

# ALTERNATIVA PARA EL CONTROL DE CARGAS BALASTO

Ing. Kurtz, Victor Hugo - Ing. Botterón, Fernando  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES - UNaM  
Facultad de Ingeniería – Dpto. de Electrónica  
Juan Manuel de Rosas 325 – CP 3360  
Tel /Fax (+54) 3755 – 42 2169 / 42 2170 / 42 6023 Int. 117  
E-mail: kurtzvh@fiobera.unam.edu.ar E-mail: botteron@fiobera.unam.edu.ar  
Oberá, Misiones - ARGENTINA

## RESUMEN

En este trabajo se propone una alternativa para el control de cargas balasto, utilizadas para la regulación de la frecuencia de la tensión generada en PCH (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas), que operan en forma aislada.

La alternativa que aquí se propone, se basa en la utilización de semiconductores de potencia denominados MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* - Transistor Semiconductor de Oxido Metálico por Efecto de Campo) que pueden reemplazar con ventajas a los “tiristores”, que son otro tipo de interruptores de estado sólido, que se vienen utilizando desde hace tiempo en la microgeneración hidroeléctrica.

Se aborda en esta oportunidad la etapa final del control de potencia, el análisis de la topología utilizada y distintos circuitos de comando de los MOSFET.

Con este aporte se pretende señalar una opción económica y relativamente simple, para el control de cargas resistivas, sin perder de vista las premisas fundamentales de la “tecnología apropiada” [Ref. 7].

## INTRODUCCION

Existen básicamente dos métodos para el control automático de la frecuencia de la tensión generada en un sistema microhidroeléctrico de operación aislada; Uno por control de carga balasto *dummy load control* - control de carga ficticia) [Casanave et al. 2001] y otro por variación de caudal turbinado (*flow control* control por flujo), [Coz et al. 1995]

### Sistema de Regulación por Carga Balasto

El sistema de control por carga balasto (o ficticia), consiste en mantener constante la potencia generada. Es decir; la máquina funciona a potencia constante:

$$P_G = P_D + P_C \quad (1)$$

Donde:

$P_G$  : Potencia generada.

$P_D$  : Potencia disipada en la carga balasto.

$P_C$  : Potencia consumida

La energía no consumida por el usuario, se disipa en forma de calor, en una o más resistencias, denominadas comúnmente resistencia balasto (carga lastre o dummy load), ubicadas generalmente en la casa de máquina, como indica la Fig. 1.

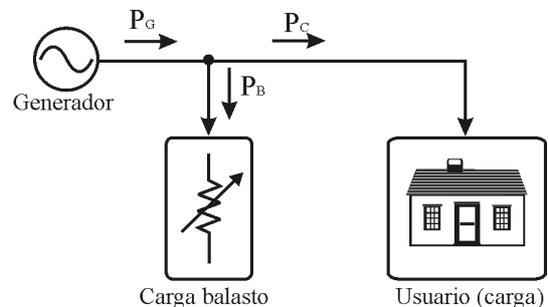


Fig. 1 – Sistema de regulación por carga balasto.

La porción de energía enviada hacia la resistencia balasto, es función de la frecuencia de la tensión generada. El sistema de control compara permanentemente la frecuencia generada con un valor de referencia. Si la frecuencia generada es mayor que la de referencia, el sistema deriva más energía hacia las resistencias balasto.

De la misma manera, si la frecuencia generada es menor que la de referencia, el regulador deriva menos energía hacia la resistencia balasto.

Para el control de la potencia disipada en la resistencia balasto, se utilizan normalmente tiristores o triacs, como llaves electrónicas.

Los tiristores o triacs son conmutados controlando el ángulo de conducción respecto a la onda de tensión generada (lo que se denomina control por ángulo de fase). Este tipo de control recorta la onda de tensión, limitando de esta forma la potencia entregada a la carga ficticia. Esta deformación de la forma de onda senoidal, produce armónicas de frecuencia elevada que se traducen en perturbaciones en el espectro de radio frecuencia (RF), que pueden afectar la recepción de ondas de radio en la zona donde se ubica el micro aprovechamiento hidroeléctrico.

Una solución alternativa al problema antes mencionado, se encuentra en la utilización del transistor MOSFET de potencia, operando en conmutación, con una frecuencia de operación elevada, mucho mayor que la utilizada en el control con tiristor.

En este caso, no se disminuye necesariamente la emisión de interferencias electromagnéticas, pero el diseño de filtros utilizados para atenuar tal emisión, es más simple que para el tiristor y por tanto más económico.

Por otro lado, el uso de MOSFET, posibilita dotar al sistema de un control eficaz contra cortocircuitos y efectuar una regulación mas fina de la carga.

El objetivo de este trabajo, es presentar topologías de simple construcción con componentes de bajo costo y de fácil adquisición en el mercado.

### CONFIGURACIONES POSIBLES

La opción mas económica es utilizar un único MOSFET. Teniendo en cuenta que esta llave es unidireccional en tensión y bidireccional en corriente (debido al diodo en anti-paralelo conectado entre drenador y surtidor). Por tanto, considerando que la potencia a controlar es alternada, la alternativa consiste en instalar el MOSFET, dentro de un puente de Graetz. En la fig. 2, se muestra la topología propuesta para generación monofásica. En esta configuración la corriente que circula por la carga es alternada mientras que por el transistor circula corriente continua.

Esta topología parece la mas obvia, sin embargo como se pretende que el MOSFET funcione en alta frecuencia de conmutación, los diodos que forman el puente de Graetz deberán ser del tipo “rápidos” (*Fast Recovery Diodes*). Estos diodos rápidos, no son muy comunes y por ende de costo elevado, especialmente para corrientes mayores de 3 A .

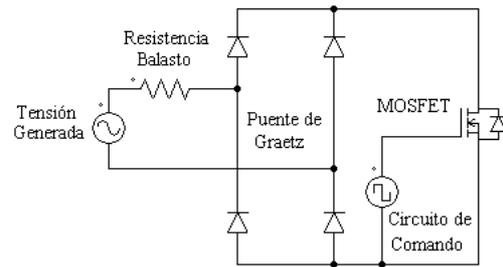


Fig. 2 – Control de potencia con la carga en alterna

En la Fig. 3 se puede observar la forma de onda troceada de la corriente CA (corriente alterna) que circula por la carga balasto.

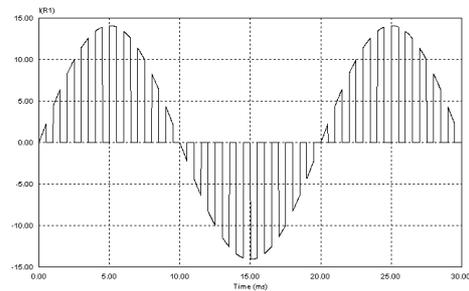


Fig. 3 – Forma de onda de la corriente sobre la resistencia balasto.

En la Fig. 4 se muestra la forma de onda de la corriente pulsante CC (corriente continua) a través del MOSFET.

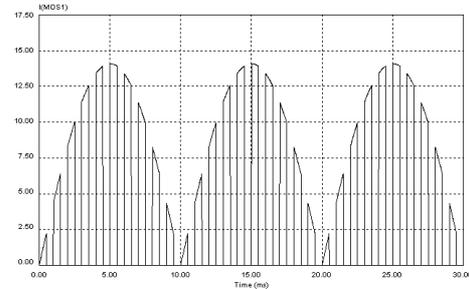


Fig. 4 – Forma de onda de la corriente sobre el MOSFET.

### Circuito Propuesto

Como la carga balasto generalmente es resistiva pura, o sea, la inductancia resultante puede ser despreciada, y por tanto toda la potencia disipada en la carga balasto es activa, es posible ubicar la resistencia balasto, del lado de CC, en serie con el MOSFET.

En la Fig. 5 se presenta la topología comentada en el parágrafo anterior, con la resistencia del lado CC.

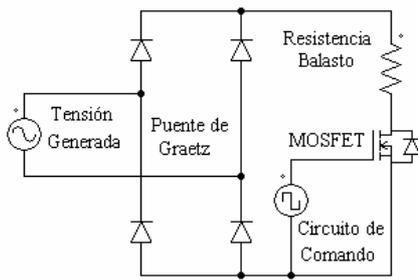


Figura 5 – Control de potencia las resistencias del lado CC.

En las figuras 6 y 7 se pueden observar las formas de onda de la corriente a través de las resistencias y de la llave de potencia. La misma es una corriente continua periódica pulsante.

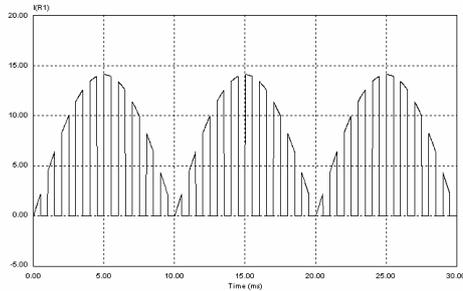


Fig. 6 – Forma de onda de la corriente pulsante sobre la resistencia balasto.

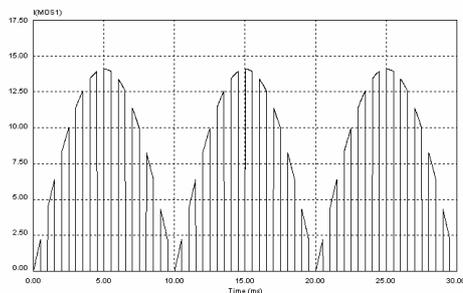


Fig. 7 – Forma de onda de la corriente pulsante sobre el MOSFET.

Es importante mencionar, que en el caso de generación trifásica es necesario agregar a la topología propuesta, solamente dos diodos, como muestra la Fig. 8.

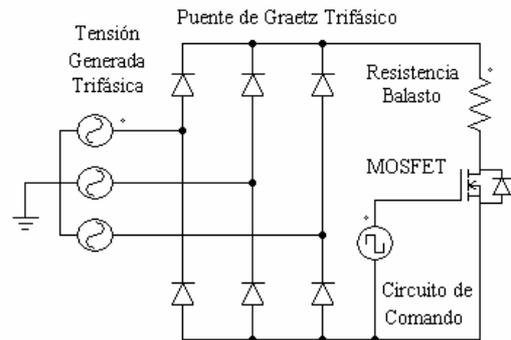


Fig. 8 - Control de potencia por MOSFET en sistemas trifásicos.

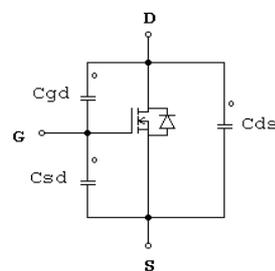
### COMANDO DE MOSFET

El MOSFET es un dispositivo controlado por tensión, lo que simplifica el circuito de comando para la entrada y salida de la conducción, constituyendo una ventaja si se compara por ejemplo, con el comando de transistores bipolares de potencia o el control por ángulo de fase en tiristores.

La entrada en conducción se consigue cuando la tensión puerta-surtidor sobrepasa la tensión de umbral, lo que fuerza al MOSFET a entrar en la región de trabajo denominada “región ohmica”. Mientras que la salida de conducción se consigue con una tensión menor a la de umbral [Mendoza et al. 2004].

Los MOSFET de potencia presentan capacidades parásitas entre sus terminales, las que influyen en la entrada y salida de los estados de conducción. Estas capacidades intrínsecas deben tenerse en cuenta para que no provoquen atrasos en la conmutación. O sea, el circuito de comando debe proveer un camino de carga y descarga rápida de las capacidades de entrada del MOSFET [Kurtz 1999].

La Fig. 9 muestra el circuito equivalente del MOSFET y las tres capacidades intrínsecas.



**C<sub>gs</sub>** : Capacitancias parásitas entre la puerta y el surtidor.

**C<sub>sd</sub>** : Capacitancias parásitas entre el surtidor y el drenador.

**C<sub>ds</sub>** : Capacitancias parásitas entre el drenador y el surtidor.

Fig. 9 - Capacidades distribuidas en un MOSFET.

El circuito equivalente en conmutación de un MOSFET de potencia se muestra a continuación

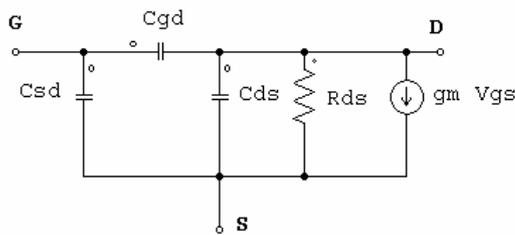


Fig. 10 - Circuito de conmutación equivalente.

### Excitación de la Compuerta

El tiempo de excitación de la compuerta puede reducirse si se conecta un circuito RC, como se muestra en la Fig. 11, para cargar más rápidamente la capacitancia de puerta.

Cuando se energiza la puerta, la corriente inicial debido a la capacitancia de puerta es:

$$I_g = \frac{V_g}{R_s} \quad (2)$$

Una vez en régimen permanente, la tensión en la puerta se transforma en:

$$V_{gs} = \frac{R_g \cdot V_g}{R_s + R_1 + R_g} \quad (3)$$

Donde  $R_s$  representa la resistencia interna de la fuente de excitación de la compuerta.

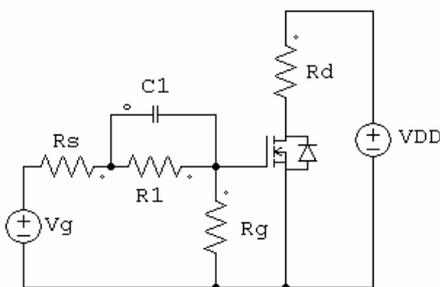


Fig. 11 - Circuito de accionamiento de un MOSFET de potencia.

A los efectos de aumentar el tiempo de conmutación, alrededor de los 100 ns o menos, el circuito de excitación debe presentar baja impedancia de salida y relativamente alta capacidad de proveer o absorber grandes corrientes.

Un circuito posible para la excitación del MOSFET y mejorar la entrada y salida de conducción, puede estar formado por dos transistores, bipolares de conmutación, uno PNP y otro NPN, en configuración "Push-Pull" y como seguidor de emisor, la cual presenta baja impedancia de salida. La Fig. 12, muestra el esquema eléctrico del circuito ensayado.

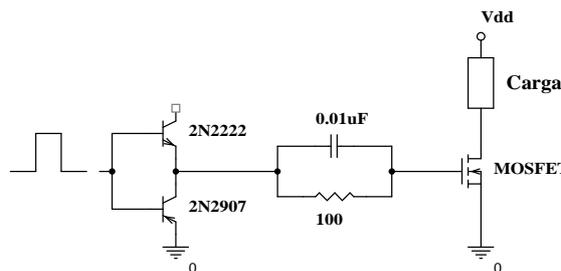


Fig. 12 - Sistema de excitación para MOSFET utilizando transistores bipolares de conmutación.

Otro de los circuitos ensayados, utiliza un solo circuito integrado de la serie CMOS, tipo HCF4009 o 4049B, formado por compuertas inversoras conectadas como se muestra en la figura 13. La conexión en paralelo de las compuertas permite obtener una alta capacidad de corriente, necesaria para el disparo del MOSFET de potencia.

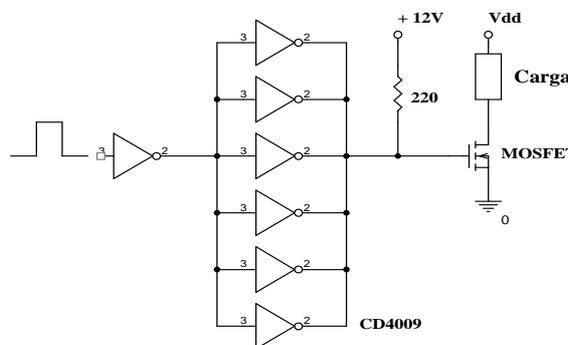


Fig. 13 - Circuito de excitación de elevada capacidad de corriente con compuertas lógicas.

En la mayoría de los casos prácticos es importante aislar galvánicamente la etapa de potencia del circuito de comando del MOSFET.

Para este caso se ha ensayado el circuito representado en la figura 14, el cual que utiliza un transformador de

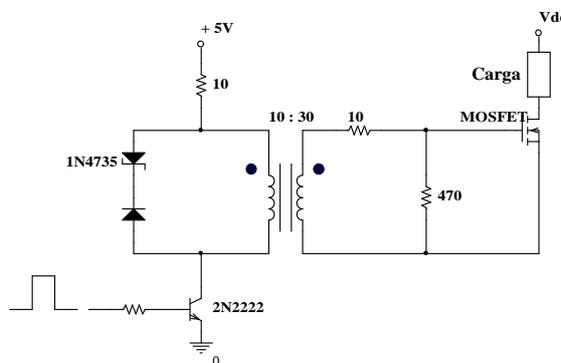


Fig. 14 - Circuito de excitación con transformador de pulso.

pulso, comandado por un transistor bipolar de conmutación.

Un circuito mejorado para la excitación de MOSFET, con aislación galvánica, es el que se muestra en la Fig. 15. La etapa de potencia queda aislada a través de un acoplador óptico. Este circuito fue propuesto por [Baggio, 1997].

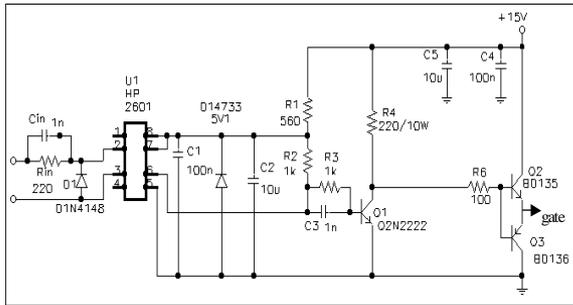


Fig. 15 -. Exitador optoacoplado. Conmutación severa con perdidas de conmutación.

A medida que la frecuencia de conmutación aumenta, las respectivas pérdidas también aumentan, necesiándose por lo tanto un circuito adicional de ayuda a la conmutación, de manera que la misma se realice en forma suave, o sea, sin la presencia simultánea de la corriente y la tensión entre los terminales de drenador (drain) y fuente o surtidor (source). En estos casos, para no incrementar el costo del sistema, se puede utilizar un circuito “snubber” o adicionar otra etapa, también simple y económica, que permita la conmutación en cero de tensión, como se muestra en la figura 16.

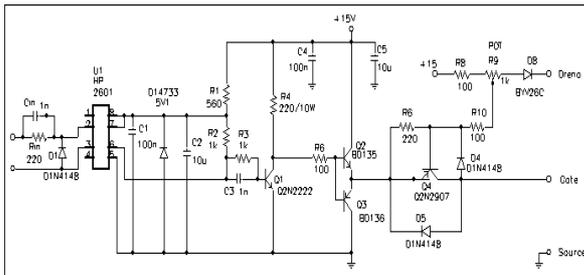


Fig. 16 - Exitador optoacoplado. Conmutación suave en tensión cero.

La característica de conmutación en cero de tensión, se puede apreciar en el resultado experimental que muestra la Fig. 17, donde  $V_{DS}$  es la tensión entre drenador y surtidor y  $V_{GS}$  es la tensión de disparo entre la puerta (gate) y surtidor (source). Observase que el pulso de tensión de entrada  $V_{GS}$  comienza a cambiar de nivel (o sea, la llave comienza a conducir) recién cuando la tensión  $V_{DS}$  llegó a cero.

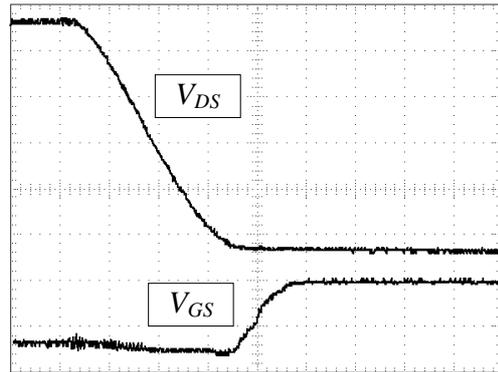


Fig. 17. Resultado experimental. Conmutación suave. Tensión drenador-surtidor versus tensión puerta-surtidor.

### Ventajas del Control con MOSFET

- ❖ Tiempos de conmutación extremadamente cortos, permitiendo la operación con frecuencias elevadas.
- ❖ Alta impedancia de entrada entre puerta (G) y surtidor (S). Haciendo que la potencia consumida sea menor, obteniéndose al mismo tiempo ganancias mas elevadas comparadas al TBP (Transistor Bipolar de Potencia). Se reduce también la complejidad de los circuitos de comando.
- ❖ El área de operación segura (SOA – Zona de Operación Segura - *Safe Operating Area*) es mucho mayor, no existiendo el fenómeno de 2ª avalancha existente en los TBP, región fácil de alcanzar si no se proyecta adecuadamente el circuito de entrada y salida en conducción, o no está bien refrigerado.
- ❖ El MOSFET es más fácil de ser asociado en paralelo debido sobretodo, a que la resistencia en estado de conducción tiene un coeficiente de temperatura positivo. Esto permite aumentar la corriente de carga agregando llaves en paralelo de las mismas características de las que ya se encuentran en el circuito, sin necesidad de una red de equalización.

### CONCLUSIONES

Este trabajo propone una alternativa económica para el control de la potencia en resistencias balasto, usadas para la regulación de la frecuencia de la tensión generada en microaprovechamientos hidroeléctricos que operan en forma aislada. Esta alternativa aborda específicamente la etapa final de control de la potencia sobre las resistencias, resaltando las ventajas en el uso de MOSFET de potencia operando en frecuencias de conmutación elevadas.

Se presentaron diferentes topologías en las cuales puede ser usado el MOSFET de potencia, utilizando un simple puente de Graetz, tanto monofásico como trifásico. La variación de la potencia consumida por las resistencias se realiza troceando la tensión CC con un ancho de pulso que depende de la diferencia de

frecuencia generada con respecto a un valor de referencia.

Fueron presentados los diversos circuitos de conmutación probados en laboratorio, con y sin aislación galvánica, e incluso con un circuito de ayuda a la conmutación para disminuir las pérdidas por conmutación a medida que la frecuencia aumenta.

Se puede afirmar que los MOSFET substituyen con grandes ventajas a los tiristores y transistores bipolares de potencia, para el control de carga balasto en microaprovechamientos Hidroeléctricos.

Finalmente hay que remarcar que en la actualidad los MOSFET de potencia, se consigue fácilmente en el mercado y a costos reducidos, al igual que los componentes necesarios para implementar el control de carga.

#### **REFERENCIAS**

1. BAGGIO, JOSÉ EDUARDO, (1997) “Estudo Teórico e Experimental de um Circuito Ativo de Auxílio à Comutação para Inversores com PWM Três Níveis”, Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria, RS, Brasil.
2. BERGTOLD, F.(1980). Triac, Thyristoren 1 und 2. Verlag und Druckerei M Frech, Stuttgart-Botnagnf –D.
3. CASANAVE, M. L.; FERNANDEZ, P. C. SOLANO, C.V (2001). Nuevo Sistema de Regulación de Turbogeneradores para Minicentrales Hidroeléctricas. IX ELPAH - Encuentro Latinoamericano y del Caribe, Sobre Pequeños Aprovechamiento Hidroenergéticos.
4. COZ, F., SANCHEZ, T., RAMIREZ GASTÓN, J. (1995) Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas. Una guía para el desarrollo de proyectos. ITDG-Lima Perú.
5. KURTZ, VICTOR H. (1999) Sistemas de Alimentación Ininterrumpidos UPS- Universidade Federal de Santa María - Centro de Tecnología, Brasil y Universidad Nacional de Misiones Facultad de Ingeniería- Argentina
6. MENDOZA HORACIO A., SERRANO MIGUEL I., y GENTILE FRANCISCO R. (2004) Variador de Velocidad de Motores Trifásicos Asincrónicos Trabajo de fin de curso: Proyecto y Diseño Electrónico, Facultad de Ingeniería U.Na.M.
7. TECNOLOGÍA APROPIADA - [www.llacta.org/organiz/coms/com62.htm](http://www.llacta.org/organiz/coms/com62.htm)