

Diseño y control tolerante a fallas de un inversor aislado para alimentar cargas auxiliares en vehículos eléctricos

Proyecto de Tesis de Maestría
Posgrado en Ingeniería Electrónica
Asesores: Dr. Andrés Alejandro Valdez Fernández

Motivación y antecedentes

En la actualidad, un vehículo eléctrico (EV, por sus siglas en inglés) comúnmente utiliza un sin número de convertidores conmutados para su funcionamiento tal y como se muestra en la Figura 1.1. Básicamente, se pueden englobar en tres tipos de convertidores de potencia: convertidores AC-DC (rectificadores), convertidores DC-DC y convertidores DC-AC (inversores). El rectificador suele ser usado en su mayoría para la carga del EV y es el encargado de convertir el voltaje de la red AC a un voltaje DC para la carga de la batería. El convertidor DC-DC tiene tres aplicaciones principales. La primera aplicación consiste en un convertidor unidireccional utilizado por diversas cargas a bordo del vehículo, como lo son: sensores, controles de ventanas, equipos de entretenimiento y sistemas de seguridad. La segunda aplicación es un convertidor que permite un flujo bidireccional de energía. Este es empleado en el encendido de motores de DC y como controlador de carga de baterías en el aprovechamiento de la energía generada durante el frenado regenerativo del EV [1]. La tercera aplicación es típicamente utilizando un convertidor DC-DC elevador como precompensador del factor de potencia (PFC, por sus siglas en inglés) durante la carga de las baterías en una estación fija [2]. Los inversores que intervienen en un EV son, por un lado son los inversores de la transmisión del vehículo y recientemente un inversor para conectar cargas auxiliares a bordo del vehículo [3], [4] (tópico de estudio de la presente propuesta). Es importante destacar que, en aplicaciones de alta tensión, es esencial contar con protecciones sólidas tanto para los dispositivos como para los usuarios, sobre todo porque los sistemas de los EV's incluyen múltiples líneas de alimentación y cualquier interferencia entre ellas podría tener graves consecuencias [2].

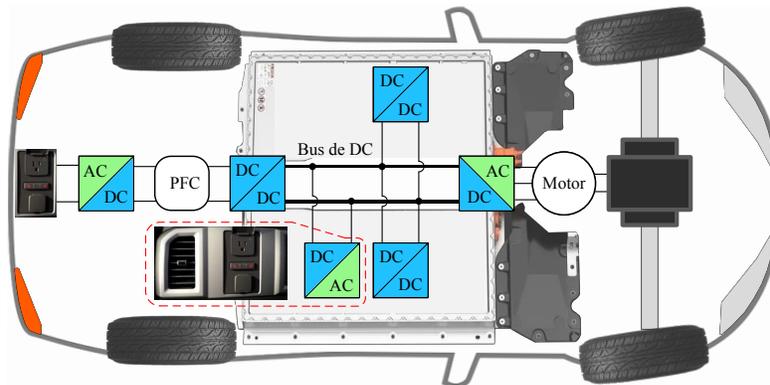


Figura 1: Convertidores de potencia comunmente utilizados en un EV.

Una de las partes más importantes de los EV's es su enlace de Corriente Directa (por sus siglas en inglés, DC), la cual es un voltaje de DC del orden de 400V y 800V que garantiza un suministro de energía constante y estable a los demás convertidores de potencia utilizados en el interior del vehículo, como lo muestra la Figura 1.1. Así mismo, es importante destacar que cada uno de los convertidores mencionados anteriormente pueden incluir más de una etapa de conversión (diferentes topologías de convertidores conectados en cascada). En este sentido, el interés por mejorar la calidad eléctrica en los EVs es en la actualidad un punto clave para su desarrollo [5]. Los avances en los dispositivos de potencia y el control en tiempo real de los mismos juegan un rol importante en la industrialización y la eficiencia energética del siglo XXI [6]. Los usuarios del vehículo pueden necesitar energizar por medio del automóvil algunos dispositivos

electrónicos que requieran una alimentación AC. Ejemplos de estos dispositivos pueden ser cargadores de celulares, consolas de videojuegos, ordenadores o incluso herramientas de trabajo o plantas de energía. Las cargas previamente descritas son conocidas como no lineales y pueden causar problemas como generación de potencia reactiva, distorsión armónica, distorsión de la tensión, interferencias en las redes de comunicaciones e impacto en la medición de la energía; tales problemas disminuyen la eficiencia global del sistema [7], [8] y son producidos debido a un porcentaje de Distorsión Armónica Total (por sus siglas en inglés, THD) que excede los rangos de seguridad establecidos por la norma IEEE-519 [9]. Se han investigado diversas técnicas de control con el objetivo de alcanzar un bajo porcentaje de Distorsión Armónica Total (THD), entre las cuales se destaca el control deadbeat [10]. Este enfoque ofrece ventajas notables, como frecuencias de conmutación constantes, respuestas dinámicas rápidas y un tiempo de asentamiento reducido [11]. Sin embargo, su rendimiento está intrínsecamente ligado a la precisión del modelado, y su implementación requiere ser discretizada [12]. Otro enfoque relevante es el control repetitivo [13], el cual ha demostrado ser efectivo en diversas aplicaciones como son convertidores de potencia, filtros activos, inversores, etc. Su aplicación más común es el seguimiento de señales de referencia periódicas y el rechazo de perturbaciones periódicas [14], [15]. El control predictivo [16] es otra técnica que ha sido utilizada en la literatura. Consiste en un algoritmo basado en la optimización numérica y es sencillo de diseñar e implementar, además de reducir el estrés computacional, sin embargo, este requiere de una mayor cantidad de tiempo de procesamiento que otros controladores [17]. El control con una estructura Proporcional Resonante (PR) es ampliamente utilizado debido a que teóricamente cuenta con una ganancia infinita a la componente fundamental y a sus múltiplos, por lo que el error de estado estacionario se aproxima a cero [18]. Este control cuenta con dos ganancias independientes una de la otra, lo que permite compensar armónicos sin introducir ganancias o cambios de fase a otras frecuencias [19].

Objetivo

Desarrollar una estructura de un inversor aislado para cargas auxiliares en para vehículos eléctricos, así como su algoritmo de control que opere en condiciones de falla de los dispositivos de conmutación y que permita voltajes puramente sinusoidales a pesar de la conexión de cargas no lineales.

Propuesta y actividades

El presente proyecto propone desarrollar, controlar e implementar una estructura de inversores para vehículos eléctricos que permita conectar cargas auxiliares de corriente alterna (circulado en rojo en la Figura 1), así como el desarrollo de un algoritmo de control para generar un voltaje puramente sinusoidal a pesar de la conexión de cargas auxiliares de naturaleza no lineal. El diagrama a bloques mostrado en la Figura 2. muestra la topología del inversor a estudiar, la cual consta de dos etapas, la primera etapa proporciona aislamiento y reduce el voltaje del Bus de DC (considerando voltajes de vehículos eléctricos comerciales) a un valor deseado por medio de convertidores DC-DC aislados. La segunda etapa se conecta en cascada a la primera etapa y consiste de un inversor de onda sinusoidal pura (TSW) basado en un convertidor multinivel de puentes-H en cascada (CHB) de siete niveles (CHB-7) que proporciona un voltaje puramente sinusoidal a pesar de la conexión de cargas auxiliares de naturaleza no lineal.

Las condiciones de falla a estudiar son fallas de circuito abierto (FCA) en los convertidores CHB del inversor TSW. En consecuencia, se sugiere modelar este tipo de fallas usando una estructura aditiva [20], tomando como base el modelo matemático en condición nominal. Esto es, se empleará un enfoque basado en modelos para la detección y aislamiento de las fallas (FDI) en los interruptores de potencia del convertidor multinivel CHB. Con este propósito, se propone emplear un banco de observadores PI para la estimación de los estados y perfiles de falla del sistema, lo que permitirá construir posteriormente un generador de residuos para el diagnóstico de la FCA en el convertidor. Para este caso en específico, se considera que la componente en CD del perfil de falla proveerá de la información necesaria para llevar a cabo las tareas de detección y aislamiento en el proceso de diagnóstico, por lo que los observadores propuestos serán los encargados de estimar la componente en CD de los perfiles.

Por otro lado, para la obtención de resultados experimentales se implementarán los convertidores DC-DC aislados, mientras que para el inversor TSW se utilizarán puentes-H desarrollados en el Laboratorio de Electrónica de Potencia, una carga no lineal y un conjunto de sensores de voltaje y corriente. Para programar el esquema de control se utilizarán una tarjeta de arreglos de compuertas lógicas programables (FPGA) programada en VHDL y una tarjeta de control dSPACE programada en Simulink de MATLAB. Cabe mencionar que actualmente se cuenta con el material necesario para la implementación del sistema en una primera etapa de control, mientras que se tiene contemplado adquirir un ACE_MLBX: Advanced Control Kit MicroLabBox para la segunda etapa del diagnóstico de fallas. Adicional, los Laboratorios de Electrónica de Potencia y Sistemas de Control de la Facultad de Ciencias se cuenta con el equipo (fuentes programables de voltaje, osciloscopios, etc.) suficiente para continuar con la implementación del sistema completo. **Cabe mencionar que este trabajo esta basado en el enfoque FDI propuesto en nuestro trabajo previo [20] y que utiliza el modelo generalizado propuesto en [21]. En este sentido, considerando el estado del arte en esta línea de investigación, se espera que los resultados experimentales permitan la escritura de un artículo de revista internacional indexada.**

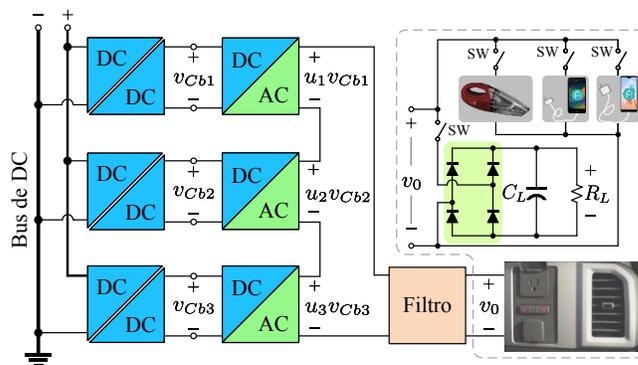


Figura 2: Topología del inversor a estudiar basado en un convertidores DC-DC aislados + un inversor CHB-7.

Las actividades a desarrollar por el estudiante son descritas en el siguiente Cronograma de actividades:

Materias por Cursar

Se propone cursar 2 de las siguientes 3 materias en el semestre Agosto-Diciembre/2024:

1. Automatización de procesos
2. Detección y estimación
3. Sistemas Electrónicos Embebidos

ACTIVIDADES	FECHA														
	Junio 2024	Julio 2024	Agosto 2024	Sep. 2024	Octubre 2024	Nov. 2024	Dic. 2024	Enero 2025	Febrero 2025	Marzo 2025	Abril 2025	Mayo 2025	Junio 2025	Julio 2025	Agosto 2025
Revisión bibliográfica.															
Estudio del concepto general de convertidores DC-DC aislados y multinivel CHB .															
Estudio de esquemas de modulación para el convertidor DC-DC aislado y el convertidor CHB.															
Simulaciones en PSCAD del convertidor DC-DC aislado y el convertidor multinivel CHB con filtro LC en lazo abierto.															
Estudio del control del convertidor DC-DC aislado.															
Estudio del control del convertidor CHB con filtro LC de 5, 7 y n niveles.															
Estudio de la epapa de detección y aislamiento de fallas															
Simulaciones en PSCAD del convertidor DC-DC aislado y multinivel CHB y filtro LC en lazo cerrado y la etapa FDI.															
Implementar el esquema de control de los convertidores DC-DC aislado y multinivel CHB.															
Pruebas experimentales preliminares del sistema en lazo cerrado en medio voltaje															
Pruebas experimentales del sistema en lazo cerrado a voltaje de valores comerciales (400V)															
Escritura de documento de tesis															
Presentación de examen previo y final de grado															

Bibliografía

[1] D. M. Bellur y M. K. Kazimierczuk, «DC-DC converters for electric vehicle applications,» en 2007 *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, 2007, pp. 286-293.

[2] P. Granello, F. Pellitteri, R. Miceli y L. Schirone, «Highly Efficient Capacitive Galvanic Isolation for EV Charging Stations,» en 2022 *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2022, pp. 389-394.

- [3] Eaton True Sine Wave (TSW) Inverters vs. Modified Sine Wave (MSW) Inverters for Microwave Oven and Refrigerator Power Revision 2.0, 2015.
- [4] Andres A. Valdez-Fernandez, Eduardo A. Gutierrez-Robles, Gerardo Escobar, Raymundo E. Torres-Olguin, "A Model-Based Controller for an Isolated Inverter for Electric Vehicle Applications," en *International Symposium on Electromobility ISEM 2023*, MONTERREY, NL, 26-28 October 2023,
- [5] L. Shao, A. E. H. Karci, D. Tavernini, A. Sornioti y M. Cheng, Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles—A Review,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116 900-116 913, 2020.
- [6] M. Debbou, T. Achour, J. Gillet y M. Pietrzak-David, «From simulation to real-time control for DFIM drive,» en 2013 IEEE 11th International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics, 2013, pp. 1-6.
- [7] M. J. H. Rawa, D. W. P. Thomas y M. Sumner, «Simulation of non-linear loads for harmonic studies,» en 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2011, pp. 1-6.
- [8] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), pp. 1-29, 2014.
- [9] A. Ulinuha y E. M. Sari, The influence of harmonic distortion on losses and efficiency of three-phase distribution transformer, *Journal of Physics: Conference*
- [10] M. Niroomand y H. R. Karshenas, «Review and comparison of control methods for uninterruptible power supplies,» en 2010 1st *Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, 2010, pp. 18-23.
- [11] P. Pariz y M. Monfared, «A Deadbeat Controller Design for Single-Phase Active Power Filters Based on Forward-Backward Discretization,» en 2021 12th *Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2021, pp. 1-5.
- [12] G. Elhassan, S. A. Zulkifli, S. Z. Iliya y col., «Deadbeat Current Control in Grid- Connected Inverters: A Comprehensive Discussion, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 3990-4014, 2022.
- [13] C. L. Gnoatto, A. Scarmin y E. G. Carati, «Repetitive control techniques applied to uninterruptible power supplies,» en 2010 9th *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON*, 2010, pp. 1-6.
- [14] E. Kurniawan, Z. Cao y Z. Man, «Robust design of repetitive control system,» en *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2011, pp. 722-727.
- [15] M. Tang, M. di Benedetto, S. Bifaretti, A. Lidozzi y P. Zanchetta, «State of the Art of Repetitive Control in Power Electronics and Drive Applications, *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 3, pp. 13-29, 2022.
- [16] J. A. Rohten, J. R. Espinoza, J. A. Muñoz y col., «Model Predictive Control for Power Converters in a Distorted Three-Phase Power Supply, *IEEE Transactions n Industrial Electronics*, vol. 63, no. 9, pp. 5838-5848, 2016.

- [17] C. Ekaputri y A. Syaichu-Rohman, «Model predictive control (MPC) design and implementation using algorithm-3 on board SPARTAN 6 FPGA SP605 evaluation kit,» en 2013 3rd *International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA)*, 2013, pp. 115-120.
- [18] R. Sowmya y S. Reddy, «Proportional Resonant Controlled Dual Active Bridge DC to AC Converter System with Enhanced Response,» *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 9, pp. 316, mar. de 2018.
- [19] M. Elghonimy, M. Fawzi, A. Kalas y G. A. Azeem, «Proportional resonant controller with resonant harmonic compensators for three-phase static frequency converter feeding nonlinear loads,» en 2017 *Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 2017, pp. 308-313.
- [20] Kassim O. Mtepele, Daniel U. Campos-Delgado, Andrés A. Valdez-Fernandez, José Angel Pecina Sánchez, “Model-based strategy for open-circuit faults diagnosis in n-Level CHB multilevel converters,” *IET Power Electronics*, vol. 12, issue 4, pp. 648-655, Feb. 2019.
- [21] Andres A. Valdez-Fernandez, Gerardo Escobar, Daniel U. Campos-Delgado, Kassim O. Mtepele and Panfilo R. Martinez-Rodriguez, “A model-based controller for a single-phase n-level CHB multilevel converter,” *Elsevier International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 125, 106454, feb. 2021, pp. 1-9.