DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA EXCITATRIZ ESTATICA PARA GENERADOR DE 5 MVA

ING. DANILO ALVARADO P.
INGEMELEC CIA. LTDA.

ING. BOLIVAR LEDESMA G.
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

RESUMEN

Se presenta una descripción de las características del sistema de excitación estática construido para uno de los generadores de 5 MVA de la Central Termoeléctrica de la fábrica La Internacional. Se pone especial atención en el diseño del convertidor estático, los detalles tecnológicos y constructivos del equipo y se hace un balance de los resultados obtenidos de la operación del sistema desde su instalación.

ABSTRACT

This paper presents a characteristics description of a static excitation system developed for one 5 MVA La Internacional Power Station synchronous generator. Special atention is given to the static converter design as well as to technological and assembling details. Furthermore an analysis of system operating results is presented.

INTRODUCCION

Tradicionalmente, la fuente de voltaje de campo para la excitación de un generador sincrónico ha estado constituída por una máquina rotativa capaz de proporcionar los niveles requeridos de corriente, tratándose en algunos casos de un generador de corriente contínua operando como un amplificador de potencia rotativo o bien pudiendo ser un generador de corriente alterna provisto de un rectificador rotativo implementado en base a elementos de estado sólido no controlados. En cualquiera de estos casos, el ajuste de los parámetros de operación del generador principal se realiza mediante el ajuste de la corriente de excitación de la máquina excitatriz, con la ventaja de que los niveles de potencia requeridos por ésta son del orden del 1 al 5% de la potencia requerida por el devanado rotórico del generador.

Normalmente el sistema de excitación para un generador sincrónico incluye el excitador, encargado de suministrar la corriente continua requerida para la excitación, y, el regulador de voltaje cuya función es mantener el voltaje RMS generado dentro de un margen tolerable. Con el fin de poder ajustar el funcionamiento transitorio y el de estado estable del sistema, actualmente se utilizan sistemas realimentados que incluyen etapas especiales estabilizadoras del sistema de excitación y en muchos casos un estabilizador del sistema de potencia.

Los diferentes esquemas adoptados para los sistemas de excitación han sido agrupados y clasificados por la IEEE como: sistemas de excitación de corriente continua tipo DC1 y DC2, sistemas de excitación de corriente alterna tipo AC1 y AC2 y los sistemas de excitación estáticos tipo ST1 y ST2.[1]

Los sistemas de excitación de corriente continua tienen como fuente de excitación para el generador un excitador con conmutador de corriente contínua. Estos sistemas en la actualidad están siendo menos empleados, pues son sistemas de respuesta lenta y requieren mantenimiento periódico. La velocidad de respuesta depende de la constante de tiempo de la excitatriz (un generador rotativo de corriente continua), la misma que es directamente proporcional a la inductancia del bobinado de su campo, lo que hace que estos sistemas no respondan rápidamente ante las variaciones del voltaje terminal.[2]

Los sistemas de excitación de corriente alterna utilizan un generador de corriente alterna cuyo voltaje es rectificado para proveer la excitación requerida para el campo del generador principal. Los rectificadores que proveen el voltaje continuo necesario para el campo del generador sincrónico pueden ser rotativos o estáticos aunque la primera opción es la más utilizada al no necesitar de anillos rozantes ya que el alternador del excitador y los diodos rectificadores están rotando con el eje. La respuesta es más rápida que aquella de los sistemas de de corriente continua ya que la excitación se obtiene a través de un grupo alternador-rectificador.[3]

Los sistemas de excitación estáticos se diferencian de los otros sistemas de excitación en que no utilizan una máquina rotativa sino que la potencia eléctrica necesaria para el campo es tomada directamente desde los terminales del generador y convertida en corriente continua.

Los sistemas de excitación estática se caracterizan por tener constantes de tiempo muy pequeñas y en ciertos casos la estabilización del excitador, como tal, no es requerida.

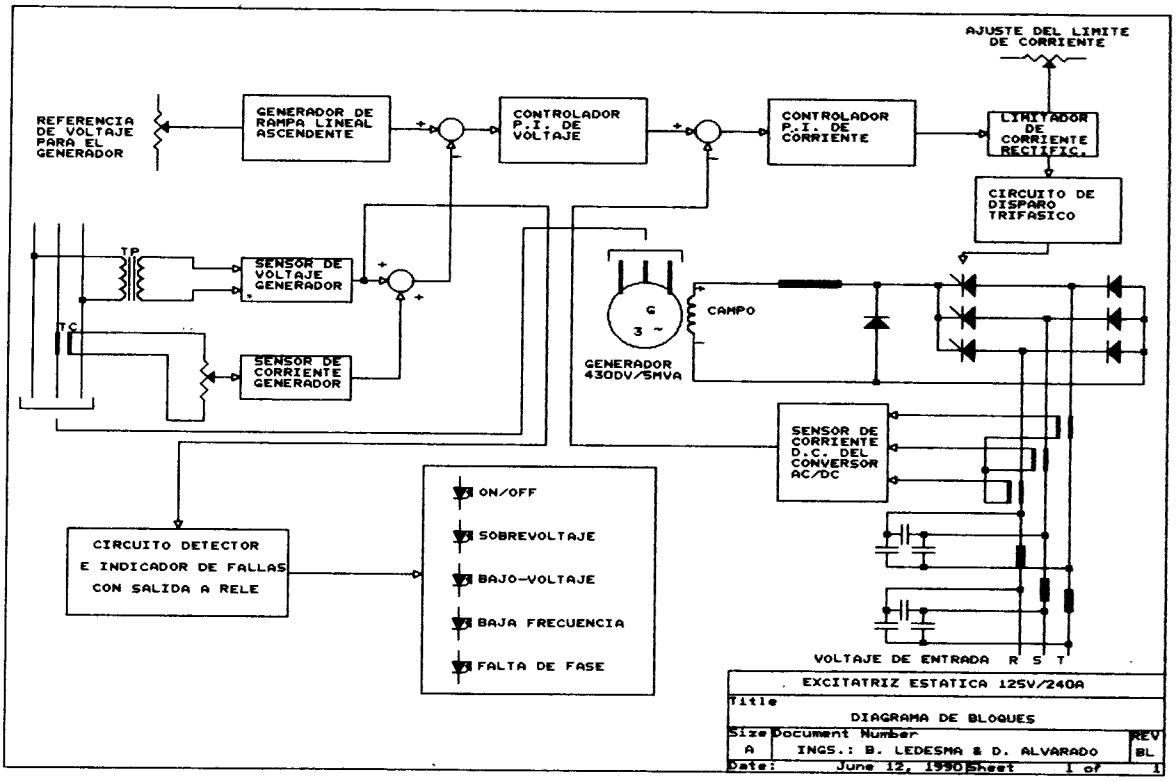

Fig. 1. Diagrama de Bloques del sistema.

DESCRIPCION

En la figura 1 se presenta el diagrama de bloques del sistema constituido por el generador principal y el sistema de excitación estático en el que la corriente de excitación del generador es abastecida a través de un transformador trifásico y un conversor AC-DC semicontrolado desde la misma salida del generador.

Los datos de placa del generador sincrónico son:

DATOS DEL GENERADOR
-Potencia nominal: 5 MVA
-Voltaje terminal: 4400 V
-Número de fases : 3
-Corriente linea : 670 A
-Factor de potencia: 0.8
-Voltaje excitación: 125 V_{DC}
-Corriente excitación: 240 A
-Velocidad sincrónica: 3600 RPM

El transformador reduce el voltaje generado por la máquina sincrónica a un nivel apropiado y existen circuitos adicionales para limitar la corriente máxima de salida del excitador estático.

La potencia nominal de la excitatriz estática está en el orden de 30 KW que son suministrados por un arreglo de tres diodos y tres tiristores en un puente trifásico semicontrolado, un filtro L de salida para disminuir el rizado de corriente y voltaje y limitar la velocidad de crecimiento de la corriente y filtros C-L-C en las líneas de entrada del convertidor para atenuar el contenido armónico de la corriente de línea, compensar los reactivos absorvidos por el conversor y reducir la ganancia ante transitorios en el sistema.

Los elementos esenciales que constituyen la excitatriz estática son:

- Conversor AC-DC trifásico semicontrolado y elementos asociados (filtros, redes snubber, fusibles, etc.).
- Circuito de disparo encargado de generar los pulsos requeridos para el activado de los tiristores del conversor estático en sincronismo con la red trifásica de alimentación.
- Circuito de medición de la corriente de campo, que incluye tres transformadores de corriente en las líneas de entrada del conversor estático, amplificadores y filtros.
- Controlador analógico tipo proporcional - integral para la regulación de la corriente de campo del generador que permite una limitación de la corriente máxima de excitación y mejora las características dinámicas de operación del sistema a lazo cerrado.
- Controlador analógico proporcional - integral para control

del voltaje terminal que permite la regulación automática del voltaje generado;

Circuito de medición y realimentación de la corriente suministrada por el generador a la carga que permite estabilizar la operación en paralelo del generador con la red pública de suministro y controlar el flujo de potencia reactiva entre las dos fuentes, y;

Circuitos de protección temporizados con señalización y alarma para detectar: sobre y bajo voltaje, baja frecuencia y desconexión de una fase.

El esquema de control adoptado corresponde al sistema de regulación lineal con lazos múltiples o en cascada en el que se implementa un regulador individual para cada una de las variables controladas. El lazo interno de realimentación permite la regulación de la corriente de excitación, mientras que el lazo de realimentación externo está encargado de la regulación de la magnitud resultante de la suma fasorial entre el voltaje terminal y una muestra de la corriente de carga del generador.

Las especificaciones técnicas de la excitatriz estática son:

ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LA EXCITATRIZ ESTATICA	
Voltaje DC de salida:	0 - 150 V
Corriente DC de salida:	240 A continuo, 350 A durante un minuto.
Regulación de voltaje:	Menor al 1%
Rango de ajuste de voltaje:	± 10% del nominal.
Tiempo de respuesta:	Menor a 0.3 seg.
Voltaje de alimentación:	220 VAC ± 20%
Frecuencia:	60 Hz ± 10%
Compensación de paralelismo:	5A a 25VA máx. para un ajuste máximo de 2% de caida de voltaje.
Temperatura máxima de operación:	70 °C.
Coeficiente de temperatura:	± 0.5% ante cambio de 40 °C.
Dimensiones:	60 x 60 x 100 cm.
Peso aprox.:	90 kg.

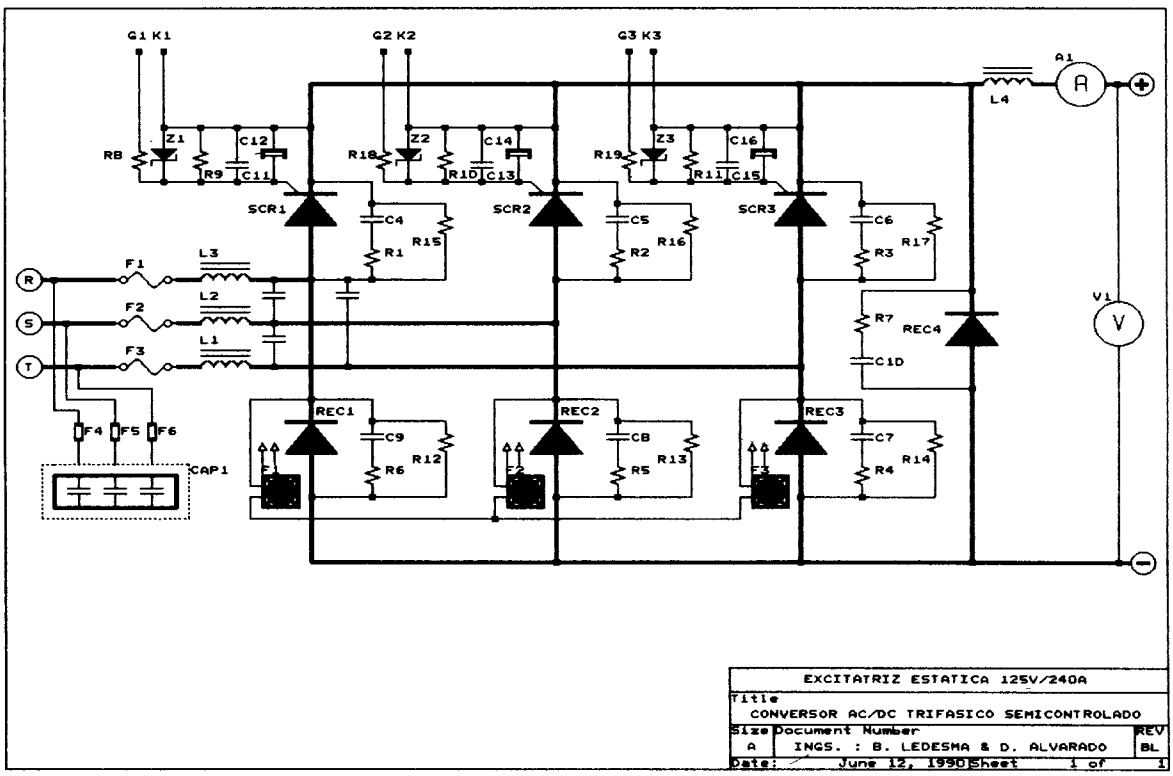

Figura No. 2

OPERACION DE LA EXCITATRIZ ESTATICA

En forma simplificada se puede decir que la excitatriz estática mide el voltaje AC del generador, compara una muestra rectificada de éste con un voltaje de referencia y suministra la corriente directa al devanado de excitación del generador con el fin de mantener constante cierta relación predeterminada entre el voltaje de referencia y el del generador.

Para permitir que el generador trabaje en paralelo con la red pública de suministro, la excitatriz incluye circuitos adicionales que permiten un reparto adecuado de la carga y además, reducen la corriente reactiva circulante entre ellos.

Para efectuar esta operación el sistema estático de excitación está constituido por las siguientes etapas principales:

Convertidor estático AC-DC:

Constituido por un rectificador trifásico semicontrolado tipo puente que utiliza tres tiristores y diodos rectificadores convencionales, como se muestra en la figura 2. Entre los terminales de salida del rectificador y el devanado de excitación del generador se incluye un filtro constituído por una inductancia en serie para disminuir el rizado de la corriente de campo y un capacitor en paralelo para atenuar el rizado del voltaje de salida.

La cantidad de corriente continua suministrada por este rectificador semicontrolado depende de los intervalos de conducción de los tiristores y de la resistencia equivalente del devanado de excitación.

En las líneas de entrada del rectificador existe un filtro π (C-L-C) encargado de atenuar la ganancia ante transitorios en las líneas AC, limitar la velocidad de crecimiento de la corriente en los semiconductores, disminuir el contenido armónico de la corriente de entrada y la potencia reactiva producida el retardo en el activado de los tiristores, mejorando así el factor de potencia de la excitatriz.

Circuito de sincronización y disparo:

El circuito se muestra en la figura 3. El sincronismo se consigue tomando muestras en forma directa de los voltajes ánodo-cátodo de cada tiristor y sintetizando a partir de éstos los voltajes de línea y de fase de la red para generar tres rampas cosenoidales defasadas 120° las cuales se comparan con un voltaje continuo de control para generar las tres señales de disparo requeridas por el conversor. Las rampas cosenoidales utilizadas para el sincronismo permiten, adicionalmente, compensar la característica no lineal del conversor y obtener una relación aproximadamente lineal entre el voltaje de control y el valor medio del voltaje de salida del conversor.

La referencia del circuito de sincronismo y disparo se conecta a los cátodos de los tiristores, las fases de entrada ingresan por los terminales 3, 4 y 5 (Fig. 3) y los pulsos de salida se conectan directamente a las compuertas de los tiristores a través de los terminales 12, 14 y 16. El voltaje de control del ángulo de activado ingresa por el terminal B. El interruptor SW2 permite conmutar la señal de control a una señal local proveniente del potenciómetro P4. El terminal 9 permite la habilitación del circuito de disparo mediante una señal lógica externa proveniente de los circuitos detectores de fallas. El interruptor SW1 permite realizar la habilitación local del circuito de sincronismo y disparo.

Los potenciómetros P1, P2 y P3 permiten calibrar la simetría del ángulo de activado de los tiristores del conversor.

Circuitos de medición:

Los circuitos de medición de corriente de campo y de voltaje terminal del generador se presentan en la figura 4.

Para la medición de la corriente DC suministrada por el excitador al campo del generador se utilizan tres transformadores de corriente montados sobre las líneas AC de alimentación al conversor estático. Los transformadores de corriente se conectan en estrella y alimentan un rectificador trifásico tipo puente que tiene como carga una resistencia en cuyos terminales se reproduce en forma muestreada la corriente de campo. Los circuitos asociados a los amplificadores operacionales U1B y U1C convierten la señal muestreada en una señal DC con bajo rizado y con un nivel apropiado de voltaje, proporcional a la corriente de campo, disponible en la salida No. 7.

El transformador T1, conectado directamente a las barras R y T del generador proporciona una muestra del voltaje generado al circuito de medición de voltaje. Un transformador de corriente montado sobre la barra S del generador y los elementos asociados a éste, permiten obtener en el secundario del transformador T3 una señal de voltaje proporcional a la corriente de carga del generador. Esta señal se suma vectorialmente con la muestra del voltaje terminal y la magnitud resultante es rectificada y filtrada para proveer en el terminal No. 8 un voltaje DC con bajo rizado. La contribución del transformador T3 al voltaje suministrado al rectificador es muy pequeña en relación al voltaje suministrado por el transformador T1.

La composición vectorial entre las muestras del voltaje terminal y de la corriente de carga, permiten realizan la compensación y estabilización necesarias para la operación del generador en paralelo con la red de suministro comercial.

El circuito de medición del voltaje terminal corresponde a un esquema monofásico, aunque se puede implementar un esquema trifásico en delta abierta utilizando el transformador T2, como se indica en la figura 4.

Compensación de reactivos para la operación en paralelo:

Cuando el generador alimenta a una carga resistiva (factor de potencia unitario),

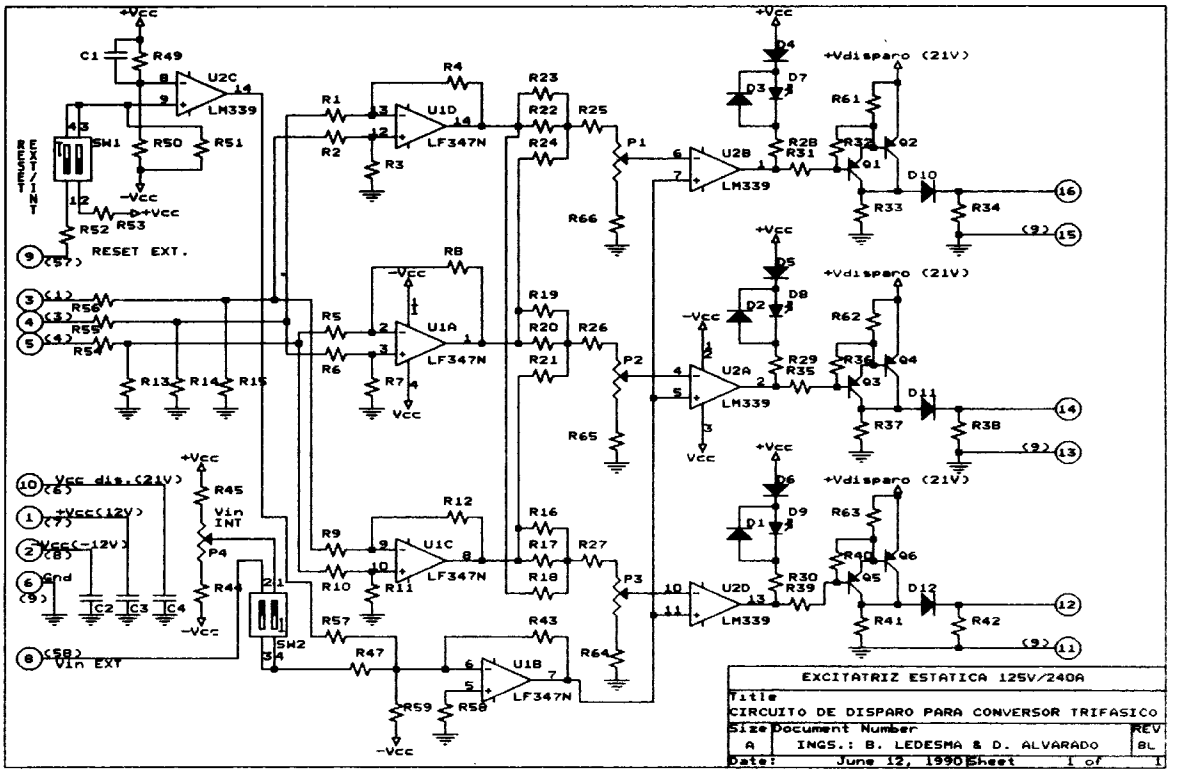

FIGURA N°3

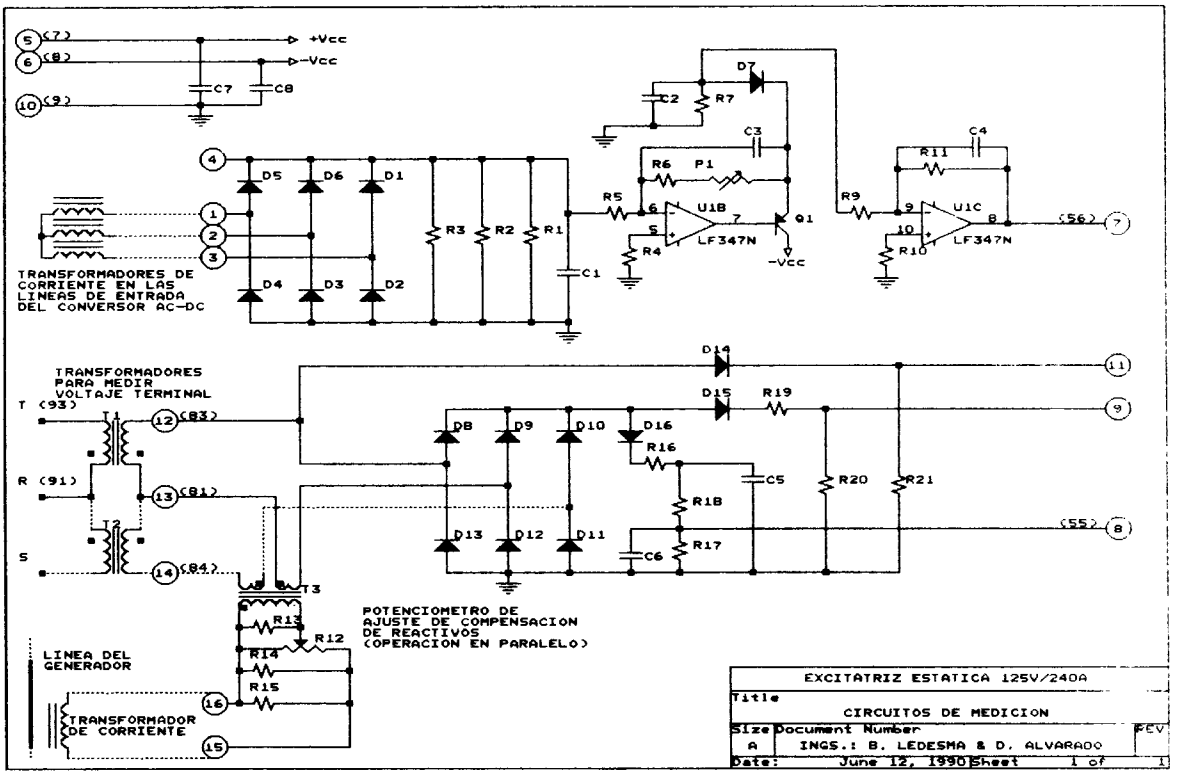

FIGURA N° 4

el voltaje en el secundario de T3 adelanta al voltaje de T1 en 90° eléctricos y la suma vectorial entre los dos voltajes es prácticamente igual al voltaje de T1. Consecuentemente, el voltaje de salida en las barras del generador es independiente de la condición de carga del mismo.

Cuando una carga inductiva es conectada al generador (f.p. menor a 1 en retraso), el voltaje del secundario de T3 se va poniendo más en fase con el voltaje de T1 y la suma combinada de los dos producen un voltaje resultante mayor que el valor medido por T1, el cual es aplicado al rectificador del circuito de medición. Dado que la acción del regulador está encaminada a mantener constante el voltaje en el terminal No. 8 del circuito de medición (fig.4), el sistema reacciona disminuyendo el voltaje de salida del generador.

Cuando una carga con factor de potencia en adelanto es conectada al generador, el efecto es totalmente contrario al anterior.

Cuando dos generadores están operando en paralelo, si la excitación de uno de ellos resulta excesiva y produce la circulación de una corriente reactiva entre los generadores, esta corriente aparecerá como una carga inductiva en el generador sobre-excitado y como una carga capacitiva en el generador subexcitado. El circuito de compensación actuará en el generador provocando una disminución de la corriente de campo si estaba sobre-excitado o un incremento en caso contrario, minimizando de esta forma y de modo automático la corriente reactiva circulante entre los generadores. La compensación actúa en la forma descrita sobre el generador cuando éste opera en paralelo con la red comercial de suministro.

Controlador lineal en cascada:

La selección del controlador es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y la complejidad del controlador a implementar. El esquema del controlador cascada mostrado en la figura 5 permite, gracias a la utilización de amplificadores operacionales, gran flexibilidad y versatilidad en el ajuste de los parámetros y ganancias.

El esquema corresponde a dos controladores proporcionales - integrales que garantizan, apropiadamente calibrados, un error estacionario teóricamente nulo, una rapidez de respuesta adecuada y un buen margen de estabilidad.

Las ganancias de cada acción pueden ser ajustadas en forma independiente mediante potenciómetros dispuestos para el efecto.

El límite máximo de corriente puede ser ajustado mediante la limitación del voltaje de salida del primer controlador, a través del arreglo formado por el diodo D4 y el potenciómetro P3.

Se ha impuesto como parámetros de diseño, los siguientes rangos de variación en las diferentes ganancias de los controladores:

REGULADOR DE VOLTAJE	
Ganancia proporcional	0.2 - 2.0
Ganancia integral	0.5 - 5.0
REGULADOR DE CORRIENTE	
Ganancia proporcional	0.4 - 4.0
Ganancia integral	0.5 - 5.0

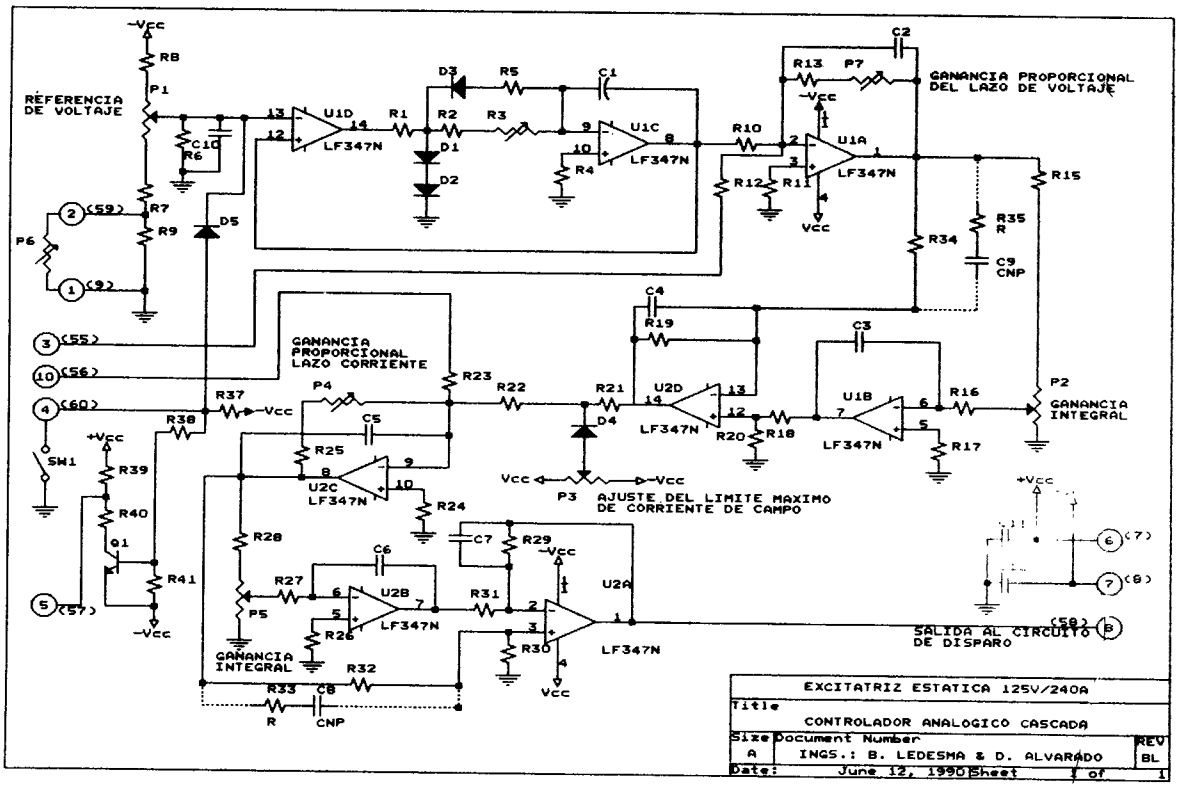

Figura No. 5

MONTAJE

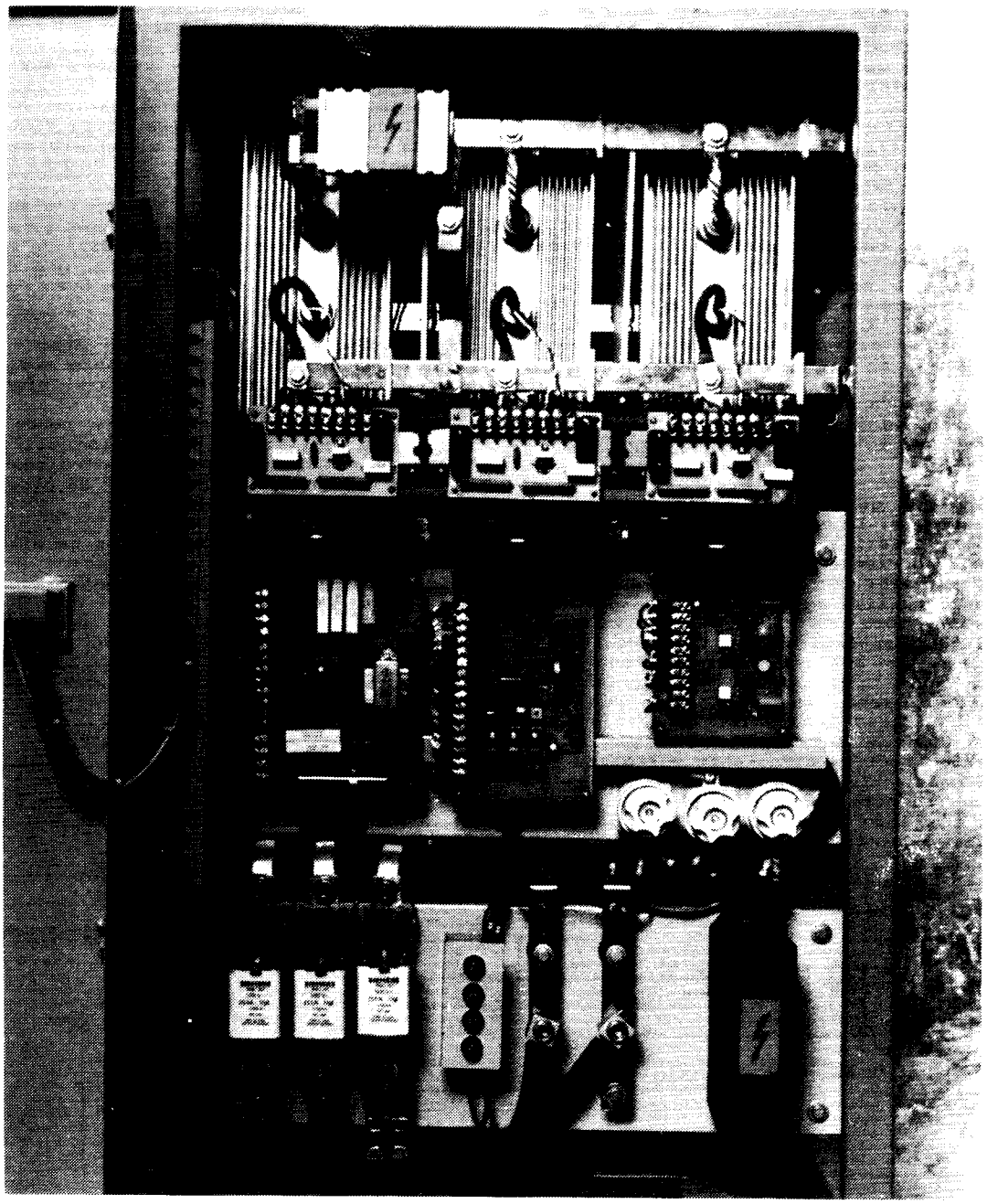

Foto No. 1

Las fotografías No. 1, 2 y 3 muestran detalles del montaje de la excitatriz estática, tanto de la parte del convertidor de potencia como las tarjetas con los circuitos electrónicos y los elementos de filtrado y protección.

El montaje del equipo responde a un esquema funcional y modular lo que permite un fácil acceso y ajuste de los elementos internos de control y calibración.

Exteriormente, la excitatriz estática posee un amperímetro y un voltímetro de corriente continua para la indicación de los parámetros de salida de la misma, un panel con indicadores luminosos que muestran el estado de operación de la excitatriz e indican la presencia de alguna condición de falla y un mínimo de elementos de control y maniobra, los cuales son:

1) Interruptor de encendido/apagado rotativo protegido para evitar su accionamiento accidental y,

2) Potenciómetro de ajuste del voltaje generado.

Internamente, se distingue en la parte frontal superior el montaje de los tiristores y diodos rectificadores que confor-

man el conversor AC-DC trifásico semicontrolado, los disipadores térmicos y tres ventiladores dispuestos en cada ramal para forzar el enfriamiento del sistema. Asociado a cada ramal diodo-tiristor, se encuentra una tarjeta que contiene las redes snuber y ecualizadoras de voltaje así como los circuitos de protección de compuerta de cada tiristor.

En la sección frontal inferior se encuentran montadas las tarjetas que conforman el circuito electrónico de control, los filtros de entrada del convertidor y los elementos de protección.

En la sección posterior del equipo se pueden apreciar de arriba hacia abajo, los siguientes elementos: tres transformadores de potencial utilizados para las fuentes de polarización de los circuitos electrónicos y para la medición del voltaje generado; tres transformadores de corriente montados sobre las barras de alimentación del conversor, los cuales se utilizan en la medición de la corriente de campo; tres inductancias intercaladas en las barras de alimentación del conversor y que forman parte del filtro de entrada y, en la parte inferior la inductancia que constituye el filtro de salida del convertidor.

Foto No. 2

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El equipo diseñado y construído para el control de la excitación del generador de la empresa La Internacional fue instalado en los primeros días de enero de 1990, sustituyendo la excitatriz rotativa controlada por el sistema Tirril antes existente en la planta. La excitatriz estática ha operado desde ese entonces cumpliendo satisfactoriamente los requerimientos y objetivos planteados, sus especificaciones técnicas y superando en todo sentido las características de operación de la planta.

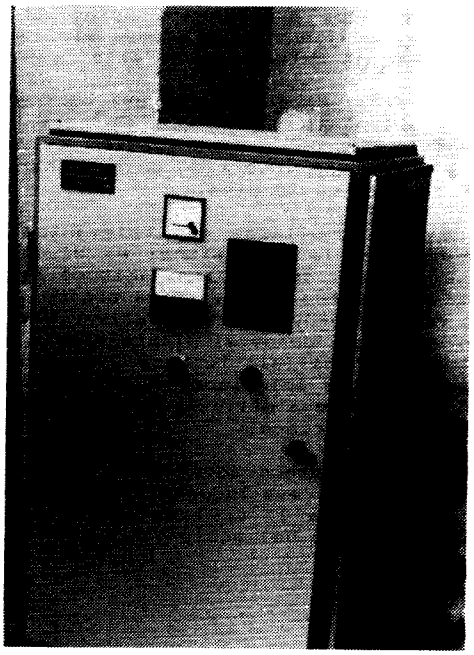

Foto No. 3

La robustez de los componentes utilizados, su acertado dimensionamiento y selección así como los ajustes adecuados de los reguladores de corriente y voltaje hacen de la excitatriz estática un equipo confiable que requiere poco o ningún mantenimiento.

Los circuitos de protección operan correctamente, limitando la corriente máxima del equipo al valor impuesto, incluso en la condición de cortocircuito en los terminales de salida. El dimensionamiento de disipadores térmicos y la ventilación evitan sobrecalentamiento de los componentes de potencia de la excitatriz.

La excitatriz estática, tanto en sus características constructivas como en su operación en estado estable y su comportamiento dinámico, ha sido diseñada para satisfacer las normas publicadas por la IEEE (Standard Practices and Requirements for General Purpose Thyristor DC Drives)[4].

Dada la magnitud del generador y lo crítico de la carga que éste maneja, resulta difícil y riesgoso realizar pruebas formales para evaluar cuantitativamente las características de respuesta transitoria del sistema, razón por la cual no se tienen datos exactos al repecto. Sin embargo, durante los periodos de ajuste y pruebas del equipo se pudo verificar que el comortamiento dinámico del sistema supera lo previsto y expuesto dentro de las especificaciones del equipo.

De igual manera, la tarea de intentar obtener un modelo matemático exacto de la planta resulta impracticable y poco ayudaría en el planteamiento de ajuste del sistema, en tanto que esta labor se la realiza atendiendo a las técnicas de calibración experimental desarrolladas para el efecto. Facilita esta labor el disponer de potenciómetros para el ajuste de los

diferentes parámetros de ganancia en un rango adecuado, previamente seleccionado en base al análisis de sistemas similares y experiencias anteriores en este campo.

El costo final de producción del equipo es considerablemente menor que el costo de equipos similares de fabricación extranjera y el tiempo invertido en su desarrollo total fue de 20 días.

Uno de los resultados más relevantes de esta experiencia profesional es el hecho de que a pesar de las limitaciones existentes en nuestro medio, se ha podido llevar a cabo un proyecto de relativa complejidad y riesgo, desde el planteamiento del problema, el análisis técnico y económico de las posibles soluciones y la implementación del sistema utilizando tecnología y mano de obra nacional.

Finalmente, deseamos agradecer el valioso aporte de la empresa Industria Electrotécnica Ecuatoriana la cual colaboró realizando el montaje del equipo.

REFERENCIAS

[1],[2],[3] Poveda, Mentor; Rivera, Pablo: "Estudio de los Sistemas de Excitación y reguladores de voltaje de las máquinas sincrónicas", Anales de las XIII Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Mayo de 1987.

[4] "IEEE Standard Practices and Requirements for Thyristor DC Drives", Noviembre de 1985.

ALVARADO POLO, DANILO. Nació en Cañar, el 1 de Enero de 1962. Obtuvo el título de Bachiller Técnico Electromecánico en el Colegio Técnico Salesiano de la ciudad de Cuencia en 1979. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniéndo el título de Ingeniero en Electrónica y Control en 1988.
Ejerció las cátedras de Electrónica Básica y Electrónica de Potencia en la Universidad de Cuenca desde 1986 hasta 1988. Prestó sus servicios profesionales a la empresa CATEM desde 1986 hasta 1988. Actualmente presta sus servicios en calidad Jefe del Departamento de Electrónica en la compañia INGEMELEC.

LEDESMA GALINDO, BOLIVAR. Nació en Quito, el 5 de Diciembre de 1962. Obtuvo su título de Bachiller en Humanidades Modernas en el Colegio San Gabriel en 1980. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Control en 1987.
En el Centro de Estudios Superiores Soggesta, en la ciudad de Urbino - Italia, realizó estudios sobre Fuentes no convencionales de Energía en 1989. Desde 1986 prestó sus servicios en la Escuela Politécnica Nacional en calidad de Ayudante de laboratorio y actualmente como Profesor Asistente dicta la cátedra de Electrónica de Potencia en la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Desde 1988 colabora con la empresa Microdigital en calidad de asesor del departamento de diseño.