

Nuevo algoritmo para la protección diferencial de generadores sincrónicos utilizando redes neuronales artificiales

*Fernando Villada**, *Jaime A. Valencia** y *Ángel Orille***

(Recibido el 28 de febrero de 2003. Aceptado el 23 de octubre de 2004)

Resumen

Se propone un nuevo algoritmo para la protección diferencial de generadores sincrónicos; está basado en redes neuronales con filtros de respuesta impulsional finita (FIRANN), la que da como resultado tiempos de respuesta inferiores a los obtenidos por los algoritmos de protección diferencial implementados o propuestos hasta el momento.

----- *Palabras clave:* redes neuronales, simulación de fallas internas, protección diferencial, generadores sincrónicos.

New algorithm for differential protection of synchronous generators based on artificial neural networks

Abstract

A new algorithm for the differential protection of synchronous generators based on finite impulse response artificial neural networks (FIRANN) is proposed. As a result, response times are lower than those of the existing algorithms.

----- *Key words:* neural networks, internal fault simulation, differential protection, synchronous generators.

* Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica, GIMEL. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. fvillada@udea.edu.co.

** Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Politécnica de Cataluña. España.

Introducción

Los generadores sincrónicos constituyen el equipo más costoso en un sistema de potencia y están sujetos, a la vez, a más tipos de fallas que los demás elementos. Las fallas en los mismos se consideran de gran importancia, ya que pueden producir daños severos y costosos al aislamiento, los devanados y al núcleo; las fallas también pueden producir tensiones bruscas de torsión en los ejes y en los acoplamientos.

Como consecuencia de las posibles fallas que se presentan dentro y fuera del generador y que producen altas corrientes de cortocircuito, se requiere el uso de elementos de protección de alta velocidad que aislen la máquina eléctrica de la red de forma casi instantánea y eviten, así, daños mayores. Uno de esos elementos es la protección diferencial, que se encarga de comparar los valores de las corrientes entrantes y salientes en cada fase del estator para detectar fallas internas y disparar la protección en el momento de su ocurrencia.

Tradicionalmente se han utilizado relés electromecánicos y de estado sólido como sistemas de protección diferencial de los generadores sincrónicos. Sin embargo, dichos relés no protegen el 100% del devanado del estator. Además tampoco han sido muy efectivos en la detección de fallas a tierra cuando el neutro del generador está aterrado a través de una impedancia alta. Por tanto, en estos casos se requiere un relé adicional que responda al flujo de corriente a través del circuito del neutro.

El rápido avance de la tecnología digital ha permitido a los investigadores y diseñadores conseguir progresos significativos en el desarrollo de algoritmos de protección basados en microprocesadores. A pesar de ello, la mayoría de esos algoritmos necesitan un ciclo de red para dar la señal de disparo y requieren además filtros y otros cálculos adicionales para el preprocesamiento de las señales.

En los últimos años, las aplicaciones de los métodos de la inteligencia artificial en el campo del

análisis de los sistemas de potencia han aumentado rápidamente. Métodos como los sistemas expertos, la lógica difusa y las redes neuronales artificiales necesitan una base de datos que describa el funcionamiento del sistema junto a un análisis lógico, en lugar del análisis matemático, para el control del sistema y facilitar la toma de decisiones.

Uno de esos métodos es el empleo de las redes neuronales artificiales (ANN) que imitan el funcionamiento del cerebro humano. Las redes neuronales se han usado para el reconocimiento de imágenes y sonidos, para el procesamiento de datos y señales, y como clasificadores. En el campo del análisis de los sistemas de potencia, se investiga para aplicar la tecnología de las redes neuronales a la predicción de los parámetros y las cargas del sistema, el análisis de la seguridad, la estabilidad y las protecciones [1-5].

En este artículo se propone un nuevo algoritmo para la protección diferencial de generadores sincrónicos, basado en redes neuronales artificiales con filtros de respuesta impulsional finita (FIRANN). Las redes FIRANN fueron entrenadas para la detección y clasificación de fallas internas. Los patrones de entrenamiento se generan mediante la simulación de fallas internas con el uso del programa de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP [6]. A pesar de que el ATP-EMTP no puede modelar directamente las fallas internas en un generador, se propone una nueva metodología para trabajar con las asimetrías internas en el modelo de máquina sincrónica del ATP-EMTP. Finalmente, se muestran los resultados experimentales del modelo de fallas internas, la estructura de la red neuronal, el método de entrenamiento y las pruebas de la red.

Redes neuronales artificiales

Una red neuronal es un sistema que permite establecer una relación, lineal o no, entre las salidas y las entradas. Sus características están inspiradas en el sistema nervioso lo que les da varias ventajas, tales como su capacidad de aprendizaje adaptativo; además son autoorganizativas, pue-

den funcionar en paralelo en tiempo real y ofrecen tolerancia a fallos por la codificación redundante de la información.

Desde el punto de vista de solucionar problemas, las redes neuronales son diferentes de los ordenadores convencionales que usan algoritmos secuenciales; las redes neuronales actúan como el cerebro humano, procesan la información en paralelo y pueden aprender y generalizar a situaciones no incluidas en el proceso de entrenamiento. Esas redes procesan la información de forma más rápida que los ordenadores convencionales, pero tienen la desventaja de que no se puede seguir su respuesta paso a paso, como se hace al ejecutar un programa convencional en un ordenador, por lo que no es fácil detectar errores.

Las redes neuronales artificiales son muy efectivas para resolver problemas complicados de clasificación y reconocimiento de patrones; la más utilizada es la llamada de propagación hacia adelante. La figura 1 muestra una red de propagación hacia adelante con dos capas ocultas. El número de entradas depende directamente de la información disponible para clasificar mientras que el número de neuronas de salida es igual al número de clases por separar. Las unidades de

una capa se conectan unidireccionalmente con las de la siguiente, y en general todas con todas, sometiendo sus salidas a la multiplicación por un peso que es diferente para cada una de las conexiones.

Otro tipo de red neuronal, conocida por su habilidad para manejar señales variables en el tiempo, es la FIRANN [7]. Su modelo de neurona se basa en filtros de respuesta impulsional finita (FIR), los cuales les permiten ser aplicadas al procesamiento temporal. El modelo de red neuronal FIRANN mostrado en la figura 2 presenta la estructura simple de una red 2-2-2 con tres unidades de retardo de tiempo en cada neurona. Nótese que el número de unidades de retardo de tiempo debe ser igual para todas las neuronas ubicadas en una misma capa; sin embargo, este número de retardos puede ser diferente en las otras capas.

Modelo para la simulación de fallas internas

El entrenamiento de las redes FIRANN se realizó con patrones escogidos aleatoriamente, del grupo de simulaciones de fallos internos en la máquina. Para cumplir con este objetivo se de-

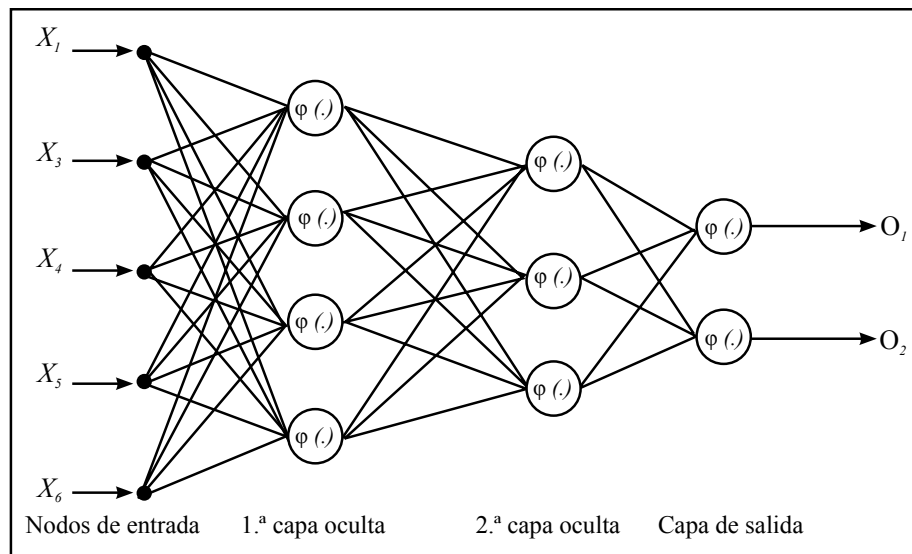


Figura 1 Red neuronal de propagación hacia adelante

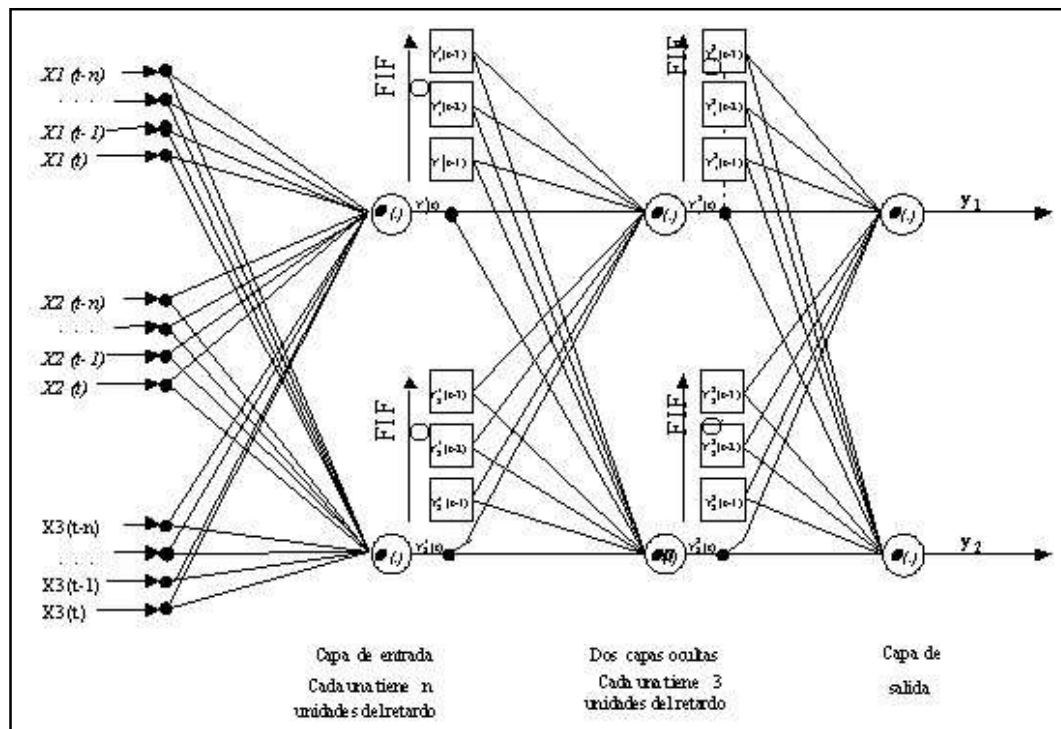


Figura 2 Red neuronal con filtros de respuesta impulsional finita (FIRANN)

sarrolló un modelo de máquina sincrónica que permite simular fallos internos en los devanados del estator usando el programa de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP. A pesar de que ese programa se ha empleado eficientemente en el análisis de transitorios eléctricos, esta herramienta no permite el estudio de fallas internas en forma directa. En este trabajo se propone una nueva metodología que permite trabajar con asimetrías internas en el modelo 59SM del ATP; de esta forma, una máquina sincrónica con una falla interna entre fase y tierra, que abarque N_f espiras del devanado del estator, puede aproximarse como una máquina simétrica imaginaria que tenga un devanado estatórico de N_f espiras en cada fase y la misma construcción del rotor de la máquina original. Con esta premisa se calculan las diferentes inductancias de la partición del devanado del estator, las que forman el modelo general de una máquina síncrona [8].

La inductancia propia de la partición correspondiente a la máquina simétrica imaginaria con N_f

espiras en cada fase, puede calcularse con base en los parámetros de construcción de la máquina, según la ecuación:

$$L_f = L_{f0} + L_{mf0} + L_{mf1} \cos 2\theta \quad (1)$$

Donde L_f es la inductancia de dispersión, L_{mf0} es la parte constante de la inductancia principal, L_{mf1} es la amplitud de la parte variable y $\theta = \omega t + \phi_f$ es el ángulo instantáneo entre el eje del ángulo de la partición y el eje directo. La parte constante y la amplitud de la parte variable de la inductancia principal se calculan de acuerdo con las ecuaciones:

$$L_{mf0} = \frac{64\mu_0 l_i R^2 N_f^2 K_{pf}^2}{\pi b_1 p^3} \Lambda_0 \text{sen} \frac{pb_1}{4} \quad (2)$$

$$L_{mf1} = \frac{64\mu_0 l_i R^2 N_f^2 K_{pf}^2}{3\pi b_1 p^3} \Lambda_1 \text{sen} \frac{pb_1}{4} \quad (3)$$

Donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m es la permeabilidad del aire, l_i es la longitud efectiva del núcleo, R

es el radio interno del estator, K_{pf} es el factor de devanado de la partición en cortocircuito del estator, p es el número de par de polos, b_l es el ancho del conductor en la ranura, Λ_0 y Λ_l son, respectivamente, la parte constante y la parte variable de la permeancia en una máquina de polos salientes, expresada en m^{-1} tal como está definida por Kinitsky [8].

De acuerdo con las ecuaciones de la máquina en las variables dqo, la inductancia síncrona en el eje directo, la inductancia síncrona en el eje de cuadratura y la inductancia de secuencia cero están dadas por las expresiones:

$$L_{df} = L_{df} + \frac{3}{2} (L_{mf0} + L_{mf1}) = L_{df} + \frac{3}{2} L_{dmf} \quad (4)$$

$$L_{qf} = L_{qf} + \frac{3}{2} (L_{mf0} + L_{mf1}) = L_{qf} + \frac{3}{2} L_{qmf} \quad (5)$$

$$L_{0f} = L_{lf} \quad (6)$$

Donde L_{dmf} , L_{df} , L_{qmf} y L_{qf} son las inductancias principales y de dispersión de la porción en cortocircuito del devanado del estator en los ejes directo y de cuadratura, respectivamente.

Las inductancias subtransitorias en los ejes directo y de cuadratura pueden determinarse a partir de los circuitos equivalentes de la máquina sincrónica en régimen transitorio. Éstas se expresan por:

$$L_{df}'' = L_{df} + \frac{1}{\frac{2}{3L_{dmf}} + \frac{1}{L_{le}} + \frac{1}{L_{ID}}}, \quad L_{qf}'' = L_{qf} + \frac{1}{\frac{2}{3L_{qmf}} + \frac{1}{L_{IQ}}} \quad (7)$$

Donde L_{le} es la inductancia de dispersión del devanado de campo, L_{ID} es la inductancia de dispersión del devanado amortiguador en el eje directo y L_{IQ} es la inductancia de dispersión del devanado amortiguador en el eje de cuadratura.

La corriente en el instante inicial del cortocircuito depende de las inductancias subtransitorias en los ejes directo y de cuadratura. Luego, la inductancia subtransitoria de una partición del devanado del estator, desfasada un ángulo δ_f

con respecto al eje directo, se puede calcular de acuerdo con la fórmula propuesta por Kinitsky [8], por medio de:

$$L_f'' = \frac{L_{df}'' + L_{qf}''}{2} + \frac{L_{df}'' - L_{qf}''}{2} \cos 2\delta_f \quad (8)$$

Bajo las premisas anotadas, a la máquina simétrica imaginaria, con los devanados en la armadura equivalentes a la partición en cortocircuito de la máquina original, se le calcula la inductancia de dispersión y la inductancia subtransitoria de acuerdo con las ecuaciones 1 a 8. Con estos nuevos valores se modifican los valores de la tabla de datos de reactancias del ATP-EMTP; para compensar la modificación se debe adicionar una reactancia externa X_{12}'' , igual a la reactancia subtransitoria de la partición en buen estado del devanado, en serie con cada una de las tres fases. Por tanto, las reactancias efectivas del generador, vistas desde el exterior, permanecerán invariables.

Para simular las fallas internas, a cada uno de los terminales externos de las fases en estado de falla se le adicionan dos fuentes de tensión en serie y de polaridad inversa. Estas fuentes de tensión tienen un valor E igual a la porción del devanado en buen estado.

La figura 3 muestra una representación esquemática del método propuesto, en el cual las reactancias modificadas y una de las dos fuentes de tensión (la negativa) se incluyen en el circuito de fallo. Esto permite una fuerza electromotriz y una reactancia durante el período subtransitorio iguales a las contenidas en la porción fallada del devanado.

La comprobación del modelo se realizó con una máquina sincrónica de laboratorio de 66 kVA, 880/440 V, 44,5/89 A, 50 Hz y los siguientes parámetros en valores unitarios: $x_d = 1,1168$, $x_q = 0,9328$, $x_d' = 0,2954$, $x_d'' = 0,2204$, $x_q'' = 0,324$. Esta máquina dispone de cuatro particiones en cada fase y manipulables desde el exterior, lo cual permitió realizar las fallas necesarias para validar el modelo.

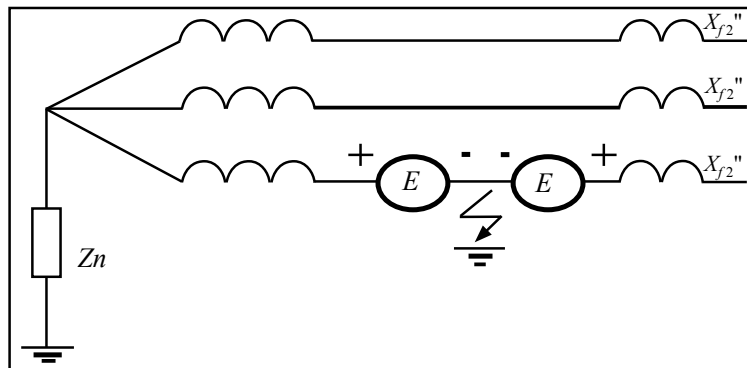


Figura 3 Representación de una falla interna en un generador síncrono

A continuación se presentan los resultados de dos de los ensayos realizados para una falla interna entre una partición del 25% de la fase A, y tierra y una falla entre dos particiones de las fases A y C. Los resultados se muestran en la figuras 4 y 5, donde se tienen las corrientes obtenidas usando el método de simulación propuesto y los resultados reales obtenidos en los ensayos de laboratorio. Como se puede apreciar en ambos casos las ondas de corriente obtenidas y sus magnitudes son muy similares lo que corrobora la validez del esquema de simulación propuesto.

Tipos simulados de falla

La máquina usada para generar los patrones de entrenamiento del esquema de protección propuesto corresponde a un generador síncrono real, de polos salientes de 150 MVA a 13,2 kV, 50 Hz. Las simulaciones se realizaron utilizan-

do el modelo de máquina síncrona propuesto, cubriendo todas las condiciones posibles de operación y tipos de falla para diferentes instantes de tiempo y diferentes tipos de carga.

La tabla 1 resume las simulaciones realizadas e incluye las utilizadas para el aprendizaje y la prueba de la red neuronal. En cada fila se anotan los grupos de simulaciones, y en cada columna los parámetros cambiantes para simular los diferentes casos. La columna EXT representa los fallos externos que no deben hacer actuar la protección diferencial, IFT corresponde a los fallos internos entre una fase del estator y tierra, IFFT son los fallos internos entre dos fases del estator y entre las dos fases y tierra, IFFFT representa los fallos internos entre tres fases del estator y entre las tres fases y tierra, NPI corresponde al número de particiones internas del devanado, tiempo representa los instantes en que se realiza

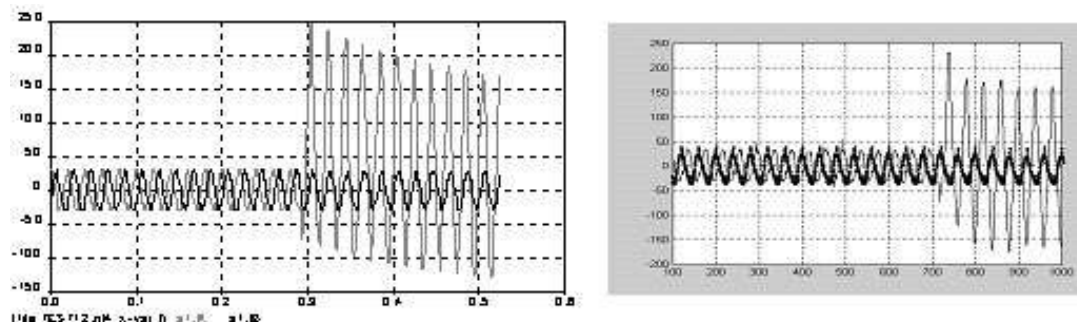


Figura 4 Falla interna fase A con tierra, a) i_a, i_b simuladas EMTP; b) i_a, i_b reales

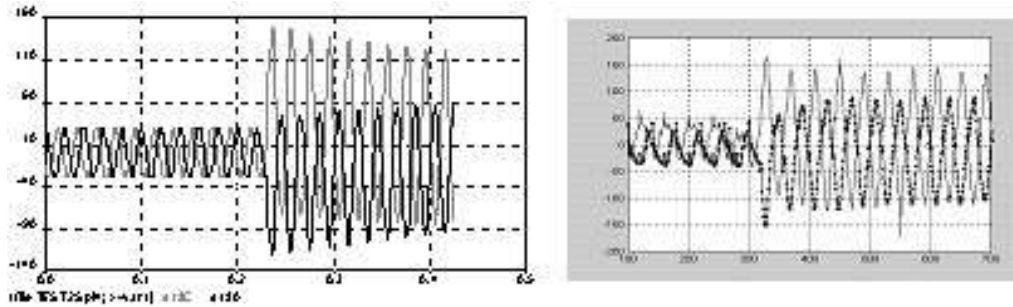


Figura 5 Falla interna entre fases A y C, a) i_a, i_c simuladas EMTP; b) i_a, i_c reales

el fallo, *carga* son los diferentes tipos de carga para la simulación y *fallos* representa el número de fallos simulados por caso.

Esquema de protección diferencial y clasificación de fallas

Las redes neuronales utilizadas en trabajos anteriores al presente fueron las redes de propagación y las redes con retardo de tiempo en las entradas. La referencia [7] propone una nueva estructura de red neuronal, basada en filtros de respuesta impulsional finita (FIRANN), como una excelente estructura para el procesamiento temporal. Esta última ha mostrado un buen desempeño en la predicción de series de tiempo. De esta forma, en los trabajos del grupo de investigación [9-10] se han aplicado exitosamente en la protección diferencial de generadores sincrónicos, transformadores y líneas de transmisión.

El diseño del esquema de protección FIRANN, la selección del número de capas ocultas, el número de neuronas en cada capa y los retardos de tiempo en cada neurona han sido realizados probando diferentes estructuras; estructuras que

dependen de las funciones de protección que se hayan incluido. El número de retardos de tiempo se ha seleccionado con el fin de lograr un tiempo de disparo inferior a 2,5 ms.

Para el entrenamiento de las redes neuronales se aplicó el método de retropropagación temporal [7] y se utilizó un programa desarrollado previamente en el grupo de investigación [11]. El programa se escribió en Pascal para el sistema operativo Dos y luego, para aumentar sus prestaciones se tradujo al lenguaje C++ y se ejecuta en un ordenador dotado con el sistema operativo Linux. Se optó por desarrollar este programa porque los paquetes de *software* para redes neuronales existentes hasta el momento no permiten entrenar el tipo de redes neuronales artificiales FIRANN empleadas. El proceso de entrenamiento se interrumpe cuando el error medio, calculado como la relación entre el número de salidas erróneas con respecto al total, es inferior al 4%. Además, la red neuronal entrenada tiene la suficiente capacidad de generalización.

El subconjunto de patrones de las simulaciones para entrenar la red neuronal se seleccionó aleatoriamente, incluyendo el 50% de las simulaciones

Tabla 1 Simulaciones realizadas

	Tiempo	NPI	Cargas	Fallos	Simulaciones
EXT	8	1	15	3	360
IFT	8	9	15	3	3.240
IFFT	8	16	9	6	6.912
IFFFT	8	64	9	2	9.216
Total					19.728

del primer grupo y el 25% de los grupos restantes. De esta forma se usaron 5.022 simulaciones para entrenar la red neuronal, lo que equivale, aproximadamente, al 25% de las simulaciones totales; lo que muestra la gran habilidad de generalización de las redes neuronales. De cada simulación seleccionada se tomó una ventana de datos equilibrada con respecto al instante de fallo; es decir, se tomaron intervalos iguales de tiempo antes y después del fallo. Así, con una frecuencia de muestreo de 2 kHz, la ventana de una simulación consta de 80 muestras; 40 muestras antes del fallo, 5 de transición inmediatamente después del fallo y, por último, 35 después de la transición. Las 5 muestras de transición inmediatamente después del fallo están pensadas para una respuesta de la protección de 2,5 ms, lo cual significa que es más rápida que cualquiera otra protección presentada hasta el momento.

La estructura del esquema de protección que presentó un mejor comportamiento se muestra en la figura 6. El esquema se compone de tres bloques paralelos FIRANN, cada uno dedicado a la protección de un tipo de falla. Las entradas de las redes FIRANN son las corrientes simuladas que entran y salen de los devanados del estator; estas corrientes se representan por i_{an} , i_{bn} , y i_{cn} para las tres fases al lado del neutro; i_{at} , i_{bt} , y i_{ct}

corresponden a las corrientes en las tres fases en los terminales de la máquina.

Bloque detector de fallas internas entre fases y tierra

El bloque detector de fallas internas entre una fase y tierra (RN1) consta de cuatro capas. La capa de entrada recibe seis señales correspondientes a las corrientes de fase que entran y salen de los devanados del estator y seis unidades de retardo de tiempo en cada entrada. La primera capa oculta tiene doce neuronas con tres unidades de retardo de tiempo, mientras que la segunda capa oculta tiene tres neuronas con tres unidades de retardo de tiempo. Se tiene una salida entrenada para ser +1 en el caso de presentarse una falla interna entre cualquier fase y la tierra y -1 en cualquier otra situación.

Bloque detector de fallas internas entre fases

El bloque detector de fallas internas entre dos fases, entre dos fases y tierra o entre las tres fases (RN2), consta de cuatro capas. La capa de entrada recibe seis señales correspondientes a las corrientes de fase que entran y salen de los devanados

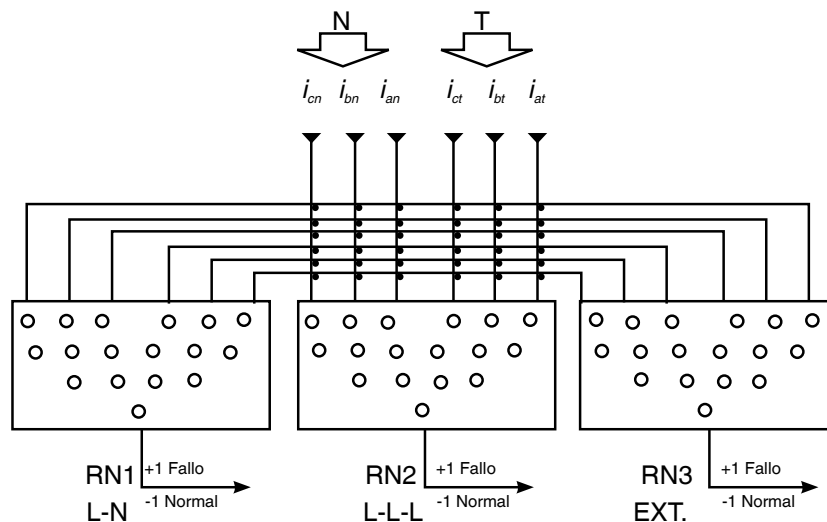


Figura 6 Estructura de protección con tres redes FIRANN

del estator y seis unidades de retardo de tiempo en cada entrada. La primera capa oculta tiene quince neuronas con tres unidades de retardo de tiempo, mientras que la segunda capa oculta tiene siete neuronas con tres unidades de retardo de tiempo. Se tiene una salida que ha sido entrenada para ser +1 en el caso de presentarse una falla interna entre fases y -1 en cualquiera otra situación.

Bloque detector de fallas externas

El bloque detector de fallas externas (RN3) consta de cuatro capas. La capa de entrada recibe seis señales correspondientes a las corrientes de fase que entran y salen de los devanados del estator y seis unidades de retardo de tiempo en cada entrada. La primera capa oculta tiene doce neuronas con tres unidades de retardo de tiempo, mientras que la segunda capa oculta tiene siete neuronas con tres unidades de retardo de tiempo. Se tiene una salida que ha sido entrenada para +1 en

el caso de presentarse una falla externa y -1 en cualquiera otra situación.

Resultados y discusión

La prueba de la red neuronal se realizó con las simulaciones no incluidas en el grupo de patrones de entrenamiento. La figura 7 muestra las corrientes para una falla interna entre la fase A y tierra y la respuesta del bloque detector RN1, donde i_{an} representa la corriente entre el punto de falla y tierra y i_{at} corresponde a la corriente entre el punto de falla y el terminal de la fase A. La falla fue aplicada cubriendo el 80% del devanado a partir del neutro, cuando el generador estaba trabajando en un 90% de su carga nominal. Todas las demás respuestas del bloque de protección RN1 fueron respuestas similares a las mostradas en la figura 7, donde la transición de -1 a un nivel de falla +1 ocurre en menos de cuatro muestras (2,0 ms) a partir de la aplicación de la falla.

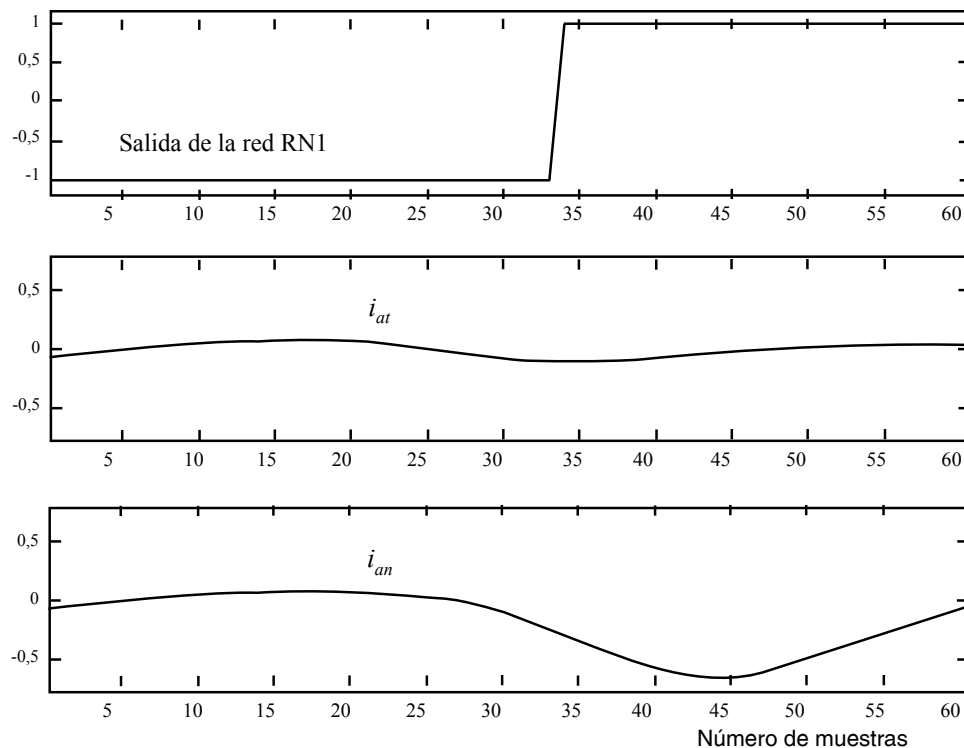


Figura 7 Respuesta de la red RN1 para un fallo interno entre la fase A y tierra

La figura 8 muestra las corrientes y la respuesta de la red neuronal RN2 para una falla interna entre dos fases. Se puede apreciar que la transición de un nivel de no falla -1 a un nivel de falla +1 ocurre en, aproximadamente, cuatro muestras (2,0 ms) a partir de la aplicación de la falla. La figura 9 muestra la respuesta de la red neuronal RN3 para una falla externa.

El algoritmo de protección propuesto también se probó para errores de transformación y ruido en los transformadores de intensidad ubicados en ambos lados de los devanados, mediante la adición de errores aleatorios a los patrones de prueba. La respuesta del esquema de protección se muestra en la figura 10, donde se observa un comportamiento de la protección similar al mostrado en las figuras 7, 8 y 9.

Finalmente, el algoritmo de protección se probó sometiendo el generador a fallos muy cercanos al punto del neutro. La figura 11 muestra cómo la respuesta es similar a las anteriores para una falla interna cubriendo el 5% del devanado a partir del neutro. De forma similar, la respuesta para una

falla interna cubriendo 1% del devanado a partir del neutro es mostrada en la figura 12.

El comportamiento del sistema de protección se probó también para cambios bruscos en la carga, diferentes puntos de fallo y para la mayoría de los casos simulados que no se incluyeron en el entrenamiento. Los resultados fueron similares a los mostrados en las figuras 7 a 12.

Con las pruebas realizadas al esquema de protección diferencial compuesto de tres redes neuronales artificiales FIRANN, se corroboran las ventajas ya conocidas de las redes neuronales artificiales, como son su inmunidad al ruido, gran capacidad de generalización y alta velocidad de respuesta debida al procesamiento en paralelo. Adicionalmente, se mostró su mejor desempeño con respecto a los algoritmos de protección diferencial existentes, al poder detectar fallos internos muy cercanos al punto del neutro, tener un buen comportamiento ante ruidos y errores en las relaciones de transformación de los transformadores de intensidad y no dar señales erróneas de disparo por cambios bruscos en la carga.

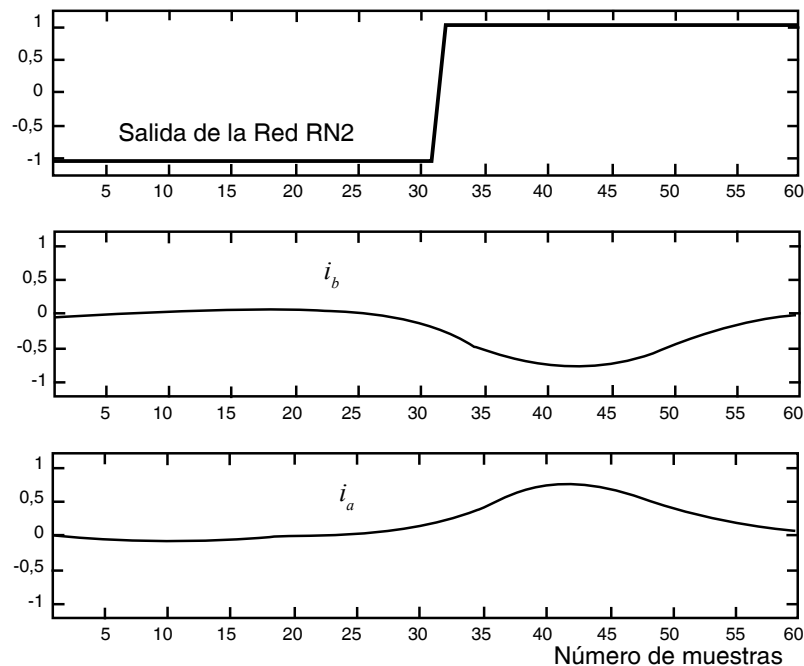


Figura 8 Respuesta de la red FIRANN para un fallo interno entre las fases A y B

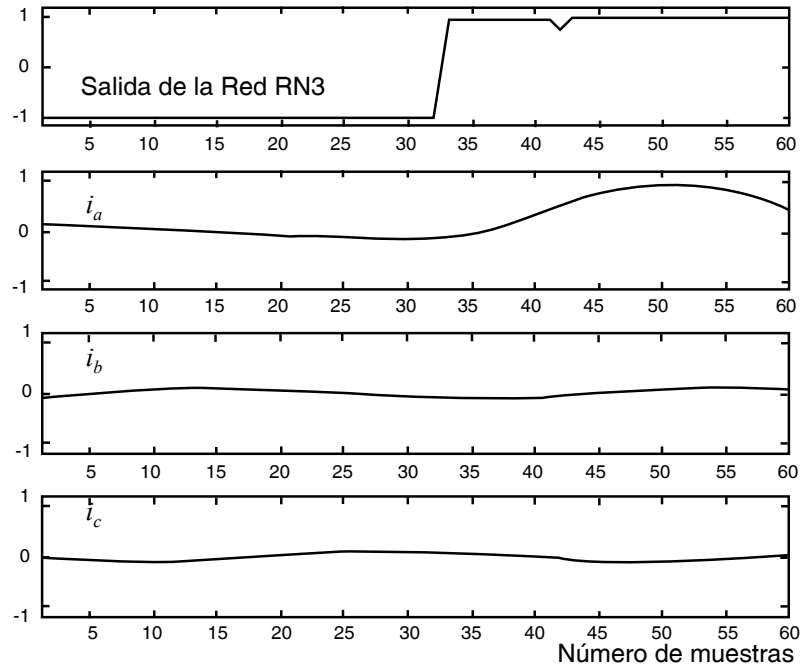


Figura 9 Respuesta de la red FIRANN para un fallo externo en la fase A

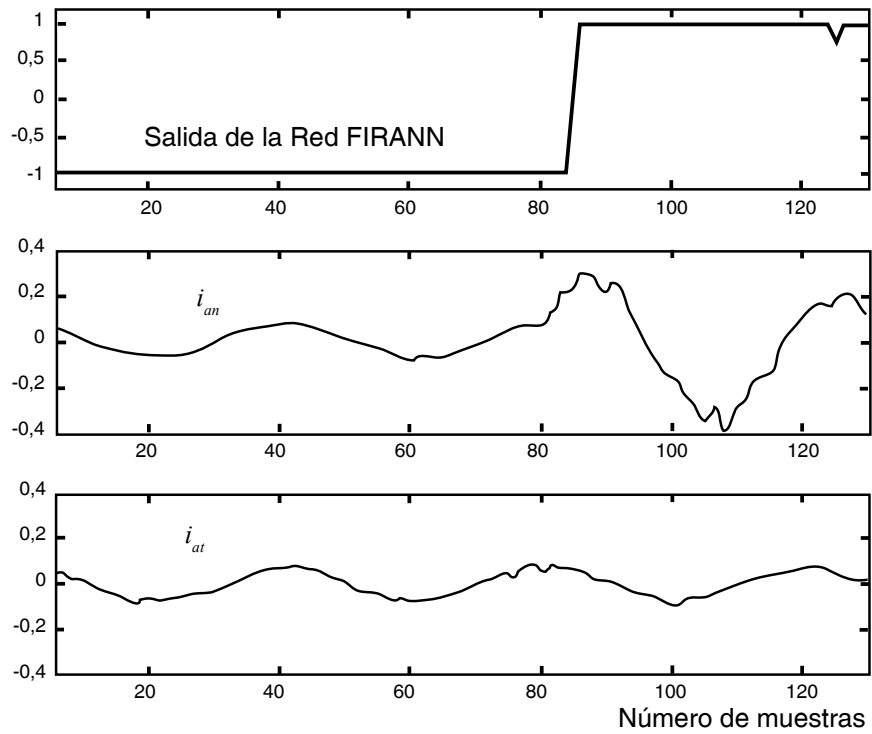


Figura 10 Respuesta de la protección diferencial para un fallo interno en la fase A

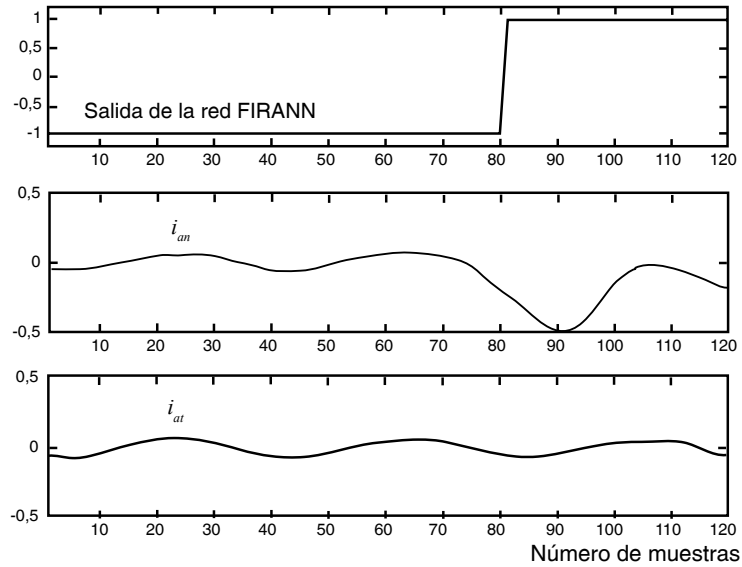


Figura 11 Respuesta de la red FIRANN para un fallo interno cubriendo el 5% de la fase A

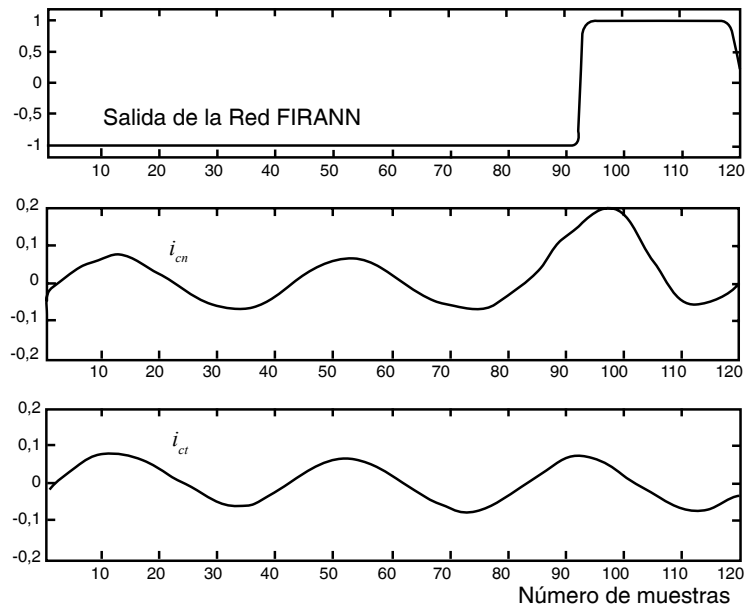


Figura 12 Respuesta de la red FIRANN para un fallo interno cubriendo el 1% de la fase C

Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un nuevo algoritmo para la protección diferencial de generadores sincrónicos usando redes neuronales tipo FIRANN, con las cuales se han obtenido

tiempos de respuesta inferiores a las protecciones digitales empleadas actualmente. Las redes neuronales fueron entrenadas con datos simulados usando el ATP-EMTP para todos los tipos de fallas; con este fin se desarrolló un modelo que permite simular las fallas internas y su compro-

bación experimental se realizó en el laboratorio. Los resultados obtenidos indican que el nuevo algoritmo de protección diferencial propuesto es rápido y confiable, con tiempos de detección inferiores a 2,0 ms.

Referencias

1. Pérez, L. G. *et al.* "Training an artificial neural network to discriminate between magnetizing inrush and internal faults". En: *Power Delivery*. Vol. 9. N.º 1. 1994. pp. 434-441.
2. Bastard, P. *et al.* "Neural Network-based algorithm for power transformer differential relays", IEE Proc. En: *Gener. Transm. Distrib.* Vol. 142. N.º 4. 1995. pp. 386-392.
3. Filippetti, F. *et al.* "Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults", IEEE Trans. En: *Industry Applications*. Vol. 31. N.º 4. Julio-agosto, 1995. pp. 892-899.
4. Orille, A. L. *et al.* "Electromagnetic torque signal estimation in a direct torque control for electrical machines". The International Conference on Electrical Machines, ICEM2000. Helsinki. August 2000.
5. Taalab, A. I. *et al.* "ANN-based novel fault detector for generator windings protection", IEEE Trans. En: *Power Delivery*. Vol. 14. N.º 3. Julio, 1999. pp. 824-830.
6. Alternative Transient Program-Rule Book. Canadian/American EMTP User Group, 1992.
7. Haykin, S. "*Neural networks: a comprehensive foundation*". Macmillan College Publishing Company. 1994.
8. Kinitzky, V. A. "Inductances of a portion of the armature winding of synchronous machines", IEEE Trans. En: *PAS*. Vol. 84. N.º 5. Mayo, 1965. pp. 389-396.
9. Villada, F. "Aplicación de las redes neuronales en la protección diferencial de generadores síncronos". Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Cataluña, Terrassa, Barcelona, España, 2001.
10. Orille, A. L. *et al.* "A FIRANN as a differential relay for three phase power transformer protection", IEEE Trans. En: *Power Delivery*. Vol. 16. N.º 2. Abril, 2001. pp. 215-218.
11. Khalil, N. "Programa de entrenamiento para redes neuronales tipo FIR". Informe interno del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cataluña. España, 1997.