

REVISIÓN DE LA APLICACIÓN DE HARDWARE IN THE LOOP EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

REVIEW OF THE HARDWARE IN THE LOOP APPLICATION IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Víctor Manuel Sámano Ortega

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
victor.samano@itcelaya.edu.mx

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
juan.martinez@itcelaya.edu.mx

Alonso Alejandro Jiménez Garibay

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
alonso.jimenez@itcelaya.edu.mx

José Enrique Botello Álvarez

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
enrique.botello@itcelaya.edu.mx

Jessica Alejandra Araujo Rodríguez

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
jessica.rodriguez3795@gmail.com

Recepción: 30/abril/2020

Aceptación: 7/noviembre/2020

Resumen

En los últimos años los sistemas de distribución eléctricos se han ido transformando. Las micro-redes se presentan como una alternativa capaz de cubrir las necesidades que esta transformación implica, convirtiéndolas en el tema de investigaciones recientes. Uno de los aspectos tratados en estas investigaciones refiere a los medios de producción de energía limpia y en este punto la energía fotovoltaica destaca. La infraestructura y recursos necesarios para probar sistemas fotovoltaicos han motivado a la búsqueda de alternativas para llevar a cabo este proceso. Una de las soluciones radica en la implementación de simulaciones Hardware in the Loop. En este trabajo se presenta una revisión de investigaciones referentes a la aplicación de técnicas Hardware in the Loop en sistemas

fotovoltaicos. Catorce investigaciones fueron sistematizadas recabando lo referente a cuatro aspectos: el tipo de hardware empleado, las ventajas y desventajas de la propuesta, la finalidad con la que fue llevada a cabo la investigación y el tipo de simulación HIL llevada a cabo.

Palabras Clave: Controller Hardware in the Loop, Hardware in the Loop, Power Hardware in the Loop, Sistema fotovoltaico.

Abstract

In the last years, electrical distribution systems have transformed. Micro-grids are presented as a viable alternative to meet the needs that this transformation implies, converting them in the topic of interest in recent investigations. One of the aspects treated in these investigations refers to the means of clean energy production and, in this point, photovoltaic energy stands out. Infrastructure and resources needed for photovoltaic systems testing have motivated the research of alternatives to carry out this process. One of the solutions lies on Hardware in the Loop simulations applied in photovoltaic systems. Fourteen investigations collected systematically what refers to four aspects: the kind of hardware employed, the advantages and disadvantages of the proposal, the finality of the investigation and, finally, the kind of HIL simulation that was carried out.

Keywords: Controller Hardware in the Loop, Hardware in the Loop, Photovoltaic system, Power Hardware in the Loop.

1. Introducción

En la actualidad los sistemas eléctricos en todo el mundo han comenzado una transición siguiendo tres tendencias conocidas como las “tres D’s” Descentralización, Descarbonización y Democratización. Estas tendencias tienen como objetivo solucionar problemáticas y satisfacer necesidades de los sistemas actuales. Entre las aportaciones de las “tres D’s” a los sistemas eléctricos se cuentan: refrenar el aumento en el costo de la energía, disminución de emisiones de CO₂, mejorar la resiliencia y fiabilidad, el reemplazo de infraestructura antigua, la mitigación del cambio climático y el suministro confiable de energía en áreas que

carecen de infraestructura eléctrica. Y aunque los factores y detalles que guían las “tres D’s” pueden diferir de un lugar a otro, las micro-redes han emergido como una arquitectura flexible para el despliegue de fuentes de energía distribuidas que puede satisfacer una amplia gama de necesidades [Hirsch, Parag, & Guerrero, 2018].

Entre las fuentes de energía distribuidas que integran las micro-redes se encuentran motores reciprocantes, turbinas y microturbinas de combustión de gas, motores Stirling, energía solar fotovoltaica y térmica, generadores y microgeneradores eólicos, y generadores hidroeléctricos, geotérmicos y mareomotrices así como la biomasa [Raju & Jain, 2019], pero en la mayoría de las aplicaciones de micro-redes el uso en paralelo de paneles solares y turbinas eólicas representan la principal fuente de energía renovable [Datta, Kalam & Shi, 2018].

Sin embargo, probar el desempeño de sistemas fotovoltaicos implica problemáticas; representa un costo de manufactura elevado, requiere de un área extensa para la disposición de los paneles y las condiciones ambientales son discontinuas [Ram et al., 2018]. Una alternativa es emular los paneles fotovoltaicos, con esto se puede reproducir la curva característica corriente-voltaje del panel bajo diferentes condiciones ambientales sin depender de fenómenos externos, además de que se reduce el costo total [Ayop & Tan, 2017]. Otra opción para realizar experimentación bajo condiciones controlables, reales y reproducibles es la simulación en tiempo real Hardware in the Loop (HIL) [Ebe et al., 2018], esta técnica consiste en la implementación del modelo de un sistema en hardware que representará al sistema real [Estrada et al., 2020].

En este trabajo se presenta una revisión sobre el uso de HIL para representar el comportamiento de sistemas fotovoltaicos. La recopilación de las investigaciones referentes a este tema se centra en el tipo de hardware empleado, el tipo y finalidad de la simulación HIL, así como las ventajas y desventajas que ofrece cada alternativa.

2. Métodos

Se recabaron 14 investigaciones referentes a la aplicación de HIL en sistemas fotovoltaicos considerando cuatro aspectos: el tipo de hardware empleado, las

ventajas y desventajas de la propuesta, la finalidad con la que fue llevada a cabo la investigación y el tipo de simulación HIL llevada a cabo, en este último parámetro se consideraron 3 tipos diferentes HIL, CHIL (Controller Hardware in the Loop) y PHIL (Power Hardware in the Loop), los criterios tomados en cuenta para la categorización en cada uno de estos tipos se describen a continuación.

La metodología HIL podría describirse como una etapa experimental en la cual, un sistema bajo prueba es puesto en un ambiente en donde el resto de los elementos con los que interactúa son simulados en tiempo real, de forma que las entradas y salidas del sistema bajo prueba son controladas [Ebe et al., 2018], esta metodología se ilustra en la figura 1. Por otro lado, la estructura típica de un sistema fotovoltaico se compone de un panel conectado a un convertidor electrónico de potencia y un controlador [Ram et al., 2020] esto se esquematiza en la figura 2.

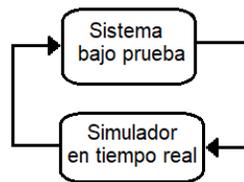


Figura 1 Esquemático de la simulación HIL.

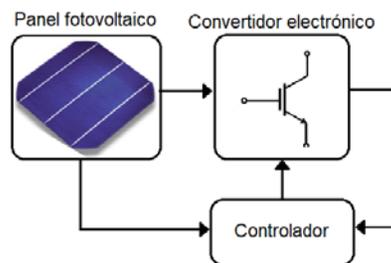


Figura 2 Esquema de un sistema fotovoltaico típico

Dependiendo de la finalidad con la que se lleve a cabo una simulación HIL sobre un sistema de este tipo, el simulador en tiempo real (STR) puede comprender el panel, el convertidor electrónico y el panel, o la totalidad del sistema. Esto implica que el sistema bajo prueba también cambia; lo mismo que el tipo de señales que se intercambian entre este y el STR. Estas características en conjunto definen los tipos de simulación HIL tomados en cuenta.

En el caso de que el sistema bajo prueba incluya únicamente al controlador del sistema fotovoltaico este se clasificó como CHIL, esta categoría hace referencia a simulaciones HIL, en las que el sistema bajo prueba se trata de un controlador implementado en hardware (un controlador real) mientras el STR emula el comportamiento de la planta a controlar [Vijay, Doolla & Chandorkar, 2017]. En el caso de CHIL el STR sólo envía señales de referencia al sistema bajo prueba y viceversa, de modo que no hay intercambio de potencia entre ellos.

Si, por otra parte, la simulación HIL implica intercambio de potencia entre el sistema bajo prueba y el STR, por ejemplo, en el caso de que el sistema bajo prueba sea un convertidor real, que transmite potencia desde un panel emulado en el STR hasta una carga, la simulación se clasifica como del tipo PHIL [Vijay, Doolla & Chandorkar, 2017].

Finalmente es probable que el STR sea el único elemento de la simulación, simulaciones de este tipo se clasificaron como HIL; en ese caso el sistema bajo prueba sólo representa instrumentos de monitoreo.

3. Resultados

Los resultados obtenidos de la recopilación se presentan en la tabla 1. La tabla se compone de 6 columnas: en la primera se hace referencia a la investigación analizada, en la segunda se presenta el tipo de hardware empleado para la implementación del STR en la simulación HIL, la tercera hace referencia al tipo de simulación llevada a cabo HIL, CHIL o PHIL, en la cuarta columna se presenta la finalidad con la que fue llevada a cabo la simulación HIL, finalmente, en las columnas quinta y sexta se presentan las principales ventajas y desventajas, respectivamente, de la simulación HIL propuesta.

4. Conclusiones

El uso de plataformas comerciales dedicadas a la implementación de simulación HIL es más común, este tipo de alternativa presenta ventajas, el desarrollo de los modelos es más simple y se puede llevar a cabo con software especializado basado en bloques.

Tabla 1 Resultados obtenidos del análisis.

Ref.	Hardware	Tipo	Finalidad	Ventajas	Desventajas
Imán 2019	Opal RT	CHIL	Probar el controlador de un convertidor puente H multinivel	Hardware dedicado programable en Simulink	Costo elevado
Ravinder 2019	Opal RT	HIL	Probar un controlador con filtro activo de potencia shunt	Hardware dedicado programable en Simulink	Costo elevado
Mai 2017	Opal RT y fuente de potencia programable	PHIL	Generar una plataforma HIL para emular el modelo termoeléctrico de un panel	La plataforma es suficientemente rápida para operar en tiempo real.	La plataforma es útil sólo para emular un panel individual.
Stala 2017	FPGA Cyclone III	HIL	Generar un emulador para reproducir la curva característica de un panel	El tiempo de respuesta del emulador es corto (50 ns por ciclo)	Es necesario un procesamiento complejo del modelo para hacer posible su implementación.
Palahalli 2018	National Instruments myRIO-1900	HIL	Generar una plataforma HIL con fines de enseñanza.	Plataforma flexible: puede escalarse o dividirse en etapas.	El modelo requiere una etapa de preprocesamiento que incluye el uso de múltiples softwares para su implementación.
Huo 2017	Arduino, tarjeta dSPACE y amplificador de potencia	PHIL	Analizar el comportamiento de la integración de un sistema fotovoltaico en la red.	Puede emplearse Simulink de Matlab para el planteamiento de los modelos.	Requiere la integración de múltiples etapas separadas, procesamiento, adecuación de señales y amplificación.
Fakham 2019	Opal RT y amplificadores de potencia de CD y CA	PHIL	Probar el funcionamiento de los inversores de potencia utilizados en un dispositivo denominado "PowerCorner", se trata de una micro-red aislada.	Hardware dedicado programable en Simulink	Costo elevado
Prabakar 2017	Opal RT	CHIL	Validar un controlador de corriente de un inversor.	Hardware dedicado. Plataforma rápida (200 nS por ciclo).	Costo elevado.
Tiong 2019	Typhoon HIL-402	CHIL	Generar una plataforma para validar algoritmos de seguimiento de punto de máxima potencia.	Hardware dedicado que integra un DSP y SCADA para CHIL. Entorno propio de programación dedicado.	Costo elevado.
Ghambari 2019	Opal RT	HIL	Validar el desempeño de un sistema fotovoltaico conectado a la red utilitaria.	Hardware dedicado programable en Simulink. Plataforma rápida 20 uS por ciclo.	Costo elevado
Moussa 2017	FPGA Xilinx Virtex5	HIL	Reproducir la curva característica I-V de un panel.	Puede emplearse un módulo de Matlab para facilitar la programación. Plataforma de bajo costo.	Se requiere de un preprocesamiento complejo para su implementación.
Singh 2017	FPGA XCS100E y filtro RC	HIL	Generar una plataforma con fines educativos.	Plataforma de bajo costo.	Rizo a la salida.
Gutierrez 2017	FPGA XC7Z020	HIL	Reproducir el comportamiento de un panel en condiciones de sombreado.	Plataforma de bajo costo. Plataforma rápida (8.3 uS por ciclo).	Es necesario un procesamiento de la solución del modelo para su implementación.
Kumar 2017	FPGA Xilinx	HIL	Validar el control dinámico de una micro-red con sistema de almacenamiento híbrido.	Plataforma de bajo costo. Plataforma rápida (3.09 nS por ciclo).	Es necesario un procesamiento complejo del modelo para hacer posible su implementación.

Otra ventaja significativa de las plataformas dedicadas es la integración, estas cuentan con protocolos de comunicación que facilitan el monitoreo y la modificación de parámetros, incluso cuentan con módulos DSP en donde se puede programar un controlador completando simulaciones HIL en una plataforma unificada. Sin embargo, el elevado costo y la poca versatilidad de las plataformas dedicadas son dos grandes desventajas de estas.

Otra opción común para el desarrollo de sistemas fotovoltaicos en HIL es el empleo de FPGA, esta opción es versátil en cuanto al número de elementos que el sistema puede incluir y su configuración, además de que representa una solución de bajo costo.

De acuerdo con Estrada (2020) lo más importante en una simulación HIL es que esta se lleva a cabo en tiempo real, en ese aspecto la opción de emplear FPGA es competitiva pues se pueden conseguir tiempos por ciclo de inclusive el orden de los nanosegundos. Una desventaja de emplear estos dispositivos como base en el desarrollo de STR's es que los modelos y las soluciones de estos deben pasar por un preprocesamiento que los convierta en adecuados para su implementación, esta característica se debe a los recursos limitados de los lenguajes empleados para la descripción de hardware.

Una opción que simplifica el tratamiento de los modelos es emplear un entorno de programación distinto del clásico HDL, esta alternativa sin embargo implica el uso de múltiples softwares y convertidores entre formatos para al fin poder embeber el sistema en una FPGA.

En cuanto a las simulaciones PHIL es claro que su desarrollo implica la integración de múltiples elementos, aún con el empleo de plataformas dedicadas a HIL es necesario integrar elementos capaces de gestionar el intercambio de potencia entre el STR y el sistema bajo prueba.

En base al análisis desarrollado se concluye que una de las mejores opciones es emplear hardware de bajo costo, en ese sentido el uso de FPGA's sería fiable pues representa una alternativa validada. Se debe buscar sin embargo que estos dispositivos cuenten con un entorno de programación propio, que facilite la implementación de los modelos.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Ayop, R., & Tan, C. W. (2017). A comprehensive review on photovoltaic emulator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 430-452.
- [2] Datta, U., Kalam, A., & Shi, J. (2018). Hybrid PV–wind renewable energy sources for microgrid application: an overview. *Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids*, 1–22. doi:10.1016/b978-0-08-102493-5.00001-7
- [3] Ebe, F., Idlbi, B., Stakic, D. E., Chen, S., Kondzialka, C., Casel, M., ... & Strasser, T. I. (2018). Comparison of Power Hardware-in-the-Loop Approaches for the Testing of Smart Grid Controls. *Energies*, 11(12), 3381.
- [4] Estrada, L., Vázquez, N., Vaquero, J., de Castro, Á., & Arau, J. (2020). Real-Time Hardware in the Loop Simulation Methodology for Power Converters Using LabVIEW FPGA. *Energies*, 13(2), 373.
- [5] Fakhm, H., Qoria, T., Legry, M., Ducarme, O., & Colas, F. (2019, October). Development of a power hardware in the loop simulation of an islanded microgrid. In *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Vol. 1, pp. 6438-6443). IEEE.
- [6] Ghanbari, N., & Bhattacharya, S. (2019). Hardware-In-The-Loop Implementation of a Grid Connected PV System. 2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. doi:10.1109/ias.2019.8912363
- [7] Gutierrez, A., Bressan, M., Jimenez, J. F., & Alonso, C. (2017). Development of real-time supervision HIL emulator of shaded PV systems. 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). doi:10.1109/icrera.2017.8191110
- [8] Hirsch, A., Parag, Y., & Guerrero, J. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 402-411. Chandrinou, K. V., & Trahanias, P. E. (1998). Web-based Information Systems ERCIM Workshop Proceedings: <http://www.ercim.org/publication/ws-proceedings/DELOS6/>.
- [9] Huo, Y., Grusso, G., & Piegari, L. (2017). Power hardware in the loop simulator of photovoltaic plant for smart grid interaction analysis. 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and

- 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe). doi:10.1109/ieeeic.2017.7977629
- [10] Iman-Eini, H., & Tennakoon, S. B. (2019). Investigation of a cascaded H-bridge photovoltaic inverter under non-uniform insolation conditions by hardware-in-the-loop test. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105, 330–340. doi:10.1016/j.ijepes.2018.08.017
- [11] Kumar, V. N., Naidu, B. R., & Panda, G. (2017). Hardware-in-loop validation of a dynamic control employed for a hybrid DC microgrid incorporating high gain DC-DC power stages. 2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). doi:10.1109/appeec.2017.8308930
- [12] Mai, X. H., Kwak, S.-K., Jung, J.-H., & Kim, K. A. (2017). Comprehensive Electric-Thermal Photovoltaic Modeling for Power-Hardware-in-the-Loop Simulation (PHILS) Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(8), 6255–6264. doi:10.1109/tie.2017.2682039
- [13] Moussa, I., Bouallegue, A., & Khedher, A. (2017). Development of a low cost PV simulator based on FPGA technology. 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS). doi:10.1109/gecs.2017.8066243
- [14] Palahalli, H., Huo, Y., & Grusso, G. (2018). Real Time Simulation of Photovoltaic System using FPGA. 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). doi:10.1109/speedam.2018.8445288
- [15] Raju P, E. S. N., & Jain, T. (2019). Distributed energy resources and control. *Distributed Energy Resources in Microgrids*, 33–56. doi:10.1016/b978-0-12-817774-7.00002-8
- [16] Ram, J. P., Manghani, H., Pillai, D. S., Babu, T. S., Miyatake, M., & Rajasekar, N. (2018). Analysis on solar PV emulators: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 149-160.
- [17] Ram, J. P., Pillai, D. S., Ghias, A. M., & Rajasekar, N. (2020). Performance enhancement of solar PV systems applying P&O assisted Flower Pollination Algorithm (FPA). *Solar Energy*, 199, 214-229.

- [18] Prabakar, K., Shirazi, M., Singh, A., & Chakraborty, S. (2017). Advanced photovoltaic inverter control development and validation in a controller-hardware-in-the-loop test bed. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). doi:10.1109/ecce.2017.8095994
- [19] Ravinder, K., & Bansal, H. O. (2019). Investigations on shunt active power filter in a PV-wind-FC based hybrid renewable energy system to improve power quality using hardware-in-the-loop testing platform. *Electric Power Systems Research*, 177, 105957. doi:10.1016/j.epsr.2019.105957
- [20] Singh, S. V., & Shubhanga, K. N. (2017). Software-in-the-loop based MPPT enabled realtime solar photovoltaics simulator in FPGA platform for academic appreciation. 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES). doi:10.1109/spices.2017.8091316
- [21] Stala, R., Penczek, A., Mondzik, A., & Stawiarski, Ł. (2017). A photovoltaic source I/U model suitable for hardware in the loop application. *Archives of Electrical Engineering*, 66(4).
- [22] Tiong, M. C., Daniyal, H., Sulaiman, M. H., Bakar, M. S., & Ab Ghani, S. (2019). A Real-time Simulation Platform for Maximum Power Point Tracking Algorithm Study in Solar Photovoltaic System. *Applications of Modelling and Simulation*, 3(2), 111-118.
- [23] Vijay, A. S., Doolla, S., & Chandorkar, M. C. (2017). Real-Time Testing Approaches for Microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(3), 1356–1376. doi:10.1109/jestpe.2017.2695486.