

PROTECCION DE ALTA VELOCIDAD DE LINEAS DE TRANSMISION

Ernesto Vázquez Martínez

RESUMEN

Los sistemas eléctricos de potencia modernos requieren que cualquier falla sea detectada y liberada en forma rápida y selectiva. Una alternativa para reducir el tiempo de liberación de la falla es identificar y analizar las componentes de alta frecuencia de las señales debidas a las ondas viajeras generadas por la falla, que constituyen sus primeras manifestaciones. Esta es la llamada protección de onda viajera. En este artículo se describen las diferentes alternativas de aplicación del efecto de propagación de ondas viajeras para protección de líneas de transmisión; pueden identificarse algoritmos de protección direccional, diferencial y de distancia basados en este principio. Finalmente, se propone el uso del Análisis de Componente Principal para identificar los frentes de onda originados por la falla como base de un nuevo algoritmo de protección de distancia de onda viajera.

PALABRAS CLAVE

Onda viajera, Análisis de Componente Principal, Línea de transmisión, Falla, Protección.

INTRODUCCIÓN

Cuando ocurre una falla en una línea de transmisión, es necesario desconectarla del resto del sistema eléctrico de potencia, función que es realizada por los relevadores de protección. Si la falla no es permanente, la línea puede ser reconectada posteriormente, utilizando un procedimiento de recierre automático. La protección de líneas de transmisión de alto voltaje (superior a 115 kV) se basa actualmente en distintos principios de detección de fallas, como son el de distancia y el diferencial de corriente. El principio más utilizado actualmente es el de distancia (Horowitz, 1988) (Blackburn, 1998); en la

práctica, los relevadores de distancia se utilizan en combinación con sistemas de comunicación para mejorar su selectividad en la protección de líneas de transmisión.

A pesar de su excelente desempeño, los relevadores de distancia tienen una limitación inherente que puede originar operaciones incorrectas bajo ciertas condiciones de operación del sistema de potencia. Algunos ejemplos de estas condiciones son las fallas con un fuerte efecto de fuente intermedia desde el extremo opuesto de la línea de transmisión, las fallas de alta resistencia y las fallas en líneas paralelas, que ocasionan operaciones incorrectas debido a la inversión del flujo de potencia. Algunos investigadores han realizado estudios detallados de estas y otras condiciones con el fin de identificar formas posibles de mejorar el comportamiento de los relevadores de distancia utilizando un principio de protección adaptiva (Bickford, 1980)(Lang, 1998). Estos resultados pueden ser mejorados en forma significativa utilizando relevadores basados en microprocesadores (Johns, 1980)(Phadke, 1988).

Otra limitación de la protección de distancia es su velocidad de operación. Para preservar la estabilidad del sistema eléctrico de potencia se requieren tiempos de liberación de fallas muy reducidos, del orden de unos pocos ciclos de frecuencia fundamental. Esto es particularmente importante en sistemas eléctricos débiles, como los que existen en los países de Latinoamérica. Los relevadores de distancia actuales tienen tiempos de operación que oscilan entre 0.5 y 2 ciclos, dependiendo del tipo, localización y características de la falla y de las condiciones de operación del sistema. Esos tiempos de operación no siempre garantizan la preservación de la estabilidad del sistema para fallas críticas.

Los algoritmos utilizados en los relevadores digitales de distancia han sido desarrollados considerando que las señales de voltaje y corriente de entrada al relevador son de frecuencia fundamental (60 Hz), o señales constituidas por una componente fundamental, una componente aperiódica exponencial y oscilaciones amortiguadas de alta frecuencia. Estas consideraciones son válidas, pero se requiere tiempo para filtrar adecuadamente estos ruidos, lo que se refleja negativamente en la velocidad de operación. El problema se agrava en las líneas de transmisión largas, debido a los siguientes factores:

1. Altas corrientes de fuga debidas al efecto capacitivo.

2. Componente aperiódica exponencial con bajo amortiguamiento, debido al alto valor de la relación X/R .
3. Componentes transitorias de frecuencias subarmónicas debidas a la compensación serie capacitiva.
4. Componentes oscilatorias amortiguadas del orden de cientos de Hertz, ocasionadas por la interacción entre la inductancia y la capacitancia de la línea.
5. Componentes transitorias de frecuencias elevadas (decenas de kHz) debidas a los procesos de onda viajera.

Una alternativa de solución a estas limitaciones del principio de protección de distancia, consiste en utilizar las componentes de alta frecuencia de las señales, debidas a las ondas viajeras generadas por la falla, como información para la función de protección. Esta es la llamada protección de onda viajera, cuya operación se basa en la identificación de componentes de señal específicamente generadas por la falla, que constituyen sus primeras manifestaciones, lo que permite lograr una alta velocidad de operación. En los últimos años se ha trabajado intensamente en la investigación de este principio, con el objetivo de desarrollar protecciones de ultra-alta-velocidad (Chowdhuri, 1996).

En el presente artículo se describen las diferentes alternativas de aplicación del efecto de propagación de ondas viajeras para protección de líneas de transmisión; pueden identificarse algoritmos de protección direccional, diferencial y de distancia basados en este principio. Se describen también las características de los diferentes algoritmos utilizados para este fin. Finalmente, se propone el uso del Análisis de Componente Principal para identificar los frentes de onda originados por la falla como base de un nuevo algoritmo de protección de distancia de onda viajera.

TEORÍA BÁSICA

La solución de D'Alembert (Johns, 1980) 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:

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

donde x es la posición a lo largo de la línea, t es el tiempo, c es la velocidad de propagación y Z₀ es la impedancia característica de la línea. Si L y C representan la inductancia serie y la capacitancia paralelo por unidad de longitud respectivamente, entonces:

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC}}; Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

Las funciones F₁ y F₂ dependen de las condiciones de frontera del caso que se esté analizando. En general, F₁ representa una onda que se desplaza en la dirección positiva de x a una velocidad c (onda directa), mientras que F₂ es una onda que se desplaza en la dirección negativa de x a una velocidad c (onda inversa); la relación entre el voltaje y la corriente en F₁ es Z₀ y en F₂ es -Z₀. Esta caracterización corresponde a una corriente positiva, representada como una carga positiva, circulando en la dirección positiva de x. Si el voltaje y la corriente son medidos en una localización x, es posible identificar la onda directa F₁ e inversa F₂, formando las señales denominadas S₁ y S₂:

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

Si la medición del voltaje y la corriente se realizan en la ubicación del relevador (x = 0), entonces las señales S₁ y S₂ son:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2F_1(-ct) = v(0,t) + Z_0 i(0,t) \\ S_2 &= 2F_2(ct) = v(0,t) - Z_0 i(0,t) \end{aligned} \quad (4)$$

donde S₁ representa el cambio de señal en la ubicación del relevador debido a la onda directa y S₂ representa el cambio de señal en la ubicación del relevador debido a la onda inversa. En la Fig. 1 se muestra un sistema monofásico con una falla sólida a tierra (R_F = 0); la onda viajera resultante está dada por la aplicación, en el punto de falla, de un escalón de voltaje de 1 p.u. para t > 0. Utilizando un diagrama de Bewley (Chowdhuri,

1996), se puede analizar el comportamiento de las ondas viajeras en el sistema debidas a la falla. Se puede apreciar que la onda inversa producida por la falla alcanza la ubicación R del relevador, y es reflejada en la discontinuidad detrás del relevador (fuente A); ésta regresa nuevamente a través de la ubicación del relevador hasta alcanzar la discontinuidad producida por la falla (punto F), donde es nuevamente reflejada hacia la ubicación del relevador. El frente de onda reflejado por la falla es el mismo, pero con polaridad opuesta, mientras que el frente de onda reflejado por la fuente detrás del relevador está distorsionado, debido a la naturaleza inductiva de la impedancia de la fuente; este comportamiento se puede apreciar en las señales $v(t)$ y $R_0 i(t)$, donde R_0 es la resistencia característica réplica, que es igual a Z_0 para una línea sin pérdidas. Adicionalmente, las señales S1 y S2 muestran en forma clara la diferencia entre las ondas viajeras directas (positiva de x) e inversas (negativa de x) en la ubicación del relevador. En una situación real, las pérdidas en la línea de transmisión debido a la resistencia y la dependencia de la frecuencia de los parámetros de la línea ocasionan atenuación en los frentes de onda a medida que las ondas se desplazan a través del sistema.

La transición entre los estados de pre-falla y de falla puede ser analizada por el principio de superposición. Aplicando el teorema de Thevenin, los cambios en el voltaje y la corriente (Δv y Δi), en la ubicación del relevador corresponden a las señales producidas por la conexión, en el punto de falla, de una fuente de voltaje de igual magnitud y polaridad opuesta al voltaje presente en el

estado de pre-falla con todas las fuentes del sistema cortocircuitadas. Definiendo v^- e i^- como las señales de voltaje y corriente en el relevador en el estado de pre-falla y v^+ e i^+ como las señales de falla, entonces:

$$\begin{aligned} v^+ &= v^- + \Delta v & ; & \quad \Delta v = v^+ - v^- \\ i^+ &= i^- + \Delta i & ; & \quad \Delta i = i^+ - i^- \end{aligned} \tag{5}$$

donde v^- e i^- son señales de frecuencia fundamental, y Δv y Δi contienen las componentes transitorias (componentes exponenciales aperiódicas y de ondas viajeras), además de las diferencias entre las magnitudes de componente fundamental entre los estados de pre-falla y falla. En la Fig. 2 se muestran las señales incrementales que se obtienen por

el efecto de superposición; puede observarse que la relación entre las componentes de frecuencia fundamental de Δv y Δi es $-ZS$, donde ZS es la impedancia de la fuente detrás de la ubicación del relevador. El comportamiento inicial de Δv y Δi describe los cambios en los frentes de onda originados por la falla, por lo que su medición es importante para el desarrollo de algoritmos de protección de onda viajera.

El análisis anterior es válido para un sistema de potencia monofásico. En el caso de un sistema trifásico, las ondas se propagan a diferentes velocidades, en dependencia de los parámetros de la línea, incluyendo la resistividad del terreno, lo que hace que el análisis sea muy complejo. En estos casos es necesario expresar las cantidades de fase en términos de sus componentes modales, que expresan los modos de propagación de las ondas viajeras en forma independiente; de esta forma, es posible aplicar el mismo análisis para cada modo de propagación, en forma similar a como se aplica la descomposición en componentes simétricas en un sistema desbalanceado.

Existen distintas transformaciones modales para líneas de transmisión reportadas en la literatura, siendo las más comunes las de Wedepohl, Clarke y Karrenbauer (Johns, 1980). En todos los casos, las variables trifásicas son transformadas en tres modos independientes donde los voltajes y corrientes en cada modo son función exclusivamente de los parámetros de ese modo. Por tanto, cada modo puede ser analizado como un sistema monofásico.

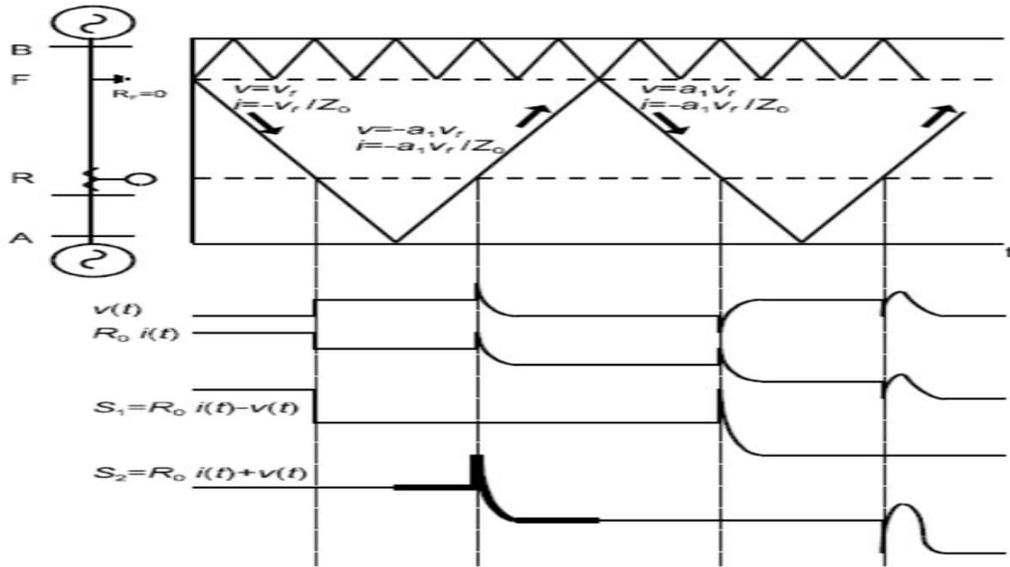


Fig. 1. Diagrama de Bewley de las ondas viajeras generadas por una falla en un sistema de potencia.

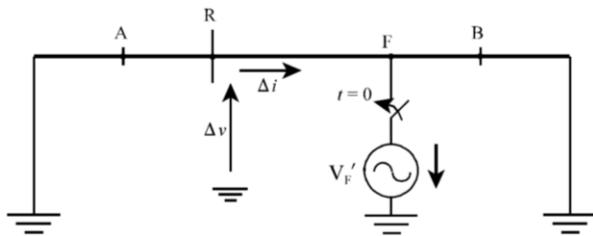


Fig. 2. Señales incrementales obtenidas por superposición.

ALGORITMOS DE PROTECCIÓN DE DISTANCIA

Estos algoritmos determinan la presencia de una falla dentro o fuera de la línea de transmisión a partir de la medición de la distancia eléctrica desde el relevador a la falla, utilizando la información de las ondas viajeras directas e inversas que pasan por la ubicación del relevador.

El algoritmo de Crossley-McLaren (Rockefeller, 1988) se basa en la comparación de una sección del frente de onda de una señal S2 con secciones subsecuentes del frente de onda de una señal S1. En la Fig. 1 se indican las señales S1 y S2 medidas en la ubicación del relevador durante una falla en la línea. El frente de onda generado por la falla se

desplaza hasta alcanzar la discontinuidad detrás del relevador, donde es reflejada nuevamente hacia el punto de falla. En este proceso, la señal S1 toma un valor cero cuando arriba el primer frente de onda proveniente de la falla, debido a la polaridad de $v(t)$ y $R0i(t)$, mientras que S2 sufre una variación originada por el frente de onda reflejado hacia la falla, cuya magnitud y forma dependen del frente de onda reflejado. Cuando esta onda alcanza el punto de falla, se genera una nueva onda en dirección al relevador con polaridad inversa. Esto ocasiona que la señal S1 sufra un cambio similar al de la señal S2, pero después de un tiempo 2τ , donde τ es el tiempo de propagación de las ondas entre el relevador y la falla. Considerando que la velocidad de propagación c es constante, la distancia a la falla l_f se calcula como $l_f = 2\tau c$. En la Fig. 1 se muestra la sección del frente de onda de la señal S2 que se utiliza para identificar el cambio en la señal S1 y calcular 2τ .

El análisis anterior es representativo del caso en que la falla es sólida, lo que desacopla las ondas viajeras a ambos lados del punto de falla. Sin embargo, si la falla es a través de un cierto valor de resistencia, como normalmente ocurre, las ondas reflejadas en el extremo remoto de la línea se propagan hasta el punto del relevador a través del punto de falla, pudiendo ocasionar una falsa identificación del cambio en la señal S1, y por tanto, un error en el cálculo de la distancia a la falla.

En este caso, el problema de la determinación de la distancia eléctrica a la falla consiste en identificar los cambios en las señales S1 y S2 entre la primera onda reflejada por la discontinuidad detrás del relevador y la segunda onda incidente proveniente del punto de falla. Se han estudiado diferentes alternativas de solución a este problema, a continuación se describe la aplicación del Análisis de Componente Principal.

ANÁLISIS DE COMPONENTE PRINCIPAL

El Análisis de Componente Principal (ACP) es una técnica estadística de análisis multivariable ampliamente usada para encontrar patrones en datos de alta dimensión. Fue inicialmente estudiada por H. Hotelling (Jackson, 1991), y se define como:

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:

$$S = \frac{\sum_{n=1}^n (\mathbf{t}_n - \bar{\mathbf{t}})(\mathbf{t}_n - \bar{\mathbf{t}})^T}{n-1} \quad (7)$$

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

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{W}^T (\mathbf{t}_n - \bar{\mathbf{t}}) \quad (8)$$

donde $\mathbf{W} = [w_1 w_2 \dots w_q]$ y \mathbf{x}_n corresponde a la representación reducida q -dimensional de los vectores $\{\mathbf{t}_n\}$.

La ventaja de análisis de componente principal es que permite una reducción en dimensiones del problema realzando similitudes y diferencias entre los datos bajo estudio y simplificando el proceso de clasificación.

V. ALGORITMO PROPUESTO

La idea es aplicar ACP con el propósito de identificar rasgos distintivos de los frentes de onda que permita identificar si son debidos a una falla interna o externa. El algoritmo propuesto utiliza el primer frente de onda de la señal incremental ΔS_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 ΔS_1 se manifiesta indicando un cortocircuito, de tal forma que:

$$\begin{aligned} \Delta S_1 = 0 & \quad \text{Estado estable} \\ \Delta S_1 > \varepsilon & \quad \text{Cortocircuito} \end{aligned} \quad (9)$$

Un valor aceptable de ε es un incremento en magnitud de 0.1 p.u. tomando como base el voltaje de operación de la línea de transmisión. La selección de la ventana de datos se hizo en forma empírica y se forma con 25 muestras de la señal ΔS_1 con un intervalo de 1×10^{-6} seg. entre muestras, lo que representa una frecuencia de muestreo de 1 MHz. La primera muestra de la ventana de datos corresponde al primer valor de ΔS_1 que supera el umbral ε como indica (9).

Las condiciones de fallas fueron simuladas en un sistema de prueba con dos fuentes de generación con una capacidad de cortocircuito de 35 y 10 GVA respectivamente, conectadas a través de dos líneas de transmisión de una longitud de 200 km cada una. La primera línea tiene una impedancias característica $Z_0 = 391.77$ ohms, y un tiempo de

propagación de $\tau = 0.341$ ms; la segunda línea tiene una impedancias característica $Z_0 = 313.15$ ohms, y un tiempo de propagación de $\tau = 0.338$ ms; la simulación se realizó en el programa PSCAD (Manitoba Hydro, 2000). Los frentes de onda generados por las fallas correspondientes al modo 1 (modo aéreo) fueron representados como vectores n-dimensionales de la forma $\mathbf{S1} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_p]$, cuyos valores corresponden al primer frente de onda que alcanza la ubicación del relevador. Con el propósito de que el algoritmo funcione en cualquier sistema de potencia, independientemente de su configuración y voltaje de operación, se normalizaron las señales $\mathbf{S1}$ (correspondientes a los frentes de onda medidos en la ubicación del relevador) para que estén entre 0 y 1. En las figuras 3 y 5 se muestran el contorno de la señal $\mathbf{S1}$ para las fallas A-G (con RF = 50 ohms) y ABC (sólidas, RF = 0 ohms) en las líneas L1 y en L2 (todas con un ángulo de inserción de 90o); las Tablas 1 y 2 describen las situaciones en que se simuló cada cortocircuito. Así mismo, las figuras 4 y 6 muestran sus correspondientes proyecciones en el subespacio de las dos primeras componentes principales. Se aprecia como el algoritmo discrimina correctamente entre fallas internas (semiplano izquierdo) y fallas externas (semi-plano derecho) independientemente de su ubicación; incluso, el algoritmo resuelve el problema de clasificación, por lo que no es necesario utilizar alguna otra técnica de clasificación de información.

Tabla 1. Fallas A-G con RF = 50 ohms.

Fallas en línea L1 (distancia en %)
10, 20, 30, 40, 50, 60 ,70, 80, 90, 95 y 99%
Fallas en línea L2 (distancia en %)
1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 ,70, 80, 90%

Tabla 2. Fallas ABC con RF=0 ohms.

Fallas en la línea L1 (distancia en %)
10, 20, 30, 40, 50, 60 ,70, 80, 90, 95 y 99%
Fallas en la línea L2 (distancia en %)
1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 ,70, 80, 90%

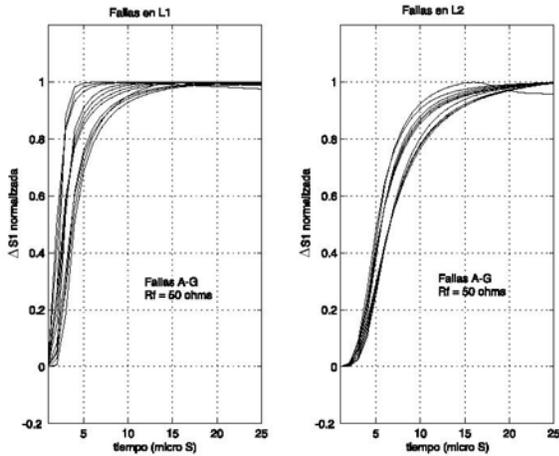


Fig. 3. Frentes de onda de fallas A-G y RF = 50 ohms.

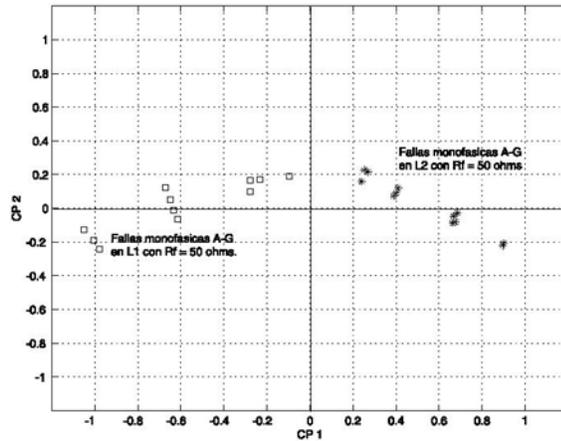


Fig. 4. Proyección de fallas A-G y RF = 50 ohms.

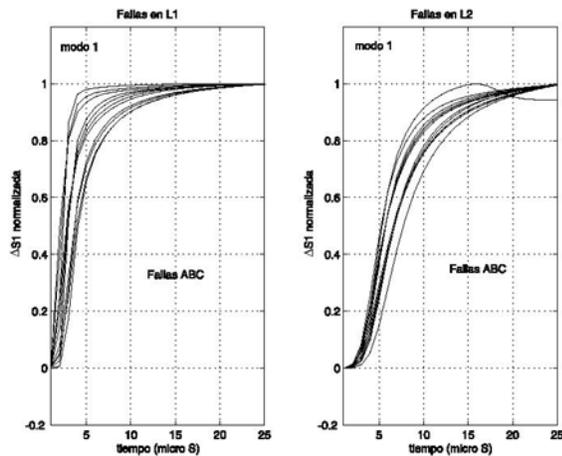


Fig. 5. Frentes de onda de fallas ABC sólidas.

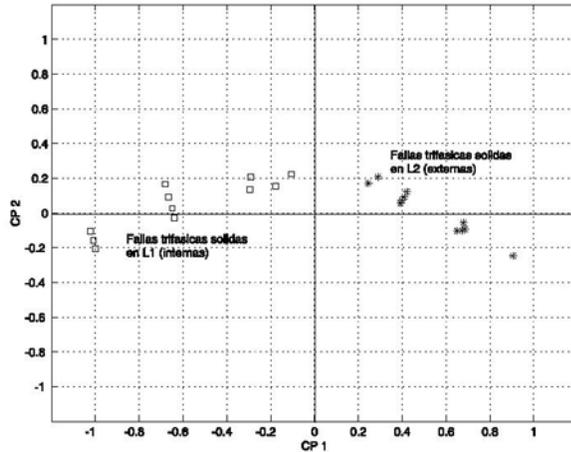


Fig. 6. Proyección de fallas ABC sólidas.

CONCLUSIONES

El algoritmo de protección propuesto usa la técnica de ACP con el propósito de obtener una representación en un subespacio de 2 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 requieren 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, que tiene como consecuencia una reducción de los tiempos de interrupción del servicio eléctrico a los consumidores.

REFERENCIAS

Bickford J.P., Mullineux N., Reed J.R. (1980). *Computation of Power System Transients*. New York, USA: Peter Peregrinus LTD.

Blackburn, J. L. (1998). *Protective Relaying*. New York, USA: Marcel Dekker, Inc.

Chowdhuri P. (1996). *Electromagnetic Transients in Power Systems*. Somerset, Great Britain: Research Studies Press LTD.

Horowitz, S.H. (1988). Adaptive transmission system relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(4), 1436-1445.

Jackson J.E. (1991). *A User's Guide to Principal Components*. Hoboken, USA: John Wiley and Sons, Inc.

Johns A.T. (1980). A new ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of EHV transmission lines. *IEE Proceedings part C*, 127(4), 228-239.

Lang J., Elangovan S., Devota J.B.X. (1998). Pattern recognition technique for travelling wave protection. *Electric Machines and Power Systems*, 26, 1007-1018.

Manitoba Hydro (2000). *PSCAD/EMTDC – Tool for Power System Simulation*. Winnipeg, Canada: The Manitoba HVDC Research Centre.

Phadke A.G., Thorp J.S. (1988). *Computer Relaying for Power Systems*. London, Great Britain: Research Studies Press LTD.

Rockefeller, G.D. (1988). Adaptive transmission relaying concepts for improved performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(4), 1446-1458.