

# Técnicas para incrementar la eficiencia de los inversores para vehículo eléctrico

O. Oñederra, N. Arandia, A. Matallana, I. Aranzabal, I. Kortabarria  
 Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)  
 e-mail: oier.onederra@ehu.es  
[http://det.bi.ehu.es/~apert/index\\_cast.html](http://det.bi.ehu.es/~apert/index_cast.html)

**Resumen**—Obtener una mayor eficiencia en los convertidores de potencia, es uno de los principales objetivos de la disciplina de la electrónica de potencia. Y la propulsión del vehículo eléctrico no es una excepción. Para ello, se han desarrollado varias técnicas con distintas metodologías tales como técnicas de modulación avanzadas, topologías de conmutación suave o *soft-switching*. En el presente artículo se muestran técnicas de incremento de eficiencia desde el nivel de dispositivo semiconductor hasta topologías de inversores.

## I. INTRODUCCIÓN

Los motores de corriente alterna (AC) presentan gran interés para la propulsión de vehículos eléctricos (EV, *Electric Vehicle*) frente a los motores de corriente continua (DC), ya que presentan mayor eficiencia, mayor densidad de potencia, mayor fiabilidad y menor necesidad de mantenimiento [1], [2]. Los motores DC son capaces de generar un par grande en parada, pero los motores AC presentan mejores prestaciones para consumo de potencia continuada, altas revoluciones por minuto, amplio rango de potencia, etc.

Por otro lado, el almacenamiento de energía eléctrica se lleva a cabo en las baterías o en tanque de hidrógeno en caso de vehículo a pila de combustible. En ambos casos, la fuente es DC, y los motores siendo alimentados en AC, se necesita un inversor de potencia para adecuar la fuente y la carga. La topología fundamental consiste en un puente trifásico de seis IGBTs. El uso extendido de esta topología se basa en su relativa simplicidad, variedad de estrategias de modulación (siendo la PWM la más utilizada), robusta detección de fallos y altas frecuencias de conmutación.

Pero hay que mencionar que esta topología presenta mucho estrés y pérdidas en conmutación, y la eficiencia es un parámetro crítico en los vehículos, tanto por la autonomía como por el volumen. Por esta razón, uno de los objetivos en el diseño de convertidores es la minimización de las pérdidas en conversión para conseguir altas eficiencias. Dichas pérdidas surgen principalmente en los dispositivos de conmutación [3], [4]. Hay que constatar que cada vez hay más demanda de mayores frecuencias de conmutación [5], ya que se consigue una reducción del tamaño de los componentes y menor ruido acústico, pero la frecuencia de conmutación está limitada por factores como estrés y pérdidas en conmutación, y altas variaciones de tensión y corriente que generan emisiones EMI [6].

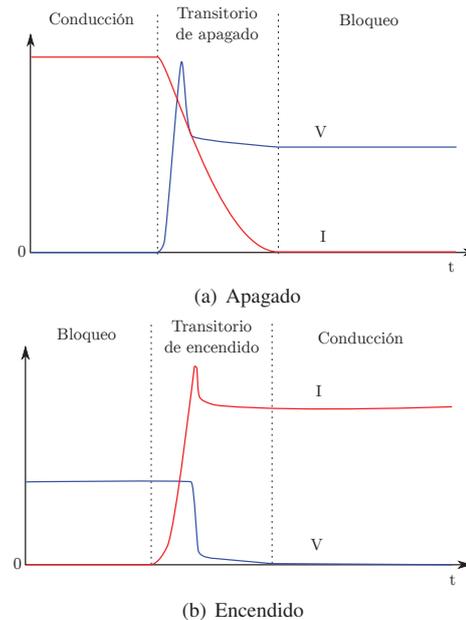


Figura 1. Formas de onda de típicos de dispositivos IGBT/MOSFET.

## II. PÉRDIDAS EN DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN

Las principales pérdidas en los convertidores se presentan en los dispositivos de conmutación y se pueden clasificar como pérdidas estáticas (conducción y bloqueo) y dinámicas (transición de encendido, transición de apagado, corriente de recuperación inversa y circuito de control o *driver* del dispositivo) [7]–[9]. Las pérdidas estáticas dependen del propio dispositivo de conmutación, y las dinámicas dependen del propio dispositivo y topología del convertidor, lo que ha llevado al desarrollo de varias topologías para reducir dichas pérdidas [9].

En la figura 1 se muestran las transiciones de apagado y encendido de un dispositivo de conmutación. Cuando las tensiones (V) y corrientes (I) tienen valores no nulos, se generan pérdidas considerables, y por lo tanto calor en el dispositivo. El producto de tensión y corriente es la potencia instantánea, e integrando en el tiempo resulta la energía perdida en forma de calor. Por la parte del *driver*, también se generan pérdidas [9], y aunque no tomen niveles tan altos como en el lado de potencia, reducir dichas pérdidas también puede ser un objetivo a buscar.

### III. TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS

Siendo uno de los focos más importantes de pérdidas los dispositivos de conmutación, una de las posibilidades para reducir las pérdidas es utilizar unos dispositivos de conmutación que tengan menos pérdidas en conducción y en bloqueo. En lo que a pérdidas dinámicas respecta, hay varias formas para afrontar la reducción de éstas:

- Reducir el intervalo de conmutación.
- Paralelización de dispositivos de conmutación.
- Técnicas avanzadas de modulación.
- Manipulación de formas de onda.

#### III-A. Reducir el intervalo de conmutación

Una de las técnicas para reducir las pérdidas de conmutación en los dispositivos es tratar de reducir el tiempo de la propia conmutación, es decir, que las transiciones sean más rápidas. Esto se puede conseguir utilizando dispositivos de nueva generación y/o nuevos materiales, como el carburo de silicio ( $SiC$ ) [10]–[14] o nitruro de galio ( $GaN$ , gallium nitride) [15]. Cada vez está teniendo más presencia el estudio de estos dispositivos en el área de propulsión del EV [16], [17]. Pero al ser dispositivos nuevos, son más costosos que los utilizados comúnmente [18].

El uso de nuevos dispositivos no es la única solución para acortar el tiempo de transición. Así, es posible controlar la velocidad de las transiciones de corrientes y tensiones de dichos dispositivos mediante el *gate driver* [19]–[27]. Estos *drivers* controlan la velocidad de carga y descarga de la capacidad parásita de puerta para controlar  $di/dt$  y  $dv/dt$ . Utilizan circuitería extra, pero con la ventaja que no deben soportar los niveles de potencia de la rama principal, ya que se sitúan en el lado de control del dispositivo.

Existen varios métodos para controlar la puerta (figura 2). Los controladores de puerta convencionales disponen de una salida *push-pull* que se conecta a la puerta al dispositivo mediante una resistencia para limitar la velocidad de carga de puerta. Existen controladores de puerta activa, que miden la corriente o la tensión del lado de potencia y controlan la carga de la puerta [23], pero se tienen que ajustar bien para cada aplicación. Para aplicaciones de alta frecuencia se han desarrollado controladores de puerta resonantes. Esto se debe a que a frecuencias altas (a partir de centenas de  $kHz$ ), las pérdidas en el controlador aumentan considerablemente haciendo que la eficiencia global del convertidor se reduzca notablemente (entre 5% y 30%) [28], [29]. En la mayoría de las topologías de puerta resonantes se utiliza una inductancia para entrar en resonancia con el condensador de puerta del dispositivo, pero presentan otros problemas como pérdidas en los dispositivos de control de puerta, uso de inductancias relativamente grandes en algunos casos, etc. Para hacer frente a estos problemas se está tendiendo a controladores por fuente de corriente [30]. Controlando la corriente de inyección al condensador de puerta se controla con mayor flexibilidad el encendido y apagado del dispositivo de potencia. Hay que tener en cuenta que los controladores de puerta resonantes y

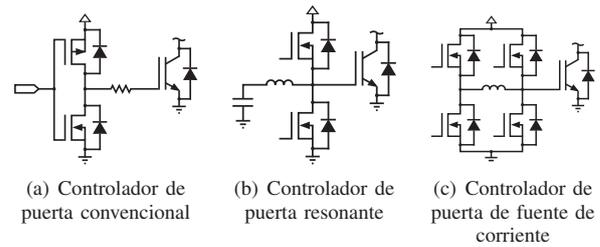


Figura 2. Topologías de controladores de puerta.

los de fuente de corriente, requieren un control más complejo que los convencionales, y dependiendo de la aplicación puede que no se obtengan los beneficios esperados. En la literatura se remarca que estas alternativas no se pueden generalizar, por lo que hay que validar para cada aplicación. En los controladores de puerta resonantes hay pérdidas en los componentes tanto en conmutación, como en conducción. Asimismo, los controladores de puerta por fuente de corriente no son una buena opción en el caso de que el dispositivo principal tenga una resistencia interna grande [30]. De todas formas hay limitaciones tales como las velocidades de tensiones y corrientes, trayectorias de operación dentro del área seguro (SOA, *Safe Operating Area*) y emisiones EMI [31], [32].

#### III-B. Paralelización de dispositivos de conmutación

Otro punto de vista para reducir las pérdidas es utilizar IGBTs (por las buenas características en conducción) y MOSFETs (por las buenas características de conmutación) en paralelo [33], [34]. En estado de conducción, el MOSFET y el IGBT conducen simultáneamente. El IGBT se encarga de conducir más corriente por el hecho que presenta menos caída de tensión [35]. En el instante de apagado, el IGBT es el que se apaga primero para reducir pérdidas producidas por la cola de corriente, aprovechando que MOSFET sigue conduciendo para mantener la tensión baja. Después de una breve demora, se apaga el MOSFET también. Cuanto más larga sea la demora de apagado del MOSFET, menos pérdidas genera el IGBT, pero también limita la frecuencia de conmutación [36].

Uno de los inconvenientes del uso de esta metodología es que se añade complejidad al control de puerta, ya que los instantes de apagado no son los mismos y requiere más circuitería. Las señales se pueden generar con un único controlador de puerta. Se introduce una resistencia de encendido para las dos puertas y una resistencia de apagado para la puerta del MOSFET para apagar más tarde que el IGBT [34], [36]. O si se desea mayor flexibilidad en el control, un controlador de puerta para cada dispositivo.

#### III-C. Técnicas avanzadas de modulación

Desde el punto de vista de la modulación, el PWM (*Pulse Width Modulation*) es la técnica más utilizada para obtener la forma de onda deseada a la salida. Teniendo de base esta técnica, se han desarrollado varias técnicas como PWM con eliminación de armónicos selectivos (SHE-PWM) [37], PWM basado en el centroide [38], PWM trapezoidal [39], PWM en

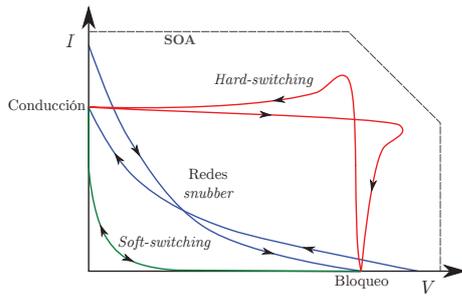


Figura 3. Trayectorias de conmutación de los dispositivos.

Tabla I  
COMPARATIVA DE CONVERTIDORES [48]

	<i>Hard-switching</i>	<i>Soft-switching</i>
<b>Pérdidas en conmutación</b>	Mayores	Menores
<b>Evacuación de calor</b>	Concentrada	Dispersa
<b>Complejidad de circuitería</b>	Simple	Complejo
<b>Emisiones EMI</b>	Considerables	Menores
<b>Problemas de <math>dv/dt</math></b>	Grandes	Menores
<b>Modulación</b>	Versátil	Limitado
<b>Costes</b>	Menores	Mayores

el espacio de vectores (SVPWM) [40], PWM con inyección de armónicos [41], PWM discontinuo (DPWM) [42] etc. Algunas de estas técnicas reducen la distorsión armónica total (THD), otros reducen el número de conmutaciones [43], [44]. Otras técnicas utilizan combinaciones de técnicas de modulación dependiendo de la carga, optimizando la característica deseada para cada punto de operación [45]–[47].

III-D. Técnicas de manipulación de forma de onda

Otra forma para reducir las pérdidas en conmutación en los dispositivos, es modificar las formas de corriente/tensión [3]. Entre estas técnicas se encuentran las redes *snubber* y topologías de conmutación suave (*soft-switching*). Los *snubbers* limitan  $di/dt$  y  $dv/dt$  de los dispositivos de conmutación principales durante las transiciones. Como desventaja, las redes *snubber* de encendido (de bloqueo a conducción) introducen tensión extra en el apagado y las redes *snubber* de apagado (de conducción a bloqueo) introducen corriente extra en el encendido. Las técnicas de *soft-switching* en cambio, utilizan redes LC para entrar en resonancia para poder conmutar en los instantes de corriente o tensión nulo (ZCS o ZVS, *Zero Current Switch* o *Zero Voltage Switch*), minimizando las pérdidas en las transiciones (figura 3) [3].

Las topologías de *soft-switching* reducen el estrés de los dispositivos principales en los instantes de conmutación. Pero hay que tener en cuenta que también tienen algunos inconvenientes respecto a los convencionales o *hard-switching* (tabla I) [48], [49].

Estas técnicas han permitido el desarrollo de varias topologías. A la hora de clasificar estas topologías, el criterio más utilizado es aquel que tiene en cuenta la localización del circuito resonante respecto al circuito principal (figura 4) [5], [50]:

En la topología de **carga resonante**, el circuito resonante

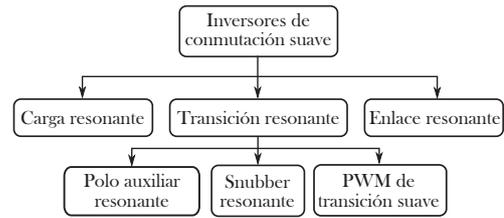


Figura 4. Clasificación de inversores *soft-switching*.

se sitúa en el lado de la carga, generando situaciones de tensión/corriente nula para conmutación en los dispositivos de la rama de potencia. La carga puede ser resonante serie (figura 5(a)), paralelo (figura 5(b)) o mixto. El principal problema de estos convertidores es que las corrientes y tensiones alcanzan valores mayores que la corriente media de carga y tensión del bus DC. Si las variaciones de carga son grandes, tienen que ser dimensionados para el peor caso, limitando niveles de alta potencia y aumentando los costes. Por esta razón esta topología no es práctica para aplicaciones de propulsión del vehículo eléctrico.

En los de **transición resonante** (figura 4), la condición de conmutación suave se consigue directamente en los propios dispositivos. Para ello hay tres subcategorías principales: polo resonante, *snubber* resonante y PWM de transición suave.

En la subcategoría de **polo resonante**, denominados inversores de polo auxiliar resonante conmutado (ARCPI, *auxiliary resonant commutated pole inverter*) [51], [52] o *quasi-resonantes*, la inductancia para habilitar la resonancia se conecta a un divisor de tensión capacitivo por cada fase (figura 5(c)). De esta forma permite la circulación de corriente en ambos sentidos. Tiene la ventaja que se puede emplear el control PWM convencional o SVM (*Space Vector Modulation*), y cada fase se controla independientemente. El puente del inversor está sometido a la tensión de la fuente, y los dispositivos auxiliares a la mitad de la misma, pero la eficiencia del inversor depende de la corriente de carga. Otro inconveniente es que se necesita otro condensador y otros conmutadores bidireccionales por cada fase.

En cuanto a los **snubbers resonantes**, las inductancias de resonancia se sitúan entre fases, controladas por dispositivos de conmutación auxiliares. Como los dispositivos auxiliares no están conectados con la rama principal de potencia, el estrés que deben soportar es menor que el de los dispositivos principales. Se denominan inversores de *snubber* auxiliar resonante (ARSI, *Auxiliary Resonant Snubber Inverter*) [53], [54]. Como los circuitos auxiliares se conectan entre fases, se pueden conectar tanto en estrella (figura 5(d)) como en triángulo (figura 5(e)). Utiliza menos componentes auxiliares que la topología ARCPI, ya que se eliminan los condensadores adicionales del bus DC, pero requiere modificaciones en el control de la modulación, añadiendo complejidad.

Los convertidores **PWM de transición suave**, se controlan por PWM y hacen posible las conmutaciones suaves (*soft-transition*) mediante circuitos auxiliares conectados a cada fase. La tensión del bus DC es fija. Es un derivado de la

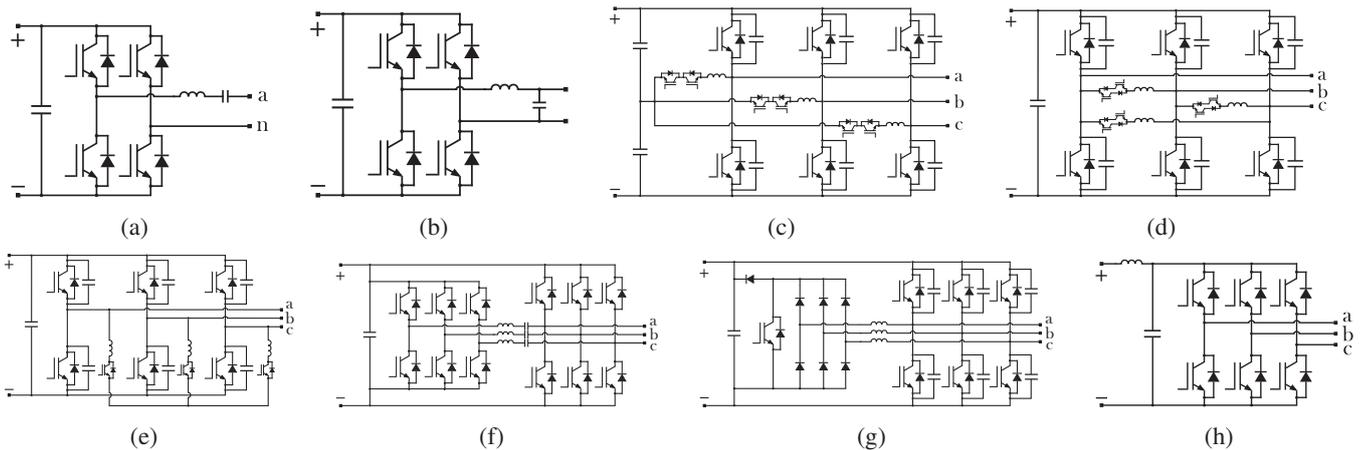


Figura 5. Topologías básicas de inversores resonantes.

topología ARCPI que permite funcionar a los dispositivos principales en transiciones de tensión nula (*ZVT, Zero Voltage Transition*) (figura 5(g)) o de corriente nula (*ZCT, Zero Current Transition*) (figura 5(f)) [55]. Como desventaja principal es el uso de muchos componentes, comparados con otros tipos, encareciendo el equipamiento.

La categoría que queda es el de **enlace resonante**. Esta arquitectura incluye un tanque de resonancia LC entre la fuente y el puente trifásico (*RDCLI, Resonant DC Link Inverter*) (figura 5(h)). De esta forma, la tensión del bus DC del inversor oscila entre cero y dos veces (sin carga) la tensión de la fuente. Se aprovechan los instantes de tensión nula (*ZVS*) para conmutar los dispositivos del inversor, con la consecuente reducción de pérdidas. Tiene el inconveniente de que los dispositivos del puente del inversor deben soportar más del doble de tensión que la de la fuente, encareciendo los componentes, y a su vez, reduciendo el tiempo de vida de los mismos. Para aplicaciones de alta potencia se deberían sobredimensionar en exceso comparado con los VSI convencionales. Y como los instantes de conmutación son fijas, la modulación está limitada [5]. Para mitigar estas limitaciones, se han desarrollado varias subcategorías utilizando técnicas como *clamping* para reducir la tensión de pico del bus DC, o técnicas quasi-resonantes para habilitar modulaciones más flexibles [5].

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo se han estudiado técnicas para incrementar la eficiencia de los inversores para aplicaciones como los EVs. Pero eso no implica que todo sea práctico o aplicable, ya que hay que buscar el compromiso entre varios objetivos. El uso de los *drivers* no convencionales tienen ventajas en aplicaciones de muy altas frecuencias (del orden de *MHz*), pero no parece práctico en los dispositivos de propulsión eléctrica. En sistemas de modulación, los aspectos como reducción de armónicos, ruido acústico y pérdidas siguen siendo importantes. En cuanto a las topologías de *soft-switching*, las investigaciones parecen centrarse más en la carga inalámbrica que en la propulsión. Y en la propulsión los vehículos del mercado utilizan inversores trifásicos convencionales. Parece que los

dispositivos de nueva generación sí cambiarán el panorama de los convertidores en un amplio rango de aplicaciones, incluyendo la propulsión eléctrica.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro de la Unidad de Investigación y Educación UF11/16 de la UPV/EHU y con el apoyo del Gobierno Vasco a través de: las ayudas para los grupos de investigación del sistema universitario vasco IT394-10, del proyecto de investigación FUTUREGRIDS-2020 del programa ETORTEK (IE14-389) y la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación DPI2014-53685-C2-2-R.

#### REFERENCIAS

- [1] C. Chan and K. Chau, "Advanced AC propulsion systems for electric vehicles," in *Proc. of International Symposium on Automotive Technology and Automation*, 1991, pp. 119 – 125.
- [2] —, "An overview of power electronics in electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 3 – 13, 1997.
- [3] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook; Devices, Circuits and Applications, third edition*. Butterworth - Heinemann, 2011.
- [4] E. Hiraki, M. Nakaoka, T. Horiuchi, and Y. Sugawara, "Practical power loss simulation analysis for soft switching and hard switching PWM inverters," in *Proc. of Power Conversion Conference (PCC)*, vol. 2, 2002, pp. 553 – 558.
- [5] T. W. Ching and K. U. Chan, "Review of soft-switching techniques for high-frequency switched-mode power converters," in *Proc. of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2008, pp. 1 – 6.
- [6] M. Jin and M. Weiming, "Power converter EMI analysis including IGBT nonlinear switching transient model," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1577 – 1583, 2006.
- [7] A. Rajapakse, A. Gole, and P. Wilson, "Electromagnetic transients simulation models for accurate representation of switching losses and thermal performance in power electronic systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 319 – 327, 2005.
- [8] —, "Approximate loss formulae for estimation of IGBT switching losses through EMTP-type simulations," in *Proc. of International Conference of Power System Transients*, 2005.
- [9] B. Bock, "Switching IGBTs parallel connection or with enlarged commutation inductance," Ph.D. dissertation, Ph. D. Thesis, Ruhr-University, Bochum, 2005.
- [10] B. Wrzeczionko, J. Biela, and J. Kolar, "SiC power semiconductors in HEVs: Influence of junction temperature on power density, chip utilization and efficiency," in *Proc. of Industrial Electronics Society Conference (IECON)*, 2009, pp. 3834 – 3841.

- [11] S. Waffler, M. Preindl, and J. Kolar, "Multi-objective optimization and comparative evaluation of Si soft-switched and SiC hard-switched automotive DC-DC converters," in *Proc. of Industrial Electronics Society Conferende (IECON)*, 2009, pp. 3814 – 3821.
- [12] H. Zhang, L. Tolbert, and B. Ozpineci, "Impact of SiC devices on hybrid electric and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 2, pp. 912 – 921, 2011.
- [13] Z. Liang, B. Lu, J. Van Wyk, and F. Lee, "Integrated CoolMOS FET/SiC-diode module for high performance power switching," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 3, pp. 679 – 686, 2005.
- [14] F. Xu, "All-SiC three-phase converters for high efficiency applications," Ph.D. dissertation, University of Tennessee, 2013.
- [15] N. Ikeda, Y. Niiyama, H. Kambayashi, Y. Sato, T. Nomura, S. Kato, and S. Yoshida, "GaN power transistors on Si substrates for switching applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 7, pp. 1151 – 1161, 2010.
- [16] Z. Shen and I. Omura, "Power semiconductor devices for hybrid, electric, and fuel cell vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 778 – 789, 2007.
- [17] K. Shenai, "Future prospects of widebandgap (WBG) semiconductor power switching devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 62, no. 2, pp. 248 – 257, 2015.
- [18] J. Rabkowski, D. Pefitis, and H.-P. Nee, "Silicon carbide power transistors: a new era in power electronics is initiated," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 17 – 26, 2012.
- [19] S. Musumeci, A. Raciti, A. Testa, A. Galluzzo, and M. Melito, "Switching-behavior improvement of insulated gate-controlled devices," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 4, pp. 645 – 653, 1997.
- [20] S. Park and T. M. Jahns, "Flexible dv/dt and di/dt control method for insulated gate power switches," in *Proc. of IEEE Industry Applications Society Conference (IAS)*, vol. 2, 2001, pp. 1038 – 1045.
- [21] J. Makaran, "Gate charge control for MOSFET turn-off in PWM motor drives through empirical means," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 5, pp. 1339 – 1350, 2010.
- [22] R. Sachdeva and E. Nowicki, "A novel gate driver circuit for snubberless, low-noise operation of high power IGBT," in *Proc. of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, vol. 1, 2002, pp. 212 – 217.
- [23] Z. Wang, X. Shi, L. M. Tolbert, and B. J. Blalock, "Switching performance improvement of IGBT modules using an active gate driver," in *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2013.
- [24] V. John, B.-S. Suh, and T. A. Lipo, "High-performance active gate drive for high-power IGBT's," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 1108 – 1117, 1999.
- [25] M. Helsen and F. Fuchs, "Adaptation of IGBT switching behaviour by means of active gate drive control for low and medium power," in *Proc. of European Conference on Power Electronics and Applications*, 2003.
- [26] P. Grbovic, "An IGBT gate driver for feed-forward control of turn-on losses and reverse recovery current," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 643 – 652, 2008.
- [27] T. Lopez, G. Sauerlaender, T. Duerbaum, and T. Tolle, "A detailed analysis of a resonant gate driver for PWM applications," in *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, vol. 2, 2003, pp. 873 – 878.
- [28] I. de Vries, "A resonant power MOSFET/IGBT gate driver," in *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, vol. 1, 2002, pp. 179 – 185.
- [29] Y. Chen, "Resonant gate drive techniques for power MOSFETs," Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [30] W. Eberle, Z. Zhang, Y.-F. Liu, and P. Sen, "A current source gate driver achieving switching loss savings and gate energy recovery at 1-MHz," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 678 – 691, 2008.
- [31] D. O. Neacsu, *Power-switching converters: medium and high power*. CRC Press, 2006.
- [32] O. Trescases, G. Wei, A. Prodic, and J. Ng, "An EMI reduction technique for digitally controlled SMPS," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1560 – 1565, 2007.
- [33] J. Kimball and P. Chapman, "Evaluating conduction loss of a parallel IGBT-MOSFET combination," in *Proc. of IEEE Industry Applications Society Conference (IAS)*, vol. 2, 2004, pp. 1233 – 1237.
- [34] K. Hoffmann and J. Karst, "High frequency power switch - improved performance by MOSFETs and IGBTs connected in parallel," in *Proc. of European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2005, p. 11.
- [35] J. Kimball and P. Chapman, "Evaluating conduction loss of a parallel IGBT-MOSFET combination," in *Proc. of IEEE Industry Applications Society Conference (IAS)*, vol. 2, 2004, pp. 1233 – 1237.
- [36] H. P. Sheth and A. M. Adesara, "Paralleling of IGBT and MOSFET for high power applications," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, pp. 222 – 228, 2012.
- [37] A. Muthuramalingam, M. Balaji, and S. Himavathi, "Selective harmonic elimination modulation method for multilevel inverters," in *Proc. of International Conference on Power Electronics*, 2006, pp. 40 – 45.
- [38] N. Lokhande, V. Jape, and P. Khatri, "A centroid based PWM switching technique for harmonic reduction of full bridge inverter," in *Proc. of International Power Engineering Conference*, vol. 2, 2005, pp. 831 – 835.
- [39] S. Ayob, Z. Salam, and A. Jusoh, "Trapezoidal PWM scheme for cascaded multilevel inverter," in *Proc. of IEEE International Power and Energy Conference*, 2006, pp. 368 – 372.
- [40] Z. Shu, J. Tang, Y. Guo, and J. Lian, "An efficient SVPWM algorithm with low computational overhead for three-phase inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 5, pp. 1797 – 1805, 2007.
- [41] A. Iqbal, E. Levi, M. Jones, and S. Vukosavic, "Generalised sinusoidal PWM with harmonic injection for multi-phase vsis," in *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 2006, pp. 1 – 7.
- [42] A. Hava, R. Kerkman, and T. Lipo, "A high-performance generalized discontinuous PWM algorithm," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1059 – 1071, 1998.
- [43] L. Asiminoaei, P. Rodriguez, F. Blaabjerg, and M. Malinowski, "Reduction of switching losses in active power filters with a new generalized discontinuous-PWM strategy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 467 – 471, 2008.
- [44] O. Ojo, "The generalized discontinuous PWM scheme for three-phase voltage source inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 6, pp. 1280 – 1289, 2004.
- [45] W. Yu and J.-S. Lai, "Ultra high efficiency bidirectional dc-dc converter with multi-frequency pulse width modulation," in *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2008, pp. 1079 – 1084.
- [46] H. van Hoek, M. Neubert, and R. De Doncker, "Enhanced modulation strategy for a three-phase dual active bridge - boosting efficiency of an electric vehicle converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5499 – 5507, 2013.
- [47] C. Dick, M. Biskoping, S. Richter, and R. De Doncker, "Variable-frequency pulse-width modulation for an improved grid-connected converter efficiency," in *Proc. of IEEE Industry Applications Society Conference (IAS)*, 2008, pp. 1 – 6.
- [48] T. Ching, "Soft-switching converters for electric vehicle propulsion," *Journal of Asian Electric Vehicles*, vol. 5, no. 2, pp. 1019 – 1026, 2007.
- [49] P. Sun, J.-S. Lai, H. Qian, W. Yu, C. Smith, and J. Bates, "High efficiency three-phase soft-switching inverter for electric vehicle drives," in *Proc. of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2009, pp. 761 – 766.
- [50] F. Blaabjerg, T. Wu, A. Tchamdjou, J. Mahdavi, and M. Ehsani, "A review of soft-switched DC-AC converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 4, pp. 847 – 860, 1998.
- [51] J. Cho, J. W. Baek, D. Yoo, and C. Y. Won, "Three level auxiliary resonant commutated pole inverter for high power applications," in *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, vol. 2, 1996, pp. 1019 – 1026.
- [52] R. De Doncker and J. Lyons, "The auxiliary resonant commutated pole converter," in *Proc. of IEEE Industry Applications Society Conference (IAS)*, vol. 2, 1990, pp. 1228 – 1235.
- [53] W. McMurray, "Resonant snubbers with auxiliary switches," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 2, pp. 355 – 362, 1993.
- [54] J.-S. Lai, "Resonant snubber-based soft-switching inverters for electric propulsion drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 71 – 80, 1997.
- [55] W. Dong, J.-Y. Choi, Y. Li, D. Boroyevich, F. Lee, J. Lai, and S. Hiti, "Comparative experimental evaluation of soft-switching inverter techniques for electric vehicle drive applications," in *Proc. of IEEE Industry Applications Society Conference (IAS)*, vol. 3, 2001, pp. 1469 – 1476.