado con el devanado de excitación. Por lo tanto el flujo resultante en el entrehierro es $\Phi_f + \Phi_{ri}$.

Cada componente de flujo induce una componente de tensión en el estator, respectivamente e_{ri} y e , de tal forma que al igual del flujo resultante en el devanado del estator, la tensión resultante puede ser representada por la suma de los fasores E_{ri} y E . El primero está asociado con una corriente en el inducido por lo que da origen a un flujo de inducción $\lambda_{ri} = N_i \Phi_{ri}$, por lo que puede ser representada como una inductancia $L_{ri} = \lambda_{ri} / I_i$. Debido a que E_{ri} es una fuente de tensión de reacción inducida, esta puede ser representada como el simétrico de la caída de la tensión en la reactancia $X_{ri} = \omega L_{ri}$, o:

$$E_{ri} = jX_{ri} I_i$$

El inducido puede ser así representado por una fuente de tensión E dependiente de la velocidad, la cual se considerará constante pues de esta forma se garantiza una frecuencia en un valor de las reactancias, y el flujo creado por el inductor, por una resistencia que representa el propio devanado en funcionamiento, una reactancia de fugas del devanado y una reactancia por reacción del inducido X_{ri} . Estas últimas se representan normalmente asociadas a una reactancia síncrona X_s .

Una resistencia R_s es considerada como la resistencia efectiva del devanado. Con lo anterior se puede obtener que debido a la circulación de una corriente en el estator existirá una caída de tensión en la impedancia síncrona, pero mientras se tenga condiciones de circuito abierto, la tensión en las terminales será igual a la tensión interna E .

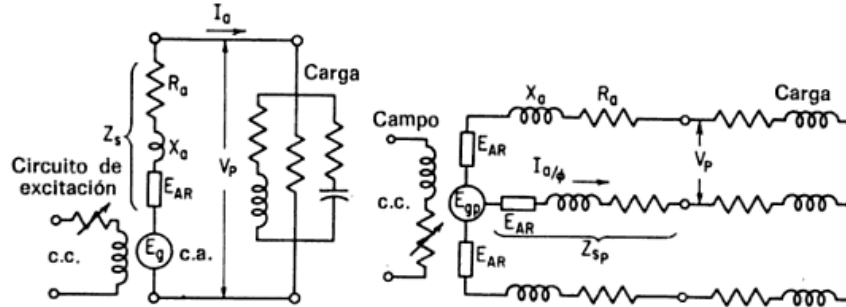


Figura 1.8 Circuito equivalente trifásico del generador conectado a una carga trifásica

Enfatizando en el hecho de que la fuente de tensión debido al campo principal E , sumada a la fuente de reacción inducida E_{ri} , producirán una corriente I , se debe considerar que esta corriente y el campo inductor se encuentran en fase, dicho de otra manera, la corriente exterior y la fuerza electromotriz debida al campo principal deben ser máximas en el mismo instante de tiempo. Para objetivo de este análisis se considera que la carga conectada al generador en la figura 1.8, es tal que la fuerza electromotriz debida al campo principal y la corriente exterior I está en fase.

Como ejemplificación se considera la primera de las fases. Si el campo principal pasa justamente delante de los conductores de la primera fase, según se muestra en la figura, será esta fase la que en ese instante tenga la tensión E máxima, y si la corriente está en fase, por los conductores de esta fase pasará también una corriente máxima.

Esta corriente dará lugar a un campo magnético cuya distribución, para el caso de la figura 1.9, con cinco pares de ranuras por fase será la siguiente:

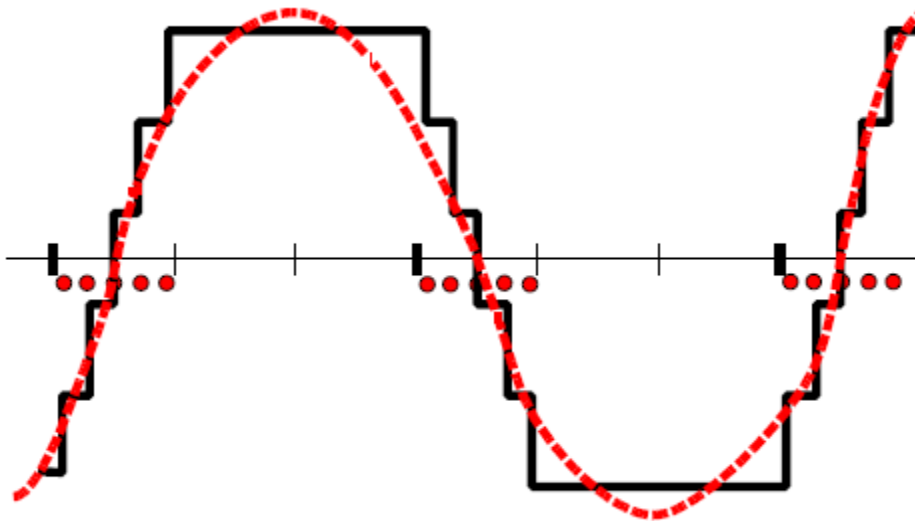


Figura 1.9 Distribución del campo magnético para un caso de cinco pares de ranuras por fase

Tomando la distribución como senoidal perfecta, y considerando que el mismo efecto se presenta en las otras dos fases, el efecto en conjunto de los tres campos, generan la aparición de un campo giratorio de velocidad impuesta por el campo del rotor.

Si consideramos que nuestro punto principal es el ángulo que forman el campo principal y de reacción inducido debido a las tres fases, se puede considerar como un campo giratorio que en todo momento presenta su máximo valor atrasado 90° respecto a la fase que en ese instante presente la máxima corriente.

Haciendo una representación vectorial de lo arriba dicho se obtienen los siguientes diagramas mostrado en la figura 1.10:

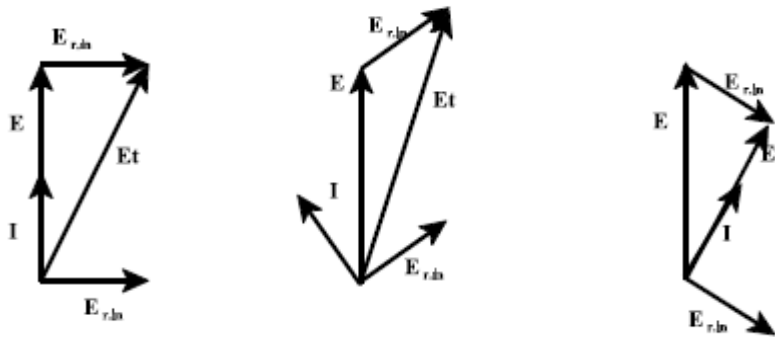


Figura 1.10 Representación vectorial de los voltajes de generador con diferentes tipos de carga

Los gráficos anteriores son los tres casos posibles que se pueden presentar de la posición de la corriente I respecto a la fuerza electromotriz E inducida por el campo principal. Debido a la posición que presente la corriente respecto a E , variará la fuerza electromotriz total, de acuerdo al ángulo que se presente entre las componentes. Cuando la reacción del inducido es tal que el campo resultante es mayor que el campo principal, se dice que aquella es magnetizante, mientras que en caso contrario, se dice de ella que es desmagnetizante.

1.3 Factores que afectan el tamaño de las máquinas síncronas

Las grandes cantidades de energía generadas por las compañías eléctricas han tomado con la debida seriedad la eficiencia de sus generadores, debido a que entre mayor sea la eficiencia del generador mayores ingresos obtendrán. Por lo que el tamaño del generador es de gran importancia para las compañías suministradoras de energía eléctrica esto es porque entre mayor capacidad tenga el generador, mayor será la eficiencia, así como los ingresos obtenidos

Por ejemplo, si un generador síncrono de 1 KW tiene una eficiencia de 50%, uno de capacidad mayor, pero modelo similar teniendo una capacidad de 10 MW inevitablemente tendrá una capacidad cercana a 90%.¹

¹ Wildi, Theodore. **Electrical Machines Drives, and Power Systems.** pág 344.

Si consideramos que entre mayor sea la capacidad de la máquina mayor será la eficiencia de la misma al igual que la magnitud de las pérdidas en forma de calentamiento, teniendo que considerar el enfriamiento de los devanados. Entre mayor sea la capacidad del generador, el sistema de enfriamiento será más sofisticado y a su vez de un costo mayor, por lo que esta es la limitante principal del tamaño del generador.

1.3.1 Sistemas de enfriamiento de la Máquina Síncrona

Toda máquina síncrona presenta una eficiencia menor al 100% debido a que se presentan pérdidas, las pérdidas que se presentan en los conductores de los devanados son en forma de calor. Este calor hace que la máquina aumente su temperatura, tal aumento de temperatura determina la transmisión de calor de la máquina al medio ambiente en forma de irradiación y parte en convección.

Derivado de diferentes estudios de máquinas eléctricas es sabido que el aislamiento de los devanados presenta deterioro por sobrecalentamiento, por lo que la temperatura del generador debe ser monitoreada y limitada, de tal forma que el devanado sufra el menor desgaste.

Para el monitoreo de la temperatura de los devanados de estator se hace uso de termopares en determinadas posiciones y números embebidos en él.

Con relación al sistema de enfriamiento, las máquinas síncronas se pueden clasificar como siguen:

- **Ventilación natural**
Aquellas en las cuales no se tiene ningún dispositivo particular para aumentar la ventilación producida por los dispositivos en movimiento de la misma máquina o de la circulación del aire externo.
- **Auto ventilación**
Aquí la ventilación se da por dispositivos instalados en el rotor, los cuales son capaces de activar el movimiento del aire proveniente del exterior o de la misma máquina.
- **Ventilación forzada**
El aire se lleva al interior del medio que contiene al generador por medio de ventiladores externos
- **Ventilación en circuito cerrado**
Se usa gas pesado como ventilante (aire o hidrógeno) en contacto con las partes vivas, se hace circular por un circuito cerrado por medio de ventiladores propios del generador.

- **Enfriamiento por líquido**
El enfriamiento se lleva a cabo mediante la circulación de líquidos o agua, figura 1.11.
- **Enfriamiento mixto**
Se presenta en turbo alternadores de potencia grande en los cuales por uno de los devanados es enfriado por medio de circulación de líquido y el otro es enfriado por gas circulante.

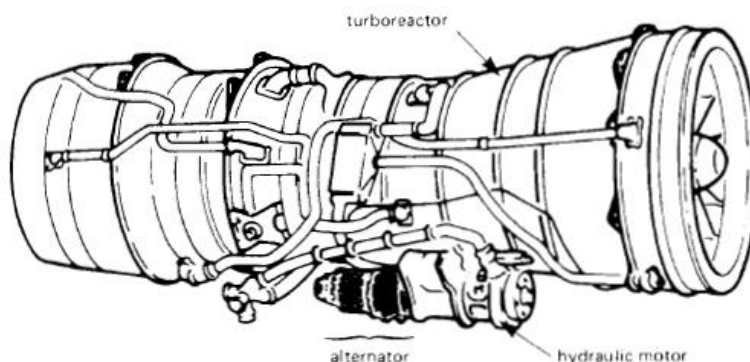


Figura 1.11 Sistema de enfriamiento hidráulico con motores

1.4 Principios de operación del generador trifásico

Como se hizo mención anteriormente el actuar de los parámetros del generador presentan diferentes comportamientos dependiendo bajo el contexto que se encuentre. Aquí se hará mención de las condiciones que se presentarán cuando en las terminales de salida se conecta una carga y los cambios que sufre gracias al tipo de carga que se conecte.

Convendrá establecer ciertos puntos que establecerán condiciones bajo las cuales se espera que esté en funcionamiento constante.

La primicia más importante es que la velocidad de la turbina, la cual se obtiene a través de la flecha conectada al generador, se mantendrá constante, con lo que se presenta la misma condición para la reactancia del inducido X , es constante en todo momento.

Mientras el generador se mantuvo operando en vacío, sin carga conectada en las terminales de salida, el voltaje medido en estas terminales es de igual magnitud al voltaje interno que se genera debido al campo magnético del inductor. Cuando se conecta cualquier carga, se cierra el circuito, con lo cual circula corriente que genera una f.m.m. de reacción del inducido lo cual se hizo de conocimiento páginas atrás. Las consecuencias de esto es la caída de tensión en las terminales del generador debido a la impedancia del inducido.

La resistencia R del devanado generalmente se considera despreciable debido a que produce una caída de tensión mínima comparada con la tensión nominal, mientras que la

reactancia dispersión X del inducido, generada por el flujo de dispersión que se presenta en los cabezales del inducido y en las ranuras en las que se encuentra, produce una caída de tensión considerable, agregando que la interacción entre la f.m.m. del inducido con la f.m.m. del inductor genera una distorsión, un aumento o una reducción en el campo de excitación de la máquina dependiendo de la corrientes en el inducido.

1.4.1 Condiciones de operación

1.4.1.1. Carga Resistiva

Cuando se conecta una carga resistiva pura se contará con un factor de potencia unitario, encontrando la corriente en fase con el voltaje, alcanzando sus magnitudes máximas en el mismo instante, con lo cual se obtendrá el diagrama fasorial siguiente.

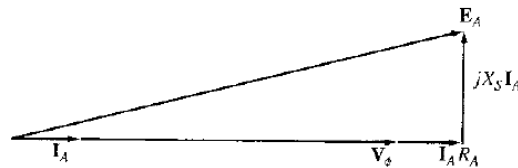


Figura 1.12 Diagrama fasorial de un generador con carga resistiva

Del mismo modo la reacción del inducido genera f.m.m. desplazada 90° a la f.m.m. generada por el inductor, teniendo una forma de onda resultante siguiente.

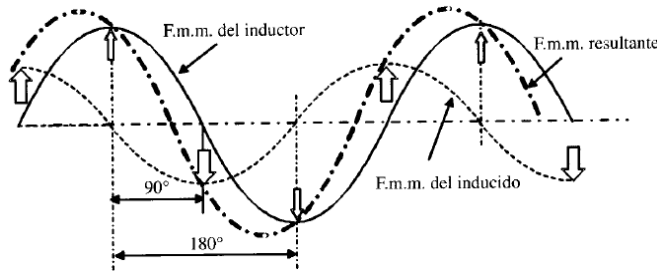


Figura 1.13 Reacción del inducido con carga resistiva

1.4.1.2. Carga Inductiva

Cuando se tiene una carga inductiva pura conectada a las terminales de salida del generador se presentara un desfase de 90° entre la corriente y la f.e.m., por lo que repercutirá de tal forma que los valores máximos de las corrientes se verán desplazadas 90° con respecto al máximo de las f.e.m.s, obteniéndose el diagrama fasorial siguiente

Generador Síncrono

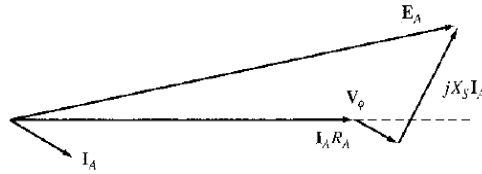


Figura 1.14 Diagrama vectorial de un generador con carga inductiva

Del mismo modo la reacción del inducido genera una f.m.m. que se opone a la f.m.m. del inductor, lo que describe que una carga inductiva pura produce una reacción desmagnetizante, la cual reduce la f.m.m. resultante al igual que una reducción en la f.e.m. inducida mostrada en la figura 1.15.

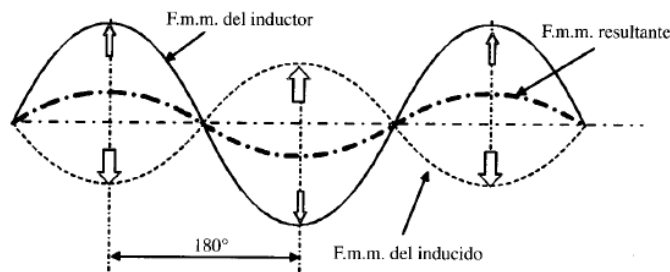


Figura 1.15 Reacción del inducido con carga inductiva

1.4.1.3. Carga Capacitiva

Faltando de analizar los efectos de una carga capacitiva pura conectada a las terminales del generador, se externó que la corriente alcanzará su valor máximo 90° eléctricos antes de que el polo se sitúe en las extremidades de las espiras del inducido, punto en que la f.e.m. es máxima, resultando el diagrama fasorial siguiente

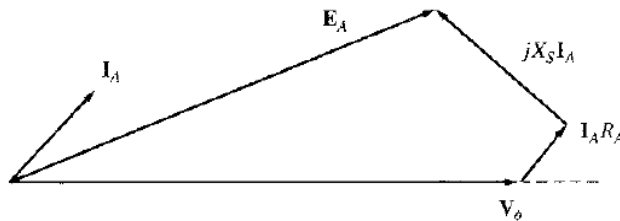


Figura 1.16 Diagrama vectorial de un generador con carga capacitiva

Del mismo modo a los 2 casos anteriores el inducido genera una f.m.m., que fortalece a la f.m.m. del inductor, de tal forma que provoca un efecto magnetizante como en la figura 1.17.

Generador Síncrono

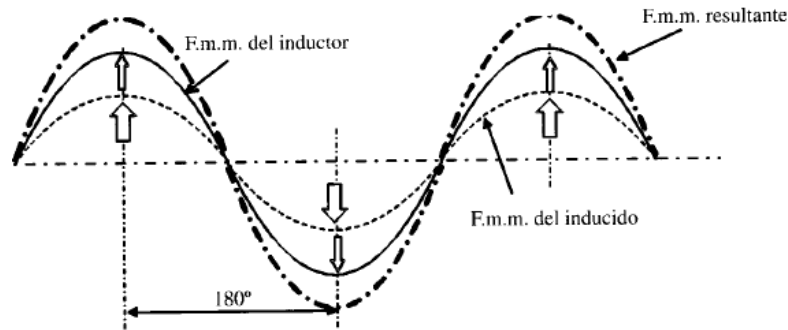


Figura 1.17 Reacción del inducido con carga capacitiva

Debido a que las cargas conectadas a las terminales de salida del generador no son puras se presentan un desfase comprendido entre -90° y $+90^\circ$ resultantes de las reacciones del inducido, derivándose variaciones en la f.m.m. resultante así como en el flujo en el entrehierro al mismo tiempo que afecta a la f.e.m. obtenida en el inducido.

Es por esto que los sistemas eléctricos de potencia es prioridad proporcionar y mantener condiciones en las que el ángulo de desfase entre la corriente y la f.e.m. sea cero o lo más cercano a cero.

1.4.2 Relación de corto circuito y reactancia síncrona X_s

Partiendo de los conceptos arriba expresados podemos considerar un generador trifásico, girando a velocidad nominal y el cual cuenta con una corriente de campo a través del sistema de excitación, al cual se le conecta en sus terminales una carga trifásica balanceada, tanto el generador como las cargas tienen una conexión en estrella.

Conforme el devanado inductor cuenta con la corriente de campo se produce un flujo Φ el cual gira con el inductor e induce tres voltajes de igual magnitud en el estator, los cuales están desfasados 120° .

Conjuntamente se sabe que los devanados presentan una resistencia R despreciable y una inductancia L , la cual se puede representar como una reactancia X , reactancia dada por

$$X_s = 2\pi fL$$

Donde

X_s = reactancia síncrona por fase [Ω]

f = frecuencia del generador [Hz]

L = inductancia aparente del devanado del estator por fase [H]

Se considera que la reactancia síncrona X_s es típicamente de 10 a 100 veces mayor a la magnitud de la resistencia R .

Debido a que se encuentra en estado estable y las condiciones en cada una de sus fases es la misma (considerando el desfase entre los voltajes y corrientes entre fases), el diagrama representativo se puede simplificar a solo una de sus fases, figura 1.18. En esta se observa que la resistencia se considera despreciable debido a que quien produce un mayor cambio en los parámetros de salida es X_s , el circuito equivalente será representado por una fuente de voltaje y X_s conectada en serie con la fuente, lo cual es el equivalente de Thevening del generador.

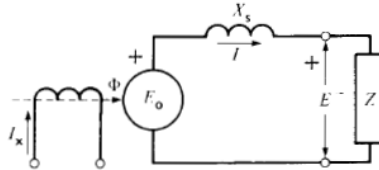


Figura 1.18 Circuito equivalente de un generador trifásico, mostrando sólo una fase

Por lo tanto considerando el valor de X_s se establece que la magnitud de E en las terminales del generador depende de E_0 y el valor de la impedancia Z .

Para adquirir el valor de la reactancia síncrona X_s no saturada, se hace por medio de la pruebas de circuito abierto y corto circuito.

En la construcción de plantas generadoras nuevas, durante la etapa de Pruebas y Puesta en Servicio, la mayoría de los clientes solicitan pruebas en campo del generador, además de las realizadas en fabrica, entre las que se encuentran la prueba de saturación en corto circuito y circuito abierto

Durante la prueba de saturación del generador en circuito abierto el generador es llevado a su velocidad nominal, cerrando el interruptor de campo de tal forma que la corriente de excitación es llevada hasta que el voltaje nominal de línea a línea es alcanzado. En este punto se toma lecturas del voltaje de línea a neutro del generador V_n así como la corriente de excitación I_{exc} . El siguiente paso es disminuir la corriente de excitación hasta llegar a cero y abrir el interruptor de campo, y se disminuye la velocidad del generador hasta cero rpm.

Sucesivamente se cortocircuitan las terminales del generador, llevando al generador a velocidad nominal, cerrando el interruptor de campo e incrementando la corriente de excitación a su valor nominal. Bajo estas condiciones se toma lectura de la corriente de generador I_{gcc} , la cual puede ser leída en el Regulador Automático de Voltaje (AVR).

Teniendo los datos correspondientes la reactancia síncrona X_s puede ser calculada con al siguiente expresión

$$X_s = V_n \div I_{gcc}$$

donde

X_s = Reactancia síncrona, por fase [Ω]

V_n = Voltaje de línea a neutro en circuito abierto [V]

I_{gcc} = corriente de corto circuito por fase, con la misma I_{exc} requerida para V_n

Este valor de X_s corresponde a la reactancia síncrona de eje directo, la cual es utilizada para describir el comportamiento de la máquina síncrona.

Así como la reactancia síncrona nos proporciona información sobre el comportamiento del generador la relación de corto circuito nos proporciona información del tamaño físico del mismo dependiendo de la capacidad, el factor de potencia y la velocidad. Con los datos obtenidos de las pruebas de corto circuito y circuito abierto se puede definir la relación de corto circuito, el cual se define como la razón de la corriente de campo a voltaje nominal en circuito abierto, a la corriente de campo requerida para la corriente nominal del inducido en corto circuito.

La relación de corto circuito tiene efecto de comportamiento sobre el generador principalmente en los siguientes aspectos:

- Regulación de voltaje
- Estabilidad
- Operación en paralelo
- Corriente de corto circuito
- Autoexcitación

1.4.3 Características de cortocircuito y circuito abierto de los generadores

Cuando se instala un generador nuevo en alguna central generadora de electricidad, este cuenta con ciertas características que el fabricante proporciona en forma de curvas características del generador, dentro de las cuales se encuentran las curvas de circuito abierto y de corto circuito.

La curva característica de circuito abierto se puede corroborar por medio de la prueba del mismo nombre que se realiza al generador en su posición final, la cual se muestra en la figura 1.19.

Retomando el protocolo de prueba del circuito abierto descrito durante la obtención del valor de la reactancia síncrona X_s , el generador se lleva a velocidad nominal, se cierra el interruptor de campo excitando el devanado inductor, sin carga alguna conectada a las terminales del generador se incrementa la corriente de campo hasta alcanzar el voltaje nominal, tomando lecturas de la corriente de campo y el voltaje de salida durante todos los incrementos. Con los datos obtenidos se puede obtener la curva *característica de circuito abierto*, la cual nos permite encontrar el voltaje interno generado para una corriente de campo dada². La curva característica de circuito abierto será del tipo de la figura 1.19, la cual nos ayuda a comprender que a altas corrientes de campo los devanados del inducido presentan saturación.

² CHAPMAN, Stephen. **Máquinas Eléctricas**. p.289

Generador Síncrono

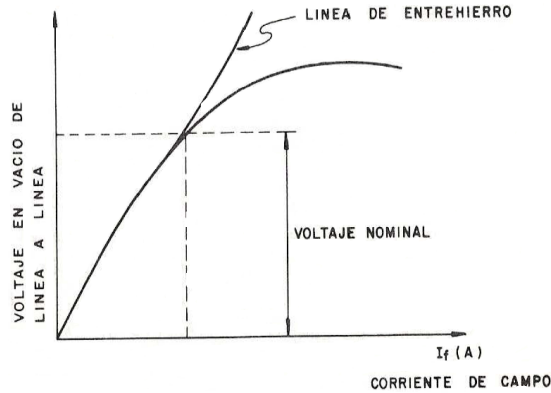


Figura 1.19 Característica de circuito abierto

Una vez expuesta la característica de circuito abierto se considera la obtención de la característica de cortocircuito del generador, en la figura 1.20.

Derivado de los conocimientos que se expusieron dentro de la obtención de la reactancia síncrona, retomaremos el mismo procedimiento de la prueba de corto circuito.

Como primer paso se cortocircuitan las terminales de salida del generador, a continuación se lleva al generador a velocidad nominal, siguiendo con el cierre del interruptor de campo para poder contar con una corriente de excitación en el devanado del rotor o inductor. Se incrementará la corriente de excitación teniendo presente que así mismo lo hará la corriente de armadura, por lo que se tomarán lecturas de corriente de campo I_f y corriente de armadura I_a , graficándolas sobre el plano cartesiano arrojan una curva como la que se muestra a continuación, la cual es la característica de corto circuito del generador.

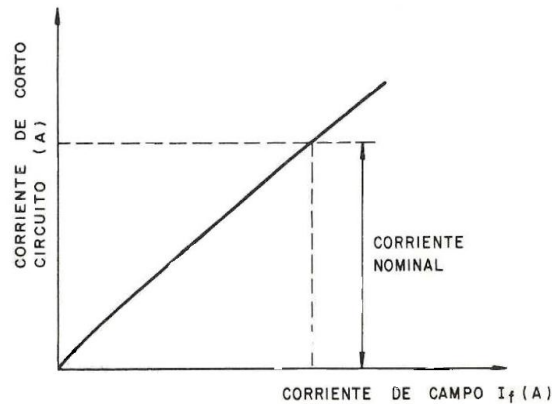


Figura 1.20 Característica de corto circuito

1.4.4. Pérdidas y eficiencia

El generador síncrono es una máquina que por sí sola no puede generar energía eléctrica por lo que necesita una fuente de potencia mecánica, que puede ser un motor primario o una turbina que mantenga la velocidad del generador constante.

Lamentablemente toda la potencia mecánica que recibe el generador no puede ser convertida a energía eléctrica, ya que durante este proceso existen pérdidas de potencia. La potencia total bajo condiciones de carga que se pierde, es la suma de las pérdidas que se presentan en:

- Pérdidas en el inducido
- Pérdidas en el fierro
- Pérdidas mecánicas
- Pérdidas por excitación
- Pérdidas en los accesorios

Las pérdidas en el inducido se deben principalmente por efecto Joule, así como a pérdidas adicionales en el estator. Para el cálculo de las pérdidas por efecto Joule se emplea la resistencia del devanado del estator

$$P_i = 3R_a I_a^2$$

Donde

P_i = potencia disipada en forma de calor en el estator (W)

R_a = resistencia por fase del devanado del estator

I_a = Corriente por fase

Existen otro tipo de pérdidas en el estator que se derivan por corrientes parásitas debido a la variación de magnetización, así como las pérdidas producidas por las corrientes entre conductores de un mismo devanado y las pérdidas en los cabezales de los devanados.

Las pérdidas mecánicas se derivan de las condiciones de operación de la máquina ya que debe de mantener sus parámetros constantes y las pequeñas variaciones a cambios de temperaturas representa pérdidas que están constituidas por

- Pérdidas por fricción de chumaceras
- Pérdidas por ventilación
- Pérdidas por fricción entre escobillas y anillos colectores

Las pérdidas por excitación se generan debido a la resistencia del devanado de campo y las de excitatriz (cuando cuenta con ella) y se calculan bajo condiciones de operación nominal. Se consideran la corriente de excitación I_f y R_f con la resistencia del devanado de campo a 75°C, por lo que las pérdidas se obtiene por

$$P_f = \frac{R_f I_f^2}{\eta_e} + 2I_f$$

Donde

$2I_f$ = Pérdidas en escobillas por contacto

η_e = Rendimiento de excitatriz rotatoria (valor entre 0.85 y 0.95).

1.4.5 Operación en paralelo

Debido a que hoy en día un generador no alimenta a una carga en particular, los sistemas eléctricos de potencia están constituidos por cientos de generadores que alimentan a todas las cargas de forma paralela, salvo el caso extraordinario que constituye el estado de Baja California Sur, que no está conectado al sistema eléctrico nacional. Las razones por las que se pretenden alimentar la carga nacional de una mayor cantidad de generadores se asocia al aspecto económico.

Como principal objetivo se pretende tener una mayor confiabilidad del sistema, lo cual se logra de tal forma que cuando se dispare una máquina no afecte al sistema de forma significativa, ya que los generadores todavía conectados al sistema absorberán la carga que alimentaba anteriormente el generador fuera del sistema, sin que estos sufran alguna perturbación o sobrecarga que pudiera ser causa de un nuevo disparo de otro generador.

Dichos disparos, muchas veces ocasionados por fallas en los devanados del generador, pueden ser evitados por medio de un programa de mantenimiento oportuno del generador. Pero cómo se va a poder llevar al generador fuera de servicio si no existen generadores operando en paralelo que permitan esta salida de máquina para revisión o reparación, si es necesario? Es por eso, prioritariamente que se determina que los generadores trabajen en paralelo.

Cuando un generador se quiere conectar al sistema este debe de contar con ciertas condiciones, tales condiciones evitarán que al cierre del interruptor de máquina que conectará en paralelo al generador, este sufra daños severos y la carga pueda perder potencia. Por lo tanto algunos parámetros del generador serán los siguientes para una conexión confiable

- Los voltajes rms de línea del generador debe ser igual a la del sistema
- El generador debe tener la misma secuencia de fases a la del sistema
- Los ángulos de fase de las fases a deben ser iguales
- La frecuencia del generador a conectar debe ser ligeramente mayor a la frecuencia del sistema en operación

En la actualidad el procedimiento de sincronizar un generador a un sistema eléctrico de potencia, es auxiliado por dispositivos que monitorean los parámetros que se enlistaron líneas arriba.

Un dispositivo indispensable es el sincronoscopio en el cual la posición de la aguja muestra el ángulo de desfase entre las tensiones del generador y el sistema. Cuando las frecuencias son iguales la aguja se posicionará en el centro y se mantendrá estática, en caso contrario la aguja tenderá a girar en sentido horario cuando el generador presenta una frecuencia mayor a la del sistema y en sentido anti horario cuando el generador presenta una frecuencia menor. Un mejor entendimiento se tiene si se observa la figura 1.21.

Generador Síncrono

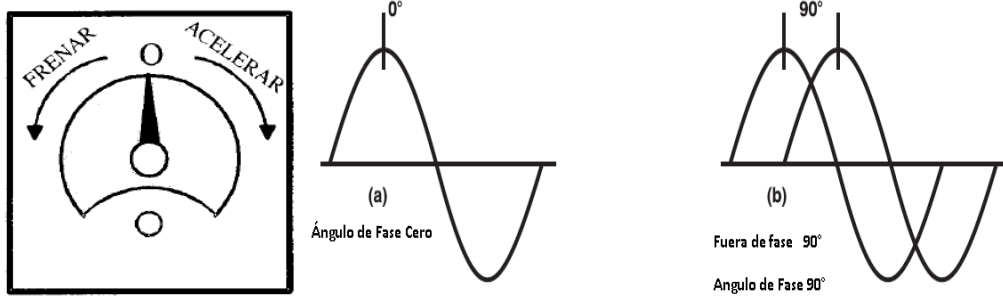


Figura 1.21 Sincronoscopio (a) voltajes en fase, (b) voltajes fuera de fase

El sincronoscopio se puede ser encontrado en los tableros de sincronización de las plantas generadoras. Dichos tableros cuentan a demás con vólmetros que miden los voltajes en las terminales del generador así como el voltaje en las barras del bus, dispositivos para medir la frecuencia en el bus y la frecuencia del generador, botones o pistolas de control para manipular la velocidad de la turbina y el voltaje de excitación en el rotor, así como dos lámparas incandescentes las cuales están conectadas en las mismas fases en ambos lados del interruptor del generador tal como se muestra en la figura 1.22. Los dispositivos mencionados en conjunto forman parte del equipo para una sincronización en forma manual la cual se puede llevar a cabo considerando que si los voltajes del generador y el sistema están en fase, la diferencia de voltaje será nula por lo que las lámparas permanecerán apagadas y el interruptor debe ser cerrado.

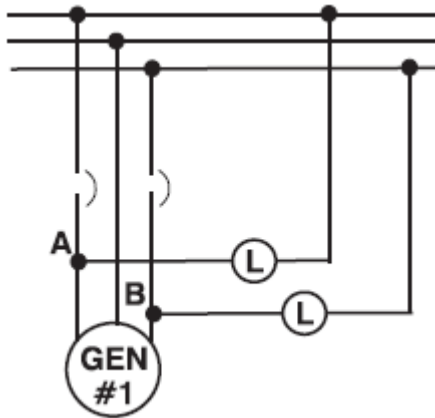


Figura 1.22 Sincronización por medio de la lámpara oscura

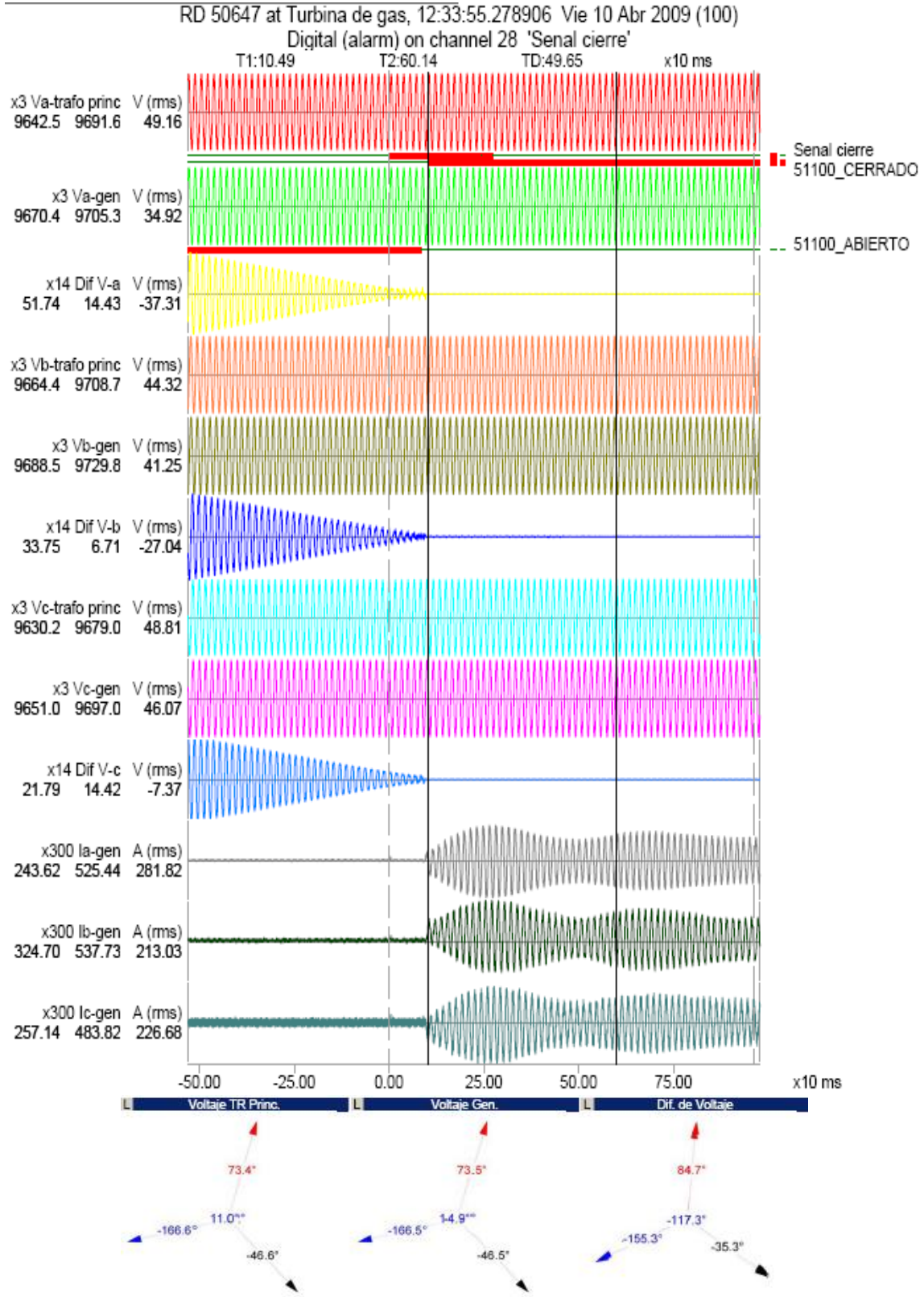
Una vez identificados los dispositivos para la sincronización manual, cabe resaltar que también se encuentra instalado el relevador de sincronización automática. Tal relevador presenta las facilidades de que una vez seleccionada la sincronización en forma automática, este se encargará de censar los voltajes y frecuencias de generador y bus, generará los pulsos necesarios para igualar las frecuencias y los voltajes hasta llevarlos a las magnitudes iguales al ajuste dado en el relevador a los parámetros de frecuencia de deslizamiento y diferencia de voltajes, así como monitorear que el ángulo de desfaseamiento sea igual o menor al ajuste dado antes de que permita el cierre del contacto de salida que energiza la bobina de cierre de interruptor de máquina, permitiendo la sincronización del generador a la

red. Un ejemplo de lo descrito se puede observar en el siguiente oscilograma de la sincronización de un Generador de Turbina de Gas.

En tal oscilograma se observa que a través de un registrador de disturbios se monitorea los voltajes de bus así como los voltajes medidos en las terminales del generador, la corriente de generador, al igual que la señal de orden de cierre de interruptor y el estado del interruptor de máquina. Dentro del mismo se observa la onda de diferencia de voltaje que van presentando en el tiempo hasta llegar al punto en que se tienen condiciones de cierre de interruptor. Una vez cerrado el interruptor se observa que se tiene una corriente pico y conforme avanza el tiempo tiende a estabilizarse en una magnitud menor. Cuando se sincroniza un generador por primera vez se hace bajo con la condición de carga mínima.

Capítulo 1

Generador Síncrono



Oscilograma de los parámetros de un generador ante una sincronización

La sincronización de un generador a una red eléctrica, es considerada la conclusión de un trabajo conceptual y de campo el cual tuvo como objetivo robustecer el sistema eléctrico nacional, volviéndolo más confiable y permitiendo una mayor eficiencia la cual representará una reducción del tiempo de ausencia de energía eléctrica, a través de las consideraciones y necesidades del área a la que se pretende conectar, siempre que no se afecte a la línea de interconexión ni a las líneas adyacentes.

Los conceptos expuestos a lo largo de este capítulo tienen como principal interés puntualizar las características principales del generador, mismos que servirán de herramienta básica para la adecuada comprensión de los capítulos subsecuentes.