

EXCITATRIZ ESTÁTICA EN BASE AL MICROCONTROLADOR INTEL 8751

Juan Carlos Rivera G., Ing.
Bolívar Ledesma G., Ing.
Escuela Politécnica Nacional

RESUMEN.

Se presenta la descripción y características de una excitatriz estática de 4.8 KW realizada en base al microcontrolador INTEL 8751, el diseño del convertidor estático utilizado, los circuitos de medición, y el software desarrollado para el control del convertidor con tiristores y para la regulación del voltaje generado.

ABSTRACT.

This paper reports the development of a 4.8 kW static excitation system for a synchronous generator. The system was developed around the microcontroller INTEL 8751. A general description of the measurement circuits and the design of the static thyristor converter are included. The software developed for the converter control and the voltage and current regulation are described.

INTRODUCCION

Generalmente, la fuente de voltaje de campo para la excitación de un generador sincrónico ha estado constituida por una máquina rotativa capaz de proporcionar los niveles de corriente necesarios tratándose, en algunos casos, de un generador de corriente continua operando como un amplificador de potencia rotativo o bien pudiendo ser un generador de corriente alterna provisto de un rectificador rotativo realizado 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 máximo del orden del 5% de la potencia requerida por el devanado rotórico del generador.

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.

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 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.

DESCRIPCION.

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

La potencia nominal de la excitatriz estática está en el orden de 4.8 KW que son suministrados por un puente trifásico semicontrolado. Filtros capacitivos en las líneas de entrada al convertidor sirven para compensar los reactivos absorbidos por el convertidor y atenuar los transitorios del sistema.

Los etapas esenciales que constituyen la excitatriz estática son:

- 1.- Convertidor AC-DC trifásico semicontrolado y elementos asociados (filtros, redes snubber, fusibles, etc.)
- 2.- Circuito de medición de la corriente de campo, con un transformador de corriente en una de las líneas de entrada al convertidor estático, amplificadores y filtros.
- 3.- Circuito de medición del voltaje terminal del generador.
- 4.- Circuito de medición de la corriente suministrada por el generador a la carga.
- 5.- Circuito de control maestro basado en el μ C INTEL 8751 cuyas funciones principales son:
 - Controlar el retardo en el activado de los SCR's y generar los pulsos requeridos para el activado de los tiristores del convertidor estático en sincronismo con la red trifásica de alimentación.
 - Realizar el algoritmo de control del tipo proporcional para la regulación de corriente de campo del generador lo que permite la limitación de la corriente máxima de excitación y mejora las características dinámicas de operación del sistema a lazo cerrado.
 - Realizar el algoritmo de control del tipo proporcional-integral-derivativo para el control del voltaje terminal que permite la regulación automática del voltaje generado.

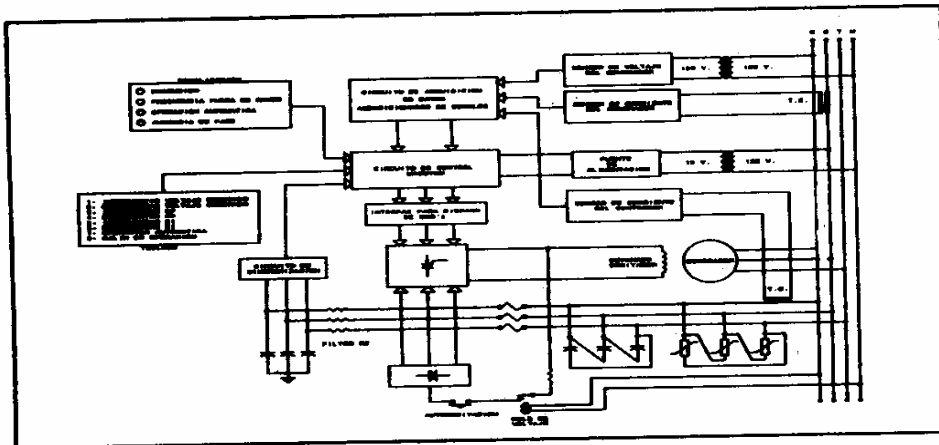


Figura N. 1

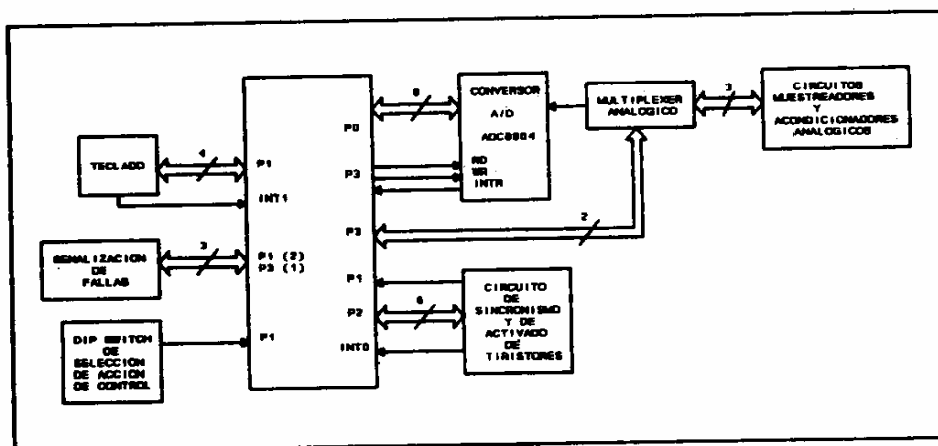


Figura N. 2

Protecciones con señalización para detectar: ausencia de fase, frecuencia fuera de rango, sobrevoltaje, sobrecorriente.

El esquema de control digital utilizado corresponde a dos lazos en cascada, el de realimentación interna que permite la regulación de la corriente de excitación, mientras que el lazo de realimentación externa está encargado de la regulación de la magnitud resultante de la suma vectorial entre el voltaje terminal y una muestra de la corriente del generador.

Las especificaciones técnicas de la excitatriz estática son:

- Voltaje nominal de salida: 0 - 240 Vdc
- Corriente nominal de salida: 20 Adc
- Corriente máxima de salida: 25 Adc
- Regulación de voltaje: $\pm 1\%$
- Tiempo de respuesta: < 5 ms
- Tiempo de estabilización: $2s < t < 3s$
- Voltaje de entrada: $220 \pm 20\%$
- Frecuencia: 60 Hz \pm Rango ajustable
- Temperatura de operación: 70 °C
- Dimensiones: 43 * 52 * 9 cm.
- Peso: 7 Kg.

OPERACION DE LA EXCITATRIZ

En forma simplificada se puede decir que una excitatriz estática mide el voltaje alterno del generador, lo compara con un voltaje de referencia, se obtiene una señal de error, y en función de ésta se suministra corriente directa al devanado de excitación del generador con el fin de mantener el voltaje del generador en un valor similar al de referencia.

Para efectuar esta operación el sistema estático de excitación está conformado 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. En paralelo a cada uno de los elementos semiconductores del puente, se tienen redes snubber de protección que disminuyen el dv/dt que se produce por la conmutación de la corriente de una rama a otra del puente. 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.

El circuito de sincronización por medio del cual se obtienen las señales de cruce por cero de los voltajes de alimentación del convertidor de tal forma de tener los pulsos para la determinación de la secuencia de fases, así como también obtener las señal de interrupción que corresponderá a la suma de las señales de sincronismo de cada fase; de esta manera el microcontrolador tendrá la señal de referencia para el inicio del conteo del ángulo de activado de cada uno de los tiristores.

CIRCUITOS DE MEDICION

Para la medición de corriente continua suministrada por el convertidor AC-DC (excitador) al campo del generador, se utiliza un transformador de corriente que se encuentra ubicado en una de las líneas de alimentación al convertidor; la señal así obtenida es transformada a una señal de voltaje, por medio de una carga resistiva ubicada en los terminales de salida del transformador de corriente. Esta señal es amplificada, rectificadora y filtrada de tal manera de obtener el valor medio de la señal muestreada, con factor de rizado bastante bajo, con un nivel de voltaje que varía entre 0 - 5 V, que es proporcional a la corriente de campo.

La medición del voltaje generado se lo realiza por medio de un transformador de potencial, conectado entre fase y neutro. Esta señal es rectificadora y filtrada de tal manera de obtener una muestra libre de las perturbaciones eléctricas propias de la operación del convertidor así como las que produce el generador. Luego se obtiene el valor medio de esta señal y es acondicionada de tal manera de tener una variación de 0 - 5 V cuando la señal de voltaje generado varía en el rango de 220 V ± 20%.

Las señales así obtenidas con sus niveles de voltaje apropiados, son enviados a un multiplexer analógico para posteriormente ser seleccionadas para ingresar a un convertidor análogo digital de 8 bits, el mismo que será controlado por medio del μC 8751.

CARACTERISTICAS DEL SOFTWARE

El sistema dispone de una etapa de inicialización en la cual se detecta la presencia de las tres fases así como la secuencia del voltaje generado. Si en esta rutina no se detecta falla se procede a la ejecución del programa; caso contrario permanece ejecutando esta rutina, hasta que la secuencia de fases sea detectada correctamente. Luego se procede a la inicialización de cada una de las constantes utilizadas en el programa, así como los valores máximos permitidos para voltaje y corriente. De igual manera se determinará el tipo de acción de control a ejecutarse que puede ser PI o PID, la cual es seleccionable de manera externa. El algoritmo de control P.I.D. desarrollado en el microcontrolador es el siguiente:

$$y(t) = K_p [e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}]$$

en el cual el valor de $e(t)$ es la señal de error que corresponde a la diferencia entre la señal del voltaje de referencia y el voltaje medido. El algoritmo de control desarrollado transformado a ecuaciones de diferencias tiene la siguiente expresión:

$$Y(K) = Y(K-1) + K_p [E(K) - E(K-1)] + \frac{K_p K_i T}{2} [E(K) + E(K-1)] + \frac{K_p K_d}{T} [E(K) - 2E(K-1) + E(K-2)]$$

La secuencia de ejecución del algoritmo de control corresponde a la siguiente explicación: Se procede en primer lugar a medir el voltaje generado por la máquina sincrónica, encontrando el valor del error al ser restada con el valor del set point de voltaje. Una vez encontrado este valor se procede a la ejecución del algoritmo de control que puede ser PI o PID. El resultado de esta acción se toma como una nueva referencia, la cual se resta con una muestra de la corriente de excitación obteniéndose un nuevo valor de error, el cual es utilizado para ejecutar una acción del tipo proporcional. El resultado de esta acción es tomado como el valor del ángulo de disparo de los tiristores del convertidor AC-DC (como se muestra en el diagrama de bloques).

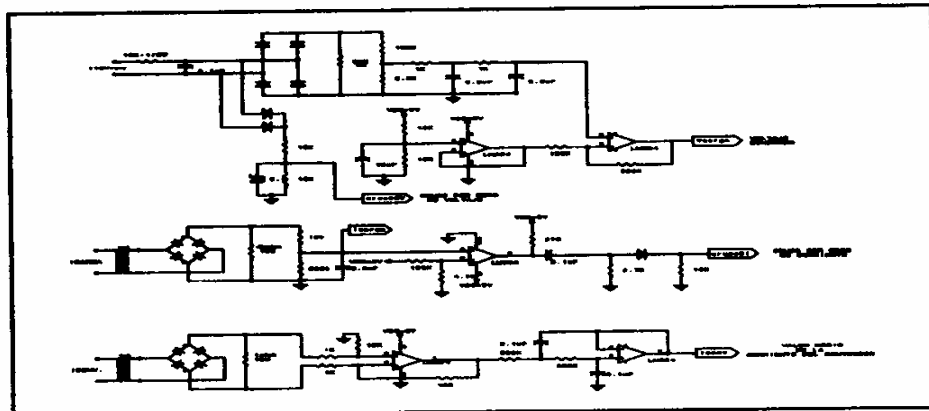
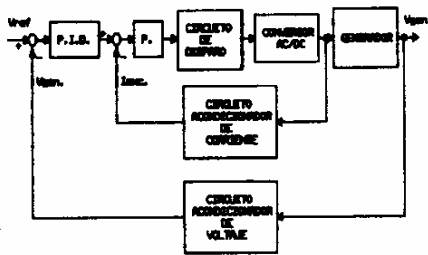


Figura N. 3



Para una correcta medición del voltaje se toman 32 lecturas de tal manera de obtener una información más precisa del voltaje generado, los cuales posteriormente son promediados. El valor así encontrado tendrá una extensión máxima de un byte, de igual forma el valor de voltaje de referencia tendrá la misma extensión. Cada una de las acciones de control se las ejecuta en forma independiente, es decir separándolas en proporcional, integral y derivativa; lo que permite con mucha facilidad escoger entre el controlador PI o PID, y además se consigue realizar las operaciones matemáticas de una forma más simplificada. Las constantes de las diferentes acciones toman valores, los cuales varían en el siguiente rango:

$$0 < K_p < 1677.7215$$

$$0 < K_i < 655.35$$

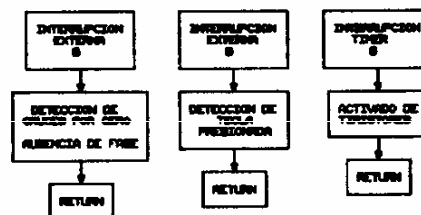
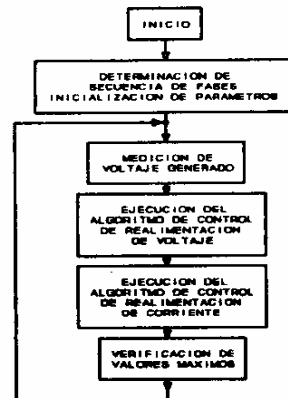
$$0 < K_d < 655.35$$

en vista de que las constantes de las acciones de control pueden tomar valores decimales, los algoritmos se los ejecuta en aritmética extendida, por lo que los resultados de las operaciones se obtienen en una extensión máxima de cinco (5) bytes. La ejecución de las rutinas es preferible realizarlas con el método propuesto y no con aritmética de punto flotante debido a que las operaciones con este sistema tienen un tiempo de ejecución mucho más grande que el utilizado.

El resultado del algoritmo de control ejecutado, es convertido a información de ángulo de activado de los tiristores por medio de tablas de traducción que además linealizan la característica cosenoidal del convertidor AC-DC, en las cuales se puede tener un control del ángulo desde 0° hasta 180° eléctricos.

Además el programa tiene protecciones de sobrevoltaje del generador, sobrecorriente de excitación, las cuales son verificadas cuando se realizan las mediciones de cada una de las variables. Para la medición de estas variables se toman un cierto número de muestras, de tal manera que las magnitudes medidas no correspondan a valores instantáneos, lo que podría provocar una salida de operación del sistema innecesaria. De igual manera el microcontrolador realiza la medición de la frecuencia del generador, la cual también es monitoreada constantemente con fines de protección.

La ejecución total del programa se la realiza en un tiempo menor que 5.555 ms cuando se trabaja a una frecuencia de 60 Hz., es decir que se lo ejecuta entre los tiempos de dos interrupciones del circuito de sincronismo consecutivas. El usuario dispone de un teclado por medio del cual se pueden variar: el valor del set point del voltaje generado, la constantes de las acciones de control, así como resetar el sistema.



RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las pruebas del equipo se realizaron sobre un generador del laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional, que tiene los siguientes datos de placa:

Potencia nominal: 3.5 KVA
 Voltaje terminal: 230 V
 Número de fases: 3
 Corriente de línea: 8.7 A en delta
 Factor de potencia: 0.8
 Voltaje de excitación: 110 Vdc
 Corriente de excitación: 1.2 A

obteniéndose una respuesta satisfactoria de los circuitos de control así como de los algoritmos de control desarrollados en el microcontrolador.

De las pruebas que se efectuaron para la verificación de las protecciones de sobrevoltaje, sobrecorriente y frecuencia fuera de rango se desprende que tienen un comportamiento adecuado.

El tiempo máximo de respuesta del sistema ante un paso de carga nominal del generador, es de 3s; esto se debe entre otras razones a las múltiples tareas que debe realizar el microcontrolador entre las cuales se tiene: muestreo del voltaje generado, corriente de excitación, detección de frecuencia, sobrevoltaje, sobrecorriente,, generación de retardo del ángulo de activado, disparo de los tiristores y de la ejecución de las acciones de control. Además la utilización de los filtros que atenúan las perturbaciones de las señales muestreadas, generan retardos de tiempo que no se los puede evitar y son los que a su vez provocan que el sistema en general actúe lentamente. Pero es necesario indicar que el comportamiento dinámico del equipo es aceptable si se consideran las características del generador con el que se hicieron pruebas.

De lo anteriormente indicado se puede decir que el microcontrolador INTEL 8051 ofrece grandes facilidades para la ejecución de multitareas para la consecución de un objetivo, como las que se desarrollaron en este trabajo.

De la experiencia del trabajo realizado es conveniente indicar que la medición del voltaje generado se lo debe realizar por medio de un conversor trifásico no controlado, porque de esta manera el filtro asociado tiene un tiempo de retardo bastante bajo lo cual es muy conveniente, ya que el sistema será más rápido.

Todas las operaciones se realizaron en aritmética extendida por ser la que mejor resultado dió en cuanto a tiempo de ejecución, dado que en operaciones como multiplicación y división realizadas en aritmética de punto flotante o mediante rotaciones, tiene un tiempo de ejecución mucho mayor que el método utilizado, lo que provocaría que el sistema se vuelva más lento, que no es conveniente en un sistema que opera a lazo cerrado.

Es necesario indicar que se está trabajando sobre la parte complementaria de la operación en paralelo del generador con la red, de tal manera de realizar la compensación de los reactivos generados.

BIBLIOGRAFIA

BOSE K., "Microprocessor-Based Design of a Firing Circuit for the Three Phase Full Wave Thyristor Dual Converter", IEEE press, USA, 1982.

LEDESMA B., ALVARADO D., "Diseño y construcción de una excitatriz estática para un generador de 5 MVA", E.P.N., Ecuador, 1990.

IEEE, "Standard Practices and Requirements for General Purpose Thyristor DC Drives", IEEE press, USA.



RIVERA, JUAN. Nació en Latacunga, el 11 de marzo de 1965. Obtuvo su título de Bachiller en Humanidades Modernas en el Colegio Vicente León de Latacunga. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Control en 1992.

LEDESMA, BOLIVAR. Nació en Quito, el 5 de diciembre de 1962. Obtuvo su título de Bachiller en Humanidades Modernas en el Colegio San Gabriel de Quito. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Control en 1987. Actualmente presta sus servicios en calidad de Profesor Agregado II en el Área de Control Electrónico de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.