

Estrategia de control para el equilibrado de corriente en transistores IGBT conectados en paralelo

Raúl Pérez*, Manuel Román*, Guillermo Velasco*

* Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona (EUETIB-CEIB)
 Departament d'Enginyeria Electrònica (DEE) – Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
 Email: raul.perez-delgado@upc.edu

Resumen—En este artículo se realiza un breve estudio sobre las características que influyen en el reparto de corriente entre semiconductores conectados en paralelo. El estudio se centra en el reparto de corriente en transistores IGBT conectados en paralelo y los mecanismos que permiten compensar dicho reparto. Para ello se proponen dos estrategias de control para el equilibrado de corriente que están basadas en un caso en el cálculo del valor medio de la corriente y en el otro, en la asociación de parejas de transistores. Finalmente se presentan resultados experimentales basados en las estrategias de control propuestas.

I. INTRODUCTION

LA asociación en paralelo de interruptores permite incrementar las prestaciones a partir de interruptores más pequeños. Cuando se requieren elevadas potencias se tiende a recurrir a módulos basados, en algunos casos, en la conexión en paralelo de interruptores integrados [1] a [4]. En aplicaciones en las que el precio de los semiconductores puede resultar determinante, la asociación en paralelo de interruptores discretos permite reducir la relación coste-Amperio del interruptor [5].

El problema que se presenta en estos casos es debido al reparto desequilibrado de las corrientes entre los semiconductores. La mayoría de fabricantes de transistores de potencia suelen facilitar notas de aplicación que describen técnicas que favorecen el reparto de corriente entre dispositivos conectados en paralelo [6], [7].

Cuando se habla de reparto de corriente entre transistores resulta conveniente diferenciar entre reparto estático y reparto dinámico. Se considera reparto de corriente estático cuando el estado de conducción de los transistores se mantiene durante un cierto tiempo. En el caso de los transistores MOSFET, el reparto estático de corriente depende principalmente de la resistencia de conducción (R_{DSon}). Esta resistencia tiene un coeficiente de temperatura positivo y como consecuencia tiende a ecualizar las corrientes que circulan a través de los transistores. No obstante, deben tomarse en consideración otros aspectos tales como la temperatura de la unión (T_j) y la corriente de drenador (I_D) puesto que de estos parámetros depende R_{DSon} . En estos casos, es muy eficaz el acoplamiento térmico de los transistores como método de reparto de corriente. Dicho acoplamiento tiende a igualar la temperatura en el disipador evitando de este modo un mayor desequilibrio de T_j .

El término dinámico no solo hace referencia a las transiciones de corte a conducción, también al reparto de corriente en aquellos casos en los que los ciclos de trabajo son pequeños y los mecanismos de reparto de corriente estático puedan ser despreciados. En los transistores MOSFET el reparto de corriente dinámico es sensible a parámetros tales como la transconductancia (g_m), la tensión umbral puerta-surtidor (V_{GSth}), las capacidades de puerta, la resistencia de conducción y al driver de activación de los transistores. Transistores con características g_m iguales permiten repartos simétricos de corriente (1).

$$g_m = \frac{\delta i_D}{\delta v_{GS}} \quad (1)$$

En el caso de los transistores IGBT, el coeficiente de temperatura de la resistencia de conducción es negativo de modo que la circulación de corriente a través de transistores en paralelo tiende a incrementar el desequilibrio.

En este artículo se realiza un breve estudio de aquellas características que provocan la falta de equilibrio en el reparto de corriente en transistores IGBT y qué medidas pueden tomarse con el objetivo de equilibrarlas. Para ello, se comparan dos estrategias de control para el equilibrado de corriente. Algunos autores proponen el cálculo del valor medio de la corriente entre transistores como estrategia de control para el equilibrado [8]. En este artículo se presenta otra estrategia basada en la asociación de parejas de transistores. Finalmente se muestran resultados de ensayos experimentales obtenidos con el esquema de control propuesto.

II. REPARTO DE CORRIENTE

La g_m y la tensión V_{GEth} son las características que contribuyen en mayor medida al desequilibrio del reparto de corriente en IGBTs conectados en paralelo (2), (3).

La existencia de inductancias parásitas en el emisor (L_e) del transistor influye también en el reparto de corriente. Las fuertes variaciones de corriente asociadas a la conmutación del transistor provocan la aparición de valores de tensión lo suficientemente elevados como para modificar la tensión de puerta del transistor en el instante de activación.

$$I_C \cong g_m(V_{GE} - V_{GEth}) \quad (2)$$

$$V_{GE} = V_{driver} + v_{Le} = V_{driver} + L \frac{dI_C(t)}{dt} \quad (3)$$

La Fig.1 muestra el modelo simplificado de un transistor IGBT [9] y en la Fig.2 se muestra la evolución de la tensión de puerta y la corriente de colector según la relación V_{GEth} y g_m de un IGBT y la desviación de esta característica para variaciones de un $\pm 10\%$ de los valores nominales. La variación de las características tecnológicas de los transistores da lugar a un reparto no equitativo de la corriente que circula a través de estos dispositivos.

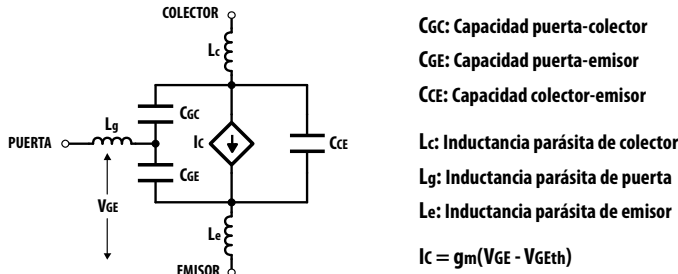


Fig.1. Modelo equivalente simplificado de un transistor IGBT

Para observar este comportamiento, se ha simulado el funcionamiento de un conmutador constituido por dos transistores IGBT en paralelo operando en un convertidor elevador (Fig.3). Las características del circuito de simulación se resumen en la Tabla I.

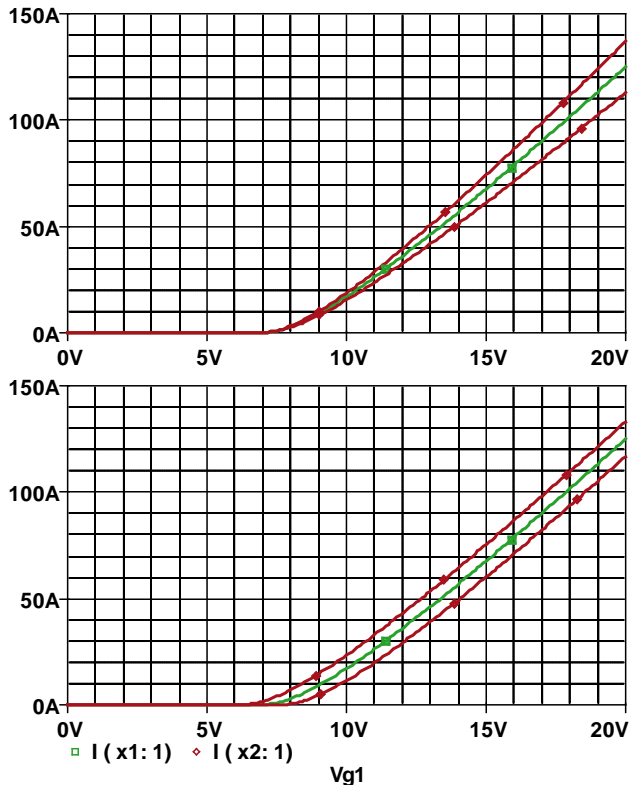


Fig.2. Simulación de la relación Tensión de puerta (V_{g1}) – Corriente de colector (I_{x1}) de un IGBT (STGP7NC60HD de ST) en las siguientes condiciones: a) variación de un $\pm 10\%$ de la tensión umbral y b) variación de un $\pm 10\%$ del valor de transconductancia.

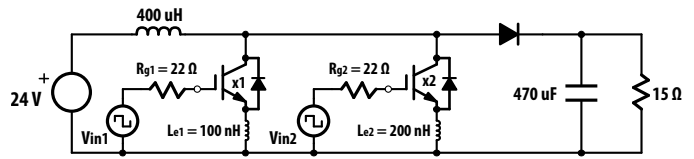


Fig.3. Convertidor elevador con conmutador basado en dos transistores IGBT conectados en paralelo.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO DE SIMULACIÓN

Símbolo	Descripción	Valor
x1, x2	IGBT: STGP7NC60HD ^[1]	
V_{GEth}	Tensión umbral	$V_{GEth(x2)} = 0.9 \cdot V_{GEth(x1)}$
g_m	Transconductancia	$g_{m(x2)} = 1.1 \cdot g_{m(x1)}$
R_{g1}, R_{g2}	Resistencia de puerta en IGBT x1 y x2	22 Ω
L_{e1}, L_{e2}	Inductancia parásita emisor de x1 y x2	100 nH, 200nH
L	Inductancia	400 μ H
V_{in}	Tensión de entrada	24 V
DC	Ciclo de trabajo	42 %
C	Capacidad de salida	470 μ F
R_L	Resistencia de carga	15 Ω

[1] Modelo de simulación SPICE de ST Microelectronics.

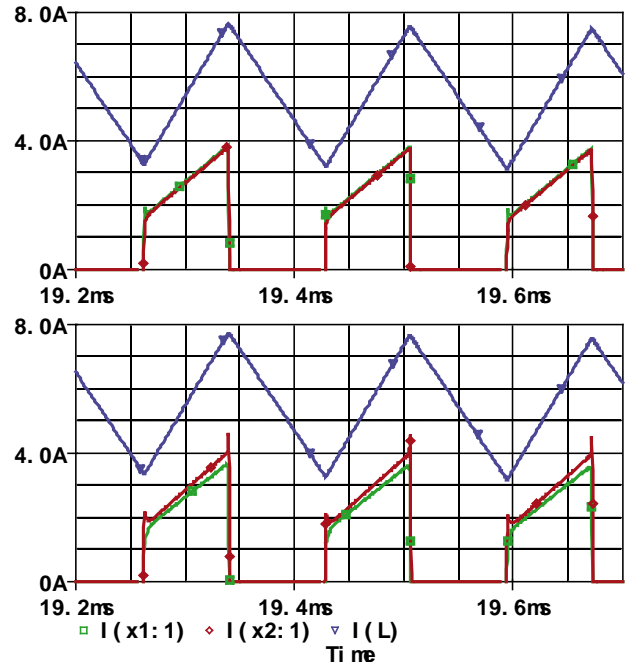


Fig.4. Corriente de colector a través de los transistores x1 y x2, a) transistores idénticos y b) tensión umbral y transconductancia según la relación mostrada en la Tabla I.

Los resultados de simulación muestran dos situaciones distintas. En la Fig.4a se muestra la corriente a través de dos transistores idénticos. Las diferencias en la corriente de conmutación se deben únicamente al valor de la inductancia parásita de emisor, no obstante, el reparto de corriente es adecuado. La Fig.4b muestra la misma simulación pero modificando las características del transistor según la relación mostrada en la Tabla I. En la figura se observa el desequilibrio en el reparto de corriente entre los dos transistores. Esta situación de desequilibrio podría verse aún más perjudicada si se tomara en consideración el efecto térmico en la conducción

de los transistores. Con el objetivo de tomar alguna acción que permita reducir o eliminar el desequilibrio, se observará el efecto que produce la variación del valor de la resistencia de puerta y la variación del nivel de tensión de activación de los transistores en el reparto de la corriente de conmutación.

A. Variación de la resistencia de puerta

El ajuste del valor de la resistencia de puerta modifica el tiempo de carga de la capacidad de puerta del transistor IGBT. Este método, utilizado por algunos drivers para reducir las pérdidas de conmutación, mejora el comportamiento transitorio en la conmutación del transistor [10]. La Fig.5 muestra el efecto que produce en la corriente de conmutación la variación del valor de la resistencia de puerta.

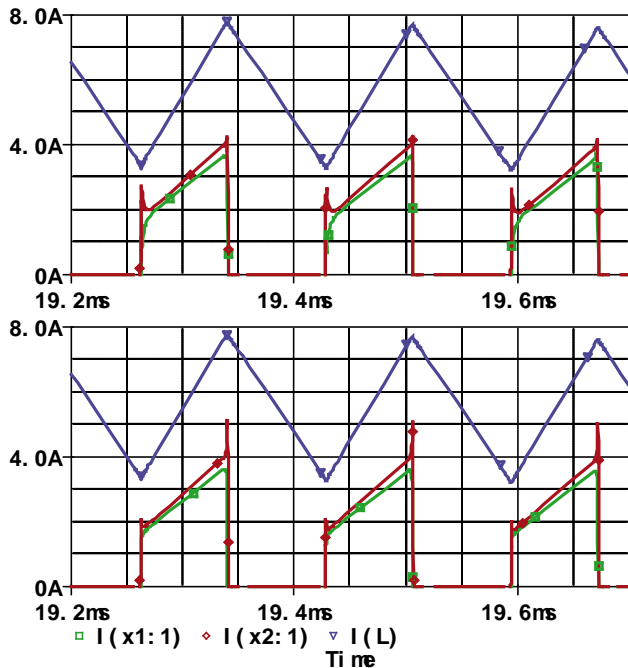


Fig.5. Variación de la resistencia de puerta, a) $R_{g1} = 150 \Omega$ y $R_{g2} = 22 \Omega$, b) $R_{g1} = 22 \Omega$ y $R_{g2} = 150 \Omega$.

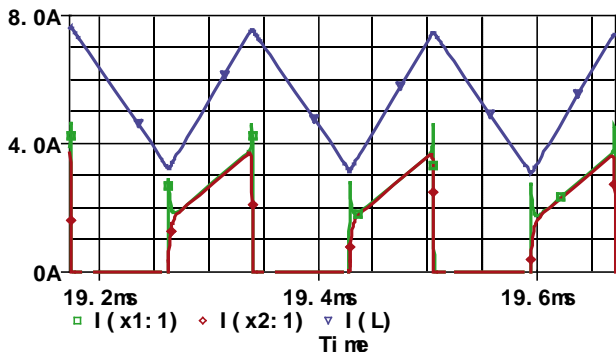


Fig.6. Efecto de la variación del nivel de tensión de activación de los transistores conectados en paralelo $V_{GE(X1)} = 15 \text{ V}$ y $V_{GE(X2)} = 12.5 \text{ V}$.

Según los resultados obtenidos puede afirmarse que la variación del valor de la resistencia de puerta mejora el transitorio de conmutación pero no permite equilibrar significativamente el reparto de corriente entre transistores conectados en paralelo.

B. Variación de la tensión de puerta

Se ha modificado el valor de la tensión de puerta para comprobar el efecto que este cambio produce en el reparto de corriente. La Fig.6 muestra que sí es posible equilibrar la corriente a través de IGBTs conectados en paralelo modificando el nivel de tensión de activación del transistor. En el siguiente apartado se presentan posibles estrategias de control de la tensión de activación de los transistores para equilibrar el reparto de la corriente de conmutación.

III. CONTROL DE REPARTO DE CORRIENTE

Los resultados obtenidos en el apartado anterior muestran que el ajuste de los niveles de tensión de la señal de activación de los transistores es un método válido para reducir e incluso cancelar el desequilibrio de la corriente que circula a través de asociaciones en paralelo de IGBTs.

En el artículo [8] se presentan técnicas para aumentar el rango de tensión y corriente en conmutadores basados en transistores IGBT mediante la conexión serie o paralelo de estos dispositivos. En el artículo se propone un esquema de control para equilibrar la corriente que circula a través de IGBTs. El esquema de control modifica, mediante el sensado de la corriente de cada uno de los transistores, el nivel de tensión de puerta que debe aplicarse para repartir de forma equitativa la corriente que circula a través de cada transistor. La referencia del circuito se obtiene mediante el cálculo del valor medio de la señal de corriente sensada. La Fig.7 muestra una posible implementación del esquema de control descrito. Las ecuaciones (4) a (7) describen la relación entre los niveles de tensión de control de los transistores y la corriente que circula a través de ellos.

$$V_{driver} = V_{PWMi} + \Delta V_i \quad (4)$$

$$\Delta V_i = k_p (V_{sAVG} - \overline{V_{sI}}) + k_i \int (V_{sAVG} - \overline{V_{sI}}) dt \quad (5)$$

$$V_{s(AVG)} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{sI}}{n} \quad (6)$$

$$V_{sI} = G_s \cdot I_{x_i} \quad (7)$$

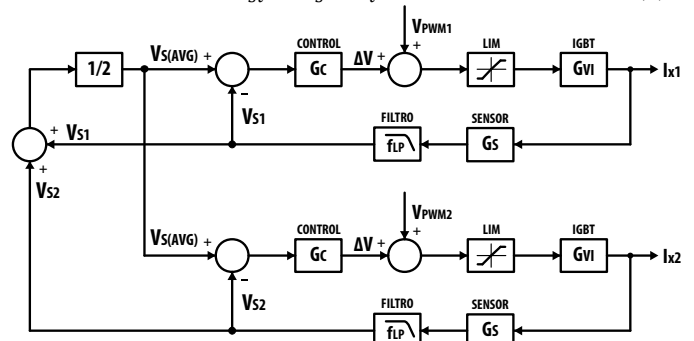


Fig.7. Estrategia de control de reparto de corriente mediante el cálculo del valor medio.

En este trabajo se propone un método alternativo que recurre a la asociación de parejas de transistores como método de control de reparto de corriente (Fig.8). La diferencia del método que se propone con el mostrando en la Fig.7 está en suprimir el cálculo del valor medio puesto que el control de reparto equitativo de corriente considera, de forma implícita,

la obtención del valor medio de la corriente que circula a través de los transistores. El número de asociaciones dependerá del número de transistores que constituya el conmutador del convertidor, según la relación mostrada en las ecuaciones (8) y (9).

$$\Delta V_i = k_p(\overline{V_{s_j}} - \overline{V_{s_i}}) + k_i \int (\overline{V_{s_j}} - \overline{V_{s_i}}) dt \quad (8)$$

$$\Delta V_j = k_p(\overline{V_{s_i}} - \overline{V_{s_j}}) + k_i \int (\overline{V_{s_i}} - \overline{V_{s_j}}) dt \quad (9)$$

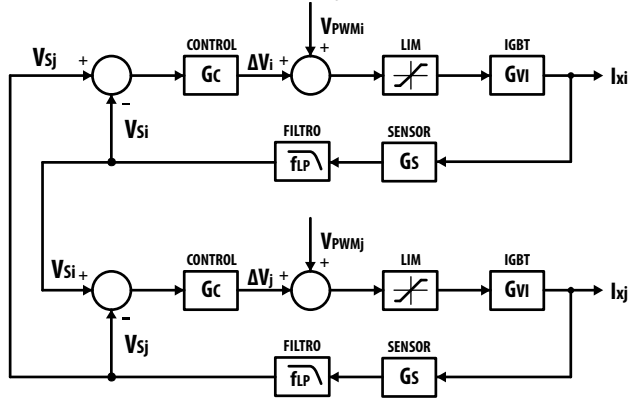


Fig.8. Estrategia de control de reparto de corriente mediante la asociación de parejas de transistores.

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se han simulado en *PSpice* los esquemas de control de reparto de corriente mostrados en las figuras Fig.7 y Fig.8. Para validar los modelos de control propuestos se ha utilizado el convertidor elevador de la Fig.9. En este caso se utilizan transistores de características distintas para asegurar un fuerte desequilibrio de corriente a través de los transistores.

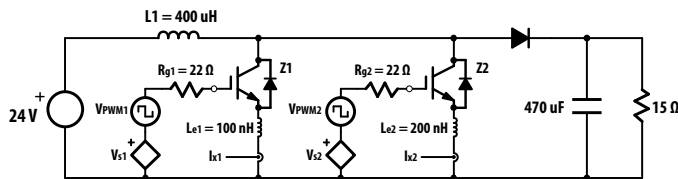


Fig.9. Convertidor elevador con conmutador basado en dos transistores IGBT conectados en paralelo (Z1: IXGH10N100 y Z2: IXGH17N100).

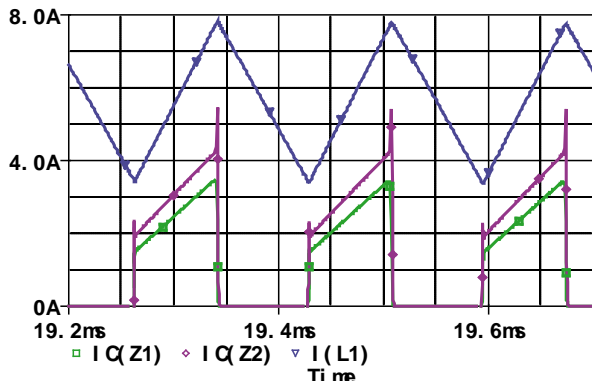


Fig.10. Resultados de simulación del circuito sin control de reparto de corriente. Corriente a través de Z1, Z2 y corriente por el inductor L1.

La Fig.10 muestra la evolución de la corriente a través de los transistores en el caso de aplicar los mismos niveles de tensión en la señal de activación. En esta figura se puede apreciar un reparto desigual de la corriente.

A. Reparto de corriente mediante cálculo de valor medio

La Fig.11 muestra la evolución de la corriente que circula a través de los dos transistores utilizando el esquema de control basado en el cálculo del valor medio de la corriente de cada transistor y se observa un mejor reparto de la misma.

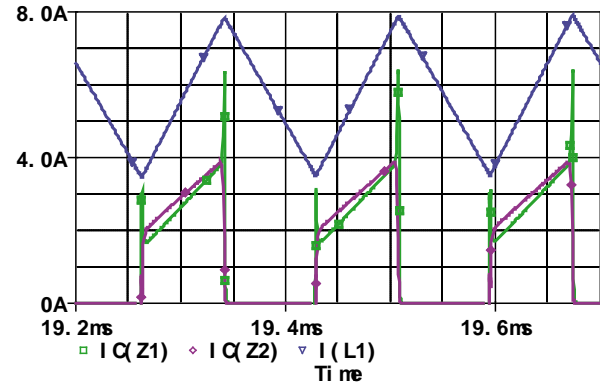


Fig.11. Resultados de simulación del esquema de control mediante cálculo del valor medio. Evolución de la corriente que circula a través de Z1, Z2 y corriente en el inductor L1.

B. Reparto de corriente mediante asociación por parejas de transistores

La Fig.12 muestra el comportamiento de la corriente que circula a través de los dos transistores utilizando la estrategia de control propuesta en este artículo.

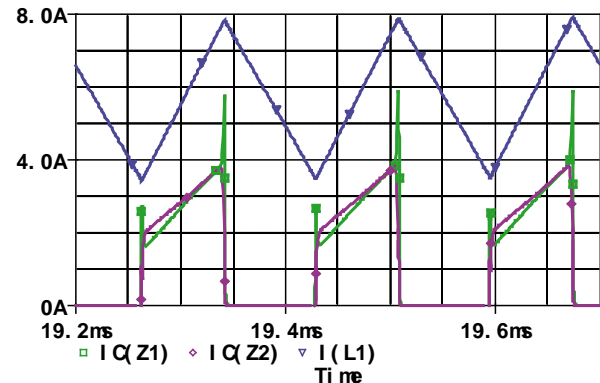


Fig.12. Resultados de simulación del esquema de control mediante asociación de parejas de transistores. Evolución de la corriente que circula a través de Z1, Z2 y corriente en el inductor L1.

Como se puede observar, los resultados de simulación de los dos esquemas de control muestran comportamientos muy similares. En el siguiente apartado se describe la implementación del control y se presentan resultados experimentales.

V. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL

Se ha experimentado sobre un interruptor basado en la asociación en paralelo de 2 transistores IGBT para validar la

estrategia de control de reparto de corriente propuesta. El control se ha desarrollado mediante una plataforma DSP (TMS320F28335) y la medida de la corriente se obtiene mediante resistencias Kelvin de 5 m Ω .

La Fig.13 muestra el reparto de corriente en una carga resistiva, aplicando los mismos niveles de tensión de puerta en los dos transistores. En la Fig.14, utilizando los esquemas de control basados en el cálculo del valor medio y mediante la asociación por parejas de transistores, se muestran los niveles de tensión de la señal de activación de cada transistor que permite equilibrar la corriente que circula a través de los mismos. En las figuras anteriores se aprecian picos de corriente tal y como se habían observado en las simulaciones. La aparición de estos picos se debe a dos factores, el primero al retardo entre las dos señales de activación de los transistores y el segundo al bajo *Slew Rate* de la tensión de puerta.

TABLA II
CONDICIONES DE ENSAYO

Símbolo	Descripción	Valor
V_s	Tensión de entrada	24 V
R_L	Resistencia de carga	15 Ω
R_s	Resistencia Kelvin de medida de corriente	5 m Ω
L_l	Inductancia	400 μ H
f_s	Frecuencia de conmutación	6 kHz
Z1, Z2	STGP7NC60HD	600 V / 14 A

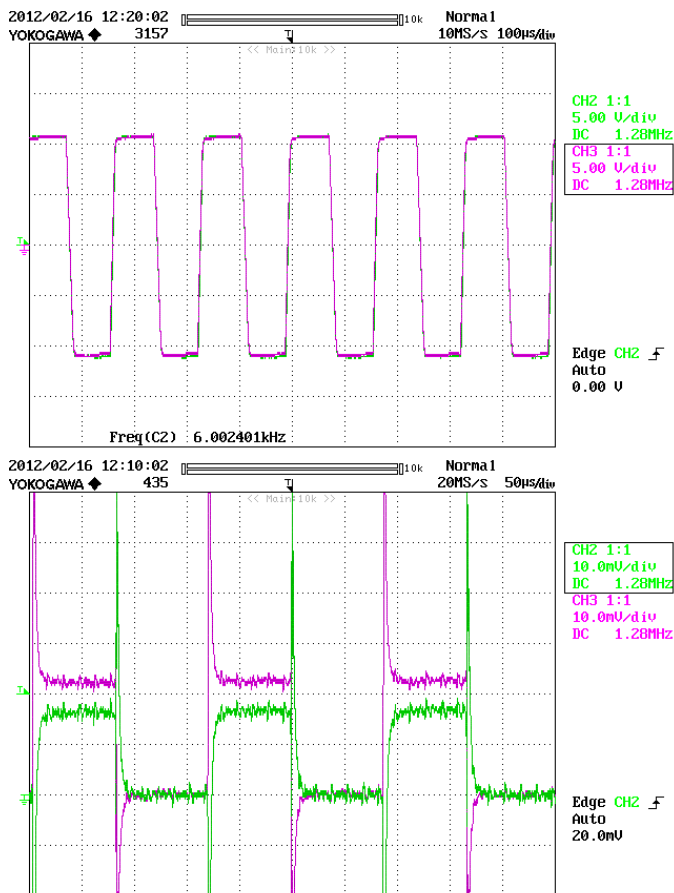


Fig.13. Resultados experimentales a) tensión de puerta y b) reparto de corriente entre transistores.

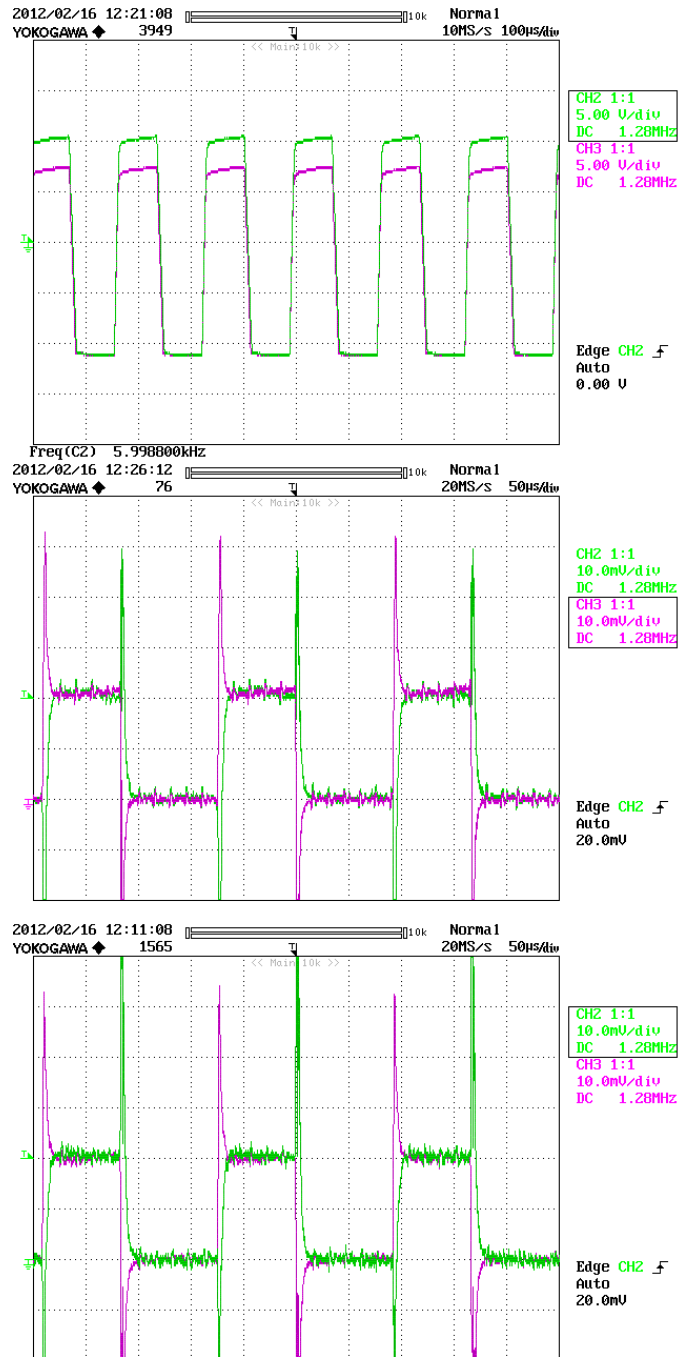


Fig.14. Resultados experimentales en circuito resistivo, a) tensión de puerta y b) reparto de corriente basado en el control mediante cálculo del valor medio y c) reparto de corriente basado en el control por asociación de parejas de transistores.

Finalmente se ha realizado un ensayo en un convertidor elevador (Fig.9) en las condiciones mostradas en la Tabla II. La Fig.15 muestra el reparto de corriente en tres situaciones distintas. La primera muestra el comportamiento de la corriente sin utilizar ningún control del nivel de tensión de puerta. La segunda corresponde al reparto de corriente utilizando el esquema basado en el cálculo del valor medio. La tercera muestra el reparto de corriente utilizando la estrategia de control basada en la asociación por parejas.

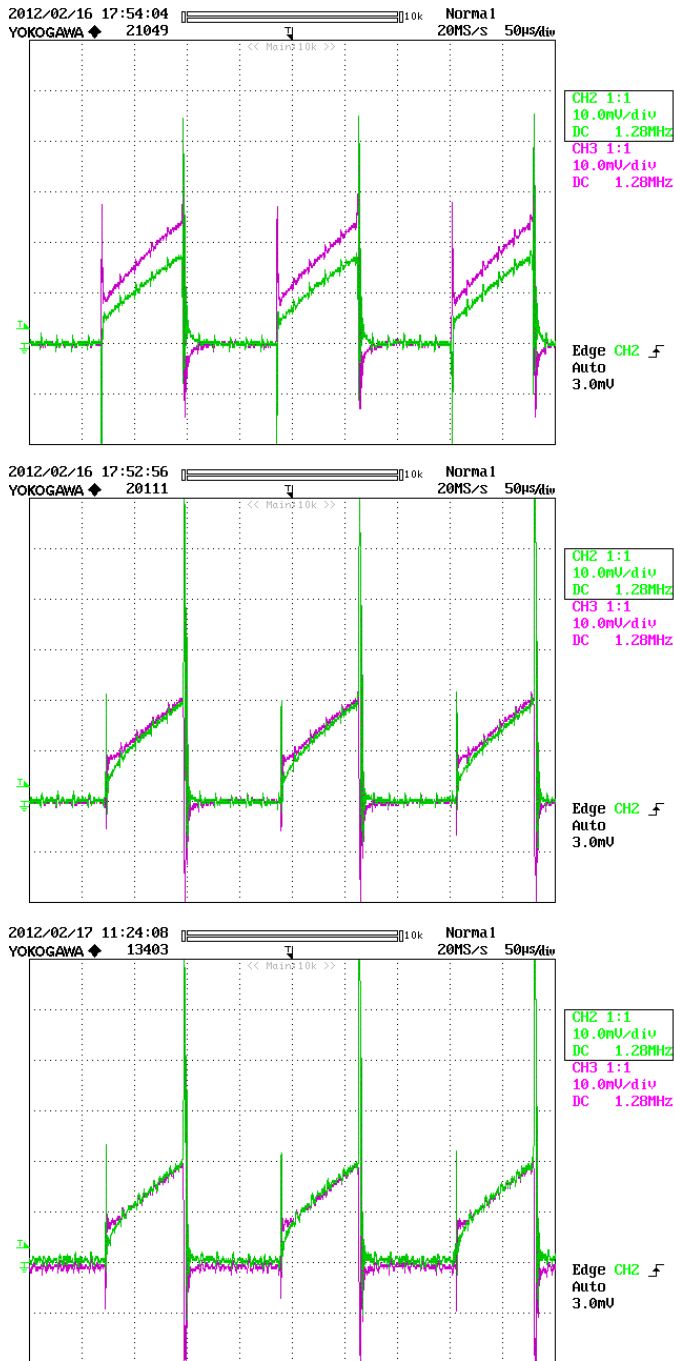


Fig.15. Resultados experimentales en convertidor elevador: a) corriente en transistores sin control de reparto de corriente, b) utilizando el control basado en el cálculo del valor medio y c) utilizando el control de reparto de corriente por asociación de la corriente entre transistores.

Los resultados experimentales son coherentes y confirman los resultados previamente obtenidos mediante simulación.

VI. CONCLUSIONES

Se ha propuesto un esquema de control que permite equilibrar el reparto de la corriente que circula a través de transistores IGBT conectados en paralelo.

El control es válido en circuitos con cargas resistivas e inductivas y, puesto que la medida de la corriente de conmutación se basa en la adquisición de valores promediados, el esquema de control no requiere una elevada velocidad de cálculo.

Se ha observado que la manera de implementar el control del driver es fundamental en las estrategias para el equilibrado de corriente. Resulta conveniente destacar que la variación del nivel de tensión puede provocar la aparición de picos de corriente en el transistor que primero entra en estado de conducción. Este fenómeno se hace más patente en función del *Slew Rate* de la señal de control.

En vista de los resultados obtenidos, puede resultar de interés estudiar la influencia que pueda tener sobre las pérdidas en los semiconductores la aplicación de estas estrategias de control.

REFERENCIAS

- [1] N.Y.A. Shammam, R. Withanage, D. Chamund, "Review of series and parallel connection of IGBTs", IEE Proceedings – Circuits, Devices and Systems, vol. 153, pp. 34-39, Feb 2006.
- [2] Serge Bontemps, "Parallel Connection of IGBT and MOSFET Power Modules", Advanced Power Technology Europe, Nov 2004.
- [3] M. Furuya, Y. Ishiyama, "Current Measurement Inside Press Pack IGBTs" *Fuji Electric Journal*, vol.75, No.8, 2002.
- [4] A. Müsing, G. Ortiz, J.W. Kolar, "Optimization of the Current Distribution in Press-Pack High Power IGBT Modules", *IPEC*, pp.1139-1146, Jun. 2010.
- [5] B. R. Pelly, "Choosing Between Multiple Discretes and High Current Modules" *International Rectifier*.
- [6] International Rectifier "Application Characterization of IGBTs", AN-990 rev2, 2009.
- [7] Fairchild Semiconductor "Parallel and series connection of MOSFET, IGBT and SKiiPPACK modules", Application Manual, 2007.
- [8] J.-F. Chen, J.-N. Lin, T.-H. Ai, "The Techniques of the Serial and Paralleled IGBTs" *Proc. IEEE IECON*, vol.2, pp.999-1004, Aug. 1996.
- [9] P.J. Grbovic, "Gate Driver With Feed Forward Control of Turn off Performances of an IGBT in Short Circuit Conditions" *EPE 2007*, Aalborg, Sep. 2007.
- [10] R. Hemmer, "Intelligent IGBT Drivers with Exceptional Driving and Protection Features" *EPE 2009*, Barcelona, Sep. 2009.