



TRABAJO TEÓRICO EXPERIMENTAL

Análisis de los métodos para la aceleración de protecciones sin comunicación, en líneas de transmisión

Analysis of the methods for the non-communication acceleration protection, On transmission line

Carlos Andrés Sánchez Ayón¹, Orlys Ernesto Torres Breffe^{2,*}


¹Empresa Eléctrica de Holguín, Cuba

²Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba

*Autor de correspondencia: otorres@electrica.cujae.edu.cu

Recibido: 9 de junio de 2020

Aprobado: 29 de septiembre de 2020

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional 

RESUMEN/ABSTRACT

El disparo simultáneo de los interruptores en ambos extremos de una línea de transmisión es uno de los problemas más complejos y costosos de resolver que presentan las protecciones de distancia. Las soluciones para acelerar el disparo de las protecciones distancia que no utilizan canales de comunicación aún no logran la efectividad necesaria. En el presente documento se presenta una revisión bibliográfica de los métodos de aceleración de las protecciones de distancia en líneas de transmisión. En este artículo se referencian primero los métodos de aceleración sin comunicación, investigados e implementados por varios científicos y compañías que comercializan sistemas de protección para sistemas de transmisión y luego se presentan los métodos convencionales, implementados sobre sistemas de comunicaciones para acelerar la operación de las protecciones frente a fallas. También en este documento son analizados los sistemas de aceleración de detección de fallas, utilizando la metodología de análisis de ondas viajeras.

Palabras clave: protecciones líneas de transmisión, protección de distancia, aceleración sin comunicación

The simultaneous tripping of the two end power circuit breaker in the transmission line is one of the complex and costly problem to be solved for the distance protection. The solutions to accelerate the distance protection tripping that not use the communication channels do not reach the necessary requirements. This document presents a bibliographic review of the acceleration methods of distance protections in transmission lines. In this paper is presented first the acceleration methods without communication are presented, investigated and implemented by several scientists and companies that market protection systems for transmission systems and then the conventional methods are referenced, implemented on communication systems to accelerate the operation of protections against failures, and. Also in this document, fault detection and acceleration systems are analyzed, using the traveling wave analysis methodology.

Key words: transmission line protections, distance protection, non-communication acceleration

INTRODUCCIÓN

En las redes eléctricas, los sistemas de transmisión tienen la mayor importancia, debido a la gran cantidad de energía que transfieren sus redes y porque ellos determinan la estabilidad del sistema eléctrico en general, ya que las grandes fuentes generadoras inyectan directamente su energía en estos.

Cómo citar este artículo:

Carlos Andrés Sánchez Ayón y Orlys Ernesto Torres Breffe. Análisis de los métodos para la aceleración de protecciones sin comunicación, en líneas de transmisión. 2020, vol. 41, n. 3, septiembre/diciembre. ISSN:1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

Para garantizar la estabilidad es necesario la implementación de sistemas de protecciones de alta velocidad de respuesta y seguridad, las protecciones diferenciales de línea (87L) en sus variantes (comparación de fases y la de porcentaje diferencial), garantizan una selectividad absoluta en la línea a proteger[1-2]. Con tiempos de comunicación cercanos a los 10 ms, estos sistemas se encargan de transferir información entre un relé local y uno remoto[3].

Existen otros esquemas de protecciones que aceleran el disparo de las protecciones de distancia utilizando sistemas de comunicaciones para lograr cortos tiempos de operación, como es la combinación entre las funciones de la protección distancia y los esquemas de disparos transferidos y bloqueos, llamados, PUP(Permissive Under-Reach Protection), POP(Permissive Over-Reach Protection), BOP (Blocking Over-Reach Protection)[4-6].

El equipamiento de comunicaciones y el medio físico de enlace para lograr la comunicación entre dos extremos de líneas hacen sumamente costoso los sistemas de tele-protecciones, mientras más seguro y robusto más costosa es la tecnología a implementar, como es el caso de los enlaces físicos de fibra óptica[7]. También, a medida que mayor sea la distancia entre los puntos a intercomunicar mayor serían los gastos para lograr una comunicación confiable[8].

La era digital generó también la implementación de relés de protecciones muy eficaces, sobre la base de microcontroladores y microprocesadores, capaces de procesar grandes volúmenes de señales analógicas y binarias. Esta alta capacidad de procesamiento permite la implementación de algoritmos complejos. Algunos científicos y compañías han investigado el desarrollo e implementación de algoritmos, que logren la aceleración de las protecciones con alta velocidad, eficiencia y seguridad sin el uso de los canales de comunicación [9-12]. De esta forma la estabilidad del sistema estaría solamente determinada y asegurada por los relés de protecciones sin la intervención de costosos sistemas de comunicaciones auxiliares.

En este documento se hace una búsqueda bibliográfica que encuentra el origen del por qué aún ninguno de los métodos de protección de líneas, sin el uso de los canales de comunicación que son más económicos, han logrado su aplicación efectiva como protección principal en las tecnologías de los relés más utilizados en el mundo. Estos métodos aún presentan ineficiencias para reaccionar adecuadamente frente a todos los tipos de cortocircuitos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Aceleración de disparos simultáneos sin comunicación

Analizando los cambios de $\Delta I_0(2)$, $\Delta I_2(2)$ (ver figura 1), en combinación con el comportamiento de los voltajes, se identifica la operación de los interruptores remotos, adyacentes y se acelera el disparo de la protección local. Chen Deshu (1989 -1990) [13-14], presenta su algoritmo basado en esta estrategia, realizando pruebas en laboratorios dinámicos y la puesta en servicio de un prototipo de relé digital en un sistema de 110 kV en China. El estudio no resuelve la aceleración para: fallas trifásicas, transición de fallas de monofásica a bifásica contra tierra en casos específicos y presencia de líneas adyacentes cortas.

$\Delta I_0(2)$ = segundo cambio de I_0 (corriente de secuencia cero), transición de régimen de falla a apertura del interruptor remoto, incremento de corriente.

$\Delta I_2(2)$ = segundo cambio de I_2 (corriente de secuencia negativa), transición de régimen de falla a apertura del interruptor remoto, incremento de corriente.

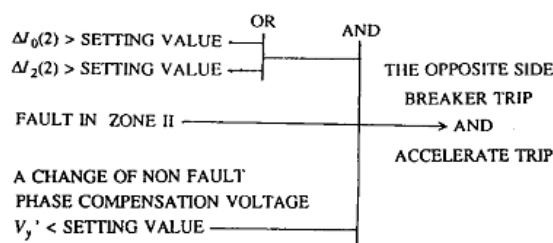


Fig. 1. Estrategia general del algoritmo propuesto por Chen Deshu[14].

Para tiempos aproximados de 100 ms de operación del interruptor remoto, se obtuvieron tiempos de operación de la protección local entre 140 – 165 ms. Este método no logra acelerar la zona 2 de forma importante porque tiene que esperar a la operación del interruptor remoto. Este método no es eficaz para fallas trifásicas dado que basa su funcionamiento en las corrientes de secuencia negativa y cero que no aparecen en estas fallas.

Estudios realizados aplicando: redes neuronales [15], análisis de ondas viajeras[16], componentes simétricas[17], algoritmo básico de aceleración Loss of Load (LoL) [18–20], incluyendo algoritmos para sistemas con doble circuito[21-22], fueron desarrollados por Z.Q.Bo (1996 – 2004), denominados “esquemas adaptativos de aceleración sin comunicación”.

En sus estudios no presentan resultados implementados sobre algún relé digital, solo resultado de simulaciones. El algoritmo de Z.Q.Bo, basado en redes neuronales aplicadas a sistemas de protecciones de alta frecuencia, emite disparo por detección de falla entre los 5 – 7.5 ms [15]. Teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones presentadas en la figura 2. 4a, se puede apreciar la detección de la falla en solo 5 ms, una técnica desarrollada por Z.Q. Bo basado en detección de ondas viajeras[16].

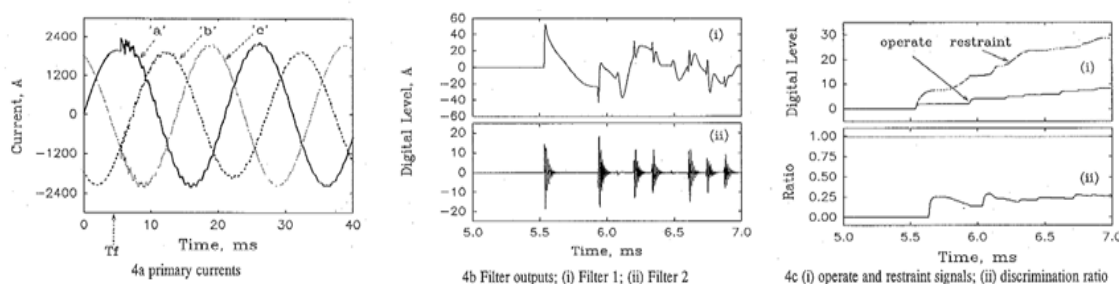


Fig. 2. Algoritmo adaptativo para la detección de fallas utilizando el análisis de ondas viajeras[16].

El algoritmo de “BO protection technique” usando las componentes simétricas (figura 3) y el método de señales superpuestas, hace detectar la operación del interruptor remoto en un tiempo de 120 ms usado para la aceleración de la protección local[17]. Utilizando la metodología mencionada, Z.Q. Bo propone tres esquemas de aceleración: esquema 1 (The Delayed Operation Approach) [18], esquema 2 (The Instant Operation Approach) [19], esquema 3 (The Accelerated Operation Approach) [20]. También presenta un ejemplo de aplicación de esta técnica en sistemas de doble circuito en un sistema simulado [21-22].

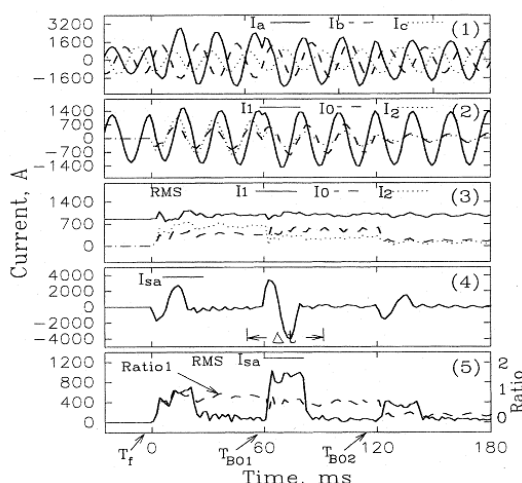


Fig. 3. Resultados de la simulación aplicando la técnica de “BO protection technique” en sistemas de doble circuito[21].

Sidhu y Sachdev proponen un esquema para la aceleración de segunda zona sin comunicación, logrando tiempos de operación de 60- 70 ms[23]. El mismo se basa al igual que el esquema propuesto por Chen Deshu (1989 – 1990) [13-14], en la detección de la operación del interruptor remoto para acelerar el interruptor local, utilizando el análisis del segundo cambio de I0 e I2. El nuevo algoritmo tiene una funcionalidad avanzada y es que una vez detectada una transición de falla se vuelve a identificar otro cambio de I0 e I2, de esta forma logra seguridad en la aceleración y mayor adaptabilidad del algoritmo a los cambios del sistema (figura 4). Mantiene la desventaja de no estar diseñado para acelerar frente a fallas trifásicas porque prevalece la condición de evaluar transición del interruptor remoto analizando corrientes de desbalance de I0 e I2. Tiene que además esperar por la apertura del interruptor remoto.

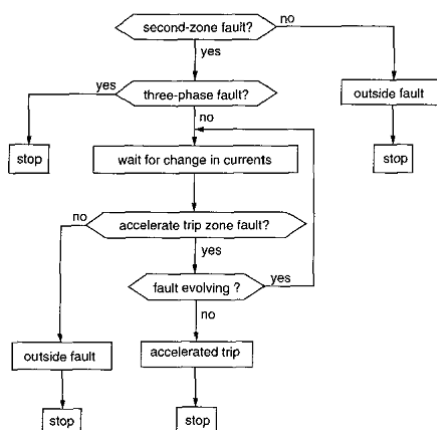


Fig. 4. Gráfica de flujo del algoritmo Sidhu y Sachdev[23].

El algoritmo básico de aceleración sin comunicación denominado “Loss of Load” (LOL) es implementado en relés distancias comercializados por AREVA [24], ALSTOM [25] y ABB [26], a partir de 1999 hasta la actualidad. El algoritmo no es funcional para líneas en estado sin transferencia de energía y fallas trifásicas, porque este tipo de falla hace persistente la circulación de corriente por las tres fases aún abierto el interruptor remoto. Es una función de aceleración de respaldo de las tele-protecciones, en caso de fallo de comunicación. Si deja de circular corriente en una o dos fases del sistema y aparece la señalización de Z2 se acelera la protección local de segunda zona, de esta forma se detecta la operación del interruptor remoto. El tiempo de operación depende principalmente de la operación del interruptor remoto y puede efectuarse 18 ms después, con falla persistente (figura 5).

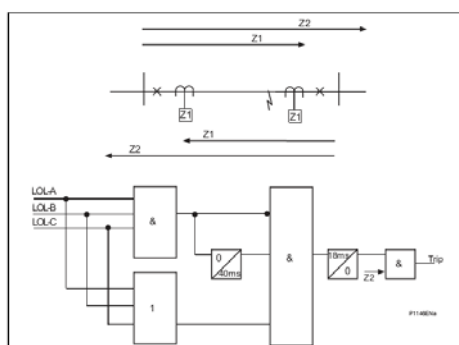


Fig. 5. Esquema lógico Loss of Load implementado por fabricantes como Areva, Alstom y ABB[24].

El algoritmo “SOUND PHASE SEEN IMPEDANCE” publicado en el 2004 por P.J. Moore y H.AI-Nasseri, para la aceleración de segunda zona de la protección distancia, utiliza la tendencia de impedancia infinita en las fases que no intervienen en la falla para distinguir la operación del interruptor remoto[27]. No es funcional para fallas trifásicas. Este algoritmo basado en una combinación de fases con alta impedancia contra fases en falla, logra distinguir la operación de los interruptores adyacentes y el remoto, de esta forma acelera su protección local una vez detectada la operación del interruptor remoto en régimen de falla (figura 6). Los resultados mostrados para un tiempo de operación de 150 ms del interruptor remoto, el algoritmo de aceleración emite el disparo local a los 160 ms. De la misma forma en caso de fallas trifásicas el cambio de las impedancias en las tres fases no ocurrirá y por tanto este método no es eficaz para estos tipos de fallas. Los tiempos de operación no se reducen sustancialmente debido a que el análisis se realiza hasta instantes después de la apertura del interruptor remoto. Con una efectividad de 92 % de detección de fallas internas, Masoud Khodadadi y Seyed Mohammad Shahrtash presentan en el 2014 su algoritmo de aceleración en líneas de transmisión basado en la detección de transientes utilizando Morfología Matemática (MM)[28]. La solución es descrita para líneas de tres terminales (figura 7), el tiempo para la determinación de falla interna o externa es de 5-10 μ s. Se utiliza el efecto de la capacitancia existente en las barras de las subestaciones sobre los transientes, de esta forma el nivel de señal en la línea a proteger (F1) es mayor que en líneas adyacentes (F2).

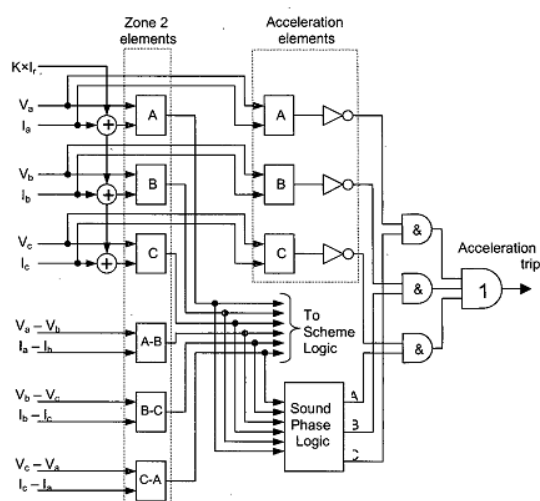


Fig. 6. Esquema lógico de algoritmo “SOUND PHASE SEEN IMPEDANCE”[27].

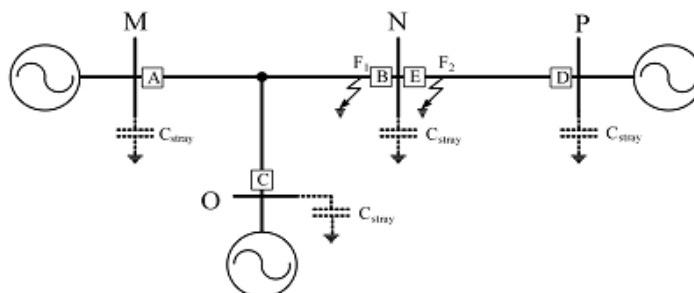


Fig.7. Diagrama de líneas de transmisión de tres terminales para la explicación del método de Morfología Matemática[28].

Arash Mahari y Majid Sanaye-Pasand en el 2017 presentan un algoritmo para la aceleración de la operación frente a fallas en la segunda zona, este es basado sobre el análisis de operaciones homopolares[29]. No presenta una solución para fallas trifásicas debido a que el algoritmo realiza el análisis sobre el efecto de una o dos fases en falla sobre las no falladas. La aceleración es basa en el análisis de las corrientes inducidas, de la fase en falla hacia las fases no falladas, si se detecta un incremento de las corrientes inducidas en las fases no falladas es porque el interruptor remoto realizó una operación monopolar en la fase fallada, ver figura 8a. Este es combinado con las funciones de la protección distancia para lograr un algoritmo general (figura 8b).

$N = \#$ de muestras normalmente

$K1 = 40$, la cantidad de muestras en un ciclo a 2 kHz

ΔI_{th} = ajuste comparado contra ΔI para establecer aceleración

$K2 = 20$, 10 ms

Nota: Los valores fueron calculados en el documento sobre la base de un sistema a 50 Hz.

Los resultados de las simulaciones resultaron que el tiempo máximo de operación para la aceleración después de la apertura del interruptor remoto es de 19 ms[29]. Estos tiempos de operación siguen dependiendo de la operación total del interruptor para emitir disparo acelerado.

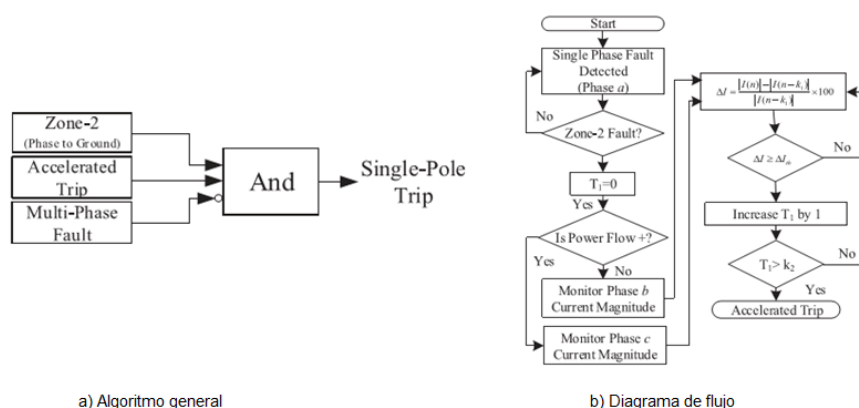


Fig. 8. Diagrama en bloque y funcional para la aceleración del disparo monopolar[29].

El método de aceleración de segunda zona utilizando el criterio de análisis de cambio de la dirección de la impedancia de fases (figura 9a), descrito por Sadeh Vejdan, Majid Sanaye-Pasand y Tarlochan S. Sidhu en el 2017[30]. Es necesario validar el algoritmo en otros escenarios no descritos en el documento que pudieran crear situaciones de operación errónea. Plantea un tiempo máximo de operación de 22 ms después de la apertura monopolar del interruptor remoto. No es factible para fallas trifásicas debido a que el algoritmo analiza de forma cruzada las fases en falla contra las no falladas. En el estado de Activación se analiza la detección de falla y el tipo de falla, este algoritmo en este documento solo es validado para fallas monofásicas. En el estado de Decisión del disparo, existen tres bloques, el primero de derecha a izquierda, garantiza un disparo acelerado, siempre que las fases no falladas tengan una impedancia mayor que el 90% de la impedancia de las fases no falladas, con el interruptor remoto abierto. En esta condición se descarta la posibilidad de presencia de carga en las fases no falladas y el algoritmo decide un disparo tripolar (figura 9b). Los dos bloques restantes están diseñados para detectar el cambio de dirección de impedancia para condiciones de baja resistencia de falla y para alta resistencia de falla.

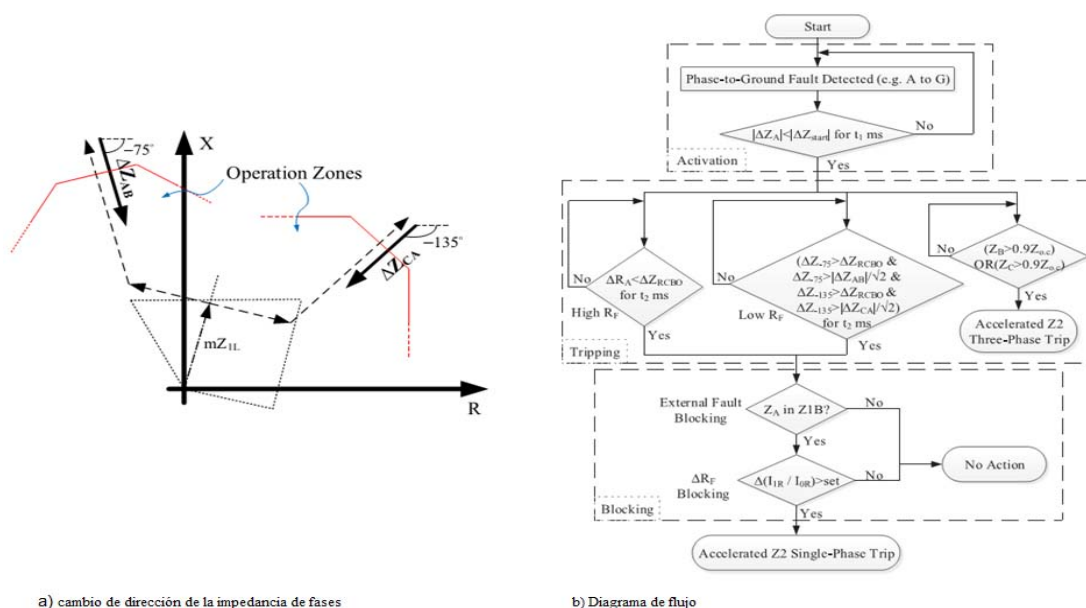


Fig. 9. Diagrama fasorial y de flujo que explica el funcionamiento del método de detección de cambio de dirección de la impedancia[30].

El método “Accelerated Sequential Tripping” (AST), presentado por Sadeh Azizi y Marjan Popoven el 2019, es una estrategia de aceleración de la segunda zona de las líneas de transmisión. Es necesario validar el algoritmo para condiciones críticas y fenómenos que ocurren en los sistemas de transmisión, se presenta en el artículo validaciones solo para fallas monofásicas por lo que no es válido para fallas trifásicas.

El disparo acelerado de segunda zona logra emitirse a los 161 ms, sigue dependiendo de la apertura total del interruptor remoto, esto hace que la reducción de los tiempos de operación no sean tan significativos [31]. En la figura 10, se puede observar la descripción del algoritmo en un diagrama de flujo.

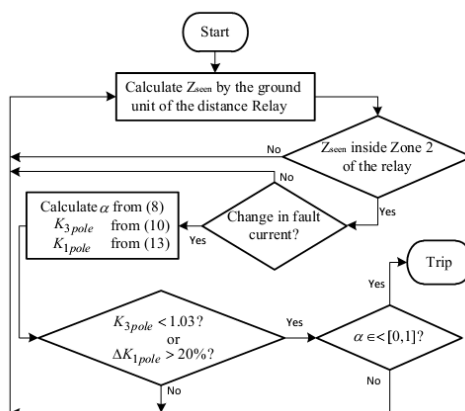


Fig. 10. Gráfica de flujo para el algoritmo AST[31].

Aceleración de la detección de fallas

En la actualidad la compañía china NR (Nary Relay) implementa en sus relés de distancia la llamada tecnología DPFC (Deviation of Power Frequency Component), también conocido como componente de transientes o componente de superposición[32]. Es aplicada principalmente en líneas extensas y se recomienda por el fabricante no habilitarla para líneas cortas o con efecto de fuentes intermedias. Actualmente se combina con tele-protecciones para disminuir los tiempos de operación en todo tipo de líneas. Esta tecnología también es aplicada en las protecciones de transformadores, generadores, barras y unidades generador – transformador[33]. El método de desviación de voltaje es uno de los más utilizados dentro de la tecnología DPFC basado en el concepto de superposición, la figura 11, se utilizó para describir su funcionamiento. Teniendo en cuenta que el relé se encuentra en el punto de ΔU se obtiene las siguientes ecuaciones (1,2), simplificadas[32]:

- Si $|\Delta U_{op}| > \Delta EF$ presencia falla interna(1)
- Si $|\Delta U_{op}| < \Delta EF$ presencia falla externa o inversa(2)

ΔU_{op} =Diferencial Voltaje calculado con límite a la zona a proteger

ΔEF =Diferencial del Voltaje en el punto de falla

La tecnología DPFC es usada principalmente para la detección rápida de la falla y en combinación con esquemas de tele-protecciones se logra una alta selectividad con alta velocidad de respuesta. Esta tecnología por sí sola no garantiza el disparo simultáneo de los interruptores asociados a una línea de transmisión sin comunicación. En un ejemplo realizado por la compañía NR presentado en , se obtuvieron tiempos máximos de operación de 17.5 ms y 23.3 ms con la combinación de las tele-protecciones propias de los relé[32].

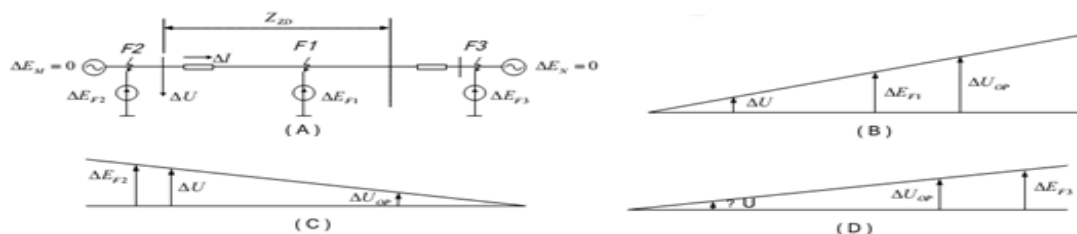


Fig. 11. En A se muestra monolineal de ejemplo de estudio, en B se muestra el comportamiento de los voltajes para una falla en F1, en C se muestra una falla detrás de la protección y en D se muestra el comportamiento de los voltajes para una falla externa en el punto F3[32].

Time Domain

En los últimos diez años la tecnología llamada Time Domain viene tomando lugar en las protecciones de líneas de transmisión, es un método de aceleración sin comunicación utilizando el análisis de ondas viajeras[34]. La compañía Schweitzer Engineering Laboratories con su prototipo, el relé SEL T400L, actualmente comercializado, define dos métodos generales, el método de valores incrementales (TD) y el de ondas viajeras (TW), pero su implementación está combinada con la utilización de esquemas de tele-protecciones, para garantizar mayor selectividad[35]. Elementos basados en IQ (incremental quantities): utilizando el método de superposición, se obtienen las componentes generadas por la falla en señales de corriente y voltaje[36 - 37].

TD32: Time Domain elemento direccional, obtenido de la polaridad relativa entre los valores incrementales de voltaje y corriente (ver figura 12), es posible definir la direccionalidad de la falla.

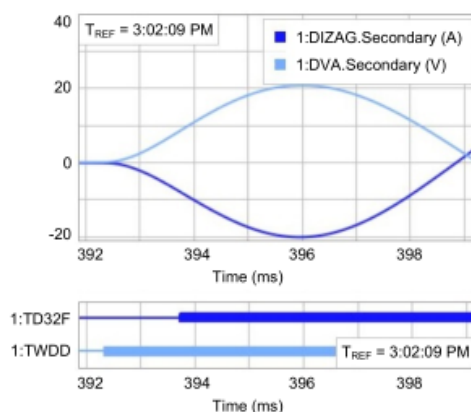


Fig. 12. Detección de direccionalidad utilizando la función TD32[36].

TD21: Analiza el perfil de voltaje de cortocircuito a lo largo de la línea a proteger para identificar si la falla se encuentra fuera o dentro de zona [38], en la figura 13, se muestra este comportamiento. En las siguientes ecuaciones (3,4), se representan las condiciones necesarias para determinar la zona en falla [36]:

$$\text{Si } V_{21OP} \geq V_{21R} \text{ la falla es interna} \quad (3)$$

$$\text{Si } V_{21OP} < V_{21R} \text{ la falla es externa} \quad (4)$$

Donde:

V_{21OP} = voltaje calculado para límite de zona

V_{21R} = voltaje de retención

V_{PRE} = voltaje en el punto de falla

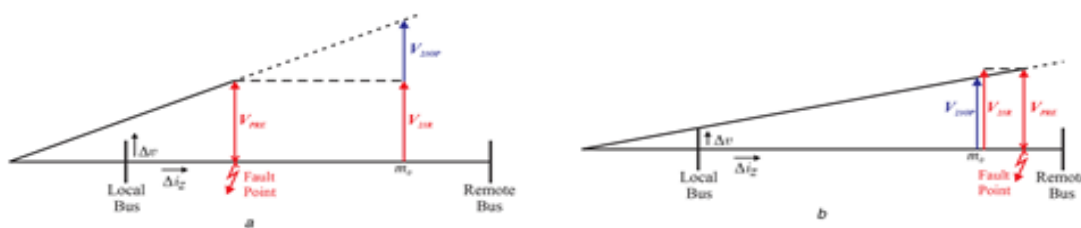


Fig. 13. Ejemplo de funcionamiento de la función TD21, a) Falla en Zona b) Falla fuera de zona [36].

Las funciones TD32 y TD21 son combinadas con esquemas de teleprotecciones de disparos transferido con el POTT (permissiveover-reach transfer trip) [38].

Elementos basados en TW (travelling waves): esta función usa la información extraída de transitorios de alta frecuencia, inducidos por las fallas, para operar, puede disparar en tiempos de microsegundos [39].

TW32: Analizando los voltajes y corrientes basados en TW se puede definir la direccionalidad de la falla teniendo en cuenta las características descritas a continuación [40].

En la figura 14 (a), se muestra el caso de una falla externa, se puede observar que en el punto L la polaridad de i_{TW} y V_{TW} son positivas, mientras que en el punto R las corrientes i_{TW} tienen polaridad inversa. En la figura 14 (b), se muestra el caso de una falla interna, se puede observar que en el punto L la polaridad de la i_{TW} es inversa al igual que en el punto R. Por lo que se puede afirmar que las i_{TW} con polaridad positiva reflejan hacia la línea y las negativas hacia las barras, teniendo como referencia los transformadores de corriente de la protección de línea.

TW87: compara magnitudes, polaridad y tiempo de recepción de las primeras incidencias de i_{TW} en ambos extremos[41]. Para fallas internas deben coincidir la polaridad de las corrientes i_{TW} , la diferencia de tiempo(P) entre las señales de llegada a cada extremo debe ser menor que las señales de propagación de la línea (ver figura 14 b),[36]. En las siguientes ecuaciones se muestran las características de operación de esta función de protección:

$$I_{op}(t) = | i_{TWR}(t) + i_{TWL}(t-P) | \quad (5)$$

$$I_{ret}(t) = | i_{TWR}(t) - i_{TWL}(t-T) | \quad (6)$$

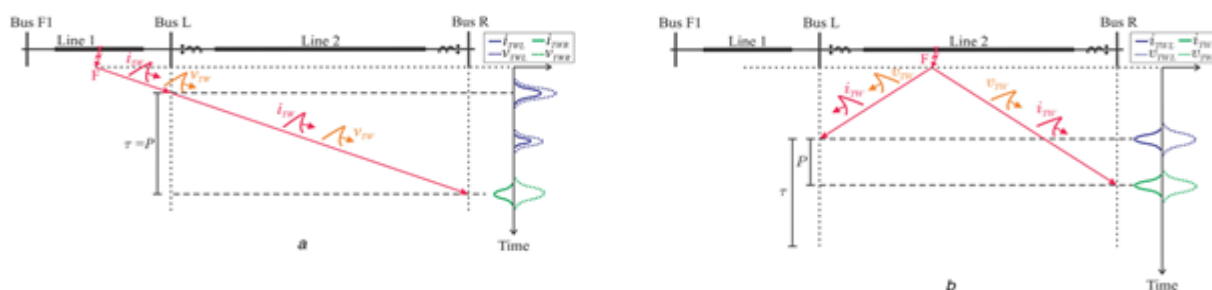


Fig. 14. Ejemplo de funcionamiento de la función TW32, a) Falla externa b) Falla Interna[36].

Existen otras funciones asociadas a las estudiadas utilizando la tecnología Time Domain como son las FL (localizador de falla), TD50 (sobrecorriente no direccional con valores incrementales), TD67 (sobrecorriente direccional con valores incrementales)[42]. Los tiempos de operación máximo según experiencias analizadas son tiempos menores a los 10 ms, en dependencia del tipo y naturaleza de la falla, así como las características de la línea[41].

RESULTADOS

En el presente trabajo se realizó el análisis de 42 citas bibliográficas, relacionadas con tres principales campos de estudio: tele-protecciones, algoritmos de aceleración sin comunicación para disparos simultáneos y aceleración de detección de fallas mediante el análisis de ondas viajeras. En la figura 15, podemos observar un resumen por contenido bibliográfico de la investigación. Correspondientes a la protección diferencial de línea 87L se analizaron 3 documentos, de esquemas de aceleración de tele-protecciones con la función distancia 5, algoritmos de aceleración sin comunicación 22, de ondas viajeras aplicando cantidades incrementales TD 7 y 5 de TW.

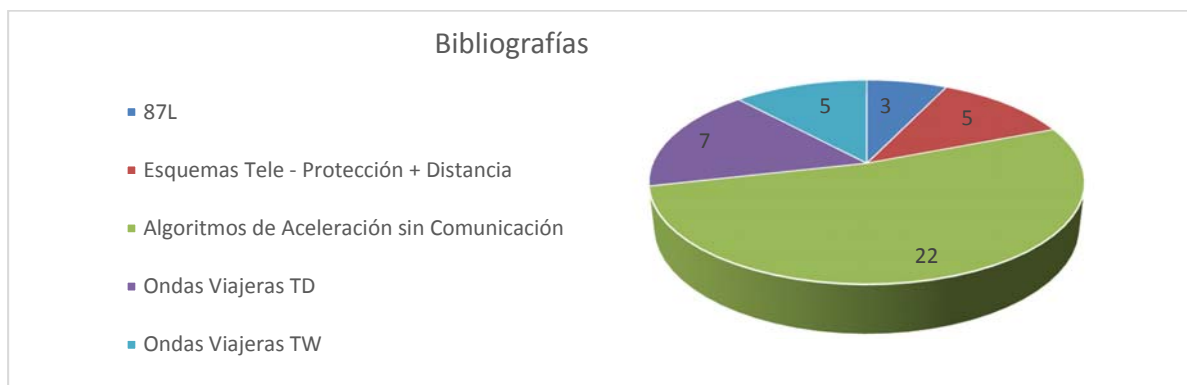


Fig. 15. Resumen de citas bibliográficas en función de los principales contenidos investigados.

Aunque más del 50% de las referencias mostradas en este documento son de las protecciones que emplean los mecanismos de aceleración del disparo de las protecciones de distancias sin utilizar canales de comunicación, estos no son los más empleados en la actualidad porque aún se presentan inconvenientes en su funcionamiento fundamentalmente para cortocircuitos que involucran las tres fases. Los métodos más empleados actualmente en nuestro país son los que utilizan los costosos canales de comunicación, siendo los de fibra óptica los más empleados en casi todos los países. No se enfatiza de la misma manera en este documento en los métodos que emplean los costosos canales de comunicación porque son los métodos más empleados y conocidos por los ingenieros electricistas dedicados a esta especialidad de las protecciones. La novedad más avanzada de la actualidad en este campo de la detección de fallas en las líneas de transmisión la tiene los métodos que emplean ondas viajeras y los valores incrementales, pero aún estos métodos necesitan del auxilio de los más costosos canales de comunicación para realizar el disparo simultáneo. Así que además del costo en la comunicación se le adiciona el costo de los filtros de alta frecuencia en las señales de tensión y corriente empleados para detectar las ondas viajeras y la detección de las ondas provenientes de las fallas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis realizado se puede concluir con los siguientes aspectos:

- Existe un alto nivel de estudio hasta la actualidad, del desarrollo de sistemas de protecciones adaptativas sin comunicación para la aceleración de los disparos y detección de fallas en líneas de transmisión. Se analizaron 34 estudios de algoritmos de este tipo.
- La función de aceleración de protección sin comunicación "Loss Of Load" es implementada por los fabricantes ABB, Areva y Alstom como respaldo frente a la pérdida de comunicación y no es funcional para fallas trifásicas. Los otros métodos analizados que no utilizan canales de comunicación comparten las mismas problemáticas.
- Las tecnologías implementadas, sin comunicación, utilizando ondas viajeras, DPFC de NR y Time Domain de SEL, actualmente son combinadas con esquemas de tele-protecciones para mejorar la selectividad en las líneas de transmisión y por tanto utilizan la comunicación como un apoyo.
- Todavía es necesario el uso de costosos canales de comunicación para garantizar la aceleración de disparos en toda la línea a proteger.

REFERENCIAS

- [1] IEEE. *IEEE Guide for Application of Digital Line Current Differential Relays Using Digital Communication*. IEEE Std C37.243-2015. New York: IEEE, 2015. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7181615?denied=>
- [2] IEEE. *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines*. IEEE Std C37.113-2015. New York: IEEE, 2015. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7502047>
- [3] IEC. *Performance and testing of teleprotection equipment of power systems*. IEC 60834-1. Switzerland: IEC, 1999. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.amazon.com/IEC-60834-2-Ed-1-0-teleprotection/dp/B000Y2LNSW>
- [4] ANDERSON, P. M. "Chapter 13. Pilot Protection Systems". POWER SYSTEM PROTECTION. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York: A JOHN WILEY & SONS, 1999. p. 469 - 530. ISBN 9780470545591. [Consultado abril de 2020]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5264139> ; <https://doi.org/10.1109/9780470545591.ch13>
- [5] AREVA. "Chapter 12. Distance Protection Schemes". Network Protection & Automation Guide. First edition. AREVA T&D - 1, Place de la Coupole - 92084 Paris La Défense - France, 2002. p. 192 - 200. ISBN 2-9518589-0-6. [Consultado abril de 2020]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/335482630/Network-Protection-Automation-Guide-Areva-1-pdf>
- [6] ALSTOM Grid. "Chapter 12 Distance Protection Schemes". Network Protection & Automation Guide. 2011. ISBN 978-0-9568678-0-3 [Consultado abril de 2020]. Disponible en: <https://www.passeidireto.com/arquivo/40750705/network-protection-automation-guide-alstom>
- [7] ENTSO-E Group. "Best Protection Practices for HV and EHV AC-Transmission Systems of ENTSO-E Electrical Grids". 2018. [Consultado abril de 2020]. Disponible en: https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/SOC%20documents/Best_protection_practices_for_HV_EHV_AC_transmission_system.pdf
- [8] AGUILERA Morales, Carlos. "TELEDISPARO – TELEPROTECCIÓN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES EMPRESAS ELÉCTRICAS". Areva, 2010. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/38259917/TELEDISPARO_

- [9] ABB. *REL 521*2.3, "Line distance protection terminal"*. ABB, 2001. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: https://library.e.abb.com/public/433f46304583cd01c12578570041e44b/1MRK506069-UEN_en_Technical_reference_manual_REL_521_2.3.pdf
- [10] ALSTOM. Technical Manual Numerical Distance Protection. P44x/EN T/H75. Alstom, 2011. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://pdfslide.net/download/link/micom-p441-p442-p444-ge-grid-guide-p44xen-th75-micom-p441p442-p444-page-12>
- [11] NARI-RELAYS. "RESEARCH AND APPLICATION OF PROTECTION TECHNOLOGY". NR, 2009.[Consultado abril de 2020].Disponible en: https://m.fwsir.com/wenshi/HTML/wenshi_20070421225354_34046.html
- [12] ZIMMERMAN, KARL. "Line Protection: From Phasors to Traveling Waves".Schweitzer Engineering Laboratories, 2015. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&trct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjRjtWUH5XoAhUKTt8KHcgQBkYQFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fceme.ece.illinois.edu%2Ffiles%2F2015%2F11%2FLine-Protection-From-Phasors-to-Traveling-Waves_2015_10_26_KZ.pdf&usq=AOvVaw0Csw58V7VoytuCkA03ZaQ1
- [13] DESHU, CHEN ; *et al.* "Scheme for accelerated trip for faults in the second zone of protection of a transmission line". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*.1989. v. 4. n. 2. p. 942 - 948. ISSN. 1937-4208. [Consultado febrero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/61.25574> ; DOI:10.1109/61.25574
- [14] PEI, LIU; *et al.* "Analysis of an accelerated trip scheme for faults in the second zone of protection of a transmission line". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY* .1990. vol 5. n. 1. p. 72 - 78.ISSN. 1937-4208. [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/61.107258> ; DOI: 10.1109/61.107258
- [15] BO, Z Q ; *et al.* "Non-communication Protection of Transmission Line Based on Genetic Evolved Neural Network". En: Sixth International Conference on Developments in Power System Protection. 1997.ISSN: 0537-9989.[Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/608209> ;DOI: 10.1049/cp:19970084
- [16] BO, Z Q. "A New Non-communication Protection Technique for Transmission Lines". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. 1998. v. 13, n. 4, p. 1073 - 1078. ISSN. 1937-4208. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/61.714458> ; DOI: 10.1109/61.714458
- [17] BO,Z Q; *et al.* "ADAPTIVE NON-COMMUNICATION PROTECTION SCHEME FOR POWER LINES". En:Developments in Power System Protection, Conference Publication.2001. ISSN. 0537-9989 ; ISBN. 0-85296-732-2 [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/974193> ;DOI: 10.1049/cp:20010119
- [18] BO, Z Q."Adaptive Non-Communication Protection for Power Lines BO Scheme 1—The Delayed Operation Approach". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. 2002. vol 17. n. 1. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/61.974192>. ISSN. 1937-4208.DOI: 10.1109/61.974192
- [19] BO, Z Q. "Adaptive Non-Communication Protection for Power Lines BO Scheme 2— The Ins BO, Z Q. "tant Operation Approach". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. 2002.vol 17. n. 1. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/61.974193>. ISSN. 1937-4208. DOI: 10.1109/61.974193
- [20] BO, Z Q. "Adaptive Non-Communication Protection for Power Lines BO Scheme 3—The Accelerated Operation Approach". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. 2002. Vol 17. Nr. 1. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/61.974194>. ISSN. 1937-4208. DOI: 10.1109/61.974194
- [21] BO, Z Q ; DONG, XINZHOU Z. ; CAUNCE, BEN R. J. ; MILLAR, ROBIN: "Adaptive Noncommunication Protection of Double-Circuit Line Systems". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. 2003. vol 18. n. 1. [Consultado abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.803748>. ISSN. 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2002.803748
- [22] YOUYI, LI ; *et al.* S."ADAPTIVE NONCOMMUNICATION PROTECTION OF DOUBLE CIRCUIT LINE SYSTEMS". En: Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. 2004. [Consultado abril de 2020]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1364813>.ISSN. 0537-9989. DOI: 10.1049/cp:20040070. ISBN. 0-86341-385-4
- [23] SIDHU, T.S; YE, P ; SACHDEV, M.S."Accelerated trip scheme for second-zone distance protection". *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.* 2003. v. 150. n. 3. [Consultado abril de 2020]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1201852?denied=>. ISSN. 1350-2360. DOI: 10.1049/ip-gtd:20030197
- [24] AREVA. "MiCOM P441/P442 & P444 Numerical Distance Protection VC2.x". 2012. [Consultado abril de 2020]. Disponible en:<https://www.manualslib.com/manual/1472543/Areva-Micom-P441.html>

- [25] ALSTOM. "MiCOM P40 Agile P442, P444 Technical Manual Numerical Distance Protection Relay ". 2017. [Consultado abril de 2020]. Disponible en: <https://www.gegridolutions.com/app/DownloadFile.aspx?prod=P441&type=3&file=125>
- [26] ABB. "Line distance protection REL650 Version 1.1 ANSI Application manual". 2019. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: https://library.e.abb.com/public/458418e78d85495089aae306105fdf30/NextECMUpload_1966561_20200131_062305.pdf
- [27] MOORE, P J; H AL-NASSERI. "IMPROVED ZONE 2 ACCELERATION SCHEME USING SOUND PHASE SEEN IMPEDANCE". En: Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. 2004. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/4108398_Improved_zone_2_acceleration_scheme_using_sound_phase_seen_impedance. ISSN. 0537-9989. DOI: 10.1049/cp:20040160. ISBN. 0-86341-385-4
- [28] KHODADADI, MASOUD ; MOHAMMAD SHAHRTASH, SEYED. "A New Non-communication Protection Scheme for Three-terminal Transmission Lines Based on Mathematical Morphology". 2014. vol 28. n. 1. p. 347 - 356. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2224890>. ISSN. 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2224890. ISBN. 0885-8977
- [29] MAHARI, ARASH ; SANAYE-PASAND, MAJID. "An Accelerated Single-Pole Trip Scheme for Zone-2 Faults of Distance Relays". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. 2017. vol 32. n. 2. p. 678 - 687. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2555787>. ISSN. 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2555787
- [30] VEJDAN, SADEGH ; SANAYE-PASAND, MAJID ; S. SIDHU, TARLOCHAN. " Accelerated Zone II Operation of Distance Relay Using Impedance Change Directions". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. 2017. vol 32. n. 6. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7781623>. ISSN. 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2638544
- [31] AZIZI, SADEGH; POPOV, MARJAN; TERZIJA, VLADIMIR. "Noncommunication Accelerated Sequential Tripping for Remote-End Faults on Transmission Lines ". En: *IEEE Milan PowerTech. 13th IEEE PowerTech*. 2019. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810846>. DOI: 10.1109/PTC.2019.8810846. ISBN. 978-1-5386-4722-6
- [32] PUDNEY, DALE ; WEI, LUO. "Protecting IEDs with deviation of power frequency". 2014. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.ee.co.za/wp-content/uploads/2014/03/energize-march-14-p-51-53.pdf>
- [33] NR ELECTRIC. "Technical Data Sheet PCS 931 Line Differential Relay". 2017. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: https://kupdf.net/queue/pcs-931-x-instruction-manual-en_58ca8222dc0d60d362339030_pdf?queue_id=-1&x=1599228235&z=MTUyLjIwNy4yMDAuMjly
- [34] O. SCHWEITZER, EDMUND ; KASZTENNY, BOGDAN; V. MYNAM, MANGAPATHIRAO. "Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults". En: *69th Annual Conference for Protective Relay Engineers* .2016. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/CPRE.2016.7914904>. ISSN: 2474-9753. DOI: 10.1109/CPRE.2016.7914904. ISBN. 978-1-5090-1532-0
- [35] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. "Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder". Schweitzer Engineering Laboratories. 2019. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://selinc.com/api/download/116461/>
- [36] G. RIBEIRO, JOÃO PAULO ; V. LOPES, FELIPE. "Modelling and simulation of a time-domain line protection relay". En: *The 14th International Conference on Developments in Power System Protection*. 2018. vol 2018. n. 15. p. 861-865. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8502997>. ISSN. 2051-3305. DOI: 10.1049/joe.2018.0272
- [37] G. RIBEIRO, JOÃO PAULO ; V. LOPES, FELIPE. "Time-Domain Protection Elements: Study and Implementation". En: *Símpoio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. 2018. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395541>. DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395541. ISBN. 978-1-5386-3363-2
- [38] HENSLER, THOMAS ; *et al.* "Testing Superimposed-Component and Traveling-Wave Line Protection". En: *Locating Faults and Protecting Lines at the Speed of Light: Time-Domain Principles Applied*. 2018. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://selinc.com/api/download/124210/>
- [39] GUZMÁN, A ; SMELICH, G ; SHEFFIELD, Z ; TAYLOR, D. "Testing Traveling-Wave Line Protection and Fault Locators". En: *14th International Conference on Developments in Power System Protection*. 2018. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://selinc.com/api/download/122501/>
- [40] METZGER, NICHOLAS ; CARSTENS, BENJAMIN ; HELENIAC, FRANK. "Practical Experience With Ultra-High-Speed Line Protective Relays". En: *22nd Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference*. Atlanta, Georgia. 2019. [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://selinc.com/api/download/124335/>

- [41] SHARMA, STHITAPRAJNYAN ; V. MYNAM, MANGAPATHIRAO."Field Experience With an Ultra-High-Speed Line Relay and Traveling-Wave Fault Locator". En: *45th Annual Western Protective Relay Conference* . Spokane, Washington.2018. [Consultado febrero de 2020]. Disponible en:<https://selinc.com/api/download/124334/>
- [42] SEL SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES."SEL T400L Protection de línea de dominio del tiempo". 2017. [Consultado febrero de 2020]. Disponible en:<https://selinc.com/es/products/T400L/>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Carlos Andrés Sánchez Ayón:<https://orcid.org/0000-0003-3944-8091>

Participó en el diseño de la investigación, recolección de los datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Orlys Ernesto Torres Breffe:<https://orcid.org/0000-0001-7781-2611>

Participó en el diseño de la investigación, recolección de los datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.