

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES ESTRUCTURAS DE COMPENSACIÓN POR CARGA BALASTO, APLICADAS A GENERADORES DE INDUCCIÓN AUTOEXCITADOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

F. Botterón ¹, G. A. Fernández ², A. P. Quintana ³, J. L. Gerber ⁴, V. H. Kurtz ⁵

Grupo de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Electrónica (GID-IE).

Universidad Nacional de Misiones (UNaM) – Facultad de Ingeniería (FIO).

Juan Manuel de Rosas N° 325 – Oberá – Misiones – Argentina – C.P. 3360 – Tel.: 3755-422169; FAX: 3755-422170

botteron@gmail.com; guillermo.fernandez.fio@gmail.com; quintanaangelpaolo@gmail.com;

gerberjorge@hotmail.com; kurtzvh@fio.unam.edu.ar

RESUMEN: Este artículo presenta el análisis comparativo de diferentes estructuras de compensación, destinadas al control de tensión y frecuencia en generadores de inducción autoexcitados, aplicados a pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs). El análisis es efectuado mediante los resultados obtenidos con la implementación de dos prototipos de control por carga balasto. Ambos prototipos permiten controlar la tensión y frecuencia, midiendo únicamente la tensión generada. Uno de los prototipos utiliza una estructura de compensación fija y el otro posee distintas estructuras, configurables para estudiar las características de control sobre el sistema de generación. El desempeño en régimen transitorio y permanente de estos prototipos fue verificado en un banco de ensayos, constituido por un grupo motor-generator de 1HP. El análisis comparativo de los resultados se efectúa observando la respuesta de la tensión generada para distintos niveles y tipos de carga, lineales como no lineales; utilizando las diferentes estructuras de compensación proporcionadas por los prototipos mencionados.

Palabras clave: Pequeñas centrales hidroeléctricas, control por carga balasto, generador de inducción, PI, PID, PD.

INTRODUCCIÓN

En pico y micro centrales hidroeléctricas que operan aisladas de la red eléctrica de distribución, es común utilizar motores de inducción como generadores. Esto se debe al bajo costo que poseen los mismos en comparación a otros tipos de generadores y también a su amplia disponibilidad (Chapallaz et al., 1992). La operación de estos sistemas de generación está caracterizada por la variación en la tensión y frecuencia de salida, cuando existen modificaciones en la carga del usuario. Si la demanda de potencia establecida por la carga del usuario es incrementada, el generador sufre una disminución en la velocidad de rotación que provoca una caída en su tensión y frecuencia. Si el usuario libera carga, la velocidad del generador sufre un incremento, ocasionando un aumento tanto en la tensión como en la frecuencia de salida del mismo. Estos cambios de tensión y frecuencia producidos a la salida del generador, no son deseables para la carga del usuario. Los mismos pueden traer inconvenientes tales como “parpadeos” en lámparas de iluminación, variación del torque y la velocidad en motores, etc.

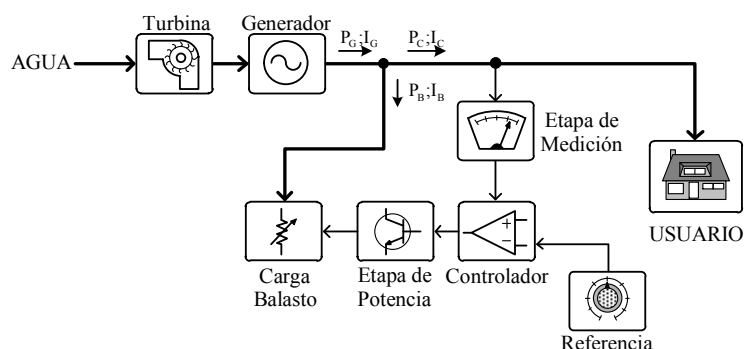


Figura 1: Regulación de frecuencia por carga balasto.

Una forma de evitar estos inconvenientes en las PCHs, es dotándolas de un control automático de tensión y frecuencia. Este control puede efectuarse a través de dos métodos: por control de flujo (caudal turbinado) o por control de carga (Kurtz y Anocibar, 2005).

¹ Docente - Investigador, FIO – UNaM, CONICET.

^{2, 5} Docente - Investigador, FIO – UNaM.

^{3, 4} Alumno, FIO - UNaM.

El sistema por control de carga, también denominado por carga balasto, posee mayor velocidad de respuesta que el sistema por control de flujo ya que no posee partes móviles que actúen en la acción de control. Esto permite que el sistema de control actúe rápidamente, contrarrestando las variaciones de la carga de usuario y permitiendo que la tensión y frecuencia adopten los valores deseados. Como contraparte a lo anterior, el control por carga balasto, reduce el almacenamiento de agua a turbinar y además disipa energía en la carga balasto, siendo necesario aprovechar esta a los efectos de mejorar la utilidad de la instalación (Fernández et al., 2010).

El control por carga balasto consiste en tratar de someter al generador de la PCH a un estado de carga constante (sin modificar el caudal turbinado), fijando así la velocidad del mismo y manteniendo constantes tanto la frecuencia como la tensión de salida del generador. Para esto, la PCH debe proveer energía al usuario y a una carga resistiva denominada carga balasto. Según la figura 1, esta carga se encuentra en paralelo con el usuario, de tal forma que el sistema de control trata de mantener constante la potencia desarrollada por el generador (P_G), variando la potencia disipada en la carga balasto (P_B), según cambie la potencia utilizada por el usuario (P_C).

La información referida a la variación de tensión y frecuencia, puede obtenerse a través de la medición de la corriente o de la tensión generada, o por una combinación de ambas al mismo tiempo (Kurtz y Botterón, 2006; Benítez, 2009). En el controlador, dicha información es comparada permanentemente con un valor de referencia a los efectos de modificar la potencia disipada en la carga balasto. Considerando que se mide la tensión generada, como se propone para los prototipos presentados en este artículo, cuando la misma supera al valor de tensión de referencia, el controlador incrementa la potencia que disipa la carga balasto. En cambio, cuando la medición es inferior a la referencia, el controlador disminuye la potencia disipada por dicha carga. Teniendo en cuenta estas variaciones, el controlador trata de mantener constante la potencia P_G , para que la velocidad del generador se mantenga prácticamente invariable ante los cambios de carga del usuario; y a su vez, la tensión y la frecuencia en los bornes del mismo, permanezcan prácticamente constantes (Kurtz y Anocibar, 2005; Kurtz y Botterón, 2006).

Los prototipos de los controladores por carga balasto presentados en este artículo, poseen un diagrama en bloques como el indicado en el cuadro CONTROLADOR de la figura 2. Como puede apreciarse, el controlador mide la tensión generada, comparándola con un valor de referencia (correspondiente a la tensión deseada sobre la carga) para generar una señal de error. Esta señal de error es procesada por el compensador, el cual genera la acción de control aplicada a la carga balasto a través del actuador, haciendo variar la potencia de la misma ante los cambios de la carga del usuario. El actuador está conformado por una llave electrónica (transistor de potencia) que interrumpe periódicamente la corriente que pasa a través de la carga balasto. En cada periodo, esta llave se mantiene cerrada por un tiempo que depende del valor correspondiente a la acción de control, generada por el compensador. La señal de comando de la llave de electrónica, es generada con el ingreso de la acción de control al generador PWM (modulación de ancho de pulso), quien proporciona los pulsos de duración necesaria para la conmutación de la misma. El circuito de comando de esta llave (*driver*), indicado en el diagrama de bloques, permite que la misma conmute más rápidamente.

Debido a que la llave electrónica utilizada en el controlador, sólo permite el paso de la corriente en una dirección, la tensión que alimenta a la carga balasto es rectificadora a través de un puente de diodos.

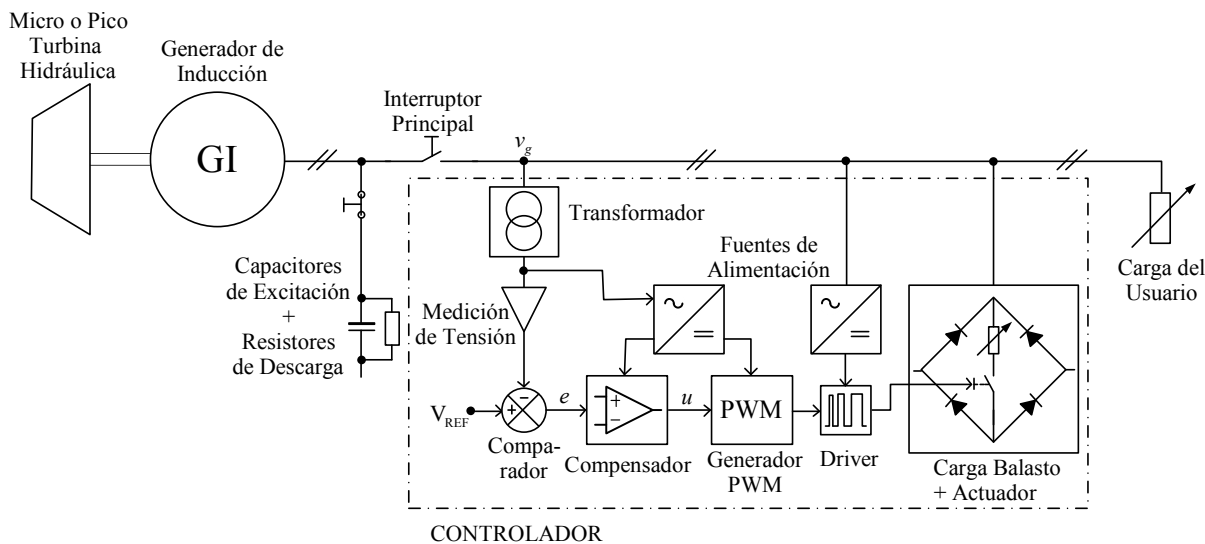


Figura 2: Diagrama de bloques de los prototipos de controlador por carga balasto.

El uso del sistema de control mencionado, permite que la PCH provea energía eléctrica al usuario con calidad aceptable, manteniendo la tensión y la frecuencia de la generación dentro de márgenes de variación admisibles. Por tal motivo, es importante el estudio del efecto que estos sistemas de control poseen sobre el sistema de generación, siendo indispensable que los mismos reaccionen adecuadamente ante cambios en la carga del usuario. Atendiendo a esto, el presente artículo analiza comparativamente la respuesta producida por distintas estructuras de compensación, las cuales están incluidas en los prototipos presentados. El propósito del análisis realizado, es determinar la estructura de compensación que proporciona la

mejor respuesta de control, haciendo que la tensión y frecuencia del generador recuperen rápidamente el valor deseado, cuando el usuario impone variaciones de carga, independientemente de la característica de la misma.

A continuación se describen los bloques presentados en la figura 2, considerando que ambos prototipos sólo difieren en la etapa de medición de tensión, el comparador y el compensador. Finalmente, son analizadas las diferentes respuestas obtenidas con las distintas estructuras de compensación, para diferentes tipos de carga.

ACTUADOR Y DRIVER

El actuador que modifica la potencia disipada en la carga balasto, esta constituido por una llave electrónica realizada a partir de un transistor MOSFET de potencia. Esta llave conmuta conectando y desconectando a la carga balasto de la tensión que provee el generador, a través del rectificador indicado en la figura 3. La frecuencia de conmutación es fija y mayor que la correspondiente a la tensión generada.

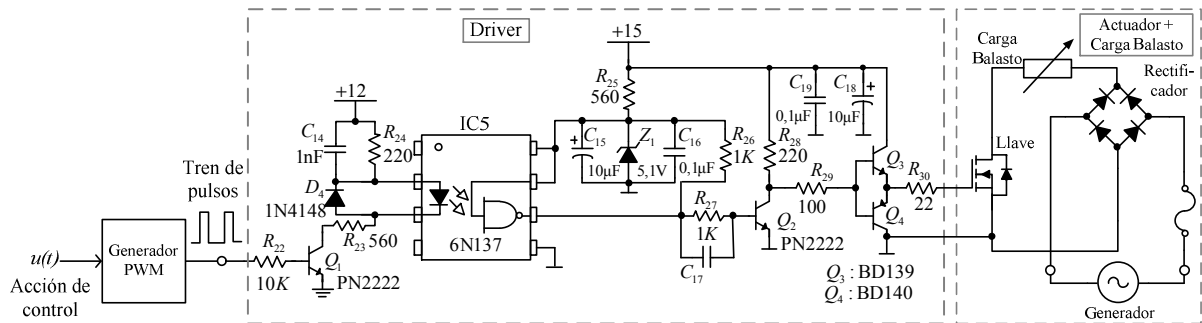


Figura 3: Circuitos del driver y el actuador del controlador por carga balasto.

El control de la potencia disipada en la carga balasto es efectuado a través de la variación del tiempo que permanece cerrada la llave, durante cada periodo de conmutación. Para variar este tiempo, el generador PWM comanda la llave a través de un tren de pulsos de tensión donde el ancho de los mismos depende de la acción de control que inyecta el compensador al generador PWM, como está indicado en la figura anterior.

En la figura 3 puede apreciarse que los pulsos provenientes del generador PWM, son aplicados al transistor de potencia a través del driver. Este circuito, energizado desde la tensión generada por la PCH mediante una fuente de alimentación separada de los demás circuitos del controlador, cumple dos funciones importantes: mejora la velocidad de conmutación de la llave y también aísla eléctricamente a la etapa de potencia (actuador y carga balasto) del resto del controlador (Brown, 2001). La aislación eléctrica mencionada, permite que cualquier falla en la etapa de potencia del controlador no sea transferida al resto del controlador.

GENERADOR PWM

Esta etapa del controlador, indicada en la figura 2, convierte la acción de control proporcionada por el compensador, en un tren de pulsos de frecuencia fija y ciclo útil variable (ancho de pulso variable), a los efectos de comandar la llave electrónica encargada de manipular la potencia disipada en la carga balasto. Según puede apreciarse en la figura 4a, este circuito es constituido por un generador de onda triangular (IC3a, IC3b y IC4) y un comparador de tensión (IC2a).

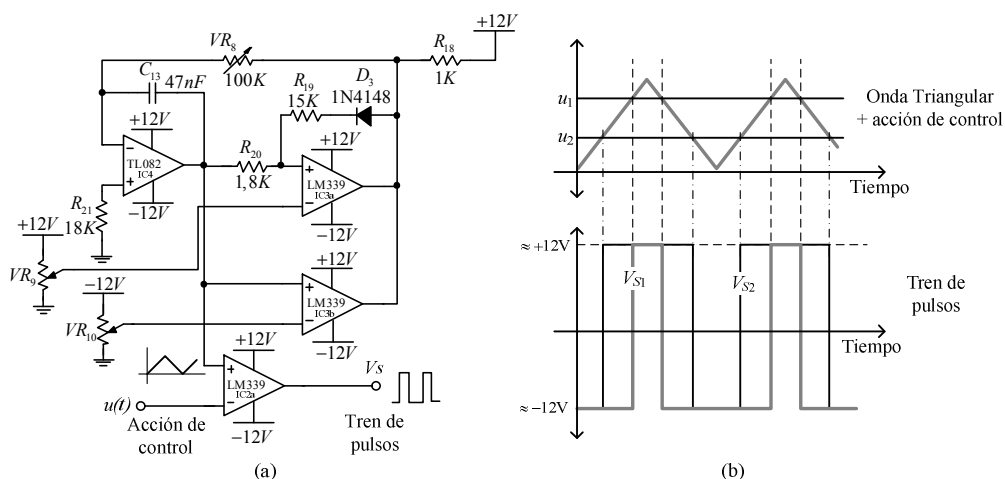


Figura 4: (a) Circuito del generador PWM. (b) Señal de salida del generador PWM, para distintos valores de la acción de control.

Según lo indica la figura 4b, el generador de onda triangular proporciona en su salida una tensión con variación de este tipo, donde la frecuencia y amplitud máxima de esta señal pueden ajustarse a través de VR9 y VR10. En los prototipos desarrollados, estos ajustes han sido realizados para obtener una onda triangular de 1kHz y 5V de amplitud.

El comparador de tensión es el que proporciona el tren de pulsos a la salida del generador PWM. Este tipo de salida es obtenida comparando la onda triangular mencionada, con la acción de control $u(t)$ que proviene del compensador. El comparador de tensión responde de la siguiente forma, ante las tensiones aplicadas a sus entradas inversora (V_i^-) y no inversora (V_i^+).

$$V_i^+ > V_i^- \Rightarrow V_S \approx +V_{CC} \quad ; \quad V_i^+ < V_i^- \Rightarrow V_S \approx -V_{CC} \quad (1)$$

Siendo $+V_{CC}$ y $-V_{CC}$ las tensiones que alimentan al comparador. Teniendo en cuenta la expresión anterior y considerando el circuito del generador PWM, en la figura 2b puede observarse como la amplitud de la tensión $u(t)$, correspondiente a la acción de control, modula el ancho de los pulsos obtenidos a la salida del comparador.

COMPENSADOR

• Primer prototipo

El controlador implementado en el Prototipo 1, es del tipo integral (Botterón et al., 2009). El circuito del compensador mostrado en la figura 5, integra a cada instante de tiempo la diferencia entre la tensión medida y un valor de referencia (tensión deseada en bornes del generador). Este error, si está presente, es llevado a cero en un tiempo determinado por la constante de integración del compensador. El error aumentará cuando la tensión en bornes del generador se incremente, por ejemplo, debido a la desconexión de la carga de alguno de los usuarios. El error disminuirá cuando el usuario conecte más carga; con lo que el sistema de control realizará la acción correctiva disipando respectivamente, mayor o menor potencia en la carga balasto. El compensador mencionado en el párrafo anterior, está implementado a través de un único amplificador operacional (IC1), que realiza el cálculo de la señal de error y a su vez implementa la acción integral. El error es integrado con una constante de tiempo dada por R_6 y C_{15} , que junto a R_{10} y P_3 , permiten regular la velocidad de respuesta del sistema. La salida sobre R_{11} , es la acción de control que recibe el generador PWM para producir los pulsos de ancho variable que son aplicados, a través *driver*, sobre la llave que comanda la carga balasto (Botterón et al., 2009).

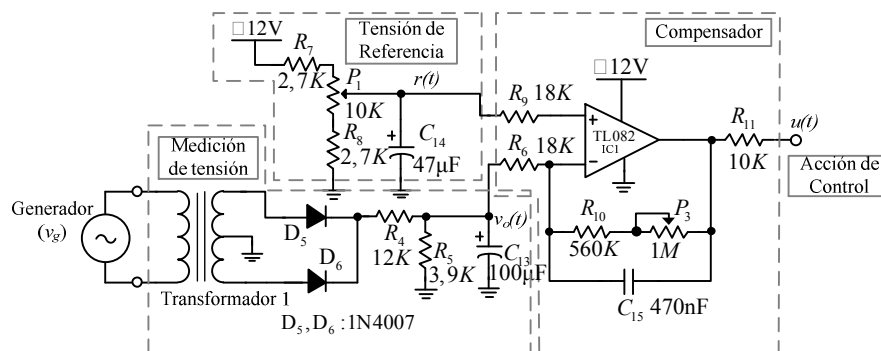


Figura 5: Circuito correspondiente a las etapas de medición, tensión de referencia y compensador del Prototipo 1.

De la figura 5 podemos obtener la ecuación que rige el comportamiento del compensador, expresando el error $e(t)$ en función de la acción de control $u(t)$ (Botterón et al., 2009). De esta forma se obtiene:

$$e(t) = \frac{R_6}{(R_{10} + P_3)} u(t) + C_{15} R_6 \frac{du(t)}{dt} \quad (2)$$

Aplicando transformada de Laplace a ambos miembros de la expresión anterior (con condiciones iniciales nulas), y considerando que $(R_{10} + P_3) \gg R_6$ queda:

$$E(s) = \frac{R_6}{(R_{10} + P_3)} U(s) + s C_{15} R_6 U(s) \quad \text{y} \quad \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{s C_{15} R_6} \quad (3)$$

Observando la expresión (3), podemos concluir que en el circuito compensador del Prototipo 1, la acción preponderante sobre la señal de error, es una acción integral pura.

• Segundo prototipo

Al igual que el Prototipo 1, este opera comparando un valor de referencia de tensión fijo, con la medida de la tensión generada. Si hubiera diferencia entre estas dos señales, el compensador calcula la acción de control que produce (a través del actuador) la potencia activa que debe ser disipada en la carga balasto para llevar a cero el error entre ambas señales anteriores.

En la figura 6 puede observarse el circuito de la estructura de compensación configurable correspondiente al Prototipo 2. Mediante los puentes de configuración pueden lograrse diferentes etapas de compensación, como ser: Proporcional (P), Integral (I), Proporcional + Integral (PI), Proporcional + Derivativo (PD), Proporcional-Integral + Derivativo (PI-D) y Proporcional-Integral + Proporcional-Derivativo (PI-PD). Cabe destacar que la acción de control derivativa, puede obtenerse

a partir de la señal de error o de la señal de salida (medida de la tensión generada). Esta última opción posee una ventaja clara, ya que la derivada de la señal de salida no es tan brusca como la derivada de la señal de error, cuando se producen variaciones de la carga del usuario en escalón.

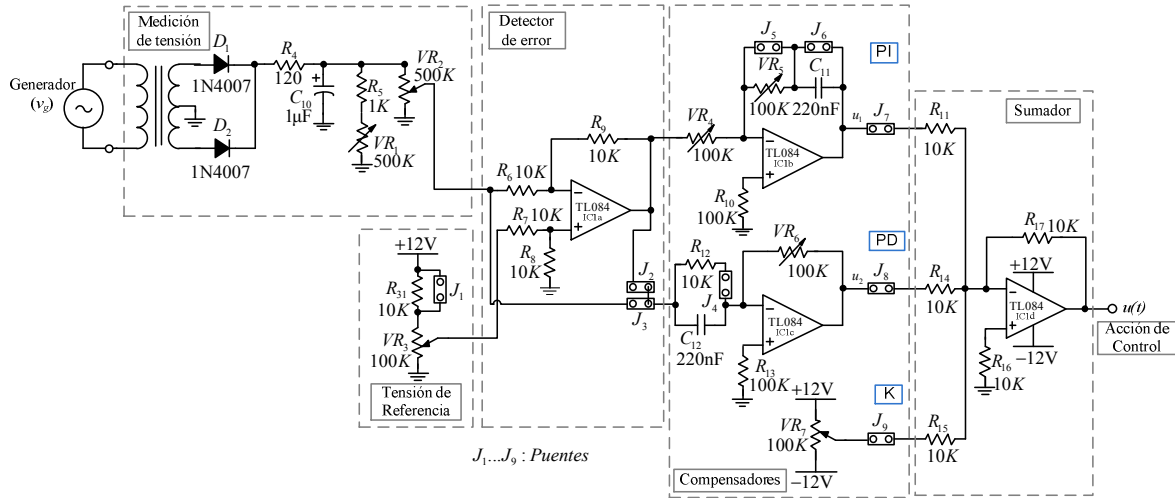


Figura 6: Circuito correspondiente a las etapas de medición, tensión de referencia y compensador del Prototipo 2.

Esta estructura de compensación configurable, está implementada en base a cuatro amplificadores operacionales del circuito integrado IC1. El detector de error construido en torno a IC1a, calcula el error entre el valor deseado (referencia de tensión) y el valor medido (valor instantáneo de la tensión generada). La señal de error resultante es aplicada al compensador configurado para generar la acción de control requerida por el sistema.

Considerándose los compensadores I y PI, construidos en torno a IC1b, la constante de tiempo integral está dada por VR_4 y C_{11} , que junto a VR_4 y VR_5 , permiten determinar la velocidad con la cual el error tiende a cero, manteniendo así la variable a controlar igual al valor deseado. En esta estructura también se encuentran implementados los compensadores D y PD, construidos en torno a IC1c. Estos compensadores son capaces de producir una acción de control anticipativa, permitiendo así estabilizar rápidamente la variable a controlar, después de una variación en la carga del usuario. La variación de la constante de tiempo derivativo, determinada por VR_6 y R_{12} , permite obtener un compensador de alta sensibilidad, que responde a la velocidad del cambio del error o de la señal de salida del sensor (dependiendo de la entrada de este compensador).

Además de los compensadores descritos, este prototipo tiene la posibilidad de comandar la carga balasto a través de una acción de control constante por medio de VR_7 . Representando este caso la operación a lazo abierto del sistema de la figura 2. En base al esquema presentado en la figura 6, pueden obtenerse, tanto en el tiempo como en transformada de Laplace, las ecuaciones que caracterizan las distintas etapas de compensación.

$$P: u(t) = -\frac{VR_5}{VR_4} e(t) \Leftrightarrow \frac{U_1(s)}{E(s)} = \frac{-VR_5}{VR_4} \quad ; \quad I: \quad u(t) = -\frac{1}{VR_4 C_{11}} \int_0^t e(t) dt \Leftrightarrow \frac{U_1(s)}{E(s)} = -\frac{1}{s VR_4 C_{11}} \quad (4)$$

$$D: u(t) = -VR_6 C_{12} \frac{de(t)}{dt} \Leftrightarrow \frac{U_1(s)}{E(s)} = -s VR_6 C_{12} \quad ; \quad PI: u(t) = -\left[\frac{VR_5}{VR_4} e(t) + \frac{1}{VR_4 C_{11}} \int_0^t e(t) dt \right] \Leftrightarrow \frac{U_1(s)}{E(s)} = -\left[\frac{VR_5}{VR_4} + \frac{1}{s VR_4 C_{11}} \right] \quad (5)$$

$$PD: \quad u(t) = -\left[\frac{VR_6}{R_{12}} e(t) + VR_6 C_{12} \frac{de(t)}{dt} \right] \Leftrightarrow \frac{U_1(s)}{E(s)} = -\left[\frac{VR_6}{R_{12}} + s VR_6 C_{12} \right] \quad (6)$$

Por último, en la figura 6 puede observarse la etapa sumadora construida en torno a IC1d, esta recibe las acciones de control de las estructuras mencionadas, a través de la selección adecuada de los puentes de configuración. Estos puentes, dan la posibilidad de sumar las distintas acciones de control, conformando diferentes estructuras de compensación y permitiendo el estudio del efecto que poseen las mismas sobre el generador de la PCH, cuando hay variaciones en la carga del usuario.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para verificar el desempeño de la estructura propuesta en el Prototipo 2 y comparar resultados con el Prototipo 1, ambos circuitos fueron conectados a un banco de ensayo constituido de un motor impulsor (con velocidad variable) y un generador de inducción autoexcitado, sobre el cual se aplicaron variaciones de carga en escalón para simular la operación de conexión y desconexión que podría efectuar el usuario sobre la PCH. Primeramente, el Prototipo 2 fue dotado del mismo circuito de medición de tensión que lleva el Prototipo 1, a los efectos de compararlos bajo las mismas condiciones y determinar las diferencias inherentes únicamente a la distinta configuración de su control integral. Como se ha mencionado, el Prototipo 1

posee únicamente un control del tipo integral, pero además, en el mismo amplificador operacional donde se implementa el compensador, está el detector de error. Para evitar excesivas oscilaciones en la acción de control a causa del integrador, en el Prototipo 1 existe una rama compuesta por R_{10} y P_3 encargada de amortiguarlas. Esta rama hace menos preciso al sistema de control de la PCH, debido a que no se anula el error en régimen permanente.

En el Prototipo 2, el detector de error y el control integral están por separado, lo cual permite aplicar una acción de control integral pura que elimina el error existente en el Prototipo 1. Otro aspecto que diferencia a los prototipos, es el tipo de alimentación que poseen. En el Prototipo 1 la alimentación es asimétrica, por lo que el compensador no podrá procesar señales de error cuando la medida de la tensión exceda al valor de la referencia, ya que en este caso, el error toma valores negativos y el compensador no podrá generar la acción de control correspondiente a ésta situación. El Prototipo 2 posee una alimentación simétrica, la cual permite a su detector de error calcular valores negativos en la salida, actuando el compensador en correspondencia con esta señal y permitiendo mejorar la respuesta del sistema ante variaciones de carga de usuario.

La figura 7a presenta las formas de onda de la acción de control y la medida de tensión para el Prototipo 1. En la misma se observa que la acción de control posee un valor de 1,2V, lo cual está por debajo de los 12V correspondiente a la tensión de saturación del controlador, para la cual el mismo dejaría de actuar correctamente. La figura 7b presenta las formas de onda de tensión y corriente en bornes del generador, donde puede apreciarse una respuesta con un tiempo de asentamiento de 500ms aproximadamente. La figura 7c indica la acción de control y la medida de tensión para el Prototipo 2, donde puede notarse que la acción de control toma un valor máximo de 7,2V, siendo mayor que en el caso del Prototipo 1, pero sin saturar al controlador. La figura 7d presenta las formas de onda de la tensión y de la corriente en bornes del generador, apreciándose una respuesta con un tiempo de asentamiento de 250ms aproximadamente, lo que hace al compensador integral del Prototipo 2 mucho más rápido en su acción correctiva.

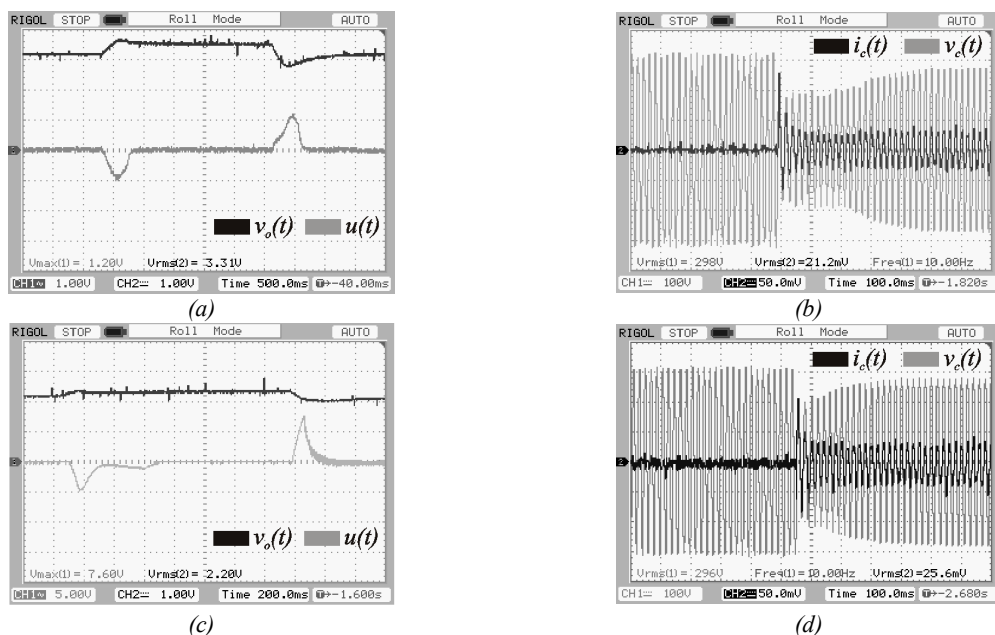


Figura 7: Variación de carga de vacío a nominal. Prototipo 1: (a) Respuesta de la medición de tensión generada y acción de control con variación de carga nominal [Esc: 1V/div.]; (b) Respuesta transitoria de la tensión y corriente del generador ante aplicación de carga nominal [Esc: $v_g(t)$ 100V/div.; $i_g(t)$ 5A/div.]. Prototipo 2: (c) Respuesta de la medición de tensión generada y acción de control con variación de carga nominal [Esc: $u(t)$ 5V/div.; $v_o(t)$ 1V/div.]; (d) Respuesta transitoria de la tensión y corriente del generador ante aplicación de carga nominal [Esc: $v_g(t)$ 100V/div.; $i_g(t)$ 5A/div.].

Otro de los aspectos importantes en estos sistemas de control, es la medición de la tensión generada. A partir de la misma, el controlador debe obtener la potencia activa a ser disipada en la carga balasto y compensar las variaciones ocasionadas en la carga del usuario. Por este motivo, un retardo temporal en la medición de la tensión generada provocará que el sistema de control responda en forma lenta, haciendo notar efectos no deseados en la instalación que alimenta la PCH. Atendiendo a esto, los prototipos poseen distintos circuitos para medir la tensión generada, permitiendo así evaluar sus respectivos comportamientos ante variaciones en la carga de usuario.

En la figura 5 puede apreciarse el primer circuito de medición propuesto. En el mismo, la tensión instantánea proporcionada por el generador es medida a través de un transformador reductor, cuya salida es rectificadora en onda completa a través de los diodos D_5 y D_6 . Esta tensión rectificada, es reducida mediante el divisor resistivo conformado por R_4 y R_5 . Luego, la tensión obtenida es filtrada por el conjunto R_4-C_{13} (filtro pasabajos), produciendo una tensión de corriente continua con amplitud proporcional al valor de la tensión entregada por el generador.

En la figura 6 puede observarse el segundo circuito de medición propuesto. El mismo es semejante al del Prototipo 1, en la figura 5. En este, el filtro pasabajos conformado por R_4-C_{10} provee una tensión continua ondulada entorno al pico de la tensión que proporciona el rectificador. En el Prototipo 2, esta ondulación es ajustada a través de VR_1 , haciendo que la tensión de salida de la etapa de medición “siga” a la tensión de pico del rectificador. Esto permite que la etapa de medición reaccione más rápido ante los cambios en la tensión generada.

El comportamiento de ambos circuitos de medición es evaluado en los dos prototipos, observando la respuesta de la tensión generada ante variaciones en la carga aplicada al generador. Para estos ensayos, los dos prototipos permanecen con un

compensador del tipo integral. La figura 8 detalla las respuestas transitorias del generador conectado al controlador cuando sufre variaciones en la salida, utilizando una carga equivalente a la potencia nominal que puede extraerse del mismo. Se observa que en el caso de usar el circuito de medición correspondiente al Prototipo 2, el sistema de control responde con mayor rapidez, haciendo que la tensión generada alcance antes el valor deseado que en el caso del circuito de medición que utiliza el Prototipo 1.

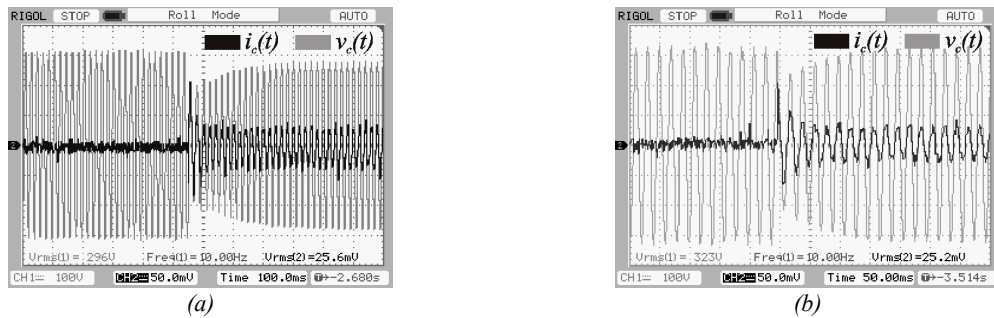


Figura 8: Respuesta transitoria de la tensión y de la corriente del generador ante la aplicación de carga nominal, con distintos circuitos de medición: (a) Prototipo 1, medición de la tensión generada, tiempo de respuesta 350ms. (b) Prototipo 2, medición de la tensión generada, tiempo de respuesta 150ms. [Esc: $v_c(t)$ 100V/div.; $i_c(t)$ 5A/div.]

Mediante los ensayos realizados, puede verificarse que utilizando un compensador integral, como el configurado en el Prototipo 2 en conjunto con una etapa de medición de tensión generada como la que se muestra en la figura 6, el sistema de control por carga balasto permitirá que la tensión de salida de la PCH recupere rápidamente el valor deseado cuando el usuario impone variaciones en la carga.

Además del compensador integral, el Prototipo 2 puede configurarse para operar con otras estructuras de compensación, permitiendo así comprobar si la tensión generada por la PCH puede alcanzar mejores respuestas transitorias ante las variaciones de carga de usuario. Para verificar lo mencionado, se realizan ensayos configurando las distintas opciones de compensación en el Prototipo 2. En cada ensayo, el generador es sometido a variaciones de carga, como así también son utilizadas diferentes tipos de cargas (lineales y no lineales). La figura 9 indica las respuestas a la salida del generador, para el Prototipo 2 configurado con tres tipos de compensadores: I, PI y PI+D. La diferencia en el tiempo de respuesta entre estos compensadores es fácilmente apreciable. En la figura 9a, el compensador integral presenta un tiempo de respuesta lento en comparación a los otros dos compensadores, siendo de 250ms aproximadamente. Para las figuras 9b y 9c, el tiempo de respuesta es el mismo, y aproximadamente de 100ms.

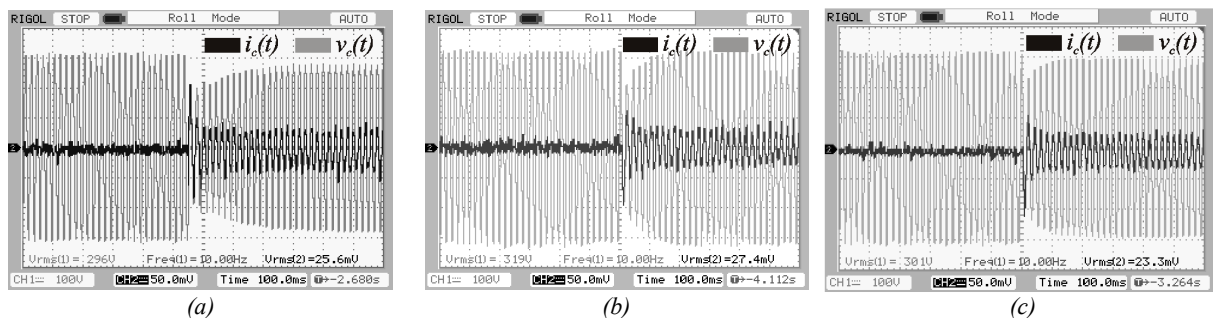


Figura 9: Respuesta transitoria de la tensión y de la corriente del generador ante aplicación de carga nominal, con distintos compensadores: (a) Compensador "I"; (b) Compensador "PI"; (c) Compensador "PI+D". [Esc: $v_c(t)$ 100V/div.; $i_c(t)$ 5A/div.]

Aunque la respuesta de los compensadores PI y PI+D (indicadas en la figura 9b y 9c) acusan el mismo tiempo de asentamiento, el compensador PI+D, gracias a su parte derivativa, produce un amortiguamiento mayor en la respuesta tanto de la tensión como de la corriente entregada por el generador. Esto último es de gran importancia ante variaciones de carga de usuario que impongan grandes picos transitorios de corriente, las cuales demanden una excesiva potencia al generador y hagan que la PCH quede fuera de servicio. Por estos motivos, la configuración del compensador PI+D es la mas adecuada para el controlador presentado en este artículo.

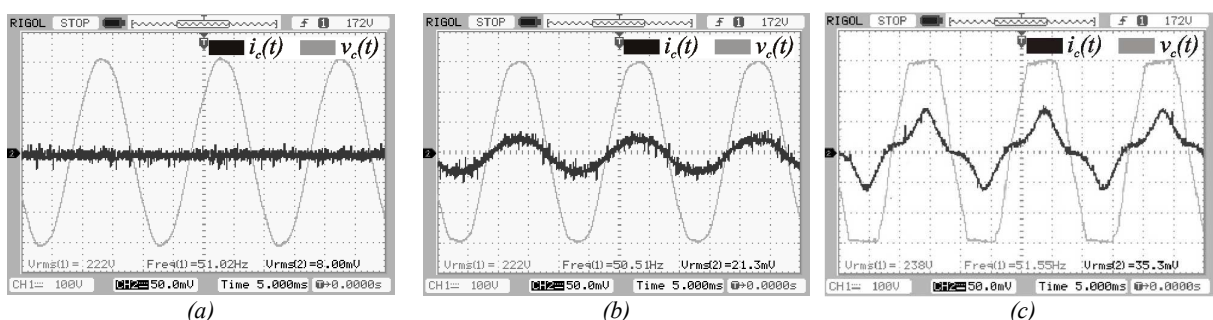


Figura 10: Tensión y corriente en bornes del generador: (a) Sin carga del usuario; (b) Con carga resistiva nominal; (c) Con carga del usuario resistiva nominal más carga no lineal.

La figura 10 presenta el comportamiento de la tensión y corriente a la salida del generador, con el Prototipo 2 conectado (configurado con compensador PI+D) y exponiéndolo a distintos tipos de carga de usuario. La figura 10c corresponde a la salida del generador cuando al mismo es conectado una carga lineal en paralelo con una carga no lineal (constituida por un rectificador con filtro LC). En este caso, los valores de tensión y frecuencia generada aumentan levemente debido a la potencia reactiva que consume este tipo de cargas. Como puede observarse en la figura 10, el generador está proporcionando energía eléctrica con un valor de voltaje eficaz y frecuencia prácticamente constantes, inclusive ante situaciones desfavorables (como ser las cargas no lineales), manteniendo la operación del sistema de generación en un punto óptimo de funcionamiento.

Para concluir, puede expresarse que el controlador propuesto en el Prototipo 2 (con compensador PI+D) es sencillo de implementar, presenta un bajo costo en comparación a los controladores importados que se encuentran en el mercado, y también exhibe un buen desempeño, tanto para régimen permanente como en régimen transitorio. Por lo cual, es una buena opción para ser empleada en PCH que operan de forma aislada y utilizan “tecnología apropiada”. El controlador, con el compensador indicado, permitirá aprovechar el potencial hidroeléctrico que existe en numerosas zonas aisladas de nuestro país (montañas, serranías, etc.), proporcionando energía eléctrica con calidad aceptable y así cubriendo necesidades socioeconómicas como ser: iluminación, refrigeración, calefacción, comunicación, entre otras.

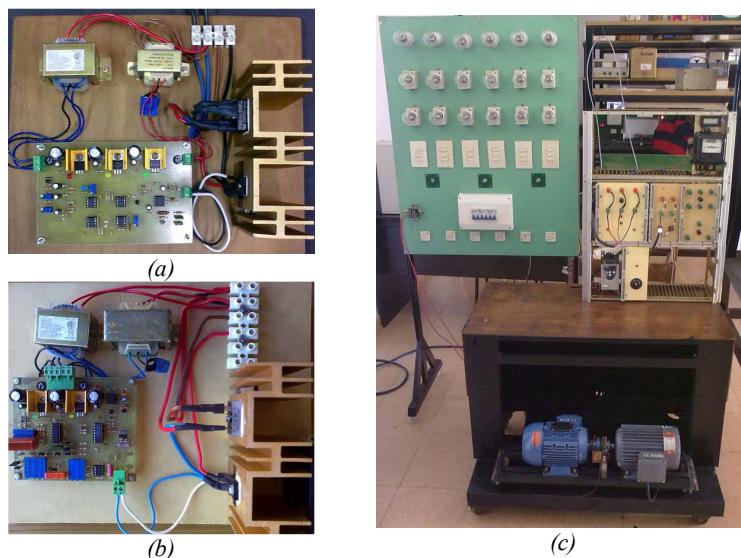


Figura 11: a) Prototipo 1; b) Prototipo 2; c) Banco de ensayos, motor-generator.

REFERENCIAS

- Chapallaz J. M., Dos Ghali J., Eichenberger G., Fischer G. (1992). “Manual on induction motors used as generators”. Harnessing water power on small scale, Vol. 10, pp. 10-12, 67-80.
- Kurtz V. H. y Anocibar H. R. (2005). “Sistema mixto para el control de la generación en microcentrales hidroeléctricas”. XI Encuentro Latinoamericano Sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos, ELPAH 2005.
- Fernández G. A., Kairiyama J. C., Botterón F., Kurtz V. H. (2010). “Control de carga balasto por periodos de conducción, aplicado a regulación de frecuencia de la tensión generada en micro y pico centrales hidroeléctricas”. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.14, p.p.06.01-06.08, ASADES2010, Argentina.
- Kurtz V. H. y Botterón F. (2006). “Alternativa para el control de cargas balasto”. Revista Hidrored (ISSN 0935-0578), número 1, año 2006, pp. 2-9.
- Benítez J. M., Botterón F., Kurtz V. H. (2009). “Proyecto e implementación de un convertidor CC-CC tipo BUCK para control de carga balasto”. XXIII Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, CRICTE2009, Brasil.
- Kairiyama J. C., Fernández G. A., Kurtz V. H. (2009). “Sistema de automatización, supervisión y control del Aprovechamiento Hidroeléctrico Arroyo El Tigre. La máquina de estado como herramienta de diseño”. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.13, (6), p.p.195-201, ASADES09, Argentina.
- Botterón F., Kurtz V. H., Dose A., Audisio O. A., Marchegiani A. R. (2009) “Controle Simples de Tensão e Freqüência de um Gerador de Indução Assíncrono Acionado por uma Micro-Turbina Hidráulica”. VI SNCA - Seminário Nacional de Controle e Automação Industrial, Elétrica e de Telecomunicações, Brasil.
- Brown M. (2001). “Power supply cookbook”, 2da. edición, pp. 66-69. Newnes, 2001.

ABSTRACT: This paper presents a comparative analysis of different compensation structures, for the control of voltage and frequency of self-excited induction generators, applied to small hydropower (SHP). The analysis is carried out by the results obtained with the implementation of two prototype of dummy load control. Both prototypes use only the measure of the generated voltage to control the voltage and frequency. The first prototype uses a fixed compensation structure and the second one has different structures, configurable to study the characteristics of control over the generation system. The transient and steady-state response of these prototypes has been verified in a motor-generator module of 1HP. Comparative analysis of the experimental results was done by observing the response of the voltage generated for different levels and types of loads, linear and nonlinear, using different compensation structures provided by the prototypes mentioned.

Keywords: Small hydroelectric plants, ballast load control, induction generator, PI, PID, PD.