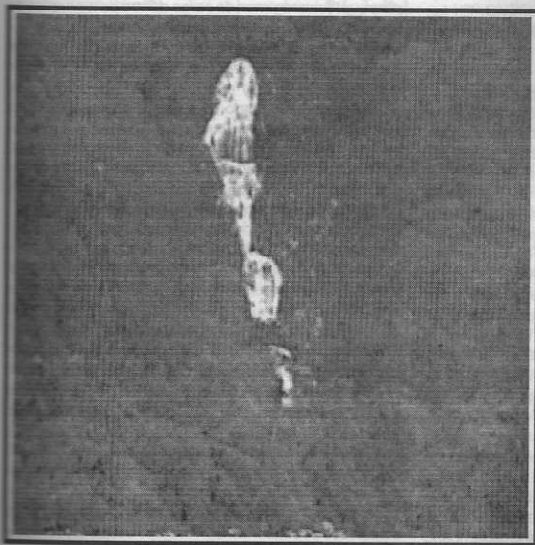


Control robusto de la frecuencia de una pequeña unidad hidroeléctrica en operación aislada



RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño de un controlador robusto, en un amplio rango de operación, de la frecuencia de una unidad hidrogeneradora de pequeña potencia en conexión aislada.

El diseño se basa en la aplicación de la estrategia de control de modo conmutado de leyes heterogéneas, implantado mediante un esquema con selector borroso a nivel supervisorio.

Como parte del diseño se establecen las condiciones para garantizar la estabilidad interna robusta ante las variaciones de los parámetros de la planta debido a cambios del punto de operación de la unidad.

PALABRAS CLAVES

Control Borroso, Control de Modo Conmutado, Control Robusto, Regulación de Pequeñas Unidades de Generación Hidroeléctrica.

ABSTRACT

This paper presents the design of a robust controller, in a wide operation range, of the frequency of a small hydroelectric power generating unit, operating on autonomous regime. The design is based on the strategy of switched mode control of heterogeneous laws, implemented by means of a fuzzy selector at supervisory level.

□ Hugo Domínguez Abreu M.Sc.
Profesor titular,
Facultad de Ingeniería Eléctrica,
Universidad de Oriente, Cuba.

□ Julio Fong Barrios, M.Sc.
Profesor auxiliar,
Facultad de Ingeniería Eléctrica,
Universidad de Oriente, Cuba.

Grupo de automatización de
Minihidroeléctrica,
Facultad de Ingeniería Eléctrica,
Universidad de Oriente,
Ave. de las Américas sin, CP 90900,
Santiago de Cuba, Cuba.
E-mail: hdom@fle.uo.edu.cu

Recibido: Mayo 2.002
Aceptado: Junio 2.002

In the design, the conditions to guarantee the robustness of the control loop internal stability, in presence of variations in the plant's parameters, due to changes in the operation point of the unit are established.

KEYWORDS

Fuzzy Control, Switched Mode Control, Robust Control, Regulation of Small Hydroelectric Power Generating Units.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de pequeñas centrales minihidroeléctricas en sistemas aislados es una alternativa económica de generación de energía eléctrica en zonas rurales montañosas con recursos hidráulicos disponibles donde no llega un sistema electroenergético mayor. En los sistemas aislados se acentúa la necesidad de la utilización de medios de regulación automática de la unidad generadora para garantizar la calidad de la energía generada y su explotación eficiente pues en estas condiciones de operación autónoma, los cambios de carga (la potencia demandada) que afectan la velocidad del grupo electrógeno alteran directamente la frecuencia eléctrica y el voltaje a la salida del generador. Usualmente se emplean estabilizadores de sistemas de potencia (PSS, del inglés Power Systems Stabilizer) para la regulación automática de la frecuencia y el voltaje a la salida del generador en unidades, que operan en modo aislado de potencia mayor de 30 kW. Los reguladores más empleados son lineales de parámetros fijos del tipo PI, PID o compensadores de atraso-adelanto que se ajustan para un punto de operación determinado. Con estos sistemas se logra un desempeño dinámico satisfactorio ante perturbaciones de carga de pequeña amplitud con relación a la carga nominal. Sin embargo presentan dos problemas: uno es que ante perturbaciones de carga de tipo impulsivos, es decir de gran amplitud y corta duración, por lo general se produce un excesivo e indeseado sobrepaso en la salida y el otro es que cuando cambia el punto de operación, que depende de la potencia demandada, la cual varía de forma aleatoria, se produce un deterioro en el desempeño dinámico del lazo debido a la variación de la dinámica de la planta por su naturaleza no lineal. Para resolver estos problemas se emplean técnicas de control no lineal, robusto o adaptable con tipo de ganancia programable o de autoajuste [1] que por lo general requieren para su implantación de medios de automatización más potentes. En este trabajo, como una alternativa de solución a este problema, se presenta el diseño de un algoritmo de control de modo conmutado (switched mode control) de leyes heterogéneas, con selector borroso a nivel supervisorio, que por su relativa sencillez puede ser implantado en un controlador programable de mediana capacidad.

Como parte del diseño se establecen las condiciones para la garantía de la estabilidad interna robusta en todo el rango de operación de la planta.

Se presenta como ejemplo el diseño del regulador de frecuencia para una unidad hidroeléctrica específica de 72 kW.

2. EL PROBLEMA DE LA REGULACIÓN DE UNA MINIHIDROELÉCTRICA EN OPERACIÓN AISLADA

La regulación de una pequeña unidad hidroeléctrica en operación aislada consiste en mantener la frecuencia eléctrica y el valor efectivo del voltaje de línea en los terminales del generador lo más cercano, dentro de un rango permisible, a los valores nominales establecidos para cualquier régimen de carga dentro de los límites de operación y ante posibles perturbaciones.

Desde el punto de vista de control, la planta que tiene como componentes la tubería de carga, las válvulas de regulación de agua y el grupo turbina-generador, se puede considerar como un sistema no lineal con dos salidas: el voltaje y la frecuencia del generador (que es equivalente a la velocidad del grupo en operación aislada) y dos entradas: el caudal de agua que entra a la turbina, que regula la potencia de entrada al sistema y la corriente de excitación del campo del generador.

Debido al carácter de las interacciones entre estas variables es apropiado emplear dos lazos de control independientes, uno de voltaje por corriente de excitación y otro de frecuencia, actuando sobre la potencia de entrada a través del caudal de agua o sobre la potencia demandada mediante la conexión de carga fantasma. En este trabajo se trata el problema de la regulación de frecuencia por caudal de agua de una pequeña unidad hidrogeneradora (de hasta unos 100 kW de potencia), de una central de derivación de gran salto de agua con turbina Pelton y alternador trifásico, afectada por cambios en la carga como perturbación principal.

Según estudios realizados sobre el comportamiento de la carga en instalaciones de este tipo [2], se pueden considerar como principales perturbaciones cambios sostenidos de pequeña magnitud (tipo escalón) y cambios no sostenidos de gran magnitud y corta duración (tipo impulsivo).

La planta a regular se puede considerar un sistema dinámico SISO no lineal que puede ser descrito alrededor de un punto de operación por modelos linealizados en variables en desviaciones, escritos en funciones de transferencia [3][4] para la entrada

$$H_p(s) = \frac{G_R(1 - T_a s)}{(1 - \frac{T_a}{2}s)(1 + T_2 s)} \quad (1)$$

In the design, the conditions to guarantee the robustness of the control loop internal stability, in presence of variations in the plant's parameters, due to changes in the operation point of the unit are established.

KEYWORDS

Fuzzy Control, Switched Mode Control, Robust Control, Regulation of Small Hydroelectric Power Generating Units.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de pequeñas centrales minihidroeléctricas en sistemas aislados es una alternativa económica de generación de energía eléctrica en zonas rurales montañosas con recursos hidráulicos disponibles donde no llega un sistema electroenergético mayor. En los sistemas aislados se acentúa la necesidad de la utilización de medios de regulación automática de la unidad generadora para garantizar la calidad de la energía generada y su explotación eficiente pues en estas condiciones de operación autónoma, los cambios de carga (la potencia demandada) que afectan la velocidad del grupo electrógeno alteran directamente la frecuencia eléctrica y el voltaje a la salida del generador. Usualmente se emplean estabilizadores de sistemas de potencia (PSS, del inglés Power Systems Stabilizer) para la regulación automática de la frecuencia y el voltaje a la salida del generador en unidades, que operan en modo aislado de potencia mayor de 30 kW. Los reguladores más empleados son lineales de parámetros fijos del tipo PI, PID o compensadores de atraso-adelanto que se ajustan para un punto de operación determinado. Con estos sistemas se logra un desempeño dinámico satisfactorio ante perturbaciones de carga de pequeña amplitud con relación a la carga nominal. Sin embargo presentan dos problemas: uno es que ante perturbaciones de carga de tipo impulsivos, es decir de gran amplitud y corta duración, por lo general se produce un excesivo e indeseado sobrepaso en la salida y el otro es que cuando cambia el punto de operación, que depende de la potencia demandada, la cual varía de forma aleatoria, se produce un deterioro en el desempeño dinámico del lazo debido a la variación de la dinámica de la planta por su naturaleza no lineal. Para resolver estos problemas se emplean técnicas de control no lineal, robusto o adaptable con tipo de ganancia programable o de autoajuste [1] que por lo general requieren para su implantación de medios de automatización más potentes. En este trabajo, como una alternativa de solución a este problema, se presenta el diseño de un algoritmo de control de modo conmutado (switched mode control) de leyes heterogéneas, con selector borroso a nivel supervisorio, que por su relativa sencillez puede ser implantado en un controlador programable de mediana capacidad.

Como parte del diseño se establecen las condiciones para la garantía de la estabilidad interna robusta en todo el rango de operación de la planta.

Se presenta como ejemplo el diseño del regulador de frecuencia para una unidad hidroeléctrica específica de 72 kW.

2. EL PROBLEMA DE LA REGULACIÓN DE UNA MINIHIDROELÉCTRICA EN OPERACIÓN AISLADA

La regulación de una pequeña unidad hidroeléctrica en operación aislada consiste en mantener la frecuencia eléctrica y el valor efectivo del voltaje de línea en los terminales del generador lo más cercano, dentro de un rango permisible, a los valores nominales establecidos para cualquier régimen de carga dentro de los límites de operación y ante posibles perturbaciones.

Desde el punto de vista de control, la planta que tiene como componentes la tubería de carga, las válvulas de regulación de agua y el grupo turbina-generador, se puede considerar como un sistema no lineal con dos salidas: el voltaje y la frecuencia del generador (que es equivalente a la velocidad del grupo en operación aislada) y dos entradas: el caudal de agua que entra a la turbina, que regula la potencia de entrada al sistema y la corriente de excitación del campo del generador.

Debido al carácter de las interacciones entre estas variables es apropiado emplear dos lazos de control independientes, uno de voltaje por corriente de excitación y otro de frecuencia, actuando sobre la potencia de entrada a través del caudal de agua o sobre la potencia demandada mediante la conexión de carga fantasma. En este trabajo se trata el problema de la regulación de frecuencia por caudal de agua de una pequeña unidad hidrogeneradora (de hasta unos 100 kW de potencia), de una central de derivación de gran salto de agua con turbina Pelton y alternador trifásico, afectada por cambios en la carga como perturbación principal.

Según estudios realizados sobre el comportamiento de la carga en instalaciones de este tipo [2], se pueden considerar como principales perturbaciones cambios sostenidos de pequeña magnitud (tipo escalón) y cambios no sostenidos de gran magnitud y corta duración (tipo impulsivo).

La planta a regular se puede considerar un sistema dinámico SISO no lineal que puede ser descrito alrededor de un punto de operación por modelos linealizados en variables en desviaciones, escritos en funciones de transferencia [3][4] para la entrada

$$H_p(s) = \frac{G_p(1 - T_a s)}{(1 - \frac{T_a}{2}s)(1 + T_2 s)} \quad (1)$$

y para la perturbación

$$H_w(s) = \frac{G_{ft}}{1 + T_2 s} \quad (2)$$

Se considera un lazo de control de frecuencia con estructura como se muestra en la figura 1.

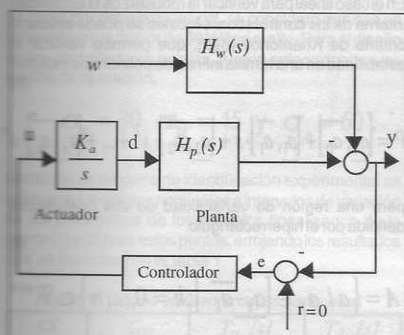


Figura 1. Lazo de control de frecuencia

Donde y [Hz] es la desviación de la frecuencia eléctrica del valor nominal (60 Hz), d [mm] es el cambio en la posición de la aguja de la válvula de agua, w [kW] representa los cambios de carga, u [V] la acción de control, e , el error y r , el cambio en la referencia (en este caso $r = 0$). Los parámetros son: las ganancias G_{ft} [Hz/mm] y G_r [Hz/kW], T_a [s] el tiempo de arranque del agua y T_2 [s] que es una constante de tiempo relacionada con el tiempo de arranque de la máquina. K_a [mm/V] es la ganancia de un actuador de tipo integral.

Se desea diseñar un controlador para regular la salida de la planta que satisfaga las siguientes especificaciones sobre la respuesta temporal para el rechazo a perturbaciones de carga de tipo escalón (amplitud de hasta un 10% de la carga nominal) e impulsiva (amplitud de hasta un 50% de la carga nominal y una duración menor de dos segundos):

- Error a régimen estacionario en el rango de ± 1 Hz.
- Sobrepaso máximo del error menor de 2 Hz.
- Tiempo de restablecimiento máximo de un minuto.

El tiempo de restablecimiento se considera como el tiempo en que el error entra definitivamente en la zona de ± 1 Hz. Se supone la existencia de incertidumbre en los parámetros de los modelos linealizados de la planta debido a errores de identificación o cambios del punto de operación. Se desea garantizar la estabilidad interna robusta y del lazo y satisfacer las especificaciones en

todo el rango de operación de la planta. Para resolver este problema se propone diseñar un controlador de modo combinado como se describe a continuación.

3. CONTROLADOR DE MODO COMBINADO

El trabajo de un controlador global para todo el rango de operación de la planta basado en la estrategia de control de modo combinado, consiste en seleccionar la acción de control según el punto de operación actual de entre un conjunto de controladores locales diseñados en las vecindades de un número finito de puntos pertenecientes al rango de operación de la planta.

El diseño de un controlador de este tipo puede describirse por los siguientes pasos:

1. Definir la región de operación de la planta y realizar una partición de ésta en un número finito de zonas detectables a través de variables medibles.
2. Diseñar un controlador local de parámetros fijos para cada zona.
3. Diseñar el selector que identifique la zona de operación actual a partir de las mediciones de las variables que la caracterizan, y, según una lógica de selección, combine los controladores locales de manera que se satisfaga el objetivo de control global y se garantice la estabilidad en toda la región de operación.
4. Verificar por simulación el desempeño del lazo y si es preciso refinar el diseño.

En el diseño del selector es importante garantizar el adecuado comportamiento del controlador global resultante sobre todo la robustez de la estabilidad así como evitar el efecto de salto de la salida que se pueda producir en el instante de conmutación de un controlador a otro. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone la realización del selector mediante un sistema de inferencia borroso (SIB) que constituye una herramienta adecuada para implantar la lógica de selección y garantiza una conmutación «suave» [5].

El SIB que se adopta es del tipo de Mamdani [6] con método de inferencia tipo producto, emborronado «singleton» y desemborronado de centro promedio. Las variables lingüísticas de entrada se definen con términos representados por conjuntos borrosos con funciones de pertenencia trapezoidales, que formen un conjunto normal, completo, consistente y ordenado. La variable de salida se define con términos representados por «singletons». La lógica de selección se puede expresar, una vez realizada la partición de la región de operación Γ de la planta, en K zonas y diseñados los controladores locales C_i para cada zona, mediante las reglas

$$R_i: \text{si } (\sigma(t_i) \in \tilde{D}_i) \text{ entonces } (u_i = C_i) \quad i = 1, \dots, K$$

Donde $\sigma \in \Gamma \subset \mathbb{R}^m$ es el vector de mediciones que caracteriza un punto de operación y $\tilde{D}_i$ los conjuntos borrosos que representan las particiones de Γ .

Representando por $\tilde{D}_i(\sigma)$ las funciones de pertenencia del vector σ la zona $\tilde{D}_i$, la salida del controlador global en un instante de tiempo t_j está dada por

$$u_g(t_j) = \sum_{i=1}^K \tilde{D}_i(\sigma(t_j)) u_i(t_j) \quad (3)$$

bajo la condición

$$\sum_{i=1}^K \tilde{D}_i(\sigma) = 1 \quad \forall \sigma \in \Gamma \quad (4)$$

La estructura del lazo de control con este controlador se puede representar por el diagrama de bloques de la figura 2.

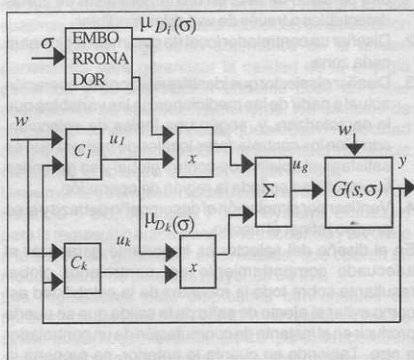


Figura. 2 Lazo de control con controlador de modo combinado.

Las condiciones que garantizan la estabilidad interna robusta del sistema en todo el rango de operación de la planta se establecen en el siguiente teorema cuya demostración aparece en [7].

Teorema

Dado un sistema de control combinado como se muestra en la figura 2, donde $G(s, \sigma)$ es estable $\forall \sigma \in \Gamma$ y $C_i; i = 1 \dots K$ son controladores locales lineales de parámetros fijos diseñados para las zonas de operación de la planta $\Gamma_i; i = 1 \dots K$. Las condiciones suficientes para que el sistema a lazo cerrado tenga estabilidad interna robusta para toda $\sigma \in \Gamma$ son:

1. Que el sistema a lazo cerrado con los controladores locales $C_i; i = 1 \dots K$ por separado sea robustamente asintótica e incondicionalmente estable en sus zonas $\Gamma_i; i = 1 \dots K$ respectivas.
2. Que los conjuntos borrosos $\tilde{D}_i; i = 1 \dots K$ representativos de las zonas de operación de la

planta estén definidos por funciones de pertenencia trapezoidales y formen un conjunto normal completo, consistente y ordenado y se cumpla la condición

$$\sum_{i=1}^K \tilde{D}_i(\sigma) = 1 \quad \forall \sigma \in \Gamma$$

En el caso lineal para verificar la robustez de la estabilidad interna de los controladores locales se puede aplicar el criterio de Kharitonov [8][9], que permite verificar la estabilidad de una familia infinita de polinomios inciertos

$$P = [a_0, \overline{a_0}] + [a_1, \overline{a_1}] \cdot s + [a_2, \overline{a_2}] \cdot s^2 + \dots + [a_n, \overline{a_n}] \cdot s^n$$

para una región de variabilidad de sus coeficientes definida por el hiperrectángulo

$$A = \{a / a_k \in [\underline{a_k}, \overline{a_k}]; k = 0, \dots, n\} \subset \mathbb{R}^{n+1}$$

probando la estabilidad de los cuatro polinomios (5), llamados polinomios de Kharitonov

$$\begin{aligned} k_1 &= \underline{a_0} + \underline{a_1} \cdot s + \overline{a_2} \cdot s + \overline{a_3} \cdot s^3 + \dots \\ k_2 &= \underline{a_0} + \underline{a_1} \cdot s + \underline{a_2} \cdot s + \underline{a_3} \cdot s^3 + \dots \\ k_3 &= \underline{a_0} + \underline{a_1} \cdot s + \underline{a_2} \cdot s + \underline{a_3} \cdot s^3 + \dots \\ k_4 &= \underline{a_0} + \underline{a_1} \cdot s + \underline{a_2} \cdot s + \underline{a_3} \cdot s^3 + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

Aún en el caso no lineal es posible investigar la robustez de estabilidad interna del lazo por este criterio, localmente en una vecindad al origen del espacio de estado, aplicando una linealización siempre que ésta sea posible.

A continuación se presenta un ejemplo del diseño de un controlador de frecuencia de una unidad específica de 72 kW.

4. DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE FRECUENCIA DE MODO COMBINADO PARA UNA UNIDAD HIDROGENERADORA DE 72 KW

Se trata de una unidad minihidroeléctrica del tipo mencionado anteriormente de 72 kW de potencia. Para el diseño del controlador combinado de frecuencia se tomó como variable que caracteriza el punto de operación la potencia demandada en kW, estableciéndose como resultado de un estudio del comportamiento de la carga

un intervalo de operación normal $\Gamma = [30, 60]$ kW. Se realizó una partición del mismo en tres zonas de operación: baja Γ_B , media Γ_M y alta Γ_A , de la siguiente manera:

$$\Gamma_B = [30, 42]; \Gamma_M = [40, 50]; \Gamma_A = [48, 60] \quad (8)$$

La carga por debajo de 30 kW, se consideró que cae en el nivel bajo y la mayor de 60 kW en el alto. Para el diseño de los controladores locales, fueron seleccionados los puntos de operación,

$$\sigma_B = 30, \sigma_M = 45 \text{ y } \sigma_A = 60.$$

Mediante un proceso de identificación experimental se estimaron los valores nominales e intervalos de variación de los parámetros de los modelos linealizados de la planta (1) y (2) para estos puntos, arrojando los resultados que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores estimados de los parámetros

σ [kW]	G_{fl} [Hz/mm]	T_a [s]	T_2 [s]
30	4.0	0.5	10.0
45	2.0	0.8	6.0
60	0.5	1.0	5.0
30-42	2.4-4.4	0.45-0.74	6.8-11.0
40-50	1.5-2.67	0.7-0.88	5.4-7.33
48-68	0.45-1.7	0.84-1.1	4.5-5.8

Se tomaron controladores locales lineales proporcionales-derivativos (PD), con función de transferencia

$$G_c = K_c + K_d \cdot s \quad (9)$$

teniendo en cuenta la presencia en el lazo de un actuador tipo integral.

Para cada zona de operación se ajustó el controlador correspondiente con los parámetros de la planta de la tabla 1 y $K_a = 0.6$, aplicando las fórmulas del método de Ziegler-Nichols de oscilaciones mantenidas; se verificó la robustez de la estabilidad interna en cada zona por el criterio de Kharitonov y en el caso necesario se refinó el ajuste hasta lograrlo.

Para aplicar el criterio de Kharitonov se determinó el polinomio característico del sistema a lazo cerrado de la figura 1 con controlador PD (9), obteniendo

$$P(s) = K_a K_c G_{fl} + (1 - K_a K_c G_{fl} T_a + K_a K_d G_{fl}) s + 0.5(T_a + 2 T_2 - 2 K_a K_d T_a G_{fl}) s^2 + 0.5 T_a T_2 s^3 \quad (10)$$

calculando los valores máximos y mínimos de los coeficientes denotados con los signos + y -, a partir de los intervalos de variación de los parámetros de la planta

$$\begin{aligned} a^+ &= K_a K_c G_{fl}^+; & a^- &= K_a K_c G_{fl}^- \\ b^+ &= 1 - K_a K_c T_a^+ G_{fl}^+ + K_a K_d G_{fl}^+; & b^- &= 1 - K_a K_c T_a^- G_{fl}^- + K_a K_d G_{fl}^- \\ c^+ &= 0.5(T_a^+ + 2 T_2^+ - 2 K_a K_d T_a^+ G_{fl}^+); & c^- &= 0.5(T_a^- + 2 T_2^- - 2 K_a K_d T_a^- G_{fl}^-) \\ d^+ &= 0.5 T_a^+ T_2^+; & d^- &= 0.5 T_a^- T_2^- \end{aligned} \quad (11)$$

Entonces se verificó la estabilidad de la familia

$$\Gamma(s) = [a^-, a^+] + [b^-, b^+]s + [c^-, c^+]s^2 + [d^-, d^+]s^3 \quad (12)$$

comprobando la estabilidad de los cuatro polinomios de Kharitonov (7).

Como resultado de este proceso se obtuvieron los parámetros de los controladores que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Ajuste de los parámetros de los controladores

σ [kW]	K_c [Hz/mm]	K_d
30	0.5	1.0
45	0.8	1.5
60	0.6	2.0

Teniendo en cuenta la implantación digital de los controladores se obtuvo la versión de tiempo discreto del PD, con período de muestreo T_0

$$u(k) = K_c \cdot e(k) + \frac{K_d}{T_0} \cdot de(k) \quad (13)$$

Donde $de(k) = e(k) - de(k)$

Se seleccionó $T_0 = 0.1$ s que satisface la condición $T_0 < 0.1 T_n$ [10], donde T_n es el período de las oscilaciones amortiguadas de la respuesta del sistema a lazo cerrado; calculando T_n para los tres controladores y tomando la menor resultó:

$$T_n = 1.43 \text{ s.}$$

Obteniendo finalmente los controladores locales de tiempo discreto para las tres zonas

$$\begin{aligned} u_B(k) &= 0.5 \cdot e(k) + 10.0 \cdot de(k) \\ u_M(k) &= 0.8 \cdot e(k) + 15.0 \cdot de(k) \\ u_A(k) &= 0.6 \cdot e(k) + 20.0 \cdot de(k) \end{aligned} \quad (14)$$

Se diseñó el selector definiendo los conjuntos borrosos B, M y A, que representan las zonas de operación baja, media y alta, respectivamente, como se muestra en la figura 3.

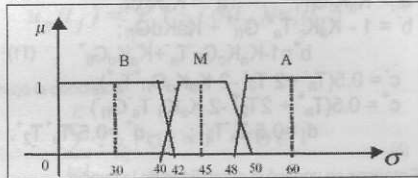


Figura 3. Conjuntos borrosos de las zonas operación.

Entonces la salida del controlador de modo combinado, con estructura como la de la figura 2, es

$$u(k) = \mu_B(\sigma(k)) \cdot u_B(e(k), de(k)) + \mu_M(\sigma(k)) \cdot u_M(e(k), de(k)) + \mu_A(\sigma(k)) \cdot u_A(e(k), de(k))$$

Se analizó por simulación el comportamiento del lazo con el controlador diseñado para perturbaciones de carga tipo escalón de 5 kW de amplitud e impulsiva de amplitud 30 kW y 2 s de duración para diferentes regímenes de carga en las tres zonas de operación. En las figuras 4 y 5 se muestran las respuestas de la frecuencia en algunas de las simulaciones realizadas.

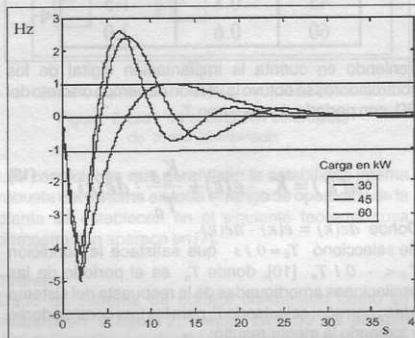


Figura 4. Respuestas a perturbación escalón

Como se observa, se logra un comportamiento satisfactorio que cumple las especificaciones del lazo para el rechazo de perturbaciones tipo escalón de pequeña amplitud, en las tres zonas de operación. Sin embargo ante perturbaciones impulsivas de gran amplitud de corta duración se aprecia un excesivo sobrepaso que supera los 2 Hz establecidos como máximo en las especificaciones.

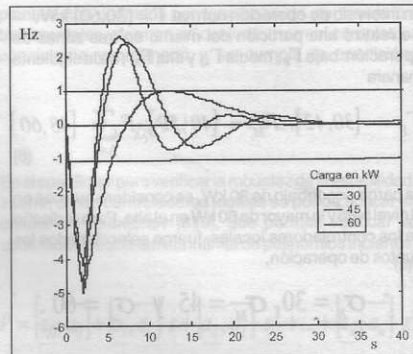


Figura 5. Respuestas a perturbación impulsiva

Esto se debe a que ante el efecto de una perturbación de gran amplitud y corta duración que saca súbitamente el estado del sistema a una región alejada del origen del plano de fase (e , e') y luego lo deja en respuesta libre, la acción del controlador PD que fue diseñado para perturbaciones de pequeña amplitud, es muy fuerte y provoca el sobre paso de la salida.

Una variante de solución de este problema es utilizar como controladores locales un tipo de controlador no lineal que actúe como el PD en una región R_0 cercana al origen del plano de fase (e , e') y con una ley no lineal en la región exterior, R_e , cuya función sólo sea atraer el estado hacia la región interior con una acción de control no muy fuerte, de manera que el sobrepaso de la salida sea pequeño.

En [7] se sintetiza un controlador borroso con estas características con resultados satisfactorios que combina una ley PD en R_0 y una heurística en R_e , aprovechando la propiedad de aproximador universal del tipo de sistema borroso empleado.

En este caso presentamos una solución más simple con la cual se obtuvieron similares resultados. Se trata de modificar los controladores locales PD (14), limitando sus entradas $e(k)$ y $de(k)$, de manera que una región rectangular centrada en el origen del plano (e , e') se comporte como el PD lineal y en la exterior se suavice su acción debido a la saturación de las entradas. El modelo de un controlador de este tipo se puede expresar como

$$u(k) = K_c \cdot e_m \cdot \text{sat}\left(\frac{e(k)}{e_m}\right) + \frac{K_d \cdot de_m}{T_0} \cdot \text{sat}\left(\frac{de(k)}{de_m}\right) \quad (15)$$

Donde la función de saturación $\text{sat}(x)$ se define por

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 1 \\ x & \text{si } |x| \leq 1 \\ -1 & \text{si } x < -1 \end{cases}$$

Sobre la base de un estudio por simulación del comportamiento de las trayectorias de estado en el plano de fase del sistema a lazo cerrado con el controlador PD, ante las perturbaciones de carga escalón e impulsivas citadas anteriormente, se establecieron los límites $\theta_m = 7.5^\circ$ y $\dot{\theta}_m = 0.2$ iguales para los tres controladores locales. Se analizó por simulación el comportamiento del lazo con el controlador de modo combinado con los controladores locales PD modificados (15) para las mismas perturbaciones de carga y zonas de operación del análisis anterior.

En las figuras 6 y 7 se muestran las respuestas de la frecuencia en algunas de las simulaciones realizadas.

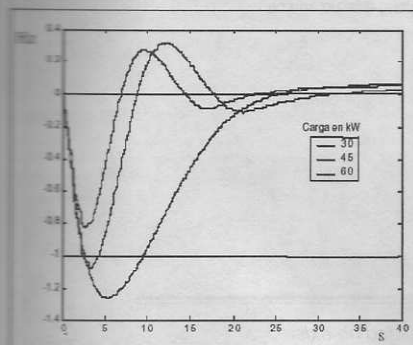


Figura 6. Respuestas a perturbación escalón con controladores locales PD de entradas limitadas

Se aprecia que con este último controlador se disminuyó significativamente el sobrepaso en las repuestas ante perturbación impulsiva, estando siempre por debajo de 1 Hz mientras que las respuestas ante perturbación escalón son similares como era de esperar, de manera que se satisfacen todas las especificaciones del lazo de control establecidas en todo el rango de operación normal de la planta.

5. CONCLUSIONES

Se presentó una técnica de diseño de un algoritmo de control de modo combinado de leyes heterogéneas con selector borroso en el nivel supervisor para la regulación

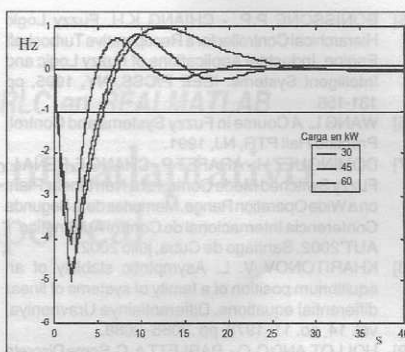


Figura 7. Respuestas a perturbación impulsiva con controladores locales PD de entradas limitadas

robusta, en un amplio rango de operación, de la frecuencia eléctrica a la salida de una pequeña unidad hidrogeneradora en conexión aislada.

La efectividad de la técnica presentada se demostró con el diseño de un controlador de frecuencia de una unidad específica de 72 kW, garantizando la robustez de la estabilidad interna a lazo cerrado, lográndose satisfacer las especificaciones de desempeño dinámico ante perturbaciones de cambios de carga de tipo escalón de pequeña amplitud y de tipo impulsivas de gran amplitud y corto tiempo de duración en todo el rango de operación de la unidad.

El algoritmo diseñado debido a su relativa sencillez, puede ser implantado en controladores programables de mediana capacidad. La técnica de diseño presentada puede aplicarse a otros problemas de control con similares características.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ÅMSTRÖM K. J.- WITTENMARK B. «Adaptive Control». Addison-Wesley Publishing Company, Inc. USA, 1995
- [2] DOMÍNGUEZ H. Modelado y simulación para el análisis y diseño de algoritmos de control de una pequeña unidad hidroeléctrica. Tesis en opción al título de Master en Automática. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1999.
- [3] OLLERO A. Control por computadora. Descripción interna y diseño óptimo. Edit. Marcombo. Barcelona. España, 1991
- [4] CAICEDO D.G.. Gobernadores de turbinas hidráulicas. Memorias del Primer Encuentro Nacional de Automática. Cali. Colombia, 1993.

- [5] BONISSONE P.P. - CHIANG K.H. Fuzzy Logic Hierarchical Controller for a Recuperative Turboshift Engine. Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. IEEE P/CSS, NY, 1995, pp 131-156.
- [6] WANG L. A Course in Fuzzy Systems and Control. Prentice Hall PTR, NJ, 1991.
- [7] DOMÍNGUEZ H.- ARAFET P - CHANG F-PEÑA L. Fuzzy Switched Mode Control of a Non Linear Plant on a Wide Operation Range. Memorias de la Segunda Conferencia Internacional de Control Automático AUT'2002. Santiago de Cuba, julio 2002.
- [8] KHARITONOV V. L. Asymptotic stability of an equilibrium position of a family of systems of linear differential equations. Differentialnye Uravneniya, vol. 14, no. 11, 1978, pp.2086-2088.
- [9] HOLLOT AND C. C.- BARLETTA C. Some Discrete Time Counterparts to Kharitonov's Stability Criterion for Uncertain Systems. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. AC-31, No. 4, April, 1986, pp 355-356.
- [10] FRANKLIN G.- POWELL J. - EMANI-NAENI A. Control de Sistemas Dinámicos con Realimentación. Addison-Wesley Iberoamericana, USA, 1991. ■

AUTORES



Hugo Domínguez Abreu, M.Sc.
Ingeniero electricista de la Universidad de Oriente en 1971. Profesor titular del Departamento de informática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
hdom@fie.uo.edu.cu



Julio Fong Barrios, M.Sc. Ingeniero electricista de la Universidad de Oriente en 1971. Profesor Auxiliar del Departamento de Control Automático de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
jfong@fie.uo.edu.cu



*«El fracaso en realidad no existe,
lo que existe es gente que abandona la lucha,
por la comodidad.»*