

Regulación de frecuencia en microcentrales hidroeléctricas mediante compensación electrónica de la carga

Hernando Vásquez, Carlos Pinedo, Jairo Palacios, José M. Ramírez
Universidad del Valle - Departamento de Electricidad

Resumen

Se presentan en este trabajo los resultados obtenidos en el diseño y la puesta en funcionamiento de un regulador electrónico de frecuencia para microcentrales hidroeléctricas hasta de 60 KW.

El regulador de frecuencia funciona mediante el principio de compensación de carga: el generador alimenta la carga de los usuarios y un juego de resistencias compensatorias, cuya función es equilibrar la potencia suministrada por el generador en todo momento. El caudal de la turbina se ajusta para que el generador entregue potencia nominal permanentemente; el regulador electrónico se encarga de conectar las resistencias adecuadas, para que continuamente se logre el balance entre la potencia mecánica y eléctrica del generador, garantizando de esta forma la estabilidad de la frecuencia.

Las resistencias se diseñan con un peso binario (1,2,4,8, etc.) y se conectan al generador por medio de triacs, que son disparados en cruce por cero; por consiguiente este tipo de compensación produce una distorsión armónica despreciable. La variación de frecuencia máxima, entre vacío y plena carga; fue de 2.5%; el tiempo de estabilización es menor que 1 seg. El sistema responde también a variaciones del caudal de entrada a la turbina en forma muy satisfactoria.

Dos unidades de este regulador han sido instaladas en microcentrales de 8 y 14 KW, en la vereda La Puerta, Municipio de Dagua, Valle del Cauca.

1. Introducción

En cualquier central hidroeléctrica debe cumplirse que el valor eficaz y la frecuencia del voltaje generado deben ser constantes,

en aras de garantizar unas condiciones aceptables en el suministro de energía eléctrica a los usuarios finales. Para lograr este fin es necesario dotar a la central de reguladores de voltaje y frecuencia, que se encarguen automáticamente de acondicionar el voltaje de campo del generador y el caudal de entrada a la turbina, dependiendo de la carga que deba suministrar la central. En forma general, se debe cumplir que la potencia hidráulica de entrada a la turbina debe ser igual a la potencia eléctrica suministrada por el generador, más las pérdidas del proceso de conversión de energía. Se distinguen por tanto, tres estados posibles de operación del conjunto turbina-generador:

1. $P_{ent} = P_{sal} + P_{per}$: Operación estable del sistema
2. $P_{ent} > P_{sal} + P_{per}$: El sistema se acelera
3. $P_{ent} < P_{sal} + P_{per}$: El sistema se frena

Para garantizar la generación de una tensión con frecuencia constante, se debe satisfacer la primera ecuación. Esto puede ser alcanzado por dos métodos:

- Control del caudal de entrada a la turbina, lo que significa que se varía la potencia de entrada, de acuerdo con los requerimientos de la carga.

- Control de la carga del generador, donde se mantiene constante la potencia de salida, igual a la potencia nominal de entrada; en este caso, cualquier variación de la carga es absorbida por un juego de resistencias compensatorias.

Los reguladores de frecuencia de grandes plantas hidroeléctricas son del primer tipo; por lo general son de construcción electromecánica, donde la manipulación de las señales de medida y control se realiza eléctricamente, pero el actuador es hidráulico o neumático. Este sistema es costoso y la implementación del mismo significa que la turbina y el regulador son de un diseño elaborado, difícil de construir en talleres poco especializados.

Por estas razones se prefiere utilizar en microcentrales hidroeléctricas reguladores de frecuencia del segundo tipo. Si



Comercializadora el mundo Ltda.

IMPORTADOR DE
MATERIALES
ELECTRICOS,
INDUSTRIALES E
ILUMINACIONES

Avda. 2CN No. 24N-43
Tels: 675957 - 675958
Telefax: (923) 675955
Cali - Colombia

bien es cierto que la construcción de los mismos se realiza con elementos de tecnología altamente especializada, también lo es que su mantenimiento es mínimo, ya que no contiene partes móviles ni vibratorias.

En este artículo se describe un regulador de frecuencia por el método de compensación de la carga, que fue diseñado en su totalidad en la Universidad del Valle. En primer lugar se presenta la descripción general y se ilustra el funcionamiento del regulador, con énfasis en la conmutación de las resistencias compensatorias; enseguida se realiza una modelización del sistema y se ajusta el compensador del mismo, siguiendo técnicas clásicas de control; por último se analiza el comportamiento del sistema en el sitio de operación y se discuten las conclusiones del trabajo.

2. Descripción del Regulador

En la Figura No. 1 se muestra el diagrama (eléctrico) esquemático de la microcentral con el regulador de frecuencia construido. Este consiste en:

- Un conjunto turbina - generador, que es alimentado con caudal constante, para suministrar en todo instante la potencia eléctrica nominal del generador.

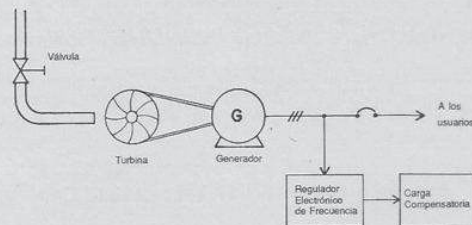


FIGURA No. 1. Diagrama esquemático de la microcentral con regulación.

- Una tarjeta de control, que se encarga de evaluar en forma permanente las variaciones de la frecuencia, produciendo la señal de control digital, que activa las tarjetas de mando de los interruptores electrónicos.

- Un juego de tarjetas de mando de los interruptores electrónicos, que tienen como misión producir las señales de disparo para los triacs, una vez hayan recibido la señal de activación por parte del sistema de compensación.

- Un juego de resistencias compensadoras, cuya característica principal es el peso binario con que se diseñan, para responder a una señal digital de control.

- Un tablero de mando, protección y medición, donde se monitorean las corrientes de carga, los voltajes de línea y la frecuencia y se conecta la carga, por medio de un interruptor termomagnético, que protege el generador ante fallas en las líneas de distribución a los usuarios.

2.1. Conjunto Turbina - Generador. La turbina es del tipo Michell Banki, de diseño normalizado; el generador es autoex-

citado y autorregulado, por medio de un transformador con núcleo saturable y con una compensación directa de carga. El conjunto fue diseñado para entregar una potencia eléctrica de 14 y 8 KW respectivamente; el voltaje generado es trifásico, 208/127 V, 60 Hz.

2.2. Tarjeta de Control. Esta tarjeta realiza las siguientes funciones:

- Medición de la frecuencia del voltaje generado: para tal fin se sensan los cruces por cero de la tensión, se adecúa esta señal y se lleva luego a un conversor frecuencia - voltaje, cuya señal de salida se filtra utilizando un paso bajo de primer orden (ver Figura No. 2). Debido a la característica de transferencia lineal del conversor utilizado, se logra que la señal de medida sea un voltaje continuo proporcional a la frecuencia.

- Creación de la señal de referencia y comparación de la misma con la señal de medida: la señal de referencia define el punto de operación del sistema, por lo que existe un potenciómetro para ajustarla externamente; en un sumador electrónico, se efectúa la resta algebraica de las señales de referencia y medida, obteniéndose la señal error del sistema.

- Compensación dinámica del sistema: este bloque se encarga de generar la señal de control adecuada, según sea el signo y el tamaño de la señal error. De acuerdo con lo descrito en el numeral 4, el compensador más apropiado para este caso es del tipo proporcional, de alta ganancia.

- Conversión analógica a digital: la señal de control, que es un voltaje continuo, se convierte en una señal digital de ocho bits; de estos se utilizan únicamente los cuatro bits más significativos para generar el código digital, que define la combinación óptima de resistencias compensadoras que deben conectarse al generador. La señal de control digital es visualizada en todo momento por medio de cuatro diodos emisores de luz (LED's).

Fuera de las funciones arriba descritas, en la tarjeta de control se encuentran ubicadas las fuentes de polarización de los circuitos electrónicos (+5V, +12V y -12V) y un oscilador de onda cuadrada ajustado a 60 Hz, que se utiliza para calibrar el sistema en red abierta.

2.3 Tarjetas de Comando de los Interruptores electrónicos.

En la Figura No. 3 se ilustra el principio de funcionamiento de los interruptores electrónicos (triacs); se observa que con cada uno de los bits del código digital equivalente a la señal de control, se activa una tarjeta de comando de los triacs. Una vez activada, la tarjeta se encarga de disparar los tres triacs en el cruce por cero de cada una de las tensiones de fase, lográndose así la conexión de una carga trifásica balanceada al generador.

2.4 Resistencias compensadoras. Una de las características más importantes del regulador de frecuencia es el diseño adecuado de las resistencias compensadoras. El sistema más sencillo de regulación de frecuencia por compensación de carga consiste en un juego de resistencias (una por fase), cuya potencia nominal es equivalente a la del generador, y un juego de interruptores electrónicos, accionados por control de fase (variación del ángulo de disparo); en este sistema el desvío de potencia hacia las resistencias puede realizarse en forma continua sobre todo el rango de potencia, y el tiempo de respuesta es muy rápido. Sin embargo, el control de fase produce grandes armónicos de corriente en el generador y por consiguiente una

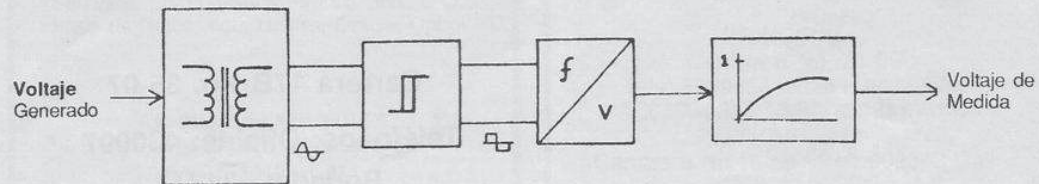


FIGURA No. 2. Medición de la frecuencia.

gran distorsión armónica, en especial cuando los usuarios están consumiendo menos del 50% de la potencia generada (1). Es por esta razón que se prefiere conmutar varios grupos de resistencias en paso por cero de voltaje: la distorsión armónica que se produce es despreciable, y se conserva un tiempo de respuesta muy rápido, pero el desvío de potencia hacia las resistencias se realiza ahora en forma discreta; además se incrementan los costos de las resistencias y de la electrónica en general, a medida que se aumentan los grupos de resistencias.

Sin embargo, este método tiene la gran ventaja de permitir la selección de las resistencias de acuerdo con el "peso" de cada bit en el código binario. Por ejemplo, si se decide trabajar con cuatro grupos de resistencias, el "peso" de ellas será 1:2:4:8, lo que significa que la variación de la carga compensatoria se hará en pasos de 1/15 p.u. Si se toma el caso de la planta de 14 KW, el paso de potencia trifásica es de 933.33 W; esto significa que, para que el sistema de compensación cambie de un estado estable a otro, se requiere que la carga de los usuarios varíe por encima o por debajo del paso de potencia. Para este caso particular los valores de las resistencias son 52, 26, 13.5 y 6.75 ohmios respectivamente; para un funcionamiento correcto del sistema debe considerarse una precisión en las resistencias de un 2 al 3% máximo.

De acuerdo con el análisis anterior, la señal de control digital puede ser adquirida desde un circuito integrado con salida binaria convencional, lo que facilita mucho la construcción del circuito de control.

Para disipar la potencia en las resistencias compensadoras se sumergen estas en un tanque lleno de agua, que se alimenta con el agua que viene de la turbina.

3. Funcionamiento del regulador

Con el fin de que el sistema decida cuál es la combinación de

resistencias más adecuada en todo momento, es posible sensar, además de la frecuencia, la corriente, el voltaje y la potencia del generador y la velocidad de rotación del eje; la decisión puede hacerse dependiente de uno o más de los parámetros mencionados; la velocidad angular no es una variable muy confiable, porque en condiciones transitorias es posible que ésta difiera de la frecuencia del voltaje generado. La corriente y la potencia del generador pueden captarse siempre y cuando el juego de resistencias compensadoras esté situado en cercanías del generador, lo cual no siempre es el caso. El sensado de la tensión generada puede producir errores, debido a la acción del regulador de voltaje, a las caídas de tensión en las líneas y al factor de potencia de la carga. Por tanto, se deduce que la variable más apropiada como señal de medida es la frecuencia del voltaje generado (1), la cual se puede sensar en forma indirecta, a través de un detector de los cruces por cero del voltaje.

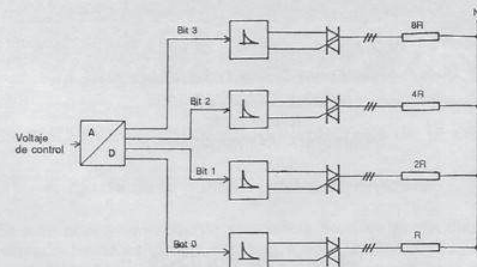


FIGURA No. 3. Conversión analógico-digital y comando de los triacs de conexión.

SISTEMAS ALTERNOS DE COLOMBIA LTDA.

DISTRIBUIDOR AUTORIZADO

UNISYS

- Software:
Producción comercial (nómina, inventario, cartera, contabilidad, etc.), construcción.
- Venta, Mantenimiento y Reparación de Computadores
- Software, Entrenamiento, Xenix, Unix, D.O.S.
- Base de Datos, 4gI, Unisys, Oracle, Cobol - C.

Av. 2E Norte No. 24N-25
TELEFONO: 615614
FAX 671012 - CALI

ALMACEN
**CIRCUITO
ELECTRICO**
DEL VALLE

SOMOS IMPORTADORES

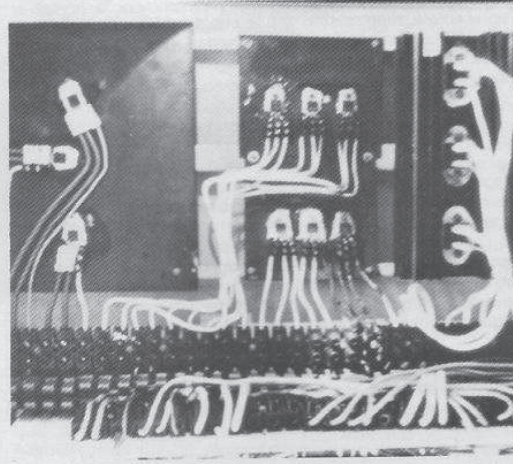
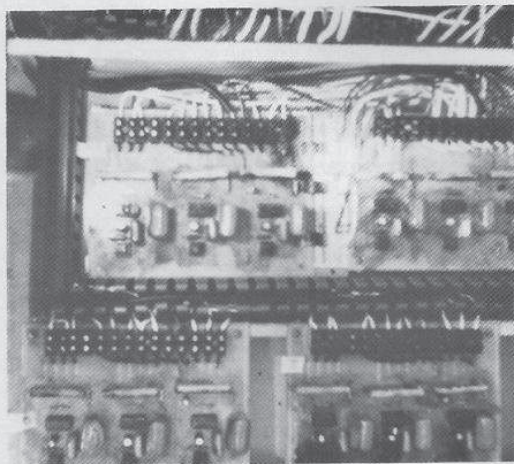
- *Materiales eléctricos
- *Alta y baja tensión
- *Industriales y residenciales

PRINCIPAL:

Carrera 6 No. 21-09
Tels: 893965 - 832841 - 832835
Telefax: (923) 832841

SUCURSAL:

Carrera 6 No.16-55 - Tel: 802342 Cali



Regulación de frecuencia en microcentrales hidroeléctricas mediante compensación electrónica de la carga.

Con base en este razonamiento se decidió sensar la frecuencia en el regulador que se construyó. Las variaciones de esta señal son captadas por el conversor frecuencia-voltaje; su señal de salida se compara con la señal de referencia y el resultado se conecta con el compensador, cuya señal de salida es llevada a la entrada analógica del conversor análogo-digit: este produce el código binario para activar las tarjetas de comando de los triacs, lográndose de esta forma la conexión de las resistencias apropiadas en todo momento.

Como el proceso de corrección es electrónico, su velocidad de respuesta para variar las resistencias compensadoras entre 0 y 1 p.u. es de menos de un ciclo; sin embargo, el sistema a controlar tiene una constante de tiempo alta y perturbaciones por las variaciones de las cargas de los usuarios; esto genera respuestas lentas y con error permanente. Por lo anterior, se requiere incorporar al sistema la tarjeta compensadora, que se encarga de suministrar la ganancia apropiada al sistema, de tal forma que se aumente la velocidad de respuesta, y al mismo tiempo se logre un error permanente pequeño. El ajuste del compensador se hace en el siguiente numeral.

La operación del regulador de frecuencia puede describirse con base en el regulador de la planta de 14KW. En la Figura No. 4 se presenta una foto de este regulador, durante la fase de pruebas finales de laboratorio. Se diferencian en la parte superior los cuatro grupos de triacs, montados sobre sus respectivos disipadores, así como el transformador de alimentación de la fuente dual de polarización. En el nivel del medio están montadas dos tarjetas de comando de los triacs y dos transformadores, para la fuente de polarización de + 5 V y la captación de la señal de frecuencia. En la parte inferior se observan las otras dos tarjetas de comando de los triacs y la tarjeta de control.

Para analizar el funcionamiento del sistema se supone que se parte de un estado de equilibrio, en el cual el regulador está alimentando una combinación determinada de las resistencias compensadoras. De repente, parte de la carga de los usuarios es apagada; inmediatamente se produce una aceleración del conjunto turbina-generador, o sea que se aumenta la frecuencia; esto significa que la señal error se hace ahora más grande, por lo que el compensador produce una señal de control mayor que la que entregaba antes de la perturbación; de esta manera, el conversor análogo digital produce un código binario, que activa otra combinación de resistencias, que disiparán mayor potencia, que hasta el momento, con lo que se logra un nuevo punto de estado estable.

4. Ajuste de la ganancia del compensador

En este punto se presenta el análisis para el ajuste del compensador; esto se realiza con una modelización de bajo orden lineal del sistema a partir de la cual se puede conocer el efecto de la perturbación de carga.

4.1 Modelización. La Figura 5 muestra el diagrama de bloques general del sistema de regulación de frecuencia.

El sistema de generación se modela mediante las ecuaciones torque-velocidad aplicadas sobre el eje de la turbina y generador; así, con la segunda ley de Newton para sistemas mecánicos rotacionales:

$$E \text{ Torques} = J k_f \frac{df}{dt}$$

$$T_t - T_{cc} - T_{cu} - T_f = J k_f \frac{df}{dt} \quad (1)$$

Donde:

J : Momento de inercia equivalente turbina-generador

Kf : Constante de proporcionalidad frecuencia-velocidad

T_t, T_{cc}, T_{cu} y T_f son los torques de la turbina, del sistema de control de cargas, de la carga de los usuarios y el torque de fricción, respectivamente.

El torque de fricción es proporcional a la velocidad; la constante de proporcionalidad es el coeficiente de fricción viscosa equivalente turbina-generador, kb:

$$T_f = k_b k_f f \quad (2)$$

En la medida de frecuencia, (Ver Figura 2) el único circuito de interés dinámico es el filtro; la constante de tiempo de éste es de 47 m/seg, la cual es despreciable comparada con la del sistema de generación. Por tanto, la medida se modela simplemente con el factor de proporcionalidad km entre el voltaje de medida Vm y la frecuencia:

$$V_m = k_m f \quad (3)$$

El sistema de control de cargas se modela mediante un tiempo muerto que representa el retardo entre un cambio de voltaje de control Vc y la ejecución de la orden de variación de la carga en el siguiente cruce por cero; este tiempo muerto es despreciable debido a que puede variar entre 2/3 y un período de la red (11 a 16 ms); así, este componente del sistema se

representará simplemente por la curva estática de voltaje de control versus torque de control de cargas, esta curva se muestra en la Figura 6. Para un modelo lineal, se aproxima la curva por una línea recta, así:

$$T_{cc} = T_{ccmax} - k_c V_c \quad (4)$$

T_{ccmax} es el torque de frenado producido al conectarse todas las resistencias de compensación y k_c es la constante de proporcionalidad entre V_c y T_{cc} .

El controlador se escogió del tipo proporcional con ganancia k_p ; se analizó la posibilidad de adicionarle una acción integral, pero por el bajo coeficiente de fricción del sistema de generación, el amortiguamiento era pequeño, obteniéndose un sistema de regulación muy oscilatorio.

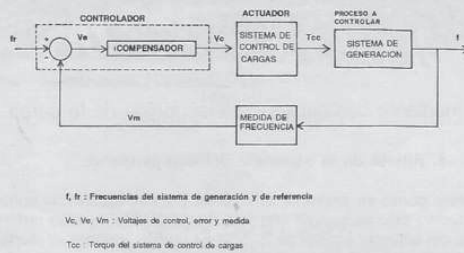


Figura No. 5. Diagrama de bloques del sistema de Regulación de Frecuencia.

Las anteriores ecuaciones se normalizan, respetando las siguientes relaciones entre bases:

$$T_{base} = f_{base} k_b / k_f = k_c V_{cbase}$$

$$V_{mbase} = k_m f_{base}$$

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones normalizadas, se obtiene el siguiente juego de ecuaciones:

$$T_{tpu}(S) - T_{ccpu}(S) - T_{cupu}(S) = t_m S F_{pu}(S) + F_{pu}(S) \quad (5)$$

$t_m = J/k_b$: constante de tiempo mecánica.

Medida:

$$V_{mpu}(S) = F_{pu}(S) \quad (6)$$

Sistema de control de cargas:

$$T_{ccpu}(S) = T_{ccmaxpu} - V_{ccpu}(S) \quad (7)$$

Con estas tres últimas ecuaciones y la del controlador, se obtiene el diagrama de bloques normalizado y lineal de la Figura 7. En el diagrama se observa cómo el torque de frenado del sistema de control de cargas es la variable manipulada del proceso a controlar, mientras que los torques de la turbina y de las cargas de los usuarios son las perturbaciones del sistema de regulación de frecuencia.

4.2 Ajuste del controlador. El criterio de ajuste es el de garantizar un error permanente menor del 2% (0.02PU), ante variaciones de velocidad debidas a variaciones de la carga de los usuarios.

Durante el arranque el sistema se lleva a la frecuencia nominal sin conectar los usuarios, con el torque de la turbina máximo y por el diseño del mismo, con el T_{ccmax} ; en esta condición el diagrama del sistema de regulación se reduce al mostrado en la Figura 8.

El error permanente es debido a la conexión de la carga máxima de los usuarios $T_{cupu}(S) = T_{cumaxpu}/S$, será:

$$ess = \lim_{S \rightarrow 0} S \cdot T_{cumaxpu}/S \cdot 1/(t_m S + 1 + k_p)$$

$$ess = T_{cumaxpu}/(1 + k_p) \quad (8)$$

Despejando K_p de (8) se obtiene:

$$k_p = T_{cumaxpu}/ess - 1 \quad (9)$$

Para el sistema $T_{cumaxpu} = 2$; luego:

$$k_p = (2/0.02) - 1 + 99$$

La constante de tiempo del sistema de regulación de frecuencia es:

$$t = t_m(1 + k_p) = t_m/100$$

Así, el sistema de regulación de frecuencia responde mucho más rápido que el sistema de generación; en la práctica, las no-linealidades como la saturación de los circuitos electrónicos disminuyen esta velocidad de respuesta.

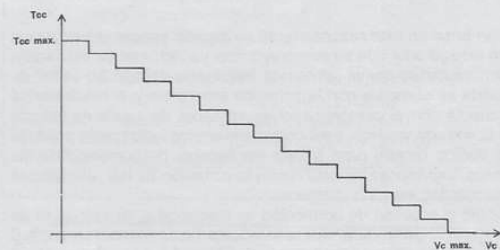


Figura No. 6. Curva estática del sistema de control de cargas.

5. Comportamiento del Sistema

El regulador de frecuencia presentado en este artículo tuvo un muy buen desempeño en el campo; una vez se realizaron los ajustes en el sitio, se logró obtener una ganancia proporcional del compensador del orden de 50. Con este valor se observó un error de estado estable de 2.5%; la velocidad de respuesta no fue medida exactamente, pero se estimó en un valor menor que 1 seg.

Otro aspecto positivo fue el comprobar que el regulador responde acertadamente ante desbalances fuertes de la carga; esta característica lo hace apropiado para ser utilizado en plantas para alimentar usuarios rurales, donde las cargas son por lo regular de alumbrado y la distribución es monofásica.

Ante variaciones lentas de la carga se observó que el error de estado estacionario aumentaba hasta los límites citados; esto se debe a la banda muerta de respuesta que posee el regulador,

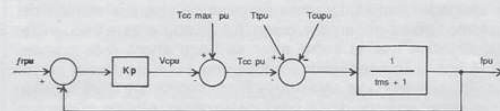


Figura No. 7. Diagrama de bloques normalizado del sistema de regulación de frecuencia.

el cual puede reaccionar sólo cuando se supere el valor del paso de potencia. Por el contrario, ante variaciones bruscas de la carga, la respuesta del regulador fue muy buena.

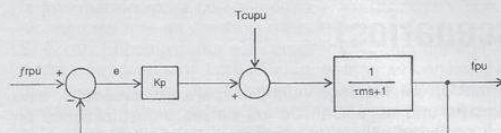


Figura No. 8. Diagrama de bloques simplificado del sistema de regulación de frecuencia.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un regulador de frecuencia por compensación electrónica de la carga, apto para ser utilizado en microcentrales hidroeléctricas hasta de 60 kv.

Los resultados obtenidos en el funcionamiento del regulador fueron satisfactorios; las variaciones observadas de la frecuencia son aceptables para plantas en funcionamiento independiente; gracias a la interacción entre los reguladores de voltaje y de frecuencia se logró mantener el voltaje generado con variaciones máximas transitorias de 3 V.

Otro aspecto que es necesario resaltar es la mínima distorsión armónica que produce el regulador. El voltaje que llega a los usuarios es de gran calidad y se evitan los armónicos de corriente en el generador, que ocasionarían calentamientos en los devanados del mismo.

El sistema de regulación de frecuencia tuvo un comportamiento más lento y con mayor error permanente, que los estimados en el numeral 4. La disminución de velocidad está asociada a la saturación del controlador durante una variación grande de

la carga; el incremento del error permanente se debe a la característica no lineal del sistema de control de cargas, a la menor ganancia proporcional con que se ajustó el compensador y a errores adicionales de medición durante las pruebas.

Es posible mejorar el comportamiento del regulador de varias maneras: a) Aumentando la ganancia del compensador, lo cual aumenta la velocidad de respuesta y reduce el error permanente. b) Aumentando el número de grupos de resistencias, lo cual disminuye el paso de potencia, o sea la banda muerta del regulador, obteniéndose un menor error de estado estable. Esta solución encarece el equipo.

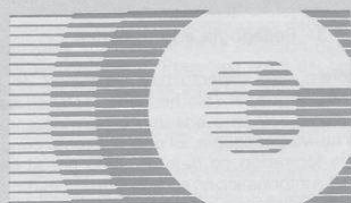
Una desventaja aparente del sistema planteado es el desperdicio de la energía generada, que no es consumida por los usuarios. Para utilizar esta energía sobrante se han propuesto varias alternativas, como alimentación de un trapiche accionado por un motor eléctrico, construcción de silos secadores aprovechando el calor disipado en las resistencias, etc.

7. Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos a la Corporación de Desarrollo Rural del Valle del Cauca, entidad que desarrolló la construcción de las microcentrales hidroeléctricas y al Ing. Axel Slogsnat, quien dirigió el proyecto.

8. Referencias

- (1) J. L. Noodward y J. T. Boys, "Electronic Load Governor for Small Hydro Plants", Water Power and Dam Construcción, pp. 37-39, July 1980.
- (2) U. Meier, A. Pittet y B. Oetli, "Electronic Load Control for Micro Hydropower Plants", Working Paper, SKAT, October 1986.
- (3) J. Yellin, "Sistemas Trifásicos de Potencia Controlados por Triac", Mundo Electrónico, pp 81-87, junio 1984.
- (4) W. Leonhard, Introduction to Control Engineering and Linear Control Systems, Berlin, Springer Verlag, 1980.



COMPUTE C S.A.

CALI - BOGOTA - MEDELLIN
B/QUILLA

- Procesamiento electrónico de datos
- Sistemas financieros en línea
- Comunicación de datos entre las principales ciudades del país
- Sistema integrado de producción de microfichas
- Sistema de información comercial en línea
- Servicio en las principales ciudades del país
- Conmutación de transacciones y mensajes entre computadores y terminales electrónicos

SWITCH

Calle 10 No. 4-47 P. 14 Ed. Banco del Comercio Apdo. 512

895347 - 835386 - 823155