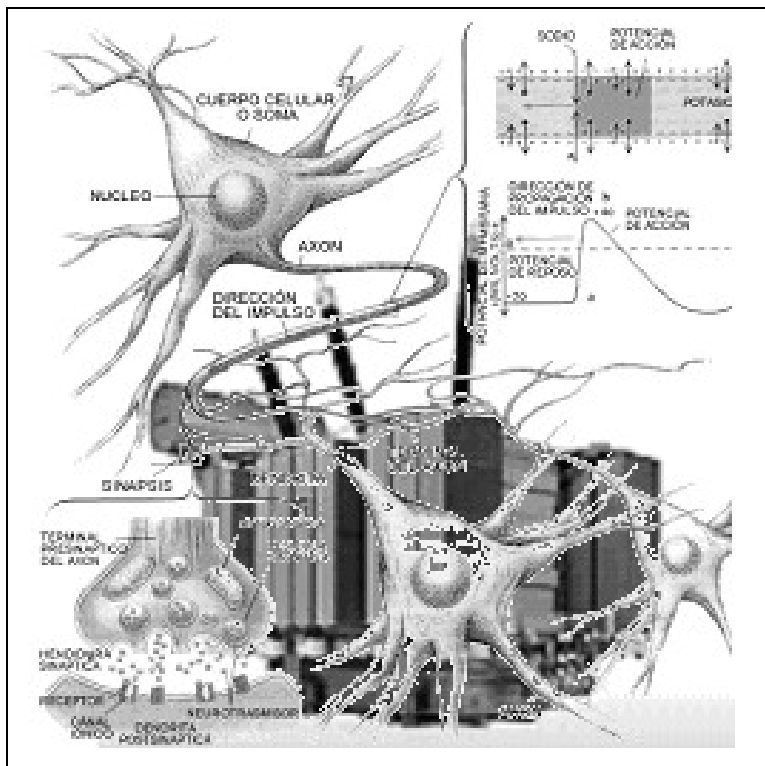


Relé para la Protección de un Transformador de Potencia basado en Redes Neuronales Artificiales



RESUMEN

En este trabajo es presentado un método de inteligencia artificial, utilizando Redes Neuronales para proteger Transformadores de Potencia. En el proceso de entrenamiento se consideró, entre otros regímenes, si el neutro del transformador está aterrado o aislado de tierra y la apertura de un conductor en el secundario de los transformadores de corriente. Se utilizó una red de propagación hacia delante, con 2 capas ocultas, y un entrenamiento supervisado con retropropagación del error.

PALABRAS CLAVES

Redes Neuronales Artificiales, Protección de Transformadores de Potencia, Simulación.

ABSTRACT

Application of intelligent method to protect Power Transformers via neural network is presented. Training process consider transformer neural grounded or isolated and one open conductor in the secondary of the current transformer, between others regimens. It was used a feed forward network back propagation, with two hidden layers.

KEYWORDS

Artificial Neural Network, Power Transformer Protection, simulation.

□Orlys E. Torres Breffe, M.Sc.
Profesor Auxiliar
ISMM, MOA.

□Miriam Vilaragut Llanes, Dra.
Profesora Auxiliar
CIPEL, CUJAE.

□Yarima Díaz Ramírez, Ing.
CTE Lidio Ramón Pérez
HOLGUIN

□Antonio Martínez García, Dr.
Profesor Titular
CIPEL, CUJAE.

1. INTRODUCCIÓN

Las protecciones diferenciales porcentuales con restricción por armónicas se consideran las más eficaces para la protección de fallas internas en los transformadores de potencia [1]. En los últimos tiempos se ha estado ensayando el empleo de técnicas de inteligencia artificial [2-8] en las protecciones eléctricas y aunque estas protecciones eléctricas no han sido ampliamente introducidas de forma comercial, sino en pocos casos [9], su estudio e investigación es cada vez de mayor interés en los técnicos relacionados con esa rama. El presente trabajo está enmarcado en esa dirección.

2. PROTECCIONES DIFERENCIALES CONVENCIONALES

La protección diferencial de corriente basa su operación en la primera ley de Kirchhoff, donde la diferencia de las corrientes en un nodo debe ser igual a cero. Para esto se hace imprescindible medir las corrientes entrantes y salientes a un nodo o elemento dado del sistema.

En la figura 1 se muestra una aplicación de este método en un transformador de potencia. Se observa un esquema simplificado de una sola fase, con dos TC instalados en los terminales de un transformador de potencia. En el secundario de los dos TC se encuentra un relé de porcentaje diferencial (87) por el cual circularía la corriente diferencial y las corrientes de retención.

En régimen normal al igual que para cortocircuitos externos (K_2), no hay diferencias de corrientes dado que, idealmente, las corrientes en ambos devanados tienen el mismo sentido y la misma magnitud, por tanto, no circula corriente alguna por la bobina de retención del relé.

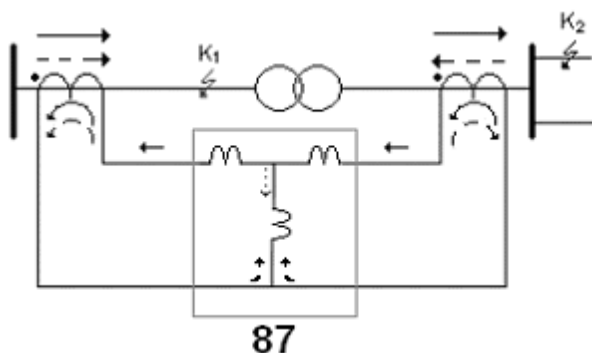


Figura 1. Principio de acción de las protecciones diferenciales

Para el caso de un cortocircuito interno en el transformador de potencia o en los terminales (K1), las corrientes pueden alcanzar magnitudes diferentes y de sentidos contrarios, dirigiéndose al punto de fallo. Por tanto, aparecerá una alta corriente diferencial que circulará por el relé y lo hará operar.

Este método es aplicado como protección principal en los sistemas eléctricos de potencia porque, como se explicó, es insensible (trabajo ideal) a fallas externas, y muy sensible a los fallos internos en el elemento protegido.

El trabajo ideal de la protección diferencial de corriente para transformadores de potencia se ve afectado por otros factores, que no se presentan cuando ella se utiliza en otros elementos del sistema tales como generadores y motores.

Los factores que afectan la protección diferencial de corriente en los transformadores de potencia son:

- Corriente de magnetización.
- Imposibilidad de igualar las corrientes secundarias de los TC, más aún si se incluyen el cambia taps de los transformadores de potencia.
- Saturación de los TC en presencia de cortocircuitos externos.
- Apertura de conductores en el circuito secundario de los TC.

En la actualidad muchos de estos factores son tomados en cuenta en las protecciones digitales modernas usando métodos de bloqueo para evitar la operación incorrecta de los mismos [10-11], pero la apertura de un conductor en el circuito secundario de un TC y las posibles operaciones incorrectas que esto puede provocar no ha sido resuelta.

La apertura de un conductor del secundario de los TC conectados a la protección diferencial es un fenómeno poco probable, pero también lo es un cortocircuito interno en el transformador de potencia. Si se pudieran evitar las operaciones incorrectas de esta protección, sin afectar mucho su sensibilidad, el resultado sería muy positivo.

3. LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES. NECESIDAD DE SU MODELACIÓN

El proceso de diseño de una Red Neuronal Artificial (RNA) consiste en los siguientes pasos [4]:

1. Preparación de los datos adecuados para el entrenamiento.
2. Selección adecuada de la estructura de la red.
3. Entrenamiento de la red.
4. Evaluación de la red con patrones no utilizados en el entrenamiento.

Los datos para el entrenamiento pueden ser tomados de la realidad a partir de señales almacenadas en oscilógrafos o dispositivos digitales modernos que guardan las señales de eventos reales producidos en el Sistema Eléctrico de Potencia.

Como el entrenamiento hay que hacerlo con numerosos regímenes, casi siempre son empleados simuladores digitales de Sistemas Eléctricos de Potencia para obtener las señales necesarias en la simulación.

Existen herramientas matemáticas que realizan el entrenamiento de una RNA y son flexibles como para cambiar el método de entrenamiento [14]. MATLAB® es una de ellas y que permite, incluso, simular el posterior funcionamiento de la red con las señales que se deseen, para verificar el aprendizaje de la misma.

4. APLICACIONES DE LAS RNA EN LOS SISTEMAS DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS

Las RNA son ampliamente estudiadas en la actualidad para su aplicación en las protecciones eléctricas [5]. Ya han sido utilizadas en los siguientes casos: protección de líneas de transmisión [2], barras, detección de fallas a tierra a través de alta impedancia, generadores sincrónicos [7], transformadores de potencia [8], entre otras.

5. ESTRUCTURA DE LA RNA PARA UN RELÉ DEDICADO A LA PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Un Relé basado en RNA incluye, además de la red, como se observa en la figura 2, otros bloques que permiten su correcto funcionamiento y su adaptación a las señales necesarias en el sistema de protección [2, 7].

El bloque "Interface Analógica de Entradas" es la etapa primaria entre las señales de entrada y el Relé, y en el mismo se realiza el proceso de conformación de las señales para el muestreo. El bloque "Muestreador" se necesita para el muestreo y filtrado de la señal. El tercer bloque, "Adaptador

de Entradas para RNA", es el encargado de crear los patrones de reconocimiento según el tamaño de la ventana escogido. El cuarto bloque lo constituye la RNA propiamente dicha. El quinto bloque, "Adaptador de Salidas de la RNA", se utiliza para definir el estado lógico de las salidas de la RNA y el último bloque, "Interface Analógica de Salida", es donde se enlazan las señales internas resultado del procesamiento de la RNA y los dispositivos de salida del Relé.

El adaptador de entradas para la RNA debe seleccionar una cantidad de muestras, según la ventana utilizada (ver figura 3), en cada una de las señales y conformar un vector de entrada a la red estática.

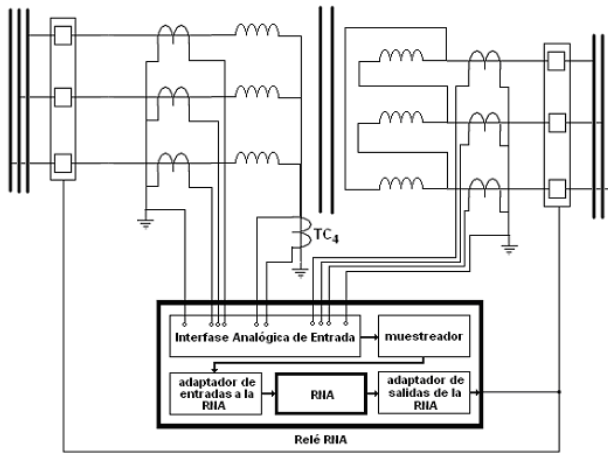


Figura 2. Diagrama en bloques de los componentes del relé basado en RNA para la protección de un transformador de potencia.

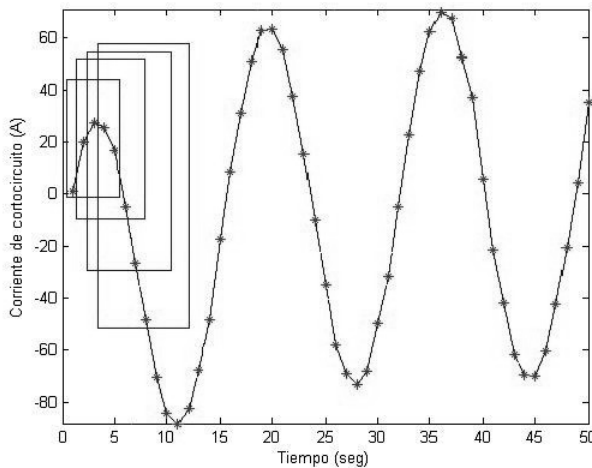


Figura 3. Ventana utilizada para adaptar la señal eléctrica como señal de entrada a la red.

Cada una de las señales empleadas en el Relé es adaptada de la forma explicada anteriormente, de ahí que la cantidad de neuronas en la capa de entrada de la RNA dependerá del número de señales utilizadas en el relé y la cantidad de muestras de la ventana de medición.

Un Relé basado en RNA utilizado para proteger transformadores de potencia deberá medir las corrientes en cada una de las fases, tanto del primario como del secundario, así como las corrientes en los neutros. Con esto podrá detectar todos los regímenes que provoquen variaciones apreciables de las corrientes. La salida de la red debe diferenciar entre un fallo o un régimen normal. Los fallos pueden ser cortocircuitos internos o externos y los regímenes normales son los diferentes estados de carga, el régimen de vacío, la magnetización al energizarlo, entre otros.

La red creada, mostrada en la figura 4, posee 35 entradas, correspondientes a las 7 corrientes empleadas por el relé y una ventana de medición con 5 muestras. Una capa de salida de 3 neuronas, correspondientes a las 3 condiciones mencionadas: régimen normal, cortocircuito interno y externo.

La primera neurona de la salida representa régimen normal, y la segunda y tercera representan los cortocircuitos internos y externos, respectivamente. Para el entrenamiento se utilizaron salidas ideales (target) de 0.1 y 0.9 para evitar los límites de las funciones de activación.

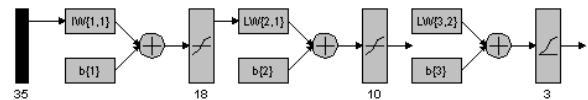


Figura 4. Estructura de la red neuronal artificial escogida según el comando nntool de MATLAB.

Se emplearon 2 capas ocultas, con 18 y 10 neuronas respectivamente. La función de activación tangencial fue la utilizada en las neuronas de la capa oculta y la sigmoideal en las de la capa de salida.

En MATLAB®, para la creación o diseño de una RNA se puede utilizar un asistente o emplear los comandos ofrecidos en las bibliotecas. El comando nntool facilita el trabajo con la red neuronal, permite crearla, inicializarla, entrenarla, simularla, entre otras funciones, a partir de los datos almacenados en variables del "workspace".

En este trabajo se utilizaron directamente los comandos newff, init, train, sim, dado que las señales que se emplearon en el entrenamiento se almacenaron en ficheros separados.

6. ENTRENAMIENTO DE LA RED

Para el entrenamiento se utilizó el modelo de un transformador de potencia de 40 MVA utilizado en la subestación de 110 kV de la Empresa Niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara, del municipio de MOA, en Holguín, Cuba.

La modelación se realiza en SIMULINK de forma continua con intervalos de tiempo variables (automáticos) mucho menores que la frecuencia de muestreo utilizada en el entrenamiento. El método de iteración empleado fue ode23tb (stiff/TR-BDF2), tomando 16 ciclos de duración para cada régimen, puesto que las corrientes de magnetización del transformador de potencia descienden a valores inferiores a la nominal en ese intervalo de tiempo.

En la figura 5 se muestra uno de los procesos de magnetización simulados para las condiciones más severas con mayores niveles de tensión y en el TAP inferior del transformador de potencia, así como otros factores [15].

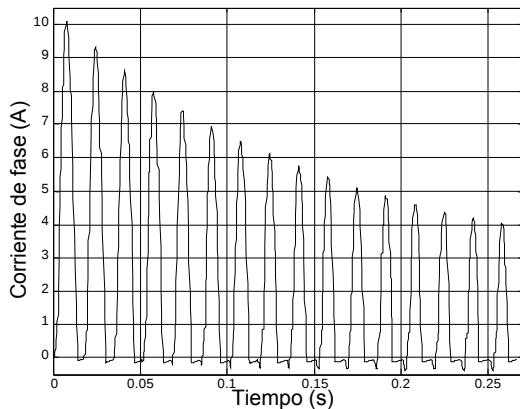


Figura 5. Corriente de magnetización en la fase A del transformador de potencia, vista en el secundario del TC, para las condiciones más severas.

Se simularon varios tipos de cortocircuitos internos y externos (figura 6), cortocircuitos trifásicos, bifásicos y monofásicos, variando las fases de ocurrencia de la falla, el estado de los interruptores, la conexión del neutro, la impedancia de la falla, así como la posible apertura de una fase en el secundario de los TC.

Se simularon 2652 regímenes diferentes, entre normales y anormales. Cada simulación fue guardada en un fichero (*.mat) y se crearon listas (cells) con los nombres de cada fichero y el formato del vector de salida de la RNA correspondiente con el régimen simulado.

Un fichero llamado cc_K1_abc_AB_cn.mat representa un cortocircuito trifásico externo en el primario, con ambos interruptores cerrados y el neutro conectado. Este régimen representa un fallo externo y por tanto, la salida ideal de la RNA deberá ser [0.1 0.1 0.9]. El valor de 0.1 para las salidas 1 y 2 representa que no es ni un régimen normal y tampoco un fallo interno, así como el valor de 0.9 en la salida 3 indica que la información almacenada en el fichero presenta un fallo externo.

En el proceso de entrenamiento se utilizó un error promedio de 1×10^{-3} con 30000 iteraciones como máximo. En la figura 7 se muestra el comportamiento del error durante el proceso de entrenamiento.

7. EVALUACIÓN DEL ENTRENAMIENTO

La red creada y entrenada se sometió a varios de los regímenes similares a los utilizados para el entrenamiento e incluso a la combinación de algunos de ellos. En la figura 8 se muestra el comportamiento de las salidas de la RNA para un régimen inicialmente de vacío, seguido por un cortocircuito monofásico interno en el transformador con el interruptor del secundario abierto.

Éste es un caso típico donde un incorrecto ajuste del coeficiente de retención (100%) en la protección de porcentaje diferencial (convencional) puede provocar que la misma no opere (operación incorrecta) aunque el fallo sea interno y las corrientes sean muy elevadas.

Este caso muestra otra posible causa: operaciones incorrectas comunes de las protecciones convencionales. Las protecciones conectadas al neutro del transformador de potencia, para la protección contra fallas a tierra, no operarán si el neutro está desconectado.

En la figura 9 se muestra otro ejemplo, pero esta vez simulando un régimen de vacío y luego un cortocircuito trifásico externo para condiciones iniciales que generan los valores de 2do y 5to armónicos mayores.

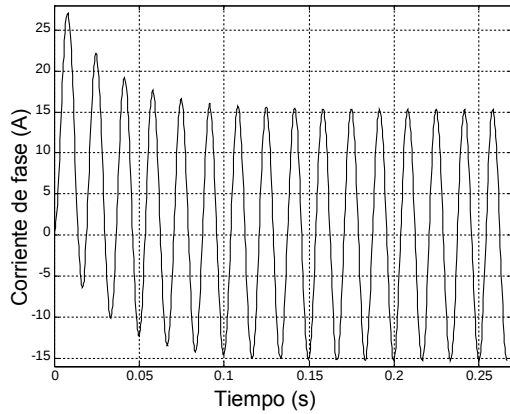


Figura 6. Corriente de cortocircuito trifásico externo en la fase A del transformador de potencia, vista en el secundario de los TC, para las condiciones más severas.

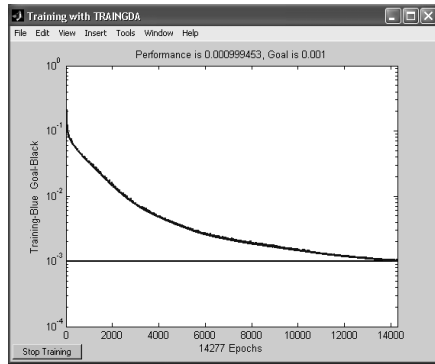


Figura 7. Comportamiento del error durante el aprendizaje de la RNA creada.

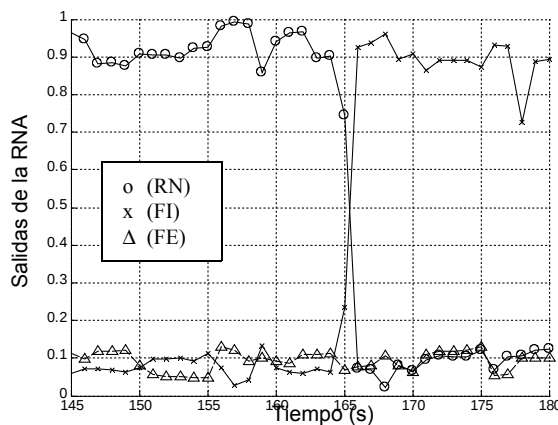


Figura 8. Respuesta de la RNA para la magnetización del transformador seguido de un cortocircuito monofásico interno en la fase A del devanado primario, con el neutro desconectado.

En la figura 10 se muestra la respuesta de la RNA para un régimen de magnetización seguido por un cortocircuito trifásico interno al transformador, pero con el TC conectado a la fase A tiene la fase abierta.

En la figura 11 se muestra el comportamiento de la RNA para un cortocircuito trifásico externo, pero con el secundario del TC conectado a la fase B abierto. Esto representaría la desconexión segura de una protección convencional.

En todos los casos se observó que las salidas de la RNA no se comportan de manera constante sino que varían relativamente poco alrededor del valor 0.9 ó 0.1, que son las respuestas ideales para las que fue entrenada y la variación de las señales de salida de la red muestra un entrenamiento adecuado.

Aunque los Relés Digitales actuales para la protección de transformadores intentan, empleando la lógica convencional, solucionar todos los aspectos que hacen ineficaz a la protección diferencial de corriente para transformadores de potencia, el empleo de las RNA y otras técnicas de la Inteligencia Artificial se imponen por su alta capacidad de diferenciar y detectar regímenes anormales.

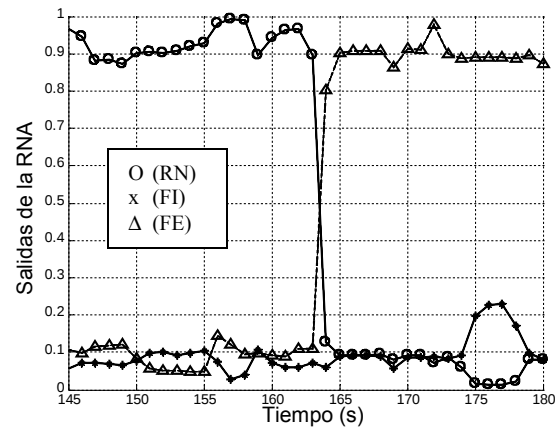


Figura 9. Respuesta de la RNA para un régimen de vacío seguida por un cortocircuito trifásico externo en el secundario del transformador de potencia a máxima generación.

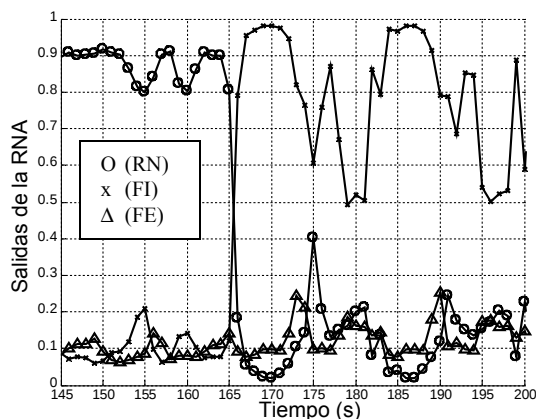


Figura 10. Respuesta de la RNA para una magnetización seguido de un cortocircuito trifásico interno en el devanado primario del transformador de potencia con la fase A del TC abierta.

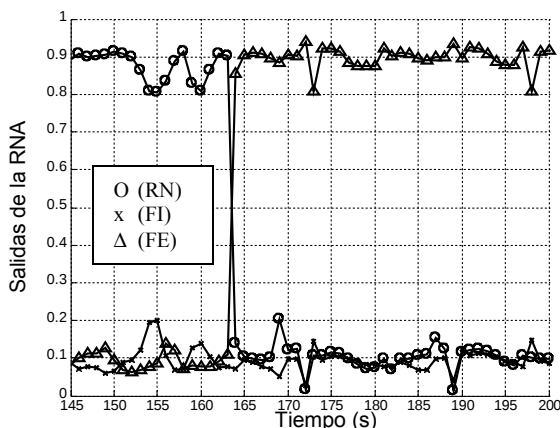


Figura 11. Respuesta de la RNA para una magnetización seguido de un cortocircuito trifásico externo en el devanado secundario del transformador de potencia con la fase B del TC abierta.

8. CONCLUSIONES

Se demuestra la sensibilidad y rapidez del relé basado en RNA ante cualquier fallo o régimen normal, en un transformador de potencia.

La RNA entrenada, con 35 entradas, dos capas ocultas y una capa de salida con 3 neuronas, logró el aprendizaje de los procesos normales y anormales en el transformador de potencia, diferenciando procesos que resultan bastante confusos como la magnetización, la apertura de un conductor y otros que harían operar incorrectamente a una protección diferencial convencional.

Fue necesario utilizar un error de 0.001 porque menor a este valor, aunque el proceso de aprendizaje se hacía más rápido, la variación de las salidas de la RNA podrían provocar operaciones incorrectas.

La simulación de los regímenes con una demora de 16 ciclos y una ventana de 5 muestras aportaron suficientes datos para el aprendizaje de la RNA, luego fueron evaluados regímenes con mayores tiempos de simulación, incluso combinaciones de ellos y la RNA se comportó sin errores apreciables.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. CHERNOBROVOV N. Protective Relaying. _ Moscow: Ed. Mir, 1974._ 1789p.
- [2]. ALTUVE F., Hector J. et al. Aplicación de Redes de Neuronas Artificiales en Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia. (México) Universidad Autónoma de Nuevo León. p. 14
- [3]. SAHA M. M, Rosolowski E., Izykowski J. Artificial Intelligent Application to Power System Protection.
- [4]. KEZUNOVIC M. Artificial Neural Network Based Protection And Newer Design Philosophies. Disponible en: <http://eent1.tamu.edu/ee679/handouts.htm>
- [5]. KEZUNOVIC M. A survey of neural net applications to protective relaying and fault analysis. Engineering Intelligent Systems, 5(4): 185-192, dic., 1997.
- [6]. KEZUNOVIC, M. et al. Neural Network Applications to Real -Time and Off-Line Fault Analysis. Disponible en: <http://eent1.tamu.edu/ee679/handouts.htm>
- [7]. MEGAHED, A. I. Malik, O.P. An Artificial Neural Network Based Digital Differential Protection Scheme For Synchronous Generator Stator Winding Protection. IEEE Transactions on Power Delivery 4(1): ene., 1999.
- [8]. SONG, Y.H. Neural Network Based Adaptive Protection Scheme for Power Transformers". Proceedings of International Conference on Developments in Power Systems Protection and Local Control (Beijing, China), pp. 110-120, may. 1994.
- [9]. GE Multilin (Canada)_ UR-T60 Transformer Management Relay _2004.
- [10]. GE Multilin (Canada)_ SR-745 Transformer Management Relay _2003.
- [11]. KASZTENNY, B. Kezunovic, M. Improved power transformer protection using numerical relays (Texas).p. 17.
- [12]. VILARAGUT. M. Curso de postgrado sobre Redes Neuronales.._ La Habana.



- [13].DÍAZ R., Yarima. Relé para la protección de un Transformador de Potencia basado en Redes Neuronales Artificiales. _Moa: ISMM Dr Antonio Núñez Jiménez, 2004._69h. Trabajo de Diploma (Ingeniería Eléctrica)
Tutor: Orlys Ernesto Torres Breffe
- [14].NEURAL NETWORK TOOLBOX User's Guide. Mathwork, 2003.
- [15].ROSALES H. Y., Guerra L. H., Martínez A. G., Arce, L, D. Metodología para el ajuste de las restricciones armónicas en la protección diferencial porcentual de transformadores. Ingeniería Energética. XXIV(2), pp. 53-58, 2003.



AUTORES



Orlys Ernesto Torres Breffe.

Ingeniero Electricista (1995) en el Instituto Superior Minero Metalúrgico ISMM; M. Sc. en la Universidad de Camaguey (1999).

Trabaja como Profesor Auxiliar y Jefe del Colectivo de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, en el ISMM. (53) 024 64476. MOA, Cuba.

Email: otorres@ismm.edu.cu



Miriam Vilaragut Llanes.

Ingeniero Electricista (1982), Master en Ingeniería Eléctrica (1997), Doctora en Ciencias Técnicas (2002). Trabaja como

profesora Auxiliar en el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) del ISPJAE, Cuba, en la disciplina de Máquinas y Accionamiento Eléctrico y en el grupo de Aplicaciones Eléctricas Industriales.

Email: miriamv@electrica.ispjae.edu.cu

Antonio Martínez García. Ingeniero Electricista (1971), Doctor en Ciencias Técnicas (1981) en el Instituto Energético de Moscú. Trabaja como Profesor Titular en el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) del ISPJAE, Cuba, en la disciplina de Sistemas Electroenergéticos.

Email: amg5057@yahoo.es