

Bidirectional Protection for DC Systems based on di/dt Behavior

Jeziel Vázquez , Elías J.J. Rodríguez , Jaime Arau , *Member, IEEE*, and Nimrod Vázquez , *Member, IEEE*

Abstract—The modern electric power systems are going through a revolutionary change due the development of DC loads and higher efficiency of DC systems where DC microgrids have some attractive characteristics, however they have several challenges such as limiting and interrupting fault current. In this paper, a protection for DC systems based on transient di/dt detection is proposed to provide faster short-circuit and overcurrent fault detection, where DC breakers are required to be designed for bidirectional fault current conditions, which is a challenge regarding DC microgrid applications due to some associated problems such as long periods of fault interruption, complex circuit structure, and low reliability. The proposal can detect fault current conditions for different distances from the point of failure, and is suitable to operation in both islanding and grid connected conditions. The proposed circuit was analyzed theoretically and experimentally in steady state, as well as under load changes and short circuit conditions to ensure proper operation, making this solution a suitable fast current fault DC breaker solution, which is a significant advantage and requirement in protection of DC systems.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/9054>

Index Terms—DC breaker, DC microgrid, DC protection, di/dt detection.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes eléctricas de corriente alterna (CA) han estado con nosotros por más de un siglo, sin embargo los altos costos para distribuir la energía a grandes distancias aunado al uso de fuentes de energía no renovable han sido factores para buscar otras formas de generación y distribución de la energía, entre las cuales destacan las microredes (MG por sus siglas en inglés), estas son consideradas redes eléctricas a pequeña escala y consisten de fuentes de energía distribuida (DERs por sus siglas en inglés), cargas y controladores.

Las principales ventajas de las MGs es que pueden operar

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Julio C. Rosas-Caro (*Corresponding author: Jeziel Vázquez*).

Este trabajo de investigación fue apoyado por la Universidad Politécnica de Querétaro, TecNM y CENIDET.

J. Vázquez está con la Universidad Politécnica de Querétaro, El Marqués, Querétaro, México (e-mail: jeziel.vazquez@upq.edu.mx).

E. J. J. Rodríguez, y N. Vazquez están el Tecnológico Nacional de México/Celaya, Celaya, Guanajuato, México (e-mails: elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx, y n.vazquez@ieee.org).

J. Arau está el Tecnológico Nacional de México/Cenidet, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: jaime.ar@cenidet.tecnm.mx).

conectadas a la red eléctrica o sin conexión (modo isla), durante fallas o perturbaciones externas, además pueden generar, distribuir, almacenar y regular el flujo de energía a consumidores locales, mejorando el rendimiento [1]-[5].

Debido al desarrollo de la electrónica de potencia y al incremento de cargas de corriente directa (CD) como celulares, televisiones entre otros, han hecho que el uso de MGs de CD sea una opción viable ya que reduce etapas de conversión, mejorando así el rendimiento del sistema eléctrico. Actualmente las MGs de CD son aplicadas en la industria aeronáutica, automotriz, marítima e industria de manufactura para la distribución de energía.

Como cualquier sistema eléctrico, las MGs de CD también están sujetas a fallas y por lo tanto necesitan protecciones. En la figura 1 se muestra un ejemplo de una MG de CD, donde las protecciones de CD son puestas en lugares estratégicos para prevenir una falla originada por un mal funcionamiento eléctrico.

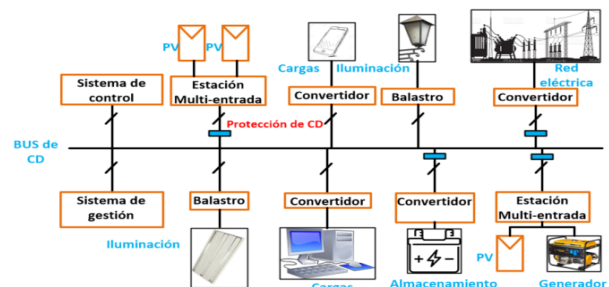


Fig. 1. Ejemplo de una microred de CD con protecciones.

El diseño de las protecciones en CD es una tarea desafiante debido a que muchos aspectos deben ser considerados. Por ejemplo, la protección debe considerar si la falla es unidireccional o bidireccional, además no se puede utilizar las protecciones de CA, otro aspecto importante es que el nivel de corriente de un corto circuito es diferente cuando la red se encuentra conectada a la red eléctrica o en modo isla, por lo que el nivel de corriente de la protección debe ser cambiado dependiendo de si está o no en modo isla [6]-[8]. También la corriente de corto circuito depende de la distancia y su detección debe ser más rápida que en el caso de una red eléctrica de CA [9-11]. El control de energía basado en comunicación logra una buena distribución de energía y regulación de voltaje. Sin embargo, las costosas líneas de comunicación entre módulos disminuyen la confiabilidad de la microred y limitan la expansión y flexibilidad de las DERs [12]. Para incrementar la rapidez de la protección en la literatura se han propuesto el uso de interruptores de estado

sólido de carburo de silicio [13]-[14]. Independientemente de la topología o técnica empleada para la detección.

En [15] proponen un circuito de control para la detección de corto circuitos y la activación de la protección por medio de dos MOSFETs de carburo de silicio. Este circuito ofrece un tiempo de protección de $1.5 \mu\text{s}$, pero no realizan pruebas de cambios de carga para la detección en falso. En [16]-[17] presentan topologías basadas en interruptores de nitruro de galio para la protección contra corto circuitos, alcanzando tiempos de respuesta en el orden de nano segundos. No obstante, estas propuestas tampoco evalúan el comportamiento ante cambios de carga, lo que puede resultar en posibles activaciones en falso.

En [18] proponen una topología basada en el convertidor Z, la cual es bidireccional y abre de forma natural el tiristor cuando una falla ocurre, además de que soporta cambios de carga, pero debido al diseño para cambiar el nivel de protección es necesario cambiar componentes de la protección. En [19] proponen una topología basada en el convertidor Z la cual es bidireccional y cuenta con inductores acoplados, pero para realizar un cambio en el nivel de protección es necesario cambiar los componentes. En [20] proponen una topología modular basada en ramas las cuales pueden conectarse en serie o en paralelo y deben estar comunicadas para limitar la corriente de corto circuito.

En [21] proponen una protección, la cual consiste en interruptores de estado sólido y ramas RC para la detección del nivel de corriente y corto circuito. En [22] proponen una protección bidireccional, la cual consiste en interruptores tanto de estado sólido como mecánicos, así como de capacitores e inductores, la cual tiene la capacidad de recuperar la energía absorbida por un corto circuito y regresarla al sistema. En [23] proponen una protección que consta de un convertidor puente completo controlado y una rama LC. En [24] proponen una protección basada en tiristores generando un cruce por cero para poder interrumpir la corriente y proteger el sistema.

En [25]-[29] presentan técnicas para detectar si una MG se encuentra conectada a la red eléctrica o aislada. En [30] utilizan un filtro de mediana discreto para detectar y clasificar las fallas dentro de una MG de CD con un tiempo de respuesta inferior a 2.5 ms. Sin embargo, muchas de las propuestas revisadas en la literatura carecen de sistemas que sea capaces de ajustar el nivel de protección y no incluyen pruebas para de cambio de carga, lo que puede resultar en activación en falso. En este trabajo se propone un circuito capaz de detectar fallas por corto circuito para proteger sistemas eléctricos de CD que sean bidireccionales. El circuito propuesto se basa en el periodo transitorio de la corriente de un inductor en el bus de CD para detectar una falla considerando solamente mediciones locales. El esquema propuesto permite la detección de corto circuitos y puede ajustar el nivel de protección de corriente por lo que puede operar tanto en modo isla como conectado a la red eléctrica. La propuesta ofrece una detección rápida por medio de un comparador analógico. Se presenta un análisis de la propuesta y un procedimiento de diseño, el cual está limitado a impedancias de línea mucho menores a la impedancia del filtro inductivo. Se validó su comportamiento

por medio de simulaciones y pruebas experimentales tanto de corto circuito como de cambios de carga con resultados satisfactorios en la protección de sistemas de CD.

II. TOPOLOGÍA PROPUESTA

La topología propuesta se basa en un trabajo previo presentado en [31]. Los cambios realizados permiten que el sistema también sea compatible con aplicaciones bidireccionales. La propuesta es ilustrada en la figura 2, en la cual se muestra cuando ocurre un corto circuito, la protección consta de un inductor (L), un filtro analógico (R_A, R_B y C_A), un interruptor de SiC y un diodo (D) como elemento de seguridad, además tiene un puente de diodos con el cual la corriente puede circular en ambos sentidos, L_n y r_n son la impedancia del cableado considerada igual para cada segmento “n” determinado por la distancia donde se origina la falla y las resistencias R_A y R_B del circuito de detección con un valor mucho mayor para evitar el acoplamiento.

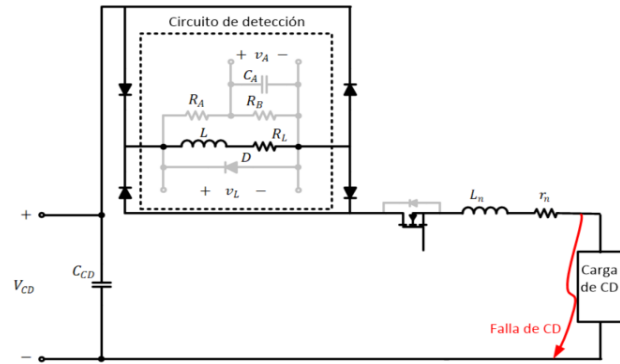


Fig. 2. Circuito de detección de corto circuito propuesto.

A. Análisis Transitorio del Inductor y Capacitor Bajo la Falla

La ecuación que describe el comportamiento de la corriente del inductor L es:

$$i_L = \frac{V_{CD} - 2V_D}{r_n + R_L + r_{falla}} \left[1 - e^{-\left(\frac{1}{\tau_L}\right)t} \right] + i_{(0)} e^{-\left(\frac{1}{\tau_L}\right)t} \quad (1)$$

donde $i_{(0)}$ es la corriente inicial justo antes de que la falla ocurra y τ_L es la constante de tiempo del inductor dada por:

$$\tau_L = \frac{L + L_n}{r_n + R_L + r_{falla}} \quad (2)$$

El voltaje del inductor está determinado por:

$$v_L = [V_{CD} - 2V_D - i_{(0)}(r_n + R_L + r_{falla})] e^{-\left(\frac{1}{\tau_L}\right)t} \quad (3)$$

donde τ_L es la constante de tiempo que determina cuando alcanza su valor final.

El comportamiento del capacitor C_A está dado por:

$$v_A = V_L \frac{R_B}{R_A + R_B} \left[1 - e^{-\left(\frac{1}{\tau_C}\right)t} \right] + v_{A(0)} e^{-\left(\frac{1}{\tau_C}\right)t} \quad (4)$$

donde C_A , R_A y R_B son los elementos del filtro analógico, v_A es el voltaje de salida y $v_{A(0)}$ es el voltaje inicial justo antes de

la falla y τ_C es la constante de tiempo del filtro y está dada por:

$$\tau_C = \frac{R_A R_B C_A}{R_A + R_B} \quad (5)$$

La corriente del capacitor está determinada por:

$$i_C = \left[\frac{v_L}{R_A} - \frac{v_A(0)}{\tau_C} \right] e^{-\left(\frac{1}{\tau_C}\right)t} \quad (6)$$

El comportamiento del inductor y del capacitor corresponde al de un sistema de primer orden comportándose de forma exponencial alcanzando su valor final dependiendo de la constante de tiempo. Para detectar el corto circuito y los cambios de carga, el comportamiento del capacitor debe ser más rápido que el comportamiento del inductor. Por lo que se debe cumplir con:

$$\tau_L > \tau_C \quad (7)$$

Finalmente, la ecuación que determina el incremento de voltaje en el filtro analógico está dada por:

$$\Delta v_A = \frac{0.787t}{5R_A C_A} [v_{CD} - 2v_D - i_{(0)}(r_n + R_L + r_{falla})] \quad (8)$$

Esta ecuación aproxima el voltaje del filtro analógico basado en el comportamiento de la corriente para detectar un cambio de carga y una falla. Entonces para decidir si ocurrió una falla es necesario definir apropiadamente el valor de v_A para activar la protección como se requiere.

$$\Delta v_A = \frac{0.787t}{5R_A C_A} [V_{CD} - 2V_D] \quad (9)$$

B. Diseño del Circuito de Detección di/dt.

Considerando las ecuaciones previas, se propone el siguiente procedimiento de diseño:

- 1) Definir L basado en:

$$L \gg L_n \quad (10)$$

- 2) Determine la carga nominal en base a la potencia nominal y el voltaje del bus de CD.

$$R_{Nom} = \frac{V_{CD}^2}{P_{Nom}} \quad (11)$$

- 3) Obtenga τ_L basado en la ecuación (2), reemplazando r_{falla} por R_{Nom} .
- 4) Defina el voltaje de detección v_A .
- 5) Para definir R_A y R_B , la recomendación es elegir valores altos de las resistencias para evitar el acoplamiento del circuito, para esto utilice la siguiente ecuación:

$$\Delta v_A = \frac{0.787R_B}{R_A + R_B} [V_{CD} - 2V_D] \quad (12)$$

- 6) Definir el valor del capacitor usando la ecuación (5) y la ecuación (7):

$$C_A = \frac{R_A + R_B}{R_A R_B} \tau_C \quad (13)$$

- 7) Verifique que la ecuación (7) es válida todavía con los valores seleccionados.

Con este procedimiento, Podemos determinar si el circuito de detección trabajara apropiadamente, sin olvidar que las aproximaciones son calculadas y que la corriente de la protección puede tener ligeras variaciones y depende de la distancia entre el breaker y la falla.

III. RESULTADOS

Utilizando el procedimiento de diseño presentado, se realizaron simulaciones y pruebas experimentales para validar la propuesta. Se empleo el DSP TMS320F28379D de Texas Instruments, que opera con una frecuencia de 12 MHz y se utilizó el bloque analógico que contiene un comparador analógico con un circuito de enganche S-R. Los interruptores utilizados fueron MOSFETs de carburo de silicio debido a su rapidez y baja resistencia de conducción, mientras que los diodos empleados fueron los diodos ultra rápidos MUR860. El filtro de salida se conectó a un transformador con una relación de 5:1 para capturar el comportamiento transitorio y reducir el voltaje a un nivel manejable por el DSP. El esquema del banco de pruebas se muestra en la figura 3. En este esquema, los interruptores S_1 y S_2 cambian la dirección de la corriente. Los interruptores S_3 a S_6 permiten el cambio de carga y la generación del corto circuito. Además, se indican las mediciones realizadas al circuito.

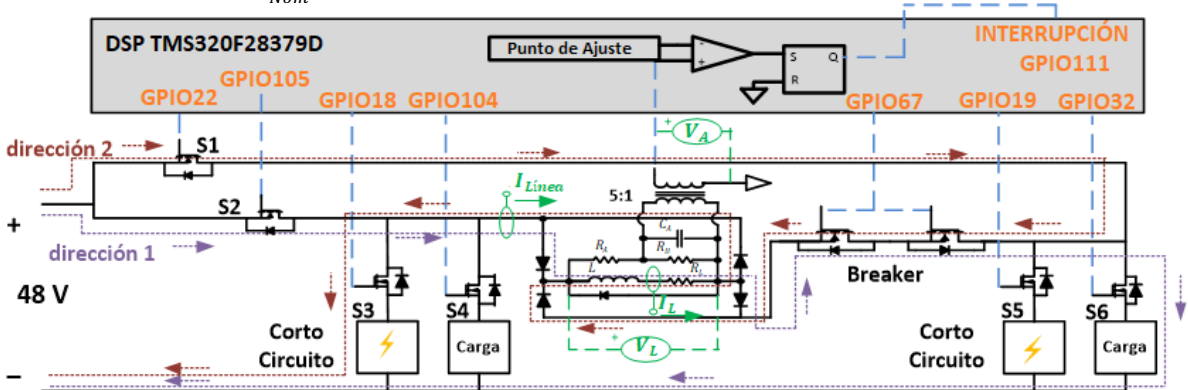


Fig. 3. Esquema del banco de pruebas realizadas incluyendo las mediciones realizadas y las direcciones de la corriente.

En la tabla I se muestran los parámetros utilizados en las pruebas realizadas y descritas en los apartados siguientes.

TABLA I
PARÁMETROS DE LA MICRORED DE CD Y LA PROTECCIÓN

Símbolo	Valor	Descripción
V_{CD}	48 V	Voltaje del bus de CD
R_{Nom}	48 Ω	Carga nominal
P_{Nom}	48 W	Potencia nominal
L	200 μ H	Inductancia de la protección
R_L	0.2 Ω	Resistencia del inductor de la protección
C_A	2.2 nF	Capacitancia del filtro
R_A	420 Ω	Resistencia del filtro
R_B	150 Ω	Resistencia del filtro
V_A	10 V	Voltaje de salida del filtro
L_n	0 μ H	Inductancia de línea

A continuación, se describen las pruebas realizadas tanto físicamente como en simulación usando el esquema mostrado anteriormente. Ambas pruebas se realizaron sin inductancia de línea para evaluar los casos en los que el corto circuito ocurre de forma más abrupta. La principal diferencia entre ellas radica en el valor del punto de ajuste: 10 V en simulación y 2 V en la prueba física. Esta diferencia se debe a que en la simulación no se utilizó el transformador, lo que afectó el punto de ajuste.

A. Prueba a Potencia Nominal Cambiando el Sentido de la Corriente.

En esta prueba se evaluó el sistema al pasar de una condición de sin carga a potencia nominal en la dirección 1. La transición a sin carga se realizó en 80 μ s y el cambio a carga nominal con cambio de dirección en 110 μ s. Los resultados se muestran en figura 4. En la prueba física el voltaje de activación alcanzó un valor máximo de 1.75 V en aproximadamente 10 μ s, mientras que en la simulación alcanzó un valor máximo de 9.85 V, ambos valores se encuentran por debajo del punto de ajuste por lo que no

ocurrió una detección en falso.

B. Prueba de 50% a 100 % a 50 % de la Potencia Nominal.

Esta prueba el sistema cambia de una carga del 50% al 100% de la carga nominal en la dirección 1, después se cambió a sin carga y posteriormente a un 50% de la carga nominal en la dirección 2. Los resultados se presentan en la figura 5. En ambas pruebas el voltaje de activación se encontró por debajo del punto de ajuste por lo que no ocurrió una detección en falso y al disminuir la corriente no incremento del voltaje en el filtro capacitivo.

C. Prueba de 50% a 100 % de la Potencia Nominal.

En esta prueba se evaluó el sistema al pasar de una condición de sin carga a potencia nominal en la dirección 1, después se cambió a sin carga y posteriormente a carga nominal en la dirección 2. Los resultados se presentan en la figura 6. En ambas pruebas el voltaje de activación se encontró por debajo del punto de ajuste por lo que no ocurrió una detección en falso.

D. Prueba de 100 % de la Corriente Nominal a Corto Circuito.

En esta prueba se evaluó el sistema al pasar de una condición de sin carga a potencia nominal en la dirección 2, después se realizó un corto circuito. Los resultados se presentan en la figura 7. En ambas pruebas el voltaje de activación alcanzó el punto de ajuste por lo que la protección fue activada. En la prueba física el sistema es protegido 2.96 μ s después de haber ocurrido el corto circuito llevando la corriente del bus de CD a cero y la energía remanente en el inductor es descargada a través del diodo. En la simulación el sistema es protegido en aproximadamente 0.38 μ s después de haber ocurrido el corto circuito.

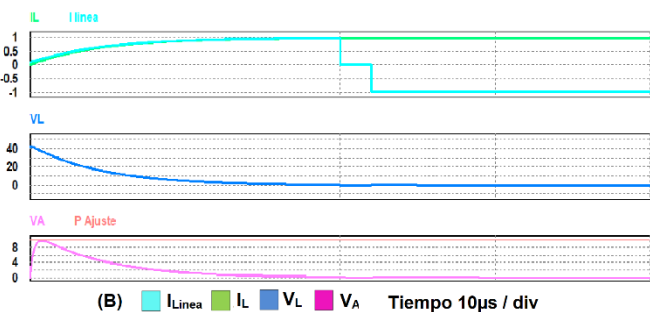
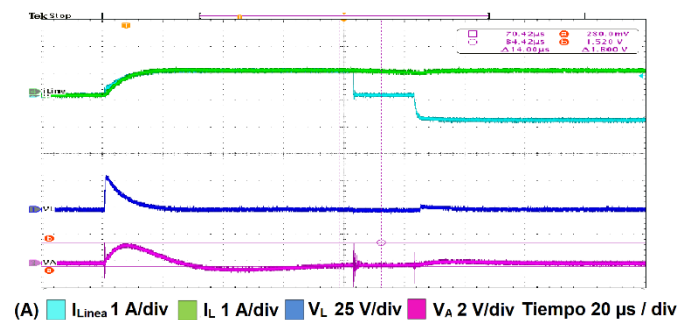


Fig 4. Prueba de 0% al 100% de la carga nominal con cambio de sentido al 100% de la carga nominal: (A) Prueba experimental, (B) Simulación. Las señales representadas son: I_{Linea} (cian), I_L (verde), V_L (azul) y V_A (rosa).

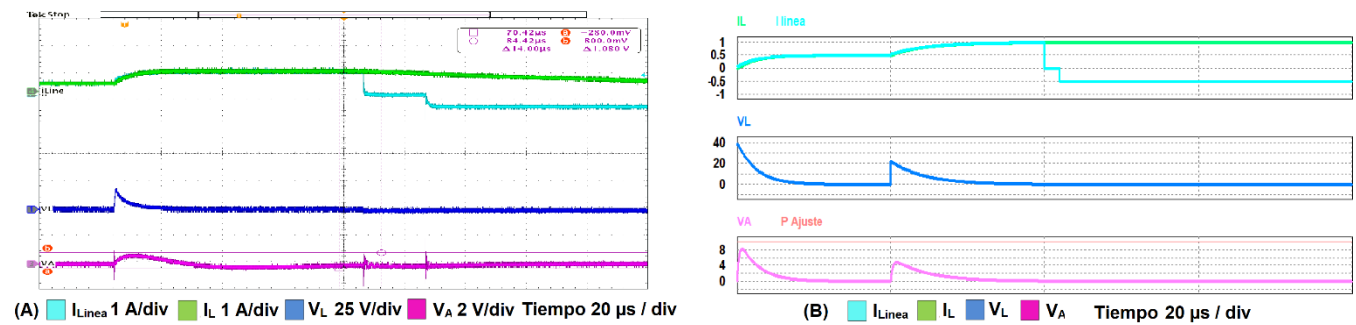


Fig 5. Prueba de 50% al 100% de la carga nominal con cambio de sentido al 50% de la carga nominal: (A) Prueba experimental, (B) Simulación. Las señales representadas son: I_{Linea} (cian), I_L (verde), V_L (azul) y V_A (rosa).

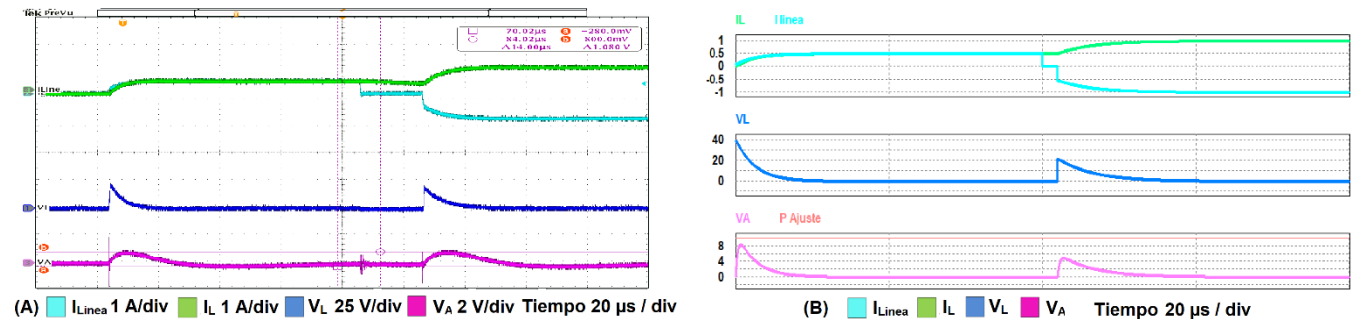


Fig 6. Prueba de 0% al 50% de la carga nominal con cambio de sentido al 100% de la carga nominal: (A) Prueba experimental, (B) Simulación. Las señales representadas son: I_{Linea} (cian), I_L (verde), V_L (azul) y V_A (rosa).

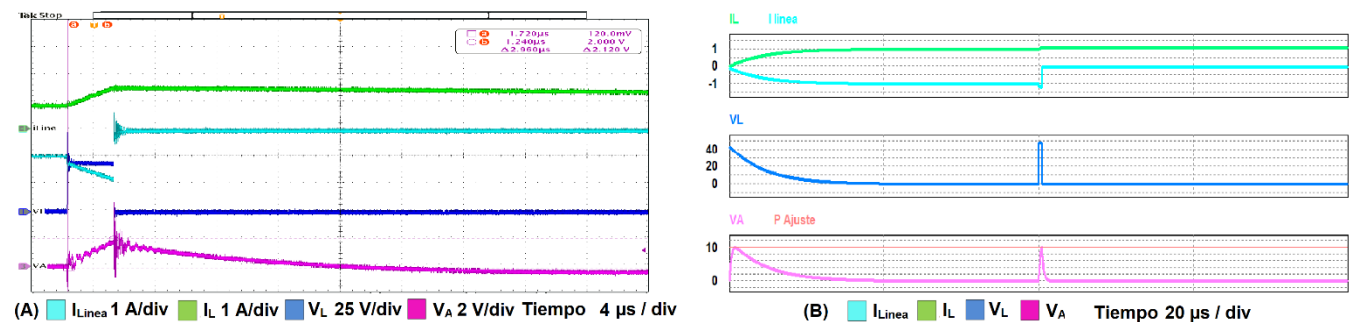


Fig 7. Prueba experimental de 100% de la carga nominal a corto circuito: (A) Prueba experimental, (B) Simulación. Las señales representadas son: I_{Linea} (cian), I_L (verde), V_L (azul) y V_A (rosa).

IV. DISCUSIÓN

El Sistema propuesto funciona adecuadamente bajo condiciones normales sin detecciones en falso y detecta los cortos circuitos independientemente de la distancia como se puede apreciar tanto en los resultados experimentales como en simulación. Al agregarle el puente de diodos el circuito funciona como si fuera el valor absoluto, es decir detecta como corto circuito cuando el cambio de la corriente es mayor al definido independientemente del sentido de la corriente. Es importante considerar la caída de voltaje en los diodos y las pérdidas por conducción. En las pruebas realizadas las pérdidas asociadas a los MOSFETs y diodos se encuentran alrededor del 5%, aunque estas pérdidas pueden reducirse. Una opción para mejorar la eficiencia es sustituir los diodos por MOSFETs teniendo en cuenta que se debe incluir un circuito de activación para cada uno por lo que no fueron utilizados en el banco de pruebas. No obstante, si se hubieran empleado, se estima que las pérdidas serían aproximadamente del 2.3%. El punto de ajuste puede ser cambiado fácilmente

para operar tanto en modo isla como conectado a la red, aunque no tiene la capacidad de detectar la conexión y desconexión de la red eléctrica. Una de las limitaciones que se es el funcionamiento para sistemas con una alta impedancia ya que para emplear el diseño propuesto la inductancia del sistema debe ser mayor que la inductancia de la línea. Hay que tener en cuenta que dependiendo de la corriente en el bus el punto de ajuste se debe cambiar para ser más exacta la detección del corto circuito, como se puede observar en las simulaciones como en las pruebas experimentales. En base a los resultados el circuito se puede utilizar para operar de forma segura en un sistema eléctrico de CD como lo son las MGs de CD tanto en modo isla como conectado a la red eléctrica, siendo una protección bidireccional.

V. COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS

En este apartado la propuesta es comparada con otros métodos y circuitos, en la tabla 2 se muestra una comparación. Se puede observar que la propuesta es versátil debido a que se

puede ajustar para operar tanto en modo isla como conectada a la red eléctrica ya que el nivel puede ser ajustado por diseño. Esta característica también es posible para sistemas más complejos.

TABLA II
COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS

Solución	Opera conectado a la red y/o en modo isla	Cambio de Carga	Tiempo de respuesta	Complejidad
[15]	No	No	1.5 μ s	Alta
[16]	No	No	800 ns	Alta
[18]	No	Si	4 ms	Alta
[19]	No	Si	150 μ s	Alta
[20]	No	No	7 ms	Alta
[21]	No	Si	11 μ s	Baja
[22]	No	No	23 ms	Alta
[23]	No	No	1.42 ms	Alta
[24]	No	Si	8.2 ms	Alta
[30]	No	Si	2.5 ms	Media
Propuesta	Si	Si	3 μ s	Baja

Otro aspecto importante en los sistemas de protecciones en CD es la insensibilidad a las fallas a cierta distancia de la protección, sistemas más complejos pueden operar apropiadamente bajo estas circunstancias, así como la propuesta.

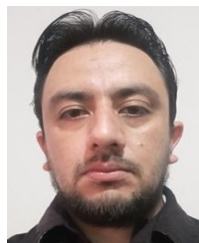
VI. CONCLUSIÓN

En este artículo se propuso un circuito de protección bidireccional para sistemas eléctricos de CD basado en el comportamiento transitorio, el cual fue analizado, se presentó una metodología de diseño así como simulaciones y finalmente se verificó de forma experimental que el cambio en la corriente es detectado de forma rápida para corto circuitos y no se activa en falso para el funcionamiento normal del sistema, además la velocidad del sistema es otra característica esencial la cual pocos métodos pueden alcanzar, el sistema propuesto puede ser mejorado agregando un sensor de corriente para detectar una sobre corriente, además el punto de ajuste puede ser cambiado fácilmente para operar en modo isla o conectado a la red eléctrica. Los sistemas de protecciones en CD todavía presentan desafíos. Entre los trabajos futuros en desarrollo se encuentran: la detección de corto circuito cuando la red tiene una alta impedancia, sistemas de protección autoalimentada, identificación del estado de conexión a la red, prevención de la generación de arcos eléctricos.

REFERENCES

- [1] A. Mohammed, S. S. Refaat, S. Bayhan, and H. Abu-Rub, "AC Microgrid Control and Management Strategies: Evaluation and Review," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 18–31, Jun. 2019. doi:10.1109/mpel.2019.2910292.
- [2] A. M. Bouzid et al., "A survey on control of Electric Power Distributed Generation Systems for microgrid applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 751–766, Apr. 2015. doi:10.1016/j.rser.2015.01.016.
- [3] Y. Yoldaş, A. Önen, S. M. Mueen, A. V. Vasilakos, and İ. Alan, "Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 205–214, May 2017. doi:10.1016/j.rser.2017.01.064
- [4] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J.-W. Jung, "AC-microgrids versus DC-microgrids with Distributed Energy Resources: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 387–405, Aug. 2013. doi:10.1016/j.rser.2013.03.067.
- [5] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011. doi:10.1109/tie.2010.2066534
- [6] N. Bayati, A. Hajizadeh, and M. Soltani, "Protection in DC microgrids: A comparative review," *IET Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 66–75, Sep. 2018. doi:10.1049/iet-stg.2018.0035
- [7] B. J. Brearley and R. R. Prabu, "A review on issues and approaches for microgrid protection," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 988–997, Jan. 2017. doi:10.1016/j.rser.2016.09.047.
- [8] S. C. Vegunta et al., "AC microgrid protection system design challenges—a practical experience," *Energies*, vol. 14, no. 7, p. 2016, Apr. 2021. doi:10.3390/en14072016.
- [9] [1] A. Hooshyar and R. Iravani, "Microgrid protection," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1332–1353, Jul. 2017. doi:10.1109/jproc.2017.2669342
- [10] J.-D. Park, J. Candelaria, L. Ma, and K. Dunn, "DC ring-Bus Microgrid Fault Protection and identification of fault location," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 4, pp. 2574–2584, Oct. 2013. doi:10.1109/tpwrd.2013.2267750.
- [11] V. Albernaz Lacerda, R. M. Monaro, D. Campos-Gaona, D. V. Coury, and O. Anaya-Lara, "Distance protection algorithm for multiterminal HVDC systems using the hilbert-huang transform," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 15, pp. 3022–3032, May 2020. doi:10.1049/iet-gtd.2019.1551.
- [12] J. Lai, H. Zhou, X. Lu, and Z. Liu, "Distributed Power Control for Ders based on networked multiagent systems with communication delays," *Neurocomputing*, vol. 179, pp. 135–143, Feb. 2016. doi:10.1016/j.neucom.2015.11.068
- [13] Y. Wang, W. Li, X. Wu, and X. Wu, "A novel bidirectional solid-State Circuit Breaker for DC Microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 7, pp. 5707–5714, Jul. 2019. doi:10.1109/tie.2018.2878191.
- [14] A. Meghwani, S. C. Srivastava, and S. Chakrabarti, "A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 172–181, Feb. 2017. doi:10.1109/tpwrd.2016.2555844.
- [15] Y. Ren et al., "A single gate driver based solid-state circuit breaker using series connected sic mosfets," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 3, pp. 2002–2006, Mar. 2019. doi:10.1109/tpel.2018.2861920
- [16] Z. J. Shen et al., "First Experimental Demonstration of Solid State Circuit Breaker (SSCB) using 650V Gan-based monolithic bidirectional switch," *2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Jun. 2016. doi:10.1109/ispsd.2016.7520782
- [17] G. E. Mejia-Ruiz, M. R. Paternina, A. Zamora-Mendez, J. C. Rosas-Caro, and G. Bolivar-Ortiz, "A novel gan-based solid-state circuit breaker with voltage overshoot suppression," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 9, pp. 8949–8960, Sep. 2022. doi:10.1109/tie.2021.3116557
- [18] D. Keshavarzi, T. Ghanbari, and E. Farjah, "A Z-source-based bidirectional DC Circuit Breaker with fault current limitation and interruption capabilities," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 9, pp. 6813–6822, Sep. 2017. doi:10.1109/tpel.2016.2624147.
- [19] S. Savaliya, S. Singh, and B. G. Fernandes, "Protection of DC system using bi-directional Z-source circuit breaker," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2016. doi:10.1109/iecon.2016.7793084
- [20] H. Shu and Z. Shao, "A bi-directional current-limiting hybrid DC circuit breaker with fast-breaking capability," *Electric Power Systems Research*, vol. 226, p. 109902, Jan. 2024. doi:10.1016/j.epr.2023.109902

- [21] B. J. Hyon et al., "Design of a solid state circuit breaker using a SIC MOSFET for LVDC applications," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 65278–65286, 2024. doi:10.1109/access.2024.3396127.
- [22] M. M. Hasan, R. Kannan, and S. M. Muyeen, "DC Circuit Breaker: A topology with regenerative current breaking capability for DC Microgrid Applications," *Electric Power Systems Research*, vol. 234, p. 110544, Sep. 2024. doi:10.1016/j.epsr.2024.110544.
- [23] J. Chen et al., "A novel direct current circuit breaker with a gradually increasing counter-current," *Electronics*, vol. 13, no. 10, p. 1883, May 2024. doi:10.3390/electronics13101883.
- [24] X. Yu, G. Jia, X. Liu, Y. Yuan, and M. Li, "A novel current-limiting hybrid DC breaker based on Thyristors," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 983–991, Sep. 2023. doi:10.1016/j.egy.2023.04.150
- [25] F. Mumtaz, K. Imran, H. Rehman, and S. B. Bukhari, "Novel protection method for AC microgrids with multiple distributed generations using unscented Kalman filter," *Electric Power Systems Research*, vol. 230, p. 110227, May 2024. doi:10.1016/j.epsr.2024.110227
- [26] F. Mumtaz, K. Imran, H. Rehman, and H. A. Qureshi, "Hardware supported fault detection and localization method for AC microgrids using mathematical morphology with state observer algorithm," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 12446–12457, 2024. doi:10.1109/access.2024.3354790
- [27] F. Mumtaz, K. Imran, H. Rehman, and S. B. Bukhari, "1D recursive median filter based passive islanding detection strategy for grid-connected distributed generations network," *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 7, pp. 1731–1746, Mar. 2023. doi:10.1049/rpg2.12708
- [28] F. Mumtaz, K. Imran, A. Abusorrah, and S. B. Bukhari, "An extensive overview of islanding detection strategies of active distributed generations in sustainable microgrids," *Sustainability*, vol. 15, no. 5, p. 4456, Mar. 2023. doi:10.3390/su15054456
- [29] F. Mumtaz, K. Imran, A. Abusorrah, and S. B. Bukhari, "Harmonic content-based protection method for microgrids via 1-dimensional recursive median filtering algorithm," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, p. 164, Dec. 2022. doi:10.3390/su15010164
- [30] F. Mumtaz et al., "Ultra high-speed fault diagnosis scheme for DC distribution systems based on discrete median filter and mathematical morphology," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 45796–45810, 2024. doi:10.1109/access.2024.3381519
- [31] J. Vázquez, E. J. Rodríguez, J. Arau, and N. Vázquez, "A di/dT detection circuit for DC unidirectional breaker based on inductor transient behaviour," *Sustainability*, vol. 13, no. 16, p. 9466, Aug. 2021. doi:10.3390/su13169466



Jeziel Vázquez was born in San Luis Potosi City, México in 1986. He received the B.S. degree in automation engineering from the Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, in 2012 and the M. Sc degree in electronics engineering from TecNM/ Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, México in 2016.

He is currently a Professor and Researcher with the Mechatronics Engineering Department, UPQ/ Universidad Politécnica de Querétaro. His fields of Interest include renewable energy, Microgrids Protections, DC/AC converters.



Elías J. J. Rodríguez was born in México in 1972. He received the B.S. degree in electronics engineering from the Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México City, México, in 1994 and the M. Sc and the Ph D. degrees in electronics engineering from the Centro Nacional de Investigación y Desarrollo

Tecnológico, Cuernavaca, México, in 1996 and 1999, respectively. He is currently a Professor and a Researcher with the Electronics Engineering Department, Instituto Tecnológico de Celaya. His fields of Interest include high-frequency power conversion, high-power-factor rectifiers, and electronic ballast.



Jaime Arau (M'92–SM'97) was born in Veracruz, Mexico, in 1960. He received the B.Sc. degree in electronic engineering from the Instituto Tecnológico de Minatitlan, Minatitlan, Mexico, in 1982 and the Ph.D. degree in electronic engineering from the Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, in 1991.

He is currently a Professor of the Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mexico, where he teaches and conducts research in power electronics since 1991. He has supervised 11 PhD and 45 MSc thesis and published more than 160 journal and conference papers and he serves as reviewer in several power electronics journals. Since 2018 he serves as Associate Editor of the *IEEE Latin America Transactions*. His fields of expertise and interest includes the design and control of power electronics converters for several applications like renewable energies, electronic ballasts, power factor correction and energy saving in general.

Dr. Arau was the recipient of the IEEE Third Millennium Medal in the year 2000 and he is currently member of the Mexican Academy of Sciences and the Morelos Academy of Sciences, as member of the Board of Directors of the National Institute of Electricity and Clean Energies – INEEL in Cuernavaca, Mexico as well as member of the Government Board of the Morelos Autonomous University – UAEM in Cuernavaca.



Nimrod Vázquez (M'98–SM'11) was born in México City, México, in 1973. He received the B.S. degree in electronics engineering from the Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, México, in 1994, and the M.Sc. degree in electronics engineering and the Dr. Ing. degree from the Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

(CENIDET), Cuernavaca, México, in 1997 and 2003, respectively. Since 1998, he has been with the Department of Electronics Engineering, TecNM / Instituto Tecnológico de Celaya. His fields of interest include dc/ac converters, power-factor correction, nonlinear control techniques, and renewable energy.