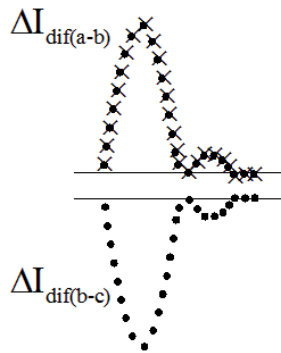


Aplicación de análisis de componente curvilínea en protección diferencial de transformadores

Félix E. Zamarrón Gaona, Ernesto Vázquez Martínez,
Oscar L. Chacón Mondragón, Vicente Cantú Gutiérrez

Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica. FIME UANL
enrique_zamarron@hotmail.com, evazquez@gama.fime.uanl.mx,
ochacon@uanl.mx, vcantutgz@yahoo.com



RESUMEN

En este artículo se presenta un nuevo algoritmo para la protección diferencial del transformador basado en Análisis de Componente Curvilínea (ACC), el cual realiza un reconocimiento de patrones de la corriente diferencial para identificar su comportamiento en diferentes condiciones de operación, incluyendo los efectos de la sobreexcitación, fenómeno que origina también incrementos abruptos de corriente. Se analizó el desempeño del algoritmo ante diversos casos de simulación de un sistema de potencia de prueba; considerando condiciones de energización, sobreexcitación y diferentes porcentaje de fallas internas en los devanados del transformador.

PALABRAS CLAVE

Análisis de componente curvilínea, protección diferencial, señal incremental.

ABSTRACT

In this article a new algorithm for the differential protection of a transformer based on a Curvilinear Component Analysis (CCA) is presented, which realizes a pattern recognition of the differential current to identify its behavior in different operation conditions, including the effects of the over excitation, phenomenon that also originates current steep increases. The performance of the algorithm was analyzed for different power system simulations, considering energizing conditions, overexcitement and different internal faults percentage in the windings of the transformer.

KEYWORDS

Curvilinear Component Analysis, differential protection, incremental signal.

INTRODUCCIÓN

En ocasiones, la protección diferencial en transformadores de potencia llega a operar incorrectamente debido a la presencia de corrientes *inrush* producidas

por condiciones de energización y sobreexcitación, las cuales pueden llegar a ser interpretadas de forma incorrecta como corrientes de falla interna, debido a que generalmente alcanzan valores muy elevados hasta 25 veces de la corriente nominal. Existen diversos esquemas que tratan de solucionar esta problemática, siendo el principio de la protección con retención por armónicas el más utilizado, en donde la segunda y quinta armónica presentes en las corrientes de inrush y de sobreexcitación, respectivamente, se utilizan para insensibilizar la protección diferencial.¹

Sin embargo, se han reportado casos en que la corriente de falla interna puede contener una cantidad considerable de segunda armónica.² Por otra parte, ha sido demostrado que en transformadores modernos el contenido de segunda armónica en las corrientes de magnetización tiende a ser relativamente más pequeño, esto debido a que sus núcleos están hechos de materiales magnéticos amorfos.

Por lo tanto, la detección de dichas armónicas no es un índice suficiente para determinar si la sobrecorriente medida es debida a una energización o a una falla interna.

Por lo anterior, ha surgido la necesidad de contar con nuevos esquemas para la protección diferencial de transformadores con el objetivo de proteger eficientemente al transformador: algoritmos que se basan en los modelos del transformador^{3,4} y en el análisis de transformaciones modales de las formas de onda de corriente y voltaje,⁵ métodos basados en la aplicación de lógica difusa.⁶ Sin embargo, en estos métodos se necesitan diseñar las leyes de lógica difusa, lo cual requiere un gran número de patrones producidos por simulaciones de diversos casos. Zhang⁷ propone un método que utiliza la transformada de correlación de tiempo mínimo (STCT) para magnificar la asimetría y el “ángulo muerto” de la corriente diferencial, en donde la problemática que se puede presentar en este esquema es la dificultad de discriminar una corriente inrush altamente simétrica.

Recientemente, se ha hecho uso de la técnica de las wavelets como un método de extracción de características de la corriente diferencial para la identificación de corrientes inrush, resultando ser una herramienta eficiente.^{8,9} Sin embargo, la información requerida para llevar a cabo la identificación del tipo de corriente depende del espectro de frecuencia, que

en cierta parte está relacionado con el contenido armónico y el grado de distorsión de la forma de onda, lo cual conlleva a posibles errores de discriminación en los casos donde la corriente inrush es altamente sinusoidal.

El algoritmo propuesto en este artículo utiliza el Análisis de Componente Curvilínea para extraer los patrones característicos de la corriente diferencial obtenida a partir de la presencia de algún evento en particular. Dicho algoritmo tiene la ventaja de ser independiente del contenido armónico y de la magnitud de la componente aperiódica de la corriente, por lo que es de esperar que el método proporcione alta seguridad para la protección de transformadores. Así mismo, tiene la característica de ser independiente del modelo del transformador y de sus parámetros, ya que, a pesar de que cuantitativamente la corriente diferencial depende de las características del transformador, sus características cualitativas (forma de onda característica) se mantienen, por lo que el algoritmo logra discriminar sin ningún problema el tipo de corriente que se presenta, sin embargo, el algoritmo requiere un previo entrenamiento fuera de tiempo real, con todos los casos posibles de operación en que el transformador de potencia puede trabajar.

MÉTODOS DE BLOQUEO DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Bloqueo y retención por armónicas

Estos métodos son utilizados para evitar operaciones incorrectas en la protección diferencial, utilizando el contenido armónico que presenta la señal de la corriente diferencial en el relevador, con el objetivo de incrementar el valor de la retención (retención por armónicas) o para inhibir la operación del relevador (bloqueo por armónicas). Se ha demostrado que la 2ª componente armónica predomina en todo el espectro armónico durante una condición de energización, y la 5ª componente armónica predomina durante una condición de sobreexcitación. En el caso del bloqueo, la lógica establece que si la magnitud de la 2ª (ó 5ª) componente armónica contenida en la corriente diferencial excede un porcentaje pre-definido de la componente fundamental, entonces se trata de una condición de energización (o sobreexcitación)

que está ocurriendo a través del transformador, bloqueando así la operación de la protección diferencial para evitar su desconexión innecesaria. El método de bloqueo por armónicos se llevará a cabo cuando se cumple cualquiera de las dos ecuaciones siguientes:

$$I_{op} < K_2 I_2 \quad (1)$$

$$I_{op} < K_5 I_5 \quad (2)$$

K_2 y K_5 representan los valores de los porcentajes predefinidos para ser utilizarlos como valores de referencia en el arranque o bloqueo del relevador. En el caso de la retención, la operación o bloqueo del relevador está dada por medio de la retención por armónicos donde se requiere que se cumpla la siguiente ecuación:

$$I_{op} > I_{ret} \cdot SLP + \sum_1^x K_{hx} I_{hx} \quad (3)$$

Donde x representa la cantidad de componentes armónicas a utilizar, SLP representa la pendiente de la característica de operación del relevador, I_{hx} representa la magnitud de la componente armónica x . El efecto que se obtiene, es incrementar en un determinado porcentaje la característica original del relevador, reduciendo así la región de operación e incrementando la de retención.

Métodos de reconocimiento de forma de onda

Otros métodos utilizados para evitar operaciones incorrectas del relevador debido a corrientes de energización y condiciones de sobreexcitación, son aquellos que basan su funcionamiento en el reconocimiento directo de la distorsión de la forma de onda de la corriente diferencial. La figura 1 muestra cualitativamente dos formas de onda correspondientes a energización y cortocircuito respectivamente.

El método consiste en detectar los intervalos de corriente diferencial cercanos a cero, comparándola con dos umbrales, uno positivo (+ Umbral) y otro negativo (- Umbral). Los pulsos de salida generados por ambos umbrales tienen una duración t_1 para el caso de energización, y t_2 para el caso de cortocircuito. Estos umbrales son comparados con un tiempo determinado como referencia, permitiendo

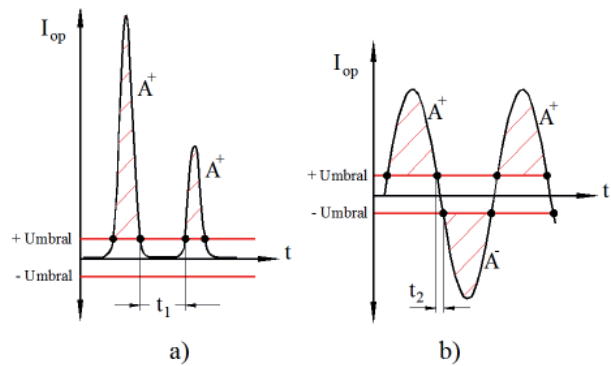


Fig. 1. Método de inhibición por reconocimiento de forma de onda de energización (a) y falla de cortocircuito (b).

discriminar entre energización y cortocircuito.

A pesar del buen desempeño que han tenido estos métodos de insensibilización, presentan una desventaja importante: en situaciones donde la forma de la corriente de energización se presenta con un alto grado de simetría (sinusoidal muy bien pronunciada) o cuando la corriente de falla es altamente asimétrica, estos métodos tienden a operar incorrectamente, ya que tienen problemas para diferenciar en forma correcta si se trata de una condición de energización o cortocircuito.

ANÁLISIS DE COMPONENTE CURVILÍNEA (ACC)

Descripción del ACC

En general, el análisis de componente curvilínea es una Red Neuronal Artificial (RNA) del tipo auto-organizada que tiene como finalidad reducir y representar grupos de datos multidimensionales, dentro de un espacio con menor dimensión. La RNA se conforma de dos capas: Una de entrada y otra de salida. Cada capa desarrolla básicamente una tarea: la primera capa desarrolla una cuantización de vectores (CV) en los datos de alta dimensionalidad en el espacio de entrada para encontrar los centroides de datos presentados, y la segunda capa, desarrolla una proyección (P) de los vectores obtenidos en la capa anterior sobre un espacio de salida de menor dimensión.^{10,11} La figura 2 representa la estructura del ACC.

En la figura 2, cada neurona individual N está conectada por medio de un par de enlaces llamados vectores de pesos. Los valores de entrada son

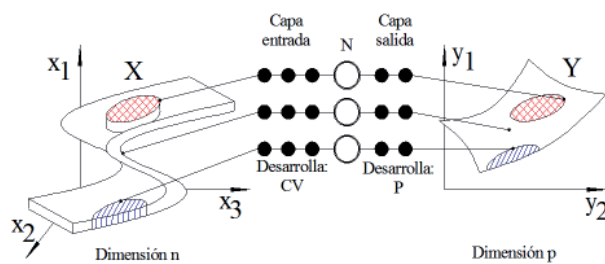


Fig. 2. Estructura y funcionamiento del ACC.

organizados en vectores columna F_i ; $i = 1 \dots N$, n -dimensionales, mientras que los correspondientes vectores de salida $\{y_i\}$ son p -dimensionales, además el tamaño de la dimensión del espacio de salida es menor que la dimensión del espacio de entrada ($p < n$).

Algoritmo del ACC

El algoritmo de ACC fue propuesto como una mejora de los mapas auto-organizados de Kohonen o SOM's (*Self Organizing Maps*). El desempeño del algoritmo se basa en la minimización de una función cuadrática de costo (función objetivo), desempeñando la diferencia entre las distancias de pares de puntos x_i, x_j (dentro del espacio de entrada) y pares de puntos y_i, y_j (dentro del espacio de salida).

$$E_{ACC} = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} (X_{ij} - Y_{ij})^2 f(Y_{ij}, \lambda_Y) \quad (4)$$

Normalmente se utiliza la distancia euclidiana como herramienta para medir las distancias $d(x_i, x_j)$, representado por el término X_{ij} y las distancias $d(y_i, y_j)$, representado por el término Y_{ij} . El objetivo es lograr forzar a las proyecciones Y_{ij} que concuerden con las entradas X_{ij} , para cada par (i, j) posible, logrando así minimizar la función de error E_{ACC} . El factor de ponderación del error $f(\cdot)$, debe estar acotado y deber ser una función monótonicamente decreciente con el tiempo (por ejemplo una función exponencial decreciente, una función sigmoide, etc.), con la finalidad de preservar la topología de la red, de igual forma que las redes auto-organizadas de Kohonen (SOM's). El valor del parámetro de vecindad $\lambda_y(t)$, es un factor decreciente con el tiempo y que afecta la escala en la cual se van proyectando los vectores de la capa de entrada. Una vez que se haya entrenado la RNA para reconocer los patrones que son presentados en la primera capa,

la red obtiene la habilidad de ubicar continuamente cualquier punto nuevo presentado en el patrón de entrada en un espacio de salida y viceversa.¹² En la figura 3 se muestra la reducción de la dimensión de los datos presentados en la capa de entrada (por cada vector de entrada F_i de dimensión 192×1 , se obtiene un solo punto en el espacio de proyección y clasificado en una determinada categoría [+1 ó -1], por lo tanto, se tendrán N puntos proyectados correspondientes a N vectores columna dentro del espacio de entrada).

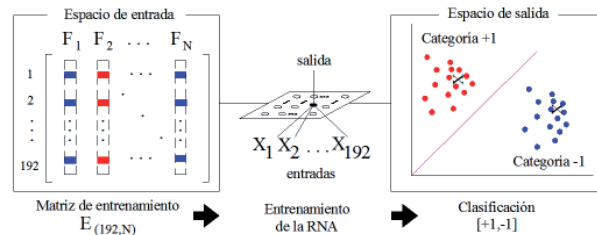


Fig. 3. Desarrollo del ACC como clasificador.

APLICACIÓN DEL ACC COMO BASE DE UNA PROTECCIÓN DIFERENCIAL

La figura 4 presenta la estructura utilizada para el entrenamiento de la RNA, donde: PDS = procesamiento digital de la señal, CE = capa de entrada, CS = capa de salida y SD = señal de decisión binaria, mostrándose, para este caso, una clasificación de -1, indicando la categoría a la que pertenece la señal de entrada a la RNA.

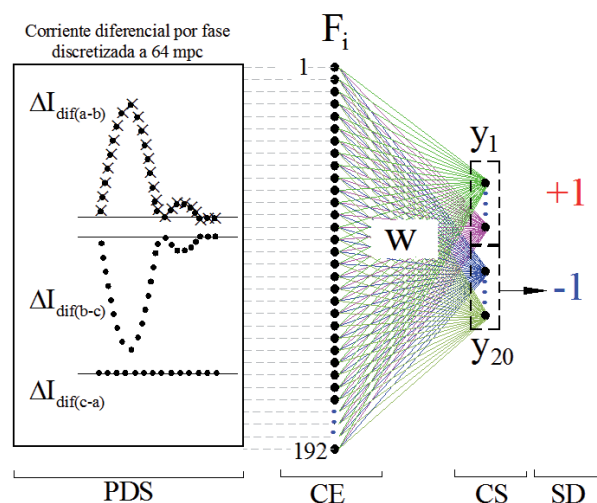


Fig. 4. Estructura de la RNA utilizada para el entrenamiento.

Los datos de entrada en CE constan de un vector columna F_i ; $i = 1 \dots N$ de dimensión 1×192 , conformado por tres subvectores $\Delta I_{diff(a-b)}$, $\Delta I_{diff(b-c)}$ e $\Delta I_{diff(c-a)}$ de dimensión 1×64 cada uno y que representan un ciclo de la corriente diferencial incremental por fase. Cada vector F_i representa un escenario distinto en el que opera el sistema de potencia y con el que se va a entrenar la RNA.

Los 192 elementos almacenados en cada vector individual F_i , son organizados en una matriz de entrenamiento E de dimensión $192 \times N$, donde N representa el número total de casos de prueba (en total 340 casos), cumpliendo la condición $0 \leq E_{ij} \leq 1$ para cada elemento ij que conforma la matriz de entrenamiento.

$$E = \begin{bmatrix} 1, F_1 & 1, F_2 & \dots & 1, F_{340} \\ 2, F_1 & 2, F_2 & \dots & 2, F_{340} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 192, F_1 & 192, F_2 & \dots & 192, F_{340} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Cada columna de la matriz E , es presentada a la red en forma aleatoria durante el entrenamiento, lo que indica que no afecta la forma en que los datos son organizados. Todos los valores de las conexiones que existen entre los 192 elementos de entrada y las 20 neuronas de salida, serán organizados en una matriz de pesos W , de dimensión 192×20 , cumpliendo la condición $0 \leq W_{ij} \leq 1$ para cada elemento ij que conforma la matriz de pesos. Al inicio del entrenamiento, la matriz W es nula.

La regla de adaptación de los valores de los pesos en la matriz W se determinará de acuerdo a la Regla de Adaptación de Kohonen Modificado.¹³ La selección de 20 neuronas en la capa de salida fue una decisión heurística basada en el proceso de entrenamiento de la red.

$$W = \begin{bmatrix} 1, N_1 & 1, N_2 & \dots & 1, N_{20} \\ 2, N_1 & 2, N_2 & \dots & 2, N_{20} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 192, N_1 & 192, N_2 & \dots & 192, N_{20} \end{bmatrix} \quad (6)$$

CONFORMACIÓN DE LA SEÑAL DE ENTRADA

Señales de la corriente diferencial

Las señales utilizadas como entrada de datos para el algoritmo, se conforman desde las tres señales de corriente diferencial para cada una de las fases $I_{diff(a-b)}$, $I_{diff(b-c)}$ e $I_{diff(c-a)}$, almacenándolas en una matriz I_{diff} :

$$I_{diff} = \begin{bmatrix} I_{diff(a-b)} \\ I_{diff(b-c)} \\ I_{diff(c-a)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{AB} - I_{ab} \\ I_{BC} - I_{bc} \\ I_{CA} - I_{ca} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Formación de las señales incrementales

A partir de (8), se obtiene la señal incremental de la corriente diferencial por fase $\Delta I_{diff(a-b)}$, $\Delta I_{diff(b-c)}$ e $\Delta I_{diff(c-a)}$. Estas corrientes son almacenadas en una matriz ΔI_{diff} . La señal incremental de la corriente diferencial del relevador se obtiene mediante la utilización de un Filtro Delta,¹⁴ cuya representación se muestra en la figura 5.

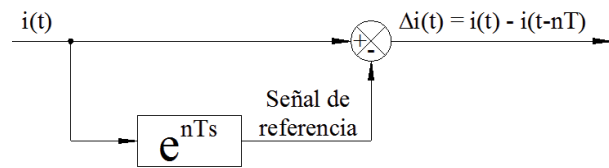


Fig. 5. Representación esquemática del filtro - delta utilizado para la obtención de las señales incrementales.

Este filtro subtrae de una forma de onda cualquiera, la misma forma de onda con un retardo de tiempo de un ciclo y posteriormente la resta de la señal original. Su interpretación es de la siguiente forma: para el esquema de protección diferencial, la ausencia de cualquier transitorio en el sistema de potencia (por ejemplo la energización del transformador o un cortocircuito), la salida del filtro es nula; en caso contrario, la señal de salida del filtro viene a representar el transitorio que está ocurriendo. La figura 6 muestra la respuesta del filtro-delta evaluada para un evento de apertura en el instante "A" del interruptor principal, en el lado primario del transformador de potencia.

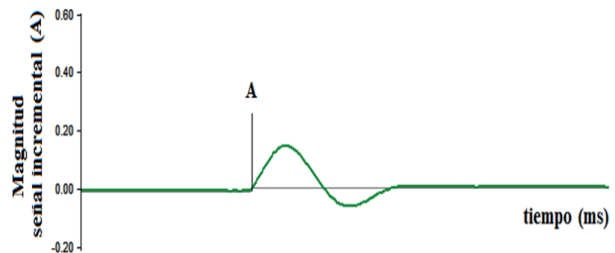


Fig. 6. Respuesta del filtro - delta para un evento de apertura en el interruptor principal del transformador.

La finalidad de este tipo de señales es mejorar la sensibilidad del algoritmo, con el objetivo de reducir los efectos de los cambios de carga que puede sufrir el sistema bajo condiciones normales de operación. Con esto, la corriente diferencial trifásica queda expresada en forma de señal incremental de acuerdo a:

$$\Delta I_{dif} = \begin{bmatrix} \Delta I_{dif(a-b)} \\ \Delta I_{dif(b-c)} \\ \Delta I_{dif(c-a)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_{AB}(t) - I_{AB}(t-nT)] - [I_{ab}(t) - I_{ab}(t-nT)] \\ [I_{BC}(t) - I_{BC}(t-nT)] - [I_{bc}(t) - I_{bc}(t-nT)] \\ [I_{CA}(t) - I_{CA}(t-nT)] - [I_{ca}(t) - I_{ca}(t-nT)] \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde T corresponde a un periodo de la señal a la frecuencia fundamental (60 Hz) y $n = 1$ (número de ciclos). Por lo tanto, la señal incremental se manifiesta indicando la aparición de una corriente transitoria de valor considerable.

Criterio de arranque del algoritmo

Se define un valor de umbral, el cual sirve como criterio de arranque del algoritmo: $\Delta I_{dif} > \epsilon$ donde el valor de ϵ es de 5 amperes y corresponde al valor de corriente nominal por secundario de los transformadores de corriente. Cuando la corriente diferencial incremental sobrepasa el valor de umbral ϵ , el algoritmo comienza a recopilar la información de un ciclo necesaria para formar las señales de entrada del algoritmo.

Escalamiento de las señales incrementales

Con la finalidad de reconocer la forma de onda que presenta la señal incremental en las tres fases del transformador, se normalizan las corrientes para cada fase en particular, dividiendo todos los valores entre el valor máximo presente por fase.

$$\Delta I_{dif} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta I_{dif(a-b)}}{\max[\Delta I_{dif(a-b)}]} \\ \frac{\Delta I_{dif(b-c)}}{\max[\Delta I_{dif(b-c)}]} \\ \frac{\Delta I_{dif(c-a)}}{\max[\Delta I_{dif(c-a)}]} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Formación de las señales de entrada

De acuerdo a lo anterior, la información de entrada al algoritmo corresponde a un ciclo de la señal incremental por cada fase simultáneamente, discretizadas a razón de 64 muestras por ciclo, lo que equivale a un tiempo entre muestras de 0.26 ms,

lo que representa una frecuencia de muestreo de 3.8 kHz. Se obtiene finalmente un vector columna ΔI_{dif_dis} de dimensión 192×1 , el cual representa los valores de la señal incremental trifásica por encima del valor de umbral ϵ , escalada.

$$\Delta I_{dif_dis} = \begin{bmatrix} \Delta I_{dif(a-b)} \\ \vdots \\ \Delta I_{dif(a-b)/64} \\ \hline \Delta I_{dif(b-c)} \\ \vdots \\ \Delta I_{dif(b-c)/64} \\ \hline \Delta I_{dif(c-a)} \\ \vdots \\ \Delta I_{dif(c-a)/64} \end{bmatrix} \quad (10)$$

La figura 7 muestra la señal incremental trifásica para el caso de una falla trifásica interna, al 50 por ciento de los devanados en las tres fases, con una resistencia de falla de 1.0Ω , con duración de un ciclo.

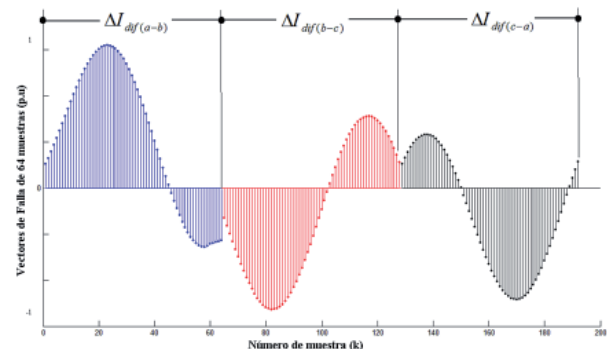


Fig. 7. Señal incremental trifásica para el caso de una falla de cortocircuito trifásico interno al 50% de los devanados en las tres fases.

Diagrama de flujo del algoritmo propuesto

En general, la lógica de control del algoritmo de protección diferencial del transformador utilizando ACC, se presenta en la figura 8:

SISTEMA DE PRUEBA

Descripción del sistema de prueba

El sistema de prueba se muestra en la figura 9. Consiste en un transformador trifásico, con conexión Δ -Y aterrizada, 100 MVA, 230/115 kV a 60 Hz. El lado primario es conectado a una fuente de tensión trifásica que suministra un voltaje de línea de 230 kV. La impedancia interna de la fuente es de 10 Ohms.

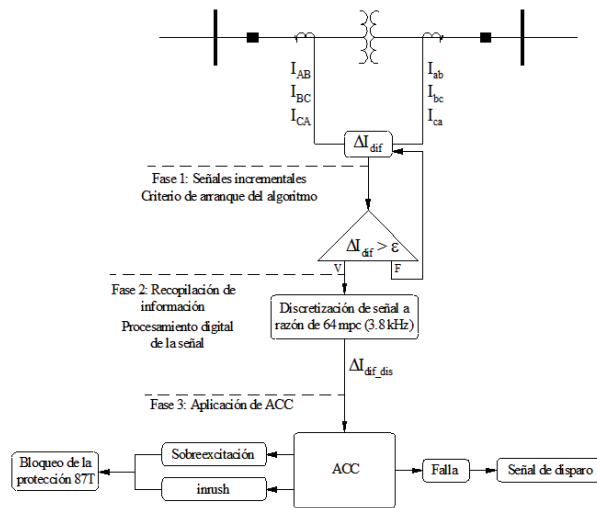


Fig. 8. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

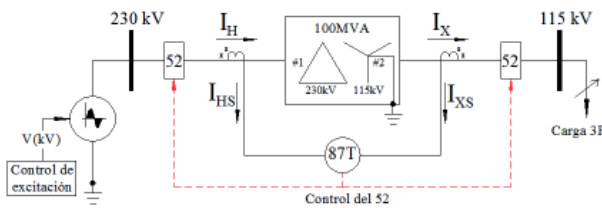


Fig. 9. Diagrama del sistema de prueba.

El sistema incluye un módulo de carga variable, un módulo de control de fallas en el secundario del transformador y un módulo de fallas para controlar los cortocircuitos en los devanados en el interior del transformador. La fuente cuenta también con una impedancia R-L, la cual es modificada para controlar la constante de tiempo de la componente aperiódica de corriente directa. El módulo de control de excitación dispone de la posibilidad de trabajar el transformador bajo condiciones de sub y sobreexcitación. El sistema es simulado en el programa Electro – Magnetic transients in DC (PSCAD / EMTCD, versión 4.2.1).¹⁵

Una condición de sobreexcitación se presenta al desconectar repentinamente grandes bloques de carga eléctrica. El sistema de prueba también tiene un control de frecuencia que simula las condiciones de baja frecuencia que ocurren, por ejemplo, cuando la carga eléctrica conectada al sistema excede la capacidad de generación.

Transformadores de corriente

Los transformadores de corriente utilizados en ambos lados del transformador difieren en su

comportamiento eléctrico, es decir, cuentan con diferentes características de saturación magnética.¹⁶ Esto trae como consecuencia, una corriente de operación de desbalance o error, proporcional a los diversos errores de transformación y de ajuste. En una condición transitoria, los transformadores de corriente se comportan de forma diferente. Para evitar la saturación magnética de ambos núcleos,¹⁷ se considera la siguiente relación:

$$\left| \frac{X}{R} + 1 \right| I_f Z_b \geq 20 \quad (11)$$

Donde X y R son la reactancia y la resistencia del sistema en la ubicación del transformador, I_f es la corriente de falla externa máxima sobre la base de la corriente nominal de los transformadores de corriente y Z_b es el burden total en base al burden nominal del transformador de corriente. Si los transformadores de corriente son seleccionados de acuerdo a (11), entonces ninguno llegará a la zona de saturación para la falla máxima fuera de la zona diferencial, reduciendo la corriente diferencial de error. Las tablas I y II muestran los datos de los transformadores de corriente utilizados.

Tabla I. Transformadores de corriente: lado primario Modelo Joseph Lucas, lado secundario Modelo Jiles-Atherton.

Transformadores de corriente			
Modelo:	J-Atherton	J-Lucas	Unidad
Vueltas primarias	1	1	
Vueltas secundarias	60	200	
Resistencia secundaria	0.5	0.61	(Ohm)
Inductancia secundaria	0.8	0.8	(mH)
Área	7.601x10-3	6.501x10-3	(m2)
Longitud tray. magnética	0.6377	0.5	(m)
Flujo remanente	0	0	(T)
Resistencia de burden	0.5	0.7	(Ohm)
Inductancia de burden	0.8	0.9	(mH)

Tabla II. Relaciones de transformación.

Relación de los TCs			Conexión de los TCs	
Np	/	Ns	η	
300	:	5	60	en alta tensión [Y]
1000	:	5	200	en baja tensión [D]

Casos de entrenamiento del algoritmo

Con la finalidad de obtener una amplia gama de señales incrementales de la corriente de operación para utilizarlos en el entrenamiento de la red, se probaron siete escenarios diferentes, cada uno de ellos simulado en 17 instantes de tiempo diferente, dentro de un ciclo completo en la onda senoidal de voltaje, para poder considerar el efecto que puede provocar el instante en que ocurre el disturbio. Los escenarios son: (1) energización del transformador en condición de vacío, (2) energización del transformador en condición de carga, (3) cortocircuitos fuera de la zona diferencial, con energización del transformador en vacío, (4) cortocircuitos fuera de la zona diferencial, con energización del transformador bajo carga, (5) cortocircuitos dentro de la zona diferencial, con energización del transformador en vacío, (6) cortocircuitos dentro de la zona diferencial, con energización del transformador bajo carga, (7) diferentes escenarios mezclados.

La figura 10 muestra un diagrama de flujo donde se expone la estructura para la formación de la matriz de entrenamiento.

La matriz de entrenamiento completa consta de 192 renglones (información de entrada a la red) y 340 columnas o casos simulados, de

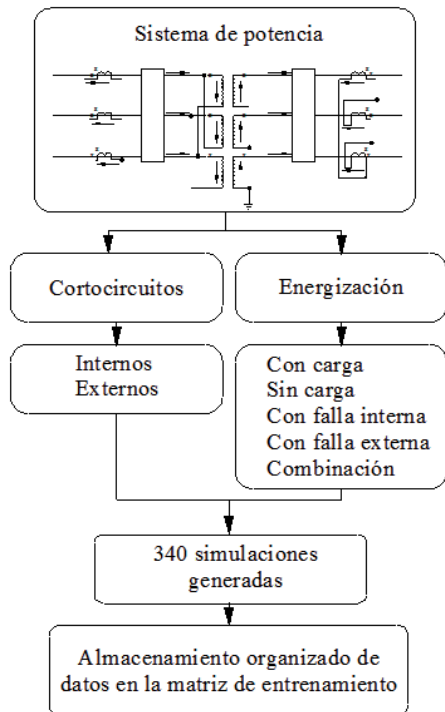


Fig. 10. Formación de la matriz de entrenamiento.

los cuales 170 corresponden a los casos donde la protección diferencial no debe bloquearse (falla dentro de la zona de protección) y los 170 restantes corresponden a casos donde la protección diferencial debe bloquearse (falla fuera de la zona de protección). En la tabla III se detalla la matriz de entrenamiento.

Tabla III. Vectores que forman la matriz de entrenamiento.

Vectores de bloqueo	Vectores de operación
1-17	18-34
35-51	52-68
69-85	86-102
103-119	120-136
137-153	154-170
171-187	189-204
205-221	222-238
239-255	256-272
273-289	290-306
307-323	324-340

RESULTADOS

El tiempo total de entrenamiento de la red fue de 15 segundos, con un total de 100 iteraciones (computadora procesador 1.6 GHz - Pentium IV, 512 Mb memoria RAM en plataforma Windows XP). En la figura 11 se muestra la salida de la red una vez que se ha entrenado, apreciándose la correcta discriminación entre fallas fuera de la zona de protección (+1) y fallas dentro de la zona de protección (-1)

Para probar el desempeño de la red, se utilizaron nuevos vectores de prueba con los que no se haya entrenado antes la red. Para ello, se simularon 4

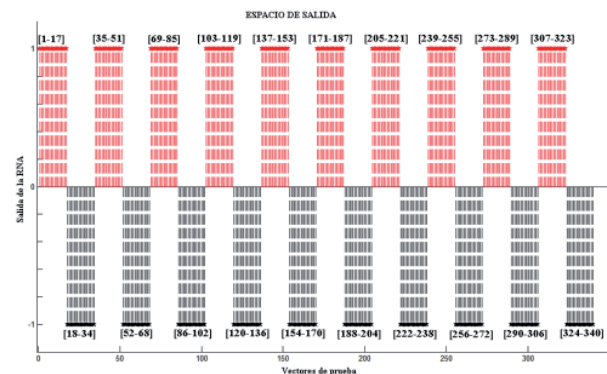


Fig. 11. Salida del entrenamiento de la RNA.

nuevos escenarios para probar la efectividad del algoritmo, cada uno de ellos también se simularon en 17 instantes diferentes de tiempo, obteniéndose así un total de 68 casos simulados, almacenándolos dentro de una matriz de prueba P con dimensiones de 192x68.

Casos de prueba del algoritmo

Se prueba el algoritmo bajo las siguientes condiciones: energización de un transformador de potencia con otro que ya está puesto en servicio (figura 12), sobreexcitación del transformador original, hasta alcanzar un porcentaje del 135%, (figura 13), aplicación de una falla monofásica a tierra, solo que para este caso, se aterriza un 10 y un 90 por ciento del devanado de la fase a respectivamente (figura 14). En la tabla IV se detalla la matriz de prueba.

Tabla IV. Vectores que forman la matriz de prueba.

Vectores de operación	Vectores de bloqueo
1-34	35-68

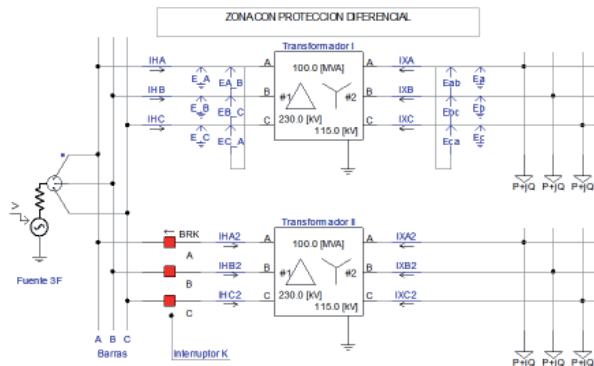


Fig. 12. Conexión de un transformador en paralelo con otro que ya está en servicio por medio del interruptor K.

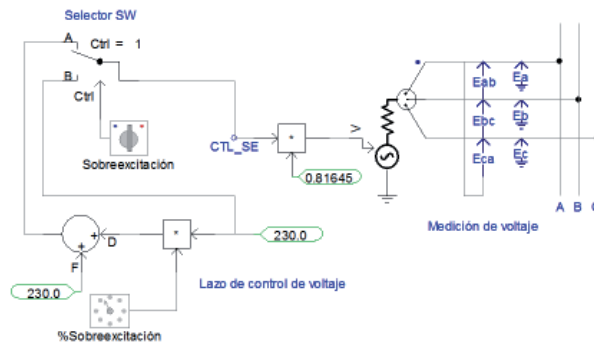


Fig. 13. Lazo de control del voltaje primario.

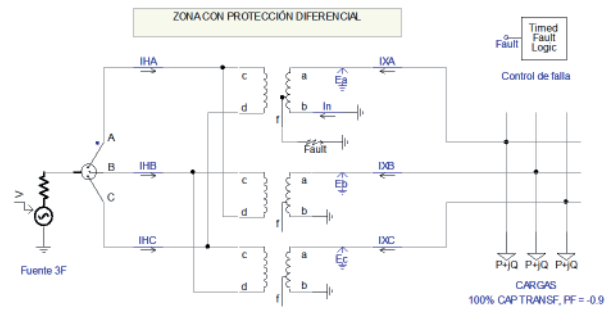


Fig. 14. Esquema de control de fallas internas.

Resultados de la prueba

La figura 15 muestra los resultados obtenidos al someter el algoritmo propuesto ante una matriz de prueba completamente nueva, la cual nunca ha sido presentada anteriormente a la red. La RNA logra discriminar correctamente entre corrientes de energización del transformador y corrientes de cortocircuito dentro de la zona de protección.

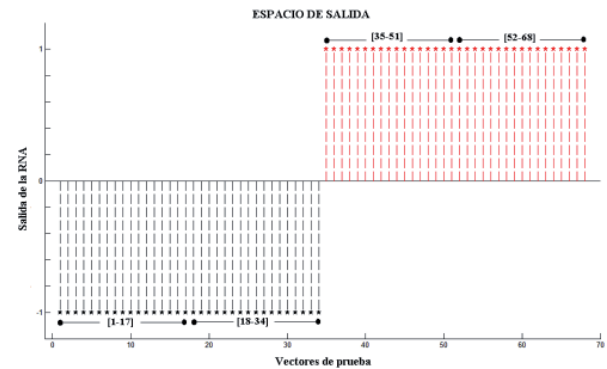


Fig. 15. Respuesta de red ante la matriz de prueba.

CONCLUSIONES

- Se propuso un nuevo algoritmo basado en Análisis de Componente Curvilínea capaz de discriminar entre corrientes de magnetización y corrientes de falla de cortocircuito, el cual opera independientemente de los parámetros del transformador y del sistema de potencia.
- Se aplica el proceso de reconocimiento de patrones a la corriente diferencial trifásica para tomar una decisión binaria [operación / bloqueo].
- El algoritmo es sensible para detectar fallas internas en los devanados, a cualquier porcentaje de sus espiras falladas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido por la Universidad Autónoma de Nuevo León y al CONACYT.

REFERENCIAS

1. C. H. Einval and J. R. Linders. A three-phase differential relay for transformer protection. IEEE Transactions PAS, vol. PAS-94, no. 6, pp. 913-918, Nov/Dec 1975.
2. P. Liu, O. P. Malik, D. Chen, G. S. Hope, Y. Guo. Improved operation of differential protection of power transformers for internal faults. IEEE Transactions Delivery, vol. 7, no. 4, pp. 1912-1919, 1992.
3. K. Inagaki, M. Higaki, Y. Matsui, K. Kurita, M. Suzuki, K. Yoshida and T. Maeda. Digital protection method for power transformers based on an equivalent circuit composed of inverse inductance. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp. 1501-1510, Oct. 1998.
4. T. S. Sidhu, M. S. Sachdev, H. C. Wood. Detecting transformer winding faults using non-linear models of transformers. 4th International Conference Developments in Power System Protection, IEEE Publication No. 302, pp. 70-74, Apr. 1989.
5. T. S. Sidhu, M. S. Sachdev. On-line identification of magnetizing inrush and internal faults in three-phase transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 4, pp. 1885-1891, 1992.
6. A. Wiszniewski and B. Kastenny. A multi-criteria differential transformer relay based on fuzzy logic. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 4, pp. 1786-1792, Oct. 1994.
7. H. Zhang, J. F. Wern, P. Liu and O. P. Malik. Discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers using short-time correlation transform. Electrical Power and Energy Systems, no. 24, pp. 557-562, 2002.
8. O. A. S. Youssef. A wavelet-based technique for discrimination between faults and magnetizing inrush currents in transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 170-176, Jan. 2003.
9. P. L. Mao and R. K. Aggarwal. A wavelet transform based decision making logic method for discrimination between internal faults and inrush currents in power transformers. Electrical Power and Energy Systems, no. 22, pp. 389-395, 2000.
10. P. Demartines, J. Hérault. Curvilinear Component Analysis: A Self-Organizing Neural Network for Nonlinear Mapping of Data Sets. IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 8(1), p.148-154.
11. J. Hérault, A. Guérin-Dugué, P. Villemain (2002). Searching for the Embedded Manifolds in High-Dimensional Data. Problems and Unsolved Questions Proceedings of European Symposium on Artificial Neural Networks (ESANN02), Bruges. ISBN 2-930307-02-1, p.173-184.
12. J. Vesanto, E. Alhoniemi. Clustering of Self – Organizing Map. IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 11, No 3, May 2002.
13. T. Kohonen, “The Self-Organizing Map”, Proceedings of the IEEE, vol. 78, No. 9, Sep. 1990.
14. G. Benmoyal and J. Roberts. Superimposed quantities: Their true nature and application in relays. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pulman, WA USA, SEL USA, 1999.
15. Manitoba HVDC Research Center, PSCAD / EMTCD, V.4.2.1.
16. J. Rohan, “Representation of magnetization curves over a wide region using a non – integer power series”, Vol. 25, pp. 335 – 340, Manchester University, 1988.
17. S. Zocholl, D. Samaha, “Current Transformers Concepts”, Proceedings of the 46th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference, Atlanta, GA, 29 Abril a May 01, 1992.