

© 2016 IEEE. Personal use of this material is permitted. Permission from IEEE must be obtained for all other uses, in any current or future media, including reprinting/republishing this material for advertising or promotional purposes, creating new collective works, for resale or redistribution to servers or lists, or reuse of any copyrighted component of this work in other works.

# Redes de Impedancia y su Aplicación en Convertidores para Sistemas de Tracción Eléctrica

E. Fernández<sup>1</sup>, Student Member IEEE, L. Romeral<sup>2</sup>, Member IEEE, V. Sala<sup>3</sup>, Member IEEE.

**Abstract**—The use of impedance networks in different types of DC/DC, DC/AC and AC/AC converters, has increased significantly, and many converters topologies and articles VSI and CSI with impedance networks have been presented for the purpose of overcoming the limitations and problems of voltage and current that frequently occurs in these topologies. The selection and implementation of a topology of network impedance would improve the reliability and performance of the power system.

This article presents a study and analysis of different network impedance topologies, the modulation techniques for the adapting to power converters for applications in electric traction.

**Keywords**—power converter DC/AC, electric vehicle, Z converter, Quasi-Z converter, network impedance.

## I. INTRODUCCION

Las redes de impedancia van tomando protagonismo en el desarrollo de aplicaciones de transformación de energía DC/DC y DC/AC. La variedad de topologías que se enmarcan dentro de esta área han permitido el desarrollo de varios sistemas como transmisión eléctrica, energía fotovoltaica, sistemas de almacenamiento de energía con baterías o supercapacitores, fuentes de alimentación UPS, cargadores eléctricos, coche eléctrico, aeronáutica, etc. [1]

Diversas topologías de convertidores del tipo buck, boost, buck-boost, unidireccionales y bidireccionales implementadas con varios dispositivos se pueden ajustar al funcionamiento de este tipo de redes de impedancia y mejorar su funcionamiento [2]. El esquema general de configuración de una red de impedancia con un convertidor de potencia con elementos semiconductores de activación, se muestra en la Fig. 1. La topología del convertidor será en función del tipo de aplicación y sistema a implementar.

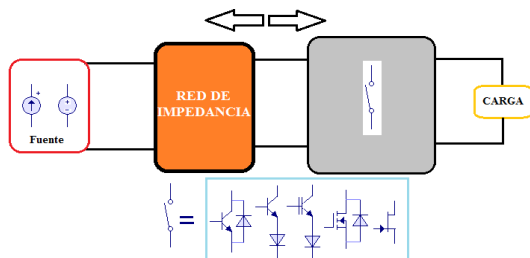


Figura 1. Esquema general de una red de impedancia en un convertidor de potencia.

Una red de impedancia básica está conformada por elementos de almacenamiento de energía lineal, condensadores e inductancias (Fig.2). También existe la posibilidad de implementar diversas configuraciones con la ayuda de elementos semiconductores como switch y diodos [3], con el propósito de poder mejorar el rendimiento y funcionamiento de la red.

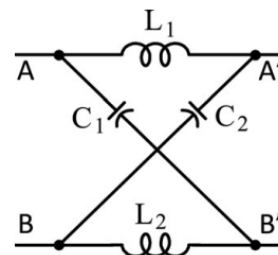


Figura 2. Red básica de impedancia.

En el desarrollo de convertidores de potencia al acoplar las redes de impedancia como elemento o fuente de entrada la tensión puede ser aumentada mediante el control de los disparos a través de tiempos de intervalo del convertidor, es decir, no existe la necesidad de un convertidor DC/DC [4], lo que hace a esta topología tipo buck-boost.

La topología clásica de convertidor con red de impedancia Z (Fig. 3), fue diseñada por F. Z Peng [5], con el propósito de superar las limitaciones de las topologías de convertidores con fuente de voltaje VSI y convertidor con fuente de corriente CSI.

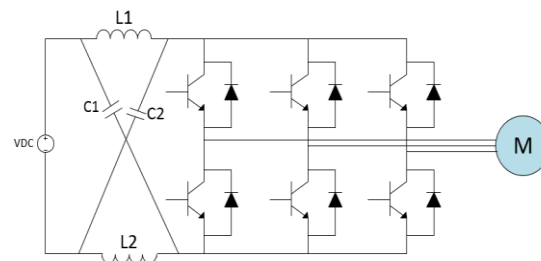


Figura 3. Topología de Convertidor con red de impedancia Z.

La aplicación de estas topologías para el desarrollo de convertidores en sistemas de tracción para coche eléctrico EV de a poco va tomando fuerza, con las ventajas descritas anteriormente. Junto con métodos de control que se pueden

<sup>1</sup> E. Fernández Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona España, efen.fernandez@mcia.upc.edu

<sup>2</sup> L. Romeral Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona España, luis.romeral@mcia.upc.edu.

<sup>3</sup> V. Sala Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona España, vicent.sala@mcia.upc.edu.

aplicar, los convertidores de potencia con fuente de impedancia se consideran como una topología emergente para el desarrollo de estos sistemas.

Varios factores intervienen en las consideraciones de diseño de convertidores de potencia en general, que afectan al rendimiento del inversor y por ende a todo el sistema de tracción. Estos requisitos que se mencionan en [6] serían alta fiabilidad, bajo coste, alta densidad de potencia, tamaño y alta eficiencia, factores todos ellos que influyen en la selección de un sistema de convertidor de potencia.

Para llegar a cumplir estos factores si bien es importante la selección de una topología adecuada y efectiva, es necesario también buscar alternativas que permitan mejorar a las ya existentes. En este trabajo se analizan y estudian las topologías de convertidores con redes de impedancia y su aplicación para sistemas de tracción. En la sección II se describen las diferentes topologías de redes de impedancia y su aplicación, en la sección III se analizan propuestas de topologías de convertidores con fuentes de redes de impedancia para sistemas de tracción y se describen algunas especificaciones de operación, y en el apartado IV se analiza diversas técnicas de modulación para estas topologías de convertidores.

## II. TOPOLOGÍAS DE REDES DE IMPEDANCIA.

La variedad de redes de impedancia que se tienen en la actualidad pueden ser utilizadas en varias topologías de convertidores como se muestra en la Fig. 4, se observa que estas se utilizan en varios tipos de conversiones de energía, conversor DC/DC; convertidor DC/AC; convertidor de fase y de frecuencia AC/AC y rectificadores AC/DC [7]. La variedad de diseño y amplia gama de estas topologías permite trabajar en convertidores de baja, media y alta tensión lo que hace que sea un campo muy amplio de estudio, por ello el análisis se centra en el desarrollo de convertidores DC/AC.

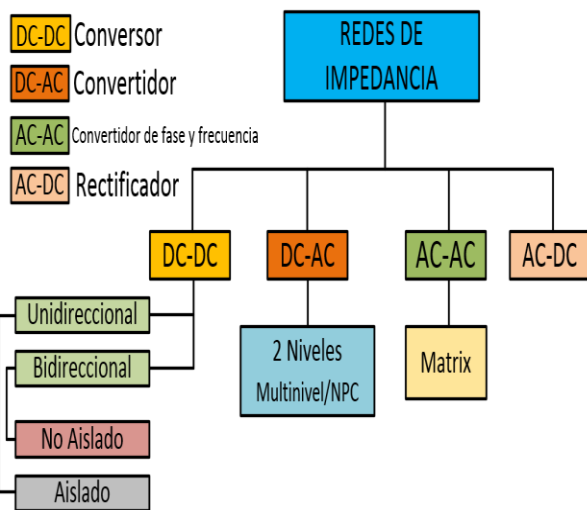


Figura 4. Redes de impedancia y su uso con convertidores.

Las topologías de convertidores DC/AC con fuentes de redes de impedancia se derivan de la topología de convertidor con fuente Z anteriormente mostrado, en donde se modifican las conexiones de los elementos lineales. Nuevas topologías se

han desarrollado y se van presentando con el propósito de reducir el número de componentes de la red Z, aumentar la ganancia de voltaje y obtener mayor densidad de potencia y de esta manera optimizar las topologías de convertidores.

Las fuentes con redes de impedancia para convertidores se pueden clasificar en 2 grupos: sin acople de transformador y con acople de transformador (Fig. 5), cada topología tiene sus características y ventajas en función de la aplicación.

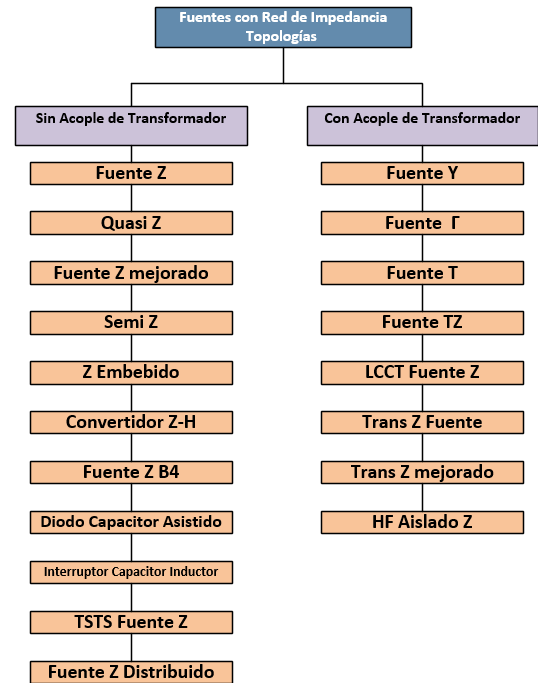
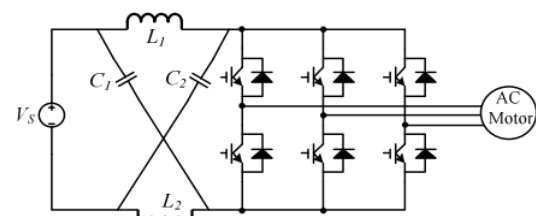


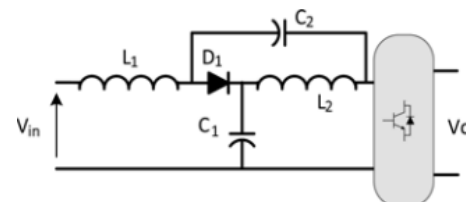
Figura 5. Clasificación de convertidores con fuente de redes de impedancia.

### A. Análisis de topologías y aplicaciones.

**1) Topología Fuente Z/ Quasi Z**, estas topologías de convertidores (Fig. 6) que son presentadas en [8]-[16], pueden ser alimentadas con fuente de voltaje VSI o corriente CSI. La función de la red de impedancia es amortiguar el acople de la fuente con el inversor, además facilitan un cortocircuito y un circuito abierto en cualquier momento, dependiendo de la situación de accionamiento y operación del convertidor.



a) Topología de convertidor inversor con fuente Z de voltaje.

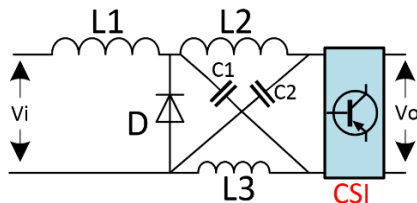


b) Topología de convertidor de voltaje con fuente Quasi Z.

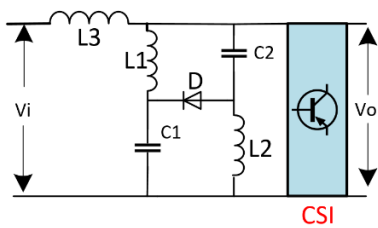
Figura 6. Topologías de convertidor con redes de impedancia.

Esta etapa inversora de salida es similar a la de un inversor convencional de fuente de voltaje o de corriente. Un VSI consta de ocho posibles estados, seis de los cuales se denominan estados de conmutación activos, los otros dos estados son denominados estados de conmutación cero [17]. Mientras que un CSI consta de 9 posibles estados, seis de los cuales son los estados de conmutación activos. Los otros tres estados corresponden a los estados en que la carga es cortocircuitada y son los estados de conmutación cero [17]. Estas topologías ZSI Y Q-ZSI con fuente de corriente (Fig.7), pueden ser bidireccionales del tipo buck-boost, con dispositivos con bloqueo de reversa y pueden ser utilizadas en aplicaciones de regeneración de energía y controles para motores.

Este tipo de convertidores sufren de problemas como la corriente de entrada discontinua en el modo de impulso cuando el ZSI alimentado por voltaje y alta corriente de estrés en el caso del ZSI por corriente, aunque existen algunas propuestas que permiten solucionar estos inconvenientes [18]-[19].



a) Topología de Convertidor ZSI con fuente de corriente.



b) Topología de Convertidor Q-ZSI con fuente de corriente.

Figura 7. Topologías de redes de impedancia Z y Q-ZSI con convertidor CSI.

**2) Topología Z mejorada**, esta topología propuesta en [20]-[21], proponen colocar varias redes de impedancia en cascada (Fig. 8). De esta forma estas topologías permiten mejorar los problemas mencionados anteriormente como la corriente de estrés sobre los elementos pasivos. El inconveniente que presentan estas topologías es el aumento del costo del convertidor por el número de elementos que se usan para su implementación y además se disminuye la densidad de potencia del convertidor.

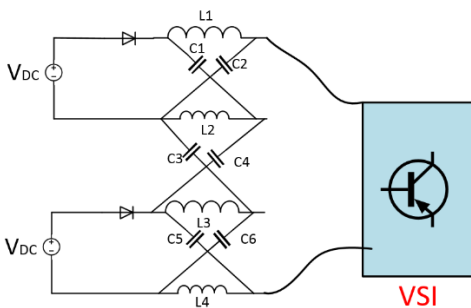
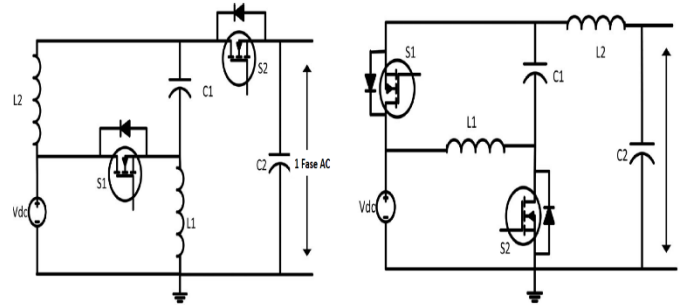


Figura 8. Topologías de convertidor con redes de impedancia Z mejorada.

**3) Topología Semi Z-Quasi Z**, este tipo de topología fue propuesta para lograr bajo costo y alta eficiencia en aplicaciones de sistemas de energía fotovoltaica de conexión a red monofásica. [22]-[23].

La ventaja de estas topologías (Fig. 9) es que pueden ser implementadas utilizando un menor número de interruptores en comparación con un ZSI tradicional y Quasi Z, pero el problema es el estrés de tensión en los dispositivos de conmutación.



a) Semi Z

b) Semi Quasi Z

Figura 9. Topología de Semi Z y Quasi Z.

**4) Topología Z embebido**, que fue propuesta para lograr corriente continua y una tensión nominal inferior en el condensador (Fig.10). Por su característica multifuente su aplicación es ideal para sistemas fotovoltaicos [24]-[25].

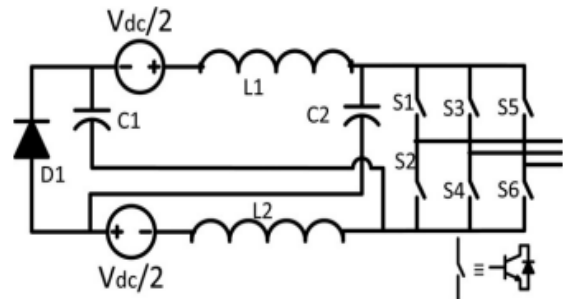


Figura 10. Topología de convertidor Z embebido.

**5) Topología de convertidor Z-H**, esta es una nueva topología que se presenta en [26], con un red de impedancia Z pero difiere en las conexiones, elimina el diodo del lado de entrada y el Shoot-through. La ganancia del convertidor es la misma al ZSI pero este tiene dos modos de operación. Este tipo de topología (Fig. 11), puede ser utilizada en conversores DC/DC, DC/AC, AC/AC.

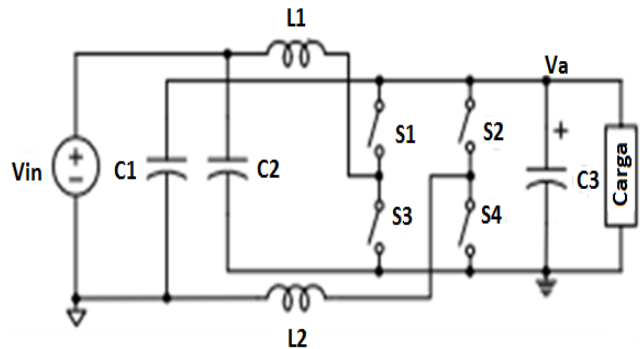


Figura 11. Topología de convertidor Z embebido.

**6) Convertidor Fuente Z-B4**, es propuesto en [27], en donde la característica principal es la utilización de menor número de elementos activos. Es una topología fiable y mejorada que reduce costos, como se muestra en la Fig. 12.

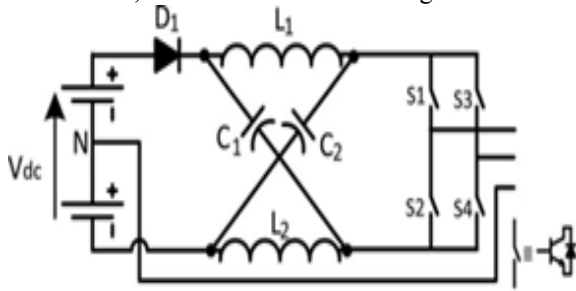


Figura 12. Topología de convertidor Z embebido.

**7) Convertidor Z con Switchs de inductor y condensador**, En la topología (Fig. 13) se agregan inductores y condensadores adicionales [28]-[29], con el objetivo de mejorar la capacidad de impulso en el circuito de salida, y reducir la tensión de estrés en los componentes pasivos. Dentro de las ventajas de este tipo de convertidor están la reducción del estrés del condensador y entrada baja de corriente de ondulación pero para la aplicación de esta topología se requieren un elevado número de elementos pasivos lo que incrementa costos y volumen del convertidor.

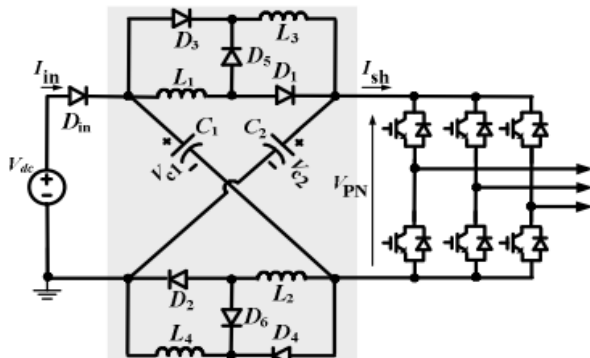


Figura 13. Topología de convertidor Z Switchs de inductor y condensador.

**8) Convertidor Z con diodo/ condensador asistido**, esta topología permite expandir la capacidad de tensión de impulso de las topologías Z y Quasi Z, esto lo consigue agregando condensadores y diodos en un determinado orden, (Fig. 14). La ventaja de esta topología es el aumento de la ganancia del voltaje y la reducción del estrés en el condensador [30]-[31]. Sin embargo el costo y tamaño de los elementos pasivos aumentan. Su aplicación está derivada a sistemas de alta potencia

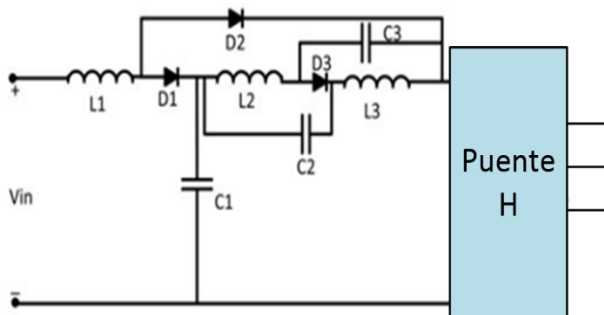


Figura 14. Topología de convertidor Z con diodo/ condensador asistido.

**9) Convertidor fuente Z TSTS**, este convertidor fue propuesto en [32], puede ser construido usando un menor número de interruptores en comparación con los tradicionales topologías de convertidor Z.

Tiene un estrés de tensión inferior y dual de puesta a tierra que lo hace adecuado para la generación de energía fotovoltaica. (Fig. 15).

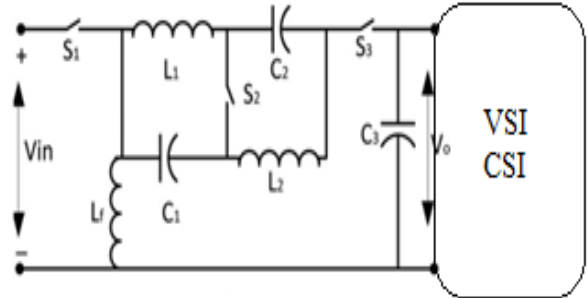


Figura 15. Topología de convertidor Z TSTS.

**10) Topología Z fuente distribuida**, las redes de impedancia distribuida tales como líneas de transmisión y componentes LC híbridos se pueden utilizar para configurar una red Z-fuente [33]-[34]. La utilización de convertidores (Fig. 16) con acople magnético o de transformador, reduce la utilización de elementos pasivos y aumenta la densidad de potencia pero incrementa el tamaño de los inversores.

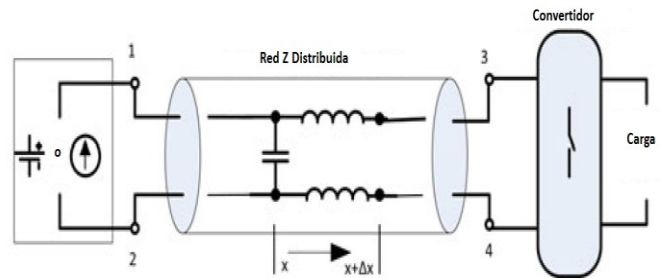


Figura 16. Topología de convertidor Z con fuente distribuida.

### III. TOPOLOGÍAS CONVERTIDORES CON REDES DE IMPEDANCIA PARA SISTEMAS DE TRACCIÓN.

En función del estudio presentado anteriormente, se puede definir que las topologías con redes de impedancia que se podrían utilizar como una alternativa o emergente en sistemas de tracción de vehículo eléctrico son la de fuente Z y Quasi Z, al considerar las diferentes prestaciones y ventajas que tiene con respecto a las topologías clásicas de VSI implementadas en estos sistemas.

#### A. Convertidor con fuente Z ZSI.

La topología ZSI [35]-[36] combina las ventajas del VSI y del CSI. Esta topología tiene una red de impedancia Z que se acopla a la entrada del inversor (Fig. 17), y la tensión puede ser aumentada mediante el control de los disparos a través de tiempos de intervalo del inversor, es decir no existe la necesidad de un convertidor DC/DC, lo que hace a esta topología tipo buck-boost [37].

Una topología con fuente Z incorpora un estado de conmutación cero adicional. Este estado cero adicional se logra por el cortocircuito de una de las tres ramas del inversor, dos de ellas o las tres en total [38]. Este estado de cortocircuito es prohibido en un inversor convencional sea VSI o CSI porque pondría en cortocircuito la fuente de entrada y provocaría su destrucción. En un inversor fuente Z esta condición es permisible ya que la red de impedancia de entrada evita el cortocircuito de la fuente de entrada. Este funcionamiento se detalla en [5]- [40]-[41].

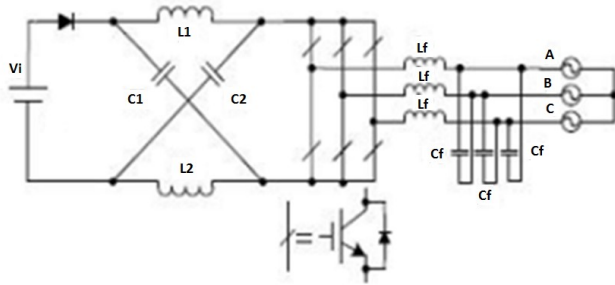


Figura 17. Topología de convertidor con red de impedancia Z para sistema de tracción.

ZSI se considera como una topología emergente para convertidores DC / AC, debido a su capacidad de trabajo, y ahorro de costos de los componentes mediante la utilización de una sola etapa de conversión. [39]. Un punto a favor de esta topología es la eficiencia y bajo costo, si se compara con el VSI y CSI, al requerir inductores y capacitores más pequeños y con alta fiabilidad con respecto a la disminución de emisiones EMI [42].

Durante los estados diferentes al estado de cortocircuito, el diodo se cierra. El voltaje de salida de la red de impedancia de entrada igual a la suma de voltajes de los dos capacitores menos el voltaje en la entrada, como se muestra en la Fig. 18.

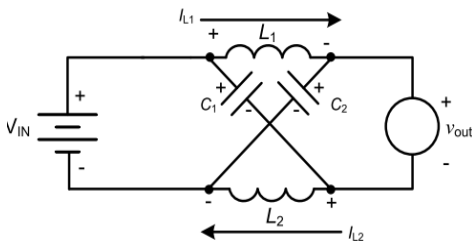


Figura 18. Circuito de la red impedancia en uno de los estados activos.

El cortocircuito del inversor de salida se establece mediante el cortocircuito de cualquiera de las tres ramas del inversor o por todas ellas. La Fig. 19 muestra el circuito equivalente del inversor Z visto desde la fuente.

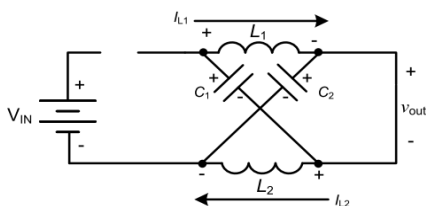


Figura 19. Circuito de la red impedancia en uno de los estados ceros.

### B. Convertidor con fuente casi Z Q-ZSI.

La topología Q-ZSI [43]-[45], que se muestra en la Fig. 20, se compone de dos partes, una red de impedancia Quasi Z y un convertidor que puede ser del tipo VSI o CSI [46]. El modo de operación es similar al ZSI, es decir, agrega un estado adicional. La red de impedancia del Quasi Z la conforman dos inductores y dos condensadores conectados de forma diferente a la red clásica Z [47].

Una de las ventajas de esta topología es que permite la disminución de la corriente de estrés en los inductores de entrada de la red. En [48] la proponen como una topología alternativa de alta prestación para aplicaciones de sistemas de tracción en vehículos híbridos y eléctricos.

La red de impedancia proporciona un amortiguador entre la fuente y el puente inversor, facilitando operación en corto y en circuito abierto en cualquier momento, dependiendo del modo de operación que se encuentre [49].

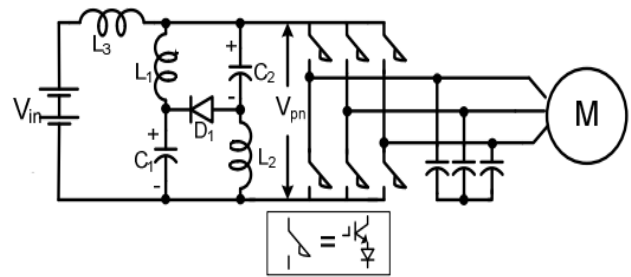


Figura 20. Topología de convertidor con red de impedancia Quasi Z para sistema de tracción.

Un problema que presentan este tipo de topologías al aplicarse a sistemas de tracción, es el retorno de corriente, al considerar que en un sistema de tracción es permisible el modo de regeneración de energía, para contrarrestar estos inconvenientes varias propuestas con topologías con fuente Z son presentadas en [10]-[50]-[51]. En [50], se implementa una topología de convertidor Z bidireccional para vehículo eléctrico (Fig. 21), con dispositivos IGBTs. La topología propuesta permite recuperación de energía, con la implementación de una red de impedancia Z como elevador DC/DC incluyendo dos estados de activación SA, SB, para alimentar al sistema y recargar la batería. Sin embargo, en número de interruptores necesarios se incrementa sustancialmente respecto a configuraciones DC/DC clásicas.

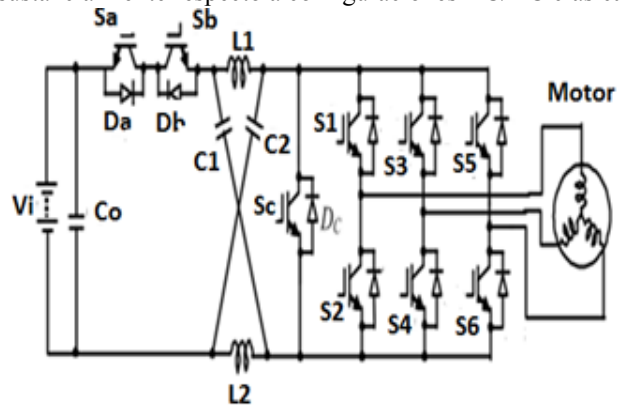


Figura 21. Topología de convertidor Z para vehículos eléctricos.



En [52], se analiza el comportamiento y el diseño de un convertidor bidireccional con fuente de impedancia  $Z$  (Fig. 22), para ello presenta un estado de activación adicional, en donde su funcionamiento condiciona la situación de retorno de corriente.

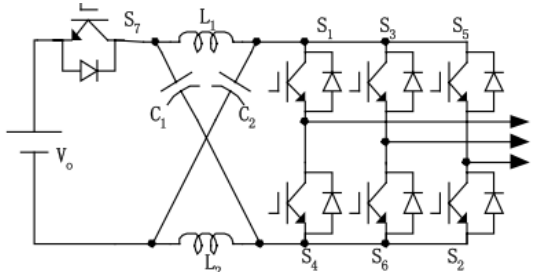


Figura 22. Topología de convertidor  $Z$  bidireccional.

Con la aplicación de esta topología se logra disminuir el estrés sobre los elementos pasivos de la red en el momento de carga y descarga del sistema.

En [53] se realiza un análisis y comparación entre tres topologías que se aplican para la implementación de sistemas de tracción, considerando el almacenamiento de energía, corriente rms y las pérdidas de potencia, una topología convencional con elevador DC-DC más un convertidor VSI (Fig. 23.a), otra que consisten en una red de impedancia  $Z$  más un VSI (Fig. 23.b) y por último una topología Q-ZSI con un inversor VSI (Fig. 23.c), como resultado de este análisis se llega a establecer que la topología con mejor rendimiento en la Q-ZSI.

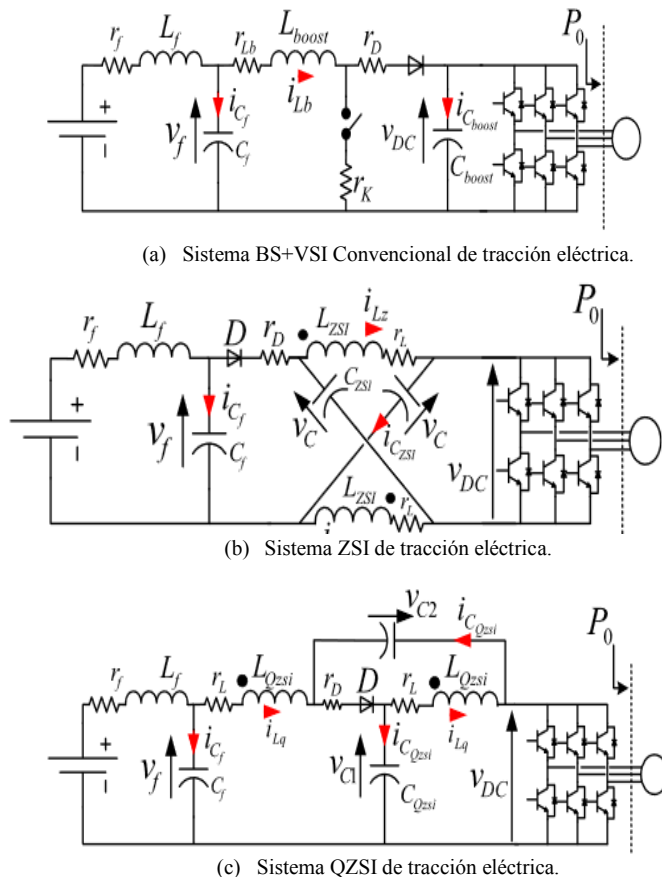


Figura 23. Topologías de sistemas de tracciones propuestos.

En la aplicación presentada en [54] se hace una propuesta de convertidor semi QZSI (Fig. 24), que utiliza una red de impedancia semi  $Z$  conformada por un inductor, condensador dos diodos y dos transistores cuya función es de un elevador DC/DC, también permite recargar la batería y protege de circuitos abiertos. La topología del convertidor propuesta es una CSI, esta reduce la capacitancia total, y produce voltajes y corrientes sinusoidales a la etapa del motor por el efecto de filtros de bajo valor de capacitancia.

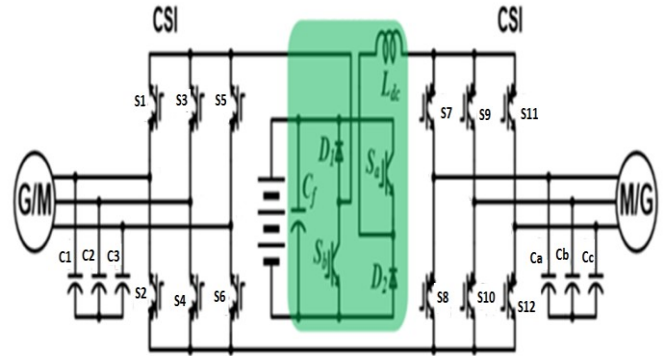


Figura 24. Topología semi  $Z$  QZSI-CSI propuesta.

En [55] la topología QZSI presentada, incorpora una red de impedancia más un convertidor VSI (Fig. 25) y se propone la incorporación de un semiconductor Mosfet en la entrada de la red Quasi  $Z$ , para poder regenerar la corriente hacia la batería y minimizar el estrés del condensador.

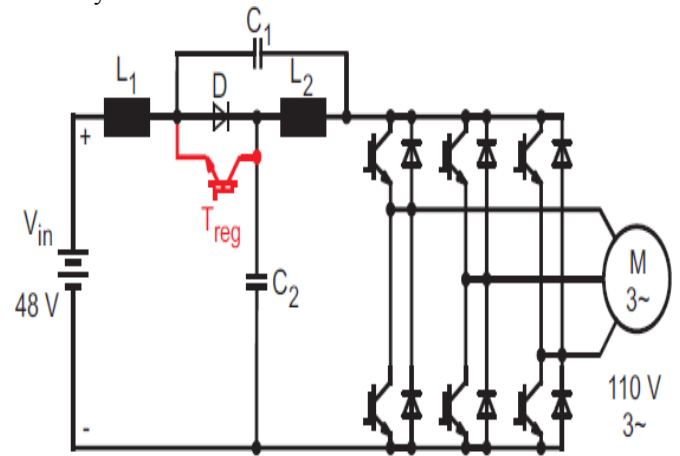


Figura 25. Topología Quasi  $Z$  Inverter con acople de sistema de regeneración.

Se concluye que la tendencia de las aplicaciones de convertidores con redes de impedancia de a poco va tomando su protagonismo en el desarrollo e investigación de sistemas de tracción para EV. Estas topologías buscan mejorar los rendimientos de los convertidores VSI y CSI. Los diferentes trabajos descritos anteriormente dan una visión más clara y precisa de las propuestas planteadas y su funcionalidad, cuyo objetivo es llegar a un sistema en donde las pérdidas de potencias sean mínimas, la recirculación de corriente a la batería sea solventada y no afecten al rendimiento del convertidor.

#### IV. TÉCNICAS DE MODULACIÓN Y CONTROL PARA CONVERTIDORES CON REDES DE IMPEDANCIA.

Varias técnicas de modulación han sido presentadas para su implementación en convertidores con redes de impedancia, el objetivo principal de una técnica de modulación es la obtención de formas de onda de corriente o voltaje en donde las pérdidas sean mínimas, además de esta característica permiten la reducción de la tensión medio común y minimización de armónicos [5].

Existen dos estrategias de modulación que se pueden aplicar para este tipo de convertidores, la PWM Senoidal SPWM y la modulación espacial vectorial SVM.

##### A. Modulación SPWM.

En [14]-[56] se presentan los diferentes tipos de métodos que se pueden aplicar bajo esta técnica de modulación, para un convertidor del tipo Q-ZSI y ZSI están las modulaciones SBC, máximo control de impulso (MBC) y máximo control de impulso constante (MCBC), la diferencia de estas técnicas con respecto al SPWM convencional está en la incorporación de un nuevo estado denominado de cortocircuito o shoot-through, el cual será repetitivo durante la aplicación de la modulación. Este estado adicional se genera cuando la señal de la portadora este por encima del valor de referencia positiva VP o señal de shoot-through y la señal moduladora o por debajo de su señal de referencia negativa y la señal moduladora genera el estado ST o de cortocircuito (Fig. 26).

En el caso de la modulación SBC la señal de referencia es una línea recta y el estado ST se produce cuando la portadora es superior y la moduladora están por sobre esta señal (Fig. 26.a), para este caso el ciclo de trabajo D viene está en función del índice de modulación M

$$D_{max} = 1 - M \quad (1)$$

Si el índice de modulación aumenta a 1 el ciclo de trabajo del estado ST es cero por ende el convertidor se comporta como un VSI o CSI dependiendo de la fuente de alimentación que tenga.

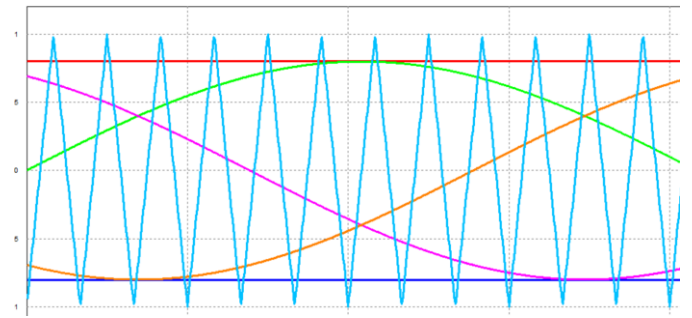
En el caso de la modulación MBC (Fig. 26. b), en donde la referencia de voltaje para el estado ST coincide con las señales moduladoras los estados ceros pasan a ser estados ST, entonces del  $D_{max}$  sería:

$$D_{max} = 1 - \frac{3\sqrt{3}M}{2\pi} \quad (2)$$

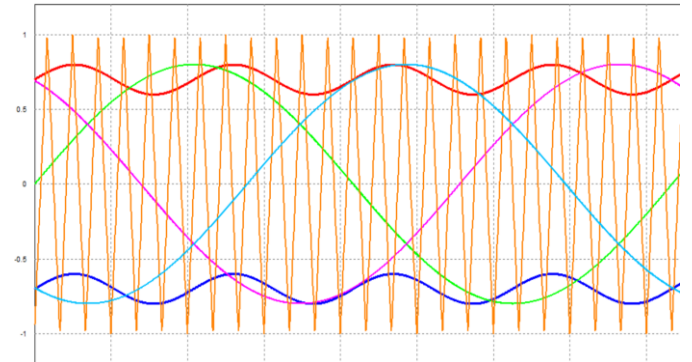
Esta modulación puede generar voltaje y corriente de ripple en el condensador e inductancia que conforman la red de impedancia [57], una manera de minimizar estos problemas es trabajar a alta frecuencia.

La modulación MCBC (Fig. 26.c), implica modificar la señal de referencia de ST ligeramente con respecto a la MBC y se obtiene una referencia constante para cada estado ST a través de una relación de ciclo de trabajo para cada conmutación.

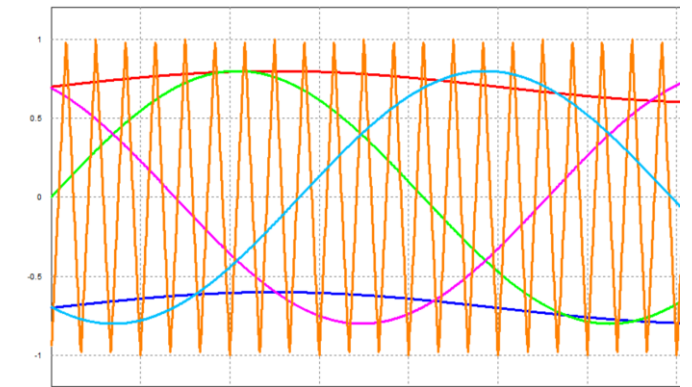
$$D_{max} = 1 - \frac{\sqrt{3}M}{2} \quad (3)$$



(a) Modulación SBC.



(b) Modulación MBC



(c) Modulación MCBC

Figura 26. Técnicas de Modulación SPWM para convertidores ZSI-QZSI

##### B. Modulación Espacial Vectorial SVM.

La modulación SVM tradicional ha sido modificada para su aplicación en este tipo de convertidores, considerando sus ventajas como la reducción de armónicos, bajo voltaje y corriente de estrés en los elementos pasivos y disminución de pérdidas en la activación [58]-[59], para el desarrollo de esta técnica se introduce un nuevo vector cero denominado estado de shoot-through (ST), que se agrega a los ya conocidos tanto en un convertidor VSI y CSI.

En la técnica de SMV para convertidores ZSI y QZSI el intervalo de tiempo en un ciclo del ST se divide en varias partes idénticas y cada una de estas se distribuye en el momento que dispara los vectores tradicionales de estado de conmutación y ceros. Existen tres métodos de modulación SVM el primero denominado ZSVM2 en donde se divide al tiempo ST en 4 partes iguales en un ciclo con una modificación de dos tiempos de activación [60].



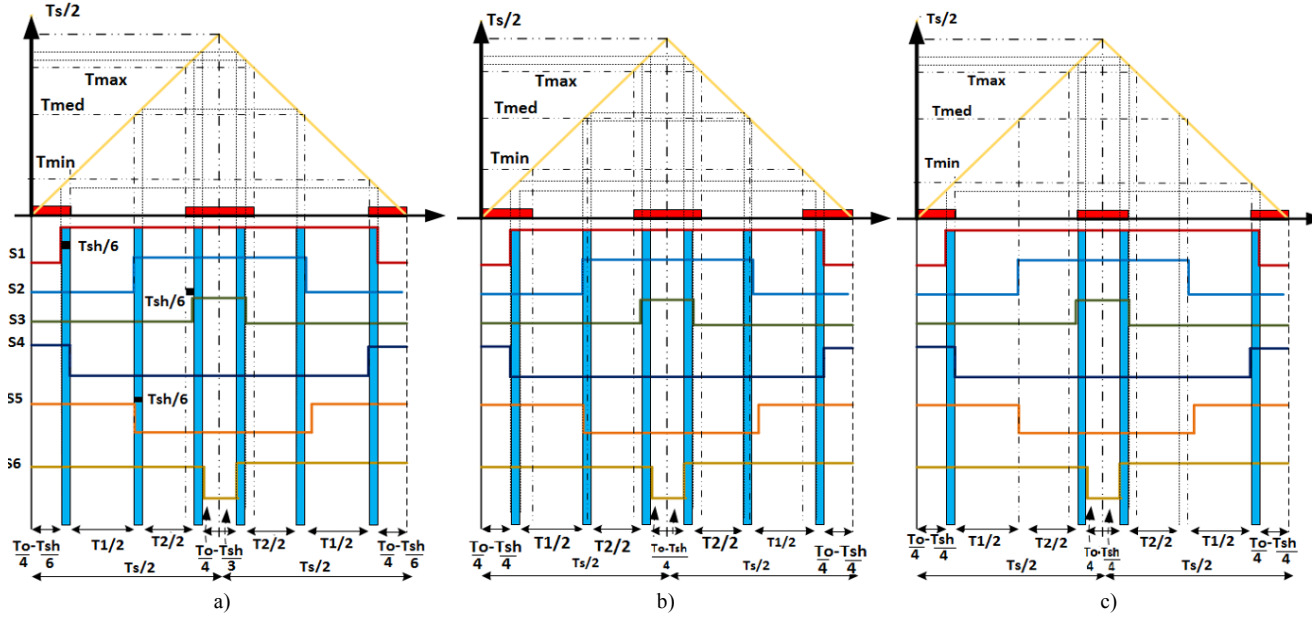


Figura 27. Técnicas de Modulación SVM para convertidores ZSI-QZSI, a) Modulación ZSVM6, b) Modulación ZSVM4, c) Modulación ZSVM2

El segundo método es conocido como ZSVM4, en donde el tiempo ST es dividido en 4 partes en cada ciclo, y únicamente modifica en 4 tiempos de conmutación [61].

ZSVM6, que consiste en dividir el ST en 6 partes y estos se van insertando en cada estado de los seis estados de conmutación [62]. A partir de estos 3 métodos principales (Fig.27), se han ido presentando diversas modificaciones en las técnicas y son analizadas en algunas investigaciones [63]-[64], tanto para el control de sistemas fotovoltaicos como para el control de motores, en donde se enfocan a disminuir el estrés de voltaje y corriente en los elementos que conforman la red de impedancia.

En la modulación ZSVM6 (Fig. 27.a), los tiempos de activación de la modulación SVM tradicional son desplazados antes o después de los tiempos reales, el tiempo total del estado ST es dividido en 6 partes iguales por periodo y cada parte es distribuida en cada secuencia de activación. La máxima relación de ST en un ciclo de trabajo o control es igual al ciclo de trabajo de un vector cero [57].

$$D_{max} = 1 - \frac{3\sqrt{3}M}{2\pi} \quad (3)$$

En la técnica ZSVM4 de igual manera se dividen en 6 partes pero ahora con la diferencia que se toman 4 estados ST de activación o control (Fig. 27. b), de esta manera el máximo tiempo ST es reducido a  $3/4T_o$ , el ciclo de trabajo para esta modulación viene dado por:

$$D = \frac{3}{4} \left( \frac{1-3\sqrt{3}M}{2\pi} \right) \quad (4)$$

Por último la técnica de modulación ZSVM2 (Fig. 27.c), esta solo realiza un solo tiempo de espera  $T_{sh}/4$  desde  $T_{max}$  para el interruptor superior y un tiempo de retraso  $T_{sh}/4$  desde  $T_{min}$  para el interruptor inferior. Dos señales de control de conmutación se modifican, y el tiempo total del estado ST a

través del tiempo se divide en cuatro partes en cada ciclo de control. El ciclo de trabajo para esta modulación es similar a ZSVM6.

## V. CONCLUSIONES

El presente estudio ofrece una visión clara sobre las topologías de convertidores con redes de impedancia utilizadas en convertidores de potencia, y en particular con aplicación en sistemas de tracción para HEV, VE, y muestra la tendencia a su implementación para solventar algunos problemas que se encuentran en los convertidores convencionales.

La utilización de una red de impedancia implica la no utilización de un elevador DC/DC, esta función es implementada por la misma red, lo que podría minimizar las pérdidas y mejorar el rendimiento del convertidor.

Las diversas técnicas de modulación que se pueden aplicar a estos tipos de convertidores, permiten ampliar el campo de la investigación en estos sistemas y brindan diferentes opciones para llegar a consolidar estas topologías emergentes en diferentes áreas como energías fotovoltaicas y sistemas de tracción.

## REFERENCIAS

- [1] Siwakoti, Y.P.; Fang Zheng Peng; Blaabjerg, F.; Poh Chiang Loh; Town, G.E., "Impedance-Source Networks for Electric Power Conversion Part I: A Topological Review," in *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.30, no.2, pp.699-716, Feb. 2015 doi: 10.1109/TPEL.2014.
- [2] F. Z. Peng, X. Yuan, X. Fang, and Z. Qian, "Z-source inverter for adjustable speed drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 1, no. 2, pp. 33-35, Jun. 2003.
- [3] Yamashita, N.; Asano, M.; Yamanaka, M.; Koizumi, H., "A Z-source inverter accepting rapid reverse current flow," in *TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference*, vol., no., pp.48-53, 21-24 Nov. 2010 TENCON.2010.
- [4] A. Emadi, S. S. Williamson, and A. Khaligh, "Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 3, pp. 567-577, May 2006.

- [5] F. Z. Peng, "Z-source inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, pp.504-510, Mar/Apr 2003.
- [6] Haizhong Ye; Yinye Yang; Emadi, A., "Traction inverters in hybrid electric vehicles," *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2012 IEEE, vol., no., pp.1, 6, 18-20 June 2012.
- [7] Gui-Jia Su; Lixin Tang, "A segmented traction drive system with a small dc bus capacitor," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012 IEEE, vol., no., pp.2847, 2853, 15-20 Sept. 2012.
- [8] Yamashita, N.; Asano, M.; Yamanaka, M.; Koizumi, H., "A Z-source inverter accepting rapid reverse current flow," in *TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference*, vol., no., pp.48-53, 21-24 Nov. 2010.
- [9] Battiston, A.; Martin, J.-P.; Miliiani, E.-H.; Nahid-Mobarakeh, B.; Pierfederici, S.; Meibody-Tabar, F., "Comparison Criteria for Electric Traction System Using Z-Source/Quasi Z-Source Inverter and Conventional Architectures," in *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, vol.2, no.3, pp.467-476, Sept. 2014.
- [10] Ellabban, O.; Van Mierlo, Joeri; Lataire, Philippe; Van Den Bossche, P., "Z-source inverter for vehicular applications," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*, vol., no., pp.1-6, 6-9 Sept. 2011.
- [11] Anderson, J.; Peng, F., "Four quasi-Z-Source inverters," in *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, vol., no., pp.2743-2749, 15-19 June 2008.
- [12] Antal, R.; Muntean, N.; Boldea, I.; Blaabjerg, F., "Novel, four-switch, z-source three-phase inverter," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, vol., no., pp.619-624, 7-10 Nov. 2010.
- [13] Fang Zheng Peng; Miaosen Shen; Holland, K., "Application of Z-Source Inverter for Traction Drive of Fuel Cell—Battery Hybrid Electric Vehicles," in *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.22, no.3, pp.1054-1061, May 2007.
- [14] Miaosen Shen; Jin Wang; Joseph, A.; Fang Zheng Peng; Tolbert, L.M.; Adams, D.J., "Constant boost control of the Z-source inverter to minimize current ripple and voltage stress," in *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.42, no.3, pp.770-778, May-June 2006.
- [15] Battiston, A.; Miliiani, E.-H.; Martin, J.-P.; Nahid-Mobarakeh, B.; Pierfederici, S.; Meibody-Tabar, F., "A Control Strategy for Electric Traction Systems Using a PM-Motor Fed by a Bidirectional Z-Source Inverter," in *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol.63, no.9, pp.4178-4191, Nov. 2014.
- [16] Shahinpour, A.; Moghani, J.S.; Gharehpetian, G.B.; Abdi, B., "High gain high-voltage z-source converter for offshore wind energy systems," in *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2014 5th*, vol., no., pp.488-493, 5-6 Feb. 2014.
- [17] Karimi, R.; Koenke, T.; Kaczorowski, D.; Werner, T.; Mertens, A., "Low voltage and high power DC-AC inverter topologies for electric vehicles," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2013 IEEE, vol., no., pp.2805, 2812, 15-19 Sept. 2013.
- [18] Y. Tang, S. Xie, and J. Ding, "Pulsewidth modulation of Z-source inverters with minimum inductor current ripple," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 1, pp. 98–106, Jan. 2014.
- [19] P. C. Loh, C. J. Gajanayake, D. M. Vilathgamuwa, and F. Blaabjerg, "Evaluation of resonant damping techniques for Z-source current-type inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 4, pp. 2035–2043, Jul. 2008.
- [20] D. Li, P. C. Loh, M. Zhu, F. Gao, and F. Blaabjerg, "Enhanced-boost Z-source inverters with alternate-cascaded switched-and tapped-inductor cells," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 3567–3578, Sep. 2013.
- [21] C. Cai, Y. Qu, and Y. Zhang, "Modeling and novel modulation of enhanced Z-source inverter," *J. Comput.*, vol. 8, no. 1, pp. 208–216, Jan. 2013.
- [22] D. Cao, S. Jiang, X. Yu, and F. Z. Peng, "Low cost single-phase semi-Z-source inverter," in *Proc. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Mar. 2011, pp. 429–436.
- [23] D. Cao, S. Jiang, X. Yu, and F. Z. Peng, "Low-cost semi-Z-source inverter for single-phase photovoltaic systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3514–3523, Dec. 2011.
- [24] P. C. Loh, F. Gao, and F. Blaabjerg, "Embedded EZ-source inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 1, pp. 256–267, Jan./Feb. 2010.
- [25] F. Gao, P. C. Loh, F. Blaabjerg, and C. J. Gajanayake, "Operational analysis and comparative evaluation of embedded Z-source inverters," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, Jun. 2008, pp. 2757–2763.
- [26] F. Zhang, F. Z. Peng, and Z. Qian, "Z-H converter," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, Jun. 2008, pp. 1004–1007.
- [27] P. C. Loh, N. Duan, C. Liang, F. Gao, and F. Blaabjerg, "Z-source B4 inverter," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, Jun. 2007, pp. 1363–1369.
- [28] M. Zhu, K. Yu, and F. L. Luo, "Switched inductor Z-source inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 8, pp. 2150–2158, Aug. 2010.
- [29] M. K. Nguyen, Y. C. Lim, and G. B. Cho, "Switched-inductor quasi-Z-source inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 11, pp. 3183–3191, Nov. 2011.
- [30] C. J. Gajanayake, F. L. Luo, H. B. Gooi, P. L. So, and L. K. Siow, "Extended-boost Z-source inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 10, pp. 2642–2652, Oct. 2010.
- [31] C. J. Gajanayake, H. B. Gooi, F. L. Luo, P. L. So, L. K. Siow, and Q. N. Vo, "Simple modulation and control method for new extended boost quasi Z-source," in *Proc. TENCON Conf.*, Jan. 2009, pp. 1–6.
- [32] L. Huang, M. Zhang, L. Hang, W. Yao, and Z. Lu, "A family of three switch three-state single-phase Z-source inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 5, pp. 2317–2329, May 2013.
- [33] F. Z. Peng, "Z-source network for power conversion," in *Proc. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Feb. 2008, pp. 1258–1265.
- [34] S. Jiang and F. Z. Peng, "Transmission-line theory based distributed Z-source networks for power conversion," in *Proc. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Mar. 2011, pp. 1138–1145.
- [35] Battiston, A.; Miliiani, E.-H.; Martin, J.-P.; Nahid-Mobarakeh, B.; Pierfederici, S.; Meibody-Tabar, F., "A Control Strategy for Electric Traction Systems Using a PM-Motor Fed by a Bidirectional Z-Source Inverter," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol.63, no.9, pp.4178,4191, Nov. 2014.
- [36] S. Suresh Kumar Dr. S. Shiv Prasad" Control Scheme of Control Scheme of Z-Source Inverter Based BLDC Motor Drive System Using Modified Pulse Width Modulation Technique", *International Journal of Engineering Research and Applications* ISSN: 2248-9622, 2014.
- [37] Adamowicz, M.; Morawiec, M., "Advances in CSI-fed induction motor drives," *Compatibility and Power Electronics (CPE), 2011 7th International Conference-Workshop*, vol., no., pp.276,282, 1-3 June 2011.
- [38] H. Xu, F. Peng, L. Chen and X. Wen, "Analysis and design of bidirectional Z-source inverter for electrical vehicles," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Austin, TX, Feb. 2008, pp. 1252-1257.
- [39] Hegazy, O.; Barrero, R.; Van Mierlo, J.; Lataire, P.; Omar, N.; Coosemans, T., "An Advanced Power Electronics Interface for Electric Vehicles Applications," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.28, no.12, pp.5508,5521, Dec. 2013.
- [40] Shuai Jiang; Dong Cao; Peng, F.Z., "High frequency transformer isolated Z-source inverters," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*, vol., no., pp.442,449, 6-11 March 2011.
- [41] Ding Li; Poh Chiang Loh; Miao Zhu; Feng Gao; Blaabjerg, F., "Generalized Multicell Switched-Inductor and Switched-Capacitor Z-Source Inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.28, no.2, pp.837, 848, Feb. 2013.
- [42] Cong-Thanh Pham, Anwen Shen, Phan Quoc Dzung, Nguyen Bao Anh, Nguyen Xuan Phu, "A Comparison of Control Methods for Z-Source Inverter", *Energy and Power Engineering*, 2012, 4, 187-195.
- [43] Y. Liu, B. Ge, H. A. Rub, and F. Z. Peng, "Control system design of battery-assisted quasi-Z-source inverter for grid-tie photovoltaic power generation," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 994–1001, Oct. 2013.
- [44] Ismeil, M.A.; Kouzou, A.; Kennel, R.; Abu-Rub, H.; Orabi, M., "A new switched-inductor quasi-Z-source inverter topology," *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2012 15th International, vol., no., pp.DS3d.2-1, DS3d.2-6, 4-6 Sept. 2012.
- [45] Vazquez Sieber, A.; Haimovich, H.; Romero, M.E., "Control-oriented Modelling and adaptive control of a single-phase quasi-Z-source Inverter," *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, vol., no., pp.572, 577, 10-13 Nov. 2013.
- [46] Sonar, S.; Maity, T., "Wind power conversion based on quasi-z source inverter," *Control, Automation, Robotics and Embedded Systems (CARE), 2013 International Conference on*, vol., no., pp.1.6, 16-18 Dec. 2013.
- [47] H. Xu, F. Z. Peng, L. Chen, and X. Wen "Analysis and Design of Bi-

- Directional Z-Source inverter for electrical vehicles," IEEE Twenty Third Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2008, Austin, Texas, Feb. 2008.
- [48] Yushan Liu; Baoming Ge; Ferreira, F.J.T.E.; de Almeida, A.T.; Abu-Rub, H., "Modeling and SVPWM control of quasi-Z-source inverter," Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on, vol., no., pp.1, 7, 17-19 Oct. 2011.
- [49] Hegazy, O.; Barrero, R.; Van Mierlo, J.; Lataire, P.; Omar, N.; Coosemans, T., "An Advanced Power Electronics Interface for Electric Vehicles Applications," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.28, no.12, pp.5508,5521, Dec. 2013.
- [50] Yamanaka, M.; Koizumi, H., "A bi-directional Z-source inverter for Electric vehicles," Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009. International Conference on, vol., no., pp.574, 578, 2-5 Nov. 2009.
- [51] Yamashita, N.; Asano, M.; Yamanaka, M.; Koizumi, H., "A Z-source inverter accepting rapid reverse current flow," in *TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference* , vol., no., pp.48-53, 21-24 Nov. 2010.
- [52] Haiping Xu; Peng, F.Z.; Lihua Chen; Xuhui Wen, "Analysis and design of Bi-directional Z-source inverter for electrical vehicles," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE*, vol., no., pp.1252-1257, 24-28 Feb. 2008.
- [53] Battiston, A.; Martin, J.-P.; Miliani, E.-H.; Nahid-Mobarakeh, B.; Pierfederici, S.; Meibody-Tabar, F., "Comparison Criteria for Electric Traction System Using Z-Source/Quasi Z-Source Inverter and Conventional Architectures," in *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of* , vol.2, no.3, pp.467-476, Sept. 2014.
- [54] Gui-Jia Su; Lixin Tang, "Current source inverter based traction drive for EV battery charging applications," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE* , vol., no., pp.1-6, 6-9 Sept. 2011.
- [55] Beer, K.; Piepenbreier, B., "Properties and advantages of the quasi-Z-source inverter for DC-AC conversion for electric vehicle applications," in *Emobility - Electrical Power Train, 2010*, vol., no., pp.1-6, 8-9 Nov. 2010.
- [56] Peng, F.Z.; Miaosen Shen; Zhaoming Qian, "Maximum boost control of the Z-source inverter," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, vol.1, no., pp.255-260 Vol.1, 20-25 June 2004.
- [57] Yushan Liu; Abu-Rub, H.; Baoming Ge, "Z-Source/Quasi-Z-Source Inverters: Derived Networks, Modulations, Controls, and Emerging Applications to Photovoltaic Conversion," in *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol.8, no.4, pp.32-44, Dec. 2014.
- [58] Ali, U.S.; Kamaraj, V., "A novel space vector PWM for Z-source inverter," in *Electrical Energy Systems (ICEES), 2011 1st International Conference on* , vol., no., pp.82-85, 3-5 Jan. 2011.
- [59] Yushan Liu; Baoming Ge; Abu-Rub, H.; Fang Zheng Peng, "Overview of Space Vector Modulations for Three-Phase Z-Source/Quasi-Z-Source Inverters," in *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.29, no.4, pp.2098-2108, April 2014.
- [60] O. Ellabban, M. J. Van, and P. Lataire, "Experimental study of the shootthrough boost control methods for the Z-source inverter," in *Proc. Eur.Power Electron. Drives Assoc.*, Jun. 2011, vol. 21, no. 2, pp. 18-29.
- [61] J. W. Jung and A. Keyhani, "Control of a fuel cell based Z-source converter," *IEEE Trans. Energy Conver.*, vol. 22, no. 2, pp. 467-476, Jun. 2007.
- [62] Y. Liu, B. Ge, F. J. T. E. Ferreira, A. T. de Almeida, and H. A. Rub, "Modelling and SVM control of Quasi Z-source inverter," in *Proc. 11th Int. Conf. Electr. Power Quality Utilization*, Oct. 2011, pp. 1-7.
- [63] Siwakoti, Y.P.; Town, G.E., "Three-phase transformerless grid connected Quasi Z-Source Inverter for solar photovoltaic systems with minimal leakage current," in *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2012 3rd IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.368-373, 25-28 June 2012.
- [64] Siwakoti, Y.P.; Town, G.E., "Common-mode voltage reduction techniques of three-phase Quasi Z-Source Inverter for AC drives," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE* , vol., no., pp.2247-2252, 17-21 March 2013.
- [65] Yuan Li; Shuai Jiang; Cintron-Rivera, J.G.; Fang Zheng Peng, "Modeling and Control of Quasi-Z-Source Inverter for Distributed Generation Applications," in *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.60, no.4, pp.1532-1541, April 2013.
- [66] Li, Yuan; Peng, Fang Z., "AC small signal modeling, analysis and control of quasi-Z-Source Converter," in *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International* , vol.3, no., pp.1848-1854, 2-5 June 2012.
- [67] Siwakoti, Y.P.; Fang Zheng Peng; Blaabjerg, F.; Poh Chiang Loh; Town, G.E.; Shuitao Yang, "Impedance-Source Networks for Electric Power Conversion Part II: Review of Control and Modulation Techniques," in *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.30, no.4, pp.1887-1906, April 2015.
- [68] Ellabban, O.; Van Mierlo, Joeri; Lataire, Philippe, "A DSP-Based Dual-Loop Peak DC-link Voltage Control Strategy of the Z-Source Inverter," in *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.27, no.9, pp.4088-4097, Sept. 2012.
- [69] Tae-Won Chun; Quang-Vinh Tran; Jung-Ryol Ahn; Jih-Sheng Lai, "AC Output Voltage Control with Minimization of Voltage Stress across Devices in the Z-Source Inverter Using Modified SVPWM," in *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE*, vol., no., pp.1-5, 18-22 June 2006.

**Efrén Fernández Palomeque** was born in Azogues. He received the M.S. degree in Control Industrial University Polytechnic ESPOL from the, Guayaquil Ecuador, in 2010. He is a PhD student in Motion Control and Industrial Applications MCIA of the University Polytechnic of Catalonia in Spain. His research interests include power-electronic system design, electrical motor drive, fault tolerant converters and their applications in hybrid and electrical vehicles.



**Dr. Luis Romeral Martínez** received his electrical engineering degree and the Ph.D. degree from the Technical University of Catalonia (UPC) in 1985 and 1995 respectively. In 1988 he joined the Electronic Engineering Department of the UPC, where he is currently Associate Professor. In 2001, Dr. Romeral headed the foundation of Motion Control and Industrial Applications (MCIA Center) as a research group of the UPC, since then, he occupies the Direction's position. His research and technology transfer activity covers industrial electronics, industrial maintenance, energy efficiency, high-voltage systems, mechatronics and electric vehicle technologies.



**Dr. Vicent Sala** was born in Valencia, Spain, in 1978. He received the B.S. and M.S. degrees in electronic engineering from the Technical University of Catalonia (UPC), Terrassa, Spain, in 2001 and 2006, respectively. In 2000, he was the responsible of the Electronic Department in Twistechnology SL. In 2006, he was the responsible of the R+D Department in INGESCO Lightning Protection Systems. In 2001, he joined in the faculty of Technical University of Catalonia (UPC) as an Assistant Professor. He is currently a member of the MCIA Research Center of the Electronic Department (UPC). He is finishing his Ph.D. related to the high efficiency multilevel power converters.

