

Algoritmo para el cálculo de fallas trifásicas en líneas de transmisión de sistemas de potencia



Colaboración

José Miguel García Guzmán; Roberto Alejandro Vargas González; Ángel Antonio Soria Salazar; Miroslava Cano Lara; Juan Pablo Razón González, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Fecha de recepción: 30 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 04 de abril de 2025

RESUMEN: En este trabajo se presenta la propuesta de un algoritmo para el cálculo de fallas trifásicas en líneas de transmisión de sistemas de potencia. El método consiste en agregar un nodo ficticio en el sistema de potencia, el cual es ubicado en el punto donde se requiere calcular la falla en la línea de transmisión y es definido en forma porcentual tomando como referencia al nodo de envío de la línea. Una vez especificado el punto de la falla se procede a llevar a cabo el análisis de fallas sistemáticas del sistema de potencia mediante la matriz Z-barra. La confiabilidad y precisión del algoritmo se demuestran mediante un caso de estudio con un sistema de potencia de prueba de 5 nodos y un sistema equivalente real de 39 nodos. Los resultados de los casos de estudio muestran que el algoritmo propuesto es confiable y dispone de precisión para calcular o simular fallas trifásicas en líneas de transmisión de sistemas de potencia.

PALABRAS CLAVE: Algoritmo, Falla trifásica, Línea de transmisión, Sistemas de Potencia, Corriente de falla.

ABSTRACT: This paper proposes an algorithm for calculating three-phase faults in transmission lines of power systems. The method consists of adding a fictitious node in the power system, which is located at the point where it is required to calculate the fault in the transmission line and is defined as a percentage, taking as a reference the line sending node. Once the fault point is specified, the power system's systematic fault analysis is carried out using the Z-bar matrix. The reliability and accuracy of the algorithm is demonstrated through a case study with a 5-node test power system and a real equivalent system of 39 nodes. The results of the case studies show that the proposed algorithm is reliable and has accuracy for calculating or simulating three-phase faults in transmission lines of power systems.

KEYWORDS: Algorithm, Three-phase fault Transmission line, Fault current.

INTRODUCCIÓN

La continuidad del suministro de energía a las cargas conectadas al sistema de potencia depende de la capacidad operativa de las protecciones eléctricas, ya que estas deben operar de manera correcta durante la ocurrencia de una falla con la finalidad de proteger al sistema de potencia. Para ello, dichas protecciones deben ser capaces de soportar el nivel de cortocircuito que se presenta en el punto de falla y abrir el circuito fallado. Las fallas trifásicas balanceadas son las menos comunes, pero más severas en los sistemas de potencia [1].

Es ampliamente reconocido que en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) se presentan fallas simétricas y asimétricas originadas por diversas razones. En la literatura se han reportado diversos estudios y algoritmos donde se calculan las corrientes de falla en subestaciones [2-4] o cuando se presentan oscilaciones de potencia

[5-7]. En lo que respecta al análisis de fallas en líneas de transmisión la mayoría de los trabajos se han enfocado a la detección, clasificación y localización de fallas utilizando diversas metodologías y algoritmos [8-12], mientras que en otros trabajos se han analizado las líneas de transmisión compensadas e incluyendo la integración de dispositivos FACTS [13, 14]. Sin embargo, se debe precisar que muy pocos algoritmos se han enfocado al análisis de fallas en las líneas, de los cuales se pueden mencionar al Algoritmo de Reactancia, Algoritmo de Phadke [15], Algoritmo de Novosel [16] y el Algoritmo de Reactancia y Tagaki [17]. No es menos importante recalcar que la mayoría de los softwares comerciales y especializados en el análisis de corto circuito no tienen implementada la herramienta para el cálculo de fallas en las líneas de transmisión. Por esta razón, resulta importante desarrollar e implementar un algoritmo computacional que permita calcular y localizar las fallas simétricas en las líneas de transmisión a lo largo de su distancia, esto con la finalidad de obtener información que permita dimensionar los interruptores, coordinar las protecciones y determinar el punto, por ende, las causas, donde se presentó la falla en la línea de transmisión [1].

Cálculo de fallas trifásicas balanceadas

Una falla trifásica se produce cuando se presenta un cortocircuito en las 3 fases de un equipo del sistema eléctrico. Debido a que el sistema se mantiene balanceado durante esta falla es posible llevar a cabo su análisis por fase. El algoritmo propuesto en este trabajo utiliza el análisis de fallas sistemáticas basado en la Zbarra, el cual se expresa matricialmente mediante la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} V_{F1} \\ \vdots \\ V_{Fk} \\ \vdots \\ V_{Fn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_k \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_{Fk} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Ec. (1)}$$

Donde la corriente de falla o el nivel de cortocircuito en el bus k del sistema de potencia es,

$$I_{Fk} = \frac{V_k}{Z_k + Z_{kk}} \text{ Ec. (2)}$$

Una vez que se conocen los voltajes de falla en los nodos del sistema es posible conocer las corrientes de falla que se presentan en las líneas de transmisión como sigue,

$$I_{Fij} = \frac{V_{Fi} - V_{Fj}}{Z_{ij}} \text{ Ec. (3)}$$

Algoritmo propuesto para el cálculo de falla trifásicas en líneas de transmisión

El algoritmo propuesto en este trabajo se basa en la adición de un nuevo nodo en el sistema de potencia, el cual se ubica entre el nodo de envío y recepción, y a cierta distancia, medida en porcentaje, del nodo de en-

vío de la línea donde se desea calcular la falla trifásica, tal como se muestra en la Fig.1. Así, el nodo de envío es el nodo de referencia para medir la ubicación de la falla en la línea de transmisión, lo cual se realiza manejando una equivalencia en porcentaje entre la distancia y la impedancia serie de la línea, es decir, si la ubicación de la falla es al 50 % de la distancia de la línea, entonces la impedancia serie vista desde el nodo de envío será el 50 % de la impedancia serie total. Es claro que, si la distancia es 0 % o 100 % la falla se ubica en el nodo de envío y recepción, respectivamente. Es importante mencionar que el algoritmo propuesto permite ubicar fallas en cualquier punto a lo largo de las líneas de transmisión de un sistema de potencia.

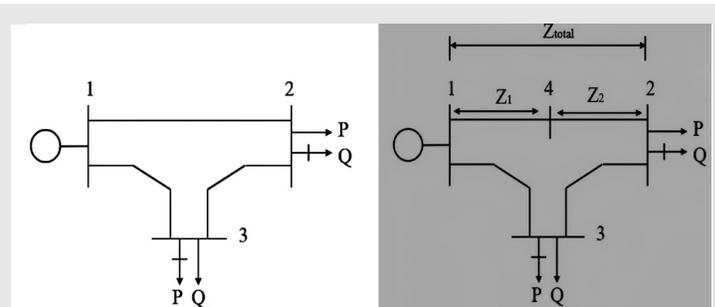


Figura 1: Sistema de 3 nodos con y sin el nodo adicional de falla.

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, cuando no se conoce la distancia total de la línea de transmisión se divide la impedancia serie entre el porcentaje de la distancia en la cual se desea calcular la falla y en ese porcentaje de distancia se ubica el nuevo nodo donde se va a calcular la falla. Así, la línea de transmisión siempre se divide en dos partes, como se ilustra en la Figura 1, considerando el punto de ubicación de la falla como un nuevo nodo en el sistema de potencia, por lo que, el sistema tendrá un nodo y una línea adicional. Una vez que se define la ubicación del nuevo nodo se procede a llevar a cabo el análisis de fallas sistemáticas utilizando la barra.

Caso de estudio

Con el fin de ilustrar la confiabilidad del algoritmo propuesto para el cálculo de fallas trifásicas en líneas de transmisión se llevan a cabo dos casos de estudio con los sistemas de potencia de prueba del IEEE de 5 nodos [18] y de Nueva Inglaterra de 39 nodos [19], en los que simulan fallas en diferentes porcentajes a lo largo de una línea en particular.

Caso de estudio con el sistema de potencia de 5 nodos En este caso de estudio se adiciona un nuevo nodo para determinar fallas trifásicas en la línea de transmisión 5-4 en intervalos del 20% de su longitud total, cubriendo desde el 0% hasta el 100%. Se debe notar que una falla al 0% de la longitud de la línea corresponde a una falla en el nodo de envío de esta, mientras que una falla al 100 % de la longitud se ubica en el nodo de recepción. En todos los porcentajes de la longitud de la

línea se considera una impedancia de falla igual a 0.16j pu. Los resultados del análisis de fallas trifásicas en la línea 5-4 se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. IF en la línea de transmisión 5-4 a diferentes porcentajes de distancia.

Longitud de la línea (%)	Magnitud I_F (pu)
0	2.7603
20	2.7499
40	2.7416
60	2.7354
80	2.7313
100	2.7293

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior el ángulo de fase de la corriente de falla es de 90°, lo cual concuerda con la Ec. (2) porque se desprecia la resistencia de los elementos de transmisión del sistema de potencia, es decir, al despreciar la resistencia no existe una parte real y solo se dispone de la reactancia o la parte imaginaria de la impedancia en la topología del sistema, lo que resulta en una impedancia con un ángulo de 90°. Los resultados presentados en la Tabla 1 se muestran gráficamente en la Figura 2 con la finalidad de apreciar de mejor manera el comportamiento de las fallas a una distancia dada de la línea de transmisión. En esta figura se observa que con el aumento del porcentaje de la longitud de la línea disminuye el nivel de corriente de falla, lo cual se debe a que la impedancia serie de la línea varía proporcionalmente con la longitud, esto es, a mayor porcentaje de distancia vista desde el nodo de recepción se tiene una impedancia más grande. Se debe mencionar que el nivel de cortocircuito en el nodo 5 es de 2.7603 pu, que, como se mencionó, corresponde al 0 % de la longitud de la línea.

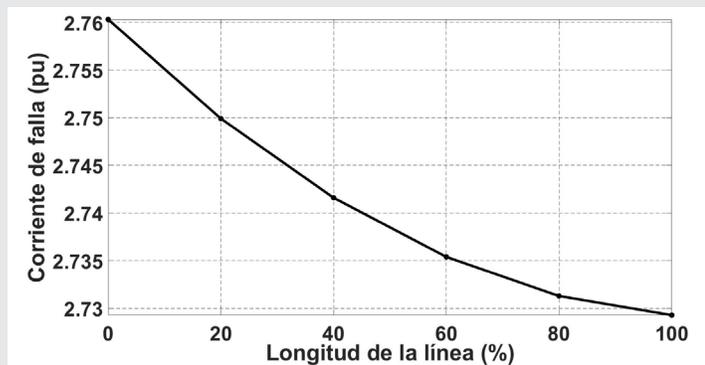


Figura 2 Comportamiento de la corriente de falla en la línea de transmisión 5-4.

Fuente: Elaboración propia.

La confiabilidad de los resultados obtenidos en este caso de estudio puede ser ilustrada mediante un balance de corrientes de falla en las líneas de transmisión que se conectan en el nodo adicional 6, para ello se

utilizan los datos mostrados en la Tabla 2. Es importante mencionar que los datos de la tabla en mención se obtienen con el nodo adicional a 60 % de la distancia vista desde el nodo de envío.

Tabla 2. Valores de corrientes de falla respecto al nuevo nodo en el sistema de 5 nodos.

Corrientes de falla en las líneas de transmisión		
Nodo de envío	Nodo de recepción	Magnitud (pu)
5	6	1.5238
6	4	1.2116

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el balance de corriente de falla en el nodo 6, se obtiene una corriente total de 2.7354 pu, lo cual coincide exactamente, de acuerdo a la Tabla 1, con el valor de la corriente total de falla al 60% de la longitud de la línea de transmisión conectada entre los nodos 5 y 4 es igual a 2.7354 pu. De igual manera, se verifica el correcto balance de corriente en cada nodo del sistema de potencia utilizado en este caso de estudio. Así, es posible corroborar que los resultados del algoritmo propuesto son confiables para llevar a cabo el cálculo de fallas trifásicas a cualquier distancia de una línea de transmisión. Esta misma técnica se aplicó en un sistema de potencia real, cuyos resultados se muestran enseguida.

Caso de estudio con el sistema de potencia de 39 nodos

En este caso de estudio se verifica la confiabilidad del algoritmo propuesto para calcular fallas trifásicas en sistemas de mayor tamaño. La línea de transmisión que se selecciona se encuentra conectada entre los nodos 20-34 y se adiciona el nodo 40 entre dichos nodos para llevar el análisis de fallas trifásicas en la línea. Los resultados de la corriente de falla a distintos porcentajes de la longitud de la línea se muestran en la Tabla 3. El ángulo de la corriente de falla es en todos los casos de 90°.

Tabla 3. Corriente de falla en la línea de transmisión 20-34 a diferentes porcentajes de distancia.

Longitud de la línea (%)	Magnitud I_F (pu)
0	4.5636
20	4.5110
40	4.4606
60	4.4124
80	4.3663
100	4.3221

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el comportamiento de la corriente de falla trifásica a lo largo de la línea de transmisión en análisis se muestra en la Figura 3. Igual que en caso de estudio con el sistema de potencia de 5 nodos, en este caso la corriente de falla disminuye al aumentar la distancia, manteniendo un comportamiento muy similar.

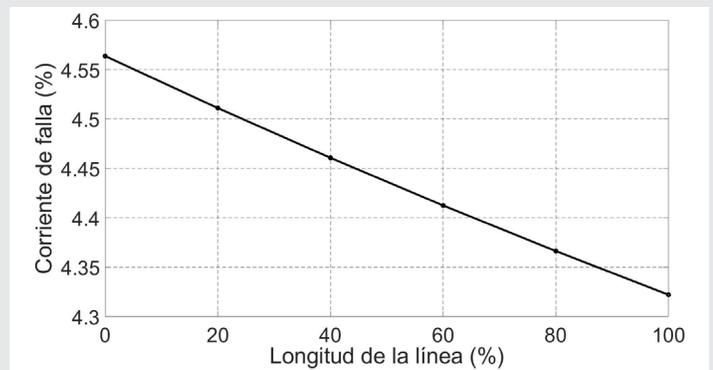


Figura 3 Comportamiento de la corriente de falla en la línea de transmisión 20-34.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al comportamiento de la falla en términos de la distancia de la línea de transmisión, ilustrado en las Figuras 2 y 3, se debe mencionar que dicho comportamiento es único y diferente, ya que depende de la topología del sistema eléctrico de potencia, así como de los valores de las reactancias de las líneas de transmisión donde se localiza la falla trifásica. La razón de lo mencionado, se debe a que los resultados de los casos de estudio que se realizaron con los sistemas de potencia mostraron un comportamiento único y específico para cada línea y para cada sistema de potencia, lo cual lo vuelve muy difícil de predecir a causa de la no linealidad de los sistemas de potencia.

Tabla 4. Valores de corrientes de falla respecto al nuevo nodo en el sistema de 39 nodos.

Corrientes de falla en las líneas de transmisión		
Nodo de envío	Nodo de recepción	Magnitud (pu)
20	40	3.6904
40	34	0.7220

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera que en el caso del sistema de 5 nodos, la confiabilidad de los resultados de este caso de estudio se demostró mediante un balance de la corriente de falla en el nodo adicional 40, dando una corriente total en este nodo de 4.4124 pu, ver Tabla 4. Esto concuerda con la corriente de falla al 60% presentada en la Tabla 2. Claramente, para realizar el balance de potencia el nodo adicional este se colocó al 60% de la línea de transmisión.

CONCLUSIONES

Un algoritmo para el cálculo de fallas trifásicas en líneas de transmisión se ha presentado. El algoritmo se basa en la adición de un nodo ficticio para ubicar la falla a una distancia deseada de la línea. La confiabilidad del algoritmo se demostró utilizando sistemas de potencia de prueba y reales mediante un balance de corrientes en el punto donde se localiza la falla. Los resultados de los casos de estudio muestran que el algoritmo puede ser utilizado de manera confiable para calcular y posteriormente para localizar fallas trifásicas en las líneas de transmisión de cualquier sistema de potencia, así mismo el algoritmo tiene potencial para ser modificado y adecuado para llevar a cabo estudios para coordinar la protección de distancia o para conocer el nivel de cortocircuito de las subestaciones del sistema de potencia. Por último, es importante señalar que el algoritmo propuesto puede ser adaptado de manera sencilla para calcular otro tipo de fallas en líneas de transmisión, tales como fallas monofásicas, fallas línea-línea o fallas línea-línea a tierra. Para ello, se puede modificar el modelo matemático basado en la matriz de impedancia Zbarra, integrando el teorema de componentes simétricas o alguna otra metodología que permitan analizar fallas bajo condiciones desbalanceadas del sistema de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

[1] aadat, H. (2010). *Power System Analysis (3rd ed.)*. Long Grove, IL: Waveland Press.

[2] Prasad, A., Edward, J. B., & Ravi, K. (2018). A review on fault classification methodologies in power transmission systems: Part I. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 5(1), 48-60.

[3] Yalçin, F., & Yildirim, Y. (2019). A study of symmetrical and unsymmetrical short circuit fault analyses in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 23(5), 879-895.

[4] Mehtre, V. V., Keshari, R., & Hyder, Z. (2021). Symmetrical and unsymmetrical faults analysis. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 9(7), 166-169.

[5] Moravej, Z., Dehghani Ashkezari, J., & Pazoki, M. (2015). An effective combined method for symmetrical faults identification during power swing. *Electrical Engineering*, 64, 24-34.

[6] Swetapadma, A., & Yadav, A. (2015). Data-miningbased fault during power swing identification in power transmission system. *IET Science, Measurement & Technology*, 10(2), 130-139.

[7] Patel, B., & Bera, P. (2019). Fast fault detection during power swing on a hybrid transmission line

using WPT. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(3), 1811-1820.

[8] Yadav, A., & Swetapadma, A. (2015). A novel transmission line relaying scheme for fault detection and classification using wavelet transform and linear discriminant analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 6, 199-209.

[9] Adly, A. R., El Sehiemy, R. A., Elsadd, M. A., & Abdelaziz, A. Y. (2019). A novel wavelet packet transform based fault identification procedure in HV transmission line based on current signals. *Journal of Electrical Engineering and Automation*, 8(1), 11-21.

[10] Jiang, J.-A., Chen, C.-S., & Liu, C.-W. (2003). A new protection scheme for fault detection, direction discrimination, classification, and location in transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(1), 34-42.

[11] Chen, K., Huang, C., & He, J. (2016). Fault detection, classification, and location for transmission lines and distribution systems: A review on the methods. *High Voltage*, 1(1), 25-33.

[12] Abdullah, A. (2017). Ultrafast transmission line fault detection using a DWT-based ANN. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(2), 1182-1193.

[13] Mishra, S. K., & Tripathy, L. N. (2019). A critical fault detection analysis & fault time in a UPFC transmission line. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 4(1), 1-10.

[14] Ray, P., Panigrahi, B. K., & Senroy, N. (2012). Hybrid methodology for fault distance estimation in series compensated transmission line. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(5), 431-439.

[15] Phadke, A. G., & Xavier, M. A. (1993). Limits to fault location accuracy. Presented at the Seventh Annual Conference for Fault and Disturbance Analysis, Texas A&M University, College Station, Texas.

[16] Novosel, W. E. D., & Phadke, A. G. (1993). Improvements in Fault Location Estimate. Presented at the Seventh Annual Conference for Fault and Disturbance Analysis, Texas A&M University, College Station, Texas.

[17] Takagi, T., & Yamaura, M. (1982). Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 75(8), 2892-2898.

[18] Stagg, G. W., & El-Abiad, A. H. (1968). *Computer Methods in Power System Analysis*. New York, USA: McGraw-Hill.

[19] Pai, M. A. (1989). *Energy function analysis for power system stability*. Kluwer Academic Publishers.

