



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA

Trabajo de Diploma

Título: ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN EXISTENTES Y A EMPLEAR EN LOS TURBOGENERADORES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE LA EMPRESA CDTE. "ERNESTO CHE GUEVARA".

Autor(a): Mylenes Navarro Rodríguez.

Tutores: Ing. Rubén Alejandro Rosell López.

Ing. Yordan Guerrero Rojas.

*Moa-2006
"Año de la Revolución Energética en Cuba."*

PENSAMIENTO

“...y siempre mediremos, por encima de todo un Técnico y un Científico no por sus conocimientos, sino por el grado de humildad y modestia con que sea capaz de aportar sus conocimientos.”

Fidel Castro.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sentido y profundo agradecimiento a todas aquellas personas que de una forma u otra hicieron posible el desarrollo y la exitosa culminación de este trabajo; por la disposición, paciencia y solidaridad. En especial a mis familiares.

A mis tutores, al personal del Taller Eléctrico y de la Central Termoeléctrica de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, quienes con su apoyo, dedicación y esmero supieron guiarme por el camino correcto hacia la meta final.

A TODOS, GRACIAS.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en especial a mi hijo; a mi madre, a mi hermano, a mi esposo y a todos aquellos que con su amor y confianza han contribuido a la culminación de mis estudios superiores.

A la Revolución Cubana, la cual me ha brindado la posibilidad de formarme como una profesional capaz de llevar adelante el desarrollo y las conquistas del Socialismo.

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Mylenes Navarro Rodríguez, autor(a) de este Trabajo de Diploma autorizo al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez hacer uso del mismo con el fin que se estime conveniente.

Diplomante: Mylenes Navarro Rodríguez

Tutor: Ing. Rubén Alejandro Rosell López.

Tutor: Ing. Yordan Guerrero Rojas.

SÍNTESIS

En la siguiente investigación se abarcó el estudio, de forma general, de los sistemas de excitación de los generadores sincrónicos, y en especial los pertenecientes a los turbogeneradores instalados en la central termoeléctrica de la Empresa Ernesto Che Guevara, así como el sistema de excitación propuesto para el nuevo turbogenerador que se instalará en la central resultado de la modernización que se lleva a cabo.

El capítulo 1 comprendió el desarrollo tecnológico de los turbogeneradores. La definición de los diferentes tipos de sistemas de excitación, sus características y funciones principales.

En el capítulo 2 se realizó la caracterización del sistema de excitación existente y los otros dos a emplear, se detallan los elementos básicos que conforman los sistemas de excitación escogidos y se describen las principales funciones de cada uno de ellos.

En el capítulo 3 se finalizó con el análisis de los tres sistemas de excitación estableciendo una comparación, así como una valoración técnico—económica de los mismos.

SUMMARY

This work embraced the study of the excitement systems. The theory understands the technological development of the generator, framing the excitement process inside a generation system. They are defined the excitement types, the characteristics and main functions, their advantages and disadvantages.

the classifications of the excitement systems were described in the chapter 1 that exist for generators of Alternating Current, according to the source of energy of the excitatory one and like their systems be carried out, as well as the different excitatory that correspond each one of the classifications. Reference will be made to its concepts, operation principle and general characteristics; as well as their conditions of stability are analyzed and how to control their voltage.

Then in the chapter 2 were carried out a technical comparison between the system of existent excitement and the other ones two to use.

By way of manual, it details the basic elements they conform the chosen excitement systems and it indicates the main functions of each one of them. It leaves of the general concept of an excitement system; it is continued with the description peculiar of each one of the components. Technical description, elements that conform it, their quality, among other parameters of great importance.

In the chapter 3 were carried out a comparison as for advantages and disadvantages of each one of them; as well as a technical valuation - economic of the obtained results.

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1. Sistemas de Excitación de los Turbogeneradores.	2
1.1 Antecedentes.	2
1.2 Generalidades de los sistemas de excitación.	4
1.3 Estructura de un sistema de excitación.	5
1.4 Regulación.	6
1.5 Límite superior (techo) del voltaje o intensificación de la excitación.	11
1.6 Estabilidad.	12
1.7 Clasificación de los sistemas de excitación.	18
1.7.1 Electromecánico Directo.	19
1.7.2 Electromecánico Indirecto.	26
1.7.3 Excitación Estática.	28
Capítulo 2. Descripción técnica de los Sistemas de Excitación fundamentales.	32
2.1 Evaluación del Sistema de Excitación Rotatoria (con escobillas) con Generador de Corriente Continua.	32
2.1.1 Excitación del turbogenerador.	36
2.2 Evaluación del Sistema de Excitación Estática.	40
2.2.1 Descripción técnica.	40
2.2.2 Control de excitación.	45
2.2.3 Modelo del SEE.	46
2.2.4 Funcionamiento del SEE.	47
2.2.5 Modelo matemático de estabilidad.	53
2.2.6 Factores que afectan la estabilidad de voltaje del sistema generador.	53
2.3 Evaluación del Sistema de Excitación Rotatoria (sin escobillas) Brushless.	55
2.3.1 Descripción técnica.	56
2.3.2 Características de operación.	58
Capítulo 3 Evaluación de los sistemas de excitación fundamentales.	60
3.1 Ventajas y desventajas de los sistemas de excitación fundamentales.	60
3.1.1 Sistema de Excitación Rotatorio con escobillas.	60

3.1.2 Sistema de Excitación Estática	63
3.1.3 Sistema de Excitación Rotatorio sin escobillas.	64
3.2 Valoración económica	66
3.2.1 Sistema de Excitación Rotatorio con escobillas	66
3.2.2 Sistema de Excitación Estática	67
3.2.3 Sistema de Excitación Rotatorio sin escobillas	67
Conclusiones	68
Recomendaciones	69
Bibliografía	70
Anexos	

CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE TURBOGENERADORES.

1.1 Antecedentes.

La generación comercial de energía eléctrica dio inicio en 1868 con la invención del Generador de Corriente Directa (CD). Su desarrollo toma fuerza con la invención de la bombilla eléctrica en 1881 por Edison, dando paso a la iluminación de calles, grandes fábricas, almacenes y teatros.

Las empresas de generación que habían desafiado a la CD se resistían a reconocer las ventajas de la generación de la Corriente Alterna (CA) que se inicia gracias a la invención de los campos rotatorios por parte de Tesla (1888) cuyas patentes cede a Westinghouse, quien pone en servicio la primera planta de generación de CA en Niágara (1895).

La invención del transformador mostró las ventajas de la CA e inclinó la balanza del desarrollo de la tecnología, dando paso a un rápido desarrollo de sistemas de generación locales.

Un sistema de generación está formado por una máquina motriz o motor primario, el generador, el regulador y el equipo de control, además de algunos dispositivos de protección. En esencia los generadores representan el corazón o la parte central de un sistema de generación.

Los Generadores Sincrónicos se han convertido en las máquinas más utilizadas en la producción de Energía Eléctrica, su popularidad se debe a que permiten un control más preciso de la frecuencia y del voltaje de la electricidad generada, pero principalmente a un control efectivo de la potencia reactiva (VAR.) y la activa (W). Sus componentes basan su funcionamiento en principios físicos, electromagnéticos y eléctricos.

En el año 1863 el inglés G. Wilde realizó con arreglo al Generador Sincrónico la proposición de V. I. Zinsteden (1851) sobre la sustitución de los imanes permanentes excitados por un generador magnetoeléctrico auxiliar de Corriente Continua (CC o CD), el cual recibió el nombre de excitatriz.

El inductor fijo del Generador Sincrónico Monofásico de Wilde representaba un electroimán en forma de Π cuyas zapatas polares abarcaban el inducido en rotación.

Para aumentar el electroimán se adaptó un generador excitador magnetoeléctrico aislado. En vez del inducido de barras, usado anteriormente, Wilde utilizó el inducido con circuito magnético de sección de doble T, propuesto en el año 1856 por el electrotécnico y empresario alemán W. Siemens, que ahora se denomina inducido de polos salientes.

El circuito magnético del inducido tenía forma de un cilindro, en las ranuras longitudinales de la superficie del cual se colocaba un devanado sacado a los anillos de contacto.

En vez de la estructura de polos salientes, elaborada para los generadores sincrónicos monofásicos, C. Braun empleó una versión original del rotor. El devanado de excitación (común para todos los polos) tenía forma de anillo, que abarcaba el árbol y era ubicado entre dos mandíbulas de acero con polos salientes en forma de garras, que constituían un sistema de polos alternados. Posteriormente ese tipo de rotor no se justificó y ahora sólo se puede encontrar en Generadores Sincrónicos Especiales.

La elaboración de las Máquinas Sincrónicas de polos interiores está relacionada con la aparición de las turbinas de vapor, que tienen frecuencia de rotación y rendimiento mucho mayores que las máquinas de vapor de émbolo.

Las turbinas de vapor fueron utilizadas por primera vez para el accionamiento de los Generadores Trifásicos en 1899, año en que fue puesta en marcha la central eléctrica de la ciudad alemana de Elberfeld en la cual fueron instaladas las turbinas de reacción de expansión múltiple, inventadas por Ch. A. Parson en el año 1884.

Estas ponían en rotación turbogeneradores de 1000kW de potencia. Al principio los rotores de los turbogeneradores tenían polos salientes con devanado de excitación concentrado, y sólo en la primera década del siglo XX se emprendió la fabricación de turbogeneradores con rotores de polos interiores con devanado de excitación distribuido.

Los primeros sistemas de excitación existentes fueron realizados manualmente, a través de reóstatos, donde las pérdidas de energía por disipación de potencia eran considerables. Por tanto no se lograba la estabilidad perfecta de la máquina debido a que los lazos de regulación eran abiertos.

Hoy en día se ha logrado implementar los sistemas de regulación de voltaje, los cuales brindan una mayor confiabilidad y varias posibilidades como lazo cerrado, rápida respuesta ante un proceso transitorio, protección a la máquina entre otros.

Acerca de las investigaciones relacionadas con los sistemas de excitación para generadores de CA se han publicado páginas en Internet. En este año 2006 se publicó un Proyecto Eléctrico de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica, llamado Sistemas de Excitación Estática de Generadores Sincrónicos, por Fabián Emerson Cubillos Zánchez optando por la Ingeniería Eléctrica en el año 2004.

“Los Generadores Sincrónicos se han convertido en las máquinas más utilizadas en la generación de energía eléctrica, su popularidad se debe a que permiten un control más preciso de la frecuencia y del voltaje de la electricidad generada, pero principalmente a un control efectivo de la potencia reactiva (VAr) y la activa (W).” [2]

Los sistemas de excitación son de gran importancia pues, a través de ellos se logra la Generación de Energía Eléctrica por la aplicación de CD a los devanados de la máquina, que dicha generación es utilizada en todas las esferas de la economía del país.

1.2 Generalidades de los Sistemas de excitación.

El sistema de excitación de una máquina sincrónica no es más que el conjunto de máquinas, dispositivos y mecanismos, utilizados para suministrar y regular CD al devanado inductor.

Los sistemas de excitación deben cumplir los siguientes requisitos:

1. Poseer una alta confiabilidad en el trabajo.
2. Ser sencillo y que su costo sea pequeño.

Además, la necesidad de regular el voltaje y garantizar un trabajo estable de las máquinas sincrónicas, le impone al sistema de excitación, una serie de requisitos complementarios.

“Para mantener el voltaje U constante en los terminales del generador, durante una variación de la carga es necesario regular corriente de excitación (I_f) y correspondientemente tensión de excitación (U_f) en márgenes amplios.

Según la Norma Estatal de la Unión Soviética (GOST) 533-68, la magnitud estable mínima de U_f de un turbogenerador, no debe ser mayor de $0.2 \cdot U_{FNominal}$.” [3]

Estos elementos debido a su vital importancia existieron siempre, primero en forma de dispositivos manuales, luego mecánicos, electromecánicos y en los últimos años, desde la aparición de los dispositivos electrónicos de potencia, los sistemas clásicos de excitación, están dando paso a otros sistemas de excitación que utilizan, de alguna manera u otra, dispositivos electrónicos semiconductores de potencia principalmente tiristores. Estos pueden ser controlados de manera automática mediante microprocesadores y/o microcontroladores.

Con estos nuevos procedimientos, se consiguen ventajas sustanciales, tales como mayor velocidad de respuesta ante cualquier variación de carga o contingencia en un sistema eléctrico de potencia, que en consecuencia aumentan la estabilidad del sistema.

1.3 Estructura de un sistema de excitación.

El objetivo principal de los sistemas de excitación es mantener el voltaje terminal a valores prácticamente constantes bajo regímenes de carga estables y también en regímenes transitorios cuando la carga oscila lentamente, o en otros casos, instantáneamente.

Las funciones básicas de un sistema de excitación son:

- Suministrar la corriente al devanado de campo.
- Controlar los voltajes de salida en forma rápida y automática.
- Contribuir a la estabilidad sincrónica del sistema de generación.

Los elementos principales de un sistema de excitación son la excitatriz y el regulador de voltaje, este último constituye el elemento que controla la salida de la excitatriz de manera tal que se tengan los cambios de potencia reactiva y voltaje generado en la magnitud requerida por la carga.

Como ya fue dicha la excitatriz provee la corriente directa de excitación al campo del Generador Sincrónico. La magnitud de la potencia que se emplea para la alimentación del campo se encuentra comprendida entre 0.35% y 1.5% de la Potencia nominal del

generador, respectivamente desde las potencias grandes hacia las pequeñas. En generadores de la misma Potencia nominal, la potencia de excitación requerida aumenta al aumentar el número de polos.

“La función de la excitatriz es permitir que el regulador de voltaje use una pequeña señal de control para ajustar la corriente de campo del generador de valor mucho mayor. En esencia la excitatriz es un amplificador de potencia.”[2]

1.4 Regulación.

Los generadores en Sistemas Eléctricos de Potencia abastecen de energía eléctrica a los centros poblados e industrias, estos constituyen una carga eléctrica variable y difícil de predecir, por lo que los generadores deben contar necesariamente de reguladores de tensión que ayuden a contrarrestar las variaciones de tensión debidas al efecto de carga, el objetivo es mantener tensiones constantes en los bornes del generador para cualquier condición de carga.

Regulación de frecuencia.

De suma importancia en los sistemas eléctricos en cuanto al grado de afectación a los consumidores lo constituye la regulación de frecuencia.

Por ello existen normas en los sistemas eléctricos para regular los límites permisibles de desviaciones de la frecuencia. En nuestro sistema es del $\pm 1\%$, es decir, ± 0.6 Hz.

La potencia activa consumida por un equipo eléctrico es también función del voltaje del mismo y reaccionará, a su vez, a sus fluctuaciones, pero sucede que generalmente los equipos son diseñados para tolerar las desviaciones normales del voltaje en un $\pm 5\%$ sin que se afecte su rendimiento u operación.

Esto hace necesario que existan los reguladores de tensión, estos elementos detectan las variaciones de tensión en los bornes del generador (que depende exclusivamente de los requerimientos de energía reactiva de las cargas) y según esto hace variar la corriente de

excitación en el devanado rotatorio de los generadores, induciendo una tensión de excitación y por lo tanto variar la tensión en los terminales del generador.

Regulación de voltaje

La regulación del voltaje tiene algunos principios básicos que podemos enmarcarlos en: asegurar un adecuado nivel de voltaje o voltaje promedio en el sistema y la limitación de las alteraciones locales del voltaje relativas al nominal.

Un balance total de potencia reactiva no garantiza que no se presenten dificultades locales, las cuales deberán ser resueltas si hay reservas aumentando la excitación de las máquinas sincrónicas o cambiando la derivación de los transformadores (redistribuyendo potencia reactiva).

Un buen regulador de tensión ha de tener las siguientes cualidades:

Rapidez de respuesta. Es decir, ha de intervenir rápidamente después de una variación de carga, para evitar que la tensión caiga rápidamente. Para ello, ha de tener poca inercia, elevado par motor, y corto recorrido.

Exactitud. Para llevar exactamente la tensión al valor de régimen, después de una perturbación.

Sensibilidad. Para reaccionar a las perturbaciones débiles.

Amortiguación eficaz. Para evitar la producción de oscilación el amortiguamiento ha de ser ajustable para que se pueda ajustar a la característica de su generador.

Sobrerregulación. Para aprovechar al máximo las posibilidades del generador.

El regulador de voltaje muestrea el voltaje de salida del generador, ésta entrada es reducida y convertida a una señal de corriente directa que representa el voltaje de línea del generador. La señal se conduce a un detector de error donde se compara con una señal de referencia. La señal de referencia es el punto de regulación del regulador y está directamente relacionada con el voltaje nominal del generador.

Si la señal muestreada aumenta o disminuye debajo de la señal de referencia, se produce una señal de error, la cual es amplificada y aplicada a la etapa de control de potencia del campo del generador.

La magnitud del voltaje CA generado es controlada por la cantidad de la CD de excitación provista al campo. Si la excitación aplicada es constante, la magnitud del voltaje podría ser controlada manipulando la velocidad del generador; sin embargo, esto implicaría una frecuencia variable y la mayoría de los usos requieren una frecuencia constante, este método de control del voltaje raramente se implementa.

En su lugar se utilizan reguladores de voltaje de estado sólido o reguladores de excitación estáticos para controlar la corriente de excitación y así regular de un modo más exacto el voltaje del generador.

La corriente de excitación (I_f) de la figura 1.1 constituye varias centenas e incluso miles de amperios. Por esta razón, económicamente no es racional regularla con ayuda del reóstato conectado al circuito del devanado de excitación, o sea, al del inducido de la excitatriz.

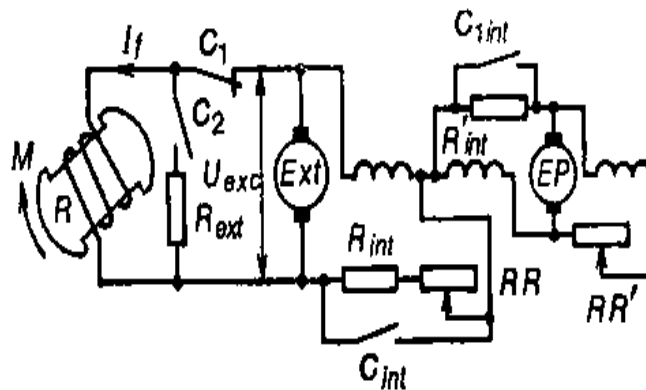


Figura 1.1. Esquema del sistema electromecánico de excitación de una máquina síncrona de gran potencia. R es el rotor de la máquina; Ext es la excitatriz (dinamo en derivación independiente); EP es la excitatriz piloto, dinamo de excitación independiente; I_f es la corriente de excitación; U_{exc} es la tensión de excitación; M es al momento o torque; RR y RR' son resistencias de regulación; C_{int} y $C_{1\ int}$ son los contactores para la intensificación de la excitación; R_{int} y R'_{int} las resistencias que se cortocircuitan durante la intensificación; C_1 y C_2 son contactos del Aparato Automático de Excitación del Campo (AAEC), y R_{ext} es la resistencia de excitación.

Las pérdidas en el reóstato reducirán notablemente el rendimiento de la máquina sincrónica. El mando de la corriente de excitación se realiza exclusivamente a cuenta del cambio de la tensión de la excitatriz U_f .

$$I_f = U_f / R_f \quad [1.1]$$

R_f : resistencia de excitación.

Según el régimen en que funciona la máquina sincrónica, diferentes corrientes de excitación y, respectivamente, diferentes tensiones de la excitatriz U_f deben mantenerse estables. En el circuito electromecánico de la figura 1.1 sirven para regular la tensión de la excitatriz E_{xt} los reóstatos RR y RR' intercalados en el circuito del arrollamiento en paralelo de la excitatriz y del subexcitador, respectivamente.

A expensas de la introducción del subexcitador EP en el circuito se amplían considerablemente los límites de regulación de la tensión de la excitatriz. En las máquinas sincrónicas de menor potencia puede no haber subexcitador.

Los reguladores que reaccionan, no sólo ante una magnitud de desviación de determinados parámetros, sino también ante una magnitud de derivadas con el tiempo, reciben el nombre de *reguladores de acción potente*.

Tipos de regulación y su interacción.

Los reguladores de excitación (RAE) influyen sobre la corriente de excitación de los generadores, garantizan la calidad de la tensión, mejoran la estabilidad y hacen más favorable el carácter de los procesos transitorios (disminuyen las oscilaciones, aceleran el atenuamiento, etc.). Estos reguladores reaccionan ante la tensión, la frecuencia, la corriente y la potencia, que comúnmente se miden en el generador dado o en la central.

Los reguladores de la frecuencia de rotación (RAFR) son reguladores primarios que influyen sobre la entrada del portador de la energía (agua, vapor, gas) a la turbina y mantienen la frecuencia de rotación de los generadores. Estos reguladores estabilizan la frecuencia de rotación reaccionando a su desviación, además en el transcurso de unos cuantos segundos elimina las desviaciones pequeñas de la carga (desde el 1 hasta el 4 %) con un período no menor de 1 min.

Los reguladores de frecuencia (RAF) son reguladores secundarios los cuales regulan la frecuencia en el sistema (comúnmente la regulación se hace de manera estática) mediante el desplazamiento paralelo de la característica estática del RAFR ejecutado por el mecanismo de variación de la frecuencia.

La regulación secundaria, a diferencia de la primaria, que sólo emplea las propiedades limitadas de acumulación de la caldera y del recalentador intermedio, debe ser más potente y debe abarcar las oscilaciones más grandes de la carga (más del 4 % para la amplitud en un período mayor de 1 min.). Esto se alcanza influyendo al mismo tiempo sobre la productividad de vapor en la unidad de la caldera y sobre las válvulas de regulación de la turbina.

Cuando hay rápidas y grandes aberturas en las válvulas, el consumo de vapor aumenta y la presión de la turbina baja. Para que no se interrumpa el funcionamiento normal de la unidad de caldera y la turbina, a los reguladores existentes les agregan uno más el regulador de presión antes de sí mismo (RAS).

Este regulador limita la disminución de la presión del vapor antes de la turbina, impidiendo el crecimiento de la velocidad y el aumento de la abertura de las válvulas de regulación de esta. Este tiene como función el mantenimiento constante de la presión del vapor antes de la turbina mediante la influencia, si es necesario, sobre las válvulas reguladoras de la turbina; las cierra si la presión bajó y las abre si aumentó.

Los reguladores de excitación y de frecuencia empleados en la actualidad, son básicamente reguladores sin zonas de insensibilidad, que realizan una regulación continua. En los generadores grandes que funcionan actualmente en los sistemas energéticos se emplean reguladores de acción continua. Estos se subdividen en:

- Reguladores de acción proporcional, que varían la corriente de excitación proporcionalmente a la desviación de uno de los parámetros del régimen (por ejemplo, la desviación de la tensión ΔU).
- Reguladores de acción forzada. Estos reaccionan no sólo a la variación de los parámetros del régimen, sino que también a la velocidad y aceleración de sus variaciones.

1.5 Límite superior (techo) del voltaje o intensificación de la excitación.

Durante cortocircuitos en la red, el voltaje U en los terminales de los generadores cae bruscamente y por eso la potencia desarrollada por éstos, también disminuye bruscamente y como las potencias de las turbinas se mantienen invariables, surge el peligro de que los generadores salgan de sincronismo.

En estos casos, para mantener U en el nivel más alto posible y resguardar la salida de los generadores de sincronismo, se utiliza el llamado forzamiento de la excitación o sea el voltaje de excitación U_f se eleva lo más rápidamente posible hasta el valor máximo posible $U_{f\text{máx}}$.

En los sistemas de excitación de generadores sincrónicos con estructuras de extinción del campo, esto se logra utilizando un relé especial, que reacciona ante la disminución brusca del voltaje y cuyos contactos shuntean el reóstato de excitación. (Relé para baja tensión).

Para que el forzamiento de excitación sea efectivo, el límite superior (el techo) del voltaje de excitación $U_{f\text{máx}}$, debe ser lo suficientemente grande.

Con un retardo, determinado por la constante de tiempo del devanado de excitación de la máquina sincrónica, la corriente de excitación alcanza el valor límite:

$$I_{f\text{máx}} = I_{f\text{nom}} \frac{U_{f\text{máx}}}{U_{f\text{nom}}} \quad [1.2]$$

$I_{f\text{máx}}$: corriente de excitación máxima,

$I_{f\text{nom}}$: corriente de excitación nominal,

$U_{f\text{máx}}$: tensión de excitación máxima,

$U_{f\text{nom}}$: tensión de excitación nominal.

La eficiencia del forzamiento de la excitación se caracteriza por la *multiplicidad de la tensión estable límite de la excitatriz*, por la cual se comprende la relación entre la tensión estable máxima de la excitatriz $U_{f\text{máx}}$ y la tensión *nominal* de excitación $U_{f\text{nom}} = R_f \cdot I_{f\text{nom}}$, así como por la *velocidad nominal de acrecentamiento de la tensión de la excitatriz*, determinada según la fórmula:

$$\left(1 - \frac{1}{e}\right) \frac{U_{f\text{máx}} - U_{f\text{nom}}}{U_{f\text{nom}} t_{\text{exc}}} . \quad [1.3]$$

Según la Norma Estatal de la Unión Soviética (GOST) 533-68 y la 5616-63, es requisito en los turbogeneradores que:

$$k_{f\text{máx}} = \frac{U_{f\text{máx}}}{U_{f\text{nom}}} \geq 1.8 \quad [1.4]$$

$k_{f\text{máx}}$: coeficiente de excitación máxima.

Constituyendo la velocidad nominal de acrecentamiento de la tensión de la excitatriz, de 1,5 a 2 de la tensión nominal en los anillos colectores por segundo. Para las demás máquinas sincrónicas la multiplicidad no es menor de 1,4; la velocidad no es menor de 0,8 de la tensión nominal por segundo.

En cuanto a la Velocidad de aumento del voltaje de excitación, durante el forzamiento de excitación, el voltaje U_f debe aumentar lo más rápidamente posible. Según la Norma Estatal de la Unión Soviética (GOST) 533-68 y la 5616-63, para los turbogeneradores, la velocidad de aumento del voltaje de excitación, durante su forzamiento, no debe ser menor que $2 \cdot U_{f\text{Nominal}}$ por segundo.

1.6 Estabilidad.

A partir del año 1920 comienzan a realizarse en el mundo estudios acerca de la estabilidad de sistemas. Se conoce como estabilidad al atributo del sistema o parte de él, que le permite desarrollar en sus elementos fuerzas restauradoras, iguales o mayores que las fuerzas perturbadoras, que permiten establecer un estado de equilibrio entre los elementos. La estabilidad de sistemas se divide en dos regímenes:

El régimen permanente que no es más que la capacidad de un sistema para mantener los valores de los parámetros del régimen, próximo a sus valores nominales en los casos de pequeñas alteraciones, es decir, cambios lentos del régimen en todo el sistema y no solo en los nodos. (Estabilidad estática).

El régimen transitorio que no es más que la capacidad que tiene un sistema en volver después de una alteración brusca y súbita, a un régimen permanente en el cual los valores de los parámetros del régimen en los nodos del sistema quedan próximos a los normales. (Estabilidad dinámica).

En la práctica, para lograr disminuir o eliminar las consecuencias negativas de las pérdidas de estabilidad, los ingenieros trabajan para establecer el límite de esta. Este límite es el máximo flujo posible de energía que puede pasar por un punto particular determinado del sistema, cuando todo el sistema o la parte de él, a la que se refiere el límite de estabilidad, está en régimen de estabilidad permanente.

Los términos y límites de estabilidad se aplican tanto al régimen permanente como al transitorio. El límite de estabilidad en régimen permanente se refiere al máximo flujo posible de energía que puede pasar por un punto determinado sin que haya pérdida de estabilidad cuando se aumenta la energía muy gradualmente.

Problema de la estabilidad.

Cuando los generadores de corriente alterna eran accionados por máquinas de vapor alternativas, uno de los problemas de servicio era el de las oscilaciones. Las variaciones periódicas del torque aplicado a los generadores, originaban variaciones periódicas de velocidad.

Las variaciones periódicas resultantes en la tensión y la frecuencia se trasmitían a los motores conectados al sistema. Estas variaciones originaban las oscilaciones de los motores y muchas veces hacían que estos, perdieran completamente el sincronismo, cuando su frecuencia natural de oscilación coincidía con la frecuencia de oscilación originada por las máquinas de accionamiento de los generadores.

Se utilizaron primeramente arrollamientos amortiguadores con el fin de reducir al mínimo la oscilación, aprovechando la acción amortiguadora de las pérdidas originadas por las corrientes inducidas en dichos arrollamientos, por cualquier movimiento relativo entre el rotor y el campo giratorio establecido por la corriente en el inducido.

El empleo de las turbinas ha reducido el problema de la oscilación, aunque todavía subsiste cuando el accionamiento se realiza con un motor diesel. Sin embargo, el mantenimiento del sincronismo entre las diversas partes de un sistema de energía se hace cada vez más difícil a medida que crecen los sistemas y sus interconexiones.

El aumento de estas interconexiones trae consigo el crecimiento de las probabilidades de fallas en las distintas partes del sistema, como pueden ser las pérdidas súbitas de cargas, cortocircuitos; los cuales a su vez pueden también originar las primeras después de la actuación de las protecciones y el aumento de la carga que puede ser originado por la desconexión de una fuente importante de energía.

Como el sistema antes del fenómeno transitorio se considera estable, la velocidad (ω) y las potencias activas y reactivas (P_g y Q_g) son constantes, por tanto se podrán calcular los valores numéricos de E_g , δ_0 , X_g , R_g . Esto puede verse en el diagrama de la figura 1.2

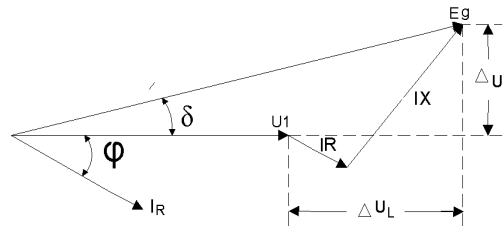


Figura 1.2 Diagrama unifilar.

Observando el diagrama y aplicando trigonometría podemos obtener las siguientes expresiones:

$$\Delta U_L = IR \cos \varphi + IX \sin \varphi \quad [1.5]$$

$$\Delta U_T = IX \cos \varphi - IR \sin \varphi \quad [1.6]$$

Siendo:

ΔU_L : Caída de voltaje en fase con U_R , en volt (Longitudinal)

ΔU_T : Caída de voltaje en cuadratura con U_R (Transversal)

I : Corriente de la carga, en Amperes

R : Resistencia de la línea, en Ohm

X : Reactancia de la línea, en Ohm

φ : Angulo de defasaje entre la tensión y la corriente de fase de la carga

Como:

$$I \cos \varphi = \frac{P_g}{U_1} \quad [1.7]$$

$$I \sin \varphi = \frac{Q_g}{U_1} \quad [1.8]$$

Donde:

P_g : Potencia activa por fase

U_1 : Voltaje de recibo o en el extremo receptor de la línea

Q_g : Potencia reactiva por fase

De ahí que:

$$E_g = \sqrt{\left(U_1 + \frac{P_g \cdot R_g + Q_g \cdot X_g}{U_1} \right)^2 + \left(\frac{P_g \cdot X_g - Q_g \cdot R_g}{U_1} \right)^2} \quad [1.9]$$

E_g : Voltaje de envío o en el extremo transmisor de la línea

R_g : Resistencia del generador

X_g : Reactancia del generador

$$\delta_0 = \delta_1 + \tan^{-1} \left(\frac{P_g \cdot X_g - Q_g \cdot R_g}{U_1^2 + P_g \cdot R_g + Q_g \cdot X_g} \right) \quad [1.10]$$

δ_0 : Ángulo de posición inicial del momento

δ_1 : Ángulo de posición final del momento

$$X_g = \frac{X_g \%}{100} \times \frac{Un^2}{Sn} \quad [\Omega] \quad [1.11]$$

Un: Tensión nominal

Sn: Potencia aparente nominal

“Cuando la potencia activa demandada por el consumidor aumenta, esto repercute en la velocidad. En las máquinas que poseen regulador de frecuencia, éste aumenta la entrada de vapor a la turbina (caso de turbogeneradores) y la velocidad al unísono con la frecuencia comienza a aumentar hasta mantenerse constante.”[6] (figura. 1.3)

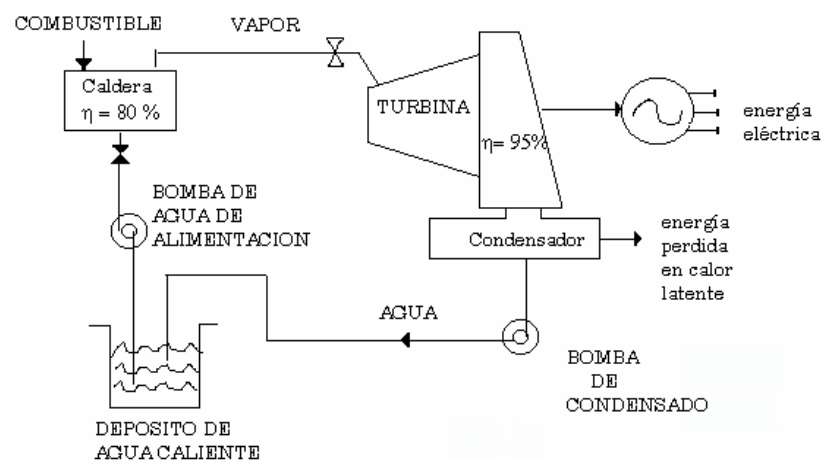


Figura 1.3 Esquema simplificado de una termoeléctrica.

La figura 1.3 representa el ciclo de operación de una termoeléctrica. Esta está compuesta por un depósito de agua caliente, una bomba de agua de alimentación encargada de absorber el agua y transmitirla a la caldera, una caldera en la cual se produce el vapor que se transmite hacia la turbina, un generador encargado de entregar al sistema energía eléctrica, un condensador por el cual pasa el vapor perdido y una bomba de condensado que transmite el agua nuevamente al depósito de agua caliente.

Cuando la potencia activa disminuye, la velocidad, la frecuencia y el ángulo de la Fem tienden a aumentar, pero el regulador tiende a cerrar la válvula de vapor y estos se estabilizan volviendo a la normalidad.

Si por otra parte, el incremento es de potencia reactiva por parte del consumidor, entonces el conocido efecto de *Reacción de Armadura* tiende a disminuir la fem generada en la máquina y con esto la tensión de la barra o de sus terminales.

Como la máquina posee un regulador de excitación, al disminuir la tensión éste incrementa la corriente de excitación y la fem comienza a aumentar, normalizándose a los parámetros establecidos (figura. 1.4).

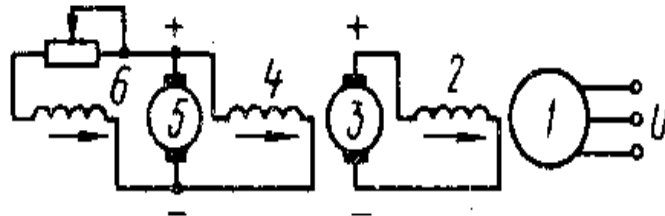


Figura 1.4 Diagrama simplificado del control de excitación de un generador síncrono.

De éste análisis se llega a la conclusión que cuando varía la potencia activa (P_g) se afecta en orden inverso a la velocidad (ω), la frecuencia (f) y la posición del ángulo del rotor (δ). Por el contrario cuando la variación es de potencia reactiva (Q_g), entonces los efectos inversos son vistos en la fuerza electromotriz (fem) generada por la máquina.

Esta acción no ocurre de forma instantánea, dado que la velocidad es un parámetro mecánico y tiene inercia mecánica o cinética, por otro lado la fem posee una inercia electromagnética proveniente del devanado de excitación. Es decir que los cambios no se observan de forma inmediata en el sistema, ni tampoco, la acción de los reguladores es tan idealmente rápida.

“Si en el sistema no existieran protecciones, luego de una perturbación las máquinas regresarían a su estado inicial, pero lo cierto es que mientras permanezca fuera de sincronismo, grandes efectos adversos a su vida útil estarán sucediendo; esfuerzo electromecánico, motorización, consumo de reactivo; además de las afectaciones que puede traerle al resto de las máquinas que estén conectadas en ese momento al sistema. Finalmente, la máquina es disparada por las protecciones de baja tensión y en el peor de los casos por el interruptor centrífugo de la turbina.”[9]

Esfuerzo electromecánico: Cuando los vectores de tensión del generador y la red no coinciden por fase, se produce un aumento del valor de la corriente en el estator que puede alcanzar valores superiores a dos veces la corriente nominal.

Como se conoce un aumento de la corriente de estator provoca a su vez un aumento de la reacción de armadura, comportándose este como un freno electromecánico.

“En presencia de este fenómeno y unida a la acción de los generadores de vapor, aumentan las vibraciones, temperatura y presión tanto en los apoyos del rotor del generador como en la turbina.”[5]

Motorización: Este fenómeno tiene lugar cuando el generador recibe potencia del sistema debido a que su motor primario o turbina ya no le entrega potencia, y empieza a consumir la necesaria para mantenerse en sincronismo, venciendo las pérdidas del generador y motor.

“Estas pérdidas de potencia en el motor se pueden deber a fallas en el motor o turbina, fallo de la caldera en caso de turbina de vapor o problemas de operación en el sistema eléctrico (subdivisión desequilibrada del sistema, etc).

La motorización del generador es un fenómeno tolerable por tiempo corto si no es consecuencia de una falla mecánica en el motor o turbina, que de mantenerse por un tiempo prolongado causa calentamiento excesivo en partes de la turbina.”[6]

La rama de estabilidad es muy importante, pues, con ella se logra una calidad de energía en los equipamientos: que los sistemas eléctricos sean confiables, evitar oscilaciones de tensión y baja frecuencia, pues estos defectos provoca envejecimiento y destrucción precoz de todas las maquinarias.

1.7 Clasificación de los Sistemas de excitación.

Hasta los años 50 para excitar las máquinas sincrónicas se empleaban casi exclusivamente los sistemas electromecánicos de excitación. En dichos sistemas como excitatriz se utiliza el generador de colector de corriente continua, cuyo inducido está conjugado mecánicamente con el árbol de la máquina sincrónica. Los circuitos de excitación con un generador de corriente continua se muestran en las figuras 1.1 y 1.5a.

Este sistema comprende, además de la propia excitatriz, un subexcitador, que alimenta el devanado de excitación independiente de la excitatriz principal, reóstatos reguladores, contactores, equipo de telemando, reguladores automáticos de tensión y otros dispositivos.

Según como estén realizados los sistemas de excitación y la fuente de energía del excitador se clasifican de la siguiente forma:

1.7.1 Electromecánico Directo.

Este sistema se conoce también como Rotatoria o Dinámica. Los sistemas de excitación directa son aquellos conjugados directamente con el árbol de la máquina síncrona (vea figura 1.6a y b), o sea, está acoplado al árbol del generador.

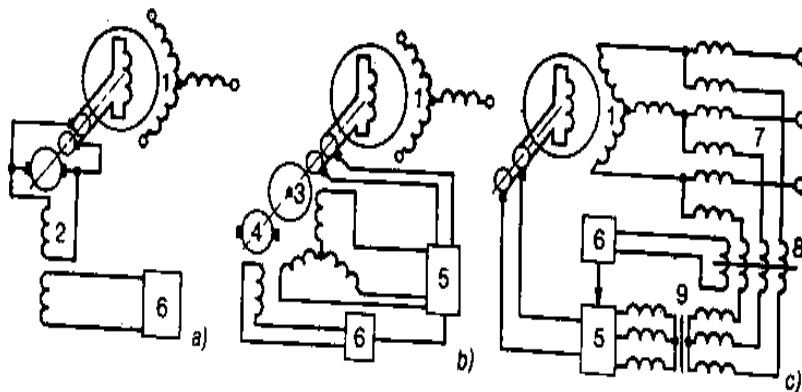


Figura 1.5. Sistemas de excitación de las máquinas síncronas.

a) electromecánico directo; b) directo con empleo de rectificadores; c) sistema de autoexcitación;

1- alternador síncrono; 2- excitatriz de corriente continua; 3- excitatriz de corriente alterna; 4- excitador piloto de la excitatriz de corriente alterna; 5- rectificador iónico o de semiconductor; 6- regulador de campo; 7- transformador; 8- reactancia controlada por el regulador de campo; 9- transformador.

Estos sistemas están constituidos por:

Eje. El rotor del motor gira soportado por el eje de la máquina. En el eje suele instalarse la excitatriz principal del generador y en su caso la excitatriz piloto, así como los ventiladores pertinentes.

Sistema de excitación. Este sistema comprende esencialmente una excitatriz principal de corriente alterna, una máquina síncrona con polos exteriores y un rectificador giratorio. En generadores de gran potencia, se utilizan sistemas de excitación con excitatriz auxiliar de imán permanente.

Devanado del Rotor. Distribuido formando un arrollamiento trifásico recorrido por corriente alterna. En las máquinas de rotor liso o interior (rotor) se utilizan devanados en forma de barra que van introducidos en ranuras realizadas en el rotor. Debido a las altas velocidades y a las fuerzas centrífugas asociadas, se construyen con cuñas de sujeción de alta seguridad. En las máquinas de polos salientes, la construcción del devanado se hace en forma de paquetes dispuestos alrededor de las expansiones polares.

Devanado del Estator. Se alimenta por corriente continua dando lugar a los polos de la máquina. El devanado del estator es trifásico y se forma en base a bobinas instaladas en las ranuras del núcleo magnético del estator. Estas bobinas, en los grandes generadores, pueden ser refrigeradas directamente por medio de agua.

Núcleo magnético. Se construye en base a planchas anulares formando un cilindro que sirve de circuito magnético a la máquina. Unas ranuras en el interior del cilindro del núcleo magnético permiten la instalación posterior del devanado del estator.

Rotor. Los rotores de las máquinas síncronas son simplemente electroimanes giratorios, contruidos de modo que tengan tantos polos como tenga el devanado del estator. Los polos del rotor se magnetizan por corriente continua que fluye en las bobinas de campo que rodean a cada polo. Los rotores de las máquinas síncronas pueden ser de polos salientes, para aplicaciones de velocidades bajas (centrales hidroeléctricas), o rotores lisos, especialmente indicados en turbogeneradores para térmicas o centrales nucleares, donde las velocidades de giro son muy elevadas.

Estator. El estator de un generador se constituye por el núcleo magnético, el devanado del estator y la envoltura o carcasa que los engloban.

Los sistemas Electromecánicos Directos pueden ser con escobillas o sin escobillas.

a) Con escobillas. El regulador de voltaje suministra la potencia al campo de la excitadora y la corriente alterna producida es mecánicamente rectificadora mediante un

conmutador y escobillas. Esta corriente directa se suministra al campo principal del generador síncrono por medio de anillos de rozamiento y escobillas. El regulador de voltaje realiza la regulación por medio de la excitadora rotativa. La escobilla es un bloque de un compuesto de carbón grafitado que conduce la electricidad libremente y tiene muy baja fricción para no desgastarse con facilidad con el anillo rozante.

Para crear el campo magnético de excitación, los devanados del rotor se alimentan con una corriente continua. Para obtener esta corriente continua hay dos métodos comunes:

Suministrarle al rotor la potencia de CC desde una fuente externa de CC, por medio de anillos rozantes y escobillas.

Suministro de potencia de CC. desde un fuente de CA montada directamente en el eje del generador síncrono y rectificando su salida.

Se suministra la corriente de excitación de CC por medio de anillos rozantes y escobillas. El procedimiento clásico consiste en utilizar un generador de CC autoexcitado en derivación (excitatriz principal), que se monta sobre el eje del grupo. Su salida se aplica al rotor del generador por medio de anillos rozantes y escobillas. Por lo general el generador es tipo derivación.

En generadores grandes, para mejorar la rapidez de respuesta del mismo, la corriente de excitación de la excitatriz principal se obtiene en parte de un tercer generador de continua, también acoplado al eje principal y autoexcitación (excitatriz piloto).

Las máquinas síncronas más pequeñas no suelen tener una excitatriz piloto y la excitatriz principal trabaja en derivación alimentando directamente el inductor o excitación de alternador. En este tipo de generadores aparecen problemas de enfriamiento y conservación de anillos, colector y escobillas.

Los Anillos de rozamiento son anillos metálicos situados sobre el eje de la máquina pero aislados de él. Sobre cada uno de ellos se coloca una escobilla. Cada extremo del devanado inductor se conecta a cada uno de los anillos.

Se utilizan en máquinas de pequeña potencia por ser el sistema más económico.

b) Sin escobillas. Es similar al tipo con escobillas, la diferencia ocurre en la rectificación para lo cual utiliza un puente de diodos. Estos semiconductores giran con el rotor

convirtiendo el voltaje alterno en directo, para ser aplicado directamente al campo del generador sincrónico, por medio de conductores a lo largo del eje que mantienen ambos sistemas apareados. Dentro de este están:

- ...con generador de corriente alterna. Del generador de CA con rectificadores giratorios. Este es una de las variedades de los sistemas con excitación independiente. Es aquella en la cual los rectificadores giran con el eje común de la excitatriz y de la máquina sincrónica, la salida de los rectificadores se conecta directamente, sin anillos ni escobillas, al arrollamiento de campo de la máquina sincrónica.

La excitatriz sin escobillas consiste de una carcasa del estator estacionario con un arrollamiento (devanado) de campo de polo saliente montado en una base, una armadura rotativa con arrollamiento trifásico CA y un conjunto convertidor rotativo CA/CC. En anexo # 8 se muestra un diagrama con el esquema. Estos son con rectificadores a semiconductores instalados sobre el árbol de la máquina que no tiene contactos corredizos.

El campo magnético de los polos del dinamo es creado por la corriente continua que circula por las bobinas que rodean los polos de hierro, esta corriente se llama corriente excitatriz. La intensidad del campo magnético dependerá, del número de vueltas de la bobina inductora y de la intensidad de corriente que pase por ella. Por lo cual, controlando la corriente de excitación por medio de un reóstato, podemos ajustar fácilmente la intensidad del campo magnético y el voltaje del dinamo (generador de corriente directa).

Ejemplos de este sistema de excitación se ponen de manifiesto en la siguiente figura.

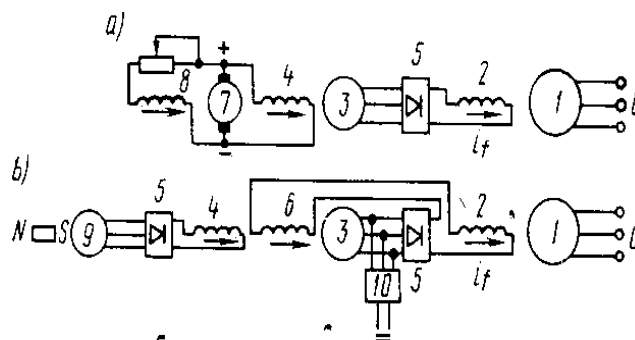


Figura 1.6. Sistema de excitación con excitatrices de CA y rectificadores.

El esquema de la figura 1.6a , se ha confeccionado en parte, en base al sistema de excitación del generador sincrónico auxiliar de frecuencia normal 3 y la excitatriz 7 están situados sobre el mismo eje del generador principal 1, el rectificador iónico posee una rejilla de control desde un regulador de excitación.

La extinción del campo, se efectúa cambiando el rectificador 5 al régimen de inversión para la transmisión de potencia desde el enrollado de excitación del generador principal 2, al generador auxiliar 3.

El esquema de la figura 1.6b, se utiliza para los turbogeneradores con potencia de 150000 kW y más. En este esquema el enrollado de excitación 2, del generador principal 1 recibe excitación del generador inductor (un excitador) 3 con una frecuencia de 500 Hz a través de los rectificadores 5.

El generador 3 posee dos enrollados de excitación: el enrollado de excitación independiente 4, el que recibe alimentación del generador auxiliar (pre-excitador) 9 a través de los rectificadores 5 y el enrollado de autoexcitación serie 6.

El generador 9 posee los polos en forma de imanes permanentes. Los generadores 3 y 9 están situados en el mismo eje del generador principal 1. El generador inductor no tiene enrollados en el rotor y por eso es muy confiable en el trabajo. En paralelo al enrollado de su armadura, se conecta una bobina trifásica inductiva (choke) 10 magnetizada con C.D.

La bobina 10 consume del generador 3, corriente inductiva y puesto que para $f=500$ Hz la reactancia inductiva del enrollado de armadura del generador es grande, el voltaje en sus terminales depende fuertemente de la corriente de la bobina 10, se logra una regulación rápida del voltaje del generador 3 y de la corriente de excitación I_f .

El enrollado de excitación 6, permite el forzamiento de la excitación durante cortocircuitos, debido a la acción de la corriente aperiódica transitoria del enrollado de excitación 2.

Los turbogeneradores modernos potentes, poseen una $I_{fN}=5000$ a 10000 A, con esto, incluso el trabajo de contactos deslizantes con escobillas, se hace difícil. Por eso, en la actualidad, se construyen generadores con sistemas de excitación sin contactos.

Tal esquema se puede confeccionar, por ejemplo, en base al esquema de la figura 1.6a, si el enrollado de la armadura 3 del generador de CA se inserta en su rotor, fijo en el eje del generador principal 1 y el enrollado de excitación 4 se sitúa en el estator.

Los rectificadores semiconductores 5, se fijan en un disco, el cual también se fija en el eje del generador 1 y rota junto con su rotor y con el enrollado de excitación 2. La regulación de la corriente I_f , en este caso, se lleva a cabo en el pre-excitador 7-8, el cual también se puede confeccionar como un generador de CA, sin contactos.

Semejantes sistemas de excitación, tienen mucha perspectiva pero poseen el inconveniente de que la extinción del campo se puede efectuar sólo en el circuito del enrollado 4 y en este caso, el campo del generador principal se extingue con lentitud.

- ...con generador y excitatriz de corriente directa (compuesto). (figura 1.7). Por el enrollado de armadura de una máquina sincrónica circula CA y por el enrollado de excitación 2 circula CD, entonces en los esquemas de composición de las máquinas sincrónicas, se utilizan rectificadores semiconductores controlados o no.

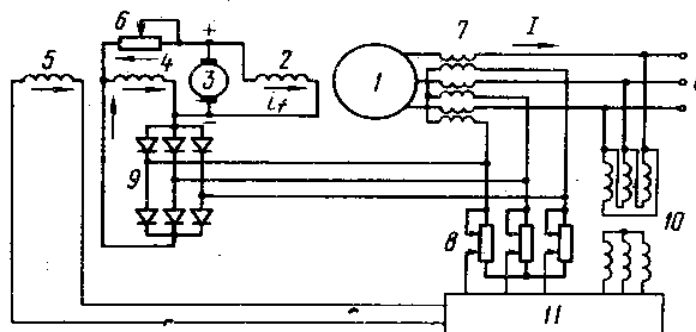


Figura 1.7. Sistema de excitación compuesta.

En el esquema principal, mostrado en la figura 1.4, de un sistema de excitación compuesta con una excitatriz de CD, el enrollado de excitación de la excitatriz 4, está conectado a la armadura de la excitación 3 con el reóstato 6 y además a los rectificadores 9, los que reciben alimentación de los transformadores 7.

Cuando el generador trabaja en vacío, el enrollado 4 recibe alimentación solo de la armadura 3. A medida que aumenta la corriente de carga del generador 1, el voltaje del enrollado secundario del transformador 7 aumentará y cuando se tenga una carga no muy

grande, este voltaje, rectificado (por los rectificadores 9) se igualará con el voltaje del enrollado 4.

Si la carga continúa aumentando el enrollado 4 se alimentará del transformador 7 y por eso la corriente de este enrollado y la corriente de excitación del generador I_f , aumentarán con el aumento de la carga.

Con el aumento de la resistencia del reóstato 8, el voltaje entregado a los rectificadores 9 y el efecto de composición del transformador 7, aumentarán. Durante cortocircuitos, el mecanismo de composición efectúa el forzamiento de la excitación.

Este tiene la propiedad de que puede trabajar a una tensión prácticamente constante, es decir, casi independiente de la carga conectada a la red, debido a que, por la acción del arrollamiento shunt, la corriente de excitación tiende a disminuir al aumentar la carga, mientras que la acción del arrollamiento serie es contraria, o sea, que la corriente de excitación tiende a aumentar cuando aumenta la carga.

Eligiendo convenientemente ambos arrollamientos puede conseguirse que se equilibren sus efectos siendo la acción conjunta, una tensión constante, cualquiera que se la carga. Incluso, se puede obtener, dimensionando convenientemente el arrollamiento serie, que la tensión en bornes aumente si aumenta la carga, conexión que se denomina hipercompound y que permite compensar la pérdida de tensión en la red, de forma que la tensión permanezca constante en los puntos de consumo.

- ...con generador de corriente directa. Se utilizan determinadas variedades de sistemas de excitación con máquinas de CD. Por ejemplo, las excitatrices potentes de las grandes máquinas, a veces poseen pre-excitadores (figura 1.8), los cuales sirven para la excitación de la excitatriz. La regulación en este caso, del sistema de excitación se efectúa en el circuito de excitación del pre-excitador por el que circula una corriente pequeña. Dicha regulación se logra bajando la potencia y el peso de los dispositivos de control y de regulación.

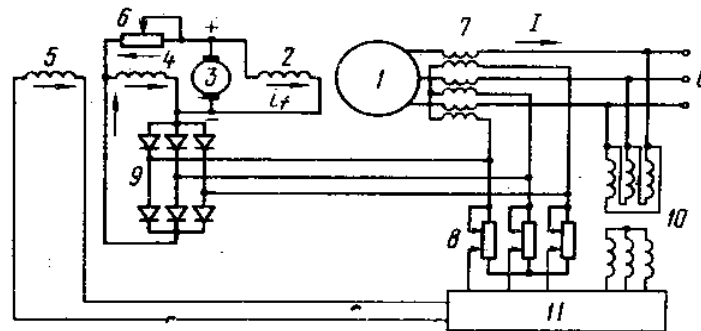


Figura 1.8. Sistema de excitación con excitatriz y preexcitatriz de CD.

1— armadura del generador síncrono, 2— enrollado de excitación del generador síncrono, 3— armadura de la excitatriz, 4— enrollado de excitación de la excitatriz, 5— armadura de la preexcitatriz, 6— enrollado de excitación de la preexcitatriz.

1.7.2 Electromecánico Indirecto.

Este sistema también es rotatorio. El rotor de la excitatriz se pone en rotación por un motor síncrono o asíncrono que se alimenta de las barras destinadas a cubrir las propias necesidades de la central o del generador síncrono auxiliar montado en el árbol del generador principal o del generador síncrono auxiliar instalado en la central especialmente para este objetivo.

Estos sistemas de excitación se diferencian de los representados en la figura 1.6 a y b sólo en que el rotor de la excitatriz está conjugado no con el árbol del generador, sino con un motor aislado.

El que generalmente se utiliza es el *valvular con diodos y tiristores de ciclo* que son rectificadores controlados o no. Estos son más modernos que los sistemas de excitación electromecánicos. Son empleados por doquier no sólo para motores y generadores de poca potencia, sino también para grandes turbogeneradores, generadores hidráulicos y compensadores síncronos, incluyendo las instalaciones de potencia límite. Dentro de este están:

a) Sin escobillas "brushless" (independiente). Este es con rectificadores. Un dinamo con excitación independiente es aquel en que el campo magnético se produce con una corriente excitatriz que procede de otra fuente distinta de la de su propio inducido, esta

fuelle de energía puede ser una batería de acumuladores o bien otro dínamo pequeño. La corriente alterna no sirve para excitar los polos magnéticos de un dinamo, ni de un alternador.

Por lo cual, los alternadores se excitan casi siempre independientemente por medio de una corriente obtenida de baterías de acumuladores o de generadores de corriente continua o CA (excitatrices).

Los dinamos que se emplean en galvanoplastia y en otros trabajos análogos, suelen tener excitación independiente, las bobinas inductoras están devanadas para un voltaje determinado. Este voltaje puede variar entre 6 y 25 V para la excitación por medio de batería y entre 110 y 120 voltios cuando la excitación se hace por medio de otro dinamo.

En los generadores de este tipo de excitación, la tensión en los bornes es casi independiente de la carga de la máquina y de su velocidad, ya que la tensión se puede regular por medio del reóstato de campo aunque, naturalmente, dentro de ciertos límites, porque la excitación del campo inductor no puede aumentar más allá de lo que permite la saturación.

“La energía necesaria para alimentar el devanado de excitación (Figura 1.6b), se obtiene de la excitatriz de corriente alterna trifásico 3, cuyo rotor esta fijado sobre el árbol del generador principal. En los circuitos de rectificadores en este caso se emplean válvulas de semiconductores (tiristores o diodos de silicio) montadas según el circuito trifásico en puente. Al regular la excitación del generador se hace uso simultáneamente de la posibilidad de mandar por rectificadores, y de la variación de la tensión de la excitatriz.”[4]

b) Con generador y excitatriz de corriente directa y rectificadores. Este también es compuesto y además es autoexcitado. (vea figura 1.6c). La energía necesaria para excitar la máquina sincrónica se toma de su devanado del inducido, en tal caso la corriente alterna, obtenida del inducido, se rectifica con auxilio de semiconductores gobernados (tiristores).

La toma de energía se lleva a cabo por medio del transformador 7, conectado en paralelo con el devanado del inducido, y del transformador 9, conectado en serie con el devanado del inducido. El transformador 9 permite garantizar el forzamiento de la excitación en caso

de cortocircuitos cercanos, cuando la tensión en el devanado del inducido baja bruscamente.

Anteriormente se analizaron sistemas independientes de excitación, en los cuales toda la energía o parte de ella, para la excitación del generador síncrono, se obtenía de excitadores en forma de máquinas de CD. o de CA. Al mismo tiempo se utilizan sistemas de autoexcitación, en los cuales esta energía se obtiene del circuito de la armadura del mismo generador.

En los últimos años, los sistemas de autoexcitación comienzan a utilizarse más frecuentemente, también para los grandes generadores, los que trabajan en los sistemas energéticos potentes y para los motores síncronos. Con esto, por lo general, se utiliza el principio de composición.

Un esquema típico de un generador compuesto con autoexcitación se muestra en la figura 1.9.

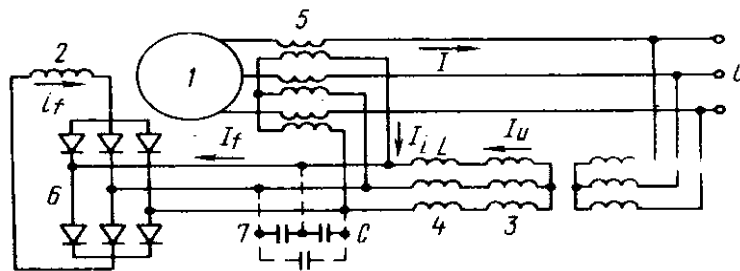


Figura 1.9. Sistema de autoexcitación de un generador compuesto.

1.7.3 Excitación Estática.

Esta puede ser a fuente de tensión o compuesta. En la excitación estática el regulador de voltaje alimenta directamente el campo rotativo del generador y no al campo de una excitatriz rotativa.

Actualmente todos los reguladores de voltaje son dispositivos estáticos, lo que significa que sus componentes de estado sólido permiten al regulador realizar su función sin la necesidad de partes móviles. La potencia se suministra al campo por medio de anillos rozantes y escobillas.

Las excitadoras estáticas se usan generalmente en lugar de las excitadoras rotativas en generadores de baja velocidad y en sistemas generadores de alto rendimiento.

Estas excitadoras han sido reemplazadas por modernos sistemas de excitación estática. Paralelamente las nuevas plantas hidroeléctricas cuentan con excitadoras estáticas para sus generadores. La generación eléctrica basada en las características propias de los generadores sincrónicos de polos salientes y con sistemas de excitación estáticos han dado buenos resultados y su funcionamiento es congruente con lo expuesto.

El SEE debe mantener el voltaje de salida del generador estable entre $\pm 1/2\%$ del voltaje nominal, para esto mide constantemente la salida del generador. Esta medición se compara con el voltaje de referencia, la diferencia de esta comparación causa un cambio inmediato en la salida CD de la excitatriz que alimenta el campo del generador, lo que tiende a normalizar el voltaje de salida del generador.

Elementos que conforman el (SEE).

El sistema de excitación está conformado por diversos equipos de potencia, edición y control. Se pueden clasificar y enumerar de la siguiente forma:

- Transformador de excitación.
- Transformador para la medición trifásica del voltaje Terminal del generador.
- Transformador para la medición monofásica de la corriente.
- El chasis de control con el regulador automático de voltaje (RAV) y el control de disparo.
- El chasis de rectificación o excitatriz donde se encuentran los sistemas de control de potencia.
- El control manual ubicado en el panel frontal del cubículo.
- Ajustadores electrónicos del voltaje de referencia para modo manual y automático.
- Banco de baterías como fuente de CD para el arranque del generador.
- Dispositivos electrónicos de control y protección.

Disposición física.

Los equipos dentro del cubículo se encuentran fuertemente montados y están protegidos contra agentes externos contaminantes. El gabinete da el suficiente blindaje en caso de explosión interna o externa o ante algún tipo de golpe mecánico del equipo móvil de la casa de máquinas.

En la parte externa del panel frontal se encuentran los mandos para el control en modo manual así como indicadores y las carátulas de los equipos de medición pertinentes para el operador.

Estabilidad del SEE.

El SEE en conjunto con el generador forman un sistema de lazo cerrado, donde el regulador es parte del lazo cerrado que une la salida del generador al campo del mismo. Ya que el campo de la excitadora es una bobina de alambre arrollada sobre un núcleo de hierro que tiene un valor de inductancia muy alto, la aplicación de voltaje al campo causa un aumento exponencial de la corriente de campo. El voltaje de salida del generador cambia en respuesta a la corriente de campo.

El resultado es un retardo de tiempo a partir del momento del cambio de voltaje de campo hasta que el voltaje del generador sea restaurado al valor regulado. Debido a este retraso de tiempo y a la alta sensibilidad del regulador, se debe incluir un circuito de estabilidad en el regulador de voltaje.

Como ya vimos la señal de error amplificada controla la conducción de los tiristores en la etapa de potencia. Cambios muy pequeños en el comparador o punto de suma del RAV pueden hacer que la salida de potencia busque los niveles máximos o mínimos para corregir el voltaje del generador.

La alta sensibilidad del amplificador de error es una característica de los reguladores de voltaje con el fin de entregar exactitud para una buena regulación del voltaje. El punto en común de los reguladores de voltaje es el circuito de estabilidad sin el cual el voltaje del generador oscilaría debido a la ganancia del RAV, y el circuito detector de error ajustaría continuamente su salida para corregir la desviación del voltaje censado contra su voltaje

de referencia. Para corregir esta oscilación se agrega el circuito de estabilidad que retroalimenta la salida del RAV con su punto de suma.

La red de estabilidad se encuentra en la tarjeta del RAV, además cuenta con un ajuste que le permite la operación estable del generador para una variedad de tamaños de máquinas, controlando la cantidad de retroalimentación aplicada al RAV.

El ajuste en sentido horario provee buena estabilidad, pero tiende a hacer mayor el tiempo de respuesta de recuperación del voltaje de salida del generador. La rotación en sentido antihorario logra disminuir el tiempo de respuesta. Un menor tiempo de respuesta ocasiona que el voltaje del generador se torne inestable y comience a oscilar.

A fin de obtener alta exactitud para una buena regulación del voltaje, el sistema de excitación se debe diseñar con circuitos electrónicos que tienen una ganancia muy alta. La ganancia, en decibelios, define la magnitud de la salida que puede producir la aplicación de una pequeña señal de entrada.

A mayor amplificación mayor es la ganancia. Los reguladores con una pobre regulación (2%) pueden tener una ganancia del amplificador de apenas 100 dB. Mientras que los reguladores de voltaje con regulación de $\frac{1}{4}\%$ pueden tener ganancias arriba de 1000 dB.

La red con los circuitos de adelanto y atraso están configurados para proporcionar una señal de retroalimentación en el punto sumador del regulador de voltaje. Esto asegura que el regulador no corrija el voltaje del sistema tan rápidamente, que oscile el voltaje de la máquina o al contrario, que retarde tanto el voltaje del generador, que tome un tiempo demasiado largo para recuperarse.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN FUNDAMENTALES.

La central termoeléctrica (CTE) de la empresa comandante Ernesto Che Guevara está llevando a cabo un proceso de modernización, el cual es para ayudar al sistema electroenergético nacional (SEN) en el suministro de energía eléctrica hacia la empresa, instalando un turbogenerador nuevo con una potencia de 25 MW con su sistema de excitación Sin Escobillas (brushless). Y además se cambiará el sistema de los turbogeneradores que están con anterioridad por la Estática. Estos sistemas se escogieron por su factibilidad ya que son sistemas con tecnologías avanzadas.

En este capítulo se relacionan los parámetros técnicos de los tres sistemas de excitación que se ponen de manifiesto a continuación:

1. Excitatriz Rotatoria con generador de corriente continua (es la que se está utilizando desde que se echó a andar la CTE de la empresa).
2. Excitatriz Estática (es la que se utilizará en los 2 turbogeneradores TG1 y TG2 de 12 MW cada uno, cuando concluya el proceso de modernización).
3. Excitatriz Rotativa sin escobillas "brushless" (es la que se utilizará en el nuevo turbogenerador TG3 de 25 MW que está siendo instalado).

2.1 Evaluación del Sistemas de Excitación Rotatoria con Generador de Corriente Continua.

La CTE cuenta con dos turbogeneradores del tipo SKODA accionados cada uno por una turbina del tipo contrapresión, la cual es alimentada con vapor convirtiendo la Energía Cinética en Energía Mecánica de rotación y luego transforma esta en Energía Eléctrica que recibe en su eje. El eje de la turbina está acoplado al rotor del generador y este a su vez tiene acoplada la excitatriz rotatoria a través del colector.

La figura 2.1 representa el esquema principal de cada turbogenerador con sus respectivas excitatrices.

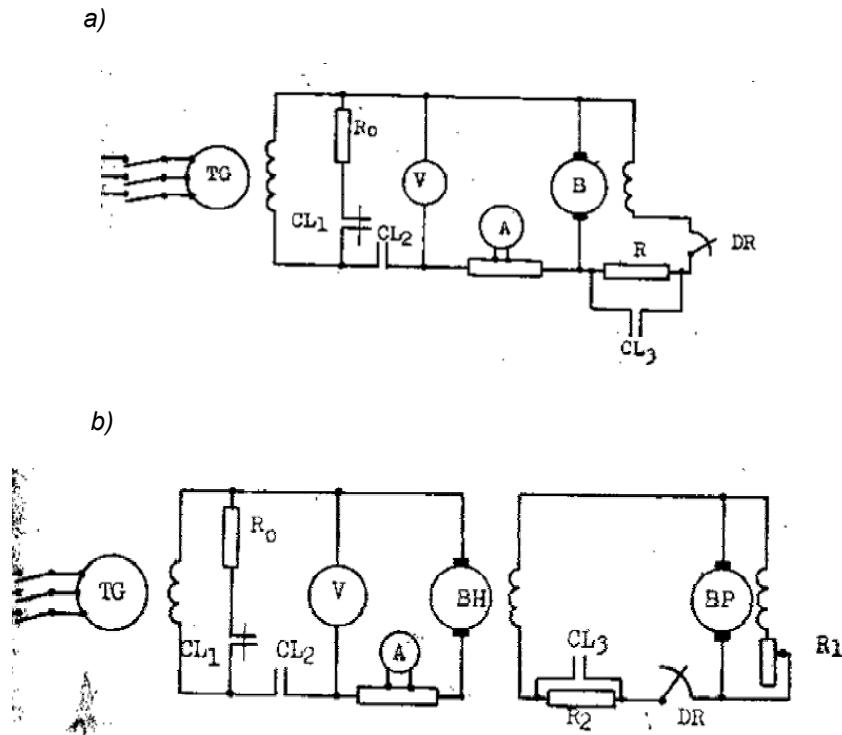


Figura 2.1 a) Esquema del turbogenerador con su excitatriz de trabajo de la CTE.

b) Esquema del turbogenerador con su excitatriz de reserva de la CTE.

En el proceso de explotación del turbogenerador es necesario velar por la conmutación del excitatriz. La señal de un correcto funcionamiento de colector es la ausencia de chisporroteo y la formación en la superficie del colector de una película brillante y una coloración diferente de la superficie del colector hasta el mismo matiz negro.

Una buena película garantiza el deslizamiento de la escobilla por el colector con pocas pérdidas del rozamiento, lo que limita el desgaste de la escobilla y la superficie del colector.

El débil chisporroteo de las escobillas, por el cual el colector y la escobilla se detienen durante en mucho tiempo en estado de capacidad de trabajo no se considera un defecto. La superficie gris mate del colector es señal de una mala conmutación, en este caso se chispean y se desgastan significativamente, la película fina se rompe y el colector se mancha.

La causa de una mala conmutación pueden ser muchas. Entre las fundamentales se encuentran las siguientes:

- unión contraria de los polos auxiliares.
- instalación incorrecta de la posición neutral de la traviesa de las escobillas
- distribución inexacta de los cepillos por el contorno del colector.
- colector no redondo.
- mica incorrectamente raspada entre las placas del colector.
- pulsación del corte transversal de la escobilla.
- calidad impropia de las escobillas.

Las escobillas desgastadas deben cambiarse por escobillas del mismo tipo y calidad de los que fueron montados en el colector en la fábrica elaboradora. El cambio de las escobillas debe realizarse oportunamente antes de que las escobillas se desgasten hasta tal punto que su armadura toque la superficie del colector.

La reserva de las escobillas debe ser no menor del 50 % más de lo que se exige para el cambio total de las escobillas en el colector. En los pequeños paros durante la explotación del colector, es necesario eliminar el polvo con un soplado de aire seco comprimido y revisar si son suficientes o no los tornillos en los portaescobillas y otros tornillos de unión. Si el colector enmugrece, entonces hay que limpiarlo con un paño humedecido en gasolina.

La forma ovalada del colector no debe ser mayor de 0,05 mm. En caso de que aumente mucho más el valor permitido, la quemadura fuerte y a fabricación de la superficie del colector, este debe ser sometido al maquinado y al esmerilado.

En el proceso de explotación del turbogenerador es necesario velar por la conmutación del excitatriz. La señal de un correcto funcionamiento de colector es la ausencia de chisporroteo y la formación en la superficie del colector de una capa brillante y una coloración diferente de la superficie del colector hasta el mismo matiz negro. Una buena capa garantiza el deslizamiento de la escobilla por el colector con pocas pérdidas del rozamiento, lo que limita el desgaste de la escobilla y la superficie del colector.

El débil chisporroteo de las escobillas, por el cual el colector y la escobilla se detienen durante mucho tiempo en estado de capacidad de trabajo no se considera un defecto. La superficie gris mate del colector es señal de una mala conmutación, en este caso se chispean y se desgastan significativamente, la capa fina se rompe y el colector se mancha.

La causa de una mala conmutación pueden ser muchas. Entre las fundamentales se encuentran las siguientes:

- unión contraria de los polos auxiliares.
- instalación incorrecta de la posición neutral de la traviesa de las escobillas
- distribución inexacta de los cepillos por el contorno del colector.
- colector no redondo.
- mica incorrectamente raspada entre las placas del colector.
- pulsación del corte transversal de la escobilla.
- calidad impropia de las escobillas.

Las escobillas desgastadas deben cambiarse por escobillas del mismo tipo y calidad de los que fueron montados en el colector en la fábrica elaboradora. El cambio de las escobillas debe realizarse oportunamente antes de que las escobillas se desgasten hasta tal punto que su armadura toque la superficie del colector. La reserva de las escobillas debe ser no menor del 50 % más de lo que se exige para el cambio total de las escobillas en el colector.

En los pequeños paros durante la explotación del colector, es necesario eliminar el polvo con un soplado de aire seco comprimido y revisar si son suficientes o no los tornillos en los portaescobillas y otros tornillos de unión. Si el colector enmugrece, entonces hay que limpiarlo con un paño humedecido en gasolina.

La forma ovalada del colector no debe ser mayor de 0,05 mm. En caso de que aumente mucho más el valor permitido, la erosión fuerte y la fabricación de la superficie del colector, este debe ser sometido al maquinado y al esmerilado.

2.1.1 Excitación del turbogenerador

En las espiras del rotor se crea la corriente alterna a causa de estar presentes los tres elementos que la originan (el conductor que son la espiras, el campo remanente y el movimiento del rotor) que luego el colector se encarga de convertirla en corriente directa.

Esta energía se trasmite de las espiras del colector a las escobillas que están fabricadas de carbón prensado y calentado a una temperatura de 1200°C. Se apoyan rozando contra el colector gracias a la acción de unos resortes, que se incluyen para hacer que la escobilla esté rozando continuamente contra el colector (figura 2.2). El material con que están fabricadas las escobillas produce un roce suave equivalente a una lubricación.

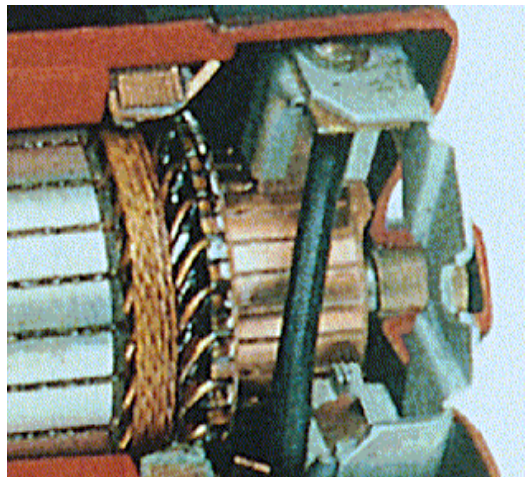


Figura 2.2 Foto de las escobillas de un generador de pequeña potencia.

Esta energía viaja por un conductor hasta los anillos del colector del generador donde se rectifica la energía y luego sale alterna. Esto se manifiesta esquemáticamente:

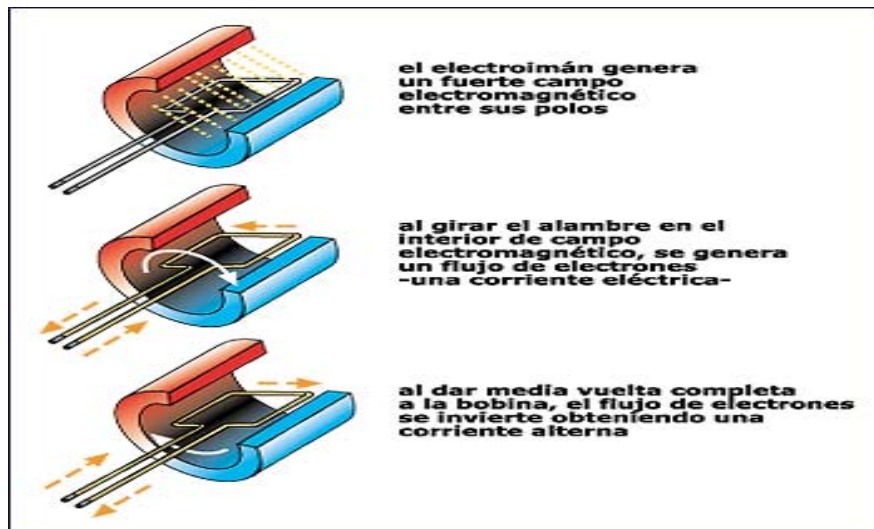


Figura 2.3 Inducción electromagnética del turbogenerador.

En el dibujo hemos instalado tres electroimanes alrededor de un círculo. Cada uno de los tres imanes está conectado a su propia fase en la red eléctrica trifásica. Como puede ver, cada electroimán produce alternativamente un polo norte y un polo sur hacia el centro.

“La fluctuación en el magnetismo corresponde exactamente a la fluctuación en la tensión de cada fase. Cuando una de las fases alcanza su máximo, la corriente en las otras dos está circulando en sentido opuesto y a la mitad de tensión. Dado que la duración de la corriente en cada imán es un tercio de la de un ciclo aislado, el campo magnético dará una vuelta completa por ciclo.”[12]

Los polos del estator de la excitatriz deben ser alimentados para lograr el nivel requerido de excitación de los turbogeneradores así como su nivel de generación. Los polos principales se alimentan de un Regulador Automático de Voltaje (RAV) en serie con un transformador de 440/220 V proveniente del SEN. . Los polos auxiliares se alimentan de un reóstato manual en serie con un banco de baterías.

En las siguientes tablas se darán los datos correspondientes a los turbogeneradores TG1 y TG2 de la empresa y sus excitatrices.

Tabla 2.1 Datos de cada excitatriz de trabajo de la CTE.

P (kW)	U _n (V)	I _n (A)	Velocidad (rpm)
125	230	544	3600

Tabla 2.2 Datos de cada generador de la CTE.

P _n (MW)	Q _n (MVAr)	S _n (MVA)	U _n (kV)	U _{excit.rotor} (V)	I _{cc} (A)	I _{excit.rotor} (A)	Velocidad (rpm)
12	9	15	10,5	42-158	825	142-463	3600
Cos φ	η	F(Hz)	Conex	X _d (%)	X _{d'} (%)	X _{d''} (%)	
0,8	0,95	60	Y	6,6	22,6	16,5	

La excitatriz tiene 20 años de explotación, las cuales han presentado diferentes problemas con el transcurso del tiempo tales como: desgastes en el colector de la máquina a causa de las escobillas; por tanto se han tenido que maquinar lo rotores de los dos turbogeneradores en varias ocasiones para emparejarlos de sus secuelas a causa de las escobillas, hasta el punto que ya es casi imposible el maquinado pues se está agotando el grosor de los rotores y resulta ser poco económico a la hora de cambiar los colectores por otros nuevos, pues seguirá con el mismo problema.

Estos turbogeneradores también cuentan con una excitatriz de reserva Rotativa Independiente alimentado por un sub-excitador que en este caso es un motor (figura 2.2) que se utiliza cuando la excitatriz de trabajo de una de las máquinas presenta problemas.

“ Este tipo es de la que se obtiene la alimentación del rotor y del estator de dos fuentes de tensión independientes. Con ello, el campo del estator es constante al no depender de la carga del motor, y el par de fuerza es entonces prácticamente constante. Las variaciones

de velocidad al aumentar la carga se deberán sólo a la disminución de la fuerza electromotriz por aumentar la caída de tensión en el rotor.

Este sistema de excitación no se suele utilizar debido al inconveniente que presenta el tener que utilizar una fuente exterior de corriente. Por esta razón es que se utiliza como reserva”.[11]

Tal es el caso que el turbogenerador dos (TG2) presentó problemas que no pudieron ser resueltos y se tuvo que mantener trabajando el TG2 con ésta de reserva haciendo la función como excitatriz de trabajo. De esta manera ya no se contaba con ninguna excitatriz de reserva y entonces hubo que montar otra excitatriz de reserva para cuando falle la excitatriz del TG1 de trabajo o la excitatriz del TG2 que su diseño es de reserva pero hace la función de trabajo.

SKODA, es un productor renombrado de generadores sincrónicos como también de suministros de los sistemas de excitación innovadores. Los sistemas de excitación de SKODA son de plan propietario y personalizado que encajan en las funciones de las características de los turbogeneradores.

“El plan y producción de los sistemas de excitación de SKODA son basados en la experiencia a largo plazo de los dos afiliados del Grupo Máquinas Eléctricas y Mandos”.[8]

Como este sistema es antieconómico los especialistas de la empresa analizaron dos variantes:

La primera era implementar el sistema sin escobillas brushless en estos turbogeneradores de 12MW, pero no pudo ser posible, pues, fue analizado con los fabricantes de SKODA y determinaron que para hacer ese cambio había que modificar las características del eje del rotor del generador, lo cual no era factible pues cambiaban las características dinámicas del mismo. Esto implicaba la compra de dos nuevos rotores para los turbogeneradores TG1 y TG2 más el sistema de excitación como tal.

La segunda era en vez de realizar los cambios de la primera variante se utilizaría un sistema de excitación Estática con el mismo rotor del generador existente, que consiste en una excitación directa a los anillos del rotor del generador.

Se hizo un estudio profundo y se aprobó en utilizar la segunda variante la cual era más económica.

En la actualidad los tipos frecuentemente usados de sistemas de excitación son como sigue en los dos siguientes epígrafes.

2.2 Evaluación del Sistemas de Excitación Estática.

Por tales inconvenientes que afectan la generación en reiteradas ocasiones y para prever que el sistema no se quede sin generación en caso de que las dos excitatrices de trabajo presenten problemas, se vio la necesidad de llevar a cabo un proceso de modernización: instalarle a estos turbogeneradores un sistema de excitación nuevo quedando así el sistema de excitación Estática para uno de los turbogeneradores TG1 y TG2 incluyendo, también una excitatriz de reserva para ser utilizada en caso de que alguna de estas posea averías con características similares a las de trabajo de las TG1 y TG2.

La empresa comercializó este sistema de excitación con el productor Skoda Energo s.r.o. Divice Controls de la república de Eslovaquia.

Este tipo de sistemas de excitación se usa en los turbogeneradores de una gama amplia de rendimiento, como tal es el caso. Si es alimentada de los terminales del generador, su regulador de voltaje debe dominar la poca caída de voltaje siguiendo las tres fases del corto circuito cercana a la estación de potencia.

En las redes interconectadas puede alimentarse de una rama-línea de arranque de la estación de potencia el cual hace que el sistema de excitación sea relativamente independiente.

2.2.1 Descripción técnica

El equipamiento de excitación consta de:

- El distribuidor de excitación Estática el que alimenta directamente al arrollamiento de excitación del generador
- El transformador de excitación de alimentación directa de los bornes del generador

Este sistema está proyectado de tal forma que:

- Seguro funcionamiento del generador en el rango del régimen del diagrama de explotación
- Rápida regulación de alta calidad en las variaciones del régimen de operación.

El distribuidor de la excitación contiene:

El Regulador digital de excitación consiste en una pieza compactada que utiliza un microcontrolador de gran potencia de 16 bits INTEL 87C196CA. Es de un canal que cumple todas las condiciones de la regulación automática de voltaje, regulación manual de corriente de excitación, sincronizador automático y autómata lógico.

El Regulador automático tiene repercusión rápida y sus virtudes en las características son las siguientes:

- Regulación de voltaje es régimen básico de la reguladora de voltaje
- El rango de regulación de voltaje a los bornes del generador en el estado estabilizado es de 0.5%
- El rango de posibilidad de regulación de voltaje en los bornes del generador es de 80-120% U_a
- Extensión de arreglo estático es $\pm 10\%$
- Comparador de voltaje del generador con el voltaje de la red (antes de sincronizar)
- Regulación de la potencia reactiva $Q=0$ (antes de desconexión del generador de red)
- Régimen invertido del cambiador para desexcitación del generador
- Control del rectificador tiristórico
- Regulación manual de corriente de excitación del generador

Las automáticas adicionales de la reguladora

- Limitador de corriente del estator (dependiente en tiempo de sobrecorriente)

- Limitador de corriente del rotor (dependiente en tiempo de sobrecorriente)
- Vigilador del límite de subexcitación
- Limitador U/f
- Regulación a distancia de la potencia reactiva

El sincronizador automático genera a través de los bornes de salida una señal para regulación de las revoluciones durante la sincronización y para la conexión del interruptor del generador.

El autómeta lógico sirve para mando, diagnostica al control secuencial de los procesos en el sistema de excitación durante el tiempo del arranque y disparo del generador.

Tabla 2.3 Parámetros del regulador digital.

Número de canales	2
Precisión (estado estable)	$\pm 0,5\%$
Posibilidad de ajuste del voltaje	0-120% (rango bruto)
Posibilidad de ajuste del voltaje	80-120% (rango fino)
Estática ajustable en el rango	$\pm 10\%$

Conexiones exteriores del distribuidor de excitación

La alimentación del distribuidor contiene:

- Alimentación de circuitos de fuerza o trabajo desde el transformador de excitación

400kVA, 10,5 Kv / 0,4 Kv

- Alimentación de circuitos auxiliares o reserva

2-220 V CD, 1-4 A 5 s; 3 fases a 60 Hz, 0,4 kV, 16 A

Las señales de entrada (contactos sin tensión) incluyen:

- Los sensores de estado de los equipos tecnológicos.

- Interruptor de salida del generador.

Las entradas lógicas:

- Señales desde los transformadores de voltaje y de corriente.
- Medición de voltaje del generador – 3 transformadores de voltaje conectados en estrella.
- Medición de la corriente del generador – 1 transformador de corriente.
- Medición de voltaje de la red – 1 transformador de voltaje.
- Conectado entre dos fases de la red.

Las señales de salidas lógicas (contactos sin tensión) incluyen:

- Parada por avería
- Orden para conectar interruptor de potencia
- Orden “revoluciones más o menos”
- Contactos auxiliares del interruptor de campo
- Señalización de operación
- Señalización de fallas

Rectificador a tiristores

Cada uno de los rectificadores a tiristores (dos) está compuesto por 6 módulos de tiristores sin potencial los que son conectados en el puente trifásico completamente controlado.

El control de los tiristores, es a través de pulsos de larga duración para reducir las pérdidas de potencia en las resistencias necesarias y para mantener la conducción de los tiristores a una décima parte en comparación con el control convencional con los pulsos de corta duración.

La conexión del circuito de fuerza es 2 rectificadores trifásicos cada uno con 6 tiristores y los datos de chapa son:

Tabla 2.4 Datos nominales del rectificador.

Voltaje nominal CD	225 V
Corriente nominal CD	525 V
Voltaje máximo CD	492 V / 20 s
Corriente máxima CD	765 A / 20 s
Voltaje de entrada CA	3 x 400 V, 60 Hz
Voltaje de techo relativo	2,4 V
Corriente de techo relativa	1,6 A

Sistema de ventilación

El aire refrigerante para el puente trifásico está suministrado por un ventilador. Su función está indicada por un sensor de flujo de aire. El aire entra al distribuidor a través de los filtros situados en la puerta y una vez calentado sale expulsado por un ventilador a la parte superior del distribuidor.

Protecciones de sobrevoltaje

La protección de sobrevoltaje en la parte alterna protege el variador de tiristores contra sobrevoltaje originada en la parte de alimentación del variador. La protección incluye un juego de los condensadores con las resistencias eléctricas, las que son a través de una resistencia de amortiguación y un rectificador auxiliar conectado a los bornes de salida del variador.

Esta protección en parte de corriente continua protege el variador tiristórico contra sobrevoltaje producida en parte de corriente continua del variador. La protección incluye dos tiristores conectados en antiparalelo, los cuales son a través de una resistencia eléctrica no lineal conectados a las barras de corriente continua.

Interruptor de campo o excitación

Este dispositivo sirve para desexcitación del turbogenerador durante disparos de emergencia y averías. En la parada operacional se reduce corriente de excitación por un régimen invertido de rectificador o marcha inversa.

Cambio de polaridad de voltaje de excitación

El cambio de polaridad de voltaje de excitación en las anillas del generador se realiza por medio del intercambio de los dos cables en la bornera de salida de armario de excitación. Esto representa aflojar y después apretar dos tornillos.

Los accesorios incluyen

- Circuitos de medición
- Calefacción
- Alumbrado y tomacorrientes auxiliares

2.2.2 Control de excitación

a) Mando local. Desde el tablero de mando con display y teclado colocado en la puerta de la caja.

El panel de mando facilita las siguientes funciones:

- Indicación del estado del regulador de excitación
- Ajuste de los parámetros del regulador
- Visualización del diagrama de carga del generador con el punto de trabajo actual
- Señalización de los defectos
- Extracto de los defectos
- Extracto de explotación

b) Mando a distancia. Conexión al sistema de control sobrepuesto mediante comunicación. Por instalación de las señales de contacto a las entradas galvanicamente separadas del regulador.

Como opción: se puede comunicar con el DCS utilizando protocolo estándar MODBUS-RTU.

2.2.3 Modelo del SEE

Para una mejor comprensión del funcionamiento del sistema de excitación estática (SEE) se dibujó el diagrama de bloques, sustituyendo los bloques funcionales por los principales equipos que los constituyen y a la vez se indican en azul las señales de control y en rojo las líneas de potencia.

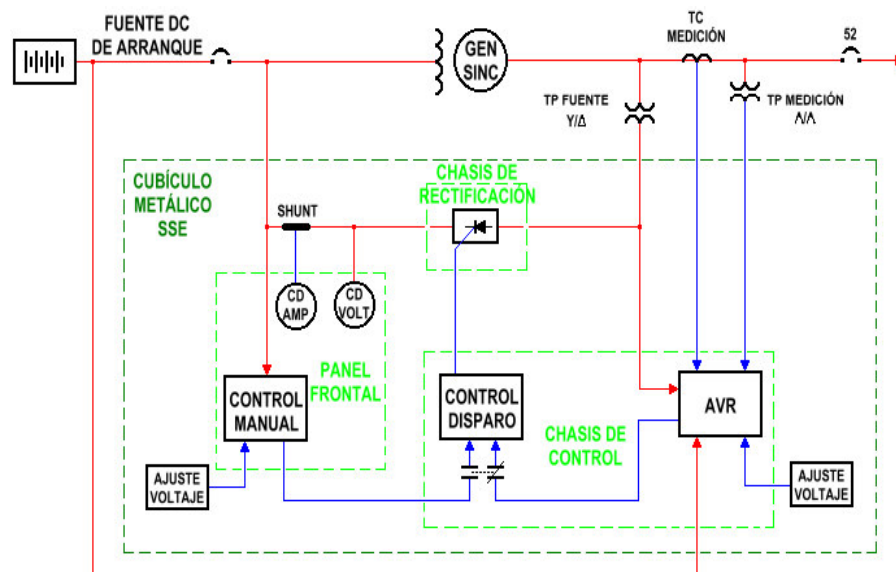


Figura 2.4 Diagrama funcional de bloques y equipos del SEE.

En la figura 2.4 se muestran los equipos constitutivos del SEE, los cuales se encuentran instalados en su mayoría dentro de un cubículo metálico clase NEMA 1, el panel frontal del mismo está abisagrado para el acceso fácil a los equipos. Fuera del cubículo encontramos la fuente de alimentación DC utilizada durante el arranque o cebado del generador y

lógicamente los transformadores tanto de medición (TC y TP) así como el transformador de excitación de donde se obtiene la potencia para excitar el campo del generador.

2.2.4 Funcionamiento del SEE

Básicamente el SEE debe mantener el voltaje de salida del generador estable entre $\pm 1/2\%$ del voltaje nominal, para esto mide constantemente la salida del generador. Esta medición se compara con el voltaje de referencia, la diferencia de esta comparación causa un cambio inmediato en la salida DC de la excitatriz que alimenta el campo del generador, lo que tiende a normalizar el voltaje de salida del generador. Cómo se lleva a cabo este proceso y cómo intervienen los distintos dispositivos se analiza a continuación.

Transformador de excitación.

Es un transformador seco, enfriado por circulación natural de aire y conectado en configuración Y- Δ . En el lado de alta tensión se conecta el voltaje de salida del generador que puede estar arriba de los 4.000 voltios, por este motivo se ubica en un gabinete cerrado y aparte del cubículo de los equipos de control.

El lado de baja tensión esta conectado al chasis de rectificación y además puede ser utilizado para alimentar el servicio propio del chasis de control. Su potencia nominal está en función al tamaño de la máquina sincrónica y de su corriente e campo. Los datos técnicos de este son:

Tabla 2.5 Datos técnicos del transformador de excitación.

Potencia nominal permanente con 40°C	400 kVA
Conexión	DY1
Voltaje nominal primario	10,5 k V
Voltaje nominal secundario	0,4 k V

Voltaje de cortocircuito E_k	6%
Clase de aislamiento	F (con resistencia térmica de 155°C)
Material de enrollado	Cu
Protección	IP 20 (contra contacto accidental con el conductor vivo o las partes móviles; contra los objetos sólidos mayores o iguales de 12,5 mm de diámetro.)

La próxima tabla de datos del autotransformador corresponde a la nueva excitatriz de reserva.

Tabla 2.6 Datos técnicos del autotransformador.

Potencia nominal permanente con 40°C	316 kVA
Voltaje nominal primario	0,48 kV
Voltaje nominal secundario	0,44 kV
Clase de aislamiento	F
Material de enrollado	Cu
Protección	IP 20

Transformadores de medición.

Son dos transformadores de precisión, el primero para el censado trifásico del voltaje de salida del generador y el segundo para la corriente en una de las fases.

El transformador de potencial es de impedancia propia muy alta, debido a que trabaja prácticamente en régimen de vacío, ya que la carga conectada en su secundario son los

circuitos de comparación del AVR y el de sincronización del control de disparo. Se conecta en configuración delta abierta tanto en el primario como en el secundario.

El transformador de corriente o intensidad consiste en un toroide o galleta debidamente aislado, el arrollamiento primario es el mismo conductor principal que lleva la generación.

Chasis de control.

El chasis de control es doblemente alimentado, con voltaje DC desde el banco de baterías y adicionalmente con voltaje AC. La operación puede ser desde ambas fuentes. El voltaje AC se aísla a través de un transformador, luego la tensión es rectificada y filtrada con un condensador.

La fuente de voltaje DC se conecta también al filtro a través de un diodo. Esto permite la operación con una o ambas fuentes conectadas al chasis. La alimentación de AC puede conectarse al secundario del transformador de excitación (ver figura 2.4) a través de transformadores de aislamiento. Se busca con esto disminuir la carga sobre la fuente de DC del banco de baterías.

Este dispositivo controla o lleva a cabo tres procesos importantes en el funcionamiento del SEE, primeramente el cebado o alimentación de arranque al arrollamiento del campo del generador, la sincronización y generación de las señales de disparo para los SCR de la excitatriz y la regulación del voltaje de salida del generador sincrónico.

Función de cebado o arranque.

Para iniciar el arranque es necesario alimentar el arrollamiento de campo del generador con una corriente de cebado que proviene del banco de baterías a través de un circuito de crecimiento de tensión. El proceso da inicio con la puesta en marcha de la máquina. El chasis de control cierra el contacto de cebado (ver figura 2.4) y simultáneamente arranca un temporizador de tiempo ajustable (22 segundos en los equipos Basler).

El contacto se mantiene cerrado hasta que se detecta a la salida del generador la tensión de sincronización, esta tensión es ajustable. Si el temporizador termina su cuenta antes de

obtener la tensión de sincronización, abre el contacto de cebado y envía una señal de “falla de flasheo”.

Debido a que el arrollamiento del campo es altamente inductivo, la repentina desconexión puede provocar un sobre voltaje de regreso en el chasis rectificador, para lo cual está conectado un “diodo volante”[6] de potencia en derivación con el campo y en oposición al paso de la corriente DC. Si el voltaje de salida alcanza el voltaje requerido, el circuito de crecimiento abre el contacto de cebado, en ese momento el chasis toma el control total de la salida de la excitatriz.

Función de sincronización y generación de las señales de disparo.

Las señales de voltaje a la salida del transformador de excitación son llevadas a través de un transformador de aislamiento hasta el circuito de disparo, que las deriva y sincroniza por separado y son comparadas con la señal de error amplificada del AVR, como resultado se obtienen tres grupos de pulsos de salida, que se utilizan para el manejo de los SCR en el chasis de rectificación. La señal de control de error varía el ángulo entre el cruce por cero de una fase y el pulso de salida [6], variando de este modo la potencia rectificada.

Función del regulador automático de voltaje AVR.

El regulador censa el voltaje de línea por medio del TP de medición, esta señal es reducida y rectificada a una pequeña señal de DC representativa del voltaje de línea del generador. Esta señal se conduce a un detector de error donde se compara con la señal de referencia de voltaje, que está relacionada con el voltaje nominal de línea del generador. Si la señal del voltaje de línea del generador excede o disminuye debajo de la señal de referencia, se produce una señal de error. Esta señal es amplificada y llevada al circuito de control de disparo.

Chasis de rectificación o excitatriz.

La función básica del chasis rectificador es producir la potencia para excitar el campo del generador. Para la rectificación utiliza un puente rectificador de potencia con tres tiristores (SCR) y tres diodos, que toma la alimentación trifásica del transformador de excitación externo y la convierte a DC para alimentar el arrollamiento del campo.

El puente de rectificación es controlado por la señal de pulsos proveniente del control de disparo. Cuando el SCR es disparado antes o después de la mitad del ciclo (paso por cero), el regulador variará el voltaje DC censado a través del campo y mantendrá el voltaje de línea del generador dentro de la banda de regulación.

Como se expuso en la teoría, es la excitatriz la etapa de potencia del SEE y donde la señal del AVR es amplificada, se verá mas adelante que esto representa una ganancia muy alta en el modelo matemático del AVR.

Panel de control manual.

El control manual es una opción de régimen de funcionamiento, bajo el cual funciona el sistema de excitación, puede requerirse para controlar la máquina en caso de falla del control automático o en caso de inestabilidad del mismo bajo ciertas condiciones de carga. Consiste en controles de llave e indicadores a los que se tiene acceso en el panel frontal del cubículo del SEE.

Los controles manuales nos dan una idea de las magnitudes que es necesario manipular para el funcionamiento del SEE y el generador. Estos controles son:

- Llave automático – manual: transfiere el control entre los modos automático y manual del SEE.
- Llave aumentar – disminuir la tensión de referencia en modo automático: cambia el voltaje de referencia cuando opera en modo automático.
- Llave de reposición de falla: se utiliza para restablecer el equipo cuando se ha activado alguna de las protecciones y ha parado la máquina, por ejemplo durante la falla de cebado de arranque.

- Llave aumentar – disminuir la tensión de referencia en modo manual: varía el voltaje de referencia cuando opera en modo manual.

- Llave de arranque – parada: sirve para conectar o desconectar el sistema de excitación.

En el panel frontal también se encuentran otros equipos de medición y protecciones que no se describen pues no forman parte de los objetivos de este trabajo.

Ajustadores electrónicos del voltaje de referencia.

Los ajustadores electrónicos reemplazan los potenciómetros operados por motor proveyendo un método de ajuste basado completamente en electrónica de estado sólido, opera como una resistencia ajustable.

Con la variación de la resistencia varía el valor del voltaje de referencia ante el AVR de manera inversa, una disminución de la resistencia provoca un aumento del voltaje de referencia y viceversa. Se tiene un ajustador para cada modo de operación, manual y automático. Pueden ser ajustados exteriormente desde el panel frontal.

Dispositivos electrónicos de control y protección.

Para asegurar la operación normal el SEE cuenta con una serie de protecciones que miden las variables del proceso de regulación, en primera instancia si alguna magnitud toma valores fuera de los límites de trabajo, envían señales de advertencia a los indicadores del panel frontal o activan el disparo o desconexión de la máquina.

Se obvió la descripción de estos dispositivos debido a que el objetivo e interés del trabajo es la parte funcional del SEE. Sin embargo se mencionan para tener una idea sobre ellos:

- Limitador de excitación mínimo - máximo
- Controlador de factor de potencia.
- Relé de sobre-excitación.
- Relé de secuencia de fase.
- Relé de baja tensión, sobre tensión y baja-sobre tensión.

2.2.5 Modelo matemático de Estabilidad del SEE.

El modelo matemático ST1, corresponde al sistema de excitación estático con fuente de potencia con rectificadores controlados, donde el bloque de la izquierda corresponde al AVR y el bloque de la derecha al generador, el bloque inferior en el lazo de retroalimentación del regulador, corresponde al circuito de estabilidad el cual como ya vimos es posible ajustar, para obtener una respuesta adecuada.

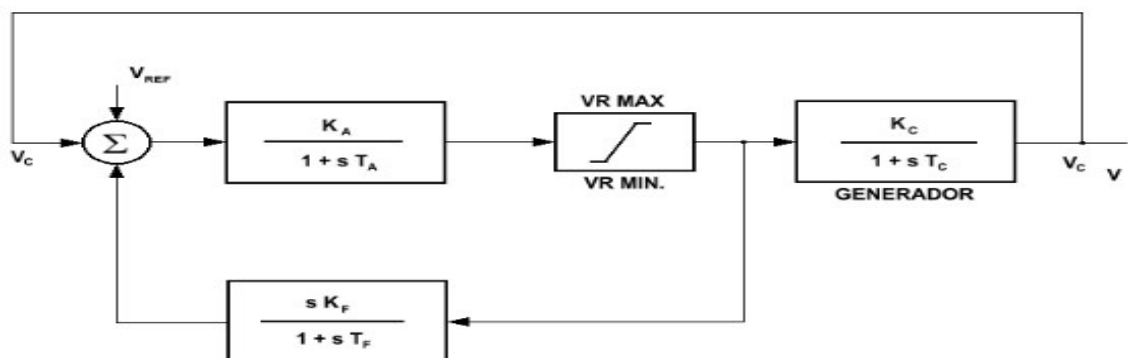


Figura 2.5 Modelo matemático del SEE del tipo ST1.

El voltaje de salida del generador se indica como V_C , y su ganancia y constante de tiempo son respectivamente K_C y T_C . Mientras que K_F y T_F son la ganancia y constante de tiempo de la red de estabilidad y K_A , T_A son la ganancia y la constante de tiempo del regulador. Los reguladores de voltaje se caracterizan por tener ganancias muy altas siendo esto uno de los factores que afectan su estabilidad. En este tipo de sistemas, las constantes de tiempo propias de la excitatriz son muy pequeñas y normalmente no requiere de la estabilización de la excitatriz como tal.

2.2.6 Factores que afectan la estabilidad del voltaje del sistema generador.

La ganancia.

A fin de obtener alta exactitud para una buena regulación del voltaje, el sistema de excitación se debe diseñar con circuitos electrónicos que tienen una ganancia muy alta. La ganancia, en decibelios, define la magnitud de la salida que puede producir la aplicación de una pequeña señal de entrada. A mayor amplificación mayor es la ganancia. Los

reguladores con una pobre regulación (2%) pueden tener una ganancia del amplificador de apenas 100 DB. Mientras que los reguladores de voltaje con regulación de $\frac{1}{4}\%$ pueden tener ganancias arriba de 1000 DB.

La red de estabilidad.

La red con los circuitos de adelanto y atraso están configurados para proporcionar una señal de retroalimentación en el punto sumador del regulador de voltaje. Esto asegura que el regulador no corrija el voltaje del sistema tan rápidamente, que oscile el voltaje de la máquina o al contrario, que retarde tanto el voltaje del generador, que tome un tiempo demasiado largo para recuperarse.

Constante de tiempo del campo.

El campo del generador está caracterizado por una inductancia y una resistencia. El cociente de la inductancia medida en henrios y la resistencia del campo medida en ohmios, se define como la constante de tiempo de máquina K_c . Describe el tiempo en segundos que tarda en cambiar la corriente de campo, desde el 63% de un nivel inicial a un valor final, luego que haya iniciado un cambio.

Generalmente es proporcional al tamaño de la máquina. Sin embargo para pequeños generadores hidráulicos que tienen muchos polos, la constante de tiempo puede ser extremadamente alta.

Velocidad de respuesta del gobernador.

El gobernador controla al apertura de los alabes, variando de este modo el ángulo de incidencia del agua sobre la turbina. Esto sirve para controlar la potencia real generada. Cuando el circuito de medición detecta un aumento de la carga, envía una señal de control al gobernador para que varíe la apertura y se pueda suplir la potencia requerida. El tipo de la respuesta del gobernador tiene influencia en la estabilidad del sistema. Por ejemplo, si su respuesta no es lo suficientemente rápida puede ocasionar inestabilidad del sistema, debido a las repetidas consignas para lograr la potencia deseada.

2.3 Evaluación del Sistemas de Excitación Rotatoria Sin Escobillas “brushless”.

Además de cambiar el sistema de excitación de los turbogeneradores TG1 y TG2, se instalará un nuevo turbogenerador del tipo UNITROL F ABB con los siguientes datos:

Tabla 2.7 Datos del turbogenerador TG3 de la CTE.

P_n (MW)	S_n (MVA)	U_n (kV)	$U_{\text{excit. rotor}}$ (V)	I_{cc} (A)	$I_{\text{excit. rotor}}$ (A)	$\cos \varphi$	Velocidad (rpm).
25	31,25	10,5	42-158	825	142-463	0,8	3600
F(Hz)	C(μ F)	X_0 (%)	X_2 (%)	X_d (%)	X_d' (%)	X_d'' (%)	norma
60	0,11	7,2	16	207	18,7 $\pm$ 15	13 $\pm$ 15	IEC 60034-3

Excitación por medio de un excitador sin escobillas de árbol montado. El campo estacionario que enrolla al excitador sin escobillas se alimenta a menudo de un excitador modelo de campo permanente, un conversor del pulso rectifica y controla el voltaje de CA, con la posibilidad de cambio por encima al consumo.

Este sistema consiste en disponer el inducido de la excitación principal de c.a. en el propio rotor, cuya salida, rectificada mediante un puente de diodos montado en el propio rotor, se conecta directamente al devanado de excitación del alternador sin salida del rotor. La excitatriz principal, es por tanto un generador sincrónico de estructura invertida, con los polos inductores en el estator y el inducido en el rotor.

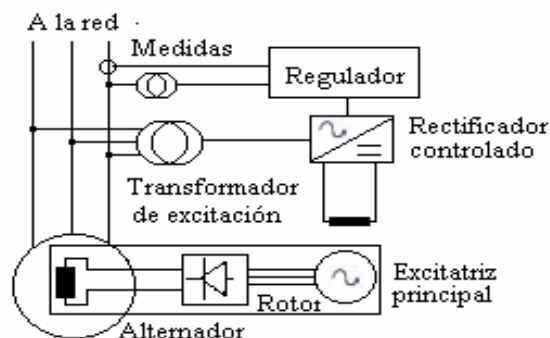


Figura 2.6 Excitación «sin escobillas» con autoexcitación.

Este esquema tiene el inconveniente de que en caso de producirse un cortocircuito en un punto eléctricamente próximo de los bornes del generador, la tensión cae a un valor próximo a cero, la máquina se queda sin excitación y al reducirse la corriente del estator («transformada de compoundaje») de modo que se garantice en todo momento la excitación del generador.

2.3.1 Descripción técnica

El equipamiento de excitación consta de:

Carcasa del estator

La carcasa del estator está formado por bobinas de campo arrollados sin dirección, soportadas en piezas de polo sólidas con bloques de filtro maleable e impregnado al vacío con resina epoxy. Las bobinas están ventiladas en su extremo para proporcionar de esta forma una amplia ventilación y márgenes de elevación de temperatura.

La carcasa del estator es encapsulada por una cubierta apropiada para proporcionar blindado y deflectores de aire para una correcta ventilación de la excitatriz.

Armadura

La armadura consiste de un núcleo laminado soportado por una armazón con un arrollamiento trifásico. Fueron realizadas adaptaciones en la armazón para el montaje de la armadura en el eje del generador y para el montaje del convertidor en la armadura.

El núcleo laminado está compuesto por láminas de acero magnético de alta calidad, esmaltadas con un reforzador inorgánico compatible con la resina. El arrollamiento de la armadura es formado por bobinas de campo arrolladas sin dirección e impregnado al vacío con resina epoxy.

Las bobinas son adecuadamente ajustadas a las laterales de las ranuras y las puntas están amarradas con una cinta maleable, para soportar las fuerzas centrífugas durante la operación normal.

Convertidor

El convertidor está compuesto por seis subconjuntos de rectificadores con sus filtros asociados, además de un subconjunto rectificador controlado de silicio de pico (SCR1, SCR2) con sus circuitos de disparo asociados (módulo M-1) conectado como se muestra en la figura 1, para proporcionar la conversión CA/CC.

El subconjunto rectificador contiene una celda “de presión” colocada entre dos disipadores para una doble ventilación. Este subconjunto es precargado por medio de arandelas de presión Belleville, para proporcionar una presión de contacto constante entre la celda y los disipadores y de esta forma obtener una correcta transferencia térmica y eléctrica en condiciones rotativas.

Cada subconjunto rectificador es aislado de la masa y atornillado a un saliente en la armazón de la armadura. Las conexiones eléctricas entre los subconjuntos son realizadas a través de barras colectoras sujetadas a los disipadores.

Los subconjuntos de filtro, conectados a través de cada rectificador, están formados de una red R C embutida en un encapsulado compuesto de epoxy, para proporcionar un excelente soporte mecánico en la velocidad de operación.

El subconjunto SCR de pico está formado por dos celdas “de presión” colocadas entre tres disipadores. El módulo de disparo M-1 de SCR está montado contra el conjunto de la placa trasera. Este subconjunto también es precargado por medio de arandelas de presión Belleville, para proporcionar una presión de contacto constante entre las celdas y los disipadores y de esta forma obtener una correcta transferencia térmica y eléctrica en condiciones rotativas.

Cada subconjunto rectificador es aislado de la masa y atornillado a un saliente en la armazón de la armadura. Las conexiones eléctricas son realizadas a través de barras colectoras o cables sujetos a los disipadores.

2.3.2 Características de operación

Hay tres tareas principales del sistema de la excitación:

- funcionamiento estable y fiable del generador en el rango entero del diagrama de capacidad
- regulación de voltaje de acción rápida con la humedad eficaz de todos los procesos transitorios.
- ambos que operan y la falta de excitación

La posible fiabilidad más alta del juego de la excitación se asegura, además de la selección cuidadosa de componentes, una aplicación de métodos de convicción de calidad, por una fase razonable de redundancia en los planes de los dos el mando y secciones de poder.

Así, con los fracasos menores, la excitación fija puede continuar en el funcionamiento normal sin la limitación. El tipo de grado de redundancia que está sujeto de plan del sistema individual de las características técnicas detalladas es difícil dar. Con las unidades básicas, el fracaso de un canal principal de la excitación, el mando se cambia automáticamente encima del canal auxiliar.

En el cambio de las unidades más pequeñas por encima del mando manual toman lugar, sin girar, gracias al dispositivo que se lleva a cabo. Los varios grados de redundancia también son aplicados en el plan de rectificador de tiristor. En los puentes de rectificación multiparalelos hay, como una regla, un puente en el exceso, para que el juego pueda continuar en el funcionamiento sin la limitación con un puente desconectado.

Con dos puentes defectuosos la corriente del campo está automáticamente reducida (el campo forzando se bloquea, o la corriente de la excitación se limita al poder activo tasado al igual que el factor de potencia es a uno). Sólo un tercer fracaso entorpecería la unidad.

Debe notarse que se toman las medidas semejantes a pesar del hecho que los fracasos son sumamente improbables debido a la fiabilidad alta de los componentes usada. Es más, en los casos especiales es posible reemplazar las unidades del tiristor defectuosas durante el funcionamiento. El diagnóstico interior fijo habilita la localización de fracaso exacta.

El Regulador de voltaje automático de este sistema es similar al del Estático. Lo que se diferencia es en la marca: UNITROL 1000.

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN FUNDAMENTALES.

3.1 Ventajas y desventajas de los sistemas de excitación fundamentales.

Luego del análisis realizado teniendo en cuenta el sistema de excitación existente y los a implementar, tenemos los elementos necesarios para establecer entre ellos la comparación.

Para conseguir esto se debe tener en cuenta algunos puntos fundamentales y para la realización de este estudio se tomaron en cuenta una serie de aspectos que permitirán demostrar que el sistema de excitación escogido por los especialistas de la empresa de la CTE es factible.

Estos aspectos son:

1. Mantenimiento
2. Velocidad de respuesta
3. Cantidad de elementos
4. Potencia que entrega
5. Regulación
6. Otros

3.1.1 Sistema de Excitación Rotatorio con Escobillas.

Mantenimiento.

La principal desventaja de este sistema son las escobillas pues presenta gran número de escobillas los cuales se desgastan con el roce constante con el colector y se requiere de una alta frecuencia de mantenimiento para el cambio de ellas, pues causa muchas pérdidas, no solo se desgastan las escobillas si no también el colector que sufre el maquinado. Las excitatrices de reserva también se maquinan. Este desgaste

crea también gran suciedad en los polos que provoca chisporroteo y bajo coeficiente de aislamiento. Así también se deteriora el conmutador de la excitadora.

Tantos periodos de mantenimiento encarecen los costos de explotación y los financieros, ya que el generador debe estar completamente fuera de servicio.

Este sistema aumenta el mantenimiento de la máquina (las escobillas deben examinarse para comprobar su desgaste). Las escobillas provocan caídas de tensión que pueden ser importantes.

La elección de las escobillas se realiza a través de la tabla 98 del libro “Guía del montador - ajustador electricista de M.Zevin, E.Parini, 1984 (en caso de que no haya datos de fábrica). El tamaño de las escobillas debe garantizar su desplazamiento libre dentro del collar. La distancia del collar a la superficie del colector debe ser de 2 a 4 mm. No se admite la utilización de escobillas diferentes.

El pulimento de las escobillas se realiza de la manera siguiente: bajo la escobilla se pone el papel de lija moviéndolo a la derecha y a la izquierda.

La fuerza de la presión de ellas debe estar regulada. La desviación del valor de la presión de las escobillas aisladas no debe exceder del 10 %.

La comprobación de la presión se efectúa con un dinamómetro o balanza de resorte, la regulación, con el resorte.

Velocidad de respuesta.

La velocidad de respuesta es lenta en el voltaje de línea debido a la inductancia suministrada al sistema por la excitadora rotativa. Adicionalmente se presentan pérdidas de energía que provocan que el sistema de generación sea menos eficiente.

Existe un creciente número de procesos industriales que requieren una exactitud en su control o una gama de velocidades que no se puede conseguir con generadores de corriente alterna. El generador de corriente continua mantiene un rendimiento alto en un amplio margen de velocidades, lo que junto con su alta capacidad de sobrecarga lo hace más apropiado que el de corriente alterna para muchas aplicaciones.

Otra ventaja es la facilidad de inversión de marcha con cargas de gran inercia, al mismo tiempo que devuelven energía a la línea, lo que ocasiona el frenado y la reducción de velocidad.

Cantidad de elementos.

La excitatriz genera Corriente Directa y como su nombre lo dice excita al generador. Está compuesta por un rotor y un estator. El rotor es bobinado de polos interiores, compuesto por espiras; su estator posee 4 pares de polos (2 pares de polos principales y 2 pares de polos auxiliares). El conjunto de las espiras del rotor constituye el colector, el cual tiene rozamiento permanente con la escobillas (20 escobillas) sujetas por las portaescobillas y a la vez a brazos metálicos fuertes fijos a la base de la máquina. La energía que sale a través de las escobillas es llevada al generador por conductores resistentes, uno por el polo positivo y el otro por el polo negativo.

La excitatriz se alimenta de un RAV en serie con un transformador proveniente de la red; y de un reóstato en serie con un banco de baterías, su activación es manual.

Otros.

Las excitatrices de reserva del TG1 y TG2 consumen 175 kW, mucho mayor que las excitatrices de trabajo (125 kW), por tanto la del TG2 con función de trabajo consume más de lo normal. Estas dependen de otra fuente de energía, o sea, es movida por un motor de 250 kW.

Ventajas del sistema. Un inducido fijo no necesita anillos y sus conductores pueden llevar un aislamiento continuo desde las espiras hasta las barras del cuadro de salida.

Si el inductor se sitúa en el rotor, la corriente continua que lo alimenta llegará hasta él por medio de dos anillos si bien la tensión de alimentación del inductor raras veces supera los 1000V, y como la potencia que absorbe el inductor es baja, raras veces producen problemas graves.

Desventajas del sistema. El inducido giratorio requiere 3 anillos rozantes (máquina trifásica) para recoger la tensión generada y enviarla al circuito exterior. Estos anillos están más o menos descubiertos y son difíciles de aislar, especialmente para las

tensiones elevadas del orden de 6000 a 25000V en las que suelen funcionar estas máquinas. Además estos anillos suelen producir perturbaciones debidas a chispas, cortocircuitos, etc.

Es más difícil aislar los conductores en un inducido giratorio que en un inducido fijo, debido a la fuerza centrífuga y a las vibraciones que produce la rotación. En máquinas grandes (en alternadores puede llegarse a 1000 - 1500MVA), los polos del inductor se coloca en el rotor y el devanado trifásico en el estator.

3.1.2 Sistema de Excitación Estática

Mantenimiento.

Sigue sin embargo presente el mantenimiento a los anillos y las escobillas.

La inexistencia de partes móviles, sensibles al desgaste mecánico, reduce los requerimientos de mantenimiento, al menos mecánico.

Velocidad de respuesta.

La respuesta para la recuperación del voltaje de línea del generador es más rápida en comparación con la excitación rotativa, ya que el sistema no ve el retraso adicional debido a las constantes de tiempo propias de la excitadora rotativa, además la eficiencia del sistema es mayor.

Cantidad de elementos.

El sistema de excitación está conformado por diversos equipos de potencia, edición y control. Se pueden clasificar y enumerar de la siguiente forma:

- Transformador de excitación.
- Transformador para la medición trifásica del voltaje Terminal del generador.
- Transformador para la medición monofásica de la corriente.
- El chasis de control con el regulador automático de voltaje (AVR) y el control de disparo de los SCR.

- El chasis de rectificación o excitatriz donde se encuentran los SCR de potencia.
- El control manual ubicado en el panel frontal del cubículo.
- Ajustadores electrónicos del voltaje de referencia para modo manual y automático.
- Banco de baterías como fuente de DC para el arranque del generador.
- Dispositivos electrónicos de control y protección.

Otros.

Estos sistemas se equipan con elementos de control electrónicos y microelectrónicos, ideados para ser cambiados íntegramente en caso de falla. Esto dificulta los intentos de reparación pues debido a su complejidad es necesario un conocimiento experto del elemento, por parte del encargado del mantenimiento y adicionalmente la dificultad de obtener repuestos específicos y no los módulos completos.

3.1.3 Sistema de Excitación Rotatorio sin Escobillas

Mantenimiento.

Su ventaja principal consiste en mantenimiento fácil debido a la eliminación del contacto corredizo (escobillas),

El mantenimiento disminuye drásticamente con la ausencia de las escobillas, sin embargo continúan presentes las pérdidas de energía en el eje y la inductancia añadida al sistema por la excitadora rotativa.

Un excitador sin escobillas requiere mucho menos mantenimiento que los sistemas con anillos rozantes y escobillas.

Muchos generadores sincrónicos que incluyen excitadores sin escobillas tienen también anillos rozantes y escobillas, de manera que disponen de una fuente auxiliar de corriente dc de campo en caso de emergencia.

En cuanto a limpieza los arrollamientos aislados proporcionan una operación duradera y satisfactoria si se mantienen razonablemente limpios y libres de suciedad, aceite, polvo

metálico, contaminantes, etc. La suciedad disminuye la capacidad de disipación de calor que, a su vez, aumenta la elevación de temperatura de la excitatriz, reduciendo de esta forma la capacidad de operación.

Una reducción semejante en la capacidad de disipación de calor es causada por la suciedad en los disipadores. En complemento a esta reducción de capacidad, la suciedad eléctricamente conductora, puede provocar destellos y chispas sobre los componentes que tienen conductores pelados.

La limpieza se obtendrá por el mantenimiento del aire de ventilación lo más limpio posible y a través de inspección y limpieza periódicas. La limpieza puede consistir en soplar la máquina con aire comprimido seco, cepillar y refregar con un paño sin hilachas. No utilice pasta de limpieza.

Si los arrollamientos se encuentran completamente sucios, puede ser necesario limpiarlos con un solvente líquido adecuado preparado especialmente para este propósito. Los procedimientos de limpieza y secado normal para el tipo de solvente utilizado deben ser respetados. Los solventes líquidos no deben ser utilizados en los conjuntos rectificadores.

La resistencia de aislamiento para tierra, debe ser verificada periódicamente para determinar la condición de los arrollamientos y para detectar cualquier falla para tierra que pueda haber ocurrido. La armadura y los arrollamientos de campo, estando normalmente sin ser aterrados, pueden trabajar con una tierra en el arrollamiento. Sin embargo, cualquier aterramiento subsiguiente, en este o en el sistema, puede causar daños considerables. Por lo tanto, si una tierra es detectada en cualquier arrollamiento, este debe ser aislado y reparado inmediatamente.

En caso de vibración la máquina debe ser verificada frecuentemente para asegurar que no existan señales de aumento de vibración.

Velocidad de respuesta.

Tiene como desventaja que el tiempo de respuesta es necesariamente más largo con respecto a otros.

Pero ésta es solucionada en la actualidad con sistemas electrónicos que le mandan una respuesta rápida de sobreexcitación, los cuales sacan de una manera rápida al generador de los procesos transitorios ocurridos.

Cantidad de elementos.

Este contiene:

- Una excitadora principal de 3 fases
- Una excitadora auxiliar con imán permanente
- Un regulador de voltaje (RAV)
- Autómata lógico

Otros

Por ser un sistema de dinamo compacto con excitación acoplada al eje del motor, el RAV es de potencia reducida, por lo que los niveles de temperatura son mínimos, por tanto hay una mayor seguridad en el funcionamiento del regulador principal.

3.2 Costos

3.2.1 Sistema de Excitacion Rotatoria con escobillas

Como vimos en el capítulo anterior, el mantenimiento de este sistema es frecuente por sus limitaciones que es cada dos meses, alternando los turbogeneradores TG1 y TG2. El TG1 está trabajando en régimen de avería; esto quiere decir que se puede dar el caso en que se le de mantenimiento por avería dentro del tiempo establecido (los dos meses).

Costo de los mantenimientos

El costo de cada mantenimiento en la excitatriz es alrededor de \$ ±27.97 en moneda nacional, donde se incluyen:

-Mano de obra	\$ 17,60
-Materiales	\$ 6,92

-Medios de trabajo	\$ 0,00
-Otros costos	\$ 3,45

Costo de los materiales

Estos son los materiales que se utilizan en los mantenimientos de las excitatrices:

• Desollo textil	2kg	\$ 1,0474
• Nafta	5L	\$ 1,6690
• Escobillas (20*32*50) 8 u		\$ 27,84
• Lija gorda (80)	¼ m	\$ 1,40
• Lija fina (120)	¼ m	\$ 1,2858

El total de estos materiales es de \$ 33,2422. No coincide con el anterior puesto que en los mantenimientos no siempre se utilizan todos estos materiales ni la misma cantidad.

3.2.2 Sistema de Excitación Estática

En este moderno sistema digitalizado cuyo costo es de 80 000 euros, los mantenimientos no son tan continuos como en el caso anterior. Por lo que los costos por mantenimiento se reducen considerablemente.

3.2.3 Sistema de Excitación Rotatoria sin Escobillas (brushless)

El costo de instalación de este sistema de excitación, de forma individual, es similar al de excitación Estática. En este caso no está presente el problema del cambio de las escobillas, por lo que el costo por efecto de mantenimiento se reduce en comparación con los dos métodos anteriores.

CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se analizaron las deficiencias que presenta el sistema de excitación rotatoria con escobillas presente en los turbogeneradores de la CTE de la empresa, sus limitaciones y continuo mantenimiento y cambio de escobillas.

Se logra un documento que fundamenta la selección de los sistemas de excitación estática y rotatoria sin escobillas para los turbogeneradores de la CTE de la Empresa Ernesto Che Guevara, el cual puede generalizarse a otras entidades.

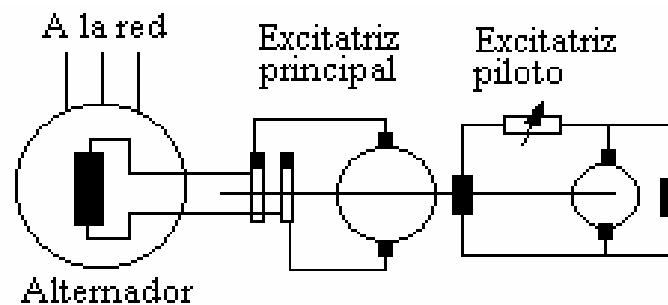
Se llevó a cabo una comparación técnica entre los tres sistemas de excitación analizados, en cuanto a los parámetros que los caracterizan quedando demostrado que el Sistema de Excitación sin Escobillas es el óptimo, este no tiene la presencia de las escobillas, que es la principal desventaja en estos. Además las variaciones ocurridas en el equipamiento son reflejadas directamente al eje del generador y a la vez a su sistema de regulación; no hay elementos intermedios. A pesar de ser un sistema inercial es mucho más conveniente su utilización ante los requerimientos de la máquina sincrónica.

Este tiene la capacidad de reaccionar rápidamente ante un proceso transitorio, ya que este tipo de sistema moderno posee tecnología de punta.

BIBLIOGRAFÍA

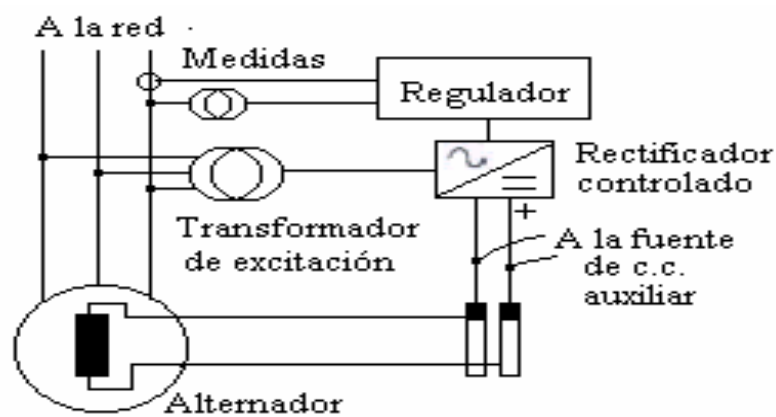
1. Chapman, Stephen. Máquinas Eléctricas. Pdf. 2005_273p
2. Cubillos Sánchez, Fabián E. Sistemas de excitación Estática de Generadores Sincrónicos. Trabajo de diploma. Universidad de Costa Rica, 2004_15p.
3. Ivanov, A.V, Smolenski. Máquinas Eléctricas/ Editorial Pueblo y Educación, 1984_196p.
4. Kostenko, M, Piotrovsky, L. Máquinas Eléctricas/ Editorial Pueblo y Educación, 1982_337p.
5. Manual de oferta Punta Gorda Norte Modernización. Excitación, 2005.
6. Rosell López, Alejandro R. Regímenes de operación de las unidades de generación de la empresa "Cdte. Ernesto Che Guevara". Trabajo de diploma. ISMM, 2003_22p.
7. Rosell López, Leonardo R. Protecciones Digitales para Generadores de Energía Eléctrica de la empresa "Cdte. Ernesto Che Guevara". Trabajo de diploma. ISMM, 2001_19p.
8. Skoda. Guía para el mantenimiento de los turbogeneradores (TG1 y TG2) con enfriador de aire/ Fábrica Vladimir Ilich Lenin/ Plzen,URSS. 1985_36p.
9. Torres Breffe, Orlys E. Manual de Protecciones Eléctricas: Conferencia 2. ISMM, 2001_7p.
10. Torres Breffe, Orlys E. Manual de Protecciones Eléctricas: Conferencia 3. ISMM, 2001_3p.
11. Zans Feito, Javier. Máquinas Eléctricas. Pdf. 2002_305p
12. Zevin, M, Parini, E. Guía del montador-ajustador electricista/ Editorial MIR Moscú, 1984_119p.
13. <http://www.eie.ucr.ac.cr/proyectos/proybach/pb0437t.pdf>.2005.
14. www.infowarehouse.com.ve, 2006.
15. www.mircem.gob.pe, 2006.
16. www.rincondelvago.com. Alternadores Trifásicos. 2005.

ANEXO # 1



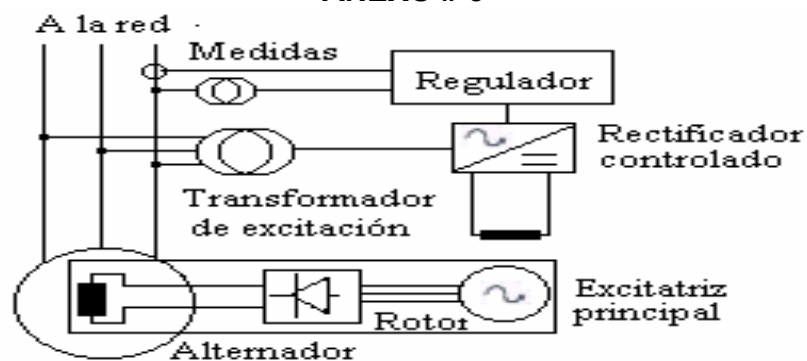
Excitación mediante generadores de corriente continua con control manual.

ANEXO # 2



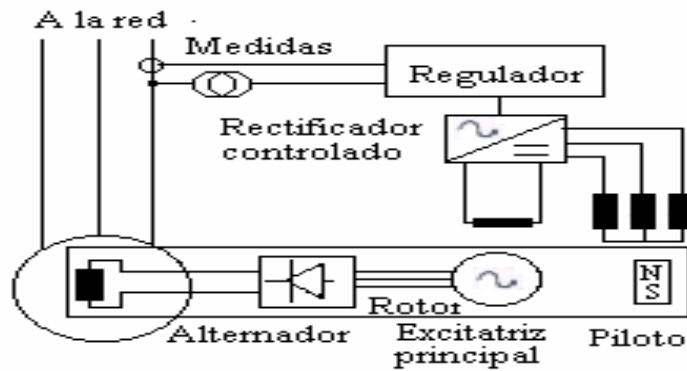
Excitación mediante puente rectificador (autoexcitación).

ANEXO # 3



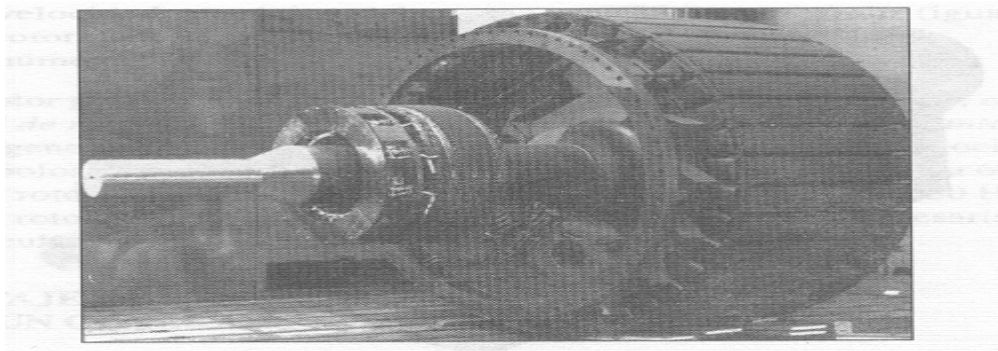
Excitación «sin escobillas» con autoexcitación.

ANEXO # 4



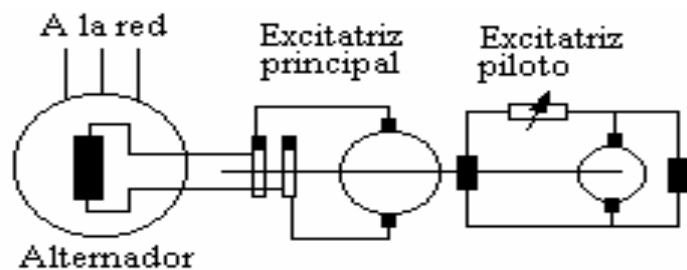
Excitación «sin escobillas» con excitatriz piloto

ANEXO # 5



Fotografía de un rotor de maquina sincrónica con excitador sin escobillas montado sobre el mismo eje. Nótese la parte electrónica de rectificación visible cerca de la armadura del excitador.

ANEXO # 6



Excitación mediante generadores de corriente continúa con control manual.

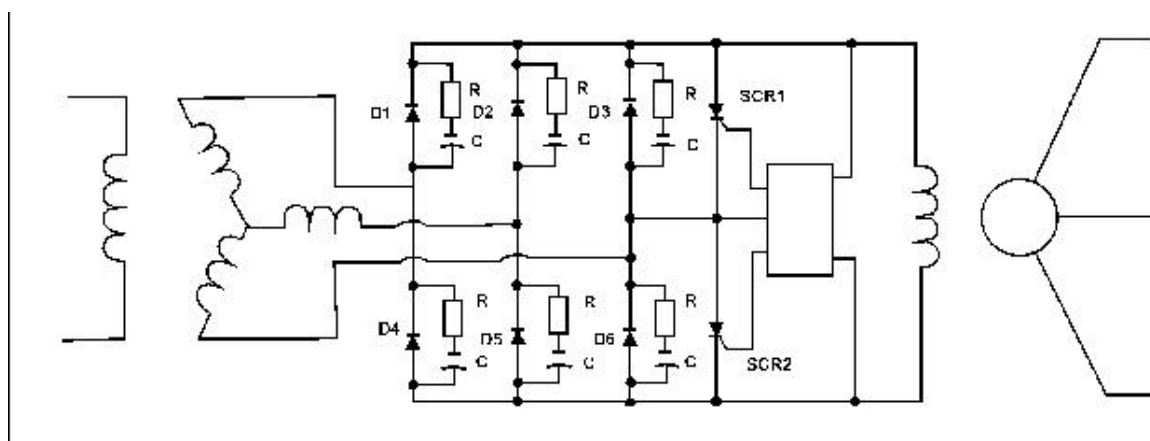
ANEXO # 7

Datos de chapa del turbogenerador de 25 MW.

Tipo	1HYJ 620720/2
Potencia Aparente	31250 kVA
Potencia activa	25000 kW
Factor de potencia	0.8
Voltaje	10.5 Kv
Control range at rated power	+ - 5%
Rated current per phase	1718 A
Conexión del enrollado del estator	WYE
Number of terminal brought out of the machine	6
Insulación class of stator winding / utilization	F/B
Insulación class of rotor+ winding / utilization	F/B
Velocidad de rotación	1800 r.p.m
Frecuencia	60 Hz
Temperature of primary coolant (air)	40 °c
Temperature of secondary coolant (water)	33°c
No load excitación current	327 A
No load excitación voltage	19V
Exc.Current for nominal rating	828 A
Exc. Voltage for nominal rating	66 V
Direct axis synchronous reactance (non satured) Xd	177,0 %
Direct axis transient reactance (satured) X'd	26,30 %
Direct axis subtransient reactance (saturated)	15,00%
Quadrature axis synchronous reactance Xq	85,50%
Quadrature axis subtransient reactance X''q	18.80%
Negative sequence reactance X ₂	18,20%
Zero sequence reactance X ₀	7,30 %
Direct axis transient open-circuit time constant T' _{d0}	8,700 s

Diret axis transient short-circuit time constant T'_d			1,40 s
Diret axis subtransient short-circuit time constant T''_d			0,026 s
Quadrature short circuit time constant T_a			0,220 s
Short circuit ratio K_c			0,65
Efficiency of alternador			
Loading (KVA)	100%	75%	50 %
Power factor 0.8	97,70	97,35	96,50

ANEXO # 8



Esquema de la exciatriz sin escobillas.