

Control Tolerante a Fallas de un Convertidor Multinivel en Cascada Trifásico

Proyecto de Tesis de Maestría

Posgrado en Ingeniería Electrónica

Asesores: Dr. Andrés A. Valdez Fernández / Dr. Daniel U. Campos Delgado

Motivación y antecedentes

En años recientes, debido al incremento del sector industrial y al avance apresurado en la tecnología, se han elevado considerablemente los requerimientos de energía eléctrica tanto en cantidad como en calidad. Por ejemplo, controladores de Corriente Alterna (CA) en el rango de megavatios son usualmente conectados a la red de medio a alto voltaje (KV). Las esperanzas de realizar cualquier intento de compensación ante estas cargas se ven desvanecidas al saber que los dispositivos semiconductores que manejan esos rangos son costosos. Aunado a esto, los sistemas electrónicos de potencia de estas capacidades requieren de protecciones elaboradas, una mayor disipación de calor y las velocidades a la que pueden conmutar disminuyen conforme aumenta su capacidad en potencia. Los convertidores multinivel se presentan como una alternativa muy importante en el procesamiento de energía eléctrica a mediana y alta potencia, ya que permiten trabajar con altos voltajes usando dispositivos semiconductores de menor capacidad; sin embargo, debido a que estos dispositivos trabajan con un número mayor de semiconductores de potencia, estos convertidores resultan más complicados de controlar y son más susceptibles de presentar condiciones de falla [1]-[3], [11]-[13].

Los convertidores multinivel se construyen usando arreglos de semiconductores de potencia y elementos pasivos como son inductores y condensadores. Estos últimos haciendo la labor de fuentes de voltaje. Lo anterior permite sintetizar voltajes sinusoidales a través de varios niveles de escalones de voltaje, esto es, ofrecen la característica de sintetizar un voltaje con base en la combinación de muchos niveles de voltajes menores; lo cual permite que se pueden producir voltajes elevados manteniendo sin estrés a los dispositivos semiconductores. El término de “multinivel” se aplica a un inversor de tres niveles o más, y fue introducido inicialmente por Nabae et al. [4] bajo el nombre de convertidor de “neutro enclavado”. Este convertidor consiste en dos capacitores en serie cuya derivación central es usada como neutro. Cada rama del convertidor tiene dos pares de dispositivos semiconductores como interruptores en serie cuyo punto central es conectado al neutro a través de diodos de enclavamiento. La forma de onda del voltaje de salida de un convertidor de tres niveles es una onda cuasi-cuadrada. Conforme se incrementa el número de niveles de tensión en el convertidor, los valores de tensión y potencia se pueden incrementar, a su vez, el contenido armónico de la forma de onda de salida es reducido considerablemente. Sin embargo, es claro que un número alto de niveles aumenta la complejidad del algoritmo de control y sobretodo introduce problemas de desequilibrio de voltajes en los capacitores. En general se pueden identificar cuatro principales topologías básicas para convertidores multinivel a la fecha:

- a. Diodo de Enclavamiento o de neutro enclavado (NPC) [4].
- b. Capacitor de Enclavamiento o “flotante” (CCI) [5].
- c. Multiceldas en cascada (Cascaded H-bridge (CHB) Multilevel) [3], [7].
- d. Convertidor Multinivel Modular [6].

Debido al bajo costo y confiabilidad, la topología de convertidor CHB ha cobrado gran interés en aplicaciones recientes como aplicaciones aeroespaciales llamadas “more electric aircraft” (MEA) [14], inversores fotovoltaicos [8], filtros activos [3], [7] y aplicaciones de aerogeneradores [9]. Esta topología se basa en la conexión en cascada de Puentes-H monofásicos. Dado que estos módulos se pueden fabricar con las mismas especificaciones, es posible abaratar los costos de producción. En caso de falla en algún módulo, éste es simplemente sustituido por uno nuevo, facilitando así su mantenimiento. Además, este tipo de topología es tolerante a fallas, ya que el convertidor puede continuar funcionando, aunque con un menor nivel de tensión, al cortocircuitar una de sus etapas. En este sentido, existen pocos trabajos en la literatura que realicen diagnóstico de fallas en los actuadores de potencia operando el convertidor bajo un algoritmo de control en

lazo cerrado [10]. Siguiendo este contexto, se distinguen dos tipos de fallas en los interruptores de potencia: fallas de cortocircuito y fallas de circuito abierto (FCA). En el caso de una falla de cortocircuito, la unión de las terminales positiva y negativa del bus de CD dispararían instantáneamente las protecciones del sistema, por lo que la planta detendría su operación, y en el peor de los casos, quedaría inservible. Por otra parte, al ocurrir una FCA, el inversor ya no será capaz de entregar los voltajes y corrientes esperados; no obstante, aunque el desempeño y eficiencia pueden ser ligeramente deteriorados, es posible que el sistema siga operando a través de una estrategia de control tolerante a fallas [11].

Objetivo

La presente propuesta de tesis tiene como objetivo general el estudiar, diseñar e implementar un controlador tolerante a fallas para el Convertidor Multinivel trifásico con conexión en Cascada de Puentes-H trabajando como filtro activo de potencia.

Propuesta y actividades

En la presente propuesta de tesis se estudia un filtro activo paralelo basado en un convertidor multinivel trifásico con conexión cascada de N puentes-H con filtro de conmutación L , la topología de este convertidor es mostrada en la Figura 1. Las condiciones de falla a estudiar son FCA en los convertidores CHB de cada rama [2], [12]-[13]. En consecuencia, se sugiere modelar este tipo de fallas usando una estructura aditiva [2], 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.

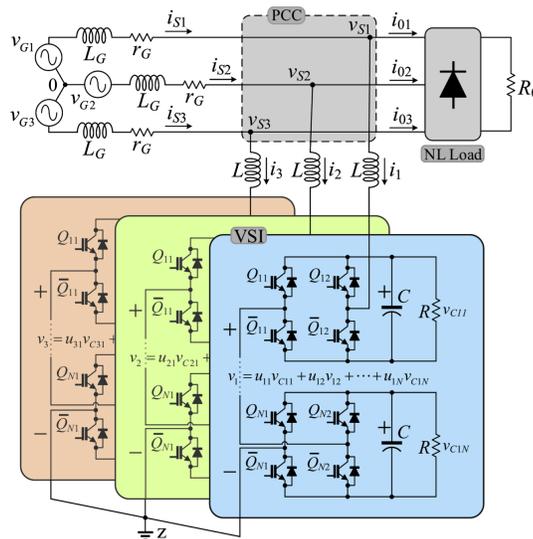


Figura 1. Convertidor multinivel CHB- n trifásico en aplicación de filtro activo.

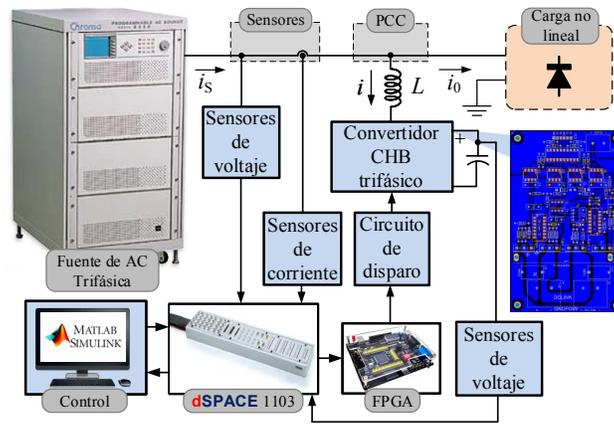
Para la obtención de resultados experimentales se continuará con la implementación del convertidor CHB trifásico mostrado en el Diagrama a Bloques de la Figura 2, este sistema consiste de un convertidor CHB trifásico implementando mediante tarjetas de puentes H desarrollados en el Laboratorio de Electrónica de

Potencia, una carga no lineal trifásica 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, además, en 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 extiende la versión monofásica presentada en [2] y la versión trifásica presentada en [13], las cuales parte del modelo generalizado propuesto [3]. 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.**

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

ACTIVIDADES	FECHA														
	Junio 2022	Julio 2022	Agosto 2022	Sep. 2022	Octubre 2022	Nov. 2022	Dic. 2022	Enero 2023	Febrero 2023	Marzo 2023	Abril 2023	Mayo 2023	Junio 2023	Julio 2023	Agosto 2023
Revisión bibliográfica															
Estudio del concepto general de convertidores multinivel y convertidor CHB trifásico con filtro L															
Estudio de esquemas de modulación para el convertidor CHB															
Simulaciones en PSCAD del convertidor multinivel trifásico CHB con filtro L en lazo abierto															
Estudio del control del convertidor CHB monofásico con filtro L de 5, 7 y n niveles.															
Estudio del control del convertidor CHB trifásico con filtro L de 5, 7 y n niveles.															
Estudio de la etapa de detección y aislamiento de fallas															
Simulaciones en PSCAD del convertidor multinivel CHB y filtro L en lazo cerrado y la etapa FDI.															
Implementar el esquema de control del convertidor multinivel CHB															
Pruebas experimentales preliminares del sistema en lazo cerrado en bajo voltaje															
Pruebas experimentales del sistema en lazo cerrado en medio voltaje (125V)															
Escritura de documento de tesis															
Presentación de examen previo y final de grado															

Cronograma de actividades



(a) (b)
 Figura 2. Diagrama a bloques del Convertidor multinivel CHB trifásico.

Materias por cursar

Se propone cursar 2 de las siguientes 3 materias en el semestre Agosto-Diciembre/2022:

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

Bibliografía

- [1] S. Kouro, M. Malinowski M, K. Gopakumar, K et. al., “Recent advances and industrial applications of multilevel converters,” *IEEE Trans. Ind. Electronics*, Vol. 57, Issue 8, pp. 2553-2580, jun. 2010.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A new neutral-point clamped PWM inverter,” *IEEE Trans. Ind. Applications*, vol. IA-17, pp. 518-523, Sept./Oct. 1981.
- [5] C. Hochgraf, R. Lasseter, D. Divan, and T. A. Lipo, “Comparison of multilevel inverters for static var compensation,” in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, Oct. 1994, pp. 921–928.
- [6] G. Catzin-Contreras, A.A. Valdez-Fernandez, G. Escobar, M. J. Lopez-Sanchez and, “A model-based controller for a single-phase grid-tied modular multilevel inverter with regulation and balance of energy,” *Wiley Int. Trans. on Eletrc. Energy Systems*, Vol., Issue, 11, 2019.

- [7] Andrés A. Valdez-Fernández, Pánfilo Martínez-Rodríguez, G. Escobar, C.A. Limones-Pozos and J.M. Sosa, "A model-based controller for the cascade H-bridge multilevel converter used as a shunt active filter," *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, Vol. 60, No. 11, pp. 5019-5028, Nov 2013.
- [8] C. D. Townsend, Y. Yu, G. Konstantinou and V. G. Agelidis, "Cascaded H-Bridge Multilevel PV Topology for Alleviation of Per-Phase Power Imbalances and Reduction of Second Harmonic Voltage Ripple," *IEEE Trans. Power Elec.*, vol. 31, no. 8, pp. 5574-5586, Aug. 2016.
- [9] M.R. Nasiri, S. Farhangi, J. Rodríguez, "Model predictive control of a multilevel CHB STATCOM in wind farm application using diophantine equations," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, vol. 66, issue 2, pp. 1213-1223.
- [10] W. Yao, Y. Yang, X. Zhang, F. Blaabjerg and P. C. Loh, "Design and Analysis of Robust Active Damping for LCL Filters using Digital Notch Filters," *IEEE Trans. on Power. Elec.*, vol.32 vol. 66, issue 3, pp. 2360-2375, March 2017.
- [11] J.A. Pecina-Sanchez, D.U. Campos-Delgado, D.R. Espinoza-Trejo, A.A. Valdez-Fernandez and C. H. De Angelo, "Fault Diagnosis of Grid-Connected PV NPC Inverters by a Model-Based and Data Processing Combined Approach," *IET Power Electronics*, en revision, 2019.
- [12] K.O. Mtepele, D.U. Campos-Delgado, A.A. Valdez-Fernandez, "Diagnosis Strategy for a Faulty Leg in the H-Bridge of CHB-nL Converters," in Proc. Congreso Nacional de Control Automático, AMCA 2018, Monterrey, San Luís Potosí, SLP, Mexico, 10-12 de oct. 2018, pp. 471-476.
- [13] K.O. Mtepele, D.U. Campos-Delgado, J.A. Pecina-Sánchez, A.A. Valdez-Fernandez, P.R. Martinez-Rodríguez, "Fault Diagnosis of Generalized n-Levels 3-phase CHB Multilevel Converters," in Proc. Congreso Nacional de Control Automático, AMCA 2017, Monterrey, Nuevo León, Mexico, 4-6 de octubre de 2017, pp. 14-19.