

26 24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

"ESTUDIO DE UN GENERADOR ELECTRICO DE
UNA UNIDAD GENERADORA A GAS TIPO
TURBO - JET"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N

RAFAEL VEGA VEGA
RAUL FLORES RIVAS



DIRECTOR DE TESIS,
ING. JOSE ANGEL LOPEZ BUCIO

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1990

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTUDIO DE UN GENERADOR ELECTRICO DE UNA UNIDAD
GENERADORA A GAS TIPO TURBO-JET

CAPITULO I

Unidades Turbo - Jet en el sistema Eléctrico de la Ciudad de México.

- 1.1.- Justificación para el uso de unidades turbo-jet.
- 1.2.- Sistema eléctrico de la Ciudad de México.
- 1.3.- Plantas con unidades turbo-jet.

CAPITULO II

Descripción y Operación de Unidades Turbo - Jet

- 2.1.- Descripción general de la unidad turbo-jet.
- 2.2.- Principios de operación de las turbinas a gas.
- 2.3.- Servicios auxiliares de la unidad turbo-jet.
- 2.4.- Ciclos de arranque y paro de la unidad.

CAPITULO III

Generador Síncrono

- 3.1.- Principios de funcionamiento del generador síncrono.
- 3.2.- Características del generador de la unidad turbo-jet.
- 3.3.- Preparación para el arranque del generador.
- 3.4.- Operación del generador.
- 3.5.- Mantenimiento del generador.
- 3.6.- Acoplamiento en paralelo de generadores síncronos.

CAPITULO IV

Sistema de Excitación y Regulación

- 4.1.- Principios de regulación de generadores síncronos.
- 4.2.- Principios de excitación de generadores síncronos
- 4.3.- Descripción del sistema de regulación y excitación del generador.

CAPITULO V

Protección del Generador

- 5.1.- Principios de la protección.
- 5.2.- Protecciones del generador.
- 5.3.- Descripción de los relevadores del generador.

**** Conclusiones**

Bibliografía

C A P I T U L O I

UNIDADES TURBO-JET EN EL SISTEMA ELECTRICO

DE LA CIUDAD DE MEXICO.

1.1 JUSTIFICACION PARA EL USO DE UNIDADES TURBO-JET.

La ciudad de México como cualquier urbe metropolitana del mundo, presenta complicados sistemas de: comunicación, transporte colectivo, servicios públicos, comercios, industria mediana y pesada, dependencias de gobierno y de servicio social, etc., mismos que son grandes consumidores de energía eléctrica.

Es por ello que reviste gran importancia la seguridad del suministro de éste vital fluido a la ciudad. Dentro de estos servicios por supuesto los de mayor preocupación son aquellos en los cuales se transporta gran cantidad de personas, como por ejemplo el sistema de transporte colectivo -- (METRO), el aeropuerto central y ahora los sistemas viales que requieren de señalización de tráfico y el alumbrado necesario.

Estos servicios poseen alimentación de emergencia para el caso de faltar el suministro normal de energía eléctrica, pero no satisfacen las necesidades normales de operación de los mismos. Por lo tanto, con una falta de potencial en el sistema central durante un lapso no descuido, podría provocarse un caos en la ciudad.

Las causas principales de la falta de potencial pueden ser: las revisiones periódicas de las unidades de las plantas de vapor y la mínima generación de las plantas hidroeléctricas causada por las épocas de estiaje demasiado lluviosas.

Ayudados en lo anterior, se decidió crear una red de emergencia que diera una respuesta inmediata de alimentación a los servicios más críticos de la ciudad como el aeropuerto Central, el Servicio de Transporte Colectivo y el primer cuadro de la ciudad.

Esta red de emergencia es un circuito alimentador que queda totalmente independiente del sistema en el momento del conflicto, integrado básicamente por generadores y subestaciones de las zonas urbana y suburbana de la ciudad. La red de emergencia está compuesta por unidades generadoras del tipo turbo-jet mismas que tienen una respuesta rápida al arranque y toma de carga no mayor de 5 minutos, para alimentar a través de un circuito de 85 - KV., los servicios antes citados.

1.2. SISTEMA ELECTRICO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

El sistema eléctrico de la ciudad de México, se encuentra dentro del sistema eléctrico central el cual forma parte de la red nacional interconectada, es un punto neurálgico en el cual converge y sale energía generada en los diferentes estados del país.

Entre las principales fuentes de alimentación al Sistema Central se encuentran las siguientes: la que proviene del Sureste, cuya energía entra por la subestación Texcoco (CFE) - subestación Santa Cruz, la energía que proviene de la planta de Infiernillo que entra por la subestación Nopala (CFE) subestación Remedios, así como la de la planta Tula que entra por la subestación Victoria y la generación de la planta Valle de México (CFE).

La energía promedio que fluye hacia el sistema por las fuentes mencionadas en un día normal de trabajo es:

Puebla	- 540 MW.
Infiernillo	- 615 MW.
Tula	- 1200 MW.
V. de México	- 950 MW.
Carga "pico" de las 20:00 hrs.,	3300 MW.

SISTEMA ELECTRICO NACIONAL.

Al expandirse, los sistemas eléctricos en la República Mexicana durante el proceso de interconexiones entre plantas y áreas anteriormente aisladas para unir en una sola Red Nacional todos estos sistemas, se aprovecharon las instalaciones existentes para asegurar el máximo rendimiento de las inversiones. Para éste propósito, se organizaron grupos de Operación, encargados de coordinar las actividades necesarias para mantener la continuidad en el servicio, la calidad en el voltaje y la frecuencia, al menor costo de operación.

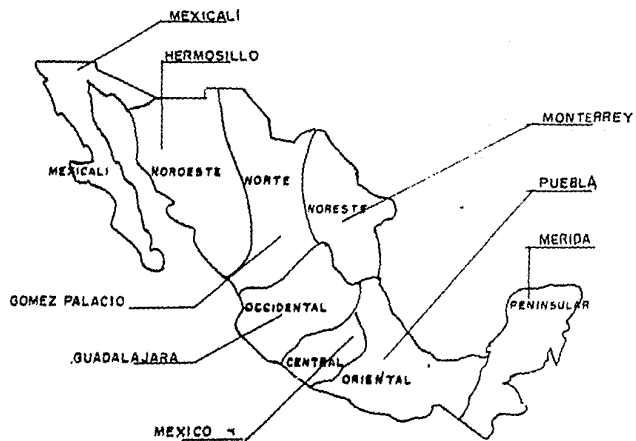


FIGURA 1-2

SISTEMA ELECTRICO CENTRAL.

El Sistema Eléctrico Central, abastece de energía eléctrica a la zona más importante del país tanto en número de servicios como en total de energía vendida, abastece a los centros de carga del Distrito Federal, Estado de México, Hidalgo, parte de Puebla, Morelos, Guerrero y Tlaxcala, con un área total de 90,000 kilómetros cuadrados, que representa el 5% del territorio nacional, donde se encuentra el 25% de la población total del país.

La demanda máxima actual es de 4 321 MW. El consumo promedio diario de energía en un día normal de trabajo es del orden de 50 682 MWh que representa el 32% del consumo nacional. Para cubrir esta demanda, el Sistema Eléctrico Central cuenta con una capacidad instalada de 5 482 MW., suministrados por 14 plantas hidroeléctricas y 5 plantas termoeléctricas.

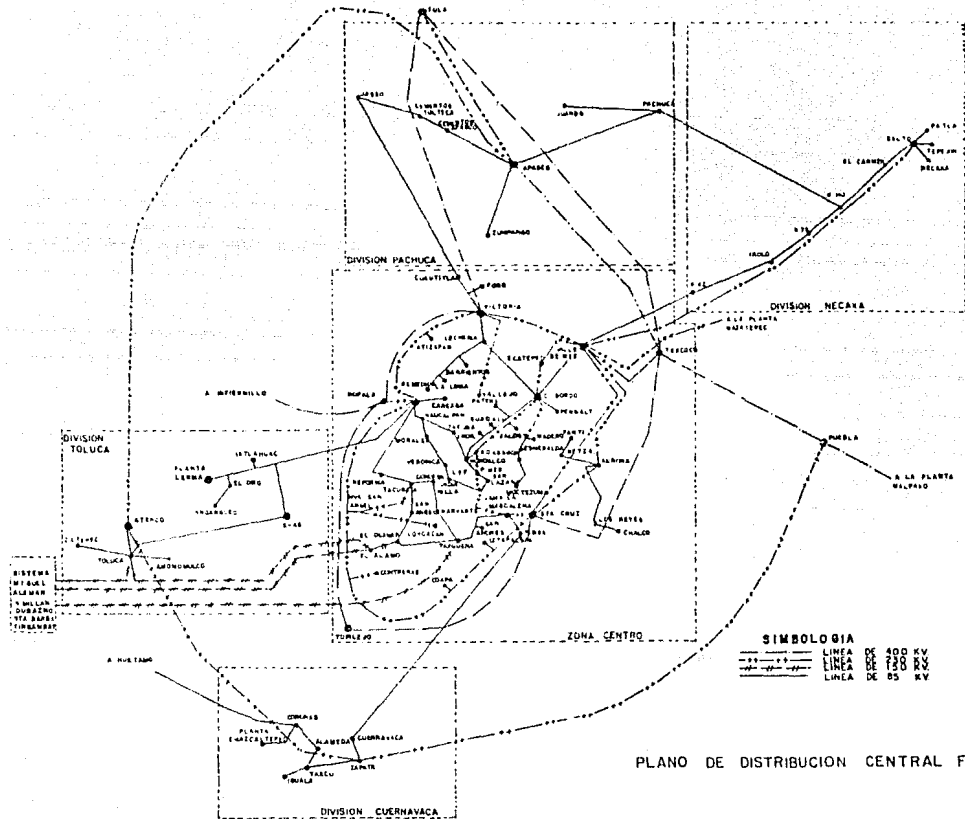
La energía de estas plantas llega a los consumidores a través de 150 líneas de transmisión con tensiones de 400, 230, 150, 85 y 23 KV., como se muestra en la figura 1-3, alimentando a clientes muy importantes como son la Industria Cementera, Industria Química, Acerera, Textil, el Transporte Eléctrico de la ciudad, etc.

Para el año de 1987, se contaban en el área urbana y suburbana, con 18 320 kilómetros de líneas y 2 625 kilómetros de cables, distribuidos en las tensiones antes mencionadas y con una capacidad instalada en subestaciones de 14 991 MVA.

DISTRIBUCION ELECTRICA EN LA CIUDAD DE MEXICO.

Es la distribución de la energía eléctrica una función costosa que consume aproximadamente el 40% de los recursos de inversión y gastos necesarios para prestar un servicio eléctrico integral. La conformación actual del sistema de distribución en la Ciudad de México, es similar a la de cualquier otra y cuenta con los siguientes elementos: subestaciones de distribución, redes primarias, transformadores de Distribución, redes secundarias, acometidas y medición del servicio proporcionado al usuario.

Existe una normalización de todo el equipo empleado. la cual se respeta ampliamente. El sistema de distribución es muy basto y complejo. ya que alimenta a una población de aproximadamente 19,000,000 de habitantes, esta dis-



SIMBOLOGIA

—●—●—●—	LÍNEA DE 400 KV
—●—●—●—	LÍNEA DE 230 KV
—●—●—●—	LÍNEA DE 138 KV
—●—●—●—	LÍNEA DE 65 KV

PLANO DE DISTRIBUCION CENTRAL FIG. I-3

tribución de energía se requiere en diversas magnitudes de acuerdo con la zona que alimenta, como medida de esta diversidad tenemos la densidad de carga (KVA/Km^2); la densidad de carga es una medida de la energía eléctrica requerida en una unidad de superficie y determina el tipo de instalación que debe emplearse en cada zona. En el caso particular de la Ciudad de México se manifiesta de la siguiente manera:

Primer cuadro de la Ciudad	50 a 90 MVA/Km^2
Sector comercial cercano	30 a 40 MVA/Km^2
Sector de industria pequeña y residencial.	16 a 30 MVA/Km^2
Sectores residenciales	6 a 8 MVA/Km^2
Sectores suburbanos.	2 a 4 MVA/Km^2

VENTAS POR SECTOR EN 1987	G W H	%
Doméstico	3 535	19.1
Comercial	2 208	11.9
Industrial	10 540	57.0
Servicios Públicos	1 561	8.4
Otros.	655	3.6

Observamos que el primer cuadro necesita un sistema que garantice la continuidad en el servicio a la vez que sea altamente seguro, condiciones que satisfacen ampliamente las redes de distribución subterráneas; éstas redes cuentan con dispositivos automáticos de control que permiten la seguridad y continuidad antes mencionadas. En los sectores que no tienen una densidad de carga tan alta se recurre a las redes de distribución aérea, que no ofrecen las ventajas de las subterráneas, pero su costo es notablemente menor. Las zonas residenciales en construcción emplean en la actualidad cableado subterráneo con el fin de mejorar la estética de la zona habitacional.

Los sistemas de distribución hoy en día, necesitan una infinidad de elementos técnicos y humanos son los cuales sería imposible lograr su finalidad.

Implica combinar una gran cantidad de equipos, cada uno de los cuales puede repercutir, si falla, en el servicio a los usuarios.

Para la distribución en la Ciudad de México en las redes primarias se emplean tensiones de 6000 volts y 23000 volts tanto en las redes aéreas como en las subterráneas, tendiendo a desaparecer las 6 KV., en las redes secundarias se tienen valores de 220 y 127 volts todos los sistemas son trifásicos, operando a 60 Hz.

El sistema que proporciona energía a la Ciudad de México y zonas aledañas es operado por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., interconectada con los sistemas de la Comisión Federal de Electricidad. en la figura 1-3, vemos un esquema de como se efectúa la subtransmisión en el Valle de México, podemos observar que se encuentra formando un anillo exterior de línea aérea de 230 KV., de tensión en doble circuito y que liga las subestaciones de: Magdalena, Valle de México, Remedios y coapa.

Este anillo sirve para alimentar otros anillos interiores que trabajan a 85 KV., así como otros circuitos que trabajan a 230 KV., que alimentan subestaciones que operan en zonas de muy alta densidad de carga que son: Nonoalco, Pensador Mexicano, Merced, Jamaica, Aurora, Santa Cruz, Iztapalapa y Ceylán. Es debido a la gran densidad de población y a la topografía del terreno que tuvo lugar la instalación del cable de mayor tensión que se tiene en operación en la República Mexicana con tensión de 230 KV. y que va de las subestaciones Nonoalco a Pensador Mexicano, de ahí a Merced y de Merced a Jamaica con una longitud total de 8632 metros.

Aparte del citado, tenemos otros cables subterráneos operando a 85 KV., como lo son: el que une las subestaciones Nonoalco y Jamaica pasando por la de San Lázaro, con una capacidad de 65000 KVA. El que va de Taxqueña a Condesa, pasando por Narvarte y el que enlaza las subestaciones: Jamaica, Indianilla, Verónica y Mirales con una longitud total de 1358 metros.

1.3. PLANTAS CON UNIDADES TURBO-JET.

En el Sistema Eléctrico central dentro del área metropolitana se cuenta con 11 unidades del tipo jet que suman una potencia total de 375 MW., nomina les, cuyas características técnicas permiten una respuesta inmediata en su arranque y toma de carga, trabajando en paralelo con el sistema como complemento de carga 6 en forma aislada formando un circuito independiente para integrar la red de emergencia.

Las subestaciones de la red son: subestación Lechería localizada en la zona suburbana del lado Noroeste de la ciudad con 4 unidades generadoras, sub estación Valle de México localizada en la zona suburbana Noreste de la ciudad que cuenta con 3 unidades generadoras y subestación Nonoalco ubicada en pleno corazón de la ciudad con 4 unidades de este tipo, lo anterior se detalla en la tabla de la figura 1-4.

Estas subestaciones de la red tienen un arreglo eléctrico en sus barras colectoras por el lado de alta tensión, muy similar entre si denominado de "Doble Barra", una principal o base y otra auxiliar, nomenciatudadas como barras "A" y barras "B" de 85 KV.

Las unidades generadoras Turbo-Jet producen una tensión de 13.8 KV., mismo que es transformado a su vez por los bancos transformadores 85 KV. y enviado éste potencial a las barras colectoras de 85 KV., de acuerdo como se encuentre repartida la carga en las barras de cada una de las subestaciones, ver figura 1-5.

De las barras colectoras de 85 KV., se conectan las líneas transmisoras a otras subestaciones vecinas así como bancos de transformadores con relación de 85/23 ó 85/6 KV., para alimentadores radiales de la carga propia de la subestación.

En la figura 1-6 se puede observar el arreglo que ocurre cuando se integra el circuito de emergencia. Sólo las subestaciones Lechería, Valle de México y Nonoalco tienen las unidades generadoras y la subestación Cerro Gordo sirve de interconexión a través de las líneas de 85 KV., Lechería 2, Valle de México y Cerro Gordo 2. La carga realmente importante y que en realidad es causa de la creación de la red, se encuentra conectada en la subestación-

SUBESTACIONES Y CAPACIDAD DE LAS UNIDADES GENERADORAS TIPO JET.

SUBESTACION	NUMERO DE LA UNIDAD	M A R C A	CAPACIDAD MW. UTILIZABLE EN CARGA BASE *	CARGA PICO MW.	REACTIVOS COMO CONDENSADORES SINCRONOS MVAR	TOTAL MW.
LECHERIA	1,2,3	MITSUBISHI	30	32	30	90
	4	ELECTRIC MACHINERY	45	46	39	45
VALLE DE MEXICO	2,3 y 4	MITSUBISHI	30	32	30	90
NONOALCO	1 y 2	MITSUBISHI	30	32	30	60
	3 y 4	ELECTRIC MACHINERY	45	46	39	90

*NOTA: Carga base en base a 85 KV. del Sistema.

Figura 1-4.

SUBESTACIONES Y CAPACIDAD DE LAS UNIDADES GENERADORAS TIPO JLT.

SUBESTACION	NUMERO DE LA UNIDAD	M A R C A	CAPACIDAD MW. UTILIZABLE EN CARGA BASE *	CARGA PICO MW.	REACTIVOS COMO CONDENSADORES SINCRONOS MVAR	TOTAL MW.
LEGERIA	1,2,3	MITSUBISHI	30	32	30	90
	4	ELECTRIC MACHINERY	45	46	39	45
VALLE DE MEXICO	2,3 y 4	MITSUBISHI	30	32	30	90
NONOALCO	1 y 2	MITSUBISHI	30	32	30	60
	3 y 4	ELECTRIC MACHINERY	45	46	39	90

*NOTA: Carga base en base a 85 KV. del Sistema.

Figura 1-4.

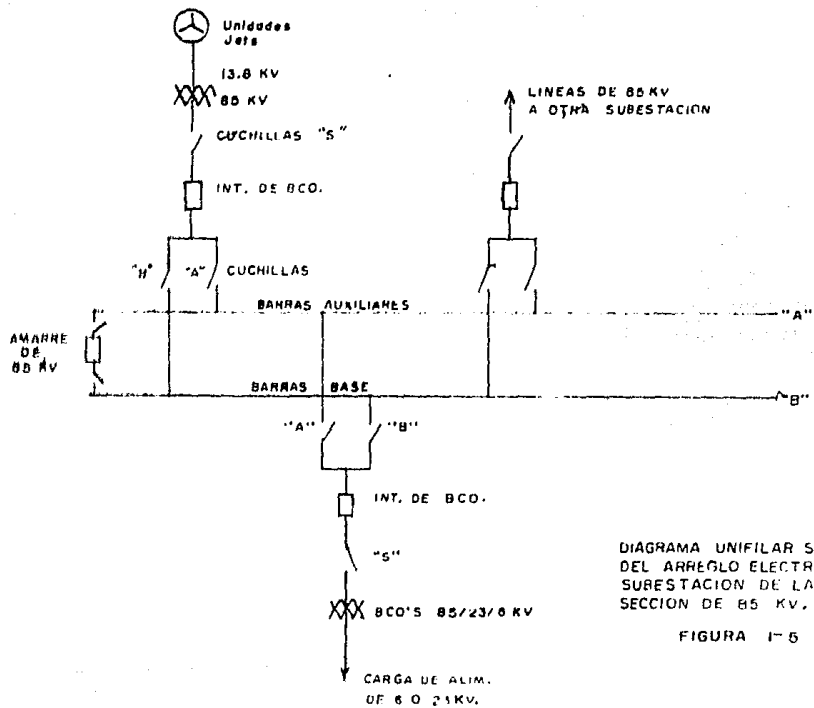


DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO
DEL ARREGLO ELECTICO DE UNA
SUBESTACION DE LA RED.
SECCION DE 65 KV.

FIGURA 1-5

REO DE EMERGENCIA SISTEMA CENTRAL

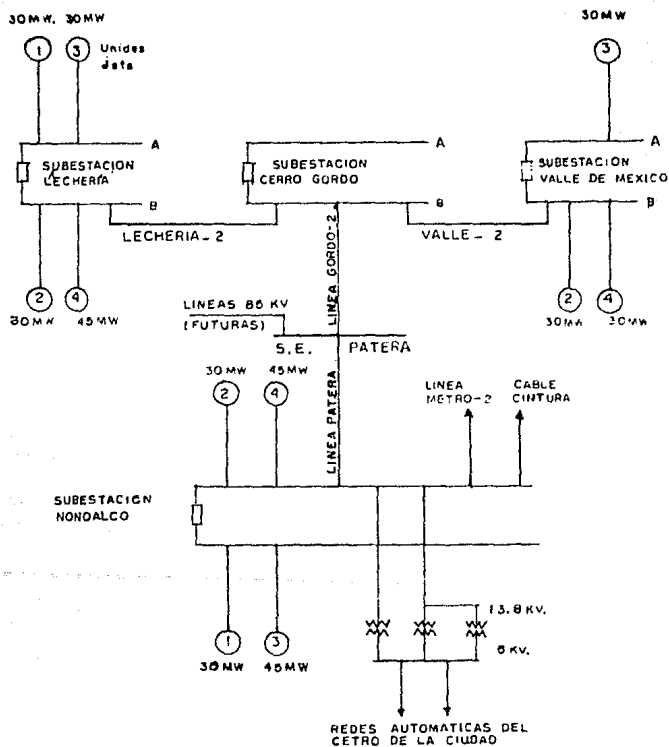


FIGURA 1-6

Nonoalco, la prioridad de carga juega un papel muy importante durante el proceso de armado de la red, porque precisamente en ésta subestación se alimentan las cargas del Metro, el cable cintura y las secciones 1,2 y 3 para las redes automáticas del centro de la ciudad. El cable cintura alimenta la subestación San Lázaro que sirve de paso para la subestación Jamaica de donde parte el cable Metro 1, que es el otro circuito de alimentación al centro de carga del Metro localizado en la subestación Buen Tono y tiene transferencia hacia los cables Metro 1 y 2, para la alimentación de éste cada vez más importante servicio de transporte de pasajeros.

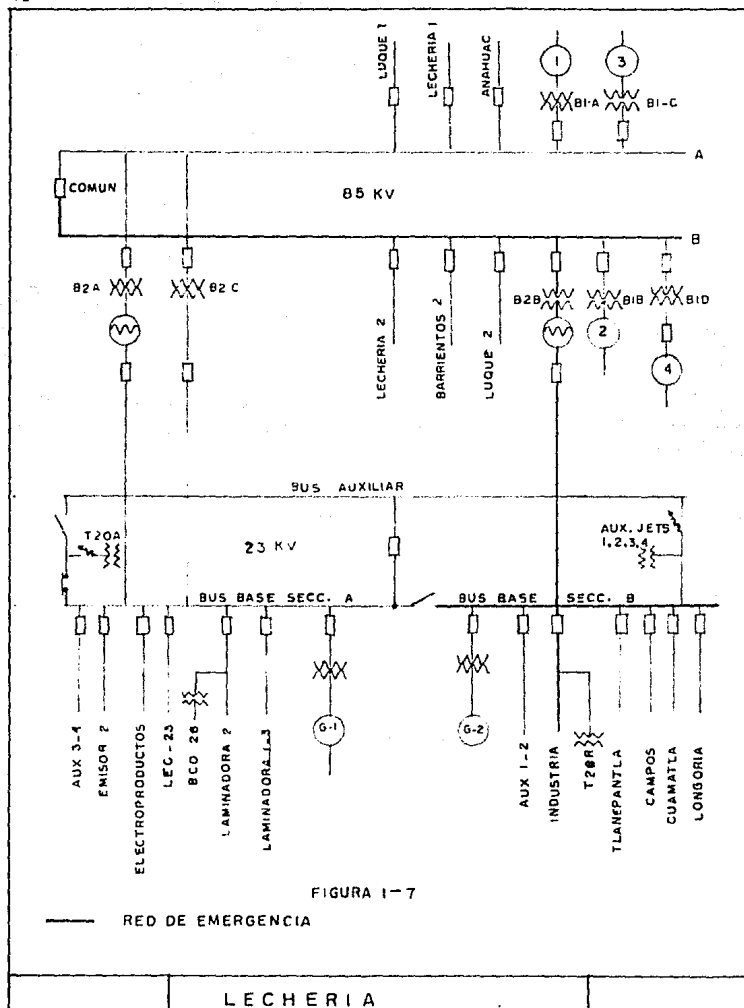
ARREGLO ELECTRICO DE LAS SUBESTACIONES CON UNIDADES JET.

Por ser el arreglo eléctrico de la sección de 85 KV, muy similar en todas las subestaciones con plantas jet se describirá una de ellas, se seleccionó la subestación Nonoalco para este fin, las figuras 1-7 y 1-8 y 1-9 representan los diagramas unifilares de las subestaciones y se representan sin cuchillas a ambos lados de los mismos, para mayor claridad de los dibujos estas se han suprimido.

Como se puede observar en la figura correspondiente al diagrama unifilar de la subestación, la sección de 85 KV., está compuesta de doble barra - denominadas "A" (auxiliares) y barras "B" (base), las cuales se pueden interconectar a través de un interruptor denominado interruptor de amarre de 85 KV; a cada una de las barras es repartida carga (líneas ó bancos) y una determina la generación de jets, que será en adelante característica de esta subestación, pero por medio del interruptor de amarre se puede mandar energía de una barra a otra y trabajar en sincronismo todas las unidades.

Se ha normalizado que las unidades jets, con número par se conectan a las barras "B" y las impares a las barras "A", así como los bancos de transformadores A, C, E, etc., a las barras "A" y los bancos B, D, F, etc., a las barras "B".

Por el lado de 6 KV., se tiene también arreglo de doble barra con su interruptor de amarre de 6 KV., en este caso de la sección de baja tensión, en los otros diagramas los arreglos eléctricos en este caso difieren pudiendo tener arreglo de bus seccionado.



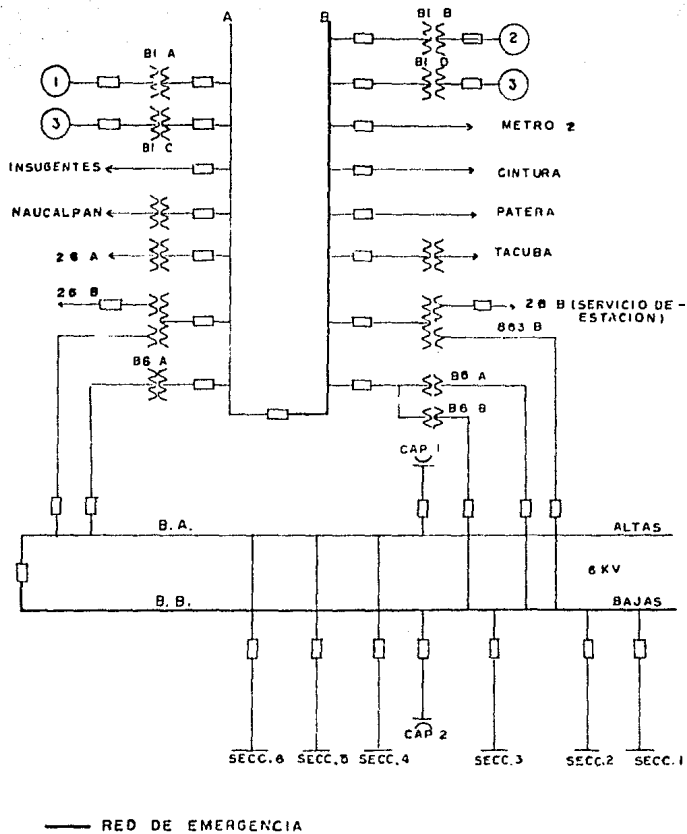


FIGURA 1-9

NONO ALCO

CAPITULO II

DESCRIPCION Y OPERACION DE UNIDADES TURBO-JET.

2.1. DESCRIPCION GENERAL DE LA UNIDAD TURBO-JET.

Una unidad turbo-jet es una máquina completa capaz de producir caballos de potencia en su flecha para mover cualquier tipo de maquinaria, en nuestro caso está acoplada a un generador eléctrico.

La teoría de operación de una turbina a gas está basada en la segunda ley de Newton y dice que un cambio de movimiento es proporcional a la fuerza aplicada. Expresada por la ecuación $F=ma$.

En el caso de una turbina a gas para usos industriales la aceleración de la masa de gases a través del generador de gases, produce gases de alta velocidad y presión que salen por la parte trasera del generador, estos gases de escape dan la potencia necesaria para mover la turbina libre, la cual convierte velocidad y energía de presión en energía mecánica para mover la flecha.

El arreglo que tienen las unidades generadoras turbo-jet instaladas en el sistema de la Ciudad de México se muestra en la figura 2-1 y consta de 2 turbinas a gas acopladas alternativamente a un generador eléctrico. Cada turbina está colocada dentro de una cabina donde se encuentran localizados la mayoría de sus servicios auxiliares para el funcionamiento de la misma. El generador eléctrico con que cuentan estas unidades es del tipo síncrono de 2 polos y tienen una capacidad de 30 ó 45 MW, se encuentra localizado en una cabina intermedia a las 2 turbinas dentro de la cual se encuentran también su excitador y sus servicios auxiliares.

Los tableros de control se ubican fuera de la unidad interconectados por medio de un cableado subterráneo, el tablero de control local se encuentra a unos metros de la máquina y el tablero de control remoto se localiza dentro del salón de tableros de la subestación eléctrica (S.E.).

En la figura 2-1, también se puede observar la ubicación de las alimentaciones de combustible tanto gaseoso como líquido, con sus sistemas de filtrado y medición de flujo. El combustible gaseoso es proporcionado directamente por Petróleos Mexicanos a través de un gasoducto desde Ciudad Penex, pasando por la estación reguladora de presión Venta de Carpio, mientras que el combustible líquido es almacenado en un depósito de 600,000 lts., de capacidad y bombeado hasta el sistema de filtrado que se encuentra cerca de la unidad.

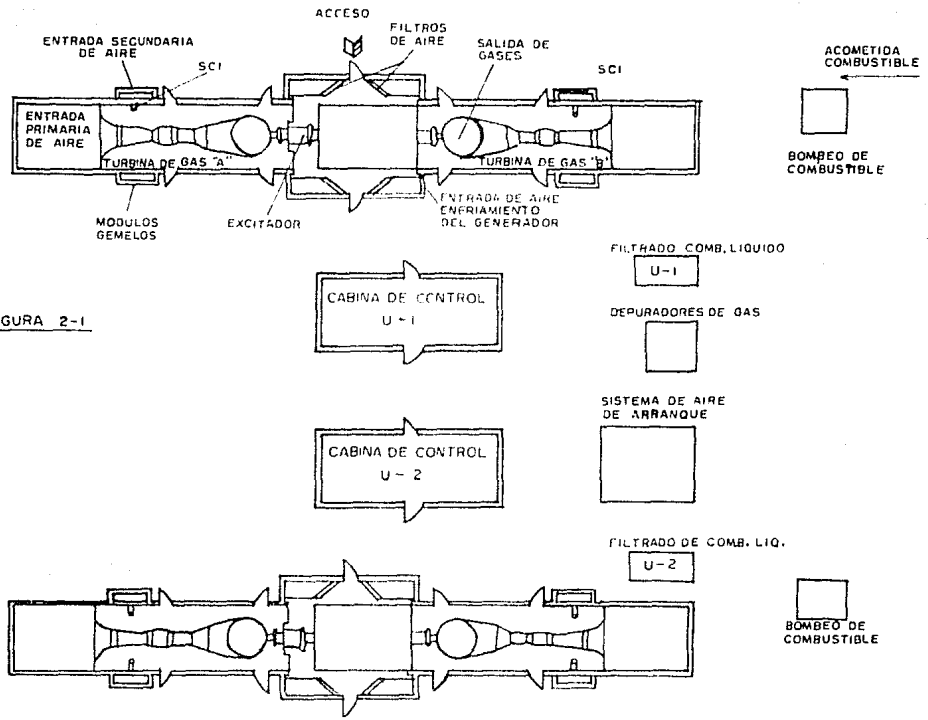


FIGURA 2-1

Se observa también la ubicación del sistema de aire de arranque de las turbinas, el cual proporciona aire a una presión de 35 Kg/Cm^2 suficientes - para elevar y sostener la velocidad de las turbinas a 1,500 r.p.m., para - efectuar el barrido de gases y tener un comburente para la ignición.

DESCRIPCION DE LA TURBINA A GAS.

Una turbina a gas consta de dos partes fundamentales:

- 1.- Un generador de gas, para producir gases de alta velocidad.
- 2.- Una turbina independiente que usa los gases del generador de gas - para desarrollar potencia y mover una flecha.

En la figura 2-2, se muestran los elementos que componen una turbina a gas, las características físicas y funciones de la mayor parte de los compo nentes serán descritos en el órden como están colocados en la máquina del - frente hacia atrás.

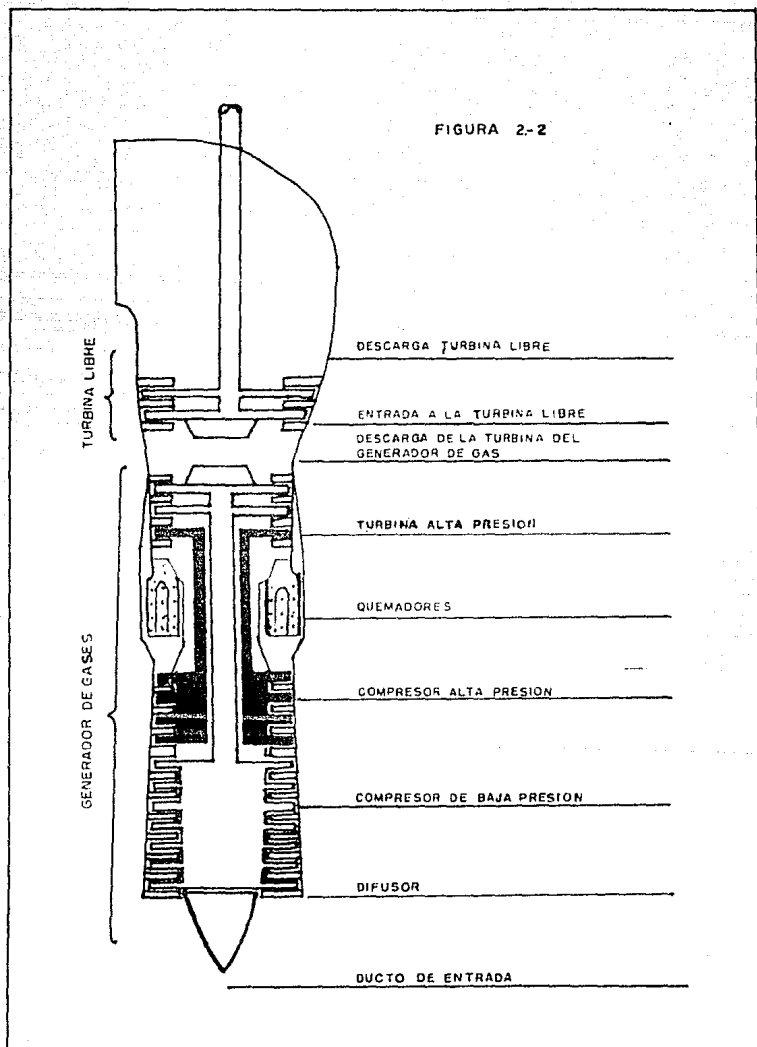
Una turbina a gas consume de 6 a 10 veces más aire por hora que una má quina de movimiento alternativo de la misma capacidad y por lo consiguiente el pasaje de entrada de aire es correspondientemente más grande

DIFUSOR Y DUCTO DE ENTRADA

En la mayor parte de las instalaciones de generadores de gas, se colo- ca una entrada tipo Bellmouth en el extremo frontal para guiar el aire ha- cia las compuertas guías de entrada al compresor. Este tipo de entrada se- diseña con el único objeto de obtener una eficiencia aerodinámica muy alta. Esencialmente la entrada es un túnel acampanado que tiene las aristas muy - bien redondeadas, para ofrecer la mínima resistencia al aire, la pérdida en el ducto se considera despreciable.

COMPRESORES

A presión barométrica normal, tal como la del interior de una máquina- parada, la combustión de la mezcla combustible-aire no produce suficiente - energía ni suficiente potencia extraída de los gases de expansión, para pro ducir trabajo utilizable con una eficiencia razonable.



La energía liberada por la combustión es proporcional a la masa de aire consumido, por lo tanto se necesita más aire para incrementar la eficiencia del ciclo de combustión que la que puede proporcionar la presión barométrica normal.

Tanto en las máquinas alternativas como en las turbinas a gas, la mezcla de aire-combustible o aire solo, deben comprimirse con objeto de que se pueda mover en un volumen dado la máxima cantidad de aire, es por esta razón que se usan compresores en las turbinas a gas.

Los compresores axiales tienen la ventaja de ser muy compactos y presentan una área frontal relativamente pequeña, así pues, las más grandes turbinas a gas emplean este tipo de compresor.

El aire en un compresor axial fluye en una dirección axial a través de una serie de aspas giratorias del rotor y una serie de aspas estacionarias del estator, las cuales son concéntricas con el eje de rotación.

A diferencia de una turbina que también emplea aspas giratorias y fijas, el paso del flujo de un compresor axial disminuye su área de la sección recta en dirección del flujo, en proporción al volumen reducido de gas a medida que aumenta la compresión entre un paso y otro.

Después de salir de la entrada Bellmouth hacia la parte frontal del compresor, el aire pasa a través de un juego de aspas guías de entrada que preparan el flujo para meterlo al primer paso del rotor del compresor.

Al entrar al primer juego de aspas giratorias al aire es impulsado en la dirección de rotación, luego pasa a un juego de aspas fijas, luego al segundo paso de aspas móviles y así sucesivamente a través de todo el compresor, como se puede observar en la figura 2-3.

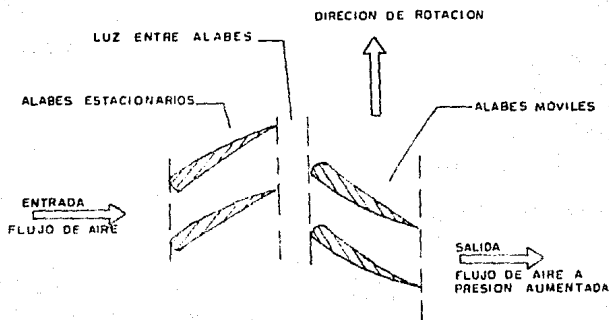


FIGURA 2-3

En los estatores, la velocidad disminuye mientras que la presión estática aumenta. A medida que la velocidad del aire decrece en los estatores, la presión debida a la velocidad o presión de pistón ya ganada en paso giratorio anterior, decrece parcialmente aunque la presión total permanece igual. Recordemos que la presión total es la suma de la presión estática más la presión de velocidad.

Como la presión va aumentando a través de los juegos sucesivos de aspas de rotor y estator cada vez se requiere menor volumen, razón por la cual el volumen del compresor va decreciendo gradualmente.

En nuestro caso el generador de gases cuenta con dos pasos de compresión o compresores cada uno de los cuales posee su turbina y no están conectados-mecánicamente como se puede apreciar en la figura 2-2. Los compresores se de nominan, el frontal compresor de baja presión y el trasero de alta presión.

El rotor del compresor trasero ó de alta presión tiene regulación de ve locidad a través del control de combustible de la máquina y es el rotor al-cual el arrancador de la máquina está conectado. Con los rotores frontal y-trasero trabajando en armonía en lugar de interferir entre ellos, puede au-mentarse la relación de compresión sin bajar la eficiencia. Con el compresor de alta presión regulado a velocidad constante la velocidad del compresor de baja presión variará con la temperatura del aire entrando, debido a la dife-rencia de trabajo necesaria para comprimir aire frío ó caliente.

SECCION DE DIFUSORES.

El aire que sale del compresor pasa por un difusor que prepara el aire-para que entre a los quemadores a baja velocidad de manera que se pueda obte-ner una buena combustión sin peligro de que se apague el quemador. Así pues, la difusión tiene lugar cuando la sección recta del área de un tubo, ducto ó tunel por el que está pasando gas o aire aumenta de tamaño progresivamente - como se muestra en la figura 2-4.

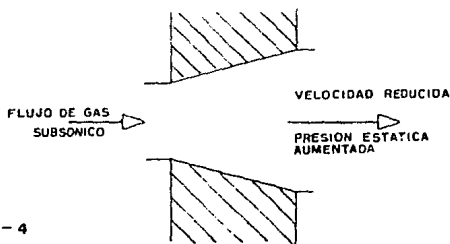


FIGURA 2-4

SECCION DE QUEMADORES.

El combustible gaseoso ó líquido se introduce en la corriente de aire en el frente de los quemadores en forma pulverizada apropiada para que se mezcle rápidamente con el aire de combustión, el combustible se lleva desde fuera de la máquina por un sistema de cabezales hasta las toberas montadas en los botes de los quemadores.

La sección de quemadores que contiene la cámara de combustión, está diseñada para quemar una mezcla de combustible y aire, liberando gases de combustión hacia la turbina. Los quemadores están encerrados en un espacio muy limitado y deben dar suficiente energía calorífica a los gases que pasan por la máquina, para acelerar su masa lo suficiente para producir la potencia deseada para la turbina.

El criterio para considerar aceptable un quemador es que la pérdida de presión de los gases que pasan a través del quemador debe ser mantenida en un mínimo, la eficiencia de combustión debe mantenerse en un nivel alto y el quemador no debe tener tendencia a apagarse, la figura 2-5 nos muestra un corte del arreglo de los quemadores de bote colocados en forma anular.

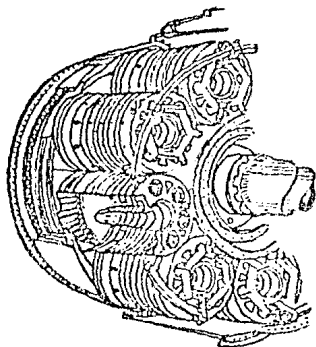


FIGURA 2-5

La cámara de combustión es del tipo anular-bote y su diseño es tal que, menos de un tercio del volumen total del aire entrando a la cámara se mezcla con el combustible, la relación promedio de la mezcla es de 60 a 1 en peso. Sin embargo, de las 60 partes de aire, solo alrededor de 15 partes en peso se usan para la combustión y por lo tanto el excedente de aire se utiliza en el sentido de flujo para enfriar las superficies del quemador y para mezclarse con los gases de combustión y enfriarlos antes de que éstos últimos entren a las turbinas.

TURBINAS DEL GENERADOR DE GAS.

La turbina extrae energía cinética de los gases en expansión que salen de la cámara de combustión, convirtiéndola en potencia en la flecha para mover el compresor y sus accesorios. Cerca de 3/4 de toda la energía disponible en los productos de combustión se necesita para mover el compresor.

La turbina de flujo axial comprende dos elementos principales: una rueda de turbina o rotor y un juego de aspas estacionarias. La sección estacionaria consiste de un plano de aspas contorneadas concéntricas al eje de la turbina y colocadas en un cierto ángulo para formar una serie de pequeñas toberas, las cuales descargan los gases hacia las aspas de la rueda de la turbina (rotor). Por esta razón al conjunto de aspas estacionarias se le llama tobera de la turbina y a las aspas mismas se les llama aspas guías de la tobera.

El área de la tobera de la turbina constituye una parte crítica del diseño de la turbina.

Si el área es muy grande, la turbina no operará a su mejor eficiencia. Si es muy pequeña la tobera tendrá una tendencia a atascarse bajo condiciones de potencia máxima, los chorros de gases de escape, saliendo de las toberas son dirigidos contra las aspas giratorias de la turbina, en una dirección que permite que la energía cinética de los gases sea transformada en energía mecánica, la cual es generada por la rueda giratoria de la turbina, como se puede observar en la figura 2-6.

TURBINA LIBRE.

Existe también una sección difusora atrás de las turbinas del generador de gases, entre el escape de la turbina y las toberas guías de la turbina libre, como en el caso del difusor entre sección compresor y sección quemadores, el área de los pasajes de gas aumenta para bajar la velocidad y aumentar la presión estática de los gases de escape saliendo del generador de gas, antes de que entren en la turbina libre.

Como su nombre lo indica la turbina libre opera en completa independencia del generador de gas, no está acoplada directamente en ninguna forma a las partes giratorias del generador de gas. Excepto por el tamaño la construcción y principios de operación de la turbina libre, son exactamente los mismos que los de las turbinas del generador de gas.

El diámetro de la turbina libre es considerablemente mayor que los de las turbinas del generador de gas, debido a que cuando los gases entran a la turbina libre ya expandieron en volumen y por lo tanto se requieren turbinas mayores para mover un flujo de gases de mayor volumen.

Las turbinas del generador de gas tienen únicamente el tamaño necesario para mover los compresores, en cambio la turbina libre debe ser lo suficientemente grande para aprovechar toda la energía de los gases que se usan en ella.

Después de salir de la turbina libre, los gases de escape van por un ducto hacia afuera de la máquina, es decir a la atmósfera. La flecha motriz de la turbina libre sobresale de la máquina a través del ducto de escape y es acoplada al generador eléctrico.

GENERADOR ELÉCTRICO.

Como se observó en la figura 2-1, el generador eléctrico se encuentra ubicado entre las dos turbinas a gas, acoplado mecánicamente a las mismas a través de las flechas de las turbinas libres de cada una de ellas.

Este generador es una máquina síncrona, trifásica con capacidad para funcionar a 50 ó 60 Hertz, con una velocidad de 3,000 ó 3,600 r.p.m., respectivamente.

tivamente, con rotor cilíndrico de dos polos, con un sistema de excitación sin escobillas y con generador magnético permanente (PMG) de 3 KVA, para funcionar con una corriente a la salida de 2,159 amperes, una tensión de 13,800 V., a factor de potencia de 0.9 PU, entregando a la salida una potencia de -- 51,600 KVA ó 46,440 KW. Los aislamientos con que está construida la unidad son:

Rotor: Aislamiento de tipo clase F (hoja de mica impregna con resina epóxica y cuñas de fibra de vidrio).

Estator: Aislamiento de tipo clase B (mica y resina poliéster).

En la figura 2-7, se muestra el arreglo general del generador eléctrico y su equipo de excitación, en ella se puede observar el acoplamiento existente entre ellos, a los extremos de este arreglo se pueden ver las bridas de acoplamiento a las turbinas libres de las turbinas a gas.

En los capítulos III y IV se describirá en detalle el funcionamiento de cada una de las partes que forman el arreglo del generador eléctrico y su excitación.

VELOCIDAD DE DESCARGA AUMENTADA POR LA ACCION DE LA TOBERA CAUSANDO REACCION CON UNA COMPONENTE EN EL PLANO DE ROTACION DEL ROTOR.

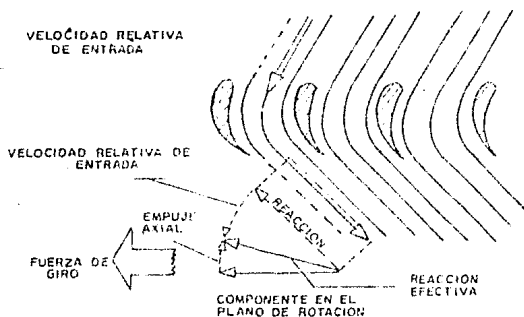


FIGURA 2-6

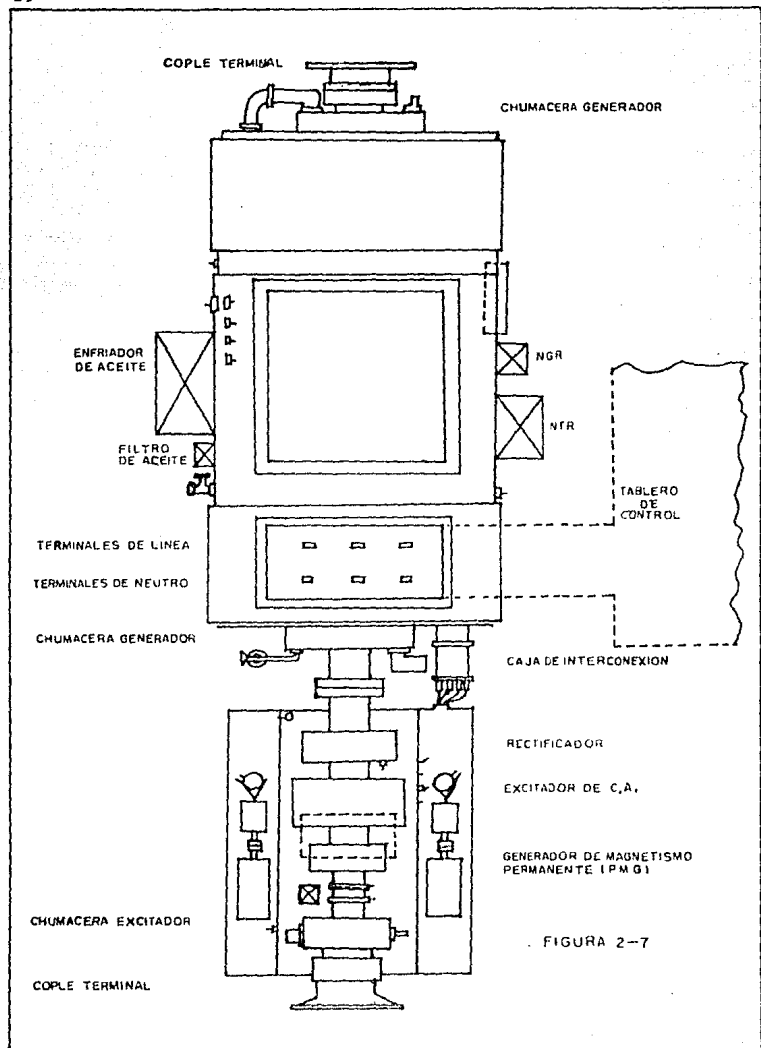


FIGURA 2-7

2.2. PRINCIPIOS DE OPERACION DE LAS TURBINAS A GAS.

ANTECEDENTES HISTORICOS.

En el siglo XVIII aparece la turbina a gas con los principios similares a los actuales. En el año de 1791, se registró en Inglaterra la primera patente de invención para una turbina a gas, presentada por el Sr. J. Barber, no obstante que ésta máquina nunca llegó a realizarse, su diseño contaba ya con las partes fundamentales actuales, es decir, compresor para el aire y el combustible, cámara de combustión y turbina del tipo impulso, las partes sometidas a altas temperaturas estaban enfriadas por agua y la lubricación era la más sencilla posible.

Partiendo de ésta unidad se siguieron haciendo modificaciones durante más de un siglo, sin que los resultados obtenidos pasaran de ser una curiosidad del laboratorio termodinámico. En el período de 1905 a 1907, dos franceses Armengaud y Lemale, después de construir varias turbinas experimentales consiguieron fabricar una unidad práctica de 25 HP., dotada de una muy baja eficiencia de solo 3%.

Posteriormente estos mismos inventores construyeron otra turbina de dos pases de impulso con un ciclo térmico ya semejante al actual.

Fundados en los resultados alcanzados por Lemale y Armengaud, otros hombres de ciencia siguieron experimentando con la nueva máquina, hasta conseguir un rendimiento aceptable. Hacia 1927 se logró una eficiencia térmica superior a 15% con potencias de 25,000 HP., y 1,000 r.p.m., el principal constructor de éstas máquinas fue el Dr. Hans Holzwarth y sus experiencias sirvieron para que el Dr. A. Stodola, estableciera los principios termodinámicos fundamentales de la turbina a gas en que se basan los diseños modernos.

FUNCIONAMIENTO.

El ciclo de una turbina a gas es parecido al de un motor de combustión interna, ambos comprimen el aire, inyectan y queman combustible, y por fin permiten la expansión y el escape de los gases de combustión aún calientes. Teóricamente, la diferencia entre la fuerza utilizada para comprimir el aire

y la que produce la combustión, es la potencia aprovechable del motor ó de la turbina.

En motor de combustión interna, los diversos tiempos es decir admisión, - compresión, combustión y escape tienen lugar sucesivamente en los cilindros - de la máquina. En cambio, la turbina a gas emplea un mecanismo separado para cada uno.

De acuerdo con lo anterior, en su realización más simple la turbina a gas consiste de tres partes principales: el compresor de aire, el combuster y la turbina propiamente dicha.

El compresor es un componente mecánico en el cual se eleva la presión del aire hasta el punto de trabajo, pero sin cambiar su composición y es del tipo rotativo. Hay dos tipos principales de diseño del rotor, el de flujo axial y el de flujo radial o centrífugo. Este último presenta algunas dificultades de manufactura, pero debido a su mejor eficiencia y menor peso es preferible en aviación. El compresor axial, es más sencillo y comúnmente usado en plantas - estacionarias en las cuales el peso no tiene mayor importancia.

La cámara de combustión (combuster) es un elemento térmico en el cual se inyecta combustible y se quema en presencia de aire para obtener una mezcla - de gases a temperatura deseada. Es en este punto en donde se le da energía al ciclo, en realidad no es una sino varias las cámaras de combustión que lleva la unidad; estas se colocan radialmente entre la salida del compresor axial y la entrada de la turbina y están contenidas en una sola coraza que rodea a - la máquina alrededor del punto mencionado.

El aire entra del compresor a la coraza y el combustible se introduce a - las cámaras por toberas colocadas en la abertura al final de éstas. Las cámaras de combustión están provistas de perforaciones con el objeto de producir una turbulencia y mezclar el aire con el combustible.

La turbina es el componente mecánico en el cual la energía potencial contenida en el gas previamente comprimido y calentado, se convierte en energía - mecánica debido a la acción cinética de un elemento rotatorio. Esta potencia - se emplea en dos partes, una la requerida para mover el compresor y los auxi - liares, la otra entregada a la flecha de salida que es la potencia útil de la

máquina. El arreglo de los rotores del compresor y la turbina puede hacerse sobre un solo eje girando ambos a igual velocidad angular ó sobre varios ejes.

Una planta de turbina a gas puede ser simple como la que incluye principalmente un compresor, cámara de combustión y turbina, por otra parte pueden tener grandes cambiadores de calor, dos ó más compresores con interenfriadores, y dos ó más turbinas con compresores auxiliares.

Clasificación.- Las plantas de potencia de turbinas a gas, pueden clasificarse siguiendo el presente criterio:

I].- Aplicación.

- 1.- Aviación
- 2.- Estacionario
 - a).- Para carga pico
 - b).- De reserva ó auxiliar
 - c).- Para carga base
 - d).- Industrial
- 3.- Locomóvil
- 4.- Marino
- 5.- Transporte

II].- Ciclo.

- 1.- Abierto
- 2.- Cerrado
- 3.- Semicerrado

III].- Disposición.

- 1.- Simple
- 2.- De una flecha
- 3.- De varias flechas
- 4.- Con interenfriamiento
- 5.- Con recalentamiento
- 6.- Regenerativo
- 7.- Axializada

IV].- Combustión

- 1.- Continua
- 2.- Intermitente

V].- Combustibles.

- 1.- Líquido
- 2.- Sólido
- 3.- Gaseoso.

CICLOS DE OPERACION.

El ciclo abierto es el más comúnmente usado, éste ciclo se explica indicando que el aire está continuamente tomado de la atmósfera y los gases de escape de la turbina se expulsan también a la atmósfera. Después que la unidad se pone en marcha por medio de un motor de arranque ó máquina, el aire atmosférico se toma por el compresor y eleva su presión varias veces a la atmosférica. El aire a la alta presión fluye al combuster donde el combustible se inyecta, manteniéndose una combustión continua.

Los productos de combustión del combuster, todavía a alta presión (ocurre muy pequeña caída de presión en el combuster) y a alta temperatura -- (538° c a 1030°c) se expande en la turbina; el gas de escape de la turbina, como se dijo antes es expulsado a la atmósfera.

Las plantas de ciclo cerrado pueden usar aire o algún otro gas estable como medio de trabajo. En lugar de quemar combustible directamente en el chorro de aire se usa una cámara de combustión externa, y el calor se transfiere al medio de trabajo a través de superficies transmisoras de calor, así, el medio de trabajo no se contamina por los productos de combustión y es constantemente recirculado. Se puede instalar un enfriador para el medio de trabajo que se recircula, antes de entrar al compresor, para hacer mínimo el trabajo de éste.

La planta de ciclo cerrado tiene las ventajas de ser, flexible en cuanto al tipo de combustible; medio de trabajo incontaminado, y tiene la posibilidad de usar un gas de características más deseables que el aire, aunque tiene una mayor desventaja en cuanto a tamaño y complejidad.

En la figura 2-8, se ilustra una planta de ciclo semicerrado, en esta planta la combustión toma lugar en la corriente de aire, igual que en un ciclo abierto, la diferencia es que una mayor proporción de los gases de escape de la turbina se recirculan después de pasar por un enfriador. Los gases recirculados se aumentan con aire para mantener un contenido de oxígeno capaz de soportar efectivamente la combustión. Esta ayuda de aire, se comprime en un compresor auxiliar movido por una turbina de gas separada.

Una gran desventaja en este tipo de plantas es que el funcionamiento del compresor se ve afectado por los depósitos en los pasajes de flujo del compresor de los recirculados.

DISPOSICIONES DE OPERACION.

La figura 2-9 ilustra en forma esquemática varias disposiciones de las plantas de turbinas de gas. Las figuras 2-9 (a) y (b), muestran la planta simple con disposición de simple y doble flecha. El término "simple flecha" significa que las compresoras y turbinas de esta planta están acopladas en-

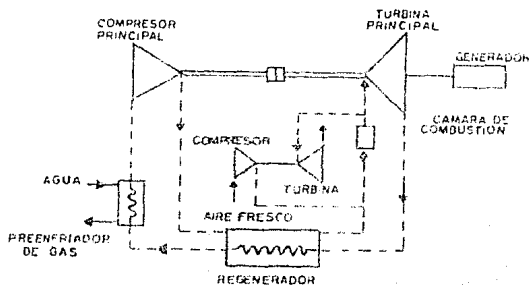
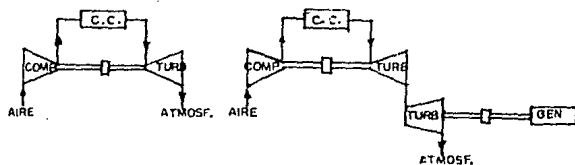
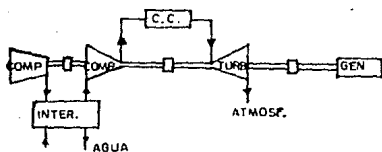


FIGURA 2-8

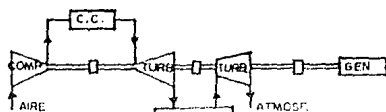


a) PLANTA SIMPLE UNA FLECHA

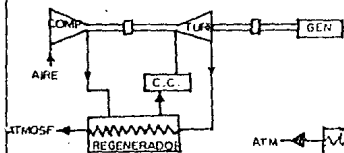
b) PLANTA SIMPLE DOBLE FLECHA



c) INTERENFRIAMIENTO



d) RECALENTAMIENTO



e) REGENERACION-UNA FLECHA

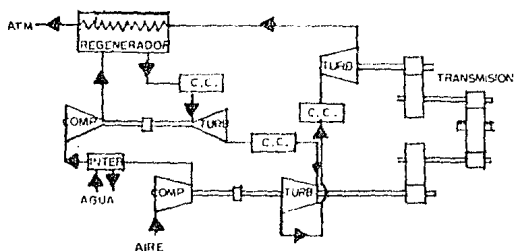
f) INTERENFRIAMIENTO-RECALENTAMIENTO
PLANTA DE TRIPLE FLECHA

FIGURA 2-9

una disposición en serie. Así los dibujos (b), (c) y (d) de esta figura, muestran una disposición de doble flecha, en la cual, dos turbinas operan independientemente una de la otra. El dibujo "f" muestra una disposición de triple flecha, donde dos combinaciones compresor-turbina operan con flechas independientes; una tercera flecha está en una turbina de baja presión.

Una planta con inter-enfriadores, se muestra en el dibujo "c", en esta planta la compresión se realiza en dos o más pasos.

El inter-enfriamiento puede usarse en disposiciones de simple flecha como en el dibujo "c", o en disposiciones de flechas múltiples como se muestra en el dibujo "f".

La planta regenerativa dibujo "e", utiliza un cambiador de calor para recuperar calor del escape de la turbina. El cambiador de calor ó regenerador opera con gases de escape de la turbina en un lado de las láminas o tubos y el aire del compresor por el otro lado. Esta operación disminuye el calor que se tiene que sumar en el combustor. La planta ilustrada en el dibujo "f" utiliza recalentamiento, inter-enfriamiento y regeneración.

CICLO TEORICO.

Como ilustración al respecto se expone la teoría del Ciclo Brayton ideal ó Ciclo Joule. En la figura 2-10 se muestra los diagramas T - S y P - v de este ciclo, en él hay una compresión isentrópica de 1 a 2, seguida por una adición de calor a presión constante de 2 a 3, una expansión isentrópica de 3 a 4 y finalmente una expulsión de calor a presión constante de 4 a 1.

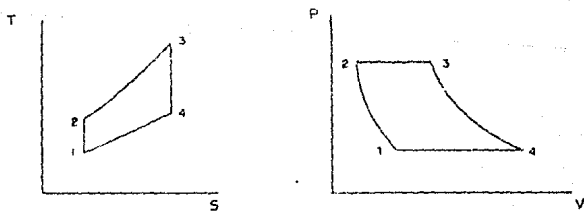


FIGURA 2-10

El ciclo se inicia por una fuente auxiliar de potencia después de la cual, el aire atmosférico se toma y se comprime en el compresor. Se inyecta combustible continuamente de 1 a 2 y la ignición en la corriente de aire es de 2 a 3, los productos de combustión más el aire calentado se expanden en la turbina de 3 a 4, y el gas de escape de la turbina se descarga a la atmósfera de 4 a 1.

como se está analizando un ciclo ideal se harán las siguientes suposiciones sin incluir un serio error, para simplificar las relaciones.

a).- Composición constante, y flujo constante del medio descargando el pequeño flujo de combustible sumado en el proceso de combustión.

b).- Calor específico medio constante (cp) a través del ciclo.

El ciclo ideal Brayton puede considerarse reversible, y su eficiencia puede expresarse como:

$$\eta_{tB} = \frac{Q_A - Q_R}{Q_A} = \frac{C_P (T_3 - T_2) - C_P (T_4 - T_1)}{C_P (T_3 - T_2)} \dots \dots \dots (a)$$

$$\eta_{tB} = \frac{(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

multiplicando y dividiendo por T_1 y T_2

$$\eta_{tB} = 1 - \frac{T_1 (T_4 / T_1 - 1)}{T_2 (T_3 / T_2 - 1)} \dots \dots \dots (b)$$

ya que $P_2 = P_3$ y $P_1 = P_4$

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{P_2}{P_1} \quad ; \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

luego:

$$\frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1 \dots \dots \dots (c)$$

comparando la ecuación (b) y (c), podemos escribir

$$\eta_{tB} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \dots \dots \dots (2-1)$$

y tambien

$$\eta_{tB} = \frac{T_3 - T_4}{T_3} \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

ademas se tiene que:

$$\eta_{tB} = 1 - \frac{(P_1)^{\frac{K-1}{K}}}{(P_2)^{\frac{K-1}{K}}} = 1 - \frac{1}{(r_p)^{\frac{K-1}{K}}} \quad \dots \dots \dots (2-3)$$

Designando $\frac{P_3}{P_4} = \frac{P_2}{P_1} = r_p$ como la relacion de presion

La ecuacion (2-1) no se expresa en terminos de temperatura limite, pero la ecuacion de la eficiencia tambien se puede expresar en funcion de la temperatura medio efectivo,

$$\eta_{tB} = \frac{Q_A - Q_R}{Q_A} = \frac{T_{MA} \Delta S_{3-2} - T_{MR} \Delta S_{4-1}}{T_{MA} \Delta S_{3-2}}$$

como se ve en la figura 2-10

$$\Delta S_{3-2} = \Delta S_{4-1}$$

se tendra:

$$\eta_{tB} = \frac{T_{MA} - T_{MR}}{T_{MA}} \quad \dots \dots \dots (2-4)$$

Así se ve, que la eficiencia térmica del Ciclo Brayton depende de la temperatura media efectiva de la adición y expulsión de calor.

Suponiendo la temperatura del aire atmosférico T_1 constante para un ciclo dado, se supone que T_2 puede también fijarse para una relación de presión dada. Entonces la magnitud de la temperatura media efectiva del calor sumado, depende solamente de la elevación de temperatura debida a la adición. En otras palabras, incrementando la temperatura T_3 de entrada a la turbina puede elevarse la temperatura media efectiva del calor sumado.

Sin embargo, también se eleva la temperatura media efectiva del calor expulsado T_4 . Pero el resultado neto es un incremento en eficiencia térmica, puede por lo tanto llegarse a la conclusión que la eficiencia térmica es también función de la alta temperatura del calor adicionado. Esta conclusión puede verse en la ecuación 1-2.

Lo anterior fue considerando un ciclo completamente reversible, cuando la irreversibilidad del proceso real se toma en cuenta el ciclo cambia completamente. La figura 2-11 ilustra en el diagrama T-S la irreversibilidad del Ciclo Brayton.

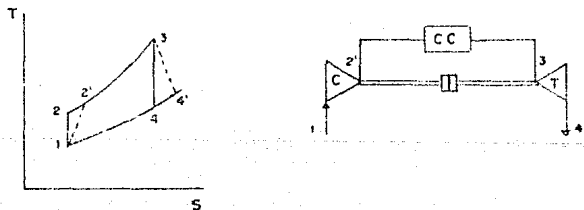


FIGURA 2-11

La turbina de gas real, difiere principalmente del Ciclo Ideal a causa de las irreversibilidades en el compresor y la turbina, y debido al descenso de presión en los pasos de flujo y en la cámara de combustión (ó en el cambiador de calor en una turbina de ciclo cerrado).

Los rendimientos del compresor y de la turbina están definidos en relación a los procesos isentrópicos. Designando los estados como la figura 2-11, las definiciones de los rendimientos del compresor y de la turbina, son los siguientes:

$$\eta_{\text{comp.}} = \frac{h_2 - h_1}{h_2' - h_1}$$

$$\eta_{\text{turb.}} = \frac{h_3 - h_4'}{h_3 - h_4}$$

Otro aspecto importante del Ciclo Brayton es el gran aumento del trabajo de compresión (llamado también trabajo de retroceso), comparado con el trabajo de la turbina; así, el compresor requerirá de 40 a 80% de la salida de la turbina. Esto es de particular importancia cuando se considera el ciclo real, ya que el efecto de las pérdidas requiere de un gran aumento del trabajo de compresión, con un pequeño aumento del trabajo de la turbina, de esta manera el rendimiento total descende rápidamente, con el consiguiente descenso en los rendimientos del compresor y de la turbina. De hecho, si los rendimientos descienden alrededor del 60%, todo el trabajo de la turbina se utilizará en mover el compresor y el rendimiento total será CERO.

2.3. SERVICIOS AUXILIARES DE LA UNIDAD TURBO-JET.

Los servicios auxiliares en una planta eléctrica de cualquier tipo, son todos los instrumentos, máquinas y equipos que sirven para mantenerla en operación, puesta en servicio y controlar el paro ya sea normal ó de emergencia. La capacidad de los servicios auxiliares varía según el tipo de planta eléctrica de que se trate, por ejemplo:

<u>Tipo de planta</u>	<u>% de capacidad instalada</u>
Planta termoeléctrica convencional	7 a 10
Planta hidroeléctrica convencional	3
Planta a reactor nuclear	15
Planta a turbina de gas tipo Jet	0.28

En la figura 2-13 se muestra el diagrama unifilar de servicios auxiliares de la subestación Valle de México, que es representativa de todas las unidades, se puede apreciar que con la máquina parada y estando el interruptor de transferencia automática en la posición "S", los auxiliares toman su energía de la subestación de 23 Kv., y cuando existe voltaje en el lado "R" del interruptor de transferencia automática (esto es cuando la unidad está funcionando), los servicios auxiliares tomarán la energía de su propio generador.

Como se puede apreciar en la figura 2-14, la alimentación preferente a los servicios auxiliares se realizará por los cables de potencia del generador y sólo en caso que falte energía en dichos cables, el interruptor de transferencia automática seleccionará la alimentación de lado subestación la transferencia es como se describe a continuación.

Cuando la unidad está parada, no hay potencial del lado generador, por lo que los relevadores: 1V y 2V están desenergizados y cerrando por sus contactos el circuito del primario del transformador de control, energizando el relevador SE que está colocado en el secundario del transformador. Los contactos de este relevador se cerrarán energizándose la bobina L0 y ésta a su vez energiza al relevador ATS, el cual efectuará el cambio de alimentación. Cuando el generador proporciona una señal de voltaje, se energizarán los relevadores 1V y 2V, abriendo el circuito primario del transformador de control,

DIAGRAMA UNIFILAR DE AUMENTACION A SERVICIOS AUXILIARES,
PLANTAS JET. VALLE DE MEXICO.

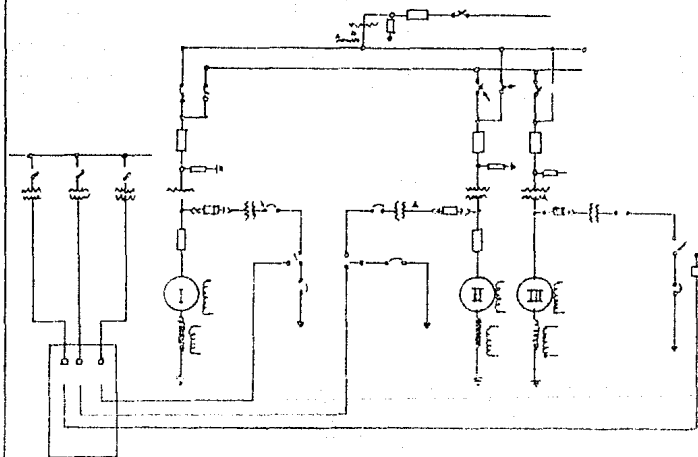
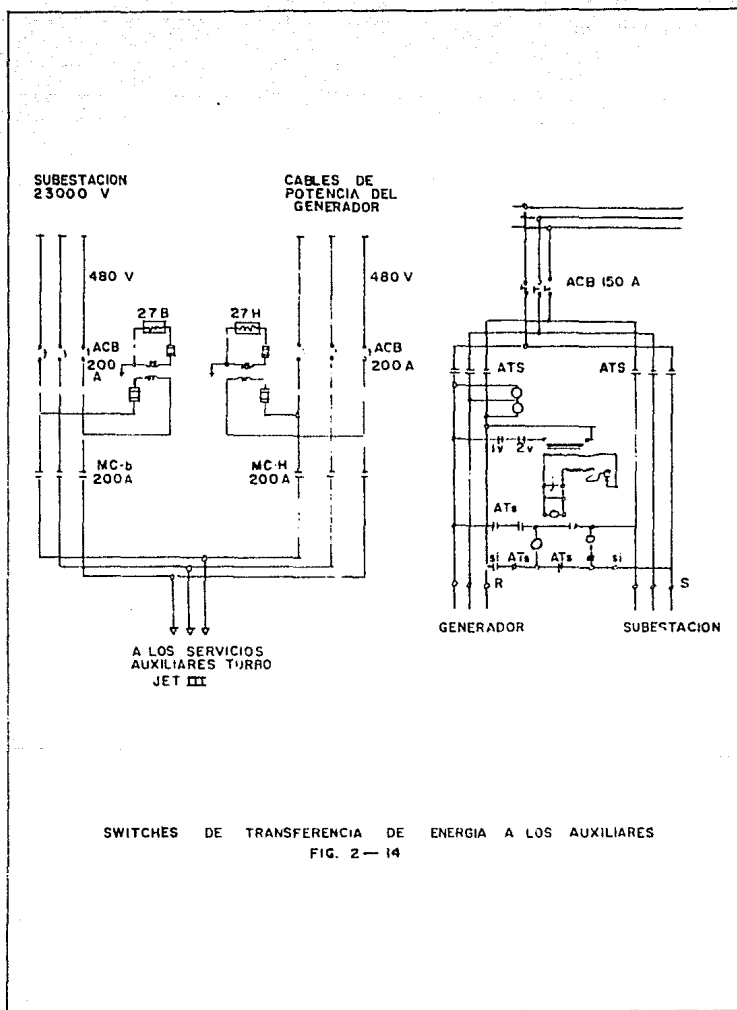


FIG. 2—13



desenergizando las bobina SE y el relevador ATS, el cual cerrará el circuito de alimentación de energía a los servicios auxiliares por el lado generador.

A continuación se describirá con más detalle los servicios auxiliares.

SISTEMA DE COMBUSTIBLE LIQUIDO.

El transporte de combustible líquido, cuenta con dos bombas para su alimentación, una de C.A., de 10 HP (80 gpm) y otra de emergencia que es de C.D. de 1-½ H.P. (50 gpm). Cuya puesta en marcha dependerá del secuenciador en forma automática ó del operador en forma manual. En forma automática la bomba de C.A. se energiza si se satisfacen las siguientes condiciones:

- a) Selección de combustible líquido
- b) Operación en paralelo de la unidad
- c) Arranque en el control maestro.

Para el caso de operación de la bomba de C.D. los requisitos son los siguientes:

- a) Selección de combustible líquido
- b) Que la unidad esté operando o lista para operar
- c) Que haya baja presión de combustible (1.4. - 1.5 Kg/Cm²).
- d) Que se cumpla un lapso de tiempo para dar margen a que la bomba de C.A. suba presión.

Recorriendo el sistema de combustible se llega al sistema de filtrado del combustible y calentadores del mismo, (120 volts C.A.), enseguida una válvula de corte de combustible en caso de incendio, como se muestra en la figura 2-15.

DIAGRAMA FLUJO COMBUSTIBLE EN TURBINAS

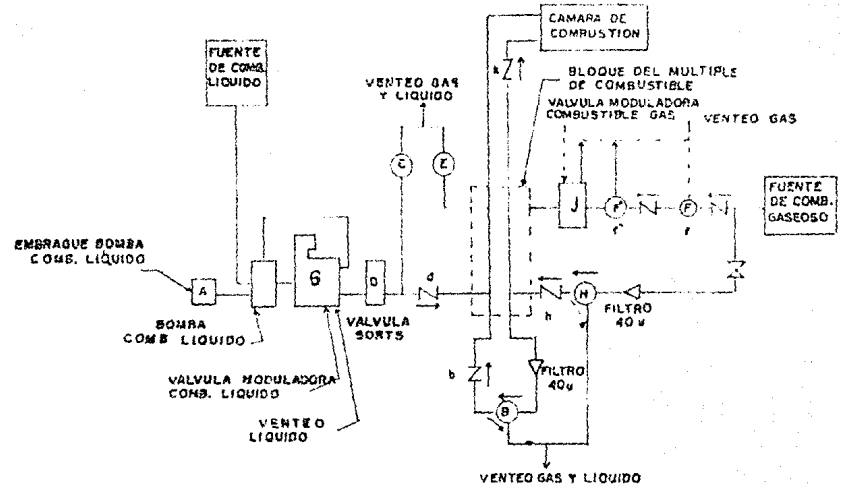


FIGURA 2-15

El combustible líquido pasa a través de dos válvulas, una de corte (SHUT-OFF) y la otra por una válvula moduladora ó reguladora, y de ahí a un bloque de válvulas solenoide para el venteo y purga (cuando hay cambio de combustible), posteriormente pasa a las tuberías del distribuidor múltiple y finalmente a las toberas donde se quema.

SISTEMA DE COMBUSTIBLE GASEOSO.

El gas viene directamente de la estación reguladora de presión Venta de Carpio y pasa a través de un orificio de medición, por medio del cual se tiene control de la presión y temperatura del gas, posteriormente pasa a un purgador de gas el cual quita el condensado, de ahí a dos válvulas de corte con sus respectivos filtros, pasando por una válvula reguladora, siguiendo a través del mismo bloque de válvulas solenoide para venteo y purga, finalmente pasa por las tuberías del múltiple a las toberas en la cámara de combustión. La energización de las válvulas de corte de combustible proviene tanto del control de combustible como del secuenciador, mientras que la válvula moduladora es gobernada por el control de combustible en la caseta de control, operando en un rango de (+) 15 VCD a (-) 15 VCD, siendo cero volts la estabilización de la válvula.

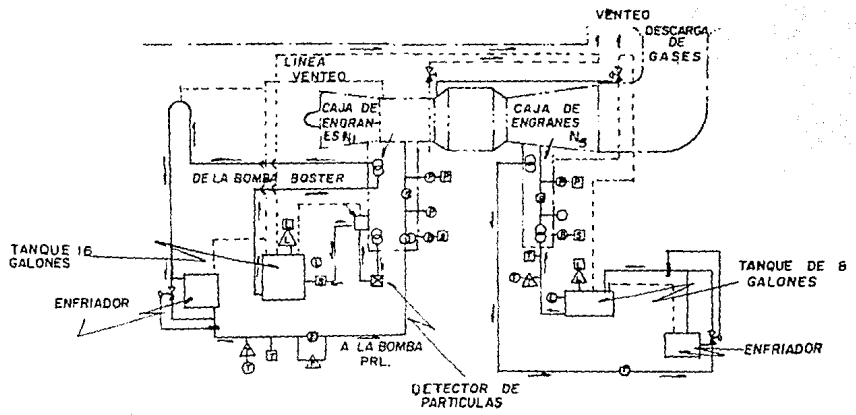
SISTEMA DE LUBRICACION.

Observando el diagrama de lubricación de la figura 2-16, para el generador de gases y la turbina libre, observamos que no hay bombas de lubricación esto es debido a que hay tren de engranes y mientras la máquina gire se asegura la lubricación, para el control de la operación se cuenta con un tablero en el costado de las máquinas con 6 carátulas que registran la presión antes y después del filtro tanto del generador de gas como la turbina libre.

GENERADOR DE GAS.

Se cuenta con un recipiente de 16 galones, el aceite pasa por la caja de engranes donde se encuentra colocada la bomba booster y de ahí a los ventiladores de enfriamiento, después de un registro de temperatura y presión, regresando nuevamente a la caja de engranes, a las chumaceras de los rotores del compresor de baja y alta, una vez realizado su trabajo el aceite pasa por el detector de partículas para llegar nuevamente al recipiente de 16 galones. El sistema del generador de gases se denomina de tanque caliente por encontrarse el enfriador después del tanque.

SISTEMA DE LUBRICACION TURBINAS DE GAS TIPO JET. FIG. 2-16.



SIMBOLOGIA

8
0
4
0



TURBINA LIBRE.

El sistema de la turbina libre recibe el nombre de tanque frio debido a que el enfriador se aceite se encuentra antes del tanque de 8 galones, del cual el aceite va a realizar su trabajo en la caja de engranes de la turbina libre y en las chumaceras regresando al al enfriador de aceite lubricante.

GENERADOR ELECTRICO.

En el generador eléctrico no hay caja de engranes por lo que se usan 2 bombas, una de C.A. principal y otra de C.D. auxiliar, la figura 2-17 muestra la trayectoria del aceite lubricante, partiendo del tanque recipiente el aceite va a la bombas con sus válvulas check, pasando por un filtro y al enfriador el cual es controlado por un interruptor de temperatura colocado en el tanque de aceite, en seguida pasa por un regulador de presión siguiendo a las chumaceras del lado turbina libre y del lado excitador, regresando al tanque una vez que ha realizado su trabajo.

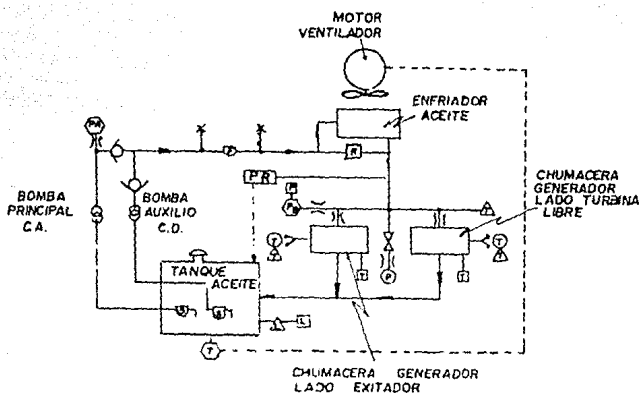
VENTILADORES DE BARRIDO DE AIRE DE ENTRADA.

Son parte del sistema de limpieza del aire de entrada al Jet, este equipo opera bajo el principio de separación inercial, logrando cambiar en forma abrupta la dirección del flujo de aire de entrada. Las partículas sucias como son más grandes tienden a continuar en sentido lineal y de esta manera son desalojadas de la entrada de aire por uno de los ductos del soplador.

Estos ventiladores entran en servicio al arrancar los ventiladores de enfriamiento de aceite lubricante de la turbina libre y paran simultáneamente.

CALENTADORES DEL GENERADOR ELECTRICO Y EXCITADOR.

La función de estos calentadores es que mientras la unidad esté parada, conservarla a una temperatura de modo tal que no se dañen los aislantes del generador eléctrico, ni del excitador, dejando de funcionar cuando se arranca la unidad.



- | | |
|---|------------------------------------|
| X CONECCION PRESION | S · COLADERA |
| ⌋ TERMOPAR | F · FILTRO |
| ⊖ COLADERA Y FILTRO CON BY-MASS | T · TEMPERATURA |
| INTERRUPTOR | PA · PRESION |
| ○ INDICADOR | PB CONTROL BOMBA C.D. |
| △ ALARMA | P · SECUENCIADOR Y CONTROL DE BOTE |
| ⊖ ALARMA BOTE | L · NIVEL |
| ⊖ BOMBA ACEITE CON REGULADOR DE PRESION | HE · CAMBIADOR DE CALOR |
| X ORIFICIO DE FLUJO | R · VALVULA DE ALIVIO |
| ⊖ VALVULA CHECK - | PR REGULADOR PRESION |
| ⌋ VALVULA CORTE | |

DIAGRAMA SISTEMA DE LUBRICACION GENERADOR ELECTRICO

FIG. 2 - 17

CALENTADORES DE COMBUSTIBLE.

La función de estos calentadores, es tener siempre listo el combustible líquido para que pueda ser introducido a la máquina sin problemas. Su energización depende de que se seleccione el combustible líquido.

CALENTADOR AMBIENTAL.

Su función es la de mantener seco el equipo eléctrico en la cabina de control para temperaturas extremas y su capacidad es de 5,000 Watts.

CARGADOR DE BATERIAS.

Es el elemento encargado de convertir corriente alterna de 440 volts a corriente directa de 115 volts, para alimentar la batería y los servicios de corriente directa, su capacidad es de 1 KVA., y normalmente suministra la energía necesaria mientras que la batería permanece en reposo.

INVERSOR.

Es el elemento que convierte la CD de 115 V. a CA de 120 V. 60 Hz., en forma normal alimenta a los servicios críticos de la unidad salvo el caso en que falle, los servicios críticos cambiarán su alimentación a las barras generales de CA.

DETECTOR DE PARTICULAS EN ACEITE LUBRICANTE.

Se alimenta con 120 V.C.A., a 60 Hz., en forma normal, teniendo dos canales de señalización uno para cada Jet, dando solo alarma de partículas en aceite lubricante, de cualquier modo siempre es conveniente parar la unidad para revisión del sistema.

DETECTOR DE AMBIENTE EXPLOSIVO.

Tiene una fuente de poder común y dos detectores uno para cada Jet, funciona bajo el principio de balanceo de un puente de resistencias formado por un elemento de referencias, un elemento expuesto al ambiente dentro de la casetta del Jet y una relación de valores que forman la otra rama del puente, cuando el por ciento de mezcla aire-gas excede de un 40% se tiene alarma y cuando excede de un 60% se para la unidad de emergencia operando las protecciones.

MONITOR DE VIBRACIONES.

Hay uno para cada Jet con tres canales cada uno, dos para el generador de gases y un tercero para la turbina libre, al arranque el valor del pulso de vibración de la máquina se recorta a la mitad para dar tiempo a la estabilización, en operación normal el valor del pulso de vibración es de 2 milésimas de pulgada, teniendo alarma a 5 milésimas y detención de la unidad a 10 milésimas de pulgada. Los detectores son de cristal de cuarzo.

SISTEMA DE AIRE DE ARRANQUE.

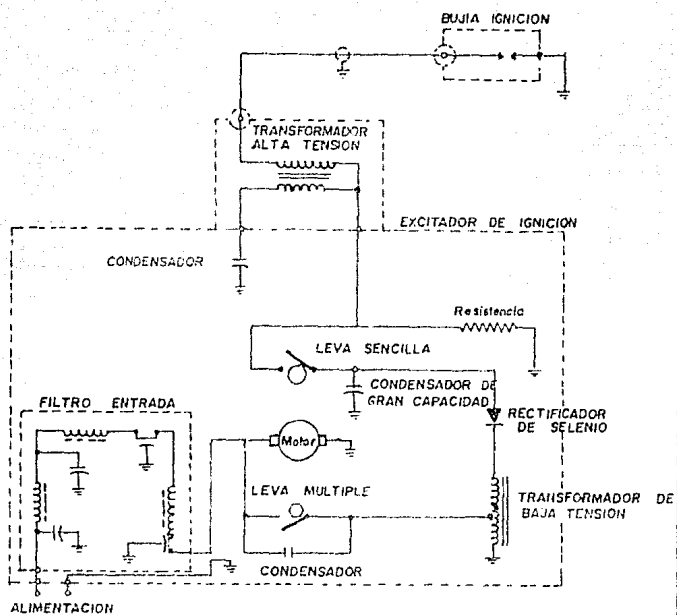
Se cuenta con dos cilindros que suministran aire comprimido a 35 Kg./Cm.², para los arrancadores de los Jet, entran en servicio al arranque de la unidad y paran cuando alcanzan su presión de 35 Kg./Cm.², a 20Kg./Cm.², se tiene alarma y a 14 Kg./Cm.², la inutilización del paquete, por lo que sólo se tiene capacidad para 4 arranques de la unidad, recuperándose en 4 horas -- aproximadamente.

SISTEMA DE IGNICION.

El sistema de ignición de las unidades Tubo-Jet consta fundamentalmente de cuatro partes a saber:

- a) Control de punto de ignición
- b) Excitación de la chispa
- c) Transformador de alta tensión
- d) Bujía.

El sistema de excitación de la chispa consta de un filtro formado por capacitores para evitar interferencias en la señal de ignición, una vez que se han cumplido las condiciones para excitación, una corriente eléctrica es suministrada a través de un filtro de entrada a un motor eléctrico, el cual hace girar una flecha a la cual se encuentran acopladas dos levas una sencilla y otra de varias puntas, las cuales tienen la función de abrir y cerrar circuitos mandando con esto, una señal intermitente de corriente hasta un transformado de potencial que eleva la señal a 2,000 volts. pasando después la señal por un rectificador de selenio de media onda, cuya función es prevenir una señal en sentido inverso que pueda proporcionar el capacitor colocado en paralelo al rectificador de selenio.



SISTEMA TÍPICO DE IGNICIÓN DE ALTA ENERGÍA TIPO CONDENSADOR C.A.
 (En algunos generadores de gas se usan sistemas de C.A.)

FIG. 2-18

Una vez que el condensador ha almacenado energía, la leva simple cierra el circuito permitiendo un pulso de corriente directa al lado primario del transformador de Alta Tensión, el cual convierte la señal de voltaje a 2,000 a -- aproximadamente 20,000 Volts, con este valor de voltaje, se puede romper el arco eléctrico, venciendo la rigidez dieléctrica entre bujía y el punto receptor, tal y como se muestra en la figura 2-18.

En la operación de las turbinas a gas y en general en todas las máquinas, para evitar explosiones por acumulaciones de gas o combustible, se procura enviar la señal de ignición antes que el combustible a la cámara de combustión.

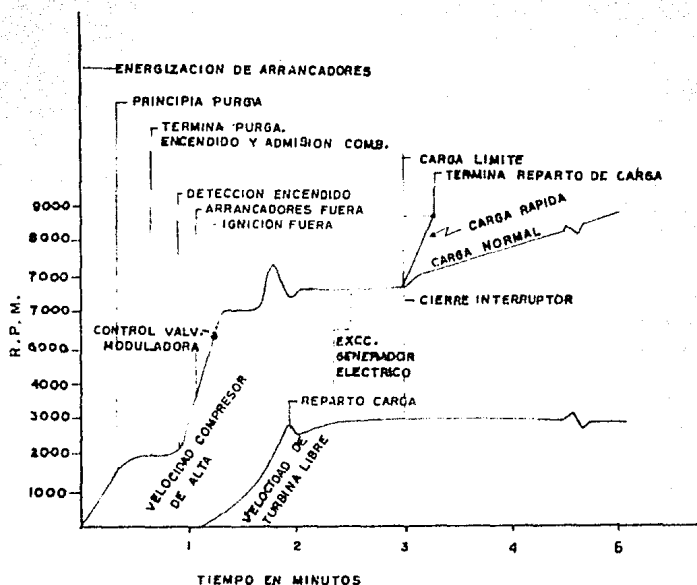
2.4. CICLOS DE ARRANQUE Y PARO DE LA UNIDAD.

DESCRIPCION DEL CICLO DE ARRANQUE NORMAL.

Como se explicó anteriormente, las turbinas a gas de la compañía de Luz y Fuerza, S.A., constan de 2 secciones, un generador de gases y una turbina libre, se dijo también que para que la turbina libre empiece a rodar, es necesario que los gases de la combustión tengan la suficiente energía para mover los álabes de las turbinas, es decir que la sección del generador de gases mueva a la turbina libre, razón para la cual hay dos curvas en un ciclo típico de arranque tal y como se muestra en la figura 2-19, donde se puede apreciar lo siguiente:

A partir del reposo y cuando se manda la señal de arranque con el control maestro, el paquete de aire de arranque manda una presión de 35 Kg./Cm² el aire comprimido al arrancador neumático acoplado al compresor de alta de la sección del generador de gases, elevando la velocidad del compresor hasta 1,500 rpm., donde debido a la rotación del compresor se efectúa el barrido de los gases residuales en la cámara de combustión evitando la acumulación de los mismo y una posible explosión, el período de purga se efectúa en 15 segundos, alcanzando el compresor de alta una velocidad de 2,000 rpm. En este punto se produce la chispa eléctrica de 20,000 V.C.D., al mismo tiempo que se abre la primera válvula de admisión, 10 segundos más tarde abre la segunda válvula de admisión de combustible, pasando el mismo por una derivación en la válvula moduladora de combustible, entrando a la cámara de combustión efectuándose ésta, con lo que los gases calientes efectuarán su trabajo sobre las turbinas de los compresores, resultando en un incremento de velocidad del compresor de alta y la movilización del compresor de baja.

A 3400 rpm., del compresor de alta el arrancador neumático se desconecta dejando libre la unidad que debe ser capaz de seguir su trayectoria ascendente empezando a girar la turbina libre una vez que los gases calientes han conseguido vencer la resistencia de las ruedas de álabes de la turbina libre. A esta velocidad la válvula moduladora abre un ángulo determinado, dejando pasar una cantidad fija de combustible para que la velocidad de la turbina libre de la unidad se coelete. El ángulo de apertura de la válvula moduladora es de aproximadamente 20° para combustible líquido y 10° para combustible gaseoso, siendo la máxima apertura de la válvula de 90° (para combustible líquido).



CICLO DE ARRANQUE NORMAL Y DE EMERGENCIA
TURBINAS DE GAS TIPO JET
50 y 60 Hz.

FIGURA 2-19

respondiendo a una apertura de 2.1° para cada volt, de aumento de la señal eléctrica a la válvula moduladora.

A el flujo de combustible formado por la derivación de la válvula moduladora más el flujo que pasa por la apertura de la misma, recibe el nombre de flujo mínimo de combustible, recibiendo esta etapa del arranque del Jet- el nombre de paso de arranque (step start), la cantidad de combustible es - de 2000 pph en líquido y 500 scfm en gas.

Cuando el compresor de alta alcanza una velocidad de 5200 rpm la válvula moduladora de combustible deja de tener una apertura fija y empieza a ser controlada eléctricamente, teniéndose una aceleración de la unidad a 6000 rpm, del compresor de alta, manteniéndose el compresor a ésta velocidad, hasta que la turbina alcance una velocidad de 1000 rpm. La razón por la cual la válvula moduladora no es controlada desde el principio, obedece a que el control de combustible trabaja a base de amplificadores operacionales, los cuales cuando no tienen a su entrada más que la referencia, tienen una señal de salida saturada, lo que ocasionaría una apertura violenta de la válvula moduladora, pudiendo provocar una explosión debido a la gran cantidad de combustible que entraría a la cámara de combustión.

Una vez que la turbina libre alcanza 1000 rpm, se tiene un incremento de apertura de la válvula moduladora haciendo que el compresor de alta alta alcance una velocidad de 7500 rpm, y la turbina libre de 2800 rpm, aproximadamente, teniéndose un decremento en la velocidad del compresor de 6600-rpm, debido a el control de combustible por medio de sus parámetros controladores, A este punto se le conoce como cambio de control de la válvula moduladora (Mod. valve cross-over point), siendo el impulso recibido suficiente para que por inercia de la turbina libre esté en condiciones próximas para cerrar el interruptor de campo del excitador y el generador eléctrico- esté en condiciones de sincronizarse al sistema y proporcionar energía eléctrica al mismo.

Una vez satisfechas las condiciones de voltaje, frecuencia, igualación de fase, el generador eléctrico es sincronizado automáticamente, la válvula moduladora de combustible seguirá abriéndose hasta que en el control de combustible la señal de velocidad iguale a la señal de referencia de máxima potencia, teniendo a la salida de los amplificadores respectivos una señal de cero volts. lo cual indica la estabilización de la válvula.

Al mismo tiempo que se va abriendo la válvula moduladora, se va incrementando la corriente directa en el campo del generador eléctrico hasta que se obtiene el valor de la potencia eléctrica seleccionada.

La potencia de la unidad permanecería constante de no ser por las variaciones de temperatura del ambiente, las cuales como se menciona en la descripción de los compresores, va a influir en el compresor de baja aumentando o disminuyendo sus revoluciones, lo que ocasiona una variación de la relación de compresión del rotor, y finalmente en la potencia eléctrica entregada por el generador eléctrico.

ARRANQUE DE EMERGENCIA.

El ciclo de arranque de emergencia requiere el mismo tiempo de un arranque normal hasta el momento en que el interruptor cierra, punto donde la válvula moduladora y la corriente de excitación en lugar de incrementarse la apertura en uno e incrementarse el valor en el otro en forma pausada, lo hacen de una manera continua, tanto que la potencia base la alcanza en sólo 2.5 minutos desde el punto de reposo inicial.

ARRANQUE NEGRO.

Se denomina "arranque negro", al arranque de las unidades Jet solamente con fuente de batería (125 V.), en los casos de emergencia en los cuales no se cuenta con energía de servicio de estación para la alimentación de auxiliares de las unidades, como son: Las bombas de aceite de lubricación, enfriamiento de ventiladores, control, etc; se usan éste tipo de arranque.

Durante el período de arranque con baterías, solamente se alimentarán exclusivamente los sistemas más indispensables como son el control, los sistemas de arranque con aire, las bombas de lubricación, dejando fuera los demás servicios auxiliares de la unidad, hasta que se cuente nuevamente con el servicio de estación.

El servicio de estación será alimentado una vez que la unidad esté generando, ó alimentado a través de los servicios propios de la subestación, cuando las barras de 85 KV., tengan potencial.

MODOS DE OPERACION DE LAS UNIDADES JET.

Es importante para nosotros el conocimiento claro de los diferentes "modos" de operación de las unidades Jet, las unidades por rutina se arrancan en modo "paralelo" o como "condensador sincrónico", no así la posición de modo "aislado preciso" que se reserva precisamente para los casos de emergencia.

Como se mencionó anteriormente existen dos tableros de control y en ellos se encuentran los selectores propios para seleccionar el modo de operación de la máquina, (paralelo, condensador sincrónico, aislado preciso), para tomar el tipo de carga (carga mínima, base, pico ó pico máxima), el tipo de combustible (gas o líquido), manual (secuencia parcial), ó automático (secuencia total), el regulador de voltaje, el gobernador de carga, el sw maestro para arranque ó paro de la unidad y el selector del tipo de toma de carga (normal ó de emergencia). A continuación explicaremos los "modos de operación" de la unidad.

MODO PARALELO.

En esta posición del selector de modo de operación, se utiliza normalmente cuando la unidad Turbo-Jet va a ser utilizada como complemento de carga, cuando se tienen picos de demanda, es decir va a funcionar en paralelo con los generadores del sistema.

CONDENSADOR SINCRONO.

En esta selección la unidad trabaja como motor sincrónico introduciendo reactivos al sistema para mejorar el factor de potencia y a su vez está como reserva rodante que puede transferirse a generador siendo su ciclo de toma de carga más rápido, o bien estando trabajando como generador se puede pasar a condensador sincrónico, descargándose la unidad hasta llegar a la motorización.

AISLADO PRECISO.

Esta posición de "modo" de arranque es importante para la función que desempeñan los Jets en la "Red de Emergencia", porque en esta condición la unidad generadora puede alimentar una carga aislada del sistema por decirlo así: el Metro ó un poblado pequeño, etc.

Existen otros "nodos" de trabajo de la unidad que son:

Operación en vacío y Operación en prueba, usando únicamente para ajustes de referencias de combustible, reparto de carga, temperaturas, ajustes de válvulas moduladoras de combustible, etc., pero que sólo se usan para mantenimiento de la máquina.

DESCRIPCION DEL CICLO DE PARO.

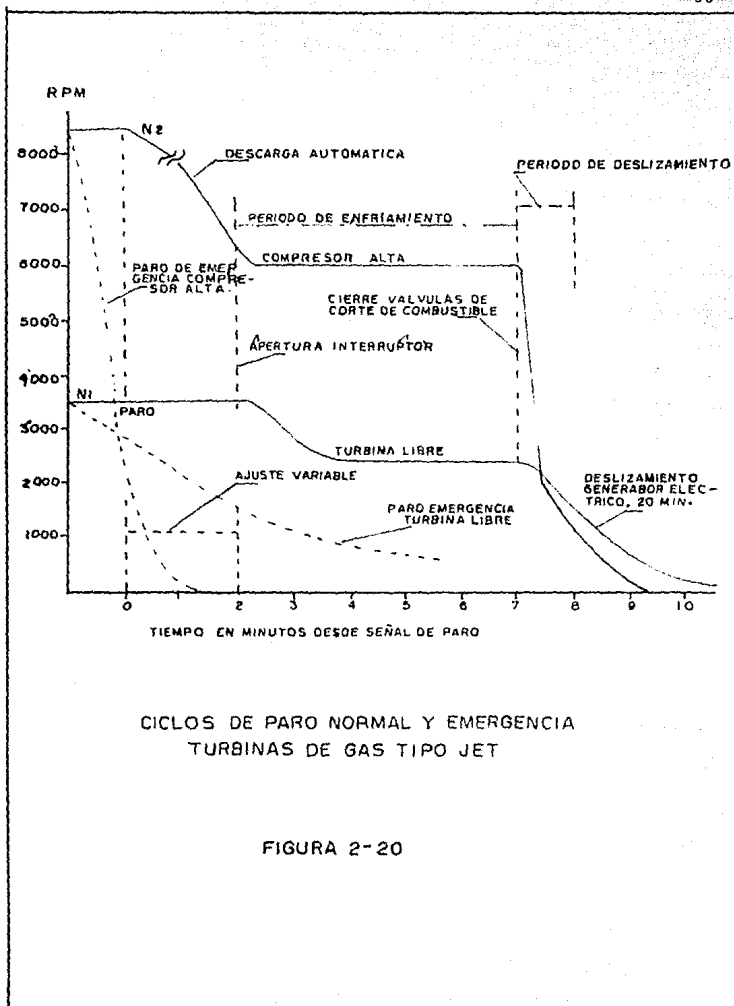
Estando la unidad a su potencia plena a la señal de paro la válvula moduladora recibirá señal de control de combustible, de cerrarse poco a poco mientras la corriente directa de excitación al campo del generador eléctrico decrece de igual manera, hasta que por no proporcionar potencia al sistema, el interruptor abra y se desconecte la unidad.

A la apertura del interruptor, la válvula moduladora permanecerá en una posición fija, permitiendo que la turbina a gas se estabilice a 6,000 rpm del compresor de alta y 3,000 rpm de la turbina libre, durante 5 minutos en el tipo FT4-11DF (# 3 Valle de México, # 1,2,3 de Lechería y # 1,2 de Nonoalco), y 15 minutos en el tipo FT4-9DF (# 1 y 2 Valle de México, # 4 de Lechería y # 3- y 4 de Nonoalco), con el propósito de enfriamiento de la turbina a gas, una vez que ha transcurrido el período de enfriamiento las válvulas de admisión y corte de combustible cerrarán, teniendo un decremento inmediato de la velocidad del compresor de alta en aproximadamente 30 segundos, mientras que el generador eléctrico acoplado a la turbina libre tardará aproximadamente 20 minutos en detenerse totalmente, tal y como se muestra en la figura 2-20

Al período final de paro de la turbina a gas y del generador eléctrico se le conoce como deslizamiento (coast down), mientras que el período entre la apertura del interruptor y el deslizamiento se le conoce como enfriamiento (coll down).

PARO DE EMERGENCIA.

El paro de emergencia causado en forma manual o automática, opera directamente sobre las válvulas de corte (Shut off) y sobre el interruptor si la unidad está con carga, razón por la cual no existe período de enfriamiento (cool-down). El tiempo de paro desde la señal es de 2 minutos para el generador de gas mientras que en la turbina libre es de 20 minutos, tal y como se puede apreciar en la figura anterior.



CAPITULO III

GENERADOR SINCRONO

CAPITULO III GENERADOR SINCRONO.

3.1. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR SINCRONO.

GENERALIDADES.

El generador eléctrico es el equipo más importante de las centrales eléctricas, ya que este transforma la energía mecánica que recibe de su máquina motriz, en energía eléctrica, que es la razón de la existencia de las centrales generadoras de electricidad.

La turbina hace girar al rotor del generador, por lo cual se dice que le entrega su energía mecánica. El excitador es un generador de C.D., la que es alimentada al rotor del generador para así generar la energía eléctrica.

La energía así generada es de corriente alterna con una frecuencia determinada por la velocidad y el número de polos del rotor (en México se usan 60Hz.), una potencial real y una tensión eléctrica determinadas por la capacidad nominal del generador. En el caso de turbogeneradoras por razones de eficiencia se utilizan elevadas velocidades, en nuestro caso 3600 RPM.

El generador consta básicamente de un Estator y un Rotor, como se ilustra en la figura 3-1. El estator se compone de piezas carentes de movimiento, entre ellas tenemos un circuito magnético formado por un conjunto de láminas de fierro al silicio, aisladas una de otra para minimizar las corrientes de Foucault. En su parte interior, ese núcleo está ranurado de manera uniforme para alojar en esas ranuras las bobinas del estator.

Las bobinas son de cobre, en forma de soleras de gran calibre para los generadores de gran capacidad, estas bobinas están aisladas una de otra y con respecto al núcleo laminado, por muy diferentes materiales como papel pescado, tela cambray, baquelita, epoxy, etc. Están empotradas en las ranuras del núcleo y éste a su vez en la carcasa exterior.

El rotor está formado por un núcleo laminado en forma cilíndrica y montado en una flecha, ranurado longitudinalmente para alojar en su interior a las bobinas del rotor, como se aprecia en la figura 3-2, las bobinas están -

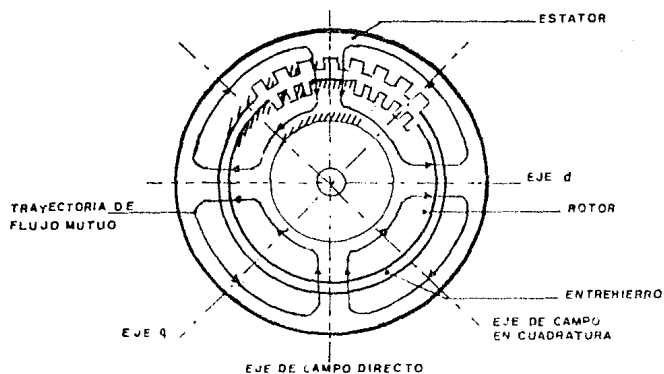


FIGURA 3-1 MAQUINA SINCRONA DE POLOS LISOS

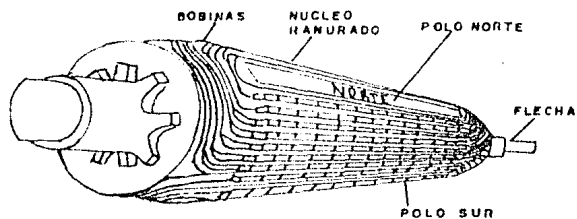
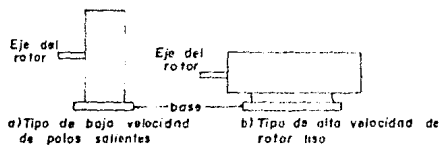


FIGURA 3-2 ROTOR DE POLOS LISOS

conectadas de manera que al recibir la corriente directa que les alimenta el excitador, forman dos polos magnéticos un Norte y un Sur.

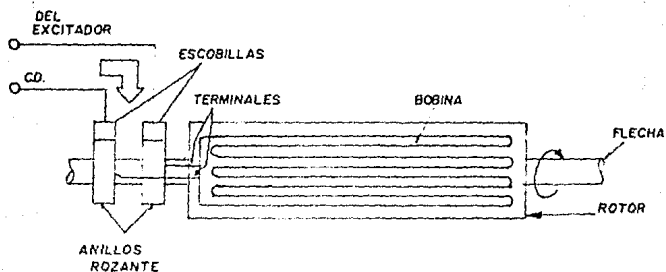
Cuando la máquina motriz hace girar al rotor se crea un campo magnético giratorio el cual induce voltajes en los devanados del estator, si el rotor es de polos lisos el flujo magnético del entrehierros y la tensión inducida en los devanados del estator serán senoidales. Un rotor de polos salientes induce ondas senoidales de voltaje distorsionadas por la presencia de armónicas.

Los generadores de polos salientes de baja velocidad requieren de estatores de gran perímetro en el cual puedan ser insertados muchos conductores, dichos estatores requieren de polos de excitación de corta longitud axial. Por otra parte, los rotores lisos de elevada velocidad tienen un pequeño perímetro que necesita de polos de excitación y conductores de gran longitud axial. Así debido a la notable diferencia en el aspecto externo, resulta fácil distinguir las máquinas síncronas de polos salientes a las de rotor liso, incluso sin ver el rotor, como se aprecia en la figura 3-3.

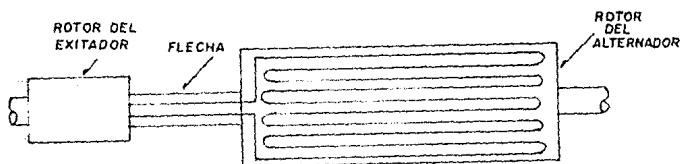


ASPECTO GENERAL DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA
FIG. 3-3

La gran mayoría de los excitadores tienen su salida de corriente directa en su estator, por ello para alimentar al rotor del generador, se usan un par de anillos rozantes y un juego de escobillas de carbón para cada anillo, como se aprecia en la figura 3-4a. Hay turbogeneradores modernos con la salida de corriente directa del excitador montada en su rotor, por ello no se usan anillos ni escobillas, efectuándose la alimentación por el interior de la flecha, como se ve en la figura 3-4b. En estas condiciones no



EXCITACION CON ESCOBILLAS FIG. 3-4a



EXCITACION SIN ESCOBILLAS FIG. 3-4b

hay chisporroteo ni problema de mantenimiento de anillos y escobillas.

CONCEPTOS BASICOS.

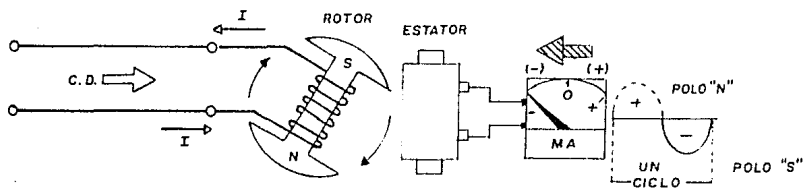
Existen algunos conceptos básicos que nos permiten comprender mejor el funcionamiento de un generador síncrono, a continuación enunciaremos los principales.

- (a) Un campo magnético variable al cortar los conductores de una bobina, induce en ella una tensión eléctrica, llamada fuerza electromotriz.
- (b) Al elemento que produce el campo magnético variable se le llama inductor.
- (c) La bobina donde se induce la tensión, se llama inducido.
- (d) El campo magnético variable induce corriente alterna.
- (e) La tensión inducida aumenta, al aumentar la intensidad del campo magnético y este aumenta con la intensidad de corriente que lo produce.
- (f) La tensión inducida aumenta, aumentando la rapidez de variación del campo magnético inductor.
- (g) La tensión inducida aumenta, al aumentar la cantidad de espiras de la bobina del inducido.
- (h) La tensión inducida aumenta, al aumentar la cantidad de espiras de la bobina inductora.

Tomando como base la figura 3-5 que nos representa un generador monofásico, podemos hacer las siguientes consideraciones.

El sentido de la corriente directa al circular en el rotor nos indica la forma en que se inducen los polos magnéticos, tomando como principio que el punto donde entra la corriente induce un polo norte y donde sale un polo sur. Al pasar el polo norte frente a la bobina del estator se induce en ella una corriente en sentido positivo, la aguja del amperímetro se mueve de cero a máximo (+) y regresa a cero, indicando que se ha llevado a cabo un medio ciclo, (+).

Al pasar el polo sur, frente a la bobina del estator, en ella se induce una corriente en sentido inverso (-), por lo que la aguja se moverá de cero a máximo (-) y regresa a cero completando el ciclo eléctrico. Por lo que podemos decir que un generador de dos polos al dar un giro produce un ciclo eléctrico.

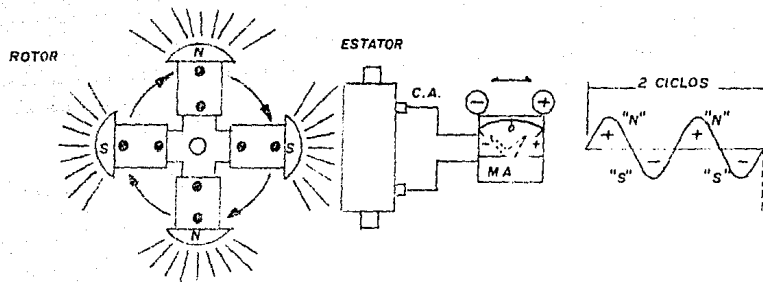


INDUCCION DEBIDA AL POLO SUR FIG. 3-5

Si el rotor de dos polos gira a una velocidad de 1 giro por segundo, tendremos una frecuencia de 60 vueltas por segundo tendremos una frecuencia de 60 ciclos por segundo. Lo anterior nos indica que la frecuencia varía proporcionalmente a la velocidad de giro.

Si variamos el número de polos del rotor como se puede apreciar en la figura 3-6, en este caso al dar una vuelta completa el rotor habrá pasado frente a la bobina del estator los cuatro polos y cada polo genera medio ciclo, de manera que una vuelta corresponde ahora a dos ciclos eléctricos. Lo que nos indica que la frecuencia varía proporcionalmente al número de polos, la siguiente fórmula nos representa los casos anteriores.

$$f = \frac{\text{RPM} \times P}{120}$$



ROTOR DE CUATRO POLOS

FIG. 3-6

Para fines de operación de un generador, se debe pensar que el rotor tiene de fábrica su cantidad de polos y no es sencillo modificarlo, por lo que en operación la frecuencia eléctrica generada, depende de la velocidad de rotación.

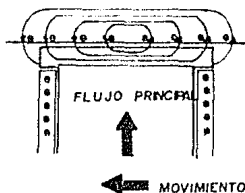
PARAMETROS ELECTRICOS.

Entre los parámetros eléctricos importantes en el estudio de los generadores síncronos se encuentran:

X_s = Reactancia síncrona.- es la reactancia en régimen permanente, es decir - cuando han desaparecido las corrientes de amortiguamiento. Esta reactancia varía con la saturación, por esta razón no se considera normalmente el valor saturado.

Puede admitirse que, para cualquier potencia, su valor coincide con el - de la impedancia síncrona, ya que los efectos de la resistencia ohmica - son reducidos. Su valor se puede determinar de acuerdo a las pruebas de Circuito Abierto y Corto Circuito.

X_q = Reactancia síncrona en cuadratura.- Es la reactancia que corresponde al flujo total, producida por la corriente del estator en régimen estable, - cuando el flujo penetra por la punta de un polo, lo atraviesa y sale por la otra punta del mismo polo, como se muestra en la figura 3-7. Su valor es proporcionado por el fabricante.



REACTANCIA SINCRONA EN CUADRATURA, QUE CORRESPONDE AL FLUJO TRANSVERSAL DEL ESTATOR FIG. 3-7

X'_d = Reactancia transitoria directa.- Esta reactancia es la correspondiente a la dispersión en los arrollamientos del estator y rotor, considerada esta dispersión en su efecto total respecto al inducido, se expresa por:

$$X'_d = \frac{U}{3 I'_d}$$

Donde:

U = Tensión entre fases en los bornes del generador, en vacío e inmediatamente antes del corto circuito.

I'_d = Valor de la corriente transitoria de corto circuito obtenida de la prueba de corto circuito.

X'_q = Reactancia transitoria en cuadratura'- Esta reactancia coincide con la reactancia síncrona en cuadratura, ya que los generadores síncronos no llevan ningún arrollamiento perpendicular al eje del polo, por lo tanto:

$$X'_q = X_q$$

Existen algunas otras reactancias de menor importancia, solamente las enunciaremos y son: Reactancia subtransitoria directa, Reactancia subtransitoria en cuadratura, Reactancia inversa, Reactancia homopolar, Reactancia de P_o tier. A continuación se describirán las pruebas de Corto circuito y de Circuito abierto.

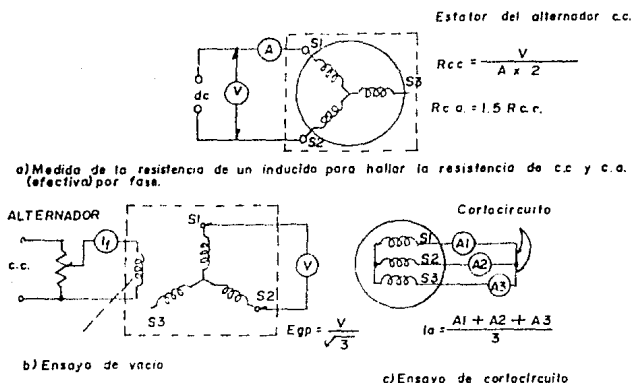
Para probar las características de un generador real, como son: la tensión generada, la eficiencia, la regulación de tensión, etc., se deberían de hacer valores nominales de tensión, velocidad y carga, pero como esto resulta muy difícil de realizar, en las pruebas del fabricante, ya que no se cuenta con motores de accionamiento, ni carga suficiente para los generadores de gran potencia, por lo tanto se han desarrollado métodos de pruebas son: El método de impedancia síncrona, el método de la fuerza magnetomótriz, el método-ASA, etc.

A continuación describiremos el método de la impedancia síncrona para la predicción de la regulación de tensión, en este método convencional, se simulan las condiciones de carga usando solo una fracción de la potencia que se

necesitaría para que funcionara como prueba a carga nominal. Este método se basa en tres pruebas las cuales son: La medición de la resistencia del inducido por fase, la prueba de circuito abierto y la prueba de corto circuito.

La resistencia efectiva del inducido por fase puede calcularse a partir de un ensayo con C.D., como se muestra en la figura 3-8a, en la cual se conecta un amperímetro en serie con el devanado y un voltímetro en paralelo. Suele usarse una fuente de C.D. de baja tensión en lugar de una fuente de C.A., ya que ésta incluirá pérdidas de acoplamiento en los polos de excitación y el hierro de alrededor, obteniéndose valores engañosos, la resistencia C.D., por fase es:

$$R_{cc} = \left(\frac{1}{2} \right) \frac{\text{Lectura del Voltímetro}}{\text{Lectura del Amperímetro}} = \frac{V}{A \times 2}$$



CONEXIONES DEL CIRCUITO DE ENSAYO DE LA IMPEDANCIA SINCRONA.

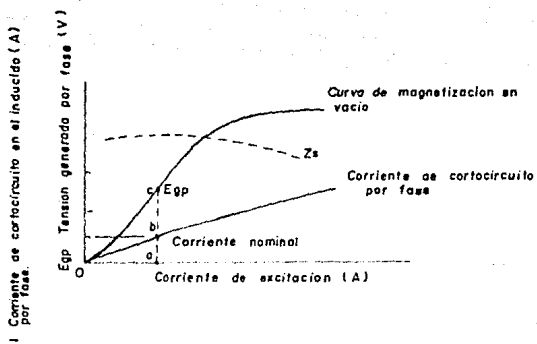
FIG. 3-8

La resistencia C.A., por fase se obtiene multiplicándose la resistencia de C.D., por un factor que varía de 1.2 a 1.8 según la frecuencia, la calidad de aislamiento, la potencia, etc.

Prueba de Circuito Abierto.- Se obtiene una curva de magnetización (en vacío) con excitación independiente del generador, funcionando a la velocidad síncrona. Se conecta un amperímetro de C.D., en el circuito de excitación para registrar la corriente de excitación y se conecta un voltímetro de C.A., en bornes de dos terminales cualesquiera del estator para registrar la tensión de línea, V_L como se muestra en la figura 3-8b. Se toma un número suficiente de lecturas empezando con intensidad de excitación CERO, y en cada caso se registran la intensidad de excitación I_e y la tensión generada por fase E_{gp} (o sea, $V/\sqrt{3}$), y se dibuja una curva de saturación como la de la figura 3-9.

Prueba de Corto Circuito.- La característica de corto circuito se toma conectando amperímetros en la línea para registrar la corriente de línea, como se muestra en la figura 3-8c. La intensidad de excitación se ajusta a Cero y el generador se lleva a su velocidad nominal, se toman lecturas de la intensidad de excitación de C.D., respecto a la intensidad en el inducido cortocircuitado, de C.A. Los resultados se dibujan en la figura 3-9. Toda la tensión generada por fase E_{gp} , es necesaria para vencer la caída interna de impedancia, $I_a Z_s$, por fase. Como Z_s es casi constante para una máquina determinada, la intensidad de corto circuito varía directamente con la tensión generada y la excitación necesaria para producirlas, por esta razón esta curva es totalmente lineal.

Cuando la intensidad de corto circuito en el inducido por fase es igual a la corriente de plena carga ó nominal, y la velocidad y frecuencia del generador corresponden a sus valores nominales, si se elimina el corto circuito y se mantuviera constante la intensidad de excitación, se mediría entre terminales del inducido la tensión por fase en vacío. Como se muestra en la figura 3-9, el punto ob representa la intensidad nominal en el inducido por fase y la intensidad de corto circuito; y oa, la excitación necesaria para producir esa intensidad. Pero esta misma excitación producirá una tensión generada en vacío de E_{gp} , correspondiente al punto oc. Como la tensión en bornes es CERO-



CARACTERISTICAS EN VACIO Y EN CORTOCIRCUITO DE UN ALTERNADOR SINCRONO.

FIG. 3-9

podemos escribir:

$$E_{gp} = I_a Z_s \quad \text{ó} \quad Z_s = E_{gp} / I_a$$

en la que I_a es la intensidad de plena carga por fase, E_{gp} es la tensión en vacío producida por la misma intensidad de excitación que originó la corriente nominal de corto circuito por fase y Z_s es la impedancia síncrona por fase.

Las distintas ecuaciones para la regulación de tensión se establece en función de las caídas de tensión producidas por la resistencia efectiva del inducido por fase y por la reactancia síncrona por fase y por consiguiente:

$$X_s = Z_s - R_a$$

en donde X_s es la reactancia síncrona por fase, Z_s es la impedancia síncrona por fase determinada en la prueba de corto circuito y R_a es la resistencia efectiva del inducido por fase determinada en la prueba de resistencia de C.D. De donde se puede escribir una ecuación general que cumplirá para todos los factores de potencia y condiciones de carga, que es:

$$E_{gp} = (V_p \cos \theta + I_a R_a) + j (V_p \operatorname{sen} \theta \pm I_a X_s)$$

en la que se usa el signo + para cargas inductivas y - para cargas capacitivas, en el segundo término.

DIAGRAMAS FASORIALES DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS

Para estudiar las relaciones eléctricas entre potencias, tensiones en bornes, fuerzas electromotrices inducida y corrientes de excitación, es decir, las características eléctricas de un generador síncrono, lo mejor es recurrir a una representación vectorial, que de una forma sencilla y clara, proporciona una idea suficientemente aproximada del funcionamiento del generador. Es muy conveniente tener concepto claro de estas particularidades, por esencial importancia para hallar la potencia producida y fijar la tensión de los generadores síncronos en las centrales eléctricas.

El diagrama vectorial del generador síncrono tiene los mismos fundamentos que el de un transformador, considerando como circuito primario el de excitación, alimentado como sabemos por corriente continua y como circuito secundario se considera el arrollamiento del inducido. La frecuencia de la corriente primaria es nula (por tratarse de C.D.), y la frecuencia de la corriente secundaria tendrá el valor correspondiente a la corriente que se desea producir (normalmente 60 Hz.).

Los datos previos que se necesitan conocer son los siguientes:

V_p = Tensión en bornes/fase

I = Corriente producida

θ = Angulo de fase entre tensión y corriente.

En lugar de la corriente I_a podemos también partir de la potencia P , de la cual deduciremos fácilmente el valor de la corriente. En lo que se refiere al ángulo de fase, viene expresado como sabemos, por el factor de potencia $\cos \theta$ que está determinado por las circunstancias de carga de la red - que se trata de alimentar.

La figura 5-10 nos representa un diagrama vectorial de un generador síncrono con carga inductiva y ohmica en el cual se han representado el vector de la tensión V_p y el vector de la corriente I_a , el cual está defasado (casi siempre en retraso) del anterior en el ángulo θ . El vector, que expresa la caída de tensión ohmica del generador estará en fase con la corriente I_a y - viene expresado por:

$$V_R = I_a R_a$$

Siendo R_a la resistencia ohmica del inducido. El vector correspondiente a las caídas de tensión inductivas estará defasado 90° en adelanto respecto al vector de la corriente I_a y está expresado por:

$$V_X = I_a X_s$$

Siendo X_s la reactancia síncrona del generador.

La caída total de tensión en el generador puede deducirse analíticamente por medio de la expresión:

$$V_z = I_a Z_s = \sqrt{(I_a R_a)^2 + (I_a X_s)^2}$$

6 bien, deducirse directamente en el diagrama vectorial, para lo cual, a partir del extremo del vector V_p , trazaremos una paralela a I_a y sobre ella se señalemos el valor del vector V_R ; en el extremo de este vector trazamos una perpendicular y sobre ella indicaremos el valor V_X . Uniendo el origen de V_p con el extremo de V_X obtendremos el vector E_{gp} que representa la fuerza electromotriz necesaria para obtener la tensión en bornes deseada V_p ; este vector formará el ángulo α con el vector de la corriente I_a .

Para inducir esta fuerza electromotriz, la corriente de excitación ha de producir un flujo Φ_1 defasado 90° en adelante con el vector de la fuerza electromotriz E_{gp} ; en la figura 3-10 se ha trazado el vector correspondiente, perpendicular al vector E_{gp} en el origen O . Este flujo varía rápidamente con la carga y ha de ser producido, como hemos dicho por arrollamiento de excitación.

Por lo tanto, es el que determina los amperivoltas de excitación \mathbb{H}_c las cuales se pueden deducir de la curva de magnetismo del generador, como se ve en la figura 3-11, como sabemos que:

$$\mathbb{H}_c = I_a \cdot n_c$$

I_c = corriente de excitación

n_c = número constante de vueltas del arrollamiento de excitación.

Resulta que la corriente de excitación i_c es proporcional al flujo Φ_1 . Si el punto A de la curva de magnetismo, corresponde a la tensión del generador marchando en vacío, la abscisa correspondiente expresa el valor de la corriente de excitación I_c . En el diagrama vectorial de la figura 3-10 se ha representado el vector correspondiente a la corriente de excitación I_c , en fase con el vector de flujo Φ_1 .

Los amperivoltas \mathbb{H}_a debidos al campo magnético del inducido valen:

$$\mathbb{H}_a = I_a n_a$$

I_a = corriente del generador.

n_a = número constante de vueltas del arrollamiento del inducido.

Estos producen un flujo magnético Φ_1 que, naturalmente está en fase con la corriente del inducido I_a ; el vector correspondiente también estará en fase con el vector de la corriente. El flujo total Φ_2 será la resultante de los flujos producidos por la excitación Φ_1 y por el inducido Φ_a y estará representado por el vector resultante de los otros dos.

Ahora, vamos a tratar individualmente los tres tipos de carga que se presentan en el funcionamiento del generador síncrono.

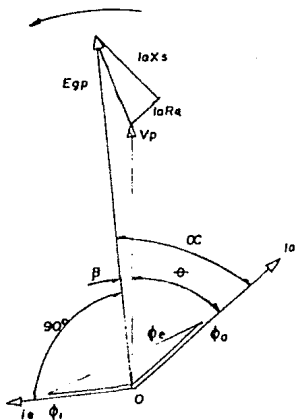
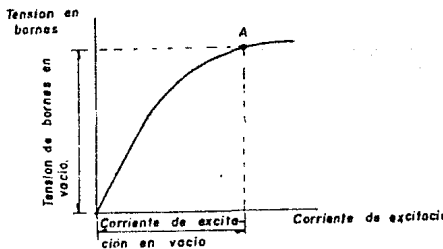


DIAGRAMA VECTORIAL DE UN GENERADOR SINCRONO.
CARGA INDUCTIVA-OHMICA. FIG. 3-10

CURVA DE MAGNETISMO DE
UN GENERADOR SINCRONO

FIG. 3-11



Carga puramente Ohmica ($\cos \theta = 1$). En este caso, el defase entre la intensidad I_a y la tensión en bornes V_p , es nulo ó sea $\theta = 0$ y $\cos \theta = 1$. En la figura 3-12, se ha representado el diagrama correspondiente; notese que ahora la caída de tensión ohmica es:

$$V_R = I_a R_a$$

se traza en prolongación con el vector de la tensión en bornes V_p fácilmente puede observarse que, en este caso, la fuerza electromotriz necesaria E_{gp} es menor que el caso general, visto anteriormente.

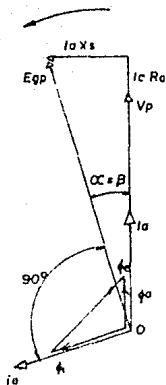


DIAGRAMA VECTORIAL DE UN GENERADOR SINCRONO. CARGA PURAMENTE OHMICA.
FIG. 3-12

Carga Puramente Inductiva ($\cos \theta = 0$, para $\theta = -\frac{\pi}{2}$). El desfase entre intensidad I_a y la tensión en bornes V_p , es en este caso 90° en atraso; es decir que $\theta = -\frac{\pi}{2}$ y que $\cos \theta = 0$. Ahora y según puede observarse en la figura 3-13, la caída de tensión.

$$V_x = I_a X_s$$

debido a la inductancia, estará en fase con la tensión en bornes.

El vector de flujo resultante Φ_r es igual a la suma aritmética de los flujos individuales Φ_1 y Φ_2 . En la figura puede observarse que, por la posición de ambos vectores, este equivale a la diferencia algebraica entre estos dos flujos ya que el flujo magnético de excitación es opuesto al flujo magnético del inducido. Por lo tanto, hay que aumentar la corriente de excitación para que el flujo correspondiente Φ_1 alcance el valor debido

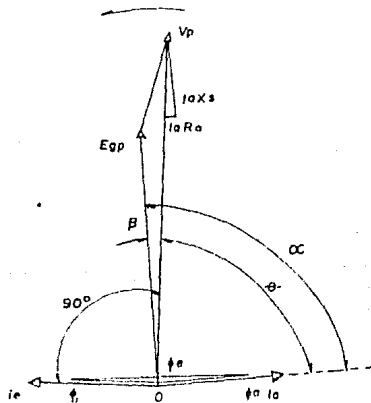


DIAGRAMA VECTORIAL DE UN GENERADOR SINCRONO CARGA PURAMENTE INDUCTIVA.

Carga Puramente Capacitiva ($\cos \theta = 0$, para $\theta = +\frac{\pi}{2}$). Ahora el desfase entre la intensidad I_a y la tensión en Bornes V_p también es de 90° , pero en adelante; tendremos $\cos \theta = 1$ y $\theta = +\frac{\pi}{2}$. Es decir que, según se ve la figura 3-14, la dirección del flujo magnético Φ_c correspondiente a la corriente del inducido I_a , coincide con la del flujo de excitación; por lo tanto el flujo resultante Φ_c será igual a la diferencia aritmética de los dos, ya que ambos actúan en el mismo sentido. Como además, la caída de tensión capacitiva actúa en sentido opuesto a la fuerza electromotriz inducida, ésta resultará menor que la tensión en bornes.

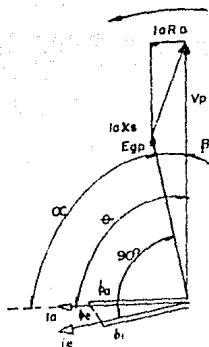


DIAGRAMA VECTORIAL DE UN GENERADOR SÍNCRONO. CARGA PURAMENTE CAPACITIVA.
FIG. 3-14

De lo expuesto hasta ahora, puede deducirse que para estudiar las condiciones de funcionamiento de un generador síncrono, hemos de tener en cuenta los siguientes elementos de juicio:

- a) corriente de excitación
- b) caídas de tensión y tensión en bornes.
- c) rendimiento del generador.

El valor del ángulo de desfase entre la corriente, la tensión y el sentido positivo ó negativo de este desfase define la tensión y por lo tanto, la excitación del generador, cuando ocurre generalmente en los receptores de energía, debe mantenerse una tensión lo más uniforme posible. Además de los procedimientos para regular la tensión en las estaciones de distribución y transformación, en las propias centrales debe también regularse la tensión, con relación a un valor medio que dependerá de la naturaleza de las cargas conectadas a la red.

En la figura 3-15, se ve la característica de un generador síncrono trifásico; en este se ha dibujado el triángulo de Potier, indicando como debe determinarse la corriente de excitación para diferentes valores del factor de potencia. Al punto a del triángulo que corresponde a $\cos \theta = 0$ y retraso de fase, corresponde el máximo de la corriente de excitación; en el punto d, tenemos que $\cos \theta = 1$ y debe reducirse el valor de la corriente de excitación.

Si el generador funciona con avance de fase (carga capacitiva) la posición del triángulo queda invertida, puede apreciarse que para desfases en adelanto, la corriente de excitación disminuye considerablemente. Según sea la construcción de la máquina, el punto a', correspondiente a $\cos \theta = 0$, quedará a uno u otro lado del eje de ordenadas; si, como sucede en la figura, el punto a' pasa al otro lado de dicho eje, significa que el generador no puede producir la corriente total para $\cos \theta = 0$, porque la excitación no puede disminuir lo suficiente para mantener la tensión nominal en bornes del generador, cuando la intensidad sea nominal. En este caso, para que el generador tenga un funcionamiento estable hay que reducir considerablemente las cargas conectadas al circuito exterior.

Este problema se agrava aún más en los turbogeneradores puesto que en estas máquinas, el triángulo de Potier es más alargado y por lo tanto, ocurre con más frecuencia que en caso de avance de fase, la intensidad de corriente obtenida del generador sea de un valor muy reducido. Incluso, en determinadas circunstancias, la excitatriz debe tener una disposición especial ó contar con contraexcitación.

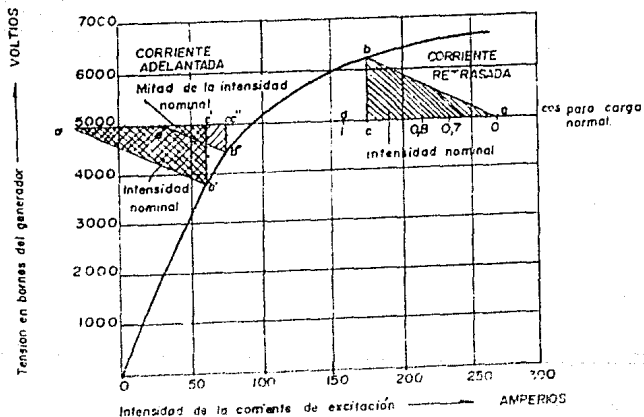


FIG. 3-15

Cálculo del diagrama fasorial de un generador sincrónico a potencia nominal con conexión estrella y carga inductiva - Ohmica

Los datos nominales son:

$$P = 346 \text{ MVA} \qquad X_s = 0.3051 \text{ ohms.}$$

$$V_L = 20 \text{ Kv (Y)} \qquad R_a = 0.001063 \text{ ohms.}$$

$$\text{F. P.} = 0.9 \text{ atrasado}$$

$$\text{Donde: } P = \text{potencia} \qquad \text{F.P.} = \text{Factor de Potencia}$$

$$X_s = \text{Reactancia por fase}$$

$$V_L = \text{Voltaje en bornes} \qquad R_a = \text{Resistencia por fase}$$

La corriente a plena carga por fase I_a se calcula de la potencia nominal:

$$I_a = \frac{P}{3 V_L} = \frac{346 \times 10^6}{3 \times 20 \times 10^3} = 9988.15 \text{ amp.}$$

El voltaje en bornes por fase V_p se calcula de la siguiente manera:

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{20\,000}{\sqrt{3}} = 11547 \text{ volts}$$

El ángulo de fase entre tensión y corriente será:

$$\theta = \cos^{-1} 0.9 = 25.84^\circ \text{ (atrasado).}$$

Las caídas de tensión en el devanado, debido a la reactancia y resistencia son:

$$V_r = I_a R_a = 9988.15 \times 0.001063 = 10.61 \text{ volts}$$

$$V_x = I_a X_s = 9988.15 \times 0.3051 = 3047.38 \text{ volts.}$$

Para conocer la tensión generada por fase E_{gp} se aplica la fórmula general:

$$\begin{aligned} E_{gp} &= (V_p \cos \theta + I_a R_a) + j (V_p \sin \theta + I_a X_s) \\ &= (11547 \times \cos 25.84^\circ + 10.61) + j (11547 \times \sin 25.84^\circ + 3047.39) \\ &= 10403.05 + j 8080.25 \end{aligned}$$

Trasladando de la forma binómica a polar tenemos:

$$E_{gp} = 13172.46 \angle 37.84^\circ$$

El ángulo α , formado entre E_{gp} e I_a vale 37.84° y conociendo $\theta = 25.84^\circ$, obtendremos el ángulo formado entre E_{gp} y V_p denominado β

$$\beta = \alpha - \theta = 37.84^\circ - 25.84^\circ = 12.0^\circ$$

Al producir el valor del vector E_{gp} la corriente de excitación I_e produce un flujo magnético \bar{F}_1 , adelantado 90° de E_{gp} y obtenemos su valor en la gráfica de las curvas de saturación en vacío y de corto circuito, teniendo el valor del vector E_{gp} .

Como la curva de saturación en vacío está en función del voltaje entre fases - tenemos:

$$V_l = E_{gp} \times \sqrt{3} = 13172.46 \times \sqrt{3}$$

$$V_l = 22815.36$$

Buscando con este valor en la curva de saturación, tenemos un valor de $I_e = 1640$

$$\bar{F}_1 = 1640 \angle \frac{12.0^\circ + 90^\circ}{1} = 1640 \angle 102^\circ$$

Para obtener el flujo de la reacción de armadura $\bar{\Phi}$ a, se calcula a partir de la curva de corto circuito, y ya que la reacción de armadura de un estado de carga, es proporcional a la de cualquier otro.

De la curva del corto circuito, I_a se alcanza con un valor de $I_e = 1858$ A, valor que corresponde a \bar{F}_1 e y como la máquina se encuentra cortocircuitada el valor de E_{gp} será:

$$E_{gp} = \Delta V = I_a \cdot X_s = 3047.38 \text{ volts.}$$

Como la curva de saturación esta en función del voltaje entre fases.

$$V_L = E_{gp} \times \sqrt{3} = 3047.38 \times 1.73 = 5272 \text{ volts.}$$

Con este valor en la curva de saturación obtenemos un valor de $I_e = 300 \text{ A}$ que corresponde a \bar{O}_1 , y tenemos:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_e - \bar{I}_1$$

$$\bar{I}_a = 1858 - 300 = 1558$$

Como I_a esta desfasado de V_p un ángulo $-\theta$ en atraso, tenemos.

$$\bar{I}_a = 1558 \angle -25.94$$

Utilizando este valor para el estado de carga y sumando vectorialmente tendremos.

$$\bar{I}_e = 1640 \cos 102^\circ - 1558 \cos -25.84^\circ - j(1640 \sin 102^\circ - 1558 \sin -25.84^\circ)$$

$$\bar{I}_e = -340.97 - 1402 - j(1604.16 + 679.06)$$

$$\bar{I}_e = -1743.19 - j2283.22$$

$$\bar{I}_e = 2872.59 \angle 52.62^\circ - 90^\circ$$

$$\bar{I}_e = 2872.59 \angle 142.46^\circ$$

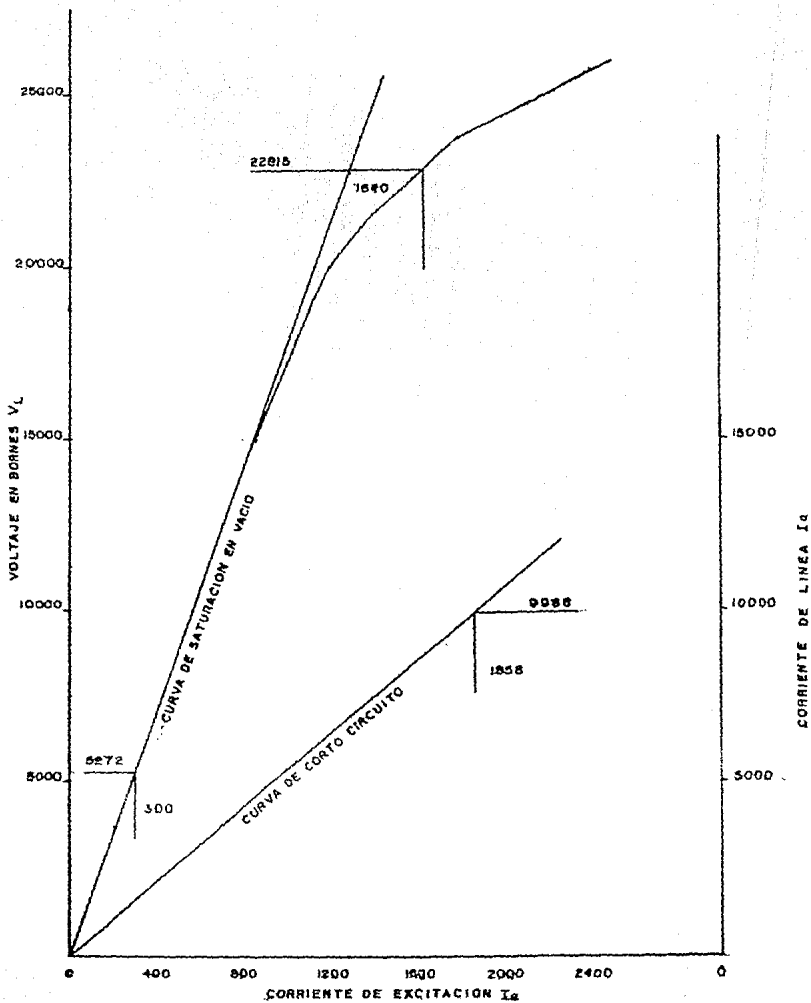
Para calcular la regulación de tensión del generador se usa la siguiente formula

$$\text{Reg} = \frac{E_{gp} - V_p}{V_p} \times 100$$

$$= \frac{13172.46 - 11547}{11547} \times 100 = 14\%$$

Las figuras siguientes nos muestran las curvas de cortocircuito, saturación en vacío y el diagrama fasorial de este ejemplo.

CURVA DE SATURACION EN VACIO Y
CURVA DE CORTO CIRCUITO



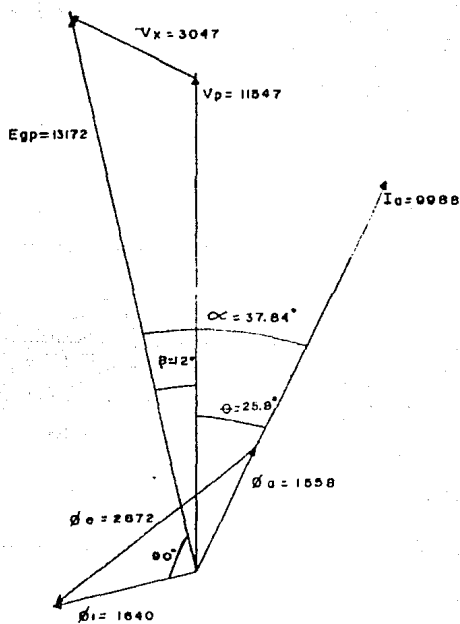


DIAGRAMA VECTORIAL DEL GENERADOR CON
 CARGA INDUCTIVA - OHMICA

3.2. CARACTERISTICAS DEL GENERADOR DE LA UNIDAD TURBO-JET.

Las unidades generadoras de energía eléctrica Turbo-Jet, instaladas en la Ciudad de México, funcionan con dos tipos de generadores eléctricos. El número de unidades existentes son 11, las cuales están repartidas de la siguiente manera:

3 unidades poseen generador de la marca Electric Machinery

8 unidades poseen generador de la marca Mitsubishi Electric Co.

Para el desarrollo de este trabajo, mostraremos las características de un generador del tipo Mitsubishi, las cuales son las siguientes:

CLASIFICACION DEL GENERADOR.

Manufacturado.	Mitsubishi Electric Corporation.	
Norma.	International Electrotechnical Commission Standards (IEC).	
Tipo	Trifásico, 50/60 Hz. enfriado por aire, soportes - tipo pedestal con baleros de ajuste, 3,000/5,600 - rpm, excitación de 150 KW, 250V y 3 KVA, del generador de Magnetismo Permanente (PMG).	
Temperatura.	40° C (104° F) a 3,500 FT, sobre el nivel del mar.	
Frecuencia	(Hz)	50 60
Voltaje.	(V)	11,500 13,800
Salida de Potencia	(KVA)	43,000 51,600
	(KW)	38,700 46,440
Factor de Potencia	(PU)	0.9 0.9
Corriente.	(A)	2,159 2,159
Velocidad.	(rpm)	3,000 3,600
Rango de Corto Circuito.	(min)	0.5 0.5
Tipo de Carcasa.	Tipo interior abierta, con filtros de aire.	
Estator.	Tipo cilíndrico, de dos polos.	
Excitación	Sistema sin escobillas, con generador de magnetismo permanente.	
Conexión	Estrella con neutro a tierra a través de una impedancia.	

NORMAS DE DISEÑO.

El generador es diseñado y manufacturado de acuerdo con las siguientes - normas:

a) Características generales: IEC 34-1 (1969), 34-3 (1968)

b) Materiales: JIS.

IEC: Normas de la Comisión Internacional Electrotécnica.

JIS: Normas de la Industria Japonesa.

c) Aislamiento Estator. Clase D (mica y resina poliéster).

d) Aislamiento Rotor. Clase F (resina epoxica, hojas de mica y cuñas de fibra de vidrio).

e) Niveles de temperatura (grados centígrados)

Bobina del estator 80° para usar el método Termo-detector.

Bobina del rotor 110°C para usar el método de resistencias.

Partes Mecánicas y Núcleo. . . 80°C para usar el método por termómetro.

f) Pruebas dieléctricas entre bobinas y tierra (volts).

Estator. 2E 3,000 (E, valor de voltaje) 3,600 V.

Rotor. 10 Ex (Ex, valor del voltaje de excitación) 2,500 V.

g) Velocidad y variación de voltaje. El generador será capaz de las siguientes operaciones, sin calentamientos dañinos al valor de KVA fijado.

1.- Valor de voltaje constante, siendo mantenido a cualquier velocidad no mayor de 5% abajo o arriba de la velocidad nominal.

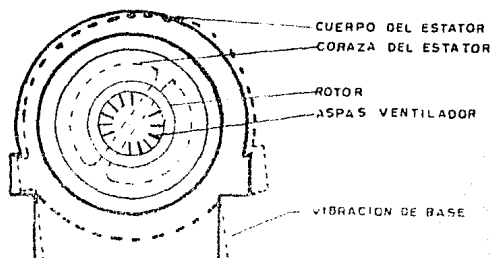
h) Esfuerzo de Sobrevelocidad. El generador será capaz de soportar una prueba de 2 min. de Sobrevelocidad al 120% de la velocidad nominal.

i) Esfuerzo de Corto Circuito. El generador es diseñado para soportar durante 30 segundos cuando es sometido a un repentino corto circuito trifásico, estando las terminales del generador operando al valor de potencia nominal y el 105% del voltaje en terminales.

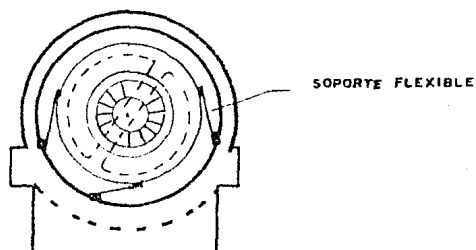
CONSTRUCCION DEL GENERADOR.

Como se mencionó anteriormente, el generador que estamos estudiando, tema de esta tesis; es del tipo trifásico síncrono, de dos polos, rotor cilíndrico con sistema de excitación sin escobillas. A continuación describiremos más en detalle sus características constructivas.

La coraza del estator, está formada por placas de acero al silicio de bajas pérdidas, unidas por pernos soldados en su parte interna y aisladas una -



SIN SOPORTES FLEXIBLES



CON SOPORTES FLEXIBLES

FIGURA 3-16

de otra para minimizar pérdidas. Se encuentra montada en el cuerpo exterior del generador, por medio de dispositivos de montaje flexible, para absorber la vibración causada por la atracción magnética entre la coraza del estator y el rotor. Lo anterior se aprecia en la figura 3-16.

El estator cuenta con 48 ranuras, en las cuales se encuentran alojadas las bobinas del inducido. Estas bobinas, están formadas por conductores de cobre de pequeña sección rectangular, recubiertas y ensambladas juntas con fibra de vidrio, endurecida con baquelita, están aisladas de tierra con cinta de mica dialastíc impregnada con resina y polimerizada con calor, una capa de pintura resistente al efecto corona es aplicada a la superficie. En medio de las dos bobinas de cada ranura, se coloca un tira de micarta ó un detector de temperatura de las bobinas.

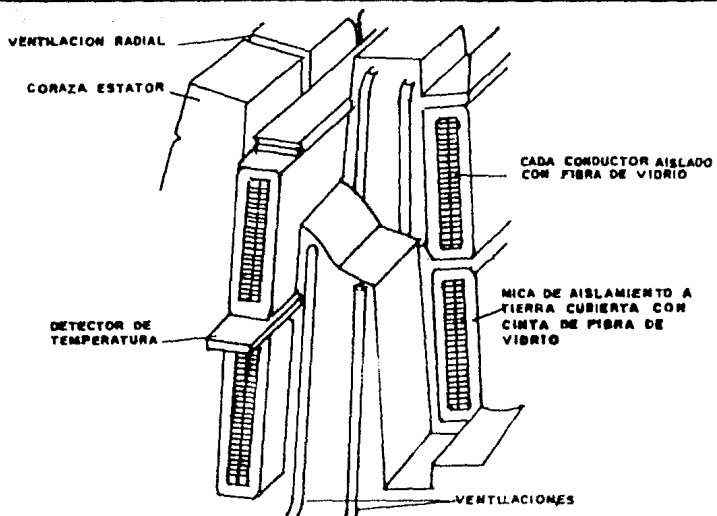


FIGURA 3-17

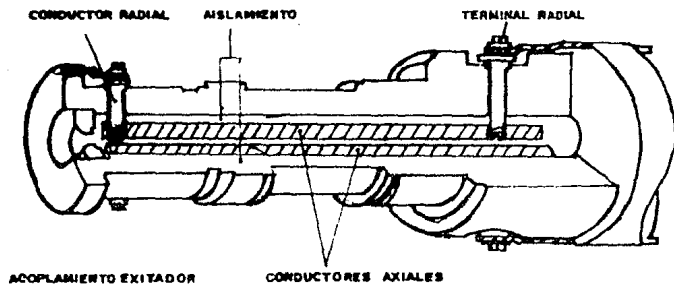
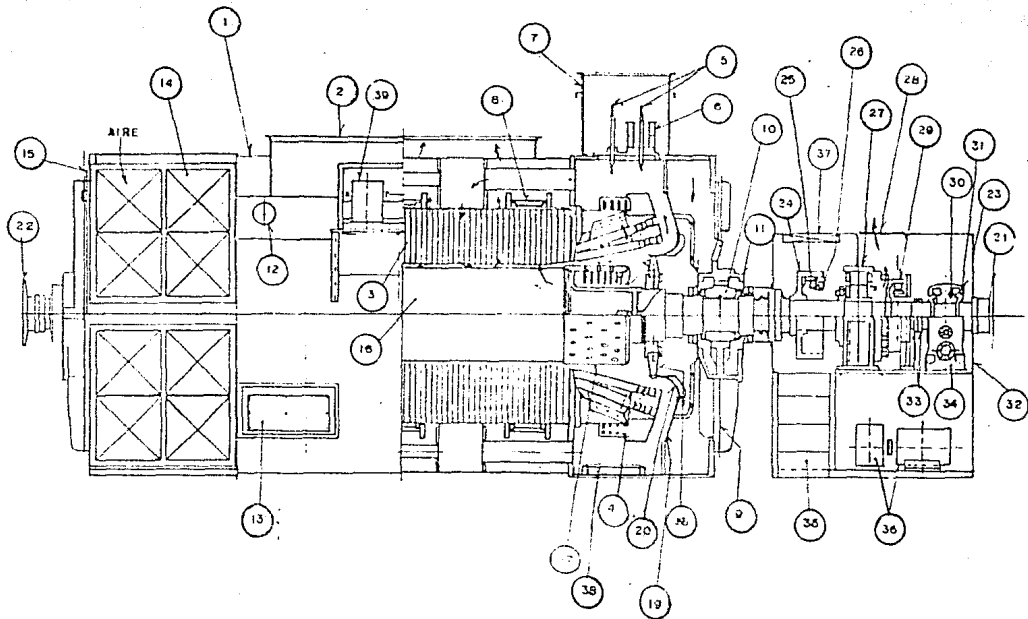


FIGURA-3-18

CORTE SECCIONAL DEL GENERADOR Y EXCITADOR
FIGURA 3-19



El enfriamiento es por medio de circulación forzada de aire, producida por un ventilador montado en la flecha del rotor, este aire pasa por filtros colocados en el cuerpo exterior del generador y circula por ranuras en la coraza del estator. La figura 3-17, nos muestra la disposición de las bobinas de las ranuras del estator.

La flecha del rotor, es forjada en una sola pieza de acero con alto contenido de Ni-Cr-Mo, después de ensamblada es balanceada a la temperatura de operación. Las ranuras del rotor alojan a las bobinas del inductor, las cuales tienen una construcción similar a las del estator, las terminales del rotor son llevadas fuera a través de su flecha como se aprecia en la figura 3-18.

El plano de la figura 3-19, nos muestra un corte seccional del generador y el excitador, las terminales de las bobinas del estator se encuentran del lado del excitador, donde son conectadas a las terminales principales de salida en la parte superior del mismo lado. A continuación se presenta un listado del nombre de las partes que lo forman de acuerdo al número de identificación.

1. Cubierta del estator
2. Ducto de salida de aire
3. Coraza del estator
4. Bobinas del estator
5. Terminales principales
6. Transformador de corriente
7. Ducto de bus
8. Montajes flexibles
9. Soportes
10. Rodamientos
11. Sellos
12. Muñon
13. Caja de terminales (medición)
14. Filtros de aire
15. Anillos de sello
16. Flecha del rotor
17. Anillo de retenida (final del rotor)
18. Ventilador
19. Guías de ventilación
20. Cubierta del ventilador.

21. Cople bendix (lado excitador)
22. Cople bendix (lado turbina)
23. Cubierta del excitador
24. Rueda de rectificadores
25. Elemento rectificador
26. Elemento fusible
27. Excitador de C.A. (excitatriz principal)
28. Salida de aire del excitador
29. Generador de Magnetismo permanente (excitatriz piloto)
30. Rodamiento del excitador
31. Sellos
32. Anillo de sello
33. Anillo colector (sistema de detección de tierra)
34. Pedestal de excitador
35. Escalerilla
36. Motor y bomba de aceite
37. Filtro de aire de excitador
38. Espacio para calentadores
39. N G R.

5.3. PREPARACION PARA EL ARRANQUE.

La puesta en funcionamiento de un turbo-generador, normalmente se realiza de acuerdo a un programa preestablecido, para elevar la velocidad y este es de acuerdo a las especificaciones de la máquina motriz.

En el capítulo II, se describieron los ciclos de arranque de la unidad - turbo-jet, en los cuales está implícito el arranque del generador. A continuación se describirán algunas consideraciones que deberán tomarse en cuenta, antes y durante el arranque.

Arranque inicial.- Al arrancar y acelerar el generador a alta velocidad, deberá ser observado hasta que alcance su velocidad y condiciones de operación normales, cuidando que todas sus partes tengan una condición estable, cualquier disturbio será registrado. Como una regla el generador deberá ser detenido inmediatamente, para investigar y efectuar las reparaciones necesarias.

Giro antes de arrancar.- Antes de suministrar combustible a la máquina, el generador deberá ser girado por algún mecanismo externo, para detectar anomalías como: Fugas en los sellos de aceite, ruido interno anormal, etc.

Ajuste de temperatura de aceite en los rodamientos.- La temperatura del aceite a la entrada de los rodamientos, será normalmente de 55 a 60°C (131 - - 140°F), cuando la velocidad aumenta la temperatura de los rodamientos también tiende a incrementarse, pero puede asegurarse una operación normal manteniendo el rango antes citado. Será necesario ser cuidadoso cuando el incremento de temperatura del aceite drenado, exceda en 20°C (36°F), normalmente el máximo permitido para una operación normal, es de 15°C (27°F).

Medición de vibraciones.- cuando la máquina está tomando velocidad, deberá ser medida la vibración que pueda existir en los rodamientos ó en la base del soporte. La magnitud de la vibración no deberá de ser mayor de 20/1000 mm., en los soportes de los rodamientos.

Prueba de sobrevelocidad.- Después de comprobar que la máquina no muestra fallas a la velocidad nominal, se puede efectuar una prueba para comprobar que la turbina dispara al 110% del rango de velocidad. Esta prueba no permite que se excedan, el 110% de velocidad ó 30 segundos.

Lista de verificación.- Antes de iniciar el arranque, varias partes -- serán inspeccionadas para asegurar que no existen fallas, en la tabla 3-1 se verán los puntos a verificar.

<u>LISTA DE VERIFICACION</u>			
<u>NUMERO</u>	<u>PUNTOS A REVISAR</u>	<u>BUENO</u>	<u>MALO</u>
	<u>Sistema de Lubricación de Rodamientos.</u>		
1	¿ se revisaron fugas de aceite en las tuberías ?		
2	¿ fue verificada la cantidad de aceite drenado a través de la ventanilla de inspección ?		
3	¿ fue probado el funcionamiento del dispositivo de protección del sistema de lubricación ?		
	<u>Ensamble de Equipo</u>		
1	¿ hay alguna parte ensamblada incorrectamente ?		
2	¿ están los tornillos y seguros bien ajustados ?		
3	¿ se encuentra el ducto de aire libre de cualquier materia extraña ?		
	<u>Instalación Eléctrica.</u>		
1	¿ fue medida la resistencia de aislamiento de la bobina - del estator ?		
2	¿ fue medida la resistencia de aislamiento de la bobina - del rotor ?		
3	¿ fue medida la resistencia de aislamiento de la bobina - del excitador ?		
4	¿ fue medida la resistencia de aislamiento del aislamiento preventivo de la flecha ?		
5	¿ está la instalación eléctrica reestablecida a la posición normal ?		
6	¿ está cada terminal de tierra perfectamente asegurada ?		
7	¿ está todo interconectado y la secuencia de operación - es satisfactoria ?		
	<u>Instrumentos de Medición</u>		
1	¿ está el termómetro de la bobina del estator indicando - correctamente ?		
2	¿ está el termómetro de los rodamientos indicando correctamente ?		
3	¿ fueron probadas todas las alarmas de los medidores ?		
4	¿ está el tacómetro de precisión y el medidor de vibraciones disponibles al momento de la aceleración ?		

TABLA 3-1

Pruebas con carga.- La carga del generador será ajustada por medio del ⁹⁶ gobernador en coordinación estrecha con la turbina, a los pasos de: 1/4 2/4, 3/4 y 4/4 en este orden, y será continuada hasta que la temperatura de cada parte se estabilice bajo la carga respectiva y la carga total sea alcanzada.

En el caso de excesivos aumentos de temperatura ó variaciones del factor de potencia del generador, la carga será reducida gradualmente, de acuerdo al diagrama tiempo-reducción de carga de la turbina, revisando todos los medidores de los tableros de: generador, turbina y excitador, anotando cualquier anomalía.

3.4. OPERACION DEL GENERADOR.

Los modos de operación del generador como son: Paralelo, condensador - síncrono, aislado preciso, etc., fueron descritos en el capítulo II. Las características y condiciones necesarias para efectuar la sincronización y el funcionamiento en paralelo de los generadores síncronos, serán tratados en el punto 3.6 de este capítulo.

En este inciso trataremos, las características y capacidades que posee este generador, para trabajar bajo diferentes condiciones de carga y tensión que se presentan en la práctica.

Cada generador tiene sus curvas características, que nos muestran su comportamiento en la operación práctica. A continuación describiremos estas curvas:

Curvas "W".- Estas curvas nos muestran la variación de la corriente de línea ó armadura, en función de la corriente de campo para un estado de carga constante. Ver figura 3-20.

Curvas de capacidad.- La capacidad de un generador está limitada por tres factores:

- a) El calentamiento en el devanado del rotor, cuando la máquina está operando con factor de potencia atrasado y es necesario sobreexcitar el campo.
- b) La potencia mecánica máxima que puede entregar la máquina motriz.
- c) La tensión máxima con que puede operar la máquina, sin riesgo de que se pierda el control sobre ella, cuando opera a factor de potencia adelantado, campo subexcitado.

La figura 3-21, muestra la curva de capacidad (reactiva) del generador, esta curva está dividida en tres zonas:

Región A es el límite de calentamiento del rotor.

Región B es el límite de calentamiento del estator.

Región C es el límite de calentamiento final.

Curvas de potencia de salida contra altitud.- Esta gráfica nos muestra la potencia que entrega un generador, operando a diferentes altitudes sobre el nivel del mar. En la figura 3-22, vemos que para una altitud de 1006 mts. (3300 ft), a una temperatura de 40°C (104 °F), el generador entrega el 100%

CORRIENTE DE SALIDA VS. CORRIENTE CAMPO DEL GENERADOR.
VOLTAJE TERMINAL 13.8 KV.

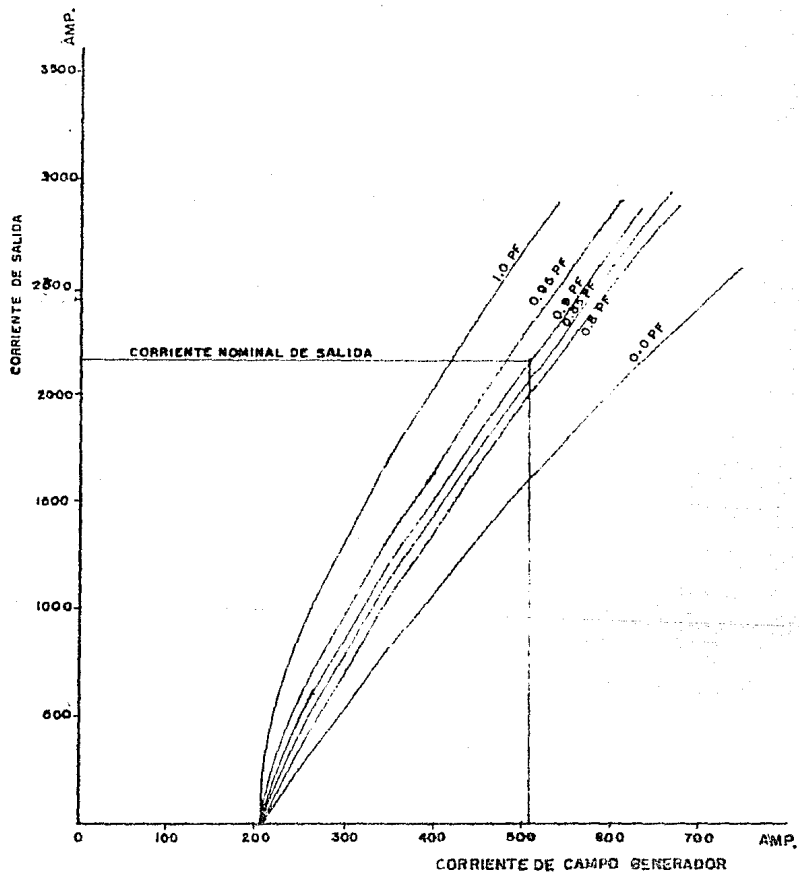


FIGURA 3-20

CARACTERISTICA DE POTENCIA VS ALTITUD
UNIDAD TURBOJET.

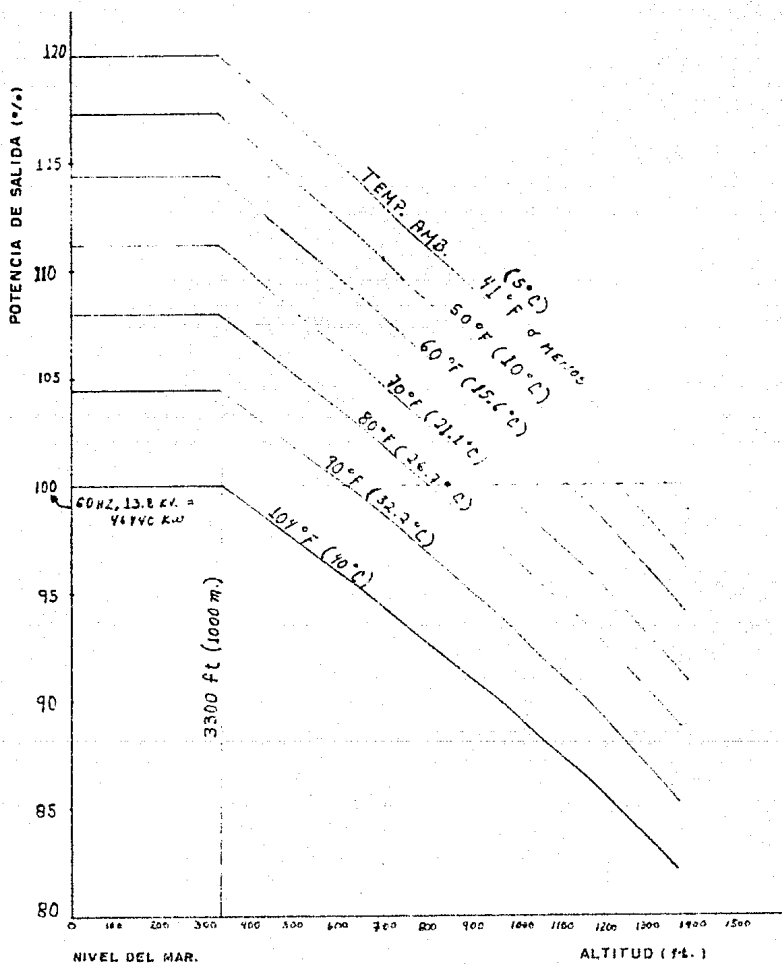


FIGURA 3-22

de su potencia. Si las condiciones de altitud y temperatura varían debemos de buscar en la gráfica, la potencia que entrega el generador en estas nuevas condiciones.

Curvas de potencia de salida contra temperatura ambiente.- El generador está diseñado para trabajar a temperatura ambiente de 40°C, pero su potencia de salida puede variar de acuerdo a las variaciones de temperatura, como se muestra en la figura 3-23.

En condiciones de operación normal, es recomendable limitar la carga del generador dentro de los rangos indicados en la curva de capacidad y en los datos nominales, porque esto hará posible asegurar una larga vida de las bobinas y mantener segura y confiable a la máquina.

El rango de capacidad al valor de voltaje, frecuencia, etc., es indicada por la curva de capacidad de la figura 3-21, por lo tanto los límites de operación pueden ser como siguen cuando las condiciones de carga mencionadas desvían de los valores dados.

1.- Voltaje terminal:

El generador puede operar sin interrupción al valor de KVA y frecuencia nominales, dentro de un rango del 95 al 105% del voltaje nominal. Con un voltaje más alto habrá mayor densidad de flujo y pérdidas en el núcleo, causando que la temperatura del núcleo aumente y la corriente se incremente siendo considerada de saturación. Por el contrario si el voltaje es menor, la corriente de estator se incrementará causando aumento de temperatura en las bobinas.

2.- Frecuencia:

El generador puede operar sin interrupción a los valores nominales de KVA y voltaje, dentro del rango de frecuencia del 95 al 105%. La baja frecuencia a un voltaje terminal constante, aumenta la corriente de campo, ocasionando que la capacidad de enfriamiento decrezca algunos grados.

UNIDAD TURBOJET

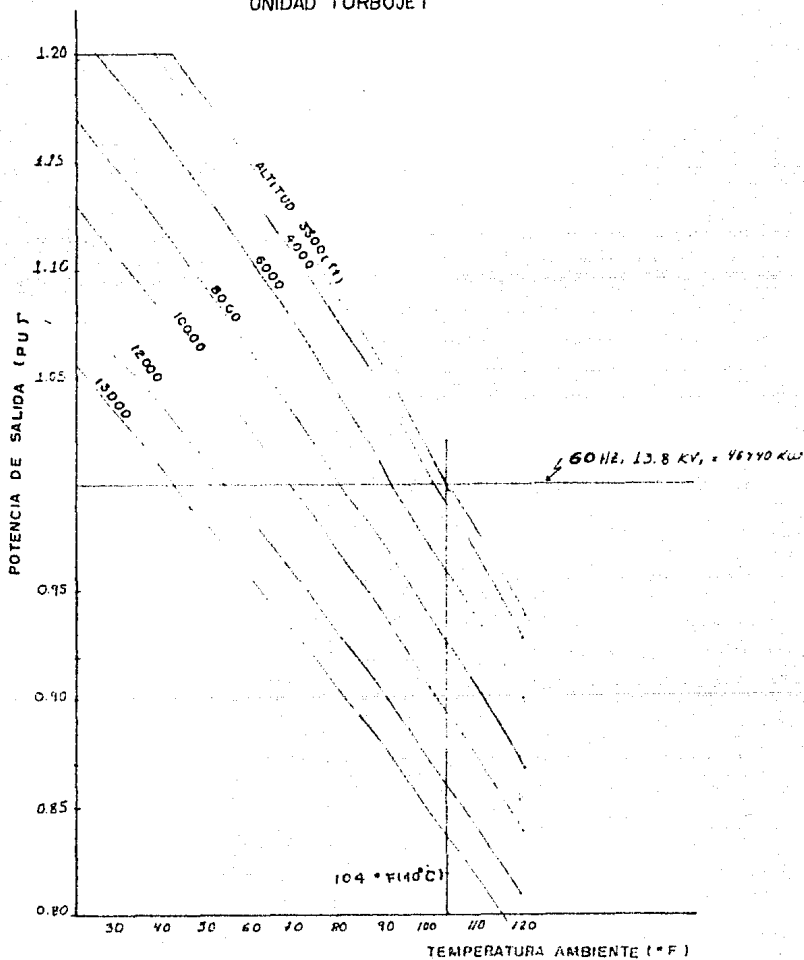


FIGURA A-23

3.- Sobrecarga:

Más carga que la de la curva de capacidad, aunque sea por corto tiempo, causa aumentos de temperatura acortando la vida de las bobinas del generador, no obstante son permitidas por cortos períodos de tiempo sin causar gran deterioro en el aislamiento, pudiendo ser calculados por la siguiente ecuación:

$$t = \frac{150}{I^2 - 1}$$

donde: t tiempo permitido de sobrecarga (seg.)

I corriente durante la sobrecarga (pu)

4.- Corto circuito trifásico:

El generador puede resistir por 30 seg., cuando es sujeto a un corto circuito trifásico en sus terminales, cuando opera el valor de KVA, factor de potencia y 10% del voltaje nominal.

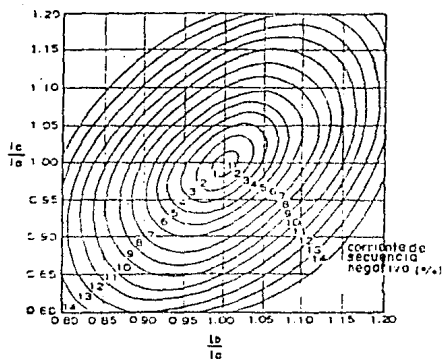
5.- Carga desbalanceada continua:

Cuando el generador opera bajo desbalance de carga ó a carga monofásica, una corriente de secuencia negativa fluirá en las bobinas del estator, cruzando en rotación inversa del campo a la misma velocidad, para eslabonar al rotor e inducir una corriente de Eddy de doble frecuencia, sobre la superficie y cuñas del rotor. Puesto que ésta corriente circula, a través de los anillos de retenida de las bobinas en ambos extremos, la superficie del rotor será sobrecalentada y las uniones de las cuñas también.

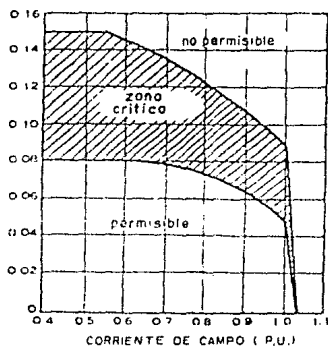
Para saber la magnitud de la carga desbalanceada que se puede permitir en operación continua, es muy importante conocer el valor de la corriente de secuencia negativa, en la figura 3-24, el valor de la corriente de secuencia negativa puede ser conocido fácilmente para cualquier carga desbalanceada. En esta figura, el área cubierta por líneas oblicuas da la zona de límite, y por lo tanto, es deseable operar bajo límite inferior.

6.- Corto circuito desbalanceado:

Al tiempo que sucede un corto circuito desbalanceado, de línea a línea y de línea a tierra, una larga corriente de secuencia negativa fluye y el corto circuito de línea a línea se reflejará más severamente sobre el calentamiento.



DETERMINACION DE CORRIENTE DE SECUENCIA NEGATIVA DESDE LAS CORRIENTES EN CADA FASE



1 P.U. = CORRIENTE DE CAMPO AL VALOR NOMINAL DE KVA, Y F.P.

DETERMINACION DE CORRIENTE DESBALANCEADA PERMISIBLE

FIGURA 3-24

3.5. MANTENIMIENTO DEL GENERADOR.

Como se ha mencionado anteriormente el generador que estamos estudiando, es del tipo de excitación sin escobillas, lo que implica que no se utilizan - escobillas ni anillos rozantes. Esta característica simplifica mucho el mantenimiento del generador ya que no son necesarios paros para cambio de escobillas gastadas, rectificación de anillos rozantes o limpieza por la acumulación de carbón.

A continuación se describirán las actividades básicas que se deberán cubrir durante los mantenimientos anuales programados y los mantenimientos mayores.

Mantenimiento anual programado del generador y equipo accesorio.

- 1) Al salir y entrar la unidad verificar posibles fugas en el sistema de lubricación.
- 2) Pruebas de resistencia de aislamiento, tanto de estator como de rotor. En caso de duda sobre valores adecuados, consultar las normas del caso.
- 3) Procurar elevar o mantener los índices de polarización entre el 1° y 10° - minutos mayores de 2.5.
- 4) Se ha establecido 30 días calendario para este tipo de mantenimiento, por lo tanto es necesario mantener la temperatura de los devanados más alta - que la temperatura ambiente, para evitar condensación. En nuestro caso se cuenta con los calentadores eléctricos para este fin.
- 5) En caso de pruebas de alta tensión, consultar los valores recomendados por el fabricante.
- 6) Reapriete general de tornillería en tableros de protección, control y medición.
- 7) Revisión de cableado de control de señales del generador a los tableros.
- 8) Verificación de tornillería y zapatas terminales en transformadores de corriente, potencial, termómetros y excitación.
- 9) Revisión y pruebas del equipo contra ondas de choque.
- 10) Revisión de empalmes, mufas, tornillería, barras, trenzas, busducto, etc., en salida del generador.
- 11) Inspección y pruebas al equipo del neutro del generador.
- 12) Revisión y pruebas del interruptor de máquina.

- 13) Verificación del equipo de protección y medición del generador.
- 14) Pruebas eléctricas al equipo de excitación incluyendo quebradora de campo.
- 15) Verificación, inspección y pruebas a sistema de regulación de voltaje.
- 16) Limpieza y/o lavado del grupo de excitación.
- 17) Limpieza y/o lavado de filtros de aire en generador y excitador.
- 18) Verificar el comportamiento de voltajes de flecha y en su caso graficar - corriente.
- 19) Hacer pruebas dieléctricas al aceite de lubricación.
- 20) Verificar condiciones de acoplamiento entre generador, turbina y excitador.
- 21) Pruebas de resistencia de aislamiento al entrar el generador en servicio.
- 22) Verificar disparo y alarmas de todos los dispositivos del generador asociados.
- 23) Verificar fusibles y diodos del rectificador rotativo del excitador.

Mantenimiento mayor del generador; además de las actividades antes mencionadas, se deberán contemplar los siguientes puntos.

- 1) Verificar resistencia de aislamiento en chumaceras.
- 2) Cambio de sellos de neopreno o material similar de tapas del generador.
- 3) Revisión de huelgos de campanas del rotor.
- 4) Inspección de cuñas y bobinado del rotor principal.
- 5) Tener maniobra para secado al vacío del rotor en caso de lavado.
- 6) Utilizar barniz adecuado para equipo rotatorio.
- 7) Inspección de devanados del estator:
 - Limpieza (trapo, escobillón de cerda, aire)
 - Inspección de separadores, cuñas, amarras, etc.
 - Condiciones de aislamiento grietas, abombamientos. efecto corona, etc.
 - Condiciones de aislamiento a la salida de las ranuras.
- 8) Verificación del entrehierro entre rotor y estator.

3.6. ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE GENERADORES SINCRONOS.

El acoplamiento de los generadores de corriente alterna puede efectuarse en serie ó en paralelo. sin embargo, el acoplamiento en serie, que solamente es necesario cuando se aprecia una tensión muy elevada, resulta superfluo en caso de corriente alterna por ser más económico elevar dicha tensión por medio de un transformador. Por esta razón, solamente presenta interés práctico el acoplamiento en paralelo.

Así pues, solamente trataremos del acoplamiento en paralelo de generadores trifásicos síncronos que son, a fin de cuentas, los que tienen mayor interés. Como primer paso para el estudio de las condiciones de funcionamiento de los generadores acoplados en paralelo describiremos a continuación las condiciones necesarias para sincronizar dos generadores entre sí ó un generador a una red.

SINCRONIZACION.

Para sincronizar un generador a un sistema eléctrico, es necesario que se satisfagan las condiciones siguientes:

- a) La tensión del generador debe ser igual a la tensión del sistema.
- b) La frecuencia del generador debe ser igual a la frecuencia del sistema.
- c) El ángulo de fase del generador debe ser igual al ángulo de fase del sistema.

Tensiones Iguales.- Para lograr que la tensión del generador iguale a la tensión del sistema, se deberá actuar sobre el reostato de la excitatriz para aumentar la corriente de campo, obteniendo con esto elevar el voltaje generado. Para saber cuando se ha cumplido esta condición, es necesario utilizar dos volímetros, uno para medir la tensión del generador y el otro para medir la tensión en el sistema, en la figura 3-25 se presenta un diagrama simplificado de la conexión de los volmetros.

Las conexiones son realizadas a través de un transformador de potencial (T.P.) que reduce la tensión del sistema a un valor de 120 V., los que son proporcionales a la tensión real de la línea, por lo que la escala de los volmetros es graduada directamente para indicar KV.

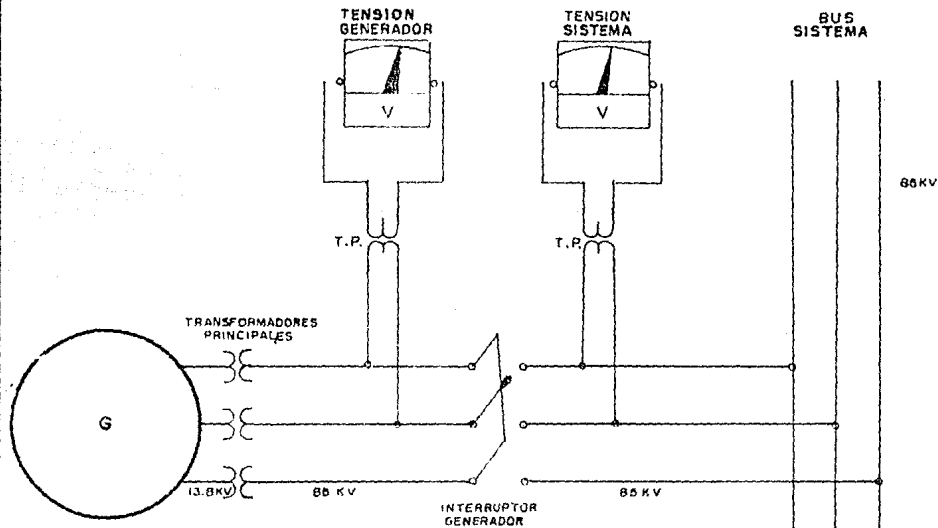


FIGURA 3-26

109 Frecuencias Iguales. La siguiente condición para sincronizar es hacer que la frecuencia del generador, sea igual a la frecuencia del sistema. Para obtener lo anterior, se deberá actuar sobre el dispositivo de regulación de velocidad, de la máquina motriz, para saber cuando se cumple esta condición se conecta un frecuencímetro para medir la frecuencia del generador y otro para saber la frecuencia del sistema, como se aprecia en la figura 3-26.

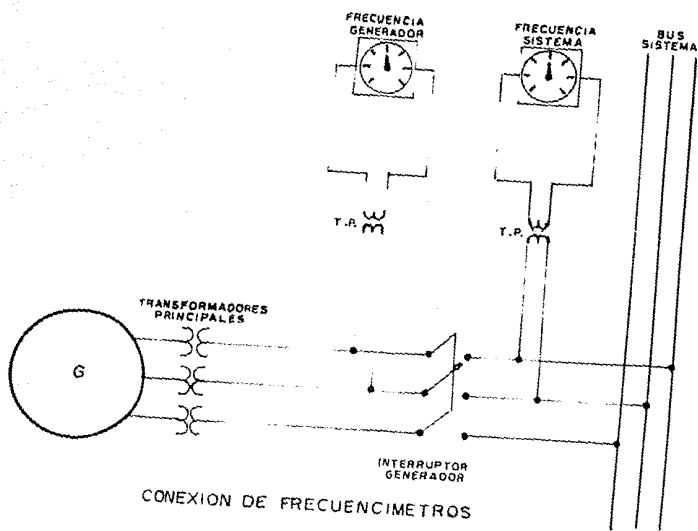


FIGURA 3-26

109 Frecuencias Iguales. La siguiente condición para sincronizar es hacer que la frecuencia del generador, sea igual a la frecuencia del sistema. Para obtener lo anterior, se deberá actuar sobre el dispositivo de regulación de velocidad, de la máquina motriz, para saber cuando se cumple esta condición se conecta un frecuencímetro para medir la frecuencia del generador y otro para saber la frecuencia del sistema, como se aprecia en la figura 3-26.

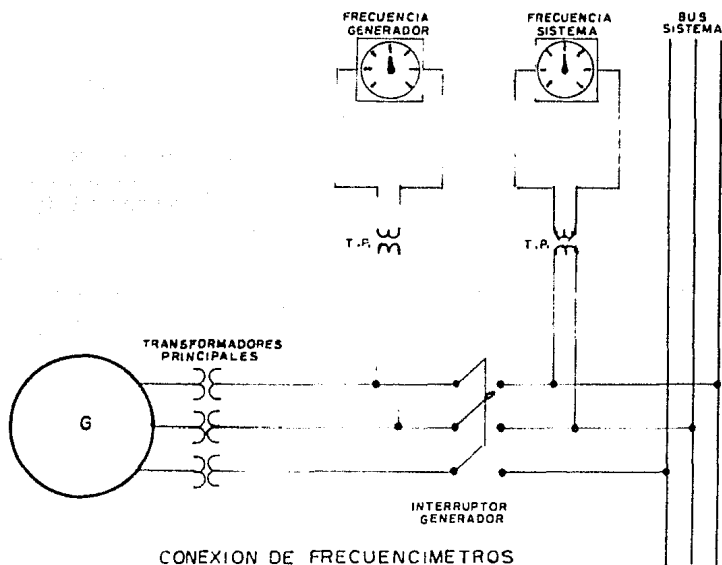
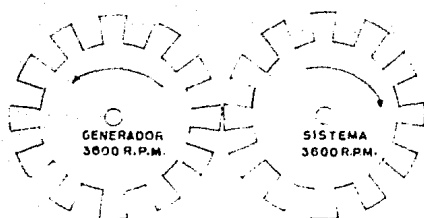


FIGURA 3-26

Para comprender mejor esta condición, podemos imaginar al sistema y al generador representados por dos engranes, para que estos puedan acoplarse (sincronizarse), es necesario que ambos giren a la misma velocidad, figura 3-27.



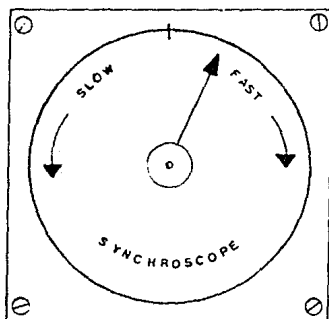
ENGRANES CON IGUAL VELOCIDAD DE GIRO

FIGURA 3-27

Se observa que a pesar de que los engranes giran a la misma velocidad, no se pueden acoplar, debido a que sus dientes están a tope. De la misma manera, es posible que el generador no pueda sincronizarse, a pesar de tener la misma frecuencia del sistema. Para ello debe satisfacerse una tercera condición.

Ángulos de Fase Iguales. - La tercera y última condición para sincronizar, es lograr que el ángulo de fase del generador y el sistema sean iguales. Para lograr lo anterior, es necesario actuar sobre la velocidad del gene

rador a fin de hacer un ajuste fino. El aparato que nos indica cuando se cumple esta condición, es el sincronoscopio figura 3-28. Este consta de dos bobinas, una conectada al generador y otra al sistema, pero ambas a través de un transformador de potencial; de esta manera su aguja gira a una velocidad igual a la diferencia de las frecuencias.



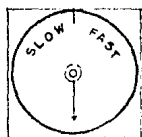
SLOW—LENTO
FAST—RAPIDO

EL SINCRONOSCOPIC

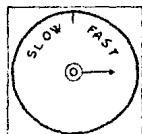
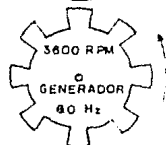
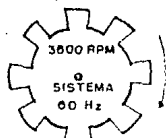
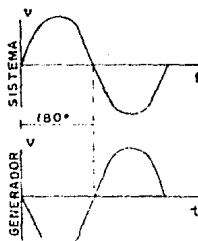
FIGURA-3 28

Este dispositivo hace girar su aguja hacia la derecha (fast), cuando el generador tiene una frecuencia mayor que la del sistema, y el sentido inverso (slow) cuando es mayor la frecuencia del sistema. Cuando la aguja se detiene, significa que las frecuencias del generador y del sistema, son exactamente iguales.

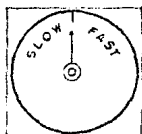
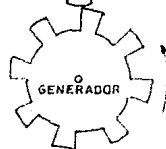
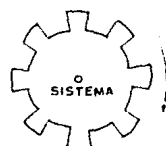
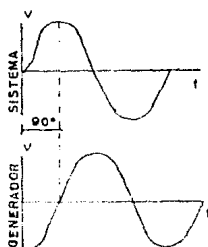
Cuando la aguja del sincronoscopio se detiene en las "seis" de un reloj imaginario, significa que las ondas de tensión eléctrica, están defasadas en 180° , lo cual sería idéntico a tener los dientes de engranes a tope figura 3-29a. Cuando la aguja del sincronoscopio se detiene en las "nueve" ó en las "tres", significa que las ondas de tensión están defasadas 90 ó 270° , ver figura 3-29b. Cuando la aguja del sincronoscopio esta en las "doce" significa que las ondas de tensión están en fase, figura 3-29c, se cumplen en este momento las tres condiciones para sincronizar el generador y el sistema.



SINCROSCOPIO



SINCROSCOPIO



SINCROSCOPIO

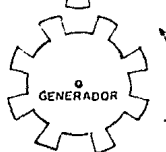
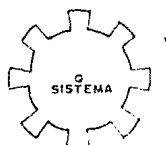
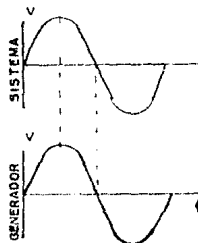


FIGURA 3-29

FUNCIONAMIENTO DE DOS GENERADORES SINCRONOS EN PARALELO.

El diagrama vectorial de la figura 3-30, nos representa el funcionamiento de un generador trifásico, en este diagrama se ha despreciado la caída de voltaje por resistencia óhmica. Los vectores nos representan lo siguiente:

U = tensión en los bornes del generador por fase.

I_1 = corriente en el circuito exterior, defasada de U en un ángulo θ

$X_S I_1$ = caída de tensión inductiva, defasada 90° en adelante con respecto a I_1 (X_S reactancia síncrona del generador).

E_1 = fuerza electromotriz por fase necesaria para conseguir la tensión en bornes U y defasada de ésta en un ángulo δ_1

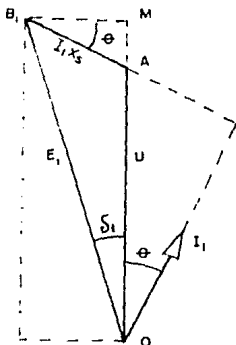


FIGURA 3-30

Vamos a suponer que las condiciones iniciales de funcionamiento son las representadas en el diagrama, definiendo al OA representando a la tensión en bornes U , el vector AB_1 sea correspondiente a la caída $X_S I_1$ y el vector E_1 representará la fuerza electromotriz existente en ese momento por causa de la excitación empleada. La corriente I_1 está defasada en atraso con respecto a la tensión U , en el ángulo θ ; por lo tanto el ángulo formado por AB_1 también valdrá θ .

Si suponemos constantes los valores de U y de X_s , resultará que el vector $X_s I_1$ será proporcional al producto $U I_1$; por lo tanto, y de acuerdo con el diagrama el segmento $B_1 M$ será también proporcional a:

$$P = 3 U I_1 \cos \theta$$

es decir, a la potencia activa del generador. De la misma forma podríamos deducir que el segmento de recta AM es proporcional a:

$$Pr = 3 U I_1 \sin \theta$$

o sea, la potencia reactiva del generador. Es decir que, eligiendo una escala apropiada, el segmento $B_1 M$ representa la potencia activa y el segmento AM representa la potencia reactiva del generador.

Cuando un generador síncrono, trabaja en paralelo con una red alimentada desde otro punto, con otro generador síncrono, conserva siempre el sincronismo, es decir la velocidad constante, pues si por causa de un aumento de carga, el rotor del generador queda retrasado, los demás generadores ceden energía y aceleran mecánicamente al rotor hasta que nuevamente alcanza la velocidad de sincronismo; lo contrario sucede si el generador se acelera, pues en este caso cede energía a los demás generadores y se retrasa hasta la velocidad de --sincronismo. En todos los casos, el rotor del generador es obligado a volver a la velocidad de sincronismo, por la acción de un par sincronizante. O sea - que, cuando dos o varios generadores síncronos trabajan en paralelo a carga - constante, la velocidad permanece también constante de una forma automática, - en este caso, no tiene que intervenir la admisión del regulador, la potencia - absorbida por el generador, es también constante.

En estas condiciones, y como veremos en seguida, la variación del excitador no cambia el valor de esta potencia absorbida, ni el valor de la tensión en bornes en el generador; únicamente varía los valores de la potencia activa y reactiva. Si ahora varía la carga exterior y por lo tanto los generadores - necesitan suministrar una potencia distinta, esta solamente se puede conseguir actuando sobre los reguladores de las máquinas motrices.

Si tomamos dos generadores idénticos (con reactancias síncronas iguales), funcionando en paralelo sobre una red, con potencias activas y reactivas constantes, a una tensión y frecuencias constantes. Basándonos en el diagrama de-

la figura 3-31 llamaremos I_1 e I_2 a las corrientes suministradas por los generadores 1 y 2, que están desfasadas, respectivamente en los ángulos θ_1 y θ_2 sobre la tensión U de la red, definiremos:

$OA = U =$ tensión de la red.

$AB_1 = X_S I_1 =$ caída de tensión inductiva del generador 1.

$AB_2 = X_S I_2 =$ caída de tensión inductiva del generador 2.

$OB_1 = E_1 =$ fuerza electromotriz del generador 1.

$OB_2 = E_2 =$ fuerza electromotriz del generador 2.

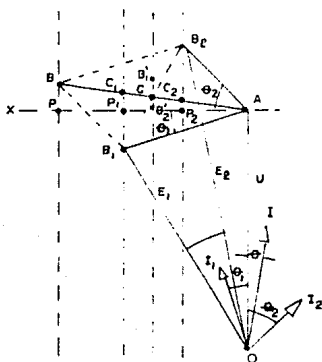


FIGURA 3-31

Las caídas de tensión inductivas están desfasadas 90° en adelante con respecto a las corrientes I_1 e I_2 . La corriente I suministrada a la red es la resultante de las corrientes I_1 e I_2 , por lo que la resultante de los vectores $X_S I_1$ e $X_S I_2$, proporcionales a estas corrientes, es el vector:

$$AB = X_S I$$

que está desfasado 90° en adelante respecto a la corriente I , esta corriente está desfasada con respecto a la tensión U en el ángulo θ . Si trazamos una per-

pendicular al vector OA a partir del punto A, los ángulos de los vectores AB_1 , AB_2 y AB con la perpendicular AX trazada, representa respectivamente, los ángulos de desfase de las corrientes sobre la tensión en bornes U.

Para la tensión constante U, los generadores suministran intensidades y potencias diferentes, recordando que los valores de las caídas inductivas son proporcionales a las corrientes correspondientes, los valores de éstas intensidades y potencias pueden expresarse de la siguiente forma:

$AC_1 = I_1$ = corriente suministrada por el generador 1.

$AC_2 = I_2$ = corriente suministrada por el generador 2.

AB = I = corriente total suministrada a la red por ambos generadores.

AP_1 = potencia activa del generador 1.

AP_2 = potencia activa del generador 2.

AP = potencia activa total $AP_1 + AP_2$

B_1P_1 = potencia reactiva, en adelanto del generador 1.

B_2P_2 = potencia reactiva, en atraso del generador 2.

BP = potencia reactiva total $B_2P_2 - B_1P_1$

En el caso que se muestra en diagrama, se puede decir que el generador 2 que está sobreexcitado, origina una corriente de circulación B_2C_2 que compensa la corriente B_1C_1 del generador 1 que está subexcitado.

Supongamos que, permaneciendo constantes la carga y la potencia, actuásemos sobre las excitaciones de ambos generadores. (sobreexcitado más el generador 2 y subexcitado el generador 1). Esta operación no hace intervenir los reguladores de velocidad y así la potencia de cada generador permanece constante y su punto representativo se desplazará sobre las líneas verticales B_1P_1 y B_2P_2 .

Cuando disminuimos la excitación del generador 1, la fuerza electromotriz E_1 disminuye y el punto B_1 queda obligado a desplazarse sobre la vertical B_1P_1 hacia abajo; el generador 1 aumentará su desfase en adelante, y también su corriente suministrada I_1 , ya que el vector AB_1 se desvía de la línea AX. Si como hemos dicho aumentamos simultáneamente la excitación del generador 2 y la tensión U permanece constante, este generador debe aumentar su desfase en atraso, y por lo tanto su corriente I_2 .

En definitiva, la corriente total I suministrada a la red habrá quedado invariable pero las corrientes suministradas por ambos generadores habrán aumentado; si hubieramos realizado la operación inversa (aumentando la excitación del generador 1 y disminuyendo la del generador 2), la corriente suministrada por cada uno de los generadores, hubiera disminuido.

La corriente suministrada por el generador 1 es mínima cuando R_1 se acerca a P_1 , es decir, cuando la corriente I_1 está en fase con la tensión en bornes; - de igual modo, la corriente mínima suministrada por el generador 2 está expresada por AP_2 . Se puede comprobar, en todo momento la marcha de cada generador, conectando 3 amperímetros uno sobre cada generador, que marcan I_1 e I_2 , y el otro sobre las barras generales que marca I . Si ahora actuamos al mismo tiempo y en sentido inverso sobre dos las dos excitaciones de los generadores, tendremos:

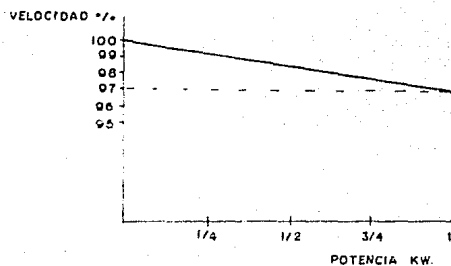
- - - Si las corrientes de los dos disminuye, el generador en el que se ha aumentado la excitación estaba defasado en atraso.
- - - Si las corrientes de los dos aumenta, el generador en el que se ha aumentado la excitación estaba defasado en adelanto.
- - - Si la corriente aumenta en uno y disminuye en otro, ambas corrientes estaban defasadas en atraso respecto a la tensión U .

REPARTO DE LA CARGA ENTRE DOS GENERADORES QUE TRABAJAN EN PARALELO.

Supondremos que se trata de dos generadores acoplados en paralelo; pero lo que explicaremos a continuación es aplicable al caso de varios generadores.

Como se verá más en detalle en el capítulo siguiente, los reguladores de velocidad de las máquinas motrices tienen un cierto grado de estatismo (es la diferencia entre la velocidad en vacío y a plena carga), la variación del grado de estatismo permite que la frecuencia de los generadores que funcionan en paralelo permanezca igual, aumente ó disminuya. Esto es de gran interés, para el reparto de la carga entre generadores que trabajan acoplados en paralelo.

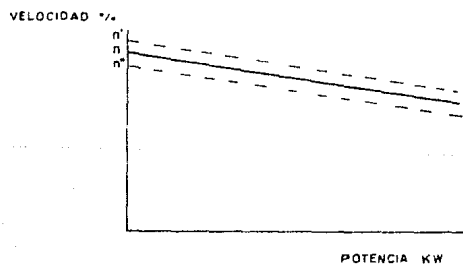
En la figura 3-32 se ha representado la curva de un regulador correspondiente a un grado de estatismo de un 3%; en este diagrama las abscisas representan las potencias de la máquina motriz y las ordenadas, el número de revoluciones de la misma. Como se ve, la curva se asemeja a una recta y en lo sucesivo - la consideraremos como tal.



CURVA PARA UN GRADO DE ESTADISTMO DE 3% DE REGULACION

FIGURA 3-32

Los reguladores tienen un cierto grado de insensibilidad, esto es una zona de indecisión alrededor de la curva de estadismo, como se puede observar en la figura 3-33. Esta zona se encuentra entre las líneas punteadas n' y n'' , despreciando esta insensibilidad supondremos que $n = n' = n''$ por el momento.



ZONA DE INESTABILIDAD EN LA CURVA DE ESTADISTMO

FIGURA 3-33

Si tomamos dos generadores iguales y que han de suministrar a la red su potencia máxima P , la figura 3-34 nos expresa el diagrama de funcionamiento y la forma de conducirse de los generadores con respecto a la velocidad en va cío. Suponiendo que el grado de estatismo es de 3% para ambas máquinas motrices. La intersección de las dos curvas corresponde a una abscisa P_1 que es la mitad de la potencia total suministrada a la red. Por lo tanto en vacío las máquinas motrices funcionan al 100% de su velocidad.

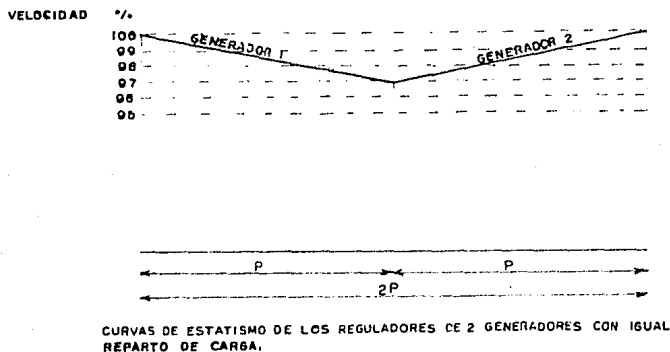


FIGURA 3-34

Si se tiene el caso, de que la máquina 1 ha de trabajar a plena carga y la máquina 2 solamente a media carga, la potencia total suministrada a la red sería de $1.5 P$; para conseguir el mismo grado de estatismo del 3% en va cío, la velocidad de la máquina 1 sería del 100%, y la máquina 2 del 98.4%, como se observa en la figura 3-35. Esto quiere decir, que si ambos generadores tienen el mismo estatismo, modificando únicamente la velocidad en vacío, podrá cargarse a voluntad cada una de ellas, repartiendo la carga de acuerdo a las necesidades del servicio. Si se aumenta convenientemente la velocidad de uno de los generadores, puede descargarse totalmente el otro generador, lo

que se utiliza en operación para separar un generador de la red.

Otro caso sería, si los grados de estatismo son diferentes en los dos generadores en este caso, es necesario que la velocidad en vacío de la máquina motriz que tiene mayor estatismo sea mayor que la velocidad en vacío de la máquina con menor grado de estatismo, como se podrá observar en la figura 3-36, para carga de 1/3 de la total, la máquina motriz 2 funcionará en vacío con una velocidad del 101% de su velocidad nominal.

Veamos ahora como afecta la insensibilidad de los reguladores en el funcionamiento de los generadores en paralelo, lo que se presenta siempre en la práctica. La figura 3-37, representa el diagrama de funcionamiento de dos generadores acoplados en paralelo, cuando el grado de insensibilidad de los reguladores de sus máquinas motrices es igual. La línea n' de la máquina 1, puede cortar a la línea n'' de la máquina 2, con lo cual, la potencia suministrada a la red por el generador 1 sería:

$$KP$$

y la potencia suministrada por el generador 2 será:

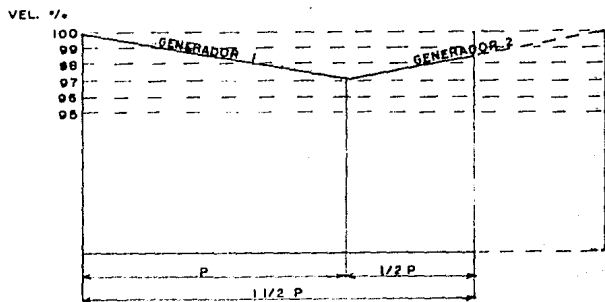
$$K_1 P$$

siendo:

$$K > 1, \quad K_1 < 1$$

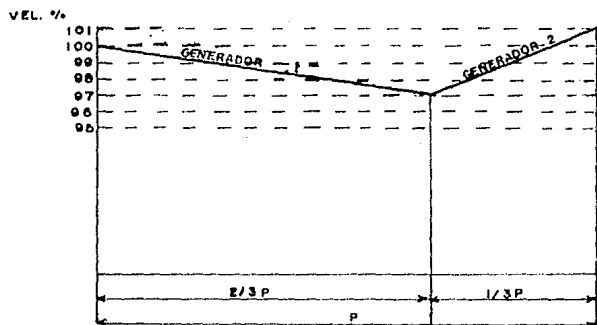
Lo que nos indica, que el suministro de potencia no será el mismo para los dos generadores. Razonando de la misma forma, se puede comprender que la situación momentánea de ambos generadores puede ser tal, que la línea n' de la máquina 2 corte a la línea n'' de la máquina 1, en este caso las condiciones descritas anteriormente se invertirán como se observa en la gráfica anterior.

De lo anterior puede deducirse que, la superficie comprendida en el cuadrilátero formado por dichas líneas, existe indecisión sobre la potencia que suministrará cada grupo, la cual puede ser comprendida entre los valores KP y $K_1 P$. Analizando la figura, observaremos que la diagonal d será menor cuando más estén inclinadas las líneas de estatismo, y naturalmente cuando menor sea la diagonal d , menor será también la zona de indecisión.



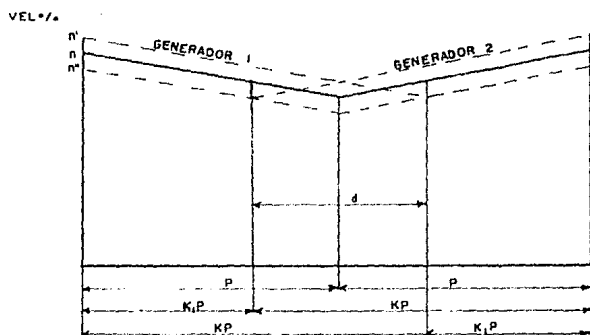
CURVAS DE ESTABILIZACION DE LOS REGULADORES DE 2 GENERADORES CON DESIGUAL REPARTO DE CARGA

FIGURA 3-35



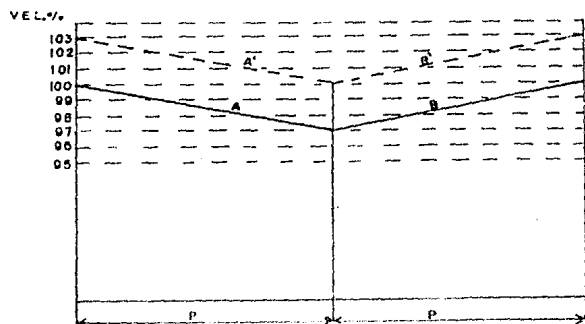
CURVAS DE ESTABILIZACION DE REGULADORES CON DISTINTO GRADO DE ESTABILIZACION PARA 2 GENERADORES DESIGUALES.

FIGURA 3-36



ZONAS DE INESTABILIDAD EN LAS CURVAS DE ESTADISTMO

FIGURA 3-37



DESPLAZAMIENTO DE LAS CURVAS DE ESTADISTMO PARA ALCANZAR LA FRECUENCIA NOMINAL A PLENA CARGA.

FIGURA 3-38

Por otro lado, el grado de estatismo no puede sobrepasar los límites impuestos por el valor mínimo que ha de tener la frecuencia de los generadores. Para ver dicha influencia nos referimos a la figura 3-38, suponiendo que cada generador suministra la mitad de potencia necesaria en la red, y que el grado de estatismo es del 3% para ambos generadores. Se tendrá que a la velocidad en vacío de 100%, corresponde la frecuencia nominal de 60 Hz., pero que a plena carga, con una velocidad de 97% de la velocidad en vacío, corresponde una frecuencia de:

$$f = 60 \frac{97}{100} = 58.2 \text{ Hz.}$$

En los motores acoplados a la red, ésta frecuencia produce una disminución de su velocidad, por lo que, el grado de estatismo no puede ser muy elevada, pero debe ser suficiente para que sea estable el funcionamiento en paralelo. Como es sabido, resulta muy conveniente que la frecuencia este muy próxima a su valor nominal para todas las cargas; para conseguir este propósito se acciona el regulador de la máquina motriz 1, aumentando su velocidad para tomar más carga, descargando en proporción a la máquina 2. Después se repite la operación con la máquina 2, hasta que vuelva a tomar su carga anterior y la potencia suministrada a la red por ambos generadores sea la misma. Esta operación debe ser realizada gradual y escalonadamente.

Procediendo como se explicó en el párrafo anterior, podemos trasladar las líneas A y B en la gráfica anterior, a las líneas A' y B' que corresponden a las nuevas condiciones de funcionamiento, con el mismo grado de estatismo pero con una velocidad en vacío de 103%; de esta forma, la velocidad a plena carga es de 100%, con la frecuencia correspondiente de 60 Hz., en vez de 58.2 Hz., como las anteriores condiciones de funcionamiento. si hubiera una interrupción de carga, los grupos funcionan con 103% de su velocidad nominal, circunstancia que habría de preverse en la construcción de las máquinas.

CAPÍTULO IV

SISTEMA DE EXCITACION Y REGULACION

4.1. PRINCIPIOS DE REGULACION DE GENERADORES SINCRONOS.

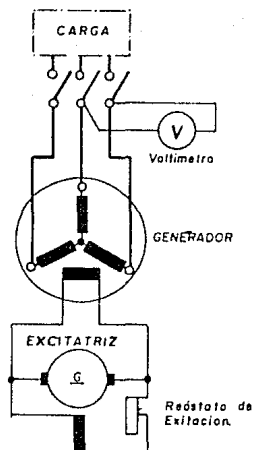
A los generadores de las centrales eléctricas se les exige que mantengan la tensión sensiblemente constante, estando sometidos a continuas variaciones de carga, por lo tanto es necesario también una continua regulación de tensión. Esta regulación de tensión es imperfecta si se realiza manualmente, para evitarlo se recurre a los reguladores automáticos, los cuales cuando se producen fluctuaciones de carga, incrementan ó disminuyen la excitación para adaptarla a las nuevas condiciones de carga.

Los generadores de las centrales eléctricas pueden funcionar en dos diferentes regímenes que son el estable y el transitorio. El primero es cuando la carga permanece constante; el segundo, es cuando se modifica lenta o instantáneamente. Nos interesa estudiar el régimen transitorio que ocurre de una perturbación, suponiendo un generador a velocidad constante, cualquiera que sea la carga que es el caso más común en la práctica.

Supongamos un generador trifásico que opera en vacío, a un velocidad y tensión nominal; su excitatriz posee un reostato de excitación que actúa sobre su campo inductor, figura 4-1. Si cerramos el interruptor podemos conectar la carga, la cual será parcialmente reactiva, la tensión bajará bruscamente, como se observa en la figura 4-2. La parte vertical AB, es la caída que se debe a la reactancia del generador, y la parte BC es el efecto de la reacción del inducido del generador.

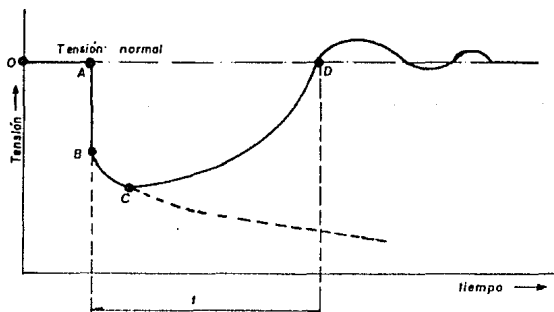
Esta reacción del inducido depende de la componente reactiva de la carga, si no se actuara sobre el reostato de la excitatriz, la tensión continuaría bajando como se representa en la línea punteada. La parte vertical de la curva tiene lugar en un tiempo nulo, el regulador no puede suprimirla ya que está caída es la que lo pone en funcionamiento, el regulador será más eficaz cuando opere más cerca del punto B. Un regulador tiene su punto de acción infinitamente cerca del punto B.

Regulación Manual de Tensión.- Si un generador es regulado manualmente, cuando el operador aprecia que la tensión empieza a bajar, maniobra inmediatamente sobre el reostato de excitación poniéndolo en corto circuito, la tensión sube, pero cuando el voltímetro indica un valor próximo al nominal, se deben insertar resistencia en el circuito de la excitatriz, pues de lo contrario la tensión crecería demasiado; por último se habrá de buscar por tanteo,-



CONEXIONES GENERADOR
TRIFASICO SINCRONO.

FIG. 4-1



—CURVAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR TRIFASICO SINCRONO EN
REGIMEN TRANSITORIO, CON REGULACION MANUAL DE LA TENSION. FIG. 4-2

el punto correspondiente a la tensión nominal. Esta regulación manual consigue los siguientes efectos:

Rama ABC: Caída de tensión

Rama CD : Elevación de tensión

Rama DE : Oscilaciones alrededor del punto definitivo de regulación.

Esto nos demuestra que, a pesar de la rápida puesta del reostato en corto circuito, el tiempo necesario para llevar la tensión a su valor nominal no es despreciable. La causa de este retardo es como se describe a continuación; para compensar la caída de tensión debida a la reactancia del generador, es necesario elevar la intensidad de la corriente que circula por los rearrollamientos de excitación de la excitatriz, reduciendo el valor de la resistencia del circuito inductor-reostato de un valor R_0 a un nuevo valor R menor que el anterior, siendo las intensidades de corrientes como sigue:

$$I_0 = \frac{U}{R_0} \quad ; \quad I = \frac{U}{R}$$

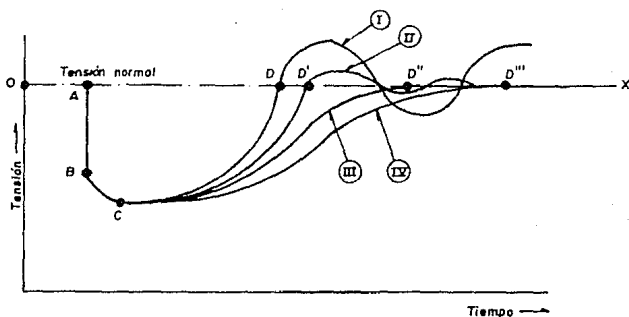
Se observa que en estas ecuaciones el tiempo no interviene, pero en el caso de los generadores debido a las inductancias, los efectos de las corrientes de autoinductancia no son despreciables; el tiempo de establecimiento de la corriente ó período transitorio es el que nos interesa más particularmente. La ecuación completa del circuito cuando se tiene en cuenta el efecto de las corrientes de autoinducción:

$$I(t) = \frac{E}{R_0} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right)$$

En término R/L se denomina constante de tiempo, el tiempo "t" que necesitamos para llevar la corriente I_0 a su nuevo valor $I(t)$, crece el coeficiente de autoinducción L , por lo tanto también con la reactancia $X = 2 \pi f L$.

La conclusión a la que se puede llegar es que, después de una perturbación importante de un generador, aunque se accione instantáneamente el reostato de excitación, habrá un período transitorio (ABCD), que es imposible suprimir en la actualidad. La misión del regulador será reducir en lo posible este período transitorio, actuando sobre la parte BCD de la curva anterior.

Funcionamiento de un Regulador de Tensión.- Supongamos un regulador, - que actúa muy rápidamente y al máximo de las posibilidades de la excitatriz; la tensión aumentará muy rápidamente pudiendo sobrepasar el valor de la tensión nominal, en ese momento el regulador actúa para hacerla bajar, pero -- por efecto de la elevada autoinducción de los circuitos inductores, la tensión crece y después decrece, pudiendo llegar a ser una función periódica - no amortiguada, que provoca oscilaciones de tensión con grandes amplitudes-alrededor del eje OX de la figura 4-3. Por lo tanto hay que dar al regulador un amortiguamiento apropiado para retardar la regulación.



CURVAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR TRIFASICO SINCRONO EN REGIMEN TRANSITORIO, PARA DIFERENTES FORMAS DE REGULACION AUTOMATICA DE LA TENSION.

FIG. 4-3

Observando las curvas de la figura 4-3 tenemos lo siguiente:

- 1.- La curva tiene un amortiguamiento insuficiente; por lo tanto se obtiene oscilaciones no amortiguadas y el regulador no llega nunca a la posición de equilibrio.

- 2.- Si se aumenta el amortiguamiento, las oscilaciones se hacen rápidamente amortiguadas (curva II), y el regulador llega a la posición de equilibrio, después de dos ó tres oscilaciones.
- 3.- Con un amortiguamiento perfecto, el funcionamiento del regulador se hace aperiódico (curva III), es decir se llega a la posición de equilibrio - sin ninguna oscilación.
- 4.- Con un amortiguamiento excesivo, el tiempo de perturbación se alarga y - aunque el funcionamiento es también aperiódico (curva IV), tarda un tiempo excesivo, ó no llega a alcanzar la posición de equilibrio.

Sobrerregulación.- Como se vió al regular manualmente el generador, fue necesario poner reostato de campo en corto circuito en el momento de aplicación de la carga, para elevar rápidamente la tensión, llevando el reostato - más allá del valor estrictamente necesario para que la tensión volviera a su valor nominal, o sea que aplicamos un sobrerregulación.

Características de los Reguladores de Tensión.- De acuerdo con lo expuesto, podemos decir que un buen regulador de tensión debe tener las siguientes característica:

- a) Rápidez de respuesta.- Es decir, ha de intervenir rápidamente después de una variación de carga, para evitar que la tensión caiga rápidamente.
- b) Exactitud.- Para llevar la tensión al valor de régimen, después de una perturbación.
- c) Sensibilidad.- Para reaccionar a las perturbaciones débiles.
- d) Amortiguación eficaz.- Para evitar la producción de oscilaciones. De ser posible el amortiguamiento ha de ser ajustable para que el usuario pueda ajustarlo a las características de su generador.
- e) Sobrerregulación.- Para aprovechar al máximo las posibilidades del generador.

4.2. PRINCIPIOS DE EXCITACION DE GENERADORES SINCRONOS.

La excitación de los generador se realiza por medio de corriente continua que recorre el circuito de las bobinas inductoras del rotor. El sistema de excitación, consta de los aparatos y máquinas cuyo objeto es suministrar-

la energía necesaria para excitar al generador. Este sistema no debe suministrar una potencia fija, si no debe desarrollar la potencia que convenga y mo dificarla tan rápidamente como sea posible, es decir poseer una gran velocidad de respuesta.

Debido a que en la práctica las variaciones de carga provocan variaciones en la tensión del generador, las cualidades del sistema de excitación, son mejores según la rapidez con la cual es capaz de restablecer el valor nominal de voltaje. La misión del sistema de excitación se puede resumir en dos conceptos: Primero.- Mantener la corriente rotorica en su valor necesario durante la perturbación y la segunda.- Restablecer el valor de la tensión en bornes del generador lo más rápido posible.

Velocidad de Respuestas de la Excitatriz.- Esta se expresa en volts por seg., tomándose como una excitatriz de respuesta rápida cuando su tensión, se eleva mínimamente un 300 %/seg., en función de su voltaje nominal. En las redes que trabajan en paralelo es necesario que, al producirse cortos circuitos lejanos, la tensión de las máquinas síncronas no baje demasiado durante el tiempo que transcurre hasta la desconexión del corto circuito, pues de otro modo desaparecería el sincronismo.

Lo anterior implica que la excitatriz debe de poder proporcionar un exceso de potencia, para contrarrestar el campo opositor provocado por el corto circuito. Según las circunstancias habrá de contar con un exceso de tensión de 20 a 50 %, de voltaje nominal.

La tensión de excitación generalmente utilizada, es de 125 V., en las centrales pequeñas y medianas, y de 250 V., en las centrales de gran potencia. La potencia del equipo de excitación es de alrededor para baja y mediana potencia, en generadores de gran potencia y elevada velocidad basta con una potencia de excitación equivalente a un 0.5 % de la potencia total del generador.

En la actualidad los sistemas de excitación se han modernizado, utilizando dispositivos electrónicos varios como : diodos, tiristores, amplificadores magnéticos, etc.

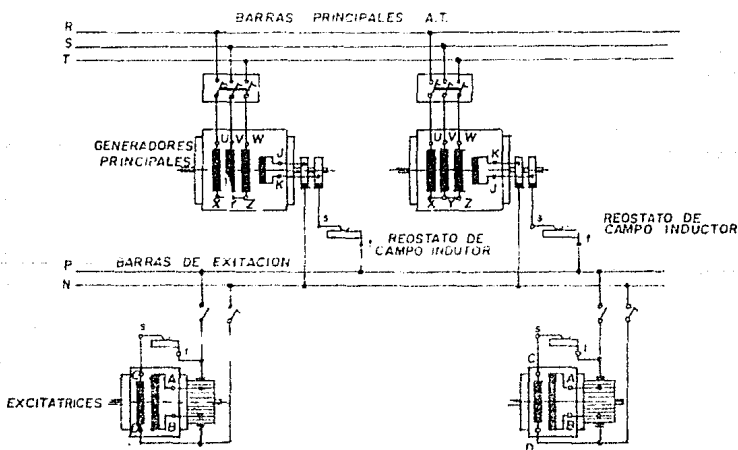
Con estos nuevos procedimientos se consiguen ventajas sustanciales tales como: Mayor velocidad de respuesta, Menor oscilación de la tensión del generador ausencia de aparatos móviles, etc.

Para mayor claridad de ésta exposición clasificaremos en cuatro grupos los sistemas de excitación existentes:

- 1.- Sistemas de excitación con excitatriz de corriente continua.
- 2.- Sistemas de excitación con excitatriz de corriente alterna.
- 3.- sistemas de excitación sin excitatriz.

1.- Sistemas de excitación con excitatriz de corriente continua.

a) Excitación Independiente.- En este sistema, un solo grupo excitatriz formado por una dinamo de tensión constante y un motor eléctrico ó una turbina auxiliar, sirve para la excitación de varios generadores regulando-se la corriente de éstos por un reostato de campo. En la actualidad su uso a disminuido mucho por la inestabilidad de la zona de regulación para valores bajos de la tensión, no permitir una variación lo suficientemente fina de la tensión y no prestarse a la aplicación de reguladores automáticos con la elevada velocidad de respuesta, un diagrama de este tipo de sistemas se muestra en la figura 4-4.

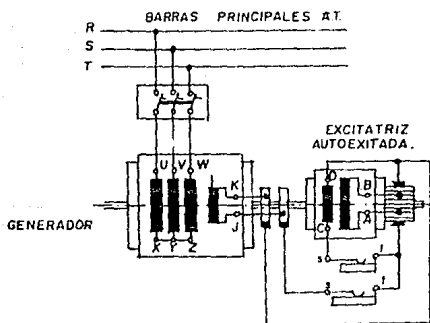


SISTEMA DE EXCITACION CON EXCITATRICES INDEPENDIENTES

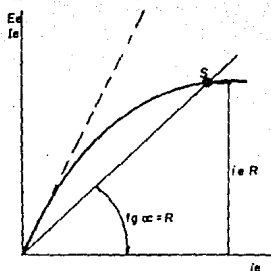
FIG. 4-4.

b) **Excitación propia.**- Por medio de una excitatriz autoexcitada en derivación, con regulación de la corriente de excitación del alternador, por medio del reostato de campo de la excitatriz. Este sistema presenta los siguientes inconvenientes: pérdidas sensibles en el reostato de regulación, baja velocidad de respuesta y zona inestable para bajos valores de voltaje de la excitatriz, ver figura 4-5.

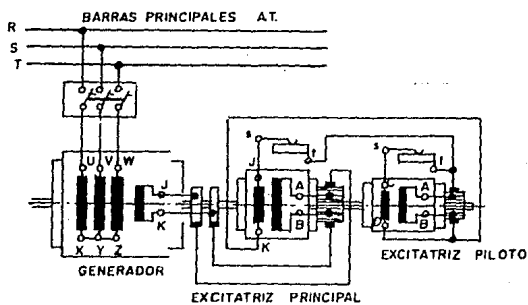
La figura 4-6, nos representa la característica en vacío de este tipo de excitatriz, la cual no da la f.e.m., inducida en ella en función de su co



SISTEMA DE EXITACION CON EXCITATRIZ AUTOEXCITADA DERIVACION FIG. 4-5.



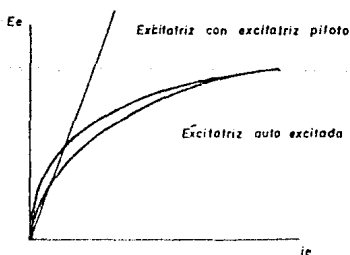
CARACTERÍSTICAS EN VACÍO DE UNA EXCITATRIZ AUTOEXCITADA DE VACÍO FIG. 4-6



SISTEMA DE EXCITATRIZ CON EXCITATRIZ PRINCIPAL Y EXCITATRIZ PILOTO. FIG. 4-7

riente de excitación. La autoexcitación será posible si la recta $i_e R$, llamada recta de resistencia del inductor, corta a la curva característica en algún punto S, si variamos la resistencia R ($\tan \alpha = R$), la inclinación de la recta cambiará, pudiendo llegar a confundirse con la parte recta de la curva característica, perdiéndose las condiciones de estabilidad.

- c) Excitación por grupo sobre el eje del generador.- Este sistema no constituye una excitatriz principal, excitada a su vez por una excitatriz piloto. Es ampliamente usado porque permite eliminar el reostato de campo del generador, y obtener una mayor amplitud de regulación ver figura 4-7, hace más rápida la variación del flujo inductor del generador principal y aumenta la sensibilidad de regulación. Un diagrama de este sistema nos lo muestra la figura 4-8.



COMPARACION DE LAS CARACTERISTICAS EN VACIO DE UNA EXCITATRIZ AUTOEXCITADA Y DE UNA EXCITATRIZ CON EXCITATRIZ PILOTO. FIG. 4-8.

- d) Excitación por un grupo montado sobre el eje del generador, con excitatriz piloto a tensión constante.- Está formado por una excitatriz principal autoexcitada y una excitatriz piloto funcionando a tensión constante, sumando su tensión de salida a la de la excitatriz principal. Este sistema reúne la ventaja de los anteriores, pudiendo fácilmente ser aplicado a máquinas antiguas y permitiendo la instalación de reguladores rápidos de tensión. Ver figura 4-9.
- e) Excitación por medio de un grupo independiente.- Esta formado por una excitatriz principal y una piloto, accionadas por un motor eléctrico, turbina auxiliar ó una caja de engranes acoplada al eje del generador. Ver figura 4-10.

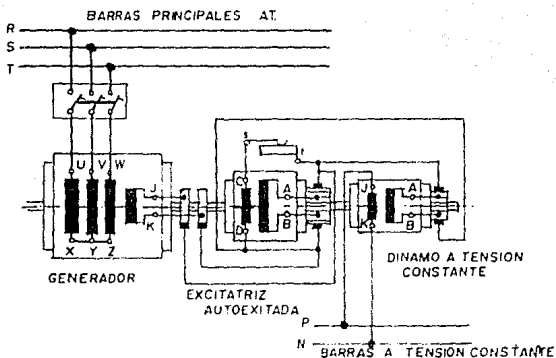
2. Sistemas de excitación con excitatriz de corriente alterna.

Debido al desarrollo de rectificadores de silicio de gran potencia, ha sido posible reemplazar las excitatrices de corriente continua por máquinas de corriente alterna, eliminando también el colector y las escobillas. La frecuencia de las máquinas de corriente alterna que alimentan la excitación, puede ser más elevada que la del generador principal, por lo tanto su construcción será más económica.

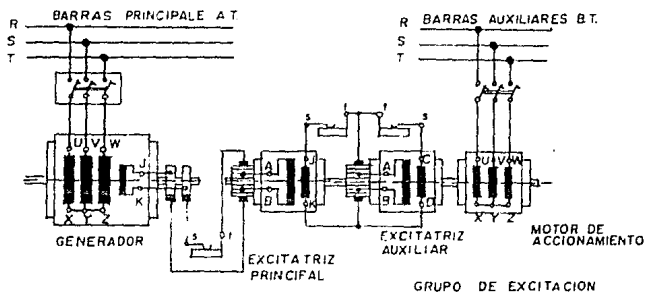
La figura 4-11, nos muestra dos esquemas simplificados de este sistema; se utiliza una excitatriz piloto de imanes permanentes con inducido de tipo estacionario, que genera corriente trifásica de alta frecuencia (420 Hz.), para alimentar el regulador de tensión. Este regulador suministra corriente continua regulada, al campo inductor estacionario de la excitatriz principal de corriente alterna, de inducido giratorio. La corriente que sale de la excitatriz principal pasa por un conjunto de diodos de silicio, una vez rectificada alimenta al inductor del generador principal.

El sistema lleva fusibles conectados en serie con cada uno de estos diodos, para protegerlos contra fallas de estos. La excitatriz y el rectificador pueden ir conectados en uno de estos dos circuitos básicos:

- a) Una excitatriz de corriente alterna conectada en estrella, para alimentar los diodos de cada fase y provista de circuito de retorno que pasa por el neutro.



SISTEMA DE EXCITACION CON EXCITATRIZ PRINCIPAL AUTOEXCITADA Y DINAMO ELEVADORA PILOTO DE FUNCIONAMIENTO A TENSION CONSTANTE FIG. 4-9



SISTEMA DE EXCITACION CON GRUPO DE EXCITACION INDEPENDIENTE ACCIONADO POR MOTOR ELECTRICO FIG. 4-10

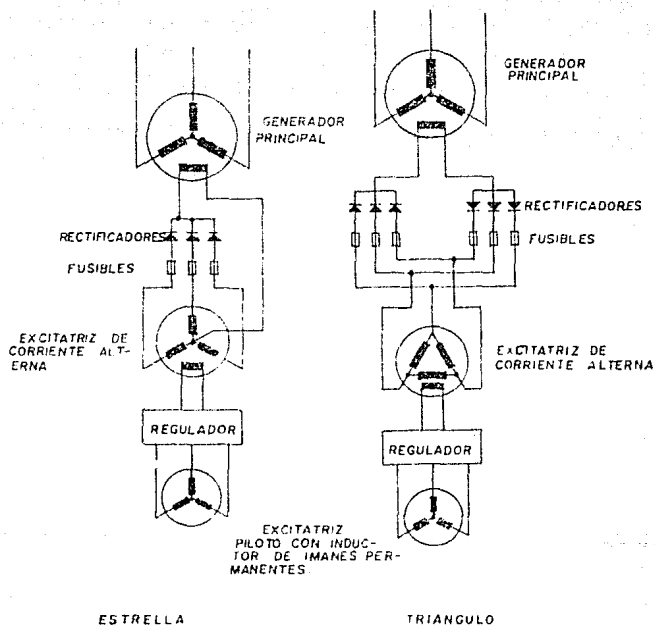


FIG. 4 - II

- b) Una excitatriz de corriente alterna conectada en triángulo para alimentar un circuito rectificador de onda completa en derivación.

En las dos variantes, cada fase tiene varias ramas en derivación para llevar la corriente que pasa por los diodos, en número de estas ramas depende de la intensidad de corriente necesaria. El número de diodos conectados en serie depende, a su vez, del valor inverso de la tensión. Las ventajas que presenta este tipo de excitación sobre los sistemas con excitatriz de corriente continua son:

- a) Mínimo mantenimiento, si se exceptúa la vigilancia del adecuado flujo de aceite, comprobación de las temperaturas, inspección visual de los fusibles y de cuando en cuando, medición de la resistencia de aislamiento.
- b) No existe el problema del polvo de carbón, ya que no se emplean escobillas, de esta forma, puede prolongarse el tiempo necesario para las limpiezas periódicas y también, disminuye la posibilidad de que baje la resistencia de aislamiento.
- c) El sistema no es afectado por la contaminación atmosférica, ya que todos sus componentes van encerrados herméticamente.
- d) Se evitan las periódicas reposiciones de las escobillas y la operación de limpieza y conservación del colector y de los anillos rozantes.

3. Sistema de excitación sin excitatriz.

La característica de estos sistemas, es que carecen de una máquina giratoria que suministre la corriente de excitación. Esta corriente es proporcionada por rectificadores estáticos; la corriente alterna primaria para alimentar estos rectificadores puede proceder del mismo generador ó de una fuente independiente de energía, por lo tanto existen dos grupos:

- a) Generadores autoexcitados.- la corriente de excitación procede del propio generador y es rectificadora después, utilizándose generalmente diodos de silicio.
- b) Generadores excitados por una fuente externa de energía.- la corriente de excitación procede de una red exterior de corriente alterna y posteriormente es rectificadora por medio de diodos ó tiristores.

Generadores autoexcitados.- Las bases en que esta fundamentado el principio de autoexcitación, se describen a continuación:

Con excitación constante, la tensión del generador síncrono es función de su carga, las variaciones de la tensión procede principalmente de la reacción de inducido, es decir, que dependen del valor de la corriente y del factor de potencia. De forma aproximada, la excitación necesaria para una tensión constante en los bornes del generador, es proporcional a la fuerza electromotriz, E , resultante de la suma geométrica de la tensión en bornes U y de la caída de tensión $X_S I$, debida a la reatancia síncrona es decir, que tenemos:

$$E = U + jX_S I$$

Partiendo de magnitudes alternas, el dispositivo de autoexcitación produce, por medio de rectificadores y por la adición geométrica de las componentes de tensión I_u y de corriente I_i (estas componentes son producidas por la tensión y la corriente a la salida del generador, para alimentar al rectificador a través de un transformador), la corriente de excitación necesaria I_e , ver figura 4-12. El dispositivo autocompensado, utiliza directamente las variaciones de corriente teniendo en cuenta el factor de potencia, para mantener constante la tensión.

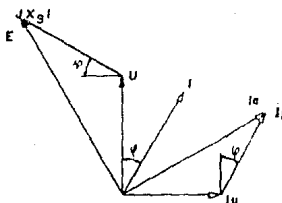
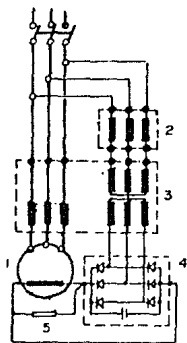


DIAGRAMA VECTORIAL DE UN ALTERNADOR CON AUTOEXCITACION.

En la mayoría de los casos, la tensión remanente del generador basta para superar el límite inferior de tensión de los rectificadores y la caída de tensión en las escobillas de los anillos colectores; por esta razón, el dispositivo puede autoamortiguarse. Generalmente basta con este dispositivo, si se quiere aumentar la precisión, puede agregarse un regulador rápido. La figura 4-13, nos muestra un diagrama simplificado de un sistema autoexcitado.



ESQUEMA DEL PRINCIPIO TRIFASICO DE UN DISPOSITIVO DE AUTOEXCITACION COMPENSADO SIMPLE.

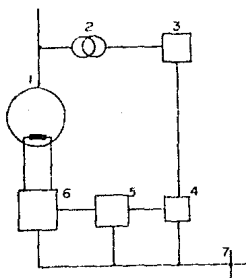
FIG. 4 - 13

Generadores excitados por una fuente independiente de energía.

Quando se dispone de una fuente segura de corriente alterna y se renuncia a la autonomía, se puede utilizar esta fuente para excitar los generadores síncronos por medio de transductores y rectificadores.

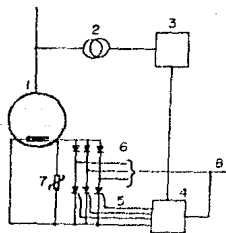
Un sistema representativo de este tipo de excitación se muestra en la figura 4-14, está formado por transductores en cascada, el escalón 6 de -- transductores de potencia está gobernado por dos escalones previos de amplificación 4 y 5, alimentados desde una red auxiliar 7. Dependiendo de potencia de la máquina será el número de escalones de amplificación.

En la actualidad debido al desarrollo de los rectificadores de silicio controlados, es posible excitar los generadores síncronos, controlando el puerto de entrada de estos tiristores por medio de un regulador electrónico. Una ventaja que nos ofrecen estos dispositivos, es que mediante un mando especial permiten establecer y cortar la corriente continua, lo que permite por medio de un ciclo apropiado de impulsos e intervalos de duración variable, la posibilidad de utilizarlos para la regulación casi sin pérdidas. La figura 4-15, nos muestra un diagrama de este tipo de excitación.



REGULACION DE UN ALTERNADOR CON EXCITACION ALIMENTADA POR UNA RED AUXILIAR.

FIG. 4 - 14



EXCITACION DE UN GENERADOR TRIFASICO SINCRONO POR MEDIO DE TIRISTORES.

FIG. 4 - 15

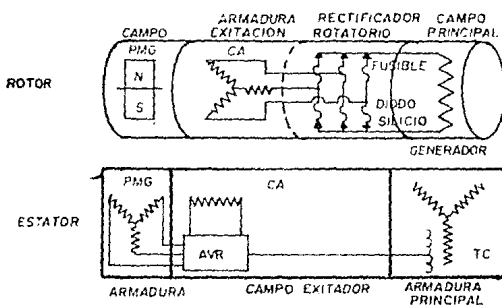
4.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN Y EXCITACIÓN DEL GENERADOR.

EXCITADOR SIN ESCOBILLAS

Clasificación del excitador sin escobillas.- El excitador sin escobillas es conectado al final de la flecha del generador, directamente con un acoplamiento sólido.

Norma.	International Electrotechnical Commission -- Standards (IEC).
Rango de salida C.D.	150 Kw. 250 V. 3000/3600 r.p.m.
Excitador C.A.	167 KVA. 150 Kw. 200 V. 0.9 fp. 482 A. -- 3000/3600 r.p.m. 200/240 Hz. 8 polos, trifásico. Aislamiento clase B.
Rectificador rotativo.	Trifásico, rectificador de onda completa (conexión Graetz)
Generador magnético.	Trifásico. 3000/3600 r.p.m. 350/420 Hz. 14 - polos. 3/3.6 KVA. 2.75/3.42 Kw. 0.95 fp. -- Permanente (PMG). 100/120 V, 17.3 A.

Principios del sistema de excitación sin escobillas.- En la figura 4-17, se muestra un sistema de excitación sin escobillas, la salida del rotor (armadura) de C.A. es rectificada por los diodos del rectificador rotativo y alimentada al campo principal del turbogenerador a través de la flecha.



SISTEMA DE EXCITACION SIN ESCOBILLAS FIG. 4-17

El rectificador rotativo, la armadura del excitador de C.A. y el campo principal del generador están todos montados en la misma flecha; por lo tanto, esto elimina escobillas, conmutadores y anillos colectores.

La corriente de campo del excitador de C.A. es alimentada desde la salida del generador magnético permanente (excitadora piloto), montado en la flecha del excitador y desde el transformador de corriente montado en la terminales principales del generador. Esta corriente es controlada por el regulador automático de voltaje (AVR), del tipo tiristores.

Circuito Rectificador.- En la figura 4-18, se muestra el arreglo del circuito rectificador, el cual es trifásico con conexión de onda completa, tres diodos en paralelo para cada fase (conexión Graetz). Son incluidas resistencias de tres Kilo-ohms en los circuitos paralelo, para asegurar una correcta división del voltaje entre los diodos y fusibles de protección conectados en serie con los diodos. Los diodos de silicio deben ser capaces de soportar hasta 600 A.C. D., en el caso de esta máquina el número de circuitos en paralelo es de tres, y alrededor de 1800 A.C.D., están disponibles a la salida.

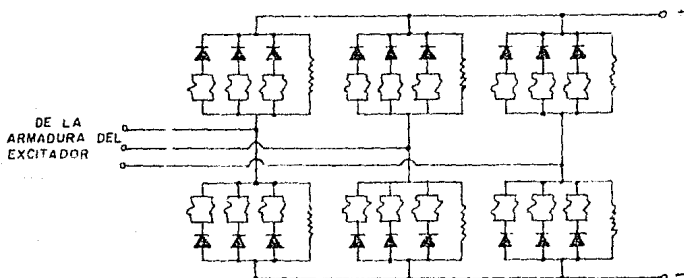


FIG. 4-18

Construcción del excitador:

- 1.- Arreglo general.- La figura 4-19, muestra un corte seccional del excitador, las partes principales son, el generador magnético permanente, el excitador de C.A. y el rectificador rotativo. La flecha es soportada en el lado del excitador de C.A. por un pedestal donde va montado el rodamiento. En el otro extremo de la flecha esta la muesca de acoplamiento, para el centrado de la flecha del generador.

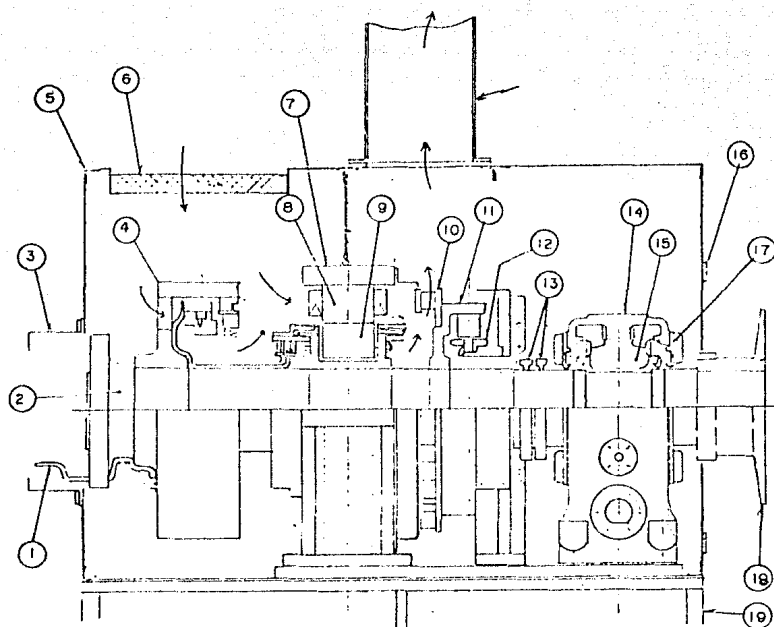
Las terminales de salida de C.D. del rectificador rotativo, pasan el acoplamiento a través de las ranuras maquinadas hasta el otro lado. El excitador está instalado sobre el tanque de aceite del sistema de lubricación y cubierto por su carcasa. El aire de enfriamiento es tomado a través del filtro de aire previsto en la cubierta del excitador y extraído a través del ducto de aire por el ventilador centrífugo, montado sobre el aro del IMG.

Calentadores (3 X 200 watts) están provistos en la carcasa para proteger los aislamientos contra el deterioro del aislamiento cuando la máquina está en reposo. Pequeños anillos colectores y escobillas operados por un selenoide, para detectar el circuito de aterrizaje, están colocados entre el pedestal y el IMG.

- 2.- Excitador de C.A. - Tipo horizontal, de polos salientes, armadura rotativa, 8 polos, tres fases, aislamiento clase B.

La salida de corriente de la armadura es alimentada hacia el rectificador rotativo. El estator (campo) y el rotor (armadura) están formados por discos de acero laminados con alto grado de silicio y con pernos de sujeción no magnéticos para reducir las pérdidas por corriente de Eddy. Las bobinas de la armadura están fuertemente sujetas con aislamientos epóxicos, y los circuitos de fase están arreglados para que la terminal interna de la bobina forme la conexión trifásica.

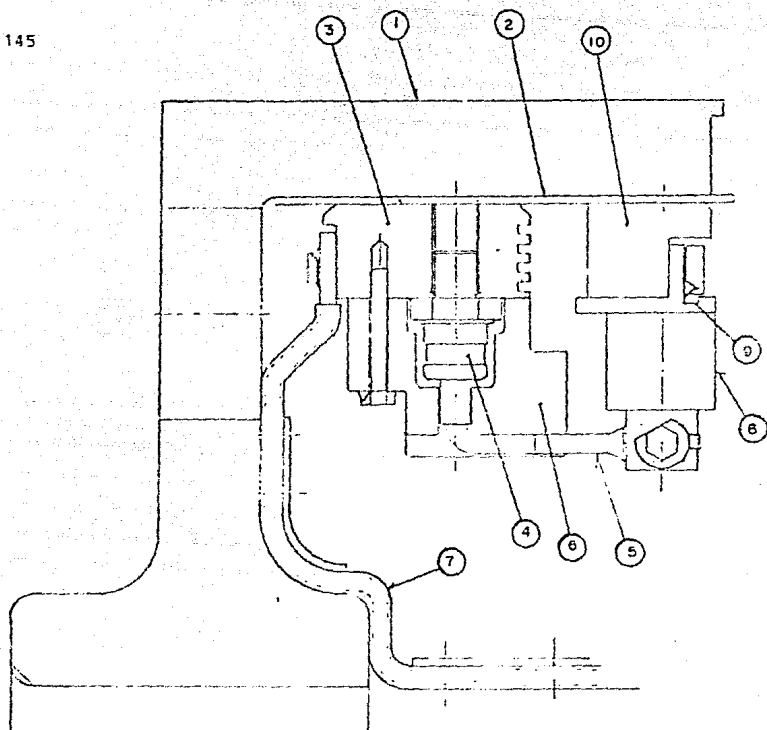
- 3.- Rectificador rotativo.- Los principales componentes del rectificador rotativo con: Diodos de silicio, fusibles, resistencias y disipadores de calor sujetos al lado interno de la rueda giratoria como se muestra en la figura 4-20



1	TERMINAL DEL EXCITACION	11	CAMPO DEL PMG (ROTOR)
2	FLECHA	12	ARMADURA DEL PMG (ESTATOR)
3	CUBIERTA DEL COPLE	13	ANILLO COLECTOR (DETECTOR DE TIERRA)
4	RUEDA DE RECTIFICADORES	14	PEDESTAL
5	CUBIERTA DEL EXCITADOR	15	RODAMIENTO
6	FILTRO DE AIRE	16	ANILLO DE SELLO
7	EXCITADOR DE C. A.	17	SELLO DE ACEITE
8	" CAMPO (ESTATOR)	18	COPLE BENDIX
9	" ARMADURA (ROTOR)	19	TANQUE DE ACEITE
10	VENTILADOR		
N°	DESCRIPCION	N°	DESCRIPCION

CORTE SECCIONAL DEL EXCITADOR

FIGURA 4-19



N°	DESCRIPCION	N°	DESCRIPCION
1	BASE DE RECTIFICADOR	6	SOPORTE DE TERMINAL
2	PLACA AISLANTE	7	TERMINAL
3	DISIPADOR DE CALOR	8	FUSIBLE
4	DIODO DE SILICIO	9	INDICADOR
5	TERMINAL DEL DIODO	10	SOPORTE DE LATON

FIGURA 4-20

La rueda giratoria del rectificador está montada sobre la flecha y las - placas de aislamiento son fijadas al lado de ella, los diodos están montados en las bases a través de disipadores de calor de metal ligero. Los fusibles poseen un indicador, el cual si el fusible es operado, se dispara a causa de la fuerza centrífuga hacia una posición, donde una luz estroboscópica puede detectarlo fácilmente.

- 4.- Piloto del excitador (PMG).- El piloto del excitador, utiliza magnetos permanentes de alta confiabilidad como campo, y está montado sobre la flecha del excitador, su salida es rectificada y conducida al AVR.
- 5.- Detector a tierra del circuito de campo.- Para poder detectar cuando existe alguna fuga a tierra del circuito de campo, son colocados pequeños anillos colectores de acero y escobillas operadas por selenoide, entre el PMG y al pedestal de soporte. Un anillo colector es conectado al punto neutro del devanado de la armadura del excitador de C.A. y otro anillo es conectado a tierra (flecha del excitador).

Operación del excitador.- No es difícil operar el excitador sin escobillas, comparado con otro tipo de excitadores, la corriente de campo y la temperatura de la bobina del rotor del generador principal, deberán estimarse por medio de curvas elaboradas para este propósito utilizando temporalmente anillos colectores.

- 1.- Estimación de la corriente de campo del generador.- El valor de la corriente de campo para diferentes cargas, puede ser estimado en gráficas elaboradas para los diferentes valores de voltaje y frecuencia, que puede entregar el generador. La figura 4-21, muestra la curva de corriente de salida Vs., corriente de campo para los valores nominales utilizados en nuestro caso (15.8 KV. 60 Hz.). En caso que las condiciones de carga no coincidan exactamente con las curvas, se puede realizar interpolación entre ellas.
- 2.- Estimación de la temperatura de la bobina del rotor.- Esta temperatura puede ser estimada por medio de la gráfica de la figura 4-22, usando lecturas de amperes de excitación de C.A. También para usar esta curva se puede estimar la corriente del rotor (campo).

CORRIENTE DE SALIDA VS. CORRIENTE CAMPO DEL GENERADOR.
VOLTAJE TERMINAL 13.8KV.

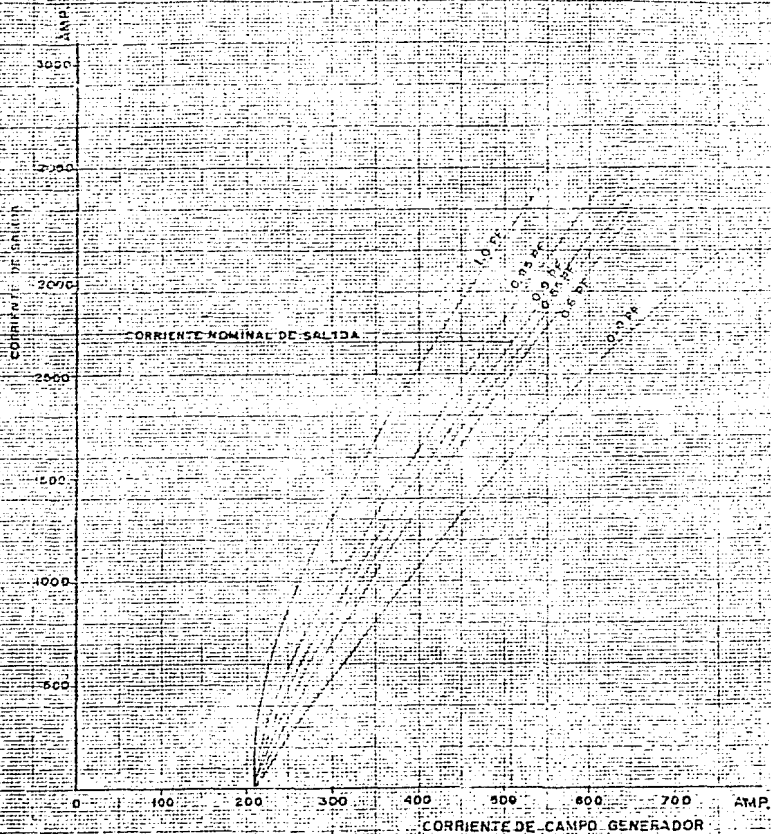


FIGURA 4-21

MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION

147

AIR COOLED TWIN-PAC GENERATOR

60Hz, 3600rpm OPERATION

GEN. ROTOR TEMP. RISE & CURRENT
VS. AC. EXC. FIELD CURRENT

AC. EXC. FIELD CURRENT

GEN. ROTOR
CURRENT

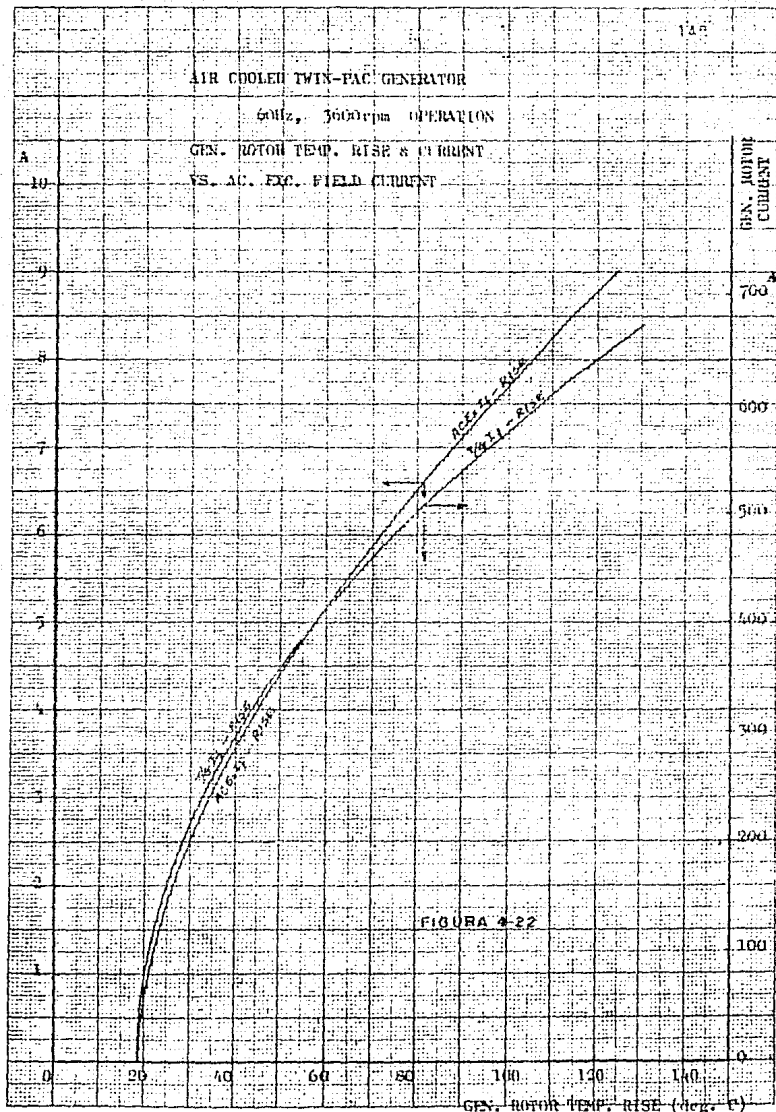


FIGURA 4-22

GEN. ROTOR TEMP. RISE (deg. C)

3.- Verificación de fusibles durante la operación.- Los diodos de silicio tienen terminales de conexión y bases de montaje especialmente diseñadas para soportar las velocidades y fuerzas rotacionales. Los fusibles protegen que cualquier circuito no tenga un diodo en corto circuito, y no operan bajo condiciones de operación como corto circuito del generador principal, o esfuerzos en el campo.

Cada fusible es equipado con un indicador, que se desplaza hacia una posición visible, cuando es operado el fusible y se puede detectar por medio de una luz estroboscópica. Si un diodo abre una rama de una terminal, el excitador puede seguir operando con los demás diodos, pero si todos los fusibles de una terminal se abren el generador debe ser disparado inmediatamente y los diodos y fusibles cambiados.

La operación práctica del excitador, está gobernada por la operación del regulador de voltaje AVR, y éste a su vez recibe señales de otros dispositivos como el Detector de potencia reactiva, el compensador de corriente cruzada, etc. como se muestra en la figura 4-23, diagrama simplificado del sistema de excitación. Para poder tener una idea de el funcionamiento de todo el sistema de excitación, en las siguientes partes de este capítulo describiremos lo antes citado.

REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE (AVR).

Este dispositivo (AVR), es usado para control del voltaje del generador de CA., (excitatriz principal), el que controla la corriente de excitación del generador, por medio de tiristores y manteniendo el voltaje del generador constante. Está provisto con circuitos limitadores de excitación mínima y sobreexcitación, pudiendo ser usado para el control del factor de potencia.

Especificaciones:

- (1) Regulación de voltaje. Dentro del 1% del valor de FP.
- (2) Alimentación de voltaje de C.A. Trifásico, 55V, 50/60 Hz.
- (3) Alimentación de voltaje de C.A., del tiristor amplificador: trifásica, 100/120 V, 350/420 Hz.
- (4) Máxima corriente de salida del tiristor amplificador: 9.2ACD.
Configuración general del sistema AVR se muestra en la figura 4-24, - como un diagrama de bloques, En la misma figura la parte encerrada - con líneas punteadas es el sistema AVR.

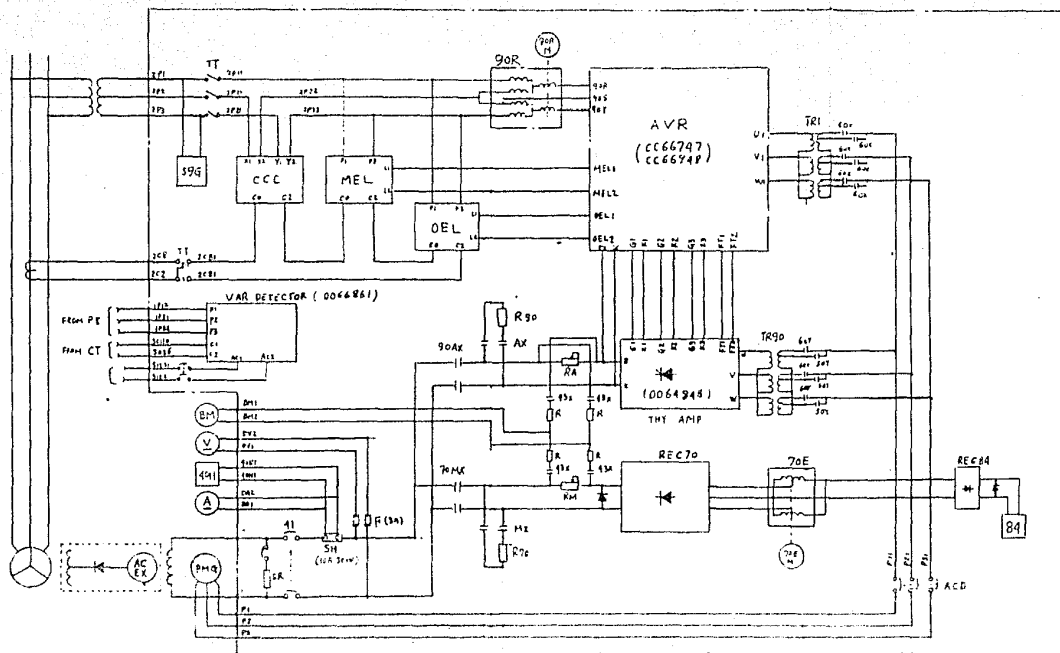
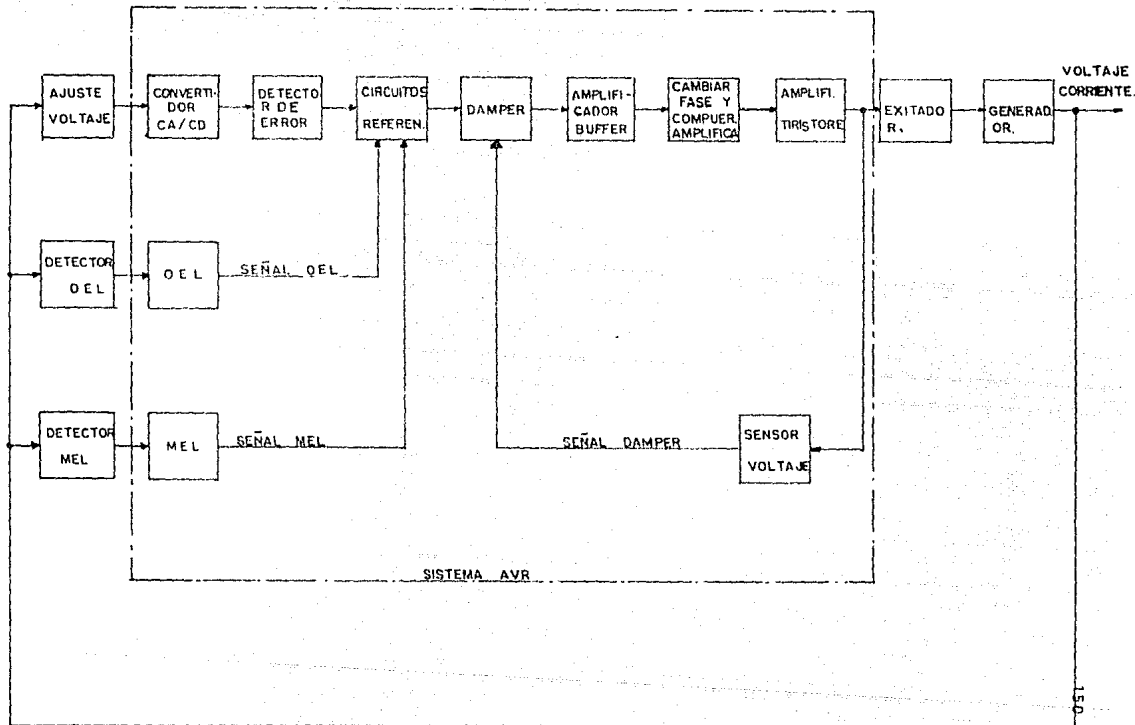


DIAGRAMA DEL SISTEMA DE EXCITACION DEL GENERADOR
 FIGURA 4-23

MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION

CC94200



SISTEMA AVR FIG. 4 - 24

Al principio la salida de voltaje del generador es dirigida hacia el convertidor de CA/CD del AVR a través del ajustador de voltaje CD. Esta alimentación de voltaje es comparada con el voltaje de referencia por el detector de error, introduciendo el registro como señal de error y alimenta a través del amplificador de amortiguación como señal de entrada del desviador de fase y puerta de amplificación. La variación de esta señal de entrada controla la desviación de fase del tiristor por medio del desviador de fase y puerta de amplificación; dando como resultado, la salida del tiristor amplificador.

La corriente de campo del excitador, es cambiada y la salida de voltaje del generador es controlada para permanecer constante. La salida del tiristor amplificador es retroalimentada por el registro, revisando la señal de error y manteniendo estable la operación del AVR.

El sistema AVR está provisto con limitador de sobreexcitación (OEL) y el limitador de excitación mínima (MEL), los límites detectados por estos dispositivos son amplificados y de acuerdo a las señales obtenidas, dirigidos hacia los circuitos de referencia, donde la corriente de campo del generador es limitada con respecto a la señal de error.

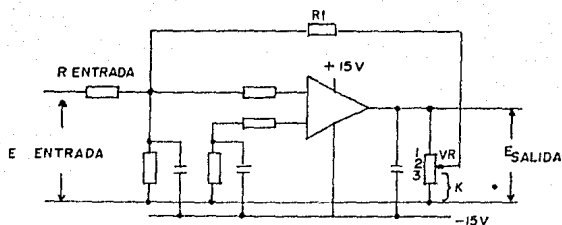
Descripción de operación de los componentes del AVR:

1.- Amplificadores operacionales.- Estos, son utilizados en los diferentes circuitos de amplificación del AVR (Detector de error, OEL, MEL, etc.), el circuito básico de amplificación se muestra en la figura 4-25. La relación matemática entre la entrada y la salida del amplificador se da en la siguiente ecuación:

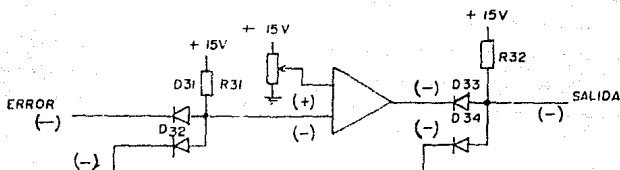
$$\text{Ganancia} = \frac{V. \text{ sal.}}{V. \text{ ent.}} = \frac{R_f}{E \text{ ent.}} \cdot \frac{1}{K}$$

La ganancia del amplificador operacional puede ser ajustada por medio de la resistencia variable VR entre un rango de $R_f/rent.$ al infinito.

- 2.- Convertidor CA/CD.- Tiene la función de convertir el voltaje de salida del generador en la señal de C.D. a través del transformador TR101, los rectificadores de corriente D101 al D106, el capacitor C101 y el reactor L101. Dirigiendo esta señal al detector de error a través de la resistencia variable VR101, la cual sirve para variar el valor de esta señal de voltaje, Figura 4-26.
- 3.- Detector de error.- Sirve para comparar el voltaje de salida de el generador (+), con el voltaje de referencia (-), a través de la resistencia variable VR5 (circuito impreso U-OP2-1, figura 4-26) y del amplificando el error de voltaje. Si se quiere tener la salida como señal negativa, el voltaje de referencia es puesto un poco más grande que el voltaje de salida del generador.
- 4.- Limitadores de excitación mínima y sobreexcitación: (OEL, MEL). Las señales OEL y MEL, son negativas cuando los límites fijados no son detectados y positivas cuando éstos límites se alcanzan. Estas señales son dirigidas hacia los circuitos OEL y MEL del AVR figura 4-26, los amplificadores operacionales de estos circuitos, son construidos de tal manera que cualquier salida es cero cuando la señal de entrada es negativa y negativa cuando la señal de entrada es positiva. De acuerdo con esto, la señal de salida (señal limitadora) del OEL o MEL es dirigida al circuito de preferencia sólo cuando cualquier límite es alcanzado.
- 5.- Circuito de preferencia.- Como se muestra en la figura 4-27, si más de una señal negativa es dirigida al circuito de preferencia al mismo tiempo, la señal mayor será la que haga operar al circuito. Las señales de limitación vienen a ser más grandes que la señal de error, con la adición de preferencia positiva por medio de la resistencia variable VR1 de los circuitos OEL y MEL (circuitos integrados U-P2-1 y U-P2-1 figura 4-26), la señal limitadora hacia OEL y MEL sirve como señal de control del AVR cuando un límite es detectado.
- 6.- Sensor de voltaje.- La salida de voltaje del tiristor amplificador es dividida por la resistencia R201 y la resistencia variable R202, este voltaje dividido es alimentado hacia el registro a través de los sensores R202, C201, R205 y C202 figura 4-26. Esta es una señal de registro que incrementa la estabilidad del sistema.

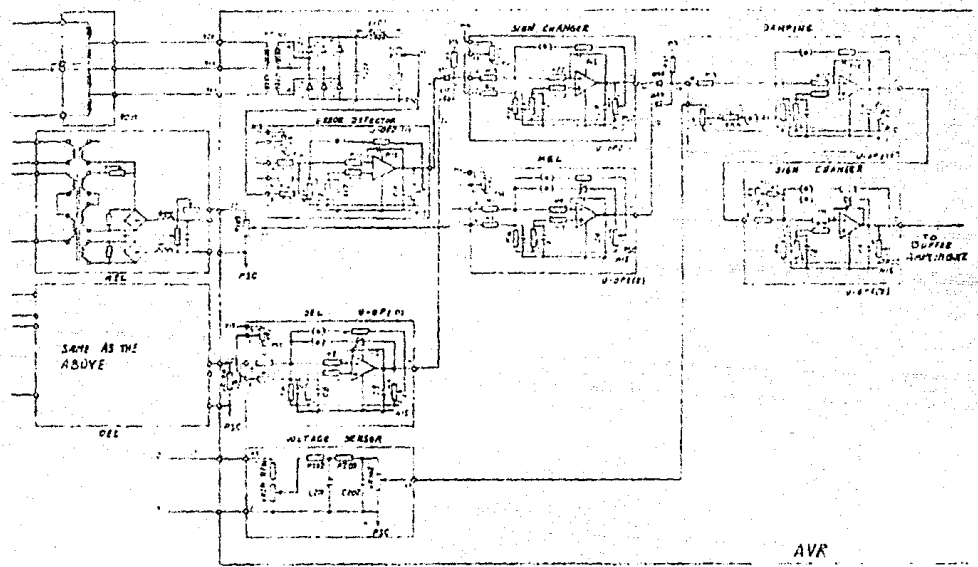


AMPLIFICADOR OPERACIONAL. FIG. 4-25



CIRCUITO DE PREFERENCIA FIG. 4-27

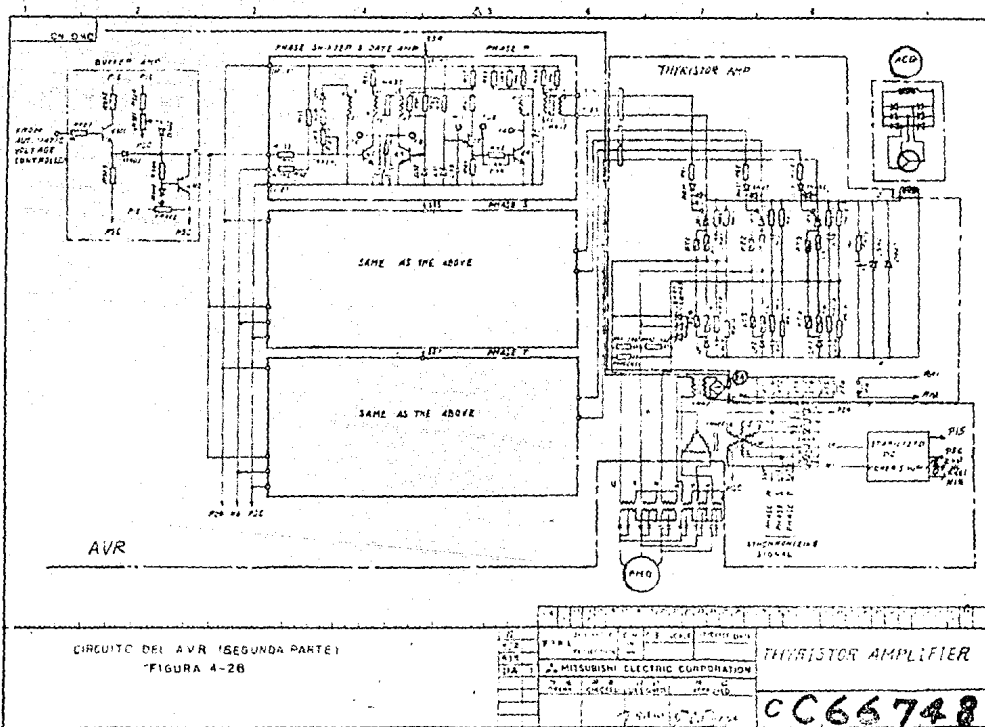
- 7.- Amortiguador.- El amortiguador recibe como señal de entrada la que le manda el detector de error y amortigua la señal hacia el sensor de voltaje. La señal de error y la de amortiguamiento son de polaridad inversa, la primera cuando varía es compensada por la otra, así la estabilidad del sistema AVR es mantenida. El ajuste del amortiguamiento puede ser variable por la resistencia VR5 (Damping).
- 8.- Cambiador de signo.- Aquí no se realiza amplificación sólo se efectúa cambio de signo entre voltaje de entrada y de salida. Este cambiador de signo tiene también la función de recortar la señal negativa solamente cuando la entrada del amplificador buffer sea positiva.
- 9.- Amplificador buffer.- Es una conexión seguidor emisor, por lo tanto, la salida de este amplificador es directamente proporcional a la entrada, y cuenta con un limitador superior VR302, y un limitador inferior VR301 Figura 4-28.



CIRCUITO DEL AVR (PRIMERA PARTE)
 FIGURA 4-26

AUTOMATIC VOLTAGE
 CONTROLLER

CC6674



en paralelo con el sistema.

Construcción.- El Diagrama de bloques del detector de potencia reactiva se muestra en la figura 4-29. La corriente y el voltaje a la salida del generador, son detectados por medio de TC'S y TP'S, las señales de los secundarios de estos transformadores son alimentadas al circuito detector de potencia -- reactiva figura 4-30, donde el voltaje proporcional a la potencia reactiva es detectado generando una señal de voltaje V_s de polaridad negativa.

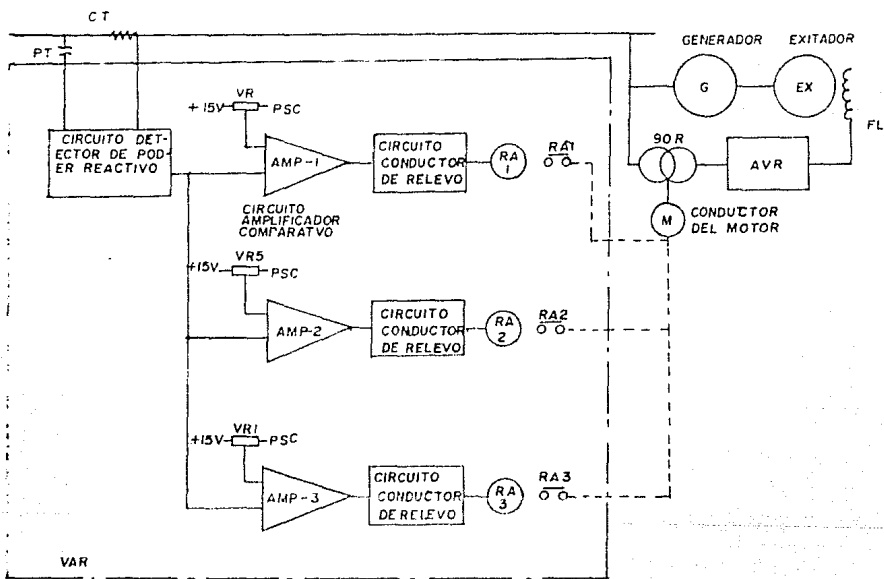


DIAGRAMA DE BLOQUES. FIG. 4-29

- 10.- Compuerta de amplificación y alternador de fases.- Este dispositivo amplifica la señal de salida del amplificador buffer y se cuenta con uno - por cada fase (R,S, T), Cuando la señal de voltaje es aplicada a la - base del transistor Q2 a través de la resistencia R31 figura 4-28, el - transistor Q2 conduce y la cantidad de reposición del amplificador magnético MAG1 se incrementa. Por lo tanto la cantidad de reposición puede ser controlada por el voltaje aplicado a la resistencia R31. Puesto que la cantidad en la compuerta de MAG1 puede ser controlada por la cantidad de reposición, el tiempo en que el transistor de juntura única WJT- y el transistor Q4 conduce puede ser controlado por la entrada de fase. Cuando Q4 conduce, el voltaje almacenado en el capacitor C35 circula a través de MAG2 y Q4. Al mismo tiempo una señal de compuerta aparece sobre el devanado de salida de MAG2.
- 11.- Amplificador de tiristores.- El amplificador de tiristores es un puente compuesto de diodos y tiristores. La salida de este aplicador es:

$$V_o = 0.675 (1 + \cos \alpha) V_i$$

Donde α es un ángulo de encendido del tiristor y V_i es una alimentación de voltaje de C.A., hacia el puente y V_o es la salida de C.D., del puente. Este sistema tiene las siguientes especificaciones:

$$V_i = 100/120 \text{ VCA. } 420/350 \text{ Hz.}$$

$$V_o = 126\text{V}-9\text{V}, 150\text{V}-11\text{V CD.}$$

$$\alpha = 30^\circ - 150^\circ$$

En los párrafos siguientes describiremos otros dispositivos que pertenecen al sistema de excitación y están relacionados con el AVR.

DETECTOR DE POTENCIA REACTIVA.

El detector de potencia reactiva (VAR), es capaz de controlar la corriente de campo del excitador de acuerdo al cambio de carga para operar el generador a la potencia reactiva definitiva. Por el uso de este aparato es posible ajustar la potencia reactiva de el generador, para la operación en -

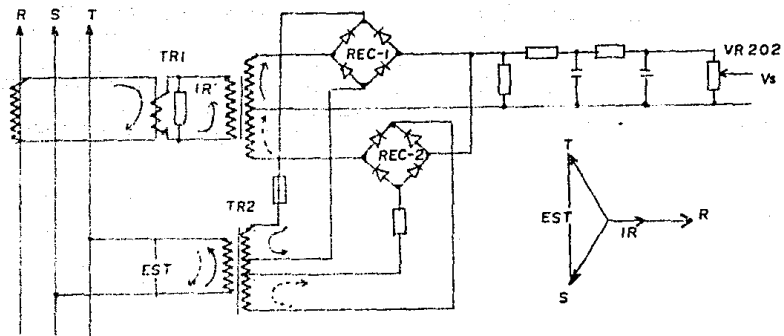


DIAGRAMA DE VECTOR

CIRCUITO DETECTOR DE POTENCIA REACTIVA FIG. 4-30.

El voltaje V_s es alimentado al circuito de comparación y aplicación, donde es comparado con el voltaje positivo de las resistencias variables VR, VRS y VRI y cuando es más grande que el voltaje ajustado en el circuito de manejo de relevadores, los relevadores son operados y por medio de sus contactos es operado el ajuste de voltaje de entrada al AVR. Estos amplificadores comparativos son ajustados de la siguiente manera: Límite máximo VRS, límite mínimo VRI, valores intermedios VR.

Función de los componentes:

- 1.- Circuito detector de potencia reactiva.- Con la corriente IR adelantada 90° con respecto al voltaje EST al factor de potencia unitario, cuando E_{st} está en el ciclo positivo ($S < T$), la compuerta del diodo REC-1 conduce, flechas continuas de la figura 4-30 (REC-2 no conduce), y la componente de corriente de la fase R aparece como la tensión de salida V_s , este es de polaridad positiva y no produce efecto en el circuito amplificador.

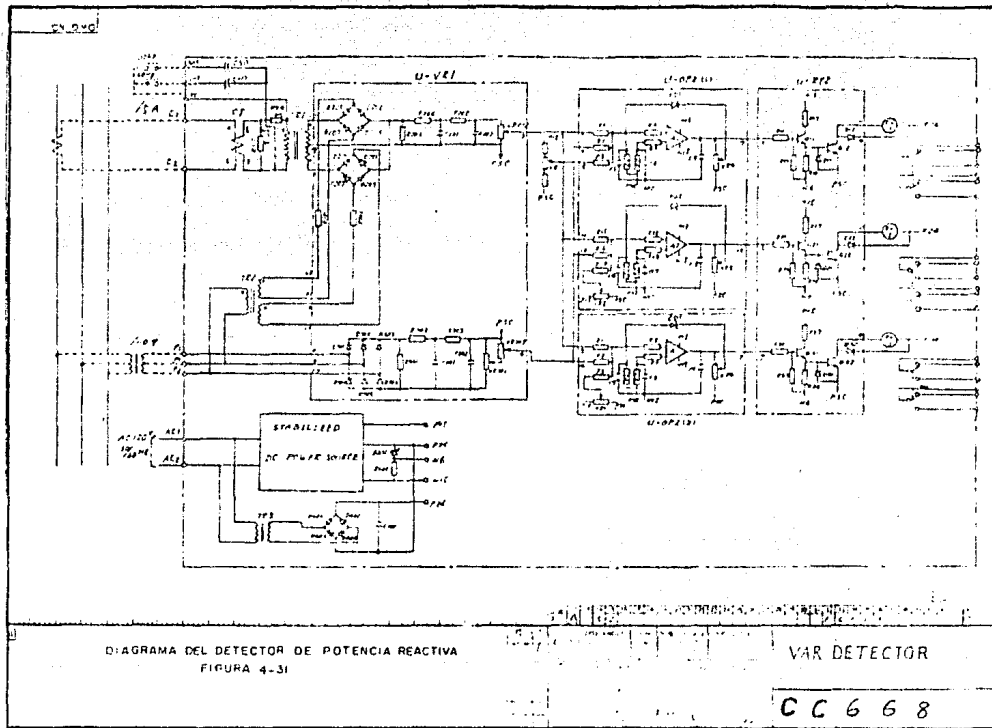
Cuando la tensión E_{st} está en el ciclo negativo ($S > T$), la compuerta del diodo REC-2 conduce (flechas punteadas figura 4-30) y la componente de corriente de la fase R aparece como la salida V_s . En este caso, la componente de corriente es de polaridad negativa y la relación entre IR y el ángulo de fase θ de la fase R es como sigue:

$$IR = I \sin \left(X + \theta + \frac{\pi}{2} \right)$$

Voltaje de detección V_s :

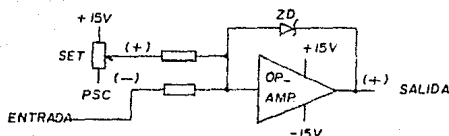
$$\begin{aligned} V_s &= I \sin \left(X + \theta + \frac{\pi}{2} \right) dx \\ &= -I \cos \left(X + \theta + \frac{\pi}{2} \right) \\ &= -2I \sin \theta \end{aligned}$$

Por consiguiente el voltaje de detección es proporcional con $I \sin \theta$. Puesto que la componente de voltaje no está incluida en V_s , el voltaje del secundario del TP, E es detectado por las resistencias variables VR301, VR302 a través del rectificador D301 al D306 y el circuito filtrador, figura 4-31, es sumado a V_s por lo tanto:



CC 6 6 8

$V_s + 3 E = E I \sin \theta \dots \dots \dots$ Potencia reactiva.



AMPLIFICADOR DE COMPARACION FIG. 4-32

- 2.- Circuito amplificador de comparación.- Como se muestra en la figura 4-32, el circuito utiliza un amplificador operacional, cuando la señal a la entrada de este circuito es negativa, elimina el voltaje ajustado (positivo), obteniéndose una salida positiva por lo tanto es usado como amplificador-inversor. En el otro caso cuando la señal de entrada es pequeña y no elimina totalmente al ajuste positivo, para el diodo tener esta es dirección inversa y la salida no aparecerá.
- 3.- Circuito de operación de relevadores.- cuando a la salida del circuito amplificador de comparación aparece una señal positiva, los relevadores del circuito operan sus contactos poniendo en funcionamiento un motor que opera el ajuste de voltaje a la entrada del AVR, compensando la señal de voltaje por causa de la potencia reactiva.

COMPENSADOR DE CORRIENTE CRUZADA (CCC).

Para tener una operación en paralelo estable de dos o más generadores, es necesario contar con una señal de compensación que haga que el voltaje inducido del generador se modifique de acuerdo a la componente reactiva de la carga, el compensador de corriente cruzada es usado para este propósito.

La figura 4-35 nos muestra un diagrama esquemático de la conexión de dos generadores trabajando en paralelo. Los voltajes secundarios del transformador de potencial TP que actúan sobre el AVR, están representados por E_1-2 , E_2-3 , E_3-1 , ver diagrama vectorial de la figura 4-35. La corriente del secundario del transformador de corriente TC, conectado a la fase 3 fluye a un autotransformador y produce un voltaje de compensación que aparece en las terminales V_3-V_{13} y V_1-V_{11} , representados por E_Z y E_R respectivamente, ver figura 4-34. E_Z es la suma vectorial de la caída de voltaje E_T causado por la resistencia y la caída E_X debida a la bobina de choque.

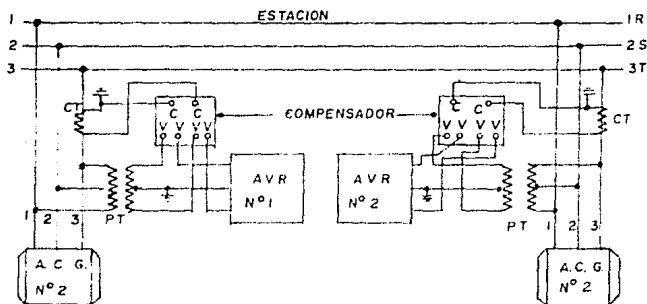


FIG. 4.- 33

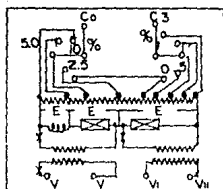
Los valores son seleccionados apropiadamente para que E_z y E_R tengan un defasamiento de 120° y se suman a las fases E_{2-3} y E_{1-2} la suma vectorial viene a ser la señal de entrada del AVR.

Operación y ajuste.- La figura 4-35 representa un caso de factor de potencia atrasado 0%. E_z y E_R están en fase con E_{2-3} y E_{1-2} respectivamente y el AVR afectado con el máximo voltaje.

Como el factor de potencia mejora, defasamientos son producidos entre E_z y E_R , también entre E_{2-3} y E_{1-2} , el voltaje que afecta al AVR es pequeño.

En el caso de un atraso del 100% de factor de potencia, el vector de compensación de voltaje avanza y se representa por la línea punteada. Esto hace que el voltaje que afecta al AVR venga a ser el mismo del TP, por lo tanto la compensación será efectuada.

Por ejemplo, en el caso de un factor de potencia atrasado los voltajes de compensación E_R y E_z son respectivamente sumados a los voltajes de línea E_{1-2} y E_{2-3} , esto hace un estado similar en el cual el voltaje del generador aparece con una cresta y el AVR opera en una dirección para disminuir el voltaje inducido por el generador. El grado de compensación puede ser ajustado del 0.5% al 12% el ajuste generalmente es hecho en un porcentaje bajo.



MAX. 12%
of 4A

FIG. 4-34

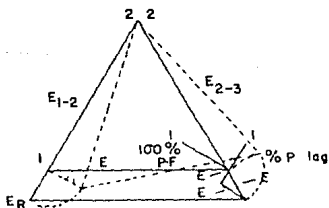


FIG. 4-35

CAPITULO V

PROTECCION DEL GENERADOR

5.1. PRINCIPIOS DE LA PROTECCION.

El problema de la protección de los sistemas eléctricos, adquiere cada vez mayor importancia ante el crecimiento de las redes eléctricas, y la necesidad de brindar un mejor servicio. Las cualidades que debe tener este servicio son: Control de voltaje, frecuencia y la continuidad de servicio.

Para cumplir con la continuidad de servicio, es necesario proveer a los sistemas eléctricos de elementos que puedan proteger sus componentes, cuando se presentan fallas, aislando la zona dañada del resto del sistema. Por lo que podemos decir, que la protección es el medio para desconectar un elemento fallado del sistema, lo más rápido posible, evitando mayores daños a ese elemento y perturbaciones al sistema.

Los elementos que intervienen en la protección son básicamente relevadores, interruptores, transformadores de corriente y transformadores de potencial, siendo el esquema elemental como se muestra en la figura 5-1.

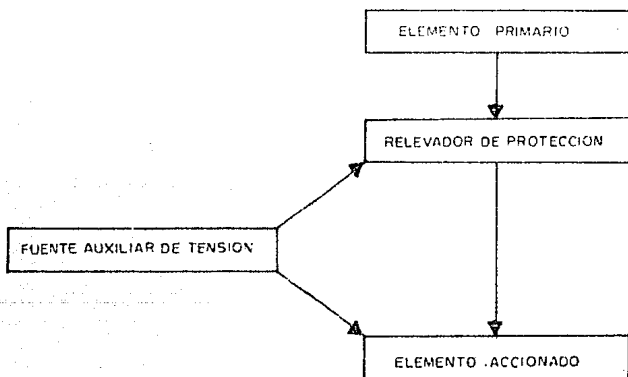


FIGURA 5-1

Elemento primario.- Este es el que detecta las señales procedentes del sistema eléctrico (corriente, voltaje, frecuencia, etc.), y las convierte en valores aptos para alimentar al relevador de protección, es decir una tensión, y potencia bajas, y están constituidos por transformadores de potencial y corriente, los cuales además sirven como medio de aislamiento de las partes de alta y baja tensión del sistema.

Relevador de protección.- Este es la parte más importante del sistema de protección, ya que él mide los parámetros eléctricos y decide la acción a realizar, cuando dichos parámetros rebasan el valor para el cual fue ajustado.

Elemento accionado.- Es aquél al cual llega la señal del relevador, y es por lo general la bobina de disparo de los interruptores.

Fuente auxiliar de tensión.- Normalmente todas las instalaciones de protección a base de relevadores, deben tener una fuente auxiliar de tensión en corriente directa, normalmente está constituido por un banco de baterías.

Para poder determinar las protecciones en una instalación cualquiera, es preciso disponer de la información completa de ésta, y conocer debidamente la importancia de la misma sobre el resto del sistema eléctrico al que está conectada. En consecuencia, se debe proceder a una planeación general de los sistemas de protección, que podría concretarse en los siguientes puntos:

- a) Conocimiento detallado de la red y/o de la instalación que hay que proteger.
- b) Definición completa de las zonas de influencia de cada protección y su comportamiento para cada tipo de disturbio.
- c) Definición concreta de los márgenes y zonas de traslape de cada sistema de protección.
- d) Definición de las protecciones de reserva, que deben actuar en caso de falla de una protección principal asociada a un interruptor, para cada tipo de falla.

Las cualidades con que debe de contar un buen sistema de protección se enumeran a continuación:

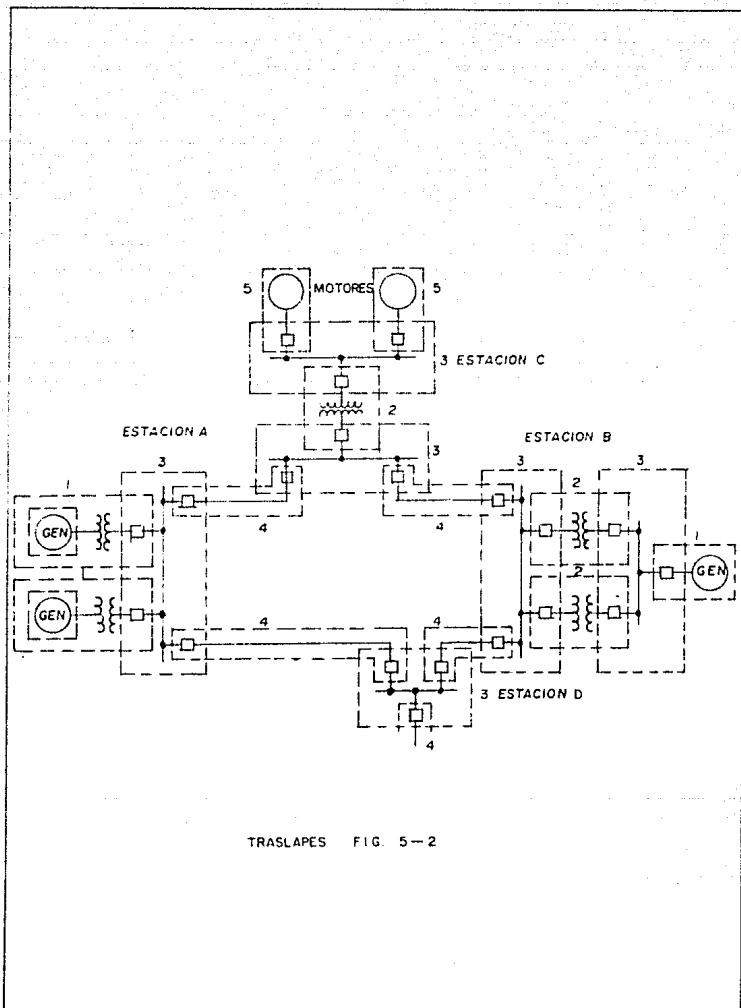
- a) Confiabilidad. - La habilidad del sistema de protección para operar correctamente cuando se necesite, y por otro lado evitar la operación en falso, o sea seguridad.
- b) Velocidad. - Tiempo mínimo de claro de falla y sin peligro del equipo protegido.
- c) Selectividad. - Máximo servicio continuo con la menor desconexión posible del sistema.
- d) Economía. - Máxima protección con mínimo costo.
- e) Simplicidad. - Mínimo de equipo y circuitería.

Un sistema de protección por relevadores puede clasificarse en varios subsistemas, uno de ellos es el llamado sistema primario que representa la primera línea de defensa contra las fallas, y está constituido por zonas definidas de protección las cuales se definen por la colocación de los transformadores de corriente y por las características y ajustes de protección. Estas zonas generalmente se traslapan, con el fin de no dejar zonas sin protección, la figura 5-2, nos muestra un ejemplo de traslape de zonas protegidas, en ella se observa que cada interruptor pertenece a dos zonas distintas, esto nos indica que el interruptor puede ser disparado por cualquiera de las dos zonas en que se encuentra.

De la misma forma que un sistema eléctrico está expuesto a fallas, el esquema de protección puede fallar. Por lo que para dar confiabilidad al sistema de protección, se utilizan los llamados relevadores de respaldo.

Existen varios conceptos con relación a la denominación de relevadores de respaldo, el primero de estos es el llamado "respaldo local" que es un esquema en el cual la zona protegida adyacente a la zona primaria en falla, opera después de un cierto tiempo de retardo, en caso de que la zona en falla no halla sido liberada por su protección primaria.

De acuerdo a lo anterior se puede decir que la protección de respaldo local es una segunda línea de defensa, existe una tercera línea de protección que es la protección remota, que se encuentra localizada a uno o dos buses del área que protege. Estos también utilizan timers para retrasar los tiempos de disparo y así dar oportunidad a los relevadores primarios y de respaldo local de operar primero.



TRASLAPES FIG. 5-2

Por lo general se utilizan medidas extensivas para aislar la protección primaria y la de respaldo, así por ejemplo si son alimentados los relevadores por C.A., se hace de fuentes separadas es decir de transformadores de instrumentos distintos; si es alimentada por C.D., de circuitos de control para el disparo distintos.

SISTEMAS DE PROTECCION DIRECTOS.

Son aquellos sistemas, en los cuales el elemento de medida es generalmente el mismo que el de corte, o está incorporado a él, y la magnitud que hay que controlar es generalmente la intensidad, se aplica a la protección sin ningún tipo de transformación, se pueden describir como sigue:

- a) Fusibles.- Es el método de protección más antiguo de todos, se basa en el incremento de temperatura que sufre un conductor al ser atravesado por una intensidad. Se calibran de forma que el conductor se funde cuando es atravesado por una intensidad prefijada, interrumpiendo el circuito.

Constituyen un método de protección simple y económico que además tiene como principal ventaja el hecho de eliminar corrientes de corto circuito en tiempos inferiores a los 5 milisegundos; reduciendo los efectos térmicos y dinámicos en la instalación. No obstante, presenta una serie de desventajas como: poca precisión, bajo poder de corte, envejecimiento, etc. En la actualidad su uso se ha restringido a circuitos de baja tensión y a derivaciones de líneas y equipos de pequeña potencia.

- b) Relés directos.- Al igual que los fusibles, protegen contra cortos circuitos. Consisten de una bobina en serie con la entrada del interruptor, y que está recorrida por la intensidad controlada, en el momento en que, por incremento de la intensidad, aumenta la fuerza del campo electromagnético generado por la bobina y supera la de un resorte antagonista que tiene el dispositivo, se produce el disparo del interruptor o se libera un sistema de relojería que produce este disparo con cierto retraso.

SISTEMAS DE PROTECCION INDIRECTOS.

Son aquellos en los que las magnitudes que hay que controlar (tensión, corriente, temperatura, etc.), se transforman en valores normalizados antes de inyectarse al relé de protección. Estos tienen conocimiento de una o varias de estas magnitudes y están arreglados para mantenerse inactivos mientras no cambien éstas.

Estos sistemas son más costosos que los directos, al precisarse además de la protección propiamente dicha, transductores y elementos de corte, sin embargo en ellos el concepto de protección alcanza su plenitud. Los principales tipos son:

1.- Sistemas electromagnéticos: Son aquellos en que la información suministrada a los relés en forma de intensidad o tensión, es transformada por éstos en una fuerza capaz de cerrar unos contactos que establecen la continuidad en el circuito de disparo. Según su construcción los podemos clasificar en:

a) Atracción electromagnética.- la construcción de estos relevadores puede ser de émbolo dentro de un selenoide o de armadura atraída por los polos de un electroimán, ver figura 5-3, y comprenden el tipo más simple que responde a señales de corriente alterna como de corriente directa.

Al circular una corriente por la bobina de polarización del relevador, se produce un flujo magnético, el cual produce una fuerza electromagnética que se ejerce sobre el elemento móvil del relevador, y es proporcional al cuadrado del flujo en el entrehierro, es decir al cuadrado de la corriente que circula por la bobina. La ecuación siguiente nos representa la fuerza de atracción producida por la corriente.

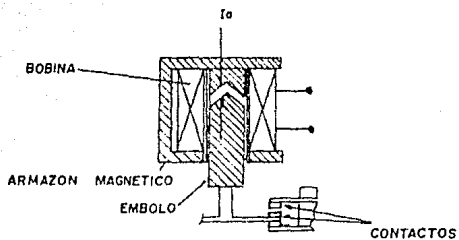
$$F = K_1 I^2 - K_2$$

Donde: K_1 es la constante de proporcionalidad.

K_2 es la fuerza mecánica de retención.

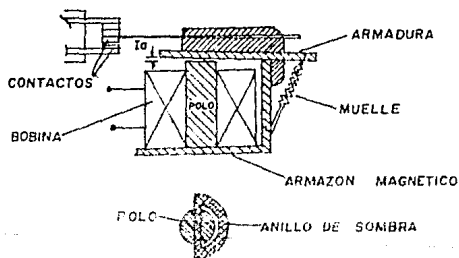
La corriente mínima que ocasiona el movimiento del relevador se llama corriente mínima de accionamiento o pick-up, para determinar esta corriente se iguala la ecuación anterior a cero y se despeja la corriente, de donde:

$$F = \frac{K(NI)^2}{(l_0)^2} - KMUELLE$$



RELE DE EMBOLO

$$F = \frac{K(NI)^2}{(l_0)^2} - KMUELLE$$



PARA RELES DE C.A.

RELE DE ARMADURA ARTICULADA

FIG. 5—3

$$I = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$$

Si el relevador está operado y se disminuye lentamente la corriente, se llegará a un valor de corriente en que regrese a la posición de reposo, a es te valor se le llama corriente de reposición.

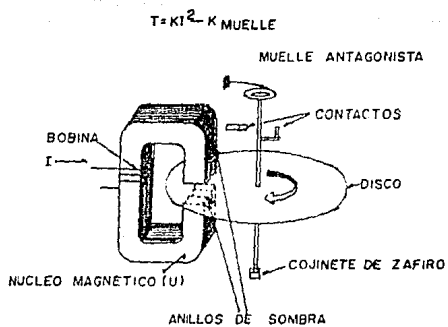
- b) Inducción electromagnética.- Estos relevadores utilizan el principio del - motor de inducción, el par de accionamiento es desarrollado sobre un rotor de disco o tambor de inducción, y se produce cuando un flujo alterno reacciona con otra corriente inducida en el rotor por otro flujo alterno des plazado en el tiempo y el espacio, pero de igual frecuencia.

Al circular una corriente a través de la bobina (ver figura 5-4), el flujo magnético producido por esta corriente, se divide en dos flujos defasados en el tiempo y el espacio con el auxilio de anillos de sombra. Estos - flujos (β_1 y β_2), inducen sobre el rotor corrientes circulares concén tricas (ver figura 5-5). Si una línea de corriente debida a β_1 toca el eje de β_2 se producirán las fuerzas F_1 y F_2 , como las corrientes que circulan - son senoidales y hay un desfaseamiento entre sí, los flujos que inducen tam bién serán senoidales con el mismo desfaseamiento.

De lo anterior podemos decir que cuando el ángulo de fase entre los dos - flujos es cero, la fuerza resultante será cero. Pero cuando ambos flujos - vayan defasados habrá una fuerza resultante neta y el disco girará.

- 2.- Sistemas de bobina móvil.- Estos relés ocupan una posición intermedia entre los equipos electromagnéticos y los electrónicos, poseen algunos elemen tos electrónicos como diodos, resistencias, condensadores, etc. Pero la medida se efectúa aún electromagnéticamente por medio de un dispositivo polarizado de cuadro móvil, ver figura 5-6.

Este sistema mide por integración los valores medidos de la magnitud de - entrada. La rapidez de este sistema es superior al electromagnético, y su con sumo y tamaño son menores.



RELE DE DISCO DE INDUCCION FIG. 5-4

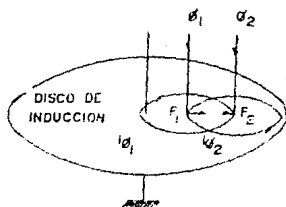
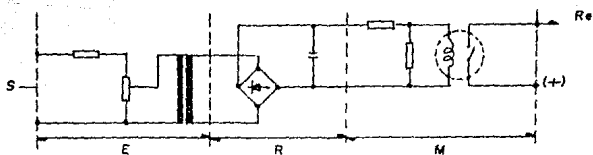
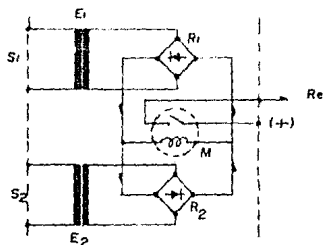


FIGURA 5-5



S Señal de entrada
 E Circuito de entrada
 R Rectificación
 M Zona de medida del sistema
 de bobina móvil.
 Re Respuesta de salida

a) una señal de entrada



b) Dos señales de entrada

RELE DE BOBINA MOVIL FIG. 5-6

3.- Sistemas de electrónica convencional.- Este sistema mide por integración los valores instantáneos de la magnitud de entrada, la aplicación de la electrónica al campo de los sistemas de protección ha permitido desarrollar una nueva gama de tipos de protección, así como mejorar sus características de funcionamiento, tanto en precisión como en rapidez, confiabilidad y duración.

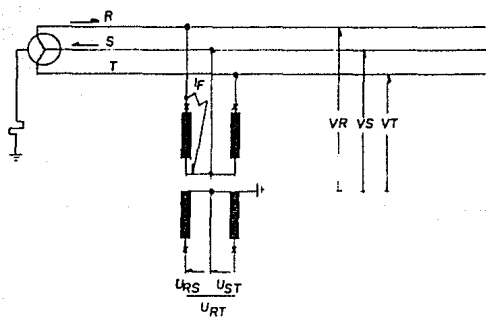
Otra cualidad importante de este sistema, es la construcción modular de los equipos, lo que ha permitido reducir el volumen y simplificar el diseño, al existir módulos de funciones específicas que se pueden utilizar en diversos tipos de protección.

A continuación explicaremos los principios de funcionamiento de los elementos que intervienen en la protección.

Transformadores de potencial.- Son transformadores de medida en los cuales la tensión secundaria es, en las condiciones normales de uso, prácticamente proporcional a la tensión primaria y defasada con relación a la misma en un ángulo próximo a cero, estos transformadores están conectados en paralelo en los puntos en que se quiere medir la tensión y su conexión más usual es entre fase y tierra, permitiendo reducir la tensión de un valor muy alto a un valor utilizado por los instrumentos de medición o protección (normalmente 120 V.).

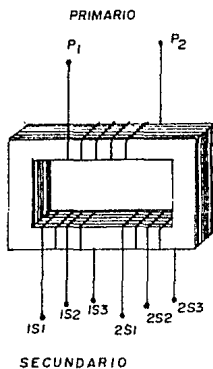
También es usual utilizar para algunas aplicaciones, dos transformadores conectados entre fases (conexión "V"); de esta forma solo se necesitan dos TP para la medida de las tres tensiones. Este tipo de montaje se utiliza principalmente para equipos de medición, pero para propósitos de protección, al no permitir la obtención de las tensiones simples que son necesarias para muchos sistemas de protección, ver figura 5-7. Los TP desde el punto de vista constructivo pueden ser de dos tipos electromagnéticos y capacitivos.

a) Transformadores de tensión electromagnéticos.- Es un transformador convencional que tiene arrollamientos primario y secundario, es muy similar a un transformador de potencia y en caso de necesitarse varios devanados secundarios éstos están bobinados sobre un único núcleo magnético al no existir limitaciones como en los transformadores de corriente, ver figura 5-8.



Conexión en "V": En el secundario se dispone exclusivamente de tensiones compuestas

CONEXIONES TÍPICAS DE TRANSFORMADORES DE TENSION
FIG. 5-7



TRANSFORMADOR DE TENSION FIG. 5-8

Se puede definir la relación de transformación por medio de la siguiente fórmula:

$$K_n = \frac{V_1}{V_2}$$

Donde: K_n es la relación de transformación

V_1 es el voltaje en el primario

V_2 es el voltaje en el secundario

La figura 5-9 nos muestra el diagrama vectorial de un transformador ideal y la figura 5-10, el diagrama vectorial debido a las caídas de voltaje en los devanados. De acuerdo a estos diagramas podemos ver, que existen dos tipos de error en el uso de los transformadores de potencial, y son: Error de relación y error de fase o ángulo.

El primero se puede expresar en porciento de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\mathcal{N} = \frac{K_n V_2 - V_1}{V_1} \times 100$$

El error de ángulo se puede apreciar en la figura 5-10. Para los transformadores de potencial es importante conocer, la potencia de consumo que va a alimentar en su secundario, y ésta puede ser calculada de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P = V_2 I_2 = \frac{V_2^2}{Z}$$

Donde: Z es la impedancia de la carga por alimentar (Volmetro, relevador, etc.)

La clase de precisión de acuerdo a normas se expresa como la correspondencia entre el error de relación expresado en porciento y el error de ángulo expresado en minutos, la tabla 5-1 nos indica esta correspondencia.

b) Transformadores de tensión capacitivos.- Este tipo de transformador se compone de un juego de capacitores conectados en serie entre línea y tierra, - de tal forma que la impedancia total permite el paso de una pequeña corrien

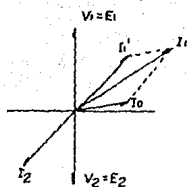
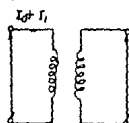


DIAGRAMA VECTORIAL TRANSFORMADOR IDEAL FIG. 5-9

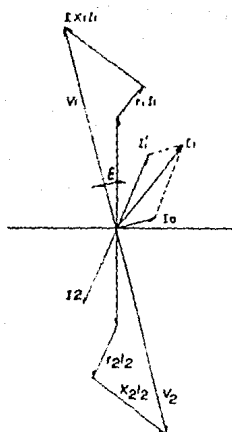


DIAGRAMA VECTORIAL TRANSFORMADOR REAL FIG. 5-10

te, de los capacitores en serie sale una derivación que a través de un reactor (circuito inductivo) alimenta a la carga, como se aprecia en la figura 5-11. - Para saber la relación entre el voltaje secundario y el primario, efectuamos - el siguiente desarrollo:

$$V_e = X_{c1}I + X_{c2}I, \quad V_s = X_{c2}I$$

$$\frac{V_e}{V_s} = \frac{(X_{c1} + X_{c2}) I}{X_{c2}I}$$

$$V_s = \frac{X_{c2}}{X_{c1} + X_{c2}} V_e$$

$$V_s = V_e \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

La bobina del reactor se comporta como un circuito abierto para las ondas de alta frecuencia, y compensa el ángulo de fase de la señal. Los capacitores están formados por un gran número de placas inmersas en aceite y contenidas en un aislador de porcelana en forma de columna hueca.

Por lo general se diseña de tal forma que $C_1 \ll C_2$. La reactancia de compensación sirve para compensar la caída de voltaje debida al efecto de los capacitores y su valor se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Wl = \frac{1}{(WC_1 + WC_2)}$$

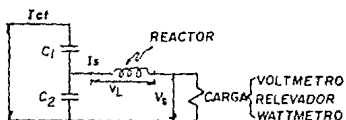
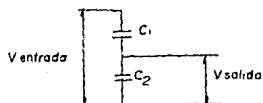


FIG. 5-11

TABLA 5-1

CLASE	ERROR DE RELACION EN %	ERROR DE ANGULO EN MIN.
0.1	± 0.1	± 5
0.2	± 0.2	± 10
0.5	± 0.5	± 20
1.0	± 1.0	± 40
3.0	± 3.0	---

CLASE DE PRECISION PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Además de lo expuesto enumeramos las características que deben de tomarse en cuenta para la elección del transformador de potencial.

- a. Tipo de instalación.- Interior o intemperie.
- b. Tensión nominal de aislamiento.- La tensión de aislamiento deberá ser por lo menos, igual a la tensión de servicio más elevada a la red donde va a ser utilizada.
- c. Uso o funcionamiento.- Los TP pueden obtenerse con uno o varios secundarios, según su aplicación, de haber varios secundarios es con el objeto de separar los equipos que van conectados a cada uno de ellos, por razones de precisión o disparidad de funciones.
- d. Forma constructiva.- Electromagnéticos o capacitivos.
- e. Tensiones nominales.- Se procura utilizar valores normalizados de acuerdo a normas internacionales. Para obtener el valor primario se toma el más próximo posible a la tensión de servicio, los valores secundarios más usuales son: - 120/ 3, 120V.
- f. Carga secundaria.- Es el valor de la potencia de los equipos conectados al secundario, incluyendo las caídas de tensión en los circuitos si las distancias son grandes.
- g.- Potencia nominal.- Es la potencia aparente secundaria bajo una tensión nominal determinada, los valores usuales son 5, 10, 30, 60, 100 etc.
- h. Clase de precisión.- Se designan por las cifras 0.1, 0.2, 0.5, etc., y corresponden al error máximo de relación admisible en porcentaje y ángulo de fase en minutos para una tensión de 0.8 a 1.2 V_n , $\cos \theta = 0.6$ y con una carga comprendida entre 0.25 a 1 del valor nominal.

Transformadores de Corriente.- Estos son elementos que alimentan a los relevadores con corriente proporcionales a las que circulan en el sistema de potencia. En condiciones normales de operación, la corriente que circula en su secundario será prácticamente proporcional a la corriente primaria y estará defasada de ésta en un ángulo próximo a cero, una razón para esto es que la carga en el secundario es de factor potencia tan atrasado que la corriente secundaria estará prácticamente en fase con la corriente de excitación.

Son muy parecidos a un transformador de potencia monofásico, aunque presentan ciertas diferencias fundamentales:

- El primario está dispuesto en serie con el circuito principal.
- La corriente primaria, es en todo momento, independiente de la carga conectada en el secundario.
- La carga secundaria debe ser mínima, funcionando en condiciones similares a las de corto circuito. Como cuando tiene conectadas bobinas de baja impedancia (ampermetros, relevadores de corriente, etc.).

Una posible clasificación de los TC, es en función de sus características constructivas, siendo las más normales las siguientes:

- a) Barra pasante o toroidal.- El devanado primario es el propio conductor cuya intensidad se mide, y sobre el circuito magnético que lo abraza se bobina el devanado secundario. Una aplicación de este tipo de transformadores es la medición de la intensidad de falla a tierra en los sistemas trifásicos, para ello se pasan las tres fases por el interior del núcleo, estableciéndose en este un flujo proporcional a la suma de las tres intensidades, es decir, la corriente secundaria es proporcional a la corriente de desequilibrio del sistema primario.
- b) Bobinados.- El circuito primario puede estar compuesto por varias espiras, estos TC son los de aplicación más común en las instalaciones. Generalmente, el devanado primario está realizado en varias secciones, lo que permite, por medio de una conexión adecuada, obtener una misma corriente secundaria con una o varias intensidades primarias nominales distintas. Para el equilibrado de las protecciones diferenciales se utilizan TC bobinados, que permiten en la mayoría de los casos obtener distintas relaciones de transformación por medio de las conexiones apropiadas de sus devanados.
- c) Atravezador.- Son transformadores cuyo devanado primario también tiene una sola espira y normalmente están montados en los aisladores de las entradas de los transformadores de potencia. Si bien las potencias y número de devanados que se pueden obtener con este tipo de transformadores, es inferior al de los bobinados, la gran economía que representan hace que utilicen siempre que es posible.

La relación de transformación para estos transformadores, se puede establecer de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$K_n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Cuando la relación está expresada en término de corriente, en el denominador aparece corriente nominal del secundario (comunmente 1 o 5Amp.), y en el numerado se tiene la corriente que al circular por el primario, provoca que en el secundario circule la corriente nominal, por ejemplo 200/5Amp. La figura 5-12a y 5-12b muestran los diagramas fasoriales ideal y real del TC respectivamente.

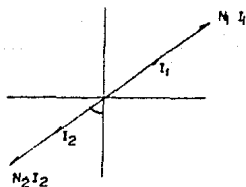


FIG. 5-12a

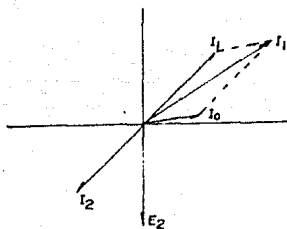


FIG. 5-12b

Como se observa en la figura, existe una diferencia entre el valor especificado y el valor medido, en la magnitud de las corrientes del TC, se expresa el error de relación de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$\eta = \frac{K_n I_2 I_1}{I_1} \times 100$$

En la misma forma que para los transformadores de potencial existe un error de ángulo que depende del servicio que presta el TP, en los transformadores de corriente existe el mismo error (positivo o negativo), y se indica por medio de un ángulo entre las corrientes primarias y secundaria, ver figura 5-13.

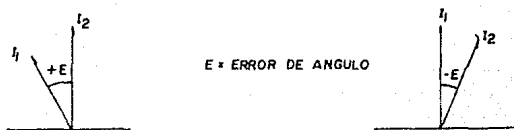


FIG. 5-13

Para poder calcular la impedancia que puede alimentarse en el secundario del TC, la ecuación que rige su comportamiento es:

$$P = Z I_2^2$$

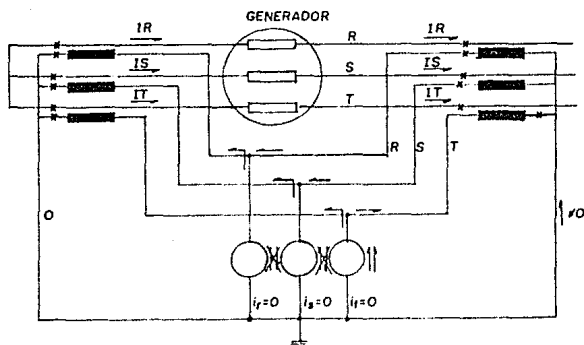
A continuación se enumerarán las principales características que deben tenerse en cuenta para la selección de los TC.

- a) Tipo de instalación.- Interior o intemperie.
- b) Tensión nominal de aislamiento.- Esta deberá ser por lo menos, igual a la tensión de servicio más elevada de la red donde va a ser utilizado.
- c) Uso o funcionamiento.- Los transformadores de corriente pueden obtenerse con uno o varios circuitos magnéticos, según su aplicación. Cuando son varios núcleos separados, cada uno de ellos tiene una función bien definida, por ejemplo en un caso de 3 núcleos sería:

- Un circuito magnético para medición.
 - Un circuito magnético para alimentar, exclusivamente a una protección diferencial.
 - Un circuito magnético para una protección de sobreintensidad.
- d) Forma constructiva.- Aparte de la concepción clásica, mediante devanados primarios y secundarios, otras formas muy corrientes son las del tipo toroidal y atravezador.
- e) Intensidades nominales.- Se procura utilizar valores normalizados, siguiendo normas internacionales. Para determinar el valor primario se toma el inmediato superior a la intensidad de servicio previsible en el circuito primario, los valores secundarios más usuales son 1 A y 5 A.
- f) Carga secundaria.- Es el valor expresado en ohms con indicación de su factor de potencia, de la impedancia de los equipos conectados a su secundario. Por la propia filosofía del TC, interesa que el valor ohmico sea el mínimo posible.
- g) Potencia nominal.- Es la potencia aparente secundaria bajo una intensidad nominal determinada, teniendo en cuenta las prescripciones relativas a límites de errores. Este concepto tiene gran importancia en el tamaño y precio del transformador, los valores más usuales son: 5, 10, 15, 30, 60 VA.
- h) Clase de precisión.- Se designa con un número (0.1, 0.5, 1.0, etc.) y corresponde al máximo error de relación admisible, en porcentaje y ángulo en minutos, para una intensidad comprendida entre 0.1 y $1.2 I_n$, con $\cos \beta = 0.8$, inducción y carga secundaria entre 0.25 y 1 veces el valor nominal.
- i) Intensidad de sobrecarga.- Es el valor eficaz de intensidad que el transformador puede soportar en forma permanente, generalmente es $1.2 I_n$.
- j) Respuesta frente a fenómenos transitorios.- De estar ubicados los TC en instalaciones donde la presencia de fenómenos transitorios y armónicos puedan tener importancia, deberá efectuarse un estudio minucioso de la reproducción de las perturbaciones y si las magnitudes de intensidades distorsionadas indican o no en el sistema de protección o medida.
- k) Tratamiento de los secundarios.- Deberá tenerse especial cuidado en que en ningún circuito secundario del TC quede abierto, es decir que de no tener ninguna carga secundaria conectada, los bornes de cada secundario del TC deberán ser puestos en corto circuito. Si no se toma esta precaución, toda la corriente primaria actúa como corriente de magnetización, con el consiguiente calentamiento del núcleo y la aparición en el secundario de una elevada tensión, lo cual pone en peligro al personal e incluso es posible una explosión.

Una cuestión importante para la conexión de los TC, es el conocimiento de la polaridad de los arrollamientos, está a de verificarse y es importantísimo respetarla, especialmente en la alimentación de relés direccionales o di

ferenciales. En la figura 5-14, se puede comprobar las consecuencias de un error de conexión en el secundario de un TC, que se traduce en un desequilibrio en uno de los relés de protección diferencial.



CONSECUENCIA DE ERRORES DE CONEXION EN LOS CIRCUITOS DE INTENSIDAD.
FIG. 5-14

También es muy importante la puesta a tierra de seguridad en los circuitos secundarios, cada circuito de corriente debe tener un único punto de conexión a tierra. De existir por ejemplo dos tierras, es posible que al circular una corriente por la red de tierras de la instalación de A.T., pase cierta corriente a través de los relés produciéndose una operación intempestiva. También es posible el caso contrario, es decir, la no operación del relé al desviarse por tierra parte de la corriente que debería provocar su operación, en la figura 5-15a y b se puede observar lo anterior.

Interrupidores.- El interruptor es el que en definitiva ejecuta las órdenes de conexión y/o desconexión indicadas por las protecciones y automatismos, la misión de los interruptores es doble:

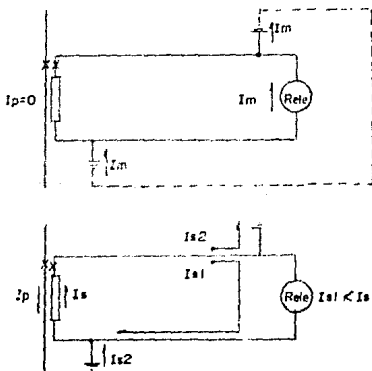
- Unión o separación de redes e instalaciones en caso de maniobras o fallas.
- Separación de las zonas averiadas en el menor tiempo posible.

En este segundo caso se produce durante la avería, un elevado incremento de la intensidad que aunque de breve duración, puede causar daños enormes a la instalación. De ahí se deduce que al igual que las protecciones, también los interruptores deben actuar en el menor tiempo posible.

En las maniobras de servicio, los interruptores deben cortar intensidades desde 1 amp., hasta algunos miles, sin embargo en las desconexiones por corto circuito, estas intensidades se elevan hasta algunas decenas de KA, en las altas tensiones.

Como quiera la desconexión de un corto circuito es la misión más difícil de cumplir por un interruptor y esta misión es un factor determinante de su tamaño, se utiliza como medida para elegir el más adecuado, la potencia de ruptura, que es la mayor potencia de corto circuito que pueda desconectar dicho interruptor, se indica en MVA, o GVA.

Hay que precisar que la potencia de ruptura indicada en la placa de datos se refiere a la tensión nominal de trabajo, si se utiliza este interruptor en una red de tensión inferior, la potencia de ruptura se reduce en la misma proporción.



CONSECUENCIAS DE LA DOBLE PUESTA A TIERRA EN UN CIRCUITO SECUNDARIO DE UN T/P
FIG. 5-15

5.2 PROTECCION DEL GENERADOR.

El generador es uno de los componentes de una central, que más dinero cuesta y está sujeto continuamente a más posibles problemas que cualquier otro equipo. El deseo de protegerlo contra condiciones de operación anormal y mantener una protección simple y confiable, da como resultado una gran divergencia en como escoger ó seleccionar la protección.

La selección debe hacerse con mucho cuidado ya que una operación de una protección es señal de una falla grave, esto es porque la desconexión incesaria de un generador grande, puede sobrecargar al resto del sistema y causar oscilaciones de potencia, y por otro lado una falla que deba operar la protección y no lo haga adecuadamente, puede causar daños funestos al generador.

Como se mencionó anteriormente dentro de las características de los sistemas de protección, es necesario conocer las fallas más comunes en el sistema que se quiere proteger. A continuación se describirán brevemente algunas de las fallas del generador.

1.- Protección del estator: La rotura del aislamiento de un conductor puede causar una falla entre conductores o entre éstos y las laminaciones. La rotura pudo haberse causado por sobrevoltajes, envejecimiento del material, hornado del aislamiento, acumulación de polvo, mal acabado, etc. Las fallas en los devanados del estator se pueden clasificar como sigue:

- a.- Corto circuito entre fases
- b.- Corto circuito de una fase a tierra
- c.- Corto circuito entre espiras
- d.- Circuito abierto en los devanados.

Estas fallas causan corrientes desbalanceadas, daños a las laminaciones de la coraza y en algunos casos pueden provocar incendios.

2.- Protección del rotor: Los devanados del rotor pueden, sufrir daños por fallas a tierra o circuitos abiertos en los devanados, las partes estructurales del rotor por si mismo se puede dañar por sobrecalentamientos, debido a corrientes del estator desbalanceadas, se puede clasificar como sigue:

- a.- Corto circuito en devanados
- b.- Circuito abierto en devanados
- c.- Tierras en el campo
- d.- Sobrecalentamientos.

3.- Motorización.- Esto sucede cuando la unidad es conectada al sistema sin suficiente potencia en su máquina motriz para cubrir las pérdidas, trabajando como generador de inducción creando un flujo de potencia que va del bus hacia la máquina, pudiendo salir de sincronismo.

4.- Pérdida de campo: Es análogo a la motorización, excepto que el sistema deberá alimentar la excitación. El acoplamiento magnético entre el rotor y el estator puede estar debilitado, originando que el rotor avance y después de un tiempo corto lo jale fuera de sincronismo con el sistema.

La operación continua sin excitación tiene efectos dañinos tanto en el generador como en el sistema. Un alternador grande, funcionado como generador de inducción tendrá muy altas corrientes circulantes en las caras del rotor, particularmente hacia los extremos que pueden causar calentamientos peligrosos en ciertas áreas y arcos en las cuñas y ranuras.

5.- Operación fuera de rango (OUT OF STEP): Un generador cuando está girando fuera de rango (más ó menos frecuencia), está sujeto a una sucesión de impactos severos cuyos efectos acumulativos pueden causar daños a la flecha, al acoplamiento, ó al montaje del estator, normalmente se utilizan relevadores de impedancias para detectar este fenómeno.

Como impedancia, el generador viene a ser mayor en proporción al sistema y el centro eléctrico cerrará en el generador. Esta condición intensifica la necesidad para detección de la operación fuera de rango, como parte complementaria del esquema de protección.

6.- Sobrevoltajes: Generalmente esta situación resulta de una pérdida de carga y sólo se permite por cortos periodos de tiempo. Algunos generadores accionados por turbinas hidráulicas pueden alcanzar el 200% ó más de voltaje cuando su carga se ha perdido, los sobrevoltajes también pueden resultar de problemas derivados con el AVR.

7.- Sobrevelocidad: Los generadores movidos por primotores alcanzan sobrevelocidades peligrosas bajo condiciones anormales de operación y cuentan con dispo

sitivos de protección que generalmente están incorporados en el sistema de gobierno del primotor, en ausencia de dispositivos mecánicos se pueden utilizar relés de frecuencia. En la mayoría de los generadores se tienen ajustado el disparo por sobrevelocidad al 10% de incremento de la nominal.

8.- Operación monofásica: La operación en estas condiciones puede causar calentamientos locales en las superficies de los polos del rotor y en los devanados amortiguadores si se utilizan, así como vibraciones severas que pueden ser transmitidas al estator y a la cimentación.

La operación de generadores en estas condiciones se puede detectar eléctricamente con relés de comparación de corrientes de cada fase para detección de desbalance. También es detectable esta anomalía con relés de secuencia negativa, pero cualquier dispositivo que se utilice deberá contar con retraso de tiempo para evitar disparos falsos en fallas externas de corto circuito ó transitorios con cargas desbalanceadas.

9.- Vibración: La vibración se pueden originar por la operación desbalanceada de corrientes en el generador, desbalance magnético en el rotor ó desbalance mecánico del mismo.

10.- Fallas en el sistema de enfriamiento: Las pérdidas por calor en el generador, son disipadas y circulan a través del aire ó hidrógeno que pase a través de todos los embobinados del generador, en sistemas donde el aire es necesario que tome del exterior es deseable evitar cambios en las cargas que puedan tener consigo condensación en el interior. Cualquier falla en el sistema de enfriamiento se manifestará en una elevación de temperatura del estator.

11.- Fallas en el sistema de lubricación: El calor desarrollado en las cámaras de máquinas grandes es transmitido al torrente de aceite de lubricación, del que se controla su temperatura por cambiadores de calor, en plantas con personal de operación esta temperatura es indicada localmente por termómetros ó por señalización en los tableros del cuadro de alarmas. En cambio en máquinas no atendidas se instalan comúnmente relés de sobretemperatura que dispararán la unidad en caso necesario.

El sistema de protección del generador está asociado a las protecciones del generador de gases y turbina libre, así como a las secuencias de arranque y paro de la unidad. En este punto solo hablaremos de las protecciones asociadas directamente al generador, las cuales se enlistan a continuación.

- a) Bajo nivel de aceite lubricante
- b) Baja presión de aceite lubricante
- c) Alta temperatura de aceite lubricante
- d) Alta temperatura del estator del generador
- e) Secuencia incompleta
- f) Esquema de protección eléctrico

Ahora describiremos brevemente su funcionamiento.

a) Bajo nivel de aceite lubricante: La detección de bajo nivel, se realiza por medio de un interruptor de nivel tipo flotador (71 G), colocado en el tanque de aceite lubricante, operando alarma a 35.5 cms., y disparo a 30 cms., del fondo del tanque (455 lts.), operando sobre el relevador 86 G, parando la unidad de inmediato.

b) Baja presión de aceite lubricante: La verificación de la presión de aceite, se realiza 30 seg., después de la señal de arranque por medio del interruptor de presión 65 G, colocado en el cabezal del distribuidor de aceite a las chumaceras, teniendo su alarma a 0.5 Kg/cm^2 , y disparo a 0.32 Kg/cm^2 , actuando sobre el relevador 86 G.

c) Alta temperatura de aceite lubricante: La detección de temperatura se realiza en las chumaceras, por medio de un interruptor térmico que acciona al relevador AR58 y el registrador de temperaturas, los límites son: para alarma de 98°C y para disparo de la unidad a 105°C , actuando sobre el relevador 86 G.

d) Alta temperatura del estator del generador: Esta alarma protege a los devanados del estator, en caso de falla del aire de enfriamiento, la detección se realiza por medio de un cinturón de bobinas registradoras de platino (50 ohms a 0°C), de las cuales la señal de temperatura más alta energiza al relevador de temperatura 49G, el valor de disparo de la unidad es de 110°C , operando sobre el relevador 86G.

e) Secuencia incompleta del generador eléctrico: Existen cuatro motivos que pueden provocar esta situación:

- No 1000 rpm con N_2 subiendo
- Falla de sincronización

- Falla de apertura del interruptor de potencia
- No 1000 rpm con N_3 bajando.

No. 1000 rpm con N_3 subiendo.- Una vez que el compresor de alta ha alcanzado 5200 rpm, y que la válvula moduladora de combustible ha entrado en control, un relevador de acción retardada se energiza, dando un tiempo de 30 segundos para que el generador eléctrico alcance 1000 rpm, en caso que no sea capaz el generador de alcanzar esta velocidad, el relevador K66 será energizado y éste operará sobre el relevador 86G, provocando el paro de la unidad.

Falla de sincronización.- Después de que la señal de arranque ha sido dada, el generador eléctrico debe estar proporcionando energía al sistema antes de 15 minutos en modo automático, esto es que el interruptor se cerrará en este período, de lo contrario el relevador K66 será energizado y operará sobre el relevador 86G, provocando el paro de la unidad.

Falla de apertura del interruptor de potencia.- Una vez que se ha dado la señal de paro de la unidad, el tiempo para que tanto la referencia de velocidades N_2 y N_3 así como la corriente de excitación bajen y permitan la apertura del interruptor es de 8 minutos, en caso contrario el relevador K66 se energizará, haciendo operar al relevador 86 G parando de emergencia la unidad.

No 1000 rpm con N_3 bajando.- Después de que el período de enfriamiento ha terminado, el generador eléctrico debe bajar su velocidad, debido a que las válvulas de corte de combustible han sido cerradas. Si en 30 minutos después del período de enfriamiento el generador no ha bajado de 1000 rpm, entonces el relevador K66 se energizará, operando sobre el relevador 86G parando de emergencia la unidad.

f) Esquema de protección eléctrica: El diagrama esquemático de protección y medición de la figura 5-16, nos muestra el esquema de protección utilizado en una unidad generadora turbo-jet. Se puede observar que el generador está conectado en estrella con su neutro aterrizado a través de un transformador de distribución, contándose con dos relevadores en el neutro: El 64N (de protección a tierra) y el 59N (sobre voltaje en el neutro) y que actúan sobre el relevador 86G (auxiliar de bloqueo), cuando sobrepasan su ajuste.

Después encontramos la protección diferencial (87), aquí podemos observar que ésta protección está dividida en tres secciones interrelacionadas que son:

- Protección diferencial del generador 87G.- La cual está conectada al neutro a través de un juego de TC's y a la salida de corriente después del interruptor de máquina (52), a través de otro juego de TC's, mandando su señal al 86G cuando detecte una falla.

- Protección diferencial de banco de transformadores 87T.- Este relevador también se encuentra conectado en el neutro del generador y a las líneas de corriente después del interruptor del transformador elevador. Este relevador manda su señal al relevador 86T cuando existe una falla, observamos que el relevador 86T opera sobre el interruptor de máquina y el interruptor de transformador, por lo cual existe traslape de protección.

- Protección diferencial de buses 87BA y 87BB.- Como se mencionó anteriormente el arreglo de barras con que se cuenta en este tipo de plantas es de barras base (BB) y barras auxiliares (BA), por lo tanto se cuenta con protección diferencial para cada una de ellas; los cuales se encuentran conectados a la corriente antes del interruptor de transformador y a los buses de subestación. Operando los relevadores 87BB y 87BA sobre los relevadores 86BB y 86BA respectivamente, cuando ocurra una falla.

Observamos que sobre las líneas de corriente se encuentran dos juegos de TC's adicionales, uno de los cuales se encuentra antes del interruptor de máquina el cual alimenta relevadores de protección exclusivamente y el otro ubicado después del interruptor que alimenta exclusivamente aparatos de medición.

También sobre las líneas de corriente se encuentran conectados juegos de TP's, los cuales indistintamente alimentan medición y protección del generador. Observamos que estos TP's están conectados a las líneas con conexión en "V" por lo cual en su secundario solo se contará con tensiones compuestas (dicha conexión se describió en inciso 5.1).

El relevador 86 que es un auxiliar de bloqueo (86G, 86T, etc.), el cual recibe las señales de salida de la mayoría de los relevadores cuando estos detectan una falla. Este relé 86 es el que acciona directamente sobre los interruptores.

A continuación enlistamos los relevadores que intervienen en la protección de este generador:

- 64N Relé de protección a tierra
- 59N Relé de sobrevoltaje
- 87G, 87T, 87BB, 87BA, Relés de protección diferencial
- 86G, 86T, 86BB, 86BA, 86SP, Relés auxiliares de bloqueo
- 63 Relés de presión de líquido o gas (Bucholtz)
- 27 Relé de bajo voltaje
- 62 Relé de tiempo retardado para arranque o paro
- 46 Relé de corriente de fase inversa o fase desbalanceada
- 67 Relé direccional de sobrecorriente (C.A.)
- 40L Relé de pérdida de excitación (relé de campo)
- 32 Relé de potencia direccional
- 21 Relé de distancia
- 59 Relé de sobrevoltaje
- 81 Relé de frecuencia
- 49 Relé térmico
- 76 Relé de sobrecorriente (C.D.)

5.3. DESCRIPCIÓN DE LOS RELEVADORES DEL GENERADOR.

RELEVADOR DIFERENCIAL [87].

Las fallas internas en el equipo eléctrico, generalmente se desarrollan como una falla a tierra de una fase y que puede involucrar a las otras dos. La protección diferencial es el esquema más efectivo contra este tipo de fallas, en ella las corrientes de cada fase y con señales en ambos extremos del equipo protegido, son comparadas en un circuito diferencial.

La figura 5-17, analiza el circuito de una fase ya que es el mismo comportamiento para las otras dos, para operación normal la corriente I_a que entra a la máquina es igual a la corriente I_b que sale en todas las fases, despreciando las fugas de corriente. Sobre la base de P.U. la corriente de secundaria es igual a la corriente primaria menos la corriente de magnetización, la relación de transformación de los TC's debe ser tal que las corrientes en sus secundarios deben ser iguales.



FIG. 5-17

La corriente en el relé $I_a - I_b$, es la diferencia de las corrientes de magnetización, usando el mismo tipo de TC's esta corriente es pequeña en carga normal, por lo tanto para evitar una operación falsa del relé, este se debe ajustar a un valor mayor de la corriente de operación normal. Si ocurre una falla entre los 2 juegos de TC's, una ó más de las corrientes del lado izquierdo se incrementará súbitamente, mientras que la corriente del lado derecho puede incrementar ó disminuir y fluir en dirección contraria. Por cualquier

trayectoria, la corriente total de falla fluirá a través del relé y este operará.

Debido a que en la práctica ningún TC responde con la misma relación de primario y secundario, además existen variaciones por la carga conectada en el secundario como: longitud de cableado, impedancia de los dispositivos, etc. La corriente diferencial puede volverse apreciable cuando el generador contribuye a una falla externa. El relé de porcentaje diferencial de la figura 5-18, resuelve el problema anterior sin demérito de la sensibilidad, las bobinas de restricción reciben la corriente del secundario de los TC's y de sensibilizan al relé para corrientes altas en fallas externas. En este relé existen dos esquemas de restricción comunes:

- Devanados en el mismo circuito electromagnético que producirán un par de apertura del contacto contra un par de cierre del mismo que es el devanado de operación.
- Un voltaje de restricción generado por la propia corriente requerida para la operación del relé que se incrementa con la magnitud de la corriente de falla externa.

Este por ciento de incremento puede ser constante de diseño del relé y es una característica de los nuevos relé de alta velocidad que se amoldan a diferentes condiciones de contribución para corrientes de falla externa. El efecto de las bobinas de restricción es despreciable en fallas internas, porque el devanado de operación tiene más amper-vueltas y recibe el total de la corriente secundaria de falla.

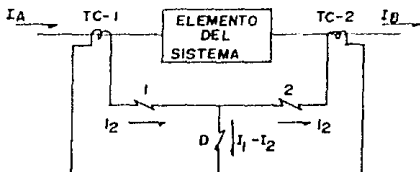


FIG. 5-18

RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO INVERSO.

Un relé de protección de sobreintensidad a tiempo inverso, operará en un tiempo que es función del valor de la corriente, de forma que cuanto mayor sea ésta menor será el tiempo de actuación, aunque esto dependa también del ajuste, es decir que el ángulo que debe recorrer el disco (éste ángulo se determina variando las posiciones de la palanca de tiempo).

La figura 5-19, nos muestra la característica de tiempo inverso, podemos observar que cada curva corresponde a una posición de la palanca de tiempo algunos ejemplos de posiciones se muestran a continuación:

Posición	1 apróx.	50° de giro del disco.
Posición	8 apróx.	180° de giro del disco.
Posición	11 apróx.	240° de giro del disco.

La figura 5-20, muestra un típico relé electromagnético de sobreintensidad a tiempo inverso, dispone de un selenoide de tomas múltiples que constituyen el ajuste del relé para varias intensidades, los polos del selenoide actúan sobre un disco de inducción; para ello cada polo está dividido con un anillo de sombra en una de sus porciones, mediante la acción de este anillo se produce el giro del disco y su velocidad será mayor cuanto mayor sea el flujo en la bobina ó sea cuanto mayor sea la corriente.

En el eje del disco de inducción se encuentra el contacto móvil, el dial de tiempos rotulado entre 1 y 10 permite acercar ó alejar el contacto móvil del fijo, es decir, permite seleccionar la curva de operación dentro de la familia de curvas. Finalmente, un imán permanente controla la velocidad del disco amortiguándola a fin de evitar rebotes en el contacto y conseguir un retardo lo más suave posible, el frenado es más intenso cuanto mayor es la velocidad de giro.

RELEVADOR DE PROTECCION A TIERRA (64N).

Este es un relé de sobrevoltaje del tipo de disco de inducción para protección a tierra, consiste de un elemento de voltaje, un contactor indicador, un transformador de ajuste y un condensador. La figura 5-21, muestra un diagrama de conexión interna de este tipo de relé.

El elemento de voltaje (CV) es del tipo de disco de inducción formado de

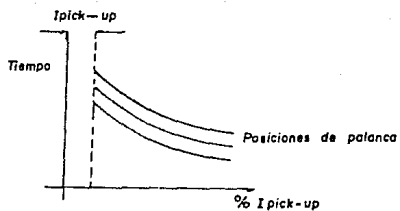
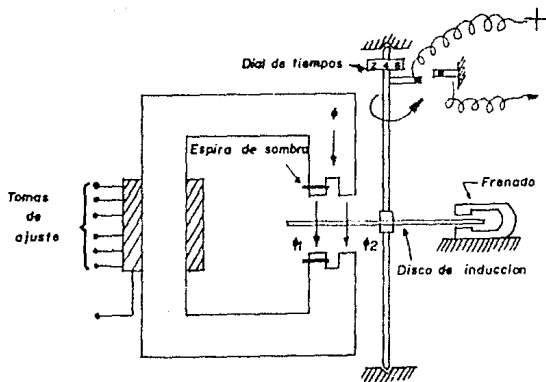


FIGURA. 5-19



RELE DE SOBREENTENSIDAD A TIEMPO INVERSO FIG. 5-20

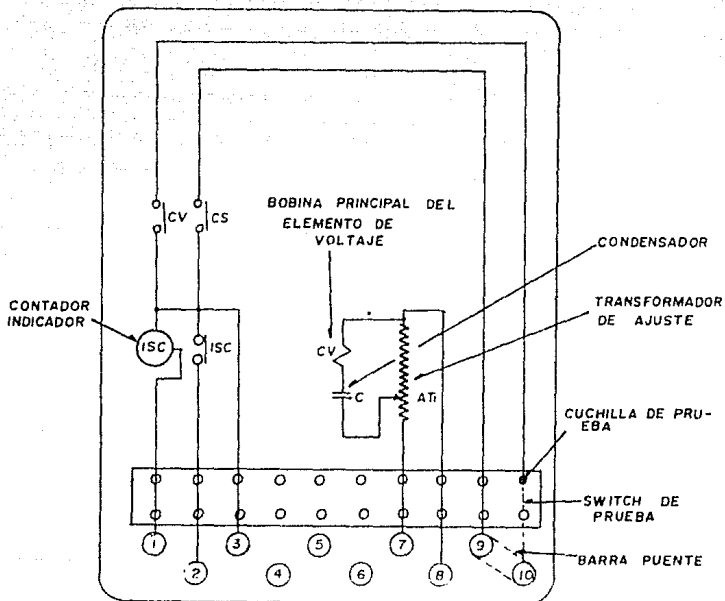


DIAGRAMA DE CONEXIONES INTERNAS DEL RELE DE PROTECCION A TIERRA FIG. 5-21

un núcleo laminado tipo E y un disco espiral, el tiempo de cierre de los contactos está controlado por la fuerza de atracción de un imán permanente. La bobina principal del elemento de voltaje está como se aprecia en la figura, -conectada en serie con un condensador, sobre el cual el voltaje medido es -aplicado a través del transformador de ajuste. El condensador tiene un valor tal al rango de frecuencia, para estar en resonancia con la bobina del elemento de voltaje y no permitir operaciones falsas causadas por las componentes-armónicas del voltaje de neutro.

Las condiciones para el aterrizaje de las máquinas rotatorias son las-siguientes:

- a. Cuando una falla a tierra ocurre en una fase, el potencial de las demás -fases se reduce grandemente.
- b. Ser apropiado para la protección por relé, esto es, el relé de protección a tierra no operará para una falla a tierra externa pero sí para una falla interna.
- c. Cuando una falla a tierra ocurre en los devanados, la corriente es limitada a un valor que no alargue mucho la falla.

En general existen dos métodos para satisfacer las condiciones anteriores, uno es el método de aterrizaje por medio de un transformador de distribución, el cual se le conecta una resistencia en su devanado secundario y el otro método en el cual el neutro del generador es directamente aterrizado -con una resistencia. Usualmente en el primero de 5 a 15 Amp., de corriente a efectiva pueden pasar, mientras que en el segundo, de 100 a 300 Amp., de máxima corriente pueden pasar.

La figura 5-22, muestra un diagrama esquemático para protección de falla a tierra en el estator con neutro a través de un transformador de distribución.

Este esquema combina buena sensibilidad para fallas a tierra, mientras-es muy insensible a voltajes de tercera armónica, consiste simplemente de un filtro de tono, que es un capacitor y una bobina que oponen una alta impedancia a voltajes de tercera armónica y previene al relé de una operación falsa. El Pick-up del relé en tercera armónica es aproximadamente 8 veces el Pick-up a frecuencia nominal.

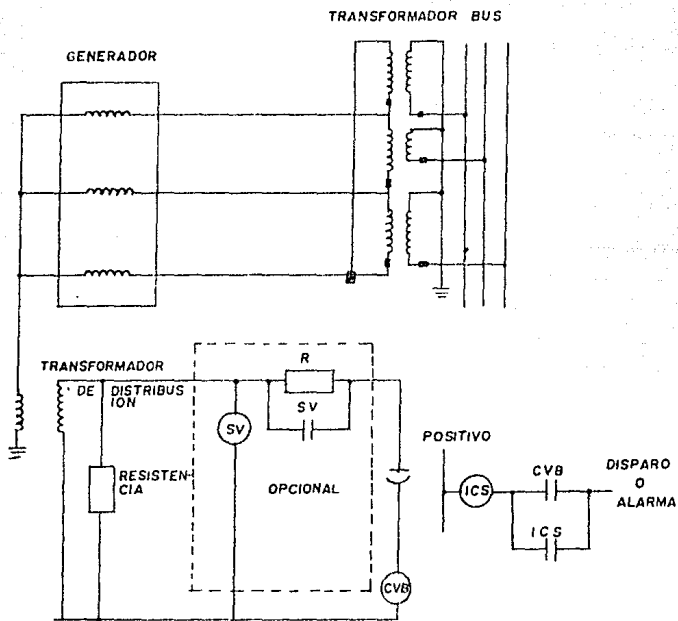


DIAGRAMA ESQUEMATICO PARA PROTECCION DE FALLA A TIERRA EN EL ESTATOR CON NEUTRO ATRAVES DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION FIG. 5-22

El relé SV se usa para proteger el CV-8 contra sobrevoltajes, éste se puede omitir cuando la capacidad continua del CV-8 es mayor que el voltaje producido en falla máxima. El SV se ajusta para abrir su contacto a 70 V. e inserta la resistencia R para limitar el voltaje a 60 V. en el CV-8.

RELEVADORES DE VOLTAJE Y CORRIENTE.

Todos los relés de sobrecorriente (SC) y sobrevoltaje (SV), tienen básicamente la misma construcción, difiriendo sólo en el tipo de bobina, la distribución del campo magnético alrededor de la coraza de hierro y el mecanismo de ajuste. Con diseño de embolo, estos relés tienen sensibilidad alta y construcción simple, ver figura 5-23, cada relé consiste de una bobina electromagnética energizada por un circuito de corriente y un embolo atraído por la bobina. El efecto del movimiento del embolo, rápidamente abre ó cierra los contactos del relé, estos relés operan dentro de dos ciclos (en base a 60), si una sobrecorriente (voltaje) de 300% ó más fluye en el circuito.

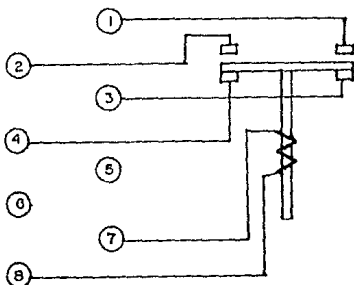


FIGURA 5-23

La corriente de operación (ó voltaje) puede ser ajustada variando el peso en la parte baja del embolo, el valor de operación y de reposición correspondiente a varios pesos es indicada en la placa de datos. El valor de reposición es de 50-60% del valor de Pick-up para C.D. y de 75-85% para C.A.

RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE DE SECUENCIA NEGATIVA (46).

Este relé es del tipo de disco de inducción especialmente diseñado para la protección de máquinas sincronas contra corrientes de fase negativa. Cuando ocurren en el sistema fallas como corto circuito entre fases, dos fases a tierra, la corriente de falla contiene una componente de fase negativa que fluye en la máquina conectada al sistema.

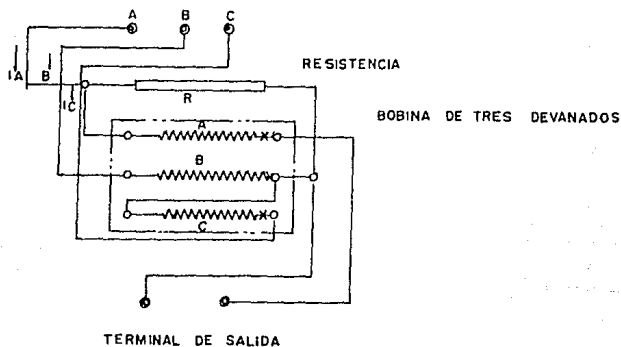
Esta corriente negativa podrá producir en el interior de la máquina, un campo magnético opuesto al rotor e inducir corrientes de Eddy sobre la superficie del mismo, causando calentamientos. De acuerdo a esto si la corriente de fase negativa sigue fluyendo a través de la máquina, el rotor puede ser dañado y un serio accidente puede resultar a causa del excesivo calentamiento.

Para protección general de fallas en el sistema, se puede utilizar relés primarios de algún tipo ó relés de respaldo directo, pero en la práctica ésto no dá la seguridad de que las fallas desbalanceadas sean renovadas dentro del tiempo permitido para corrientes de fase negativa en máquinas sincronas, en todas las situaciones y bajo todas las circunstancias. De este modo es necesario un relé que pueda dar protección para corrientes de secuencia negativa dentro del período de tiempo permisible.

Este relé consiste de un filtro de corriente de fase negativa y un elemento de sobrecorriente, como se explica a continuación:

1. Filtro de corriente de fase negativa.- Es un dispositivo para separar solo la corriente de secuencia negativa de un circuito de corriente, y consiste de un reactor de tres devanados y una resistencia ajustable, la figura 5-24, muestra la conexión interna del filtro.

La caída de voltaje $I_A R$ es proporcional a la corriente secundaria I_A del TC de la fase A, y es alimentada a ambos lados de la resistencia R, un voltaje $-jkI(I_B - I_C)$, proporcional a la diferencia de los vectores de las corrientes secundarias de los TC de las fases B y C ($I_B - I_C$), pero 90° - atrasado en fase, es obtenido en la bobina A del reactor. De este modo entre las terminales de salida la caída de voltaje de la resistencia R y el voltaje inducido en la bobina A del reactor son aplicados en serie.



FILTRO DE CORRIENTE DE SECUENCIA NEGATIVA FIG. 5-24

Esta salida de voltaje tiene un valor proporcional a la corriente de secuencia negativa en el circuito; de acuerdo a esto, cuando K_f equivale a $R/3$, y una corriente de secuencia positiva es aplicada, la caída de voltaje $I_A \cdot R$, de la resistencia R y el voltaje inducido en la bobina A es $-jK_f (I_B - I_C)$ son de igual tamaño pero diferentes 180° en fase, como se muestra en la figura 5-25a, y el voltaje obtenido por la aplicación de estos voltajes en series es cero.

Inversamente en la figura 5-25b, si una componente de corriente de fase negativa es aplicada, estos voltajes son iguales en tamaño y similares en fase, por lo tanto el voltaje obtenido en las terminales de salida aplicando estos voltajes en serie, es un voltaje de salida proporcional a la entrada de fase negativa.

2.- Elemento de sobrecorriente.- Es del tipo de disco de inducción con característica de tiempo inverso, muy similar en funcionamiento al descrito anteriormente como relevador de sobrecorriente de tiempo inverso.

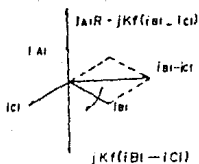


FIG. 5-25a

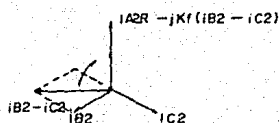


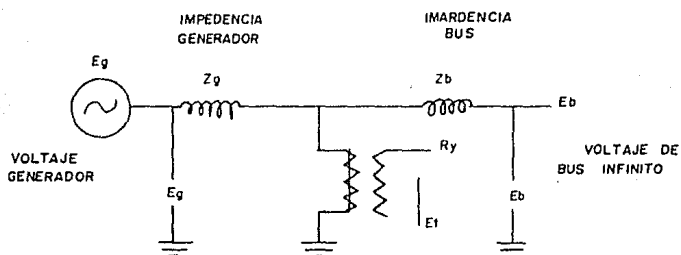
FIG. 5-25b

RELEVADOR DE PERDIDA DE CAMPO (4OL).

Generalmente reducciones anormales de excitación ó pérdida de excitación de máquinas sincronas, causan sobrecorrientes en el circuito de la armadura resultando en la pérdida de sincronismo, causada por la reducción del par de sincronización y sobrecalentamientos causados por corrientes de I_{hd} . En esta condición la impedancia calculada desde la máquina, el voltaje terminal y la corriente cambian con el lapso de tiempo.

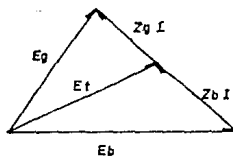
Estas condiciones pueden ser consideradas como un fenómeno en el cual el voltaje inducido interno del generador E_g , cae con respecto a el voltaje de un bus infinito E_b , cuando el circuito equivalente de la máquina sincrona se asume que es como el de la figura 5-26a, el relé es pensado para detectar la pérdida de campo a través de calcular la caída en el voltaje inducido del generador E_g , con respecto al voltaje de un bus infinito. En el interior del relé, la caída puede ser expresada en terminos de E_t (voltaje terminal), I (corriente de armadura), Z_b (impedancia de las terminales del generador hacia el bus infinito) y Z_g (impedancia interna del generador).

Considerando que la zona de operación del relés el interior de un círculo mostrado en la figura 5-27, en la cual el voltaje del bus E_b es tomado en fase a un vector de referencia con su origen en cero, teniendo el círculo su centro sobre la extensión del vector E_b y teniendo los límites del diámetro-



(a) CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR CONECTADO A UN BUS INFINITO.

(b) DIAGRAMA VECTORIAL DEL CIRCUITO



FIGS. 5-26

REGIONES DE OPERACION DEL RELEVADOR DE PERDIDA DE CAMPO
 FIG. 5-27

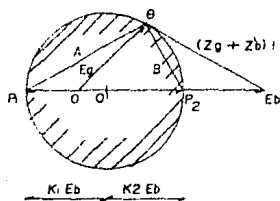
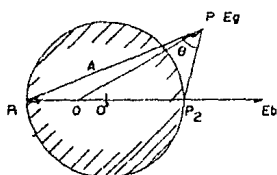
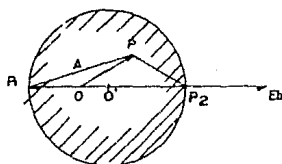


DIAGRAMA VECTORIAL



OPERACION NORMAL



CONDICION DE PERDIDA
 DE CAMPO

en P_1 y P_2 ; donde $OP_1 = K_1 E_b$ y $OP_2 = K_2 E_b$, siendo $K_1 = 0.6$ y $K_2 = 0.8$. - Cuando el voltaje inducido interno del generador tiene caídas del 60 al 80% es considerado como pérdida de campo.

Si el voltaje interno del generador, vector E_g , es expresado por el vector OP , la relación del ángulo θ será el formado por los vectores PP_1 y PP_2 , los que se forman uniendo el punto P al final del vector E_g , con los puntos P_1 y P_2 sobre el círculo de operación. Las condiciones para operación ó no operación del relé son como sigue:

Vector E_g .- Dentro del círculo de operación (en la condición de pérdida de campo): $90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$.

Vector E_g .- Fuera del círculo de operación (con el circuito de campo normal): $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ó $270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$.

Vector E_g .- Sobre el círculo de operación (con condiciones del circuito de campo críticas): $\theta = 90^\circ$ ó 270° .

Por lo tanto, si la relación de fase entre dos vectores PP_1 ($=A$) y PP_2 ($=B$), es analizada por un elemento sensitivo a la fase es posible detectar una caída ó disminución de E_g con respecto a E_b . Entonces, relacionando los vectores A y B en función de los valores del diagrama vectorial de la figura 5-26b, en base al siguiente desarrollo:

$$E_b = E_t - Z_b' I \dots \dots \dots (1)$$

$$E_g = E_t + Z_g I \dots \dots \dots (2)$$

De la figura 5-27

$$A = PP_1$$

$$A = (1 + K_1)E_b + (Z_g + Z_b')I$$

$$A = (1 + K_1)E_t + \frac{1 + K_1 K}{1 + K_1} Z_g I \dots \dots \dots (3)$$

$$B = PP_2$$

$$B = (1 + K_2)E_b + (Z_g + Z_b')I$$

$$B = (1 + K_2)E_t + \frac{1 + K_2 K}{1 + K_2} Z_g I \dots \dots \dots (4)$$

donde:

$$K = \frac{Z_b}{Z_g} \quad \text{constante determinada por las condiciones del sistema.}$$

$$K_1 = \frac{P_1^0}{E_b} \quad \text{constante determinada por el ajuste del relé.}$$

$$K_2 = \frac{P_2^0}{E_b} \quad \text{constante determinada por el ajuste del relé.}$$

$(1 + K_1)$ y $(1 + K_2)$ son constantes, y no tienen relación con la interrelación de fases entre los dos vectores. Todos los relés de este tipo, son dispuestos para detectar las relaciones interfases entre los dos vectores expresados en las fórmulas (3) y (4), y para descubrir caídas en el voltaje interno del generador con respecto al voltaje del bus.

En la figura 5-28, se tiene un diagrama de conexión externa de este tipo de relé, el elemento de campo LF introduce desde la corriente del TC, un voltaje equivalente a $(1 - K_1 K / 1 + K_1) Z_g I$, en el devanado secundario del transformador MT_A e induce un voltaje equivalente a $(1 - K_2 K / 1 + K_2) Z_g I$ en el devanado secundario del transformador MT_B . Por la suma de estos dos voltajes y el voltaje secundario del TP, es posible obtener los voltajes equivalentes de las fórmulas (3) y (4) anteriores.

La figura 5-29, nos presenta las conexiones principales de la unidad LF (loss-of-field), los dos voltajes descritos en el párrafo anterior, son aplicados para excitar los polos diametralmente opuestos del elemento tipo copada de inducción a través de apropiados desviadores de fase de la red. El par de cierre de contactos es producido cuando el ángulo de fase entre los dos voltajes anteriores satisface apropiadamente las relaciones anteriores descritas.

Por la forma en que es alimentado E_L dentro del relé, usado E_{AB} , como una corriente para obtener la caída de voltaje a través de los transformadores MT_A y MT_B , por lo tanto I_{AB} es la diferencia entre las corrientes de la primera y segunda fase.

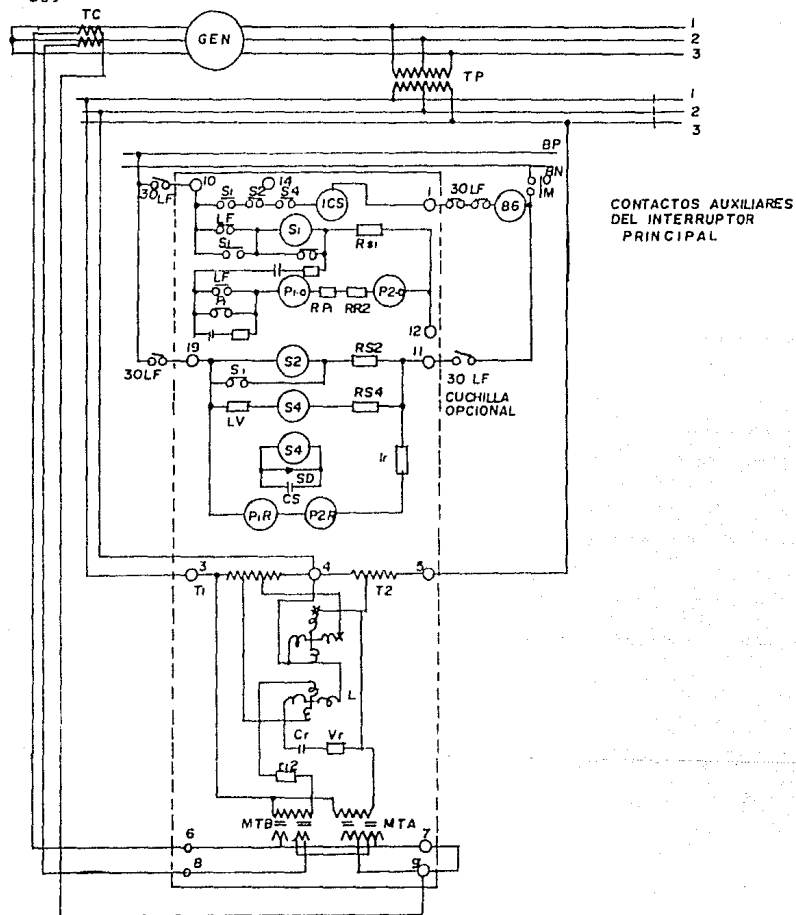
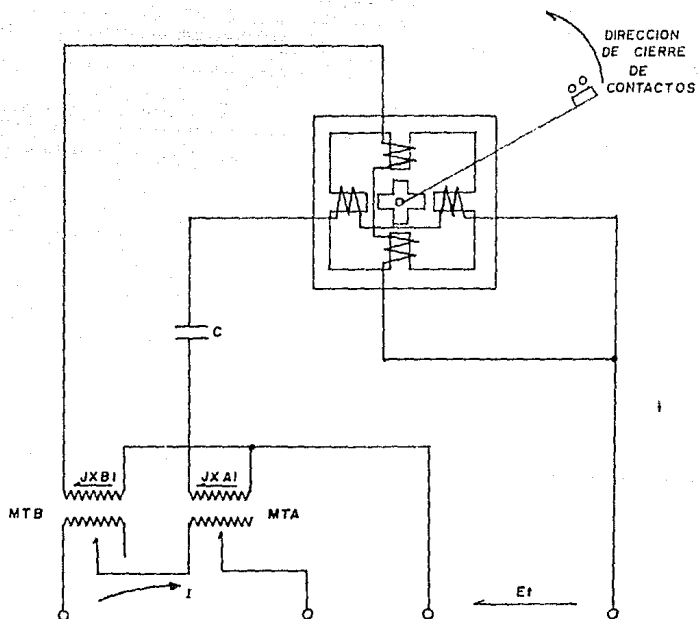


DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL RELEVADOR DE PERDIDA DE CAMPO FIG. 5-28

DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL ELEMENTO PARA LA DETECCION DE PERDIDA DE CAMPO
FIG.-5-29



El tap de MT_B es para localizar el punto P_2 del círculo de operación de la unidad LF, la definición del valor del tap es la misma para MT_A para el punto P_1 .

RELEVADOR DIRECCIONAL DE POTENCIA. (32)

Este relé es especialmente diseñado para cerrar sus contactos, cuando una pequeña potencia en una dirección específica lo energiza y es apropiado para protección de generadores sincrónicos en operación como motor.

Si un generador está operando y la energía de la máquina motriz conecta a él decrece, podrá obtener alimentación de energía desde el sistema para operar como motor y recíprocamente impulsa a la máquina motriz.

Como un resultado, en el caso de un turbo-generador, se pueden dañar los alabes de la turbina debido a el sobrecalentamiento causado por la fricción. Tales problemas son generalmente prevenidos por medidor de flujo de vapor. En el caso de un generador hidroeléctrico, hay daños debido a la cavitación causada por la operación con pequeño caudal, lo cual es prevenido usando un medidor de caudal.

En el caso de un generador diesel, los daños son provocados debido a las explosiones ó incendios del combustible cuando está operando como motor, esto debe ser prevenido por todos los medios.

La protección contra tales daños en la operación del generador como motor, por medio de detectar la corriente inversa en las terminales del generador, se puede decir en general que tiene un fuerte matiz de protección de respaldo, pero en vista de que la protección se hace extensiva a la máquina motriz, se dice que tiene una gran importancia.

Equipado con suficiente capacidad continua como un relé de potencia, para protección del generador en su operación como motor, el relevador de potencia es alto en sensibilidad dinámica. Esto es claro considerando, por ejemplo, el caso de un turbo-generador donde la corriente de vapor soporta el 99% de la capacidad, el 1% remanente de pérdidas es cubierto por el sistema.

Las pérdidas del turbo-generador son aproximadamente del 3% del valor de salida, el flujo de corriente inversa en este caso será no mayor del 1% - del 3% (0.03%) del valor de salida. Las magnitudes de corriente inversa, que son producidas en los generadores operando como motores, sin entrar potencia en la máquina motriz, se muestra en la tabla 5-2.

TABLA 5-2

CLASIFICACION	MAGNITUD DE CORRIENTE INVERSA
TURBO-GENERADOR	3% del dato de placa en KW.
GENERADOR DIESEL	25% del dato de placa en KW.
TURBINA HIDRAULICA	del 0.2 al 2% del dato de placa en KW.

El relé de potencia de este tipo, responde dentro de un minuto de corriente inversa, y es apropiado para ser usado como protección en la operación como motor. La figura 5-30, nos muestra un esquema de protecciones de este tipo de relé, el elemento detector de potencia del relé registra la corriente inversa, y permite un tiempo límite de operación de 2 a 25 seg., promedio del elemento limitador de tiempo (elemento T), y después el circuito de disparo acciona cerrando contactos. La figura 5-31, nos muestra el esquema interno de conexiones del relé.

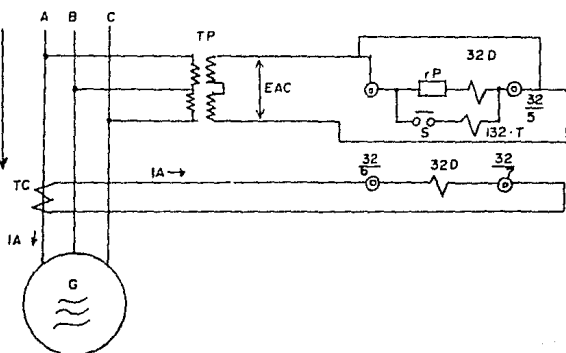
El elemento limitador de tiempo es originalmente usado para prevenir - operaciones erróneas, causadas por fallas de corto circuito, fuera de sincronismo, etc. Pero la operación como motor es permitida como máximo por 30 seg.

La secuencia de operación completa de este relé es como sigue:

Quando la potencia en una dirección específica es superior a un valor pre determinado y después de un tiempo límite el cual es obtenido de acuerdo a la característica de tiempo inverso del relé.

- (1) Los contactos del elemento direccional de potencia (D) cierran.
- (2) El contactor auxiliar (S) es energizado.
- (3) El elemento limitador de tiempo (T), es energizado por los contactos de (S) y después del límite de tiempo ajustado, los contactos de (T) cierran.

DIRECCION DE DETECCION DE POTENCIA



EL DIAGRAMA VECTORIAL MUESTRA
EL CASO CUANDO EL FACTOR DE
POTENCIA ES 1.

FIG. 5-30

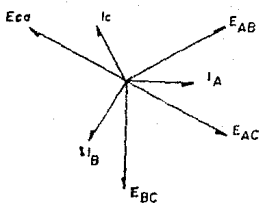
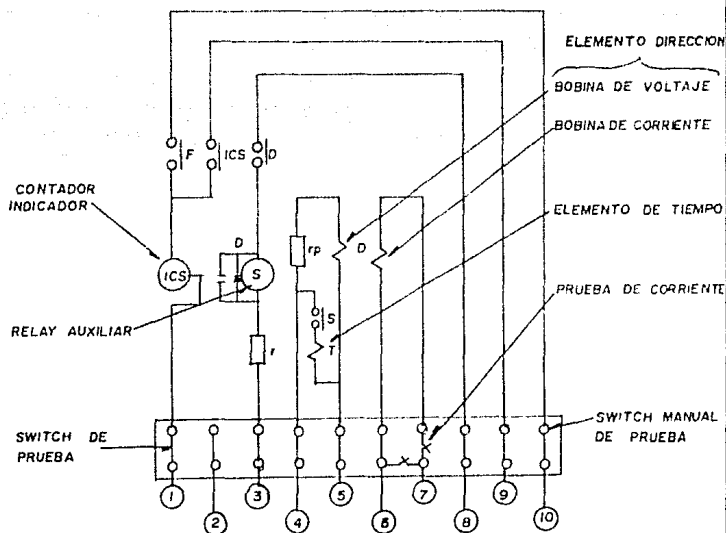


DIAGRAMA DE CONEXIONES INTERNAS DEL RELEVADOR DIRECCIONAL DE POTENCIA
FIG. 5-31



(4) El circuito indicador opera cerrando el circuito de disparo.

RELEVADOR DE DISTANCIA (21).

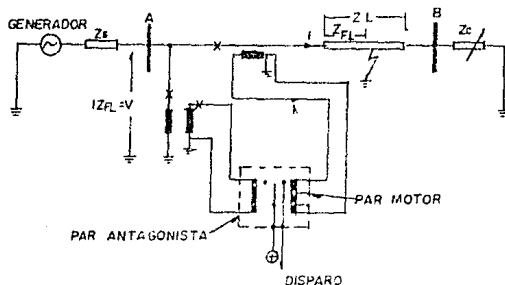
Con el nombre genérico de protección de distancia se conoce toda una gama de relés, cuya unidad de medida actúa en función del valor de la impedancia por fase del elemento protegido. Su denominación más correcta sería la - relé de mínima impedancia ó relé de mínima reactancia, el principio de medición es la comparación entre la tensión en el punto donde se halla instalado y la corriente de falla. Para esto el relevador tiene una bobina de tensión - que recibe la señal de un TP y una bobina de corriente que recibe la señal - de un TC.

La medición de la impedancia puede realizarse fácilmente mediante un relé de balanza, como el de la figura 5-32, en el que el par que trata de evitar la operación es proporcional a la tensión en el punto de medida y la señal que trata de producirlo es la intensidad que recorre el elemento protegido. El ajuste del relé se consigue variando el número de espiras de la bobina motora, de forma que el par motor y el antagonista están equilibrados en el momento que el cociente entre la tensión y la intensidad aplicadas sea - igual a la impedancia ajustada Z_M .

Si ocurre una falla al final de la línea la corriente de corto circuito será mínima, puesto que la impedancia de corto circuito es la impedancia total de la línea. La corriente irá aumentando conforme la distancia disminuya, mientras que la tensión decrecerá, por lo tanto se puede ajustar el relé para que opere a una distancia determinada (para una relación $Z_M = V/I$ determinada).

En un plano R - X, el lugar geométrico de todos los puntos que cumplen con la ecuación:

$$\frac{V}{I} = Z_M$$



RELE DE BALANZA CONECTADO PARA OPERAR A MINIMA IMPEDANCIA

FIG. 5-32

Es un círculo con centro en el origen y de radio Z_M , ver figura 5-33, en la circunferencia de esta área el par motor es igual al par antagonista. Z_M es el valor de la impedancia a que se ha ajustado el relé, para una impedancia menor que la de este ajuste (al aumentar la corriente) el relé operará, fuera de esta área el relé no operará.

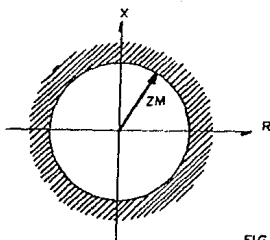
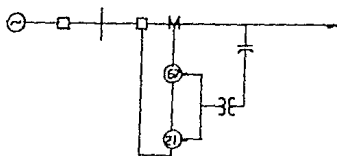
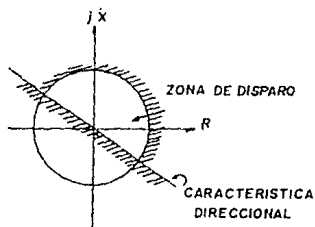


FIG. 5-33

El relé descrito anteriormente no es direccional y por lo tanto, ante falla externa en dirección contraria a la línea, si el valor de Z_M es inferior al ajuste, se producirá un disparo incorrecto, para evitar lo anterior se instala de tal forma que su operación está controlada por una unidad direccional, obteniéndose una característica de operación como la de la figura 5-34.

Un relé de distancia tiene por lo general tres zonas de operación, esto implica tres impedancias características, como se aprecia en la figura 5-35. Teniéndose las siguientes características:

1. Si se produce una falla en la primera zona operan Z_{M1} , Z_{M2} y Z_{M3} .
2. Si se produce una falla en la segunda zona operan Z_{M2} y Z_{M3} .
3. Si se produce una falla en la tercera zona opera Z_{M3} .



67: UNIDAD DIRECCIONAL
21: UNIDADES DE DISTANCIA

FIGURA 5-34

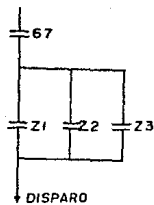
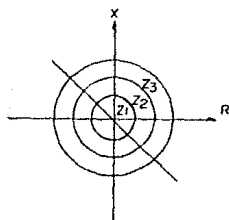


FIGURA 5-35

CONCLUSIONES

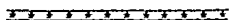
CONCLUSIONES

Las unidades generadoras a gas, tienen gran importancia en el sistema eléctrico de nuestra Ciudad; debido a su versatilidad para operar como complemento de carga o para amarrar el esquema de Red de Emergencia.

Sus principales ventajas son: rapidez de arranque y toma de carga, sencillo manejo, mínimo mantenimiento, pequeña área para su instalación y poco equipo auxiliar para su operación, dualidad de funcionamiento con gas o diesel, bajo nivel de ruido, no requiere agua (escasa en nuestra Ciudad). Por lo cual es factible su instalación dentro de la ciudades, teniendo ahorro en la transmisión de la energía.

El presente trabajo, fue realizado con la intención de servir como auxiliar en las materias de ingeniería, relacionadas con las áreas de generación, distribución y protección. Teniéndose especial interés en el generador eléctrico, su excitación, su regulación y su sistema de protección.

BIBLIOGRAFIA



Bibliografía:

- Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A.
Instrucción Book, Twin Pack-Air Cooled Generator.
Mitsubishi Electric Co. 1971. (volumen I Generador).
- Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A.
Instrucción Book, Twin Pack-Air Cooled Generator.
Mitsubishi Electric Co. 1971 (volumen II Sistemas de
regulación y Excitación).
- Conversión de Energía Electromecánica.
Autor: Vembu Gourishankar.
Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.
- Máquinas Eléctricas, Estado dinámico y Permanente.
Autor: George J. Thaler & Milton L. Wilcox.
Ed. Limusa, México, 1979.
- Redes Eléctricas Volumen I.
Autor: Jacinto Viqueira Landa.
Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.
- Redes Eléctricas Volumen II.
Autor: Jacinto Viqueira Landa.
Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.
- Sistemas Eléctricos de Potencia.
Autor: William D. Stevenson Jr.
Ed. Mc. Graw - Hill, 1979.
- El Arte y la Ciencia de la Protección por Relevadores.
Autor: C. Russel Mason.
Ed. Compañía Editorial Continental, S.A. México, 1980.
- Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia.
Autor: William D. Stevenson Jr.
Ed. Mc. Graw - Hill, 1977.
- Circuitos de Corriente Alterna.
Autor: Rossel M. Kerchner & George F. Corcovan.
Ed. Editorial Continental, S.A. México, 1978.

- Máquinas Motrices Generadoras de Energía Eléctrica

Autor: D. José Ramírez Vázquez

Editorial: CEAC, S. A.

- Protecciones en las Instalaciones Eléctricas

Autor: Paulino Montané

Editorial: Marcombo

- Fundamentos de Protecciones de Sistemas Eléctricos

Autor: Gilberto Enriquez Harper

Editorial: Limusa.