

Recibido 13 de septiembre de 2024. Aceptado 29 de noviembre de 2024. Publicado 19 de diciembre de 2024.

ISSN: 2448-7775

Diseño e implementación de una fuente basada en electrónica de potencia para la validación de la protección de corriente direccional

LUIS RAMON MERCHAN VILLALBA^{1*}, JUAN MANUEL CANO GALLARDO¹, JOSÉ JESÚS CONTRERAS PÉREZ¹, GUILLERMO TAPIA TINOCO², MARIO ROBERTO ARRIETA PATERNINA³, JORGE URIEL SEVILLA ROMERO⁴

¹Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México.

²Universidad de Guanajuato, Irapuato, Guanajuato, México.

³Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

⁴Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos-Minatitlán, Veracruz, México.

*Autor de Correspondencia: lr.merchan@ugto.mx

RESUMEN Este trabajo presenta el diseño e implementación de una fuente de corriente y de voltaje para la validación de la protección de corriente direccional en relevadores de protección de sistemas eléctricos de potencia. Las fuentes se desarrollan con sistemas de electrónica de potencia basado en transistores de Nitruro de Galio, utilizando la topología de puente completo y medio puente para la fuente de voltaje y de corriente respectivamente. Mediante el uso de la fuente desarrollada se valida la operación de protección de corriente direccional en el relevador SEL-451.

PALABRAS CLAVE— Fuente de voltaje, fuente de corriente, electrónica de potencia, transistores GaN, relevadores de protección, protección de corriente direccional.

I. INTRODUCCIÓN

La protección de corriente direccional es esencial para mantener la estabilidad y seguridad en sistemas eléctricos de potencia, especialmente en redes de transmisión y distribución, donde la identificación precisa de la dirección del flujo de corriente durante eventos de cortocircuito o fallas es crucial. Los relevadores de protección direccional permiten discriminar de manera efectiva la dirección de la corriente de falla, asegurando la desconexión selectiva de las áreas afectadas sin interrumpir innecesariamente el servicio en otras partes del sistema [1].

Para validar el desempeño de estos relevadores es necesario contar con equipos que permitan la emulación de señales de corriente y voltaje bajo diferentes condiciones de operación y falla. No obstante, los equipos comerciales diseñados para esta tarea, como los simuladores multifuncionales o inyectores de corriente de alta precisión, suelen tener costos elevados y flexibilidad restringida a lo que brinda el entorno de software utilizado para el manejo de estos, lo que limita su accesibilidad en entornos académicos y de investigación [2], [3], [4], [5].

Dadas estas situaciones, se han desarrollado propuestas a nivel académico y de investigación. Algunas opciones consideran el uso de sistemas RTS (por sus siglas en inglés para *Real Time Simulation*) en conjunto con amplificadores de potencia, lo cual permite representar el comportamiento

de un sistema eléctrico mediante la salida de señales eléctricas [6], [7], [8], [9]. Aunque éstas permiten una gran flexibilidad para generar posibles situaciones en una red eléctrica, resulta en una solución costosa debido a la necesidad de sistemas RTS, además de requerir amplificadores de potencia los cuales permiten representar las señales de entornos digitales en señales reales de corriente y voltajes [9], [10].

Debido a la relevancia de las señales de corriente en las protecciones eléctricas, se han desarrollado algunas propuestas basadas en amplificadores de corriente, lo cuales generan las señales por indicación de un elemento externo. Estas propuestas se pueden adaptar también a generación de señales de voltaje. Algunas plantean sistemas de generación de señales de corriente basados en sistemas lineales con pérdidas considerables [11], otros con sistemas de electrónica de potencia, eficientes, pero con alto nivel de ruido [12] y algunas integran sistemas lineales y electrónica de potencia en tecnologías complejas [13]. Se puede identificar en la literatura que las señales que más interesan para la validación de los sistemas de protección son las de corriente [14], [15], aunque también las señales de voltaje son importantes. En [16] se presenta un amplificador de voltaje basado en un convertidor de 9 niveles para la validación de protecciones de voltaje. Esta propuesta opera con una baja frecuencia de conmutación resultando en un voltaje de salida distorsionado. Adicionalmente, se tienen propuestas para la validación de

relevadores de protección que operan con base en sistemas electromecánicos y transformadores de baja frecuencia con el objetivo de tener una solución económica, pero resultando en sistemas de gran volumen y peso, con elevadas pérdidas y reducida flexibilidad [17], [18], [19], [20]. Dentro de la literatura los autores no han encontrado opciones de prototipos que incorporen fuente de corriente y voltaje para la validación de protecciones de corriente direccional.

Este trabajo propone el diseño e implementación de una fuente de corriente y voltaje de bajo costo, adecuada para la validación de relevadores de corriente direccional. El sistema se basa en el uso de electrónica de potencia, considerando la implementación con transistores de Nitruro de Galio (GaN), un tipo de transistor de brecha amplia que ha demostrado ventajas significativas en aplicaciones de electrónica de potencia, tales como alta eficiencia energética, capacidad de operar a mayores frecuencias de conmutación y tolerancia a altas tensiones [21]. Los transistores GaN ofrecen mejoras en comparación con los dispositivos tradicionales basados en silicio, lo que los convierte en una solución ideal para el desarrollo de fuentes compactas y eficientes destinadas a la validación de relevadores en laboratorios de investigación [22], [23].

La fuente propuesta permitirá la inyección de corrientes y tensiones controladas, con ajustes precisos de magnitud y ángulo de fase para emular diversas condiciones de falla en sistemas eléctricos. Esto proporcionará una plataforma accesible y de bajo costo, ideal para instituciones educativas y laboratorios con limitaciones presupuestales, sin comprometer la calidad de las pruebas de validación de relevadores direccionales. Además, el diseño basado en GaN no sólo mejora el rendimiento y la eficiencia del sistema, sino que también permite una configuración modular que facilita su actualización para futuras pruebas de protección más complejas.

II. GENERADOR DE VOLTAJE Y CORRIENTE

La generación de las señales de corriente y voltaje se basan en el uso de sistemas de electrónica de potencia, los cuales incorporan transistores tipo GaN, cuya descripción se presenta a continuación.

A. GENERADOR DE VOLTAJE

Para la generación de la señal de voltaje se hace uso del convertidor de puente completo (FB del inglés *Full-bridge*), el cual permite que en los terminales de salida del inversor exista un voltaje pico igual al de la fuente de alimentación (v_{dcv}). Además, el generador considera un filtro LC, el cual permite eliminar las componentes de alta frecuencia en el voltaje de salida. La topología del generador de voltaje se presenta en Fig. 1, para el cual se considera el uso de la modulación unipolar, con el objetivo de mejorar la calidad de

las señales de salida al obtener los niveles de $+v_{dcv}$, 0 y $-v_{dcv}$. El esquema de modulación se presenta en Fig. 2, donde se considera una frecuencia de conmutación de 50 kHz, resultando en un voltaje de salida con una frecuencia de 100 kHz. Para este generador se utiliza el transistor TP65H070L [24] de la empresa Transphorm mediante el modulo TDHB-65H070L-DC [25].

El generador de voltaje se modela mediante la función de transferencia (1). Los parámetros del filtro de la fuente de voltaje se presentan en la Tabla I, de donde se obtiene la frecuencia de resonancia para el filtro, que es de 6.848 kHz, siendo mayor que 10 veces la frecuencia fundamental (600 Hz) y menos que la mitad de la frecuencia de conmutación (50 kHz) para una operación adecuada.

$$\frac{I_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{sCR_c + 1}{s^2LC + sC(R_c + R_L) + 1} \quad (1)$$

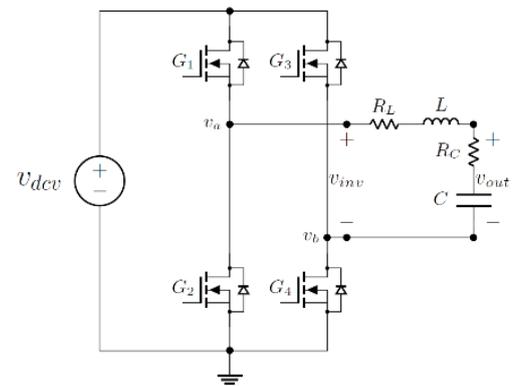


Fig. 1. Topología del generador de voltaje.

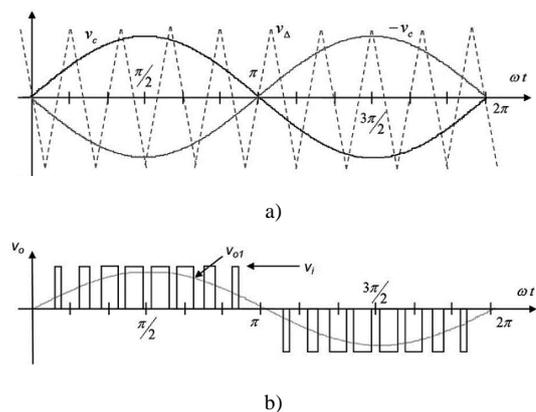


Fig. 2. Modulación unipolar inversor FB a) Moduladora-portadora, y b) voltaje de salida en el inversor (v_o) y filtrado (v_{o1}) [26].

TABLA I. PARÁMETROS FUENTE DE CORRIENTE.

Parámetros	Valores 1
L, R_L	560 μ H, 0.4 Ω
C, R_C	4 μ F, 0.4 Ω

B. GENERADOR DE CORRIENTE

El generador de corriente se implementa mediante un inversor del tipo medio puente (HB del inglés *Half Bridge*), el cual hace que en el sistema exista un voltaje de la mitad del voltaje de la fuente de alimentación (v_{dci}). Esta topología requiere de la existencia de un voltaje positivo y negativo con respecto a un punto común, lo cual se puede obtener mediante el uso de una fuente de directa y dos capacitores. A la salida del inversor se hace uso de un filtro del tipo LCL cuyo objetivo es eliminar las componentes de alta frecuencia en la corriente de salida. La topología del generador se presenta en Fig. 3, mientras que la técnica de modulación se muestra en Fig. 4. El generador de corriente considera el módulo de transistores GaN LMG5200 [27] de Texas Instruments mediante la tarjeta de evaluación BOOSTXL-3PHGANINV [28].

El generador de corriente se modela mediante la función de transferencia (2) cuyos parámetros se presentan en la Tabla II, de donde se obtiene la frecuencia de resonancia para el filtro, que es de 8.639 kHz, siendo también mayor que 10 veces la frecuencia fundamental (600 Hz) y menos que la mitad de la frecuencia de conmutación (25 kHz).

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{sCR_c + 1}{s^3 K_1 + s^2 K_2 + sK_3 + K_4} \quad (2)$$

Donde

$$K_1 = L_1 L_2 C \quad (3)$$

$$K_2 = C(2L_1 R_2 + R_c L_2 + L_1 R_o + R_1 L_2) \quad (4)$$

$$K_3 = (L_1 + L_2 + CR_c(R_2 + R_o) + CR_1(2R_1 + R_o)) \quad (5)$$

$$K_4 = R_1 + R_2 + R_o \quad (6)$$

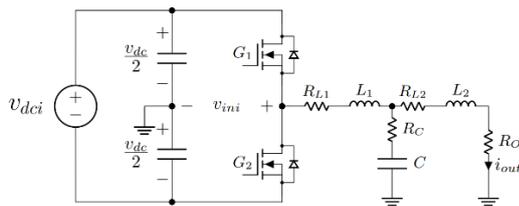
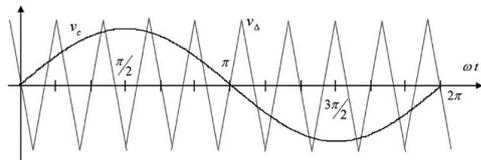
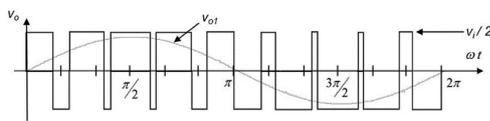


Fig. 3. Topología del generador de corriente.



a)



b)

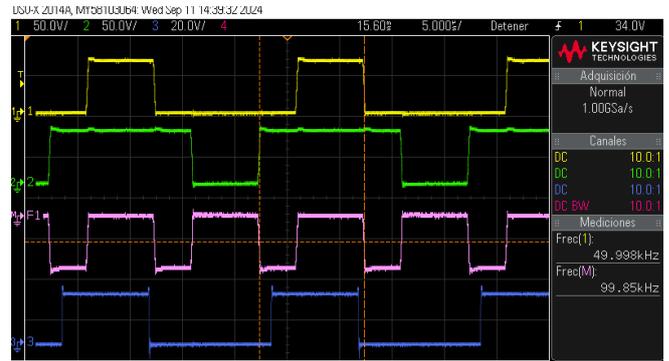
Fig. 4. Modulación bipolar inversor HB a) Moduladora-portadora y b) voltaje de salida en el inversor (v_o) y filtrado ($vo1$) [26].

TABLA II. PARÁMETROS FUENTE DE CORRIENTE.

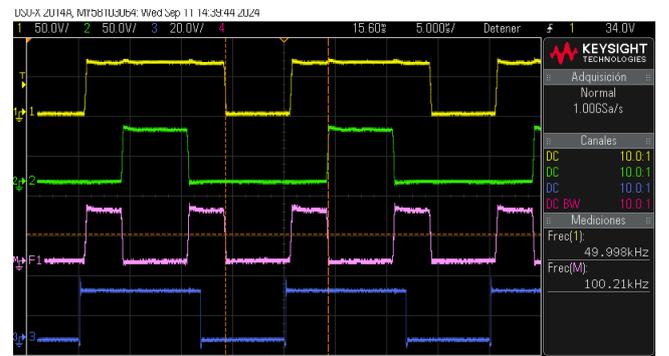
Parámetros	Valores 1
L1, RL1	560 μ H, 0.4 Ω
L2, RL2	100 μ H, 0.4 Ω
C, RC	4 μ F, 0.4 Ω
R0	1.1 Ω
Cdc	2350 μ F

La operación de los sistemas de electrónica de potencia se lleva a cabo mediante el uso del microcontrolador TMS320F28379D [29] el cual incorpora el periférico ePWM [30] para generar las señales de disparo de los transistores. Adicionalmente, se hace uso de la plataforma descrita en [31] para entregar los disparos del microcontrolador a los inversores.

En la Fig. 5 se presentan las señales de voltaje en los terminales de los inversores FB y HB. Para el FB se presenta la señal v_a (amarilla), v_b (verde) y la resta de estas que corresponde a la señal v_{inv} (rosa), resaltando que la frecuencia de la señal v_{ini} es de 100 kHz siendo que v_a y v_b son de 50 kHz. Para el HB se presenta la señal v_{ini} que posee una frecuencia de 50 kHz.



a)



b)

Fig. 5. Señales de voltaje en los terminales de los inversores (FB v_a amarillo, v_b verde, v_{inv} rosa, HB v_{ini} azul) para; a) Voltaje v_{inv} negativo, y b) voltaje v_{inv} positivo.

III. CONFIGURACIÓN DE PROTECCIÓN DE CORRIENTE DIRECCIONAL SEL 451

Para la validación de la operación de la protección de corriente direccional se hace uso del relevador SEL 451 [32], mediante la prueba establecida en el manual para el elemento direccional de secuencia negativa F32Q y F32R (Pág. 3.12 en [33]). Para la protección de corriente direccional el relevador estima la impedancia de secuencia negativa (7), donde en presencia de una falla hacia adelante la impedancia presenta valores negativos.

$$Z_2 = \frac{|V_2|}{|I_2|} \cos(\angle(V_2) - \angle(Z_1) - \angle(I_2)) \quad (7)$$

donde V_2 es el voltaje de secuencia negativa, I_2 la corriente de secuencia negativa y Z_1 la impedancia de secuencia positiva.

El desarrollo de la prueba requiere la configuración del relevador según las especificaciones indicadas en la Fig. A1 del apéndice. La prueba corresponde al desarrollo del siguiente procedimiento con el sistema de generación de señales:

- I. Aplicar un voltaje V_a de $18\angle 180^\circ$.
- II. Aplicar una corriente I_a de $0\angle 96^\circ$
- III. Incrementar $|I_a|$ a valores superiores de 0.4 A, lo que debe activar el bit R32Q, e incrementar $|I_a|$ a valores superiores de 4.62 A, lo que debe activar el bit F32Q.

IV. RESULTADOS

Como primera prueba se establece la generación de señales de voltaje y corriente para verificar que estas correspondan a los niveles indicados en magnitud y fase, en la misma medida se necesita verificar que se tenga sincronía entre las señales de voltaje y corriente. El montaje de la prueba se muestra en Fig. 6. Para esto se establece como generación una señal de V_a de $18\angle 0^\circ$ y una señal I_a de $1\angle 0^\circ$, de la cual se registra la forma de onda y la medición en el relevador SEL en Fig. 7. En Fig. 8 se presentan las señales para cuando V_a de $18\angle 0^\circ$ e I_a de $4.5\angle -84^\circ$, teniendo así consistencia entre la señal generada y la medición del relevador.

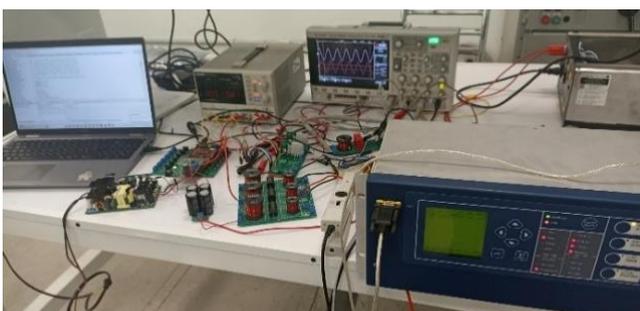


Fig. 6. Montaje experimental para validación de la fuente desarrollada.

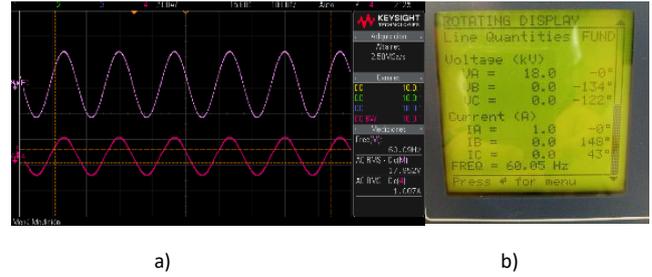


Fig. 7. Generación señal de V_a de $18\angle 0^\circ$ e I_a de $1\angle 0^\circ$ a) Señal temporal y b) medición relevador.

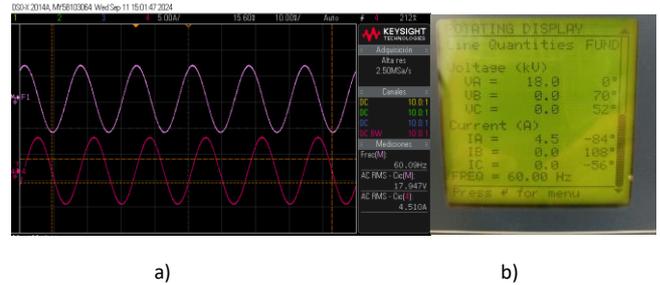


Fig. 8. Generación señal de V_a de $18\angle 0^\circ$ e I_a de $4.5\angle -84^\circ$ a) Señal temporal y b) medición relevador.

En la Fig. 9, se visualiza la generación de una señal V_a de $18\angle 0^\circ$ y una señal I_a de $2.2\angle 0^\circ$ que pasa a ser $2.2\angle -84^\circ$, obteniendo así un desfase entre las señales de voltaje y corriente de 84° . Fig. 10, presenta una señal V_a de $18\angle 0^\circ$ y una señal I_a que pasa de $1\angle -84^\circ$ que pasa a ser $5\angle -84^\circ$. De este modo se logra visualizar que el sistema puede generar las señales de voltaje y corriente adecuadas para la validación de la protección considerada en este trabajo.

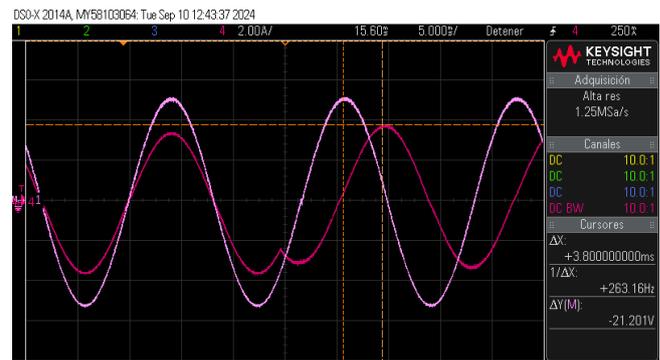


Fig. 9. Variación en I_a de $2.2\angle 0^\circ$ a $2.2\angle -84^\circ$.

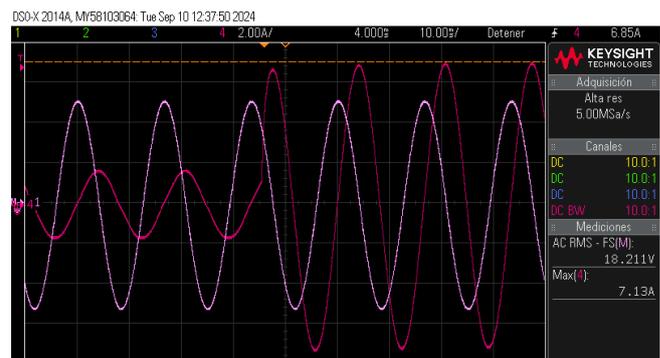
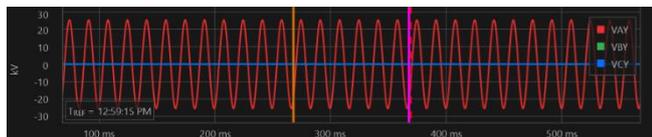


Fig. 10. Variación en I_a de $1\angle -84^\circ$ a $5\angle -84^\circ$.

Una vez se tiene la generación de las señales adecuadamente se procede a la validación de la protección direccional del relevador según lo indicado en la Sección III.

Para la activación del bit R32Q se establece un voltaje de V_a de $18\angle 0^\circ$ V y una señal I_a de $0.3\angle -84^\circ$ A, la cual posteriormente pasa a ser de $2.2\angle -84^\circ$ A. Ante esta acción se obtiene la respuesta del relevador que se presenta en Fig. 11, la cual es obtenida directamente del software del relevador [34]. En esta figura se puede observar cómo ante la condición establecida se genera el disparo de la señal, verificando así su comportamiento.

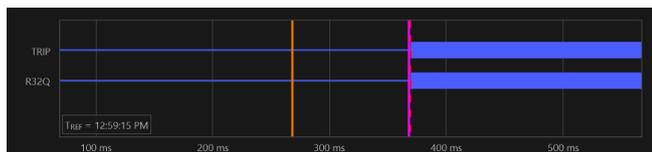
Para la activación del bit F32Q se asigna un voltaje inicial V_a de $18\angle 0^\circ$ V y una señal I_a de $0.3\angle -84^\circ$ A, que pasa a ser de $4.8\angle -84^\circ$ A luego de un tiempo. Esta prueba da como resultado las señales que se muestran en Fig. 12, donde se observa la operación de la señal F32Q, validando así la operación del relevador.



a)



b)

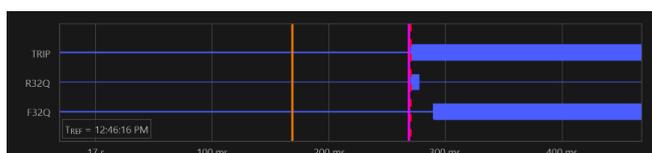


c)

Fig. 11. Señales en el relevador ante la prueba de disparo del bit R32Q a) Voltaje, b) corriente y c) bit R32Q.



a)



b)

Fig. 12. Señales en el relevador ante la prueba de disparo del bit F32Q a) corriente y b) bit R32Q y F32Q.

Para verificar que la validación de la operación del relevador fue adecuada se procede a realizar el mismo procedimiento, pero haciendo uso del equipo JHS903 el cual es una opción comercial que tiene la capacidad de generar las señales requeridas para validar la operación del relevador [35]. El montaje experimental se presenta en Fig. 13.

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente se generan las señales para activar los bits R32Q y F32Q, cuya respuesta se observa en Fig. 14 y Fig. 15, teniendo una respuesta similar a la obtenida con la fuente desarrollada dentro de este trabajo.

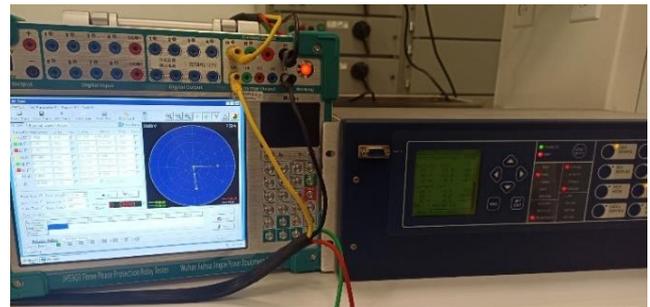
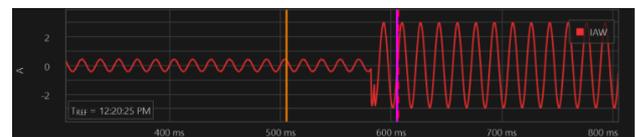
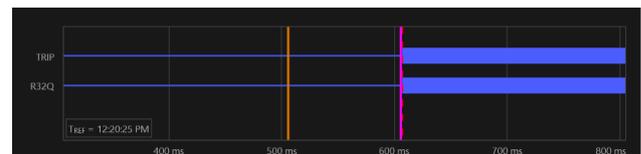


Fig. 13. Montaje para validación de protección de corriente direccional basado en el equipo JHS903.



a)

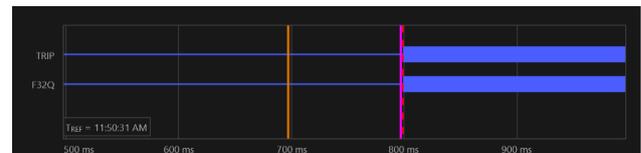


b)

Fig. 14. Señales en el relevador ante la prueba de disparo con equipo JHS903 del bit R32Q a) corriente y b) bit R32Q.



a)



b)

Fig. 15. Señales en el relevador ante la prueba de disparo con equipo JHS903 del bit F32Q a) Voltaje, b) corriente y c) bit F32Q.

De este modo la propuesta tiene la capacidad de validar la protección del relé en forma similar que el equipo comercial. La propuesta tiene un costo aproximado de 400,00 usd, mientras que el equipo JHS903 [35] tiene un costo de aproximadamente 4.000,00 usd. Aunque el equipo comercial tiene diversidad de funciones, para el objetivo puntual de la validación de la protección direccional de corriente la propuesta brinda una opción asequible. Cabe mencionar, que la propuesta tiene posibilidad de seguir incorporando funciones, lo cual requiere de elementos de software, brindando flexibilidad para la adición de nuevas capacidades.

V. CONCLUSIONES

El presente trabajo presentó el diseño e implementación de una fuente de voltaje y corriente para la validación de relevadores de protección de corriente direccional, la cual se basa en sistemas de electrónica de potencia que hace uso de transistores del tipo GaN. Se verificó que las señales generadas correspondieran con las mediciones tomadas por el relevador, teniendo así señales adecuadas para la aplicación. Se validó la operación de la protección de corriente direccional mediante la prueba del elemento direccional de secuencia negativa del relevador SEL 451, según el procedimiento indicado en el manual de este mediante la verificación de la activación de las señales F32Q y R32Q. Se validó mediante el uso de un equipo comercial el procedimiento de verificación de la protección, teniendo resultados similares haciendo uso de una propuesta de bajo costo.

APÉNDICE A.

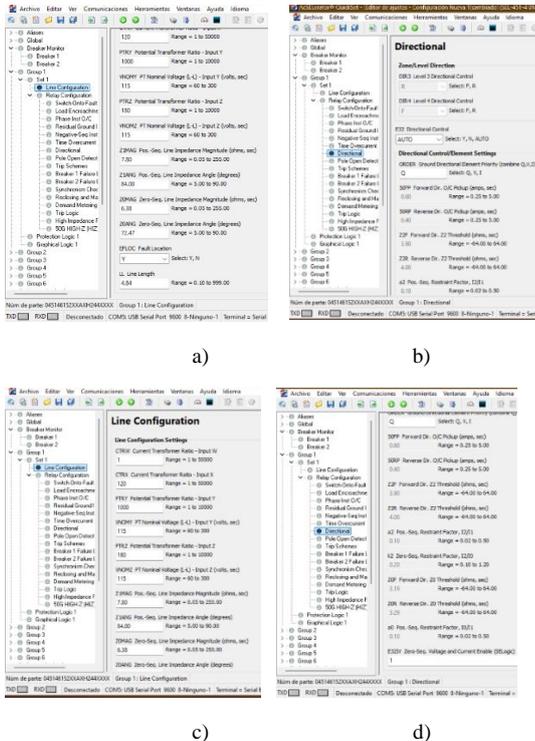


Fig. A1. Configuración relé SEL para validación de operación de los bits R32Q y F32Q.

REFERENCIAS

- [1] J. Ciuffo and A. Cooperberg, *Power System Protection*. Wiley, 2021. doi: 10.1002/9781119847397.
- [2] OMICRON, “CMC 356 - Equipo universal de prueba de relés y herramienta de puesta en servicio - OMICRON.” Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://www.omicronenergy.com/es/productos/cmc-356/#contact-menu-open>
- [3] Mors Smitt, “Portable relay tester PRT-MS1.” Accessed: Sep. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.morssmitt.com/products/400814/portable-relay-tester-prt-ms1>
- [4] doble, “F6150e Power System Simulator.” Accessed: Sep. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.doble.com/product/f6150e/>
- [5] Meger, “SMRT410 SISTEMA DE PRUEBA DE RELÉS MEGGER.” Accessed: Sep. 08, 2024. [Online]. Available: <https://csa.megger.com/products/prueba-de-reles-de-proteccion/multi-phase-relay-testing>
- [6] E. Tremblay, A. Kachurovski, D. Leschert, and K. Busby, “Protective Relay Upgrade Utilizing Real-Time Simulator Technology: Application in an Industrial Facility,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 27, no. 4, pp. 57–68, Jul. 2021, doi: 10.1109/MIAS.2021.3063087.
- [7] J. Eloy-García, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “Grid simulator for power quality assessment of micro-grids,” *IET Power Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 732–741, 2013, doi: 10.1049/iet-pel.2012.0541.
- [8] H. Kikusato et al., “Microgrid controller testing using power hardware-in-the-loop,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13082044.
- [9] J. Montoya et al., “Advanced Laboratory Testing Methods Using Real-Time Simulation and Hardware-in-the-Loop Techniques: A Survey of Smart Grid International Research Facility Network Activities,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 12, p. 3267, Jun. 2020, doi: 10.3390/en13123267.
- [10] Omar Alexander Chura Vilcanqui, Antonio Cezar de Castro Lima, and Luiz Alberto Luz de Almeida, “Design and Analysis of Amplifiers for Protective Relay Testing,” *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014.
- [11] B. Liu, X. Fang, and Y. Chen, “The design and simulation analysis of current amplifier circuit of relay test,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 466–467, pp. 966–970, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.466-467.966.
- [12] K. S. Ling, A. M. Gole, P. G. McLaren, and R. Wachal, “A PWM current amplifier for testing protective relay,” in *IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37373)*, IEEE, pp. 218–223, doi: 10.1109/CCECE.2002.1015204.
- [13] Z. Stanisic, “High efficiency, linear current amplifier for testing protective relays,” in *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, IEEE, May 2014, pp. 544–549. doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850479.
- [14] M. Ferrari, E. C. Piescorovsky, T. Smith, and J. Hambrick, “Cost-Effective Three-Phase Current Amplifier Interface for Real-time Simulator with Relays in-the-Loop,” in *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, IEEE, Oct. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000320.
- [15] I. Voloh, B. Kasztenny, and C. B. Campbell, “Testing line current differential relays using real-time digital simulators,” in *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)*, IEEE, pp. 516–521. doi: 10.1109/TDC.2001.971287.
- [16] A. Molina Moreno, F. Martinez Cardenas, and G. Gutierrez Alcaraz, “Design of a Multilevel Class D Voltage Amplifier for Relay Testing,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 4, pp. 543–549, Jun. 2014, doi: 10.1109/TLA.2014.6868853.
- [17] B. Bhalja, R. P. Maheshwari, B. A. Oza, and P. H. Shah, “Development of a new over-current/under-current relay testing kit,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 37, no. 11, pp. 1208–1218, Nov. 2009, doi: 10.1080/15325000902993548.

- [18] N. M. Hagyana, C. G. Irianto, and M. Sukmawidjaja, "Designing of characteristic test equipment for over current relays with current capacity of 30 amperes," in *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, IEEE, Oct. 2017, pp. 532–537. doi: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225905.
- [19] M. S. Rahman, N. Saqib, S. H. Abhi, and S. M. I. Huq, "Design and implementation of protective relay testing device using microcontroller and servo-motor," in *3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology, EICT 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/EICT.2017.8275135.
- [20] W. Xu, Y. Yang, Q. Xie, and H. Xu, "Design of three phase high current generator based on virtual instrument technology," in *2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, IEEE, Oct. 2017, pp. 713–716. doi: 10.1109/ITOEC.2017.8122443.
- [21] H. A. Mantooth, M. D. Glover, and P. Shepherd, "Wide Bandgap Technologies and Their Implications on Miniaturizing Power Electronic Systems," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 2, no. 3, pp. 374–385, Mar. 2014. doi: 10.1109/jestpe.2014.2313511.
- [22] A. Lidow, J. Strydom, R. Strittmatter, and C. Zhou, "GaN: A reliable future in power conversion dramatic performance improvements at a lower cost," Mar. 01, 2015, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/MPEL.2014.2381457.
- [23] R. Mitova, R. Ghosh, U. Mhaskar, D. Klikic, M. X. Wang, and A. Dentella, "Investigations of 600-v gan HEMT and GaN diode for power converter applications," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 29, no. 5, pp. 2441–2452, May 2014. doi: 10.1109/TPEL.2013.2286639.
- [24] Transphorm, "TP65H070L Series." Accessed: Sep. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.transphormusa.com/en/document/datasheet-tp65h070l-650v-gan-fet/>
- [25] Transphorm, "TDHB-65H070L-DC Half-bridge Daughter Card Power Stage." Accessed: Sep. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.transphormusa.com/en/evaluation-kit/tdhb-65h070l-dc/>
- [26] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*. Elsevier, 2018. doi: 10.1016/C2016-0-00847-1.
- [27] Texas Instruments, "LMG5200 ACTIVE 80V GaN Half Bridge Power Stage." Accessed: Sep. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/LMG5200>
- [28] Texas Instruments, "BOOSTXL-3PHGANINV 48-V Three-Phase Inverter." Accessed: Sep. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/BOOSTXL-3PHGANINV#supported-products>
- [29] T. Instruments, "Technical Reference Manual TMS320F2837xD Dual-Core Delfino Microcontrollers," 2017.
- [30] T. Instruments, "C2000 Real-Time Control Peripherals Reference Guide," 2018.
- [31] L. R. Merchan-Villalba, J. M. Lozano-Garcia, F. Gonzalez-Longatt, J. M. Ramirez-Arredondo, A. Pizano-Martinez, and J. G. Avina-Cervantes, "Low-Cost Real-Time Control Platform with Embedded Isolated Electrical Sensors for Power Electronics," *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 15, p. 3320, Aug. 2023. doi: 10.3390/electronics12153320.
- [32] Schweitzer Engineering Laboratories, "SEL-451 Sistema de protección, automatización y control de bahía." Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <https://selinc.com/es/products/451/>
- [33] SEL Schweitzer Engineering Laboratories, "SEL-451-5 Protection, Automation, and Bay Control System Instruction Manual," 2024.
- [34] Schweitzer Engineering Laboratories SEL, "SEL-5030 Software acSELErator QuickSet." Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <https://selinc.com/es/products/5030/>
- [35] Wuhan Jiuhua Jingce Power Equipment, "JHS903 Relay Protection Tester Microcomputer Secondary Current Injection Relay Test Set 3 Phase." Accessed: Sep. 10, 2024. [Online]. Available: <https://jiuhuajingce.en.made-in-china.com/product/mQLrgpRYFSWz/China-Relay-Protection-Tester-Microcomputer-Secondary-Current-Injection-Relay-Test-Set-3-Phase.html>

BIOGRAFÍAS



LUIS RAMÓN MERCHAN VILLALBA Realizó sus estudios de pregrado en la Universidad Industrial de Santander en Bucaramanga Colombia obteniendo el título de Ingeniero Electrónico en 2013. En 2015 obtiene su título de Maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, mismo lugar donde en el año 2020 obtiene su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, sistemas eléctricos inteligentes, micro redes, dispositivos FACTS, entre otros.



JUAN MANUEL CANO GALLARDO Recibió el título de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en el año 2022 por parte de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses son la electrónica de potencia, las energías renovables, las microrredes y el diseño de máquinas eléctricas.



JOSÉ JESÚS CONTRERAS PÉREZ Actualmente se encuentra en la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, cursando sus últimos semestres, su interés son los temas de electrónica de potencia, energías renovables, análisis de flujos de potencia y micro redes.



GUILLERMO TAPIA TINOCO Realizó estudios de licenciatura como ingeniero electricista y maestría en ciencias en ingeniería eléctrica en la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. Realizó el Doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato (UG). Actualmente se desempeña como profesor de tiempo parcial con definitividad en la División de Ciencias de la Vida de la UG. Es miembro del SNII nivel I y sus áreas de interés incluyen la aplicación de algoritmos inteligentes en redes eléctricas, redes inteligentes y comunicación IoT.



MARIO ALBERTO ARRIETA PATERNINA Recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligentes.



JORGE URIEL SEVILLA ROMERO Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en el Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México en 2009. En 2013 recibió el título de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Politécnico Nacional, México. Finalmente, en 2024 obtuvo el título de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. Actualmente es profesor de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana. Sus áreas de interés son el modelado en estado estable y en estado dinámico de sistemas eléctricos de potencia, entre otros.