

Protección de distancia basada en el reconocimiento de patrones de onda viajera

ERNESTO VÁZQUEZ MARTÍNEZ*, JORGE CASTRUITA ÁVILA*

La creciente tendencia a operar las líneas de transmisión con voltajes cada vez mayores trae consigo nuevos y complicados problemas para el área de protecciones: uno de éstos es la necesidad de reducir el tiempo de detección de las fallas, a fin de evitar daños a equipos y mejorar la estabilidad transitoria del sistema de potencia.¹

Actualmente, los esquemas de protección de líneas de transmisión utilizan los cambios en las señales de voltaje y corriente a frecuencia fundamental para detectar la presencia de alguna falla en la línea protegida,² esto implica la necesidad de usar filtros digitales, los cuales introducen un retardo de tiempo al detectar un cortocircuito. Para reducir los tiempos de detección de fallas, se ha propuesto el uso de señales transitorias de alta frecuencia generadas por la falla, ya que esas señales contienen toda la información de las características de la falla. Los algoritmos propuestos por algunos autores^{3,4,5} han demostrado que es posible detectar y localizar fallas con esquemas basados en ondas viajeras (OV); sin embargo, estos algoritmos tienen problemas para detectar fallas de alta impedancia o fallas que ocurren cerca del cruce por cero.

El algoritmo propuesto discrimina entre una falla interna o externa, a partir del reconocimien-

to de patrones del contorno del primer frente de onda que arriba a la ubicación de la protección. El problema de reconocimiento se simplifica preprocesando la información con la técnica de análisis de componente principal, usada en análisis multivariable. De esta forma, el reconocimiento de patrones se realiza en un subespacio de dos dimensiones, sin la necesidad de un algoritmo de clasificación. El tiempo de operación del algoritmo es de 25×10^{-6} seg.

Se analizó el desempeño del algoritmo mediante casos de simulación, y se consideraron las condiciones de falla más críticas de detectar, como los cortocircuitos cercanos a la ubicación de la protección, cortocircuitos en el extremo de la línea protegida, cortocircuitos que ocurren cerca del cruce por cero de la onda de voltaje, y cortocircuitos que ocurren a través de una alta impedancia. En todos los casos el algoritmo discriminó correctamente entre cortocircuitos internos y externos a la línea protegida. Los resultados ponen de manifiesto que el algoritmo desarrollado satisface los requerimientos de confiabilidad, selectividad, sensibilidad y tiempo de operación impuestos para la protección de líneas de transmisión de alto voltaje.

*Doctorado en Ingeniería Eléctrica, FIME, UANL
evazquez@gama.fime.uanl.mx

Principio de detección de fallas usando ondas viajeras

A. Ondas viajeras en una línea de transmisión

La solución de D'Alembert³ de las ecuaciones de onda de voltaje, $v(x,t)$, y de corriente, $i(x,t)$, en una línea de transmisión monofásica con parámetros distribuidos y sin pérdidas, están expresadas como:

$$\begin{aligned} v(x,t) &= F_1(x-ut) + F_2(x+ut) \\ i(x,t) &= [F_1(x-ut) + F_2(x+ut)]/Z_0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde x es la posición a lo largo de la línea, t es el tiempo, u es la velocidad de propagación, y Z_0 es la impedancia característica de la línea. Las funciones F_1 y F_2 dependen de las condiciones de frontera del caso que se esté analizando. F_1 representa una onda que se desplaza en la dirección positiva de x , a una velocidad c (onda directa), mientras que F_2 es una onda que se desplaza en la dirección negativa de x , a una velocidad c (onda inversa); si el voltaje y la corriente son medidos en una localización x , es posible identificar F_1 y F_2 , formando las señales denominadas S_1 y S_2 :

$$\begin{aligned} S_1 &= v(x,t) + Z_0 i(x,t) = 2F_1(x-ut) \\ S_2 &= v(x,t) - Z_0 i(x,t) = 2F_2(x+ut) \end{aligned} \quad (2)$$

Si la medición se realiza en ($x = 0$), entonces:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2F_1(-ut) = v(0,t) + Z_0 i(0,t) \\ S_2 &= 2F_2(ut) = v(0,t) - Z_0 i(0,t) \end{aligned} \quad (3)$$

donde S_1 representa el cambio de señal en la ubicación del relevador, debido a la onda directa, y S_2 representa el cambio de señal en la ubicación del relevador, debido a la onda inversa. Así, S_1 y S_2 muestran la diferencia entre las ondas viajeras directas (dirección positiva de x) e inversas (dirección negativa de x) en la ubicación del relevador.

En líneas de transmisión trifásicas, para simplificar los cálculos, es necesario descomponer las señales de fase en sus correspondientes modos de propagación, cada uno con su propia atenuación

y velocidad de propagación. La transformación modal puede expresarse por:

$$\begin{aligned} \Delta v_m(t) &= S^{-1} \Delta v_f(t) \\ \Delta i_m(t) &= Q^{-1} \Delta i_f(t) \end{aligned} \quad (4)$$

donde $\Delta v_f(t)$, $\Delta i_f(t)$ son los voltajes y corrientes incrementales de fase, y $\Delta v_m(t)$, $\Delta i_m(t)$ son sus correspondientes voltajes y corrientes modales. En este caso, las señales incrementales se obtienen eliminando las condiciones de prefalla en las señales de voltaje y corriente utilizando un filtro delta.⁶ S y Q son las matrices de transformación, siendo las más comunes las de componentes simétricas.⁷ La descomposición modal permite analizar un sistema trifásico, en función de tres modos de propagación, tratándolos como tres sistemas monofásicos.

B. Efecto de coeficientes de reflexión y refracción

Las ondas viajeras que se generan ante la aparición de un disturbio en la línea de transmisión se propagan por las líneas hasta que llegan a una discontinuidad (elementos en una subestación, unión de varias líneas, etc.); en ese punto, las ondas se dividen en una onda reflejada y una onda transmitida (figura 1), la magnitud de cada una de esas ondas está dada por los coeficientes de reflexión (k_R) y refracción (k_T), los cuales son de la forma:

$$\begin{aligned} k_R &= \frac{Z_b - Z_a}{Z_a + Z_b} \\ k_T &= \frac{2Z_b}{Z_a + Z_b} \end{aligned} \quad (5)$$

donde Z_a y Z_b corresponden a las impedancias características de cada una de las líneas. Los frentes de ondas viajeras propagándose por una línea de transmisión experimentan una modificación en su contorno al atravesar una discontinuidad provocada por un cambio de impedancia. En la figura 1, una onda incidente V_i se propaga por la línea 2, con impedancia característica Z_b alcanza la discontinuidad y continúa a través de la línea 1 con una impedancia Z_a como una onda refractada,

experimentando una modificación en el contorno de V_i a $k_T V_i$.

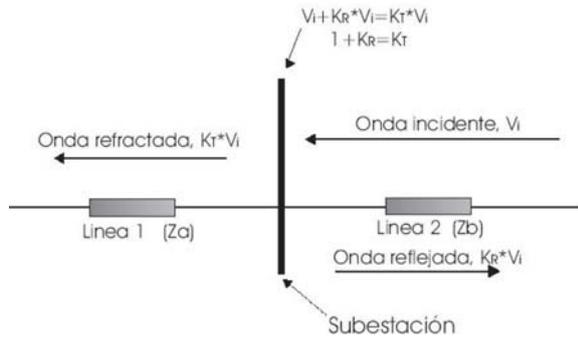


Fig. 1. Comportamiento de OV en una discontinuidad.

En el caso de que ambas líneas sean idénticas ($Z_a = Z_b$), el contorno de la onda viajera no se ve afectado, y no existe onda reflejada. Es difícil que se presente esta situación, $Z_a = Z_b$, en sistemas eléctricos de potencia reales. Asimismo, las ondas viajeras que se propagan a través de una línea de transmisión homogénea se ven mínimamente afectadas en su contorno, aun considerando pérdidas por atenuación. Ésta es la base conceptual del nuevo algoritmo que se describe en este artículo.

Representación de frentes de ondas viajeras con análisis de componente principal

A. Análisis de componente principal

El ACP es una técnica estadística de análisis multivariable ampliamente usada para encontrar patrones en datos de alta dimensión. Fue inicialmente estudiada por H. Hotelling⁸ y se define de la siguiente manera: para un grupo de vectores p -dimensionales $\{t_n\}$, $n \in \{1, \dots, N\}$, los q ejes principales w_j , $j \in \{1, \dots, q\}$ son aquellos ejes ortonormales en los cuales la máxima varianza es retenida por proyección. Se puede demostrar que los ejes w_j corresponden a los q eigenvectores dominantes en:

$$S w_j = \lambda_j w_j \quad (6)$$

asociados a los eigenvalores más grandes de la matriz de covarianza S formada por:

$$S = \frac{\sum_1^n (t_n - \bar{t})(t_n - \bar{t})}{n-1} \quad (7)$$

donde \bar{t} es la media de la muestra. La nueva representación vectorial es:

$$x_n = W^T (t_n - \bar{t}) \quad (8)$$

donde $W = [w_1 w_2 \dots w_q]$ y x_n corresponde a la representación reducida q -dimensional de los vectores $\{t_n\}$. La ventaja de análisis de componente principal es que permite una reducción en dimensiones del problema, realza similitudes y diferencias entre los datos bajo estudio y simplificando el proceso de clasificación entre clases.

B. ACP aplicado a discriminación de fallas en líneas de transmisión

La idea es aplicar ACP, con el propósito de identificar rasgos distintivos de los frentes de onda que permitan identificar si se deben a una falla interna o externa. El algoritmo propuesto utiliza el primer frente de onda de la señal incremental DS_1 , usando el modo aéreo 1 bajo la matriz de transformación modal de Wedephol. Se asume que los transductores no degradan la forma del frente de onda generado por la falla. Cuando ocurre una falla, la señal DS_1 se manifiesta indicando un cortocircuito siempre y cuando supere un umbral de

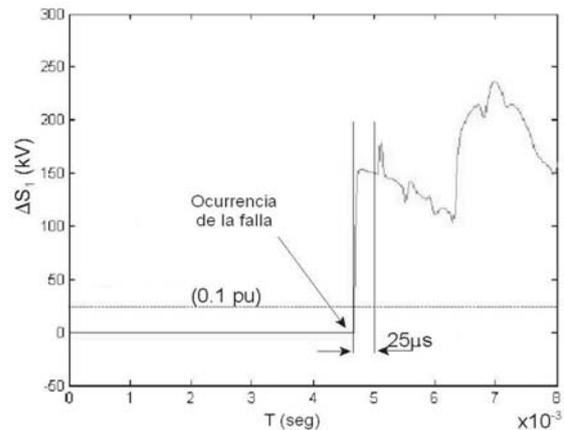


Fig. 2. Umbral y ventana de datos del algoritmo.

10% del voltaje de operación de la línea. La selección de la ventana de datos se hizo en forma empírica y se forma con 25 muestras de la señal DS_1 , con un intervalo de 1×10^6 seg. entre muestras, lo que representa una frecuencia de muestreo de 1 MHz. La figura 2 muestra la ventana de datos usada por el algoritmo.

C. Determinación de las componentes principales

Las condiciones de fallas elegidas como patrones de prueba se muestran en la tabla I, consideran el sistema de prueba mostrado en la figura 3, el cual fue simulado en el programa EMTDC/PSCAD.⁹ Los frentes de onda generados por las fallas correspondientes al modo 1 (modo aéreo) fueron representados como vectores n -dimensionales de la forma $DS_1 = [x_1 x_2 \dots x_p]$. Para que el algoritmo funcione en cualquier sistema, independientemente de su configuración y voltaje de operación, se normalizaron las señales DS_1 para que estén entre 0 y 1 según:

$$\mathbf{t}_n = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta S_1}{\max(\Delta S_1)} \quad \text{si } |\max(\Delta S_1)| > |\min(\Delta S_1)| \\ \frac{\Delta S_1}{\min(\Delta S_1)} \quad \text{si } |\max(\Delta S_1)| < |\min(\Delta S_1)| \end{array} \right\} \quad (9)$$

En el apéndice se describe la configuración física de los conductores de las líneas de transmisión; las impedancias características y tiempos de propagación de ambas líneas son muy similares, con lo cual se pretende evaluar la sensibilidad del algoritmo ante este caso crítico.

Tabla I. Casos de simulación para determinar las CP.

Tipo de falla	Resistencia de falla	Línea 1	Línea 2	Instante de inserción de falla POW (ms)
Fallas AG	$R_f = 0$	10, 20, 30,	1, 5, 10, 20,	Cada 1 ms en un ciclo de la onda de voltaje
Fallas AG	$R_f = 50$	40, 50, 60,	30, 40, 50,	
Fallas ABC	$R_f = 0$	70, 80 90,	60, 70, 80 y	
		95 y 99%	90%	

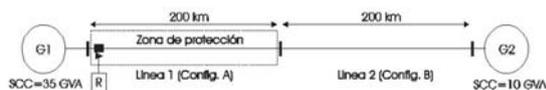


Fig. 3. Sistema de potencia de prueba 1

Los vectores \mathbf{t}_n corresponden a las versiones normalizadas de los frentes de onda usados como patrones de prueba. La ventaja de (11) es que facilita el proceso de clasificación para discriminar entre fallas internas y externas, al mismo tiempo resuelve el problema de signo en la rotación de los ejes que representan las componentes principales.⁸ Para cada instante de inserción de falla, los vectores \mathbf{t}_n pueden acomodarse de la forma:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1(1,1) & t_1(1,2) & \dots & t_1(1,h) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_k(k,1) & t_k(k,2) & \dots & t_k(k,h) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n(n,1) & t_n(n,2) & \dots & t_n(n,h) \end{bmatrix} \quad (10)$$

A partir de (12), se resta la media de cada columna de \mathbf{T} , y se determina la matriz de covarianza \mathbf{S} , de donde se obtienen los eigenvectores \mathbf{V} y los eigenvalores \mathbf{D} :

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= [\text{eig}_1 \quad \text{eig}_2 \quad \dots \quad \text{eig}_{25}] \\ \mathbf{D} &= \text{diag}[\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \dots \quad \lambda_{25}] \end{aligned} \quad (11)$$

Con el propósito de visualizar la relación entre los diferentes frentes, es deseable hacer una proyección a un subespacio de menor dimensión. Para ello se escogieron los eigenvectores dominantes (asociados a los eigenvalores más grandes) de la matriz de covarianza \mathbf{S} , que por lo general corresponden a los dos primeros eigenvectores dominantes. Los eigenvectores dominantes son los nuevos ejes sobre los que se van a proyectar los frentes de onda \mathbf{t}_n , a partir de la transformación:

$$\mathbf{CP}_{12} = [\text{eig}_1 \quad \text{eig}_2]^T \cdot [\mathbf{t}_n - \bar{\mathbf{t}}_n] \quad (16)$$

donde $\bar{\mathbf{t}}_n$ corresponde al vector columna con la media cada dimensión de los datos de prueba y \mathbf{CP}_{12} son las proyecciones de los vectores \mathbf{t}_n en el subespacio de las dos primeras componentes principales.

Con el propósito de eliminar el efecto del instante de inserción de falla³, se repitió el ACP para

tiempos de inserción de 1 a 16 ms con paso de 1 ms en la onda de voltaje, se obtuvieron al final 16 pares de componentes principales, correspondiéndole un par de CP a cada instante de inserción. Por tanto, antes de determinar la ubicación de una falla, se debe determinar en qué instante de tiempo ocurrió; este problema se resuelve con el uso de un detector de cruce por cero.⁶

Diagrama de flujo del algoritmo

En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo; las señales de voltajes y corriente de fase son desacopladas por medio de la transformación de Wedephol, y se obtiene la señal incremental DS_1 correspondiente. Cuando una falla ocurre en la línea, el frente de onda es almacenado durante 25×10^{-6} seg, y una vez que se calcula el ángulo de inserción de falla y se ha elegido el par de vectores de transformación adecuado, el vector que contiene la señal DS_1 es proyectado en el subespacio de sus CP. En el caso de que la falla se detecte en un instante de tiempo que no coincida con los 16 utilizados para la obtención de las CP, el algoritmo considera que la falla ocurrió en el instante de tiempo inmediato superior, y utiliza las CP para ese tiempo. Así, cuando ocurre una falla interna (la proyección aparece en el semiplano izquierdo de CP) se genera una señal de disparo al interruptor.

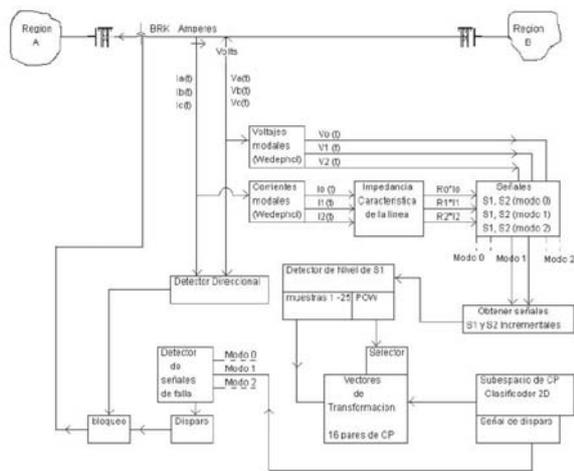


Fig. 4. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

Resultados

Se realizaron pruebas en un segundo sistema de prueba (figura 5), con la finalidad de demostrar que el algoritmo puede detectar fallas en la línea protegida, independientemente de la topología del sistema de potencia, esto es posible ya que las señales de entrada se normalizan antes de ser procesadas. Las simulaciones de falla se hicieron en un sistema de prueba más complejo, utilizando las componentes principales generadas para el sistema de prueba 1. Los casos de falla simulados se muestran en las tablas II y III; las figuras 6 y 7 muestran sus proyecciones en el subespacio de las dos primeras CP; se aprecia cómo el algoritmo discrimina correctamente entre fallas internas (semiplano izquierdo) y fallas externas (semiplano derecho).

El algoritmo no tuvo problemas para clasificar las fallas, independientemente del semiciclo en el que ocurren, su ubicación, la resistencia de falla o el instante de inserción; incluso, el algoritmo resuelve el problema de clasificación, por lo que no es necesario utilizar alguna otra técnica de clasificación de información; esto es posible, ya que para cada falla se calcula el instante de inserción, lo que permite elegir el par de vectores de transformación adecuados. Esto incrementa la confiabilidad al algoritmo para una correcta discriminación de la ubicación de la falla

El uso de la ventana de datos impone restricciones al detectar y discriminar fallas que ocurren cerca del bus local, esto se debe a que una onda viajera generada por una falla cercana llegará rápidamente a la ubicación del relevador, reflejándose continuamente entre el bus y el punto de falla, estas reflexiones sucesivas provocan distorsiones en el

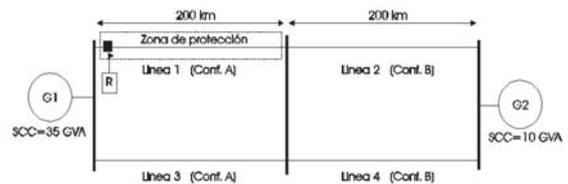


Fig. 5. Sistema de potencia de prueba 2.

frente de onda, originalmente generado por la falla. La distancia mínima a la que el frente de onda no se afecta es $x = uT_v$; donde u es la velocidad de propagación de la onda viajera, y T_v es el tamaño de la ventana de datos; si $u=300,000$ km/s, y $T_v = 25 \times 10^{-6}$ segundos, entonces $x = 7.5$ km.

Tabla II. Fallas trifásicas sólidas.

Tipo de falla	POW (ms)	Distancia (km)
ABC(interna)	14	8
ABC(interna)	7	88
ABC(interna)	6	70
ABC(interna)	13.4	24
ABC(interna)	9.0	190
ABC(interna)	5.9	143
ABC(externa)	9.9	30
ABC(externa)	14.3	135
ABC(externa)	13.1	192
ABC(externa)	12	6
ABC(externa)	11	95
ABC(externa)	4	110

Tabla III. Fallas monofásicas con resistencia de falla.

Tipo de falla	POW (ms)	Distancia (km)	R_f (ohms)
A-G(interna)	9	90	20
A-G(interna)	4	88	40
A-G(interna)	3	70	60
A-G(interna)	10.9	24	20
A-G(interna)	4.8	190	40
A-G(interna)	8.6	143	60
A-G(externa)	2.4	30	20
A-G(externa)	11.1	135	40
A-G(externa)	6.0	139	60
A-G(externa)	13	145	20
A-G(externa)	9	95	40
A-G(externa)	3	195	60

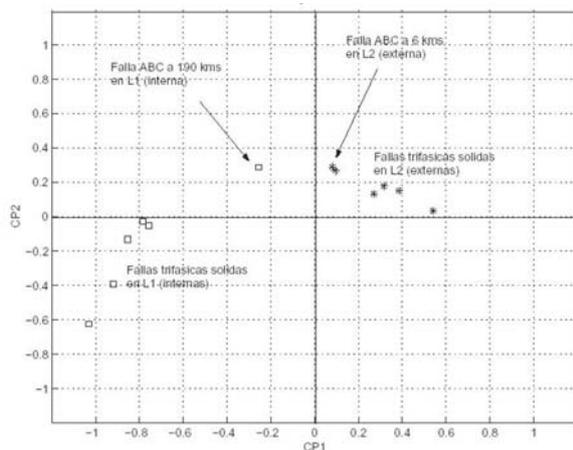


Fig. 6. Proyección de fallas ABC (tabla II).

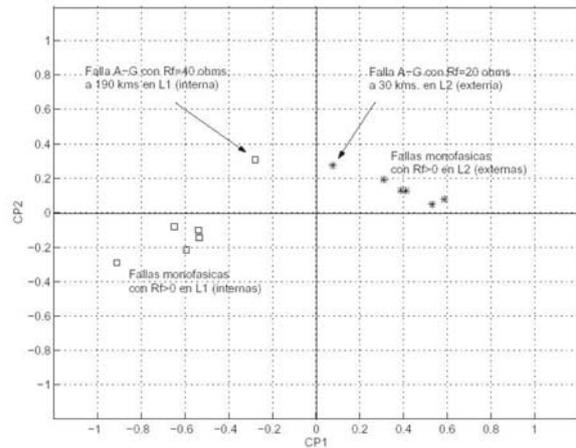


Fig. 7. Proyección de fallas A-G (tabla III).

Conclusiones

El algoritmo de protección propuesto usa la técnica de ACP, con el propósito de obtener una representación en un subespacio de dos dimensiones de los frentes de onda originados por un cortocircuito. Esto permite simplificar el proceso de discriminación de la ubicación del cortocircuito, ya que no se requiere el uso de técnicas de clasificación.

Los resultados obtenidos en las pruebas muestran la capacidad del algoritmo propuesto para distinguir entre fallas internas y externas, usando solamente el primer frente de onda, independientemente de la configuración de la red eléctrica, lo que implica una disminución considerable en el tiempo de detección y liberación de fallas en líneas de transmisión, lo que tiene como consecuencia una reducción de los tiempos de interrupción del servicio eléctrico a los consumidores.

Resumen

En este artículo se presenta un nuevo algoritmo de protección de líneas de transmisión basado en ondas viajeras. El algoritmo usa el primer frente de onda generado por el colapso de voltaje en el punto de aparición de falla para determinar si se encuentra dentro o fuera de la línea protegida. Se

propone usar técnicas de reconocimiento de patrones basadas en análisis de componente principal para procesar las señales transitorias de voltaje y corriente, eliminar la redundancia de información y realzar los patrones característicos de fallas internas y externas. Se analizó el desempeño del algoritmo mediante casos de simulación en dos sistemas de potencia de prueba, considerando fallas críticas de detectar, y en todos los casos el algoritmo discriminó correctamente entre fallas internas y externas.

Palabras clave: Ondas viajeras, Reconocimiento de patrones, Análisis de componente principal.

Abstract

This paper describes a new algorithm for transmission line protection based on traveling waves. The algorithm uses the first wave generated by a voltage collapse during a fault in the power system in order to discriminate between internal and external fault. Pattern recognition techniques using principal component analysis are proposed to process the voltage and current traveling waves, to reduce redundancies in the transient information, and to highlight the characteristic behavior for internal and external faults. The new algorithm is tested through simulation cases using two power systems with typical configuration, considering the detection of critical faults. In all cases, the algorithm discriminates between internal and external faults correctly.

Keywords: Traveling waves, Pattern recognition, Principal component analysis.

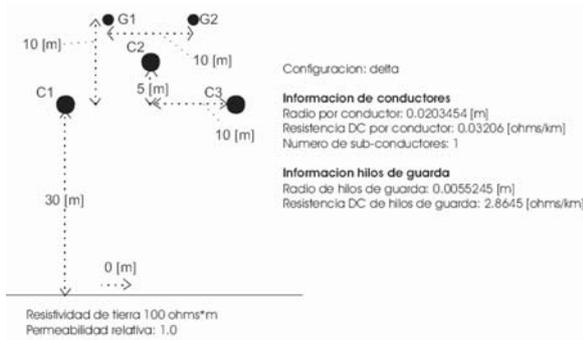
Referencias

1. Stanley H. Horowitz, Power System Relaying, Second edition, Research Studies Press LTD. John Wiley and sons inc. 1995.
2. J. Lewis Blackburn, Protective Relaying, principles and applications, Marcel Dekker Inc., Bothell, Washington. 1987.
3. Ernesto Vázquez Martínez, Application of Pattern Recognition with Principal Component Analysis for Travelling Wave Protection, <http://www.ipst.org/TechPapers/2001/IPST01Paper105.pdf>, IPST '01 - Rio de Janeiro, Brazil, June 24-28, 2001.
4. P.A. Crossley and P.G. McLaren, "Distance protection based on travelling waves," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, no. 9, September 1983, pp. 2971-2983.
5. E.H. Shehab-Eldin, P.G. McLaren, Travelling wave distance protection problem areas and solution, University Engineering Department, Trumpington Street, Cambridge, U.K. July 1988.
6. Gabriel Benmouy, Jeff Roberts, Superimposed Quantities: Their true nature and application in relays, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA, SEL USA 1999.
7. Iván de Jesús Rivas Cambero, Tesis: Análisis y evaluación de dos métodos de protección modal de distancia, CINVESTAV Guadalajara, Jalisco, Mayo 2002.
8. Stefan Van Aelst, Principal Component Analysis, Ghent University, Faculty of Sciences, Department of Applied Mathematics and Computer Science, Krijgslaan 281, S9 B-9000 Gent BELGIUM.
9. PSCAD/EMTDC - TOOL FOR POWER SYSTEM SIMULATION, Manitoba Hydro, The Manitoba HVDC Research Centre, website www.pscad.com, Canada.

Recibido: 30 de septiembre de 2008

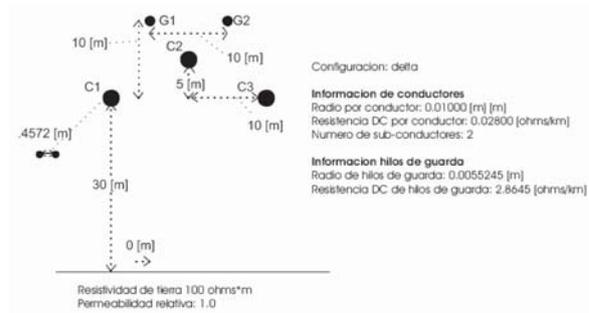
Aceptado: 22 de enero de 2009

Apéndice: Configuración física de las líneas de transmisión en los sistemas de prueba



$$Z_0 = 391.77 \text{ ohms}, \tau = 0.341 \text{ ms}$$

Fig. Configuración de línea A en los sistemas de prueba.



$$Z_0 = 313.15 \text{ ohms}, \tau = 0.338 \text{ ms}$$

Fig. Configuración de línea B en los sistemas de prueba.