

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO “DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRICA

TESIS PRESENTADA EN OPCION AL TITULO ACADEMICO DE DOCTOR EN
CIENCIAS TECNICAS

TITULO: Desarrollo de herramientas para la creación, modelación y comprobación de
protecciones eléctricas

Autor: M.Sc. Orly Ernesto Torres Breffe

Tutores: Dr. Antonio Martínez García

Dra. Miriam Vilaragut Llanes

2005

Año de la Alternativa Bolivariana para las Américas

Introducción General

La ciencia de las protecciones eléctricas tiene poco más de un siglo de existencia. Los primeros dispositivos de protección surgen, por necesidad, al unísono con el primer Sistema Eléctrico de Potencia a finales del siglo XIX. A lo largo del siglo XX, se desarrollan sorprendentemente tanto los conceptos teóricos como la tecnología utilizada en los dispositivos de protección. El siglo XXI augura cambios aún más sorprendentes con modificaciones conceptuales y filosóficas para esta ciencia.

Los conceptos desarrollados a principios del siglo pasado, basados fundamentalmente en el empleo de la lógica booleana (protecciones convencionales), aún son la base de la filosofía empleada en la comprensión y el trabajo de los dispositivos digitales que se emplean en la actualidad. La introducción de los Métodos de Inteligencia Artificial amenaza con transformar radicalmente estos conceptos (protecciones inteligentes).

A finales del siglo XX tanto la modelación matemática y la simulación de los dispositivos de protección comenzaron a ser una necesidad. Los dispositivos digitales, basados en microprocesadores, han incorporado funciones de protección que evolucionaron en numerosas y necesarias combinaciones lógicas, si se comparan con los clásicos dispositivos de principios de siglo, aumentando las probabilidades de una selección y/o ajuste incorrectos.

En la actualidad, un Relé Digital Multifunción, además de constituir la protección integral de un elemento cualquiera del Sistema Eléctrico de Potencia, incluye los instrumentos de medición y control necesarios. Esto ofrece numerosas ventajas en cuanto a la reducción del tamaño de las instalaciones y el costo del mantenimiento, entre otras.

Situación problemática

Los fabricantes de Relés Digitales modernos precisan de verificar adecuadamente el correcto funcionamiento de cada una de las funciones de protección, medición y control, así como sus combinaciones, antes de introducirlos al mercado.

Constantemente se están publicando nuevas versiones del software de bajo nivel de estos dispositivos, ya sea para corregir determinado error encontrado, hacer determinada modificación o mejorar una u otra función de protección, medición o control.

Los técnicos que proyectan y/o instalan los sistemas de protecciones digitales, necesitan asegurar o garantizar la correcta selección de las funciones de protección y sus ajustes. De la misma forma, en caso de que se presenten incorrectas operaciones, el problema radica en determinar rápidamente las causas que las provocan.

Las numerosas combinaciones lógicas de las funciones de protección incluidas en los Relés Multifunción, así como la complejidad de las mismas, hacen de este proceso de selección, ajuste y búsqueda de las causas de operaciones incorrectas, un proceso lento y costoso.

Este problema, tanto desde el punto de vista del fabricante como de los técnicos y proyectistas, se incrementará con el empleo de los Métodos de Inteligencia Artificial en los dispositivos de protección. Estos métodos sencillamente no pueden ser analizados sin la ayuda de una computadora digital potente.

Problemas no resueltos

A finales del siglo XX las grandes compañías fabricantes de Relés comenzaron con la aplicación de Simuladores Digitales en Tiempo Real que les permitieron verificar el

comportamiento de sus Relés antes de introducirlos en el mercado, pero estos simuladores no están al alcance de los técnicos y proyectistas en los países subdesarrollados. Estos simuladores son de dos tipos: en un caso realizan la simulación del Sistema Eléctrico de Potencia para verificar en la práctica los Relés Digitales simulados y en el otro caso, hacen la simulación de las funciones del Relé Digital, utilizando modelos detallados del hardware, el cual comprueban con parámetros de averías generadas en Simuladores Analógicos.

Por otra parte, hasta el momento los software que permiten hacer una simulación del Sistema Eléctrico de Potencia y sus Protecciones (EMTP®) no incluyen las Técnicas de Inteligencia Artificial, para estos análisis se emplean otras herramientas informáticas por parte de los investigadores.

En nuestro país existe poco desarrollo en la modelación y simulación de protecciones eléctricas. En escasas ocasiones prácticas se utilizan software con modelos fasoriales y estos modelos no permiten hacer un análisis dinámico o transitorio de las instalaciones, el resto no utiliza la simulación. Escasos investigadores han estudiado la modelación y simulación transitoria de algunos dispositivos de protección, pero separando la operación del sistema de potencia y las protecciones eléctricas. No se reportan trabajos de aplicación de las Técnicas de Inteligencia Artificial en las protecciones eléctricas, por tanto no se pueden hacer valoraciones técnicas profundas de las investigaciones realizadas por otros autores. No se fabrican Relés de Protección ni se cuenta con las herramientas adecuadas para hacerlo.

Objetivo General

Crear una herramienta que permita simular el comportamiento de las funciones de protección de un sistema convencional o inteligente, que esté instalado o se pretenda instalar, a partir de los datos de averías simuladas (al unísono) en el propio Sistema Eléctrico de Potencia, que permita predecir las operaciones incorrectas en las protecciones y buscar sus soluciones.

Hipótesis

Si se crea una herramienta computacional que involucre no sólo la modelación y simulación de los dispositivos de protección sino incluso, de los elementos del Sistema Eléctrico de Potencia, se podrá facilitar el proceso de verificación del comportamiento de los sistemas de protección instalados o que estén en proyección.

Adicionalmente, esta herramienta virtual ayudará a investigadores relacionados con las protecciones eléctricas en la búsqueda de nuevas soluciones, tanto con la tecnología convencional como con la aplicación de los Métodos de Inteligencia Artificial.

La herramienta a crear debe ser capaz de conectarse, mediante tarjetas interfases, a señales eléctricas provenientes de simuladores analógicos o de instalaciones reales, para así verificar el comportamiento de los métodos de medición utilizados en las nuevas funciones de protección creadas.

Novedades del trabajo

1. La creación de una Biblioteca en el SIMULINK del MATLAB que incluya los dispositivos de protección más utilizados en la práctica, así como soportar los dispositivos basados en técnicas de inteligencia artificial y que permita predecir el

comportamiento ante fenómenos transitorios de los sistemas de protecciones completos a partir de la simulación del sistema eléctrico de potencia y sus protecciones eléctricas como una unidad.

2. Obtener los patrones de entrenamiento, entrenar una Red de Neuronas Artificiales para ser utilizada en específico en la protección de Transformadores de Potencia y que opere correctamente, para aquellos regímenes más difíciles de identificar, incluso con determinados defectos en los instrumentos de medición como la apertura de un conductor en el circuito secundario de los transformadores de corriente.

Tareas de la investigación:

Para hacer esta investigación el autor se propuso las siguientes etapas:

1. Investigar el desarrollo tecnológico y científico de las protecciones eléctricas desde su surgimiento, para lograr una fundamentación coherente del por qué del empleo de los simuladores digitales de protección, así como para hacer una valoración de los trabajos anteriores relacionados con la modelación de dispositivos de protección.
2. Investigar el desarrollo y las aplicaciones de las Técnicas de Inteligencia Artificial en las Protecciones Eléctricas.
3. Seleccionar la herramienta matemática o plataforma de programación y crear sobre ella la Biblioteca Virtual de Protecciones Eléctricas que permita simular al unísono un Sistema de Potencia cualquiera y sus protecciones.
4. Hacer la modelación matemática de los dispositivos secundarios convencionales mayormente utilizados en la práctica nacional.

5. Validar en tiempo real los modelos matemáticos creados, empleando tarjetas interfases, comparando su funcionamiento con el de los Relés reales.
6. Simular, con la herramienta creada, instalaciones importantes de protecciones eléctricas reales del país y verificar sus comportamientos. En caso de encontrar deficiencias concretas, verificar las soluciones antes de proponerlas, utilizando la propia herramienta.
7. Proponer un Relé Inteligente basado en Redes de Neuronas Artificiales y comprobar su funcionamiento comparándolo con una aplicación real de protecciones convencionales.

El documento se divide en 4 capítulos en los cuales se resuelven las tareas anteriormente enumeradas. El capítulo inicial se dedica a describir el estado actual de la modelación, simulación y comprobación de protecciones eléctricas en el ámbito internacional. En el segundo capítulo se desarrollan y comprueban los modelos de los dispositivos de protecciones creándose una Biblioteca Virtual de Protecciones Eléctricas. Estos modelos se emplean en la simulación de las protecciones eléctricas de instalaciones industriales reales del territorio de MOA (Cuba), lo cual se encuentra en el tercer capítulo. El último capítulo se dedica a la creación, entrenamiento y verificación de un Relé basado en Redes de Neuronas Artificiales para la protección de un transformador de potencia, mostrando sus ventajas con respecto a los Relés convencionales simulados y estudiados en el tercer capítulo.

Capítulo I. Actualidad en la Modelación y Simulación de Protecciones

Se presenta una panorámica del desarrollo actual de la modelación matemática de las protecciones eléctricas en la que se destaca el desarrollo de software tales como EMTP® y MATLAB®, para la simulación de Sistemas Eléctricos de Potencias con sus protecciones.

Se reconoce como modelo matemático de Relés de Protección al conjunto de ecuaciones que describen las características de operación de los mismos. Estas características pueden ser disímiles: corrientes versus tiempo, corriente diferencial versus corriente de retención, resistencia versus reactancia, entre otras.

Hoy día, los fabricantes de Relés simulan sus diseños y nuevos métodos de protección en las computadoras. Los modelos empleados en estos casos son modelos detallados del hardware, que resultarían inadecuados para la simulación del comportamiento de un Sistema Eléctrico de Potencia y sus protecciones.

Los modelos genéricos resultan suficientes para el análisis y prevención de las operaciones incorrectas en sistemas de protecciones eléctricas instalados o que se pretendan instalar en un Sistema Eléctrico de Potencia cualquiera. Estos modelos son mucho más representativos que los modelos fasoriales que utilizan los valores eficaces calculados mediante métodos matriciales.

En la modelación genérica de los dispositivos de protección se está empleando el método de caja negra, donde se relacionan matemáticamente las entradas y salidas de un dispositivo determinado. Esta variante, aunque es la más utilizada, presenta inconveniente

en la modelación de los Relés Electromecánicos; dado que en estos, influyen otras variables en su funcionamiento.

Los dispositivos basados en técnicas de inteligencia artificial, ampliamente investigados en la actualidad, pero de muy poca aplicación real o comercial, no pueden ser puestos en funcionamiento sin el uso de simuladores. Muchos de estos dispositivos aprenden o precisan de reglas de conocimientos, es decir, no necesitan de ser ajustados, por lo que el empleo de simuladores que brinden los datos necesarios para el aprendizaje, son imprescindibles.

Los actuales estudios de protecciones, basadas en Redes de Neuronas Artificiales (RNA), emplean el simulador EMTP® y crean, entrenan y comprueban la RNA utilizando MATLAB® u otras herramientas matemáticas.

Capítulo II. Modelación Matemática, Simulación y Comprobación de Dispositivos de Protección

Se construyeron los modelos matemáticos de varios dispositivos de protección y se simularon utilizando el software MATLAB/Simulink. En la Biblioteca Power System Blockset de Simulink existen varios modelos de los elementos del Sistema Eléctrico de Potencia (transformadores, generadores, líneas, motores, entre otros) así como algunos dispositivos de protección tales como los descargadores valvulares, interruptores de potencia, entre otros que se utilizan en la modelación matemática de un sistema de protecciones.

En este capítulo se construyeron modelos para Transformadores de Corriente dado que no existen en MATLAB, así como el modelo genérico de varios Relés de Protección de mayor utilización en la práctica nacional.

Modelación y simulación de Transformadores de corriente

El conjunto de ecuaciones utilizadas para la modelación matemática de los transformadores de corriente se muestra a continuación:

$$i'_P = \frac{i_P}{K_{TC}}$$

$$i_0 = i'_P - i_S$$

$$\psi = f(i_0)$$

$$I_S(s) = \frac{s}{(R_H + s \cdot L_H)} \psi(s)$$

Donde:

i_P : corriente del devanado primario

I_p : corriente del primario referida al secundario

I_s : corriente del devanado secundario

K_{TC} : relación de transformación de corriente

I_o : corriente de magnetización

ψ : concatenaciones totales de Flujo

R_H : resistencia equivalente calculada a partir de la suma de la resistencia interna del devanado secundario y la carga.

X_H : reactancia equivalente calculada a partir de la suma de la reactancia interna del devanado secundario y la carga.

s : operador de Laplace

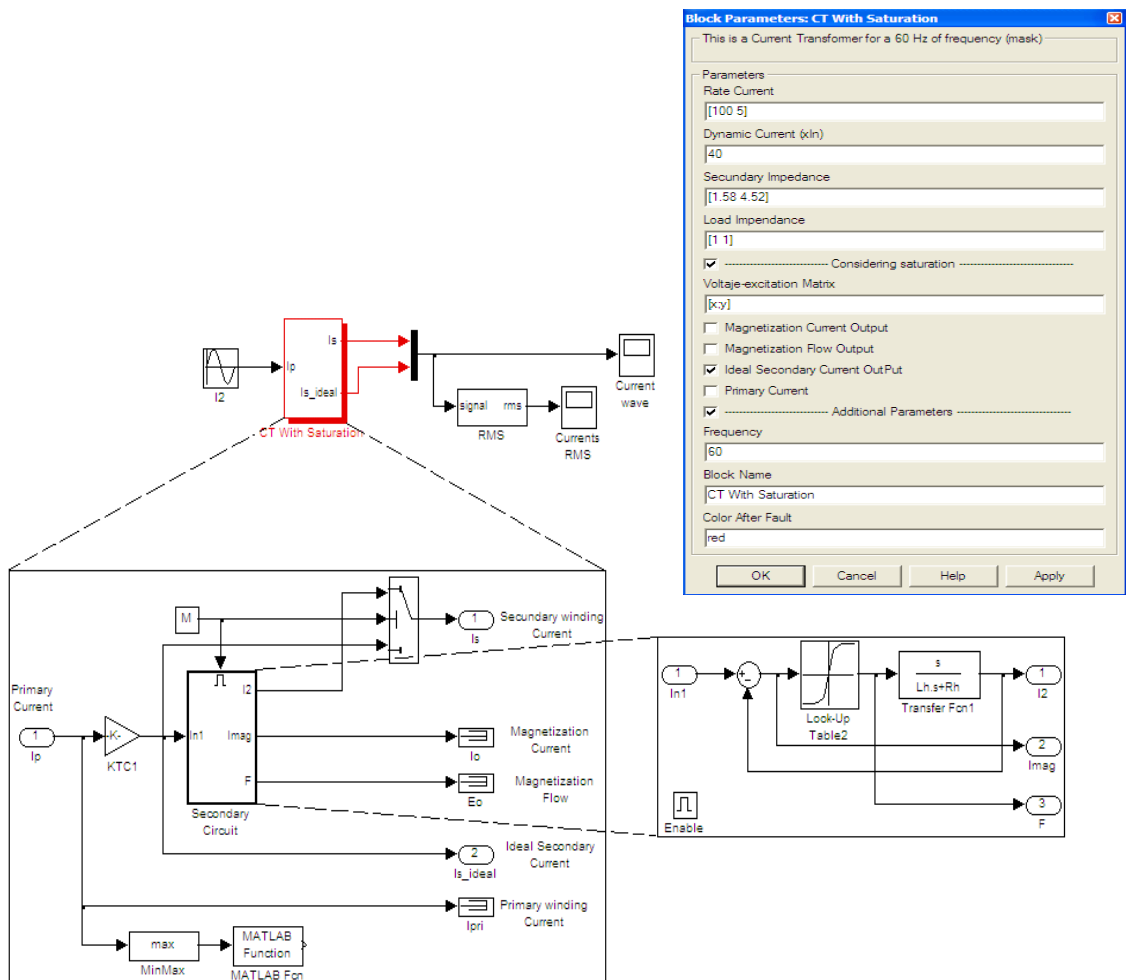


Figura 1.0. Modelo en Simulink para la simulación de un TC monofásico considerando la saturación a través de una sola curva de histéresis y la máscara dinámica para identificar el modelo con el TC que se desea estudiar.

Estas ecuaciones se obtuvieron con la aplicación de las Leyes de Kirchhoff al circuito equivalente del Transformador de Corriente. Son fundamentalmente ecuaciones diferenciales de primer orden, pero la relación entre las concatenaciones totales de flujo (ψ) y la corriente de magnetización es una relación no lineal, que representa los fenómenos de histéresis del núcleo.

Se construyó un modelo en Simulink (figura 1.0) para la simulación de los Transformadores de Corriente el cual utiliza una sola curva para simular la histéresis del núcleo, mediante una tabla de búsqueda (look up table). También se muestra la máscara dinámica creada para que el usuario introduzca los datos que identifican el Transformador de Corriente que se desea simular.

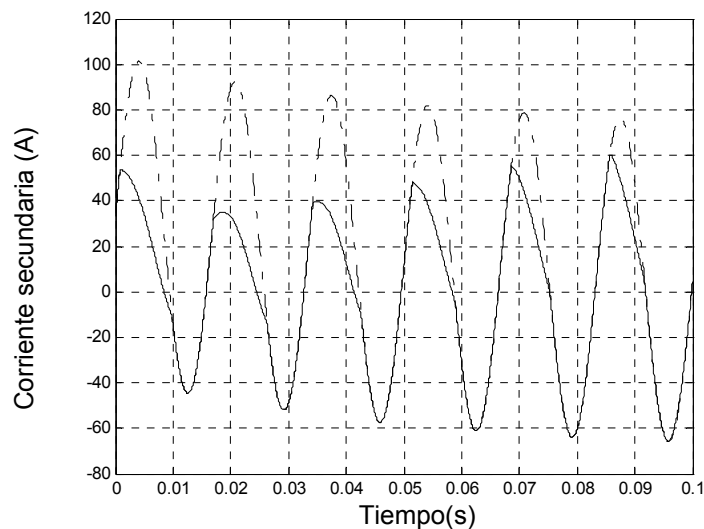


Figura 2.0. Corriente ideal (línea discontinua) y real (línea continua), simuladas con el modelo del TC de 100/5, $R = 1.58$ y $X = 4.52$ utilizando la función tangencial hiperbólica para simular la alinealidad del núcleo. Devanado secundario en cortocircuito. La corriente simulada es de 10 veces la nominal.

También se creó un modelo de transformador de corriente trifásico, construido a partir de la unión de tres transformadores de corriente monofásicos, en el que adicionalmente a la

curva de saturación del núcleo se permite cambiar la conexión de los devanados del secundario. En la figura 2.0 se muestra los resultados de la simulación de un TC monofásico con corriente mayores a 10 veces la nominal y con componentes de directa, muy frecuentes en los cortocircuito de los sistemas eléctricos de potencia.

En la figura 3.0 se muestra la dependencia de la deformación de la onda de la corriente en el secundario con relación a la componente resistiva o reactiva de la impedancia equivalente del circuito secundario del Transformador de Corriente.

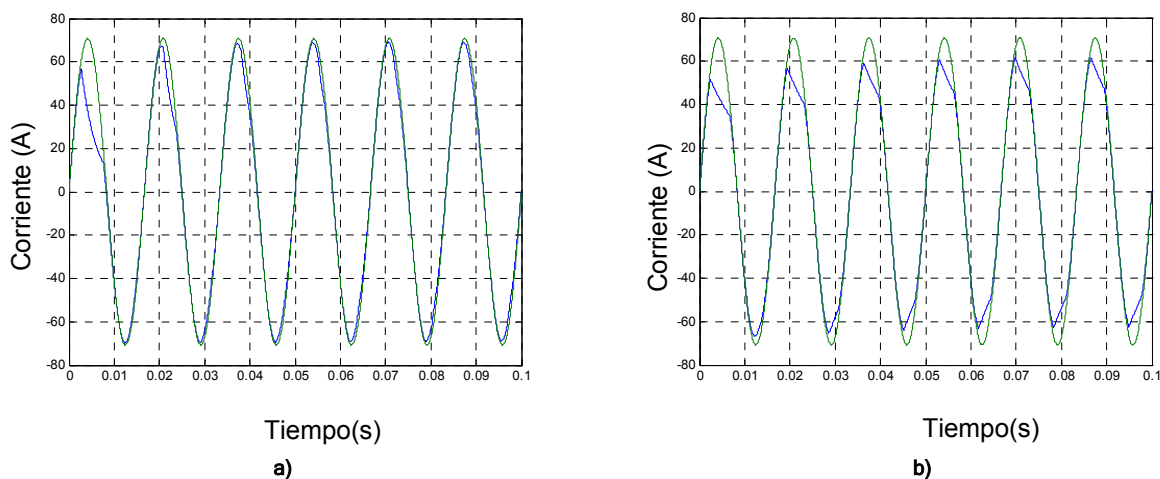


Figura 3.0. Corrientes secundarias, ideal y real simulada, de un TC, con una intensidad de 10 veces el valor nominal. Cargas **a)** resistiva pura **b)** mayormente inductiva. El TC simulado posee los mismos datos que el utilizado en la figura 2.0

Cuando la componente resistiva es mayor (figura 3.0 a), la deformación es visualmente menor y dura mucho menos ciclos si se compara con la corriente cuando la impedancia es mayormente inductiva (figura 3.0 b). Adicionalmente se comprobó la validez de los modelos comparándolos con los resultados de dos ensayos a Transformadores de Corriente reales y las formas de onda son muy similares. Como curva de excitación se utilizó la función tangencial hiperbólica.

Modelación y Simulación de Relés de protección

Los modelos de los Relés de Protección se realizaron según el método de caja negra, tomando como señal de entrada los parámetros eléctricos que utilizan en su funcionamiento y como señal de salida, el estado del contacto de disparo. La salida “0” significa que el dispositivo virtual (modelo) ha operado.

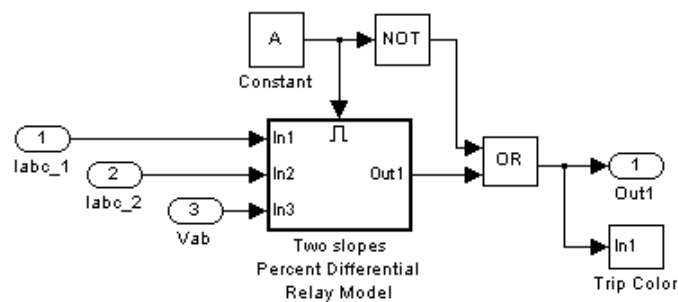


Figura 4.0. Modelo en Simulink para un Relé de Porcentaje Diferencial de doble rampa, pero representa la generalidad de los modelos creados.

En la figura 4.0 se muestra el modelo de un Relé Porcentaje Diferencial donde se pueden observar las características fundamentales de la modelación empleada en Simulink para cualquier Relé. Las salidas del modelo son controladas por el estado de la variable A, la cual es modificada por el usuario en las máscaras dinámicas que se crearon para este fin. En este caso, el modelo utiliza tres señales de corriente y una salida. El bloque Trip Color permite cambiar el color del modelo durante la modelación, si el dispositivo modelado ha operado.

Se modelaron los siguientes dispositivos, que se enumerarán en forma general utilizando la numeración ANSI/IEEE:

- Relés de Magnitud
 - Relés de Sobrecorriente (50 y 51)
 - Relés de Baja y Alta Tensión (27 y 59)
 - Relés de Baja y Alta Frecuencia (81 U/O)
- Relés Direccionales (67 y 32)
- Relés de Distancia (21)
- Relés Diferenciales (87)

Los Relés de magnitud son aquellos que utilizan una sola variable o parámetro eléctrico para su funcionamiento. Dentro de estos se modelaron varios tipos de Relés de Sobrecorriente, Relés de Sobrecorriente de Tiempo Inverso y Tiempo Definido. Los Relés de tiempo definido con tiempo cero, imitan los Relés de Sobrecorriente instantáneos.

Se crearon los siguientes modelos de Relés de Sobrecorriente:

- Relés de fase de Tiempo Definido e Inverso.
- Relés de Secuencia Cero de Tiempo Definido e Inverso.
- Relés de Secuencia Negativa de Tiempo Definido e Inverso.
- Relés con Restricción por Tensión.

Estos Relés pueden ser seleccionados en la biblioteca y ser instalados en un modelo de Power System Blockset de Simulink, para ser una simulación de una instalación real cualquiera. Todos los Relés de Sobrecorriente modelados son de amplia utilización en la práctica nacional e internacional. Las curvas de tiempo contra corriente modeladas responden a los estándares ANSI, IAC, IEC.

Se construyeron los modelos de varios Relés Direccionales, tanto los Relés Direccionales de comparación de fase, como los Relés Direccionales de potencia. Adicionalmente se incluyen los Relés Direccionales de Sobrecorriente (67). En sus variantes monofásicas y trifásicas, así como los Relés Direccionales de Secuencia Cero. Las ecuaciones que permitieron modelar estos Relés son las siguientes:

$$\text{Cos}(\varphi_{sm} - \varphi_r) = \text{Cos}(\varphi_{sm} - (\varphi_u - \varphi_i)) > 0$$

$$Pr = Ur \cdot Ir \cdot \text{Cos}(\varphi_{sm} - \varphi_r)$$

donde:

φ_r : ángulo de desfase entre las señales de tensión y corriente medidas por el Relé Direccional.

φ_u : ángulo de desfase de la tensión medido por el Relé Direccional.

φ_i : ángulo de desfase de la corriente medida por el Relé Direccional

φ_{sm} : ángulo de máxima sensibilidad ajustado en el Relé Direccional o característico del mismo.

Ur : valor eficaz de la tensión medida por el Relé Direccional.

Ir : valor eficaz de la corriente medida por el Relé Direccional.

Pr : potencia medida por el Relé Direccional.

Modelos de Relés de Distancia también fueron incluidos en la biblioteca creada. Se pueden simular dos tipos fundamentales de Relés de Distancia, basado en un modelo de comparación de fase, los del tipo MHO y los Elípticos. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\underline{Z}_2 = \frac{Ur}{Ir}$$

$$\underline{Z}_{op} = \underline{Z}_2 - \underline{Z}_1$$

$$\underline{Z}_{pol} = \underline{Z}_2$$

Donde:

\underline{Ur} : valor complejo de la tensión medida en el Relé de Distancia.

\underline{Ir} : valor complejo de la corriente medida en el Relé de Distancia.

\underline{Z}_1 : valor complejo de la impedancia ajustada en el Relé de Distancia.

\underline{Z}_2 : valor complejo de la impedancia medida en el Relé de Distancia.

\underline{Z}_{op} : impedancia de operación calculada en el Relé de Distancia.

\underline{Z}_{pol} : impedancia de polarización calculada en el Relé de Distancia.

Igualmente se simularon varios tipos de Relés Diferenciales. Los Relés Diferenciales de Sobrecorriente, así como los de Porcentaje Diferencial de una y dos rampas, con diferentes comportamiento en dependencia de las corrientes de retención. Las ecuaciones para modelar un Relé Diferencial de 2 rampas es la siguiente:

$$I_{op} = |\underline{I}_1 - \underline{I}_2|$$

$$I_{ret} = \text{máximo}(|\underline{I}_1|, |\underline{I}_2|)$$

Si $I_{ret} \leq 1 pu$ y $I_{op} > I_{s1}$ entonces opera

Si $1 pu < I_{ret} < I_{s2}$ y $I_{op} > K_1 \cdot I_{ret}$ entonces opera

Si $I_{ret} \geq I_{s2}$ y $I_{op} > K_2 \cdot I_{ret}$ entonces opera

Donde:

I_{op} : valor eficaz de la corriente diferencial calculada en el Relé Diferencial.

I_{aj} : valor eficaz de la corriente preestablecida en el Relé Diferencial por encima de la cual opera.

\underline{I}_1 : valor complejo de la corriente medida por el Relé Diferencial en un terminal del elemento protegido.

\underline{I}_2 : valor complejo de la corriente medida por el Relé Diferencial en el otro terminal del elemento protegido.

I_{ret} : valor eficaz de la corriente de retención del Relé.

K_1 : coeficiente de retención ajustable en el Relé.

I_{s1} : corriente ajustable que establece el mínimo valor de corriente de operación del Relé.

I_{s2} : corriente de retención del Relé Diferencial por encima de la cual se cambia a la segunda rampa

K_2 : coeficiente de retención de la segunda rampa

Validación práctica los modelos de Relés de Protección

Para validar el funcionamiento de los Relés de Protección creados, se utilizó la posibilidad de MATLAB para el trabajo en tiempo real a través del equipo dSPACE, que es una interfase para la adquisición de datos. En la figura 6.0 se muestra un diagrama monolineal de la instalación utilizada.

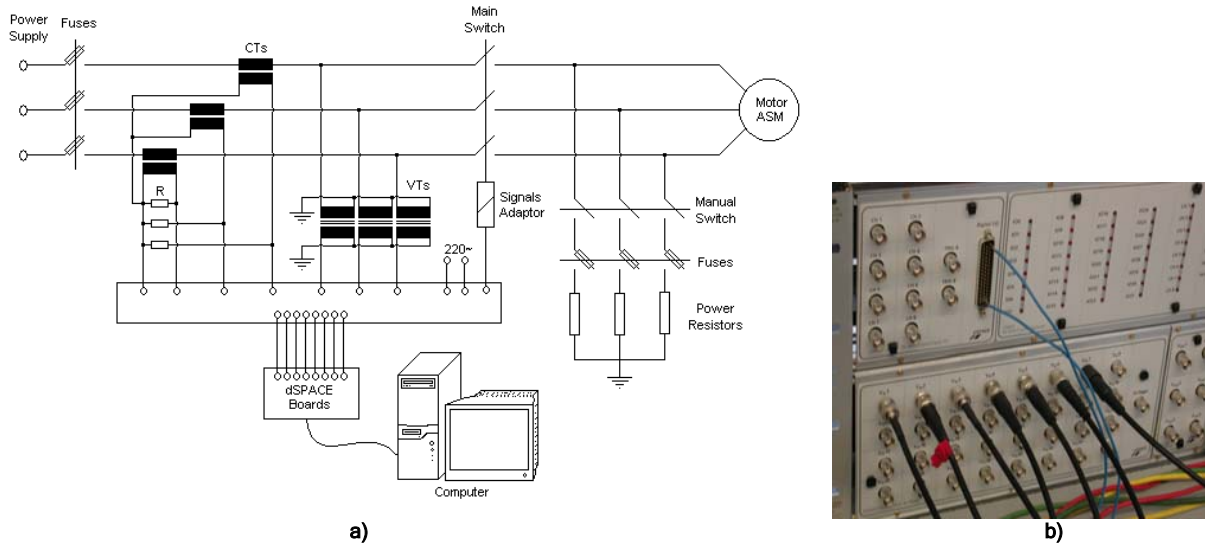


Figura 6.0. a) Esquema simplificado del experimento para la protección digital de un motor de inducción. b) Vista frontal del dSPACE

Se experimentó con varios tipos de defectos y averías en el motor: cortocircuitos multifásicos y monofásicos a tierra en el motor, sobrecargas simétricas y asimétricas, baja y sobre tensión, entre otros, los cuales se repitieron más de 20 veces cada uno. Los resultados de la operación de la protección computarizada mostraron que los modelos simulados en MATLAB responden como lo hacen sus homólogos en la práctica. En la figura 7.0 se muestra la forma de onda de la corriente del estator durante el proceso de arranque y durante un cortocircuito bifásico en el terminal del motor que es desconectado.

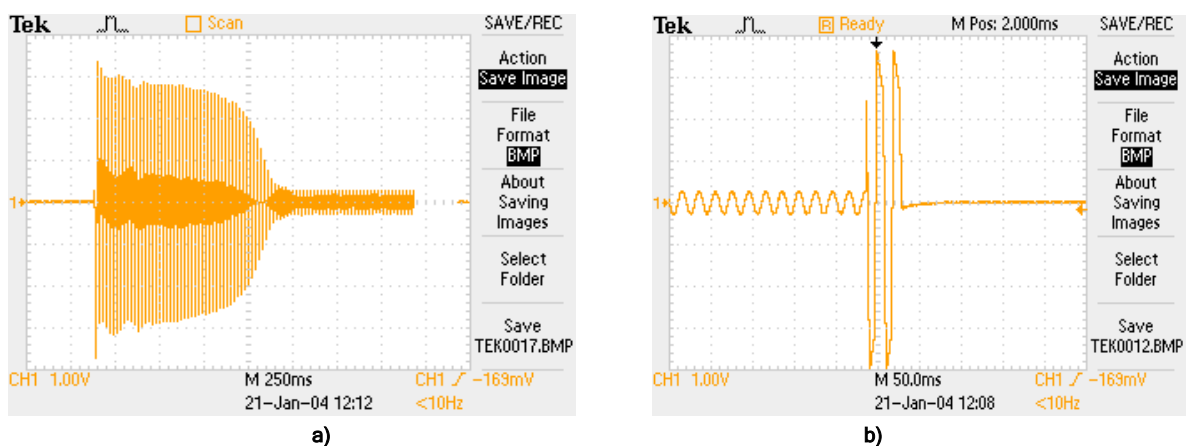


Figura 7.0. Imagen capturada desde el osciloscopio digital, que presenta las corrientes en la fase A del motor referida al secundario del TC a) durante el arranque b) durante un fallo bifásico a tierra que involucró las fases A y C.

Capítulo III. Simulación de las Protecciones Convencionales para Transformadores de Potencia

En este capítulo se simulan las protecciones instaladas en dos transformadores de potencia diferentes correspondientes a subestaciones industriales reales. Los casos de estudios corresponden con los Transformadores de Potencia de las empresas niquelíferas Comandante Pedro Soto Alba y Comandante Ernesto Che Guevara.

En ambos Transformadores de Potencia, que tienen características diferentes en cuanto a la potencia nominal, la conexión del neutro, entre otros aspectos, están siendo protegidos por Relés basados en microprocesadores de la firma General Electric Power Management. Los Relés SR-745 (protección integral de transformadores) y SR-750 (protección integral de alimentadores) están interconectados para proteger a los transformadores contra todos los defectos tanto interno como externos a los mismos.

Caso de estudio I. Protección del Transformador de Potencia perteneciente a la Empresa Comandante Pedro Soto Alba (PSA).

En la figura 8.0 se muestra un diagrama monolineal de las funciones de protección instaladas en los Relés SR-745 y SR-750. Este diagrama se construyó a partir de los ficheros de ajustes extraídos de los Relés Digitales, los planos de instalación y las entrevistas con los técnicos y especialistas de la empresa.

A partir de los niveles de corrientes de cortocircuitos y los datos generales de la instalación, se modeló el Sistema Eléctrico de Potencia y sus protecciones. Utilizando los modelos de Relés de la Biblioteca Virtual de Protecciones Eléctricas creada en MATLAB/Simulink, se

modelaron las funciones de protección de los Relés Digitales Multifunción SR-745 y SR-750.

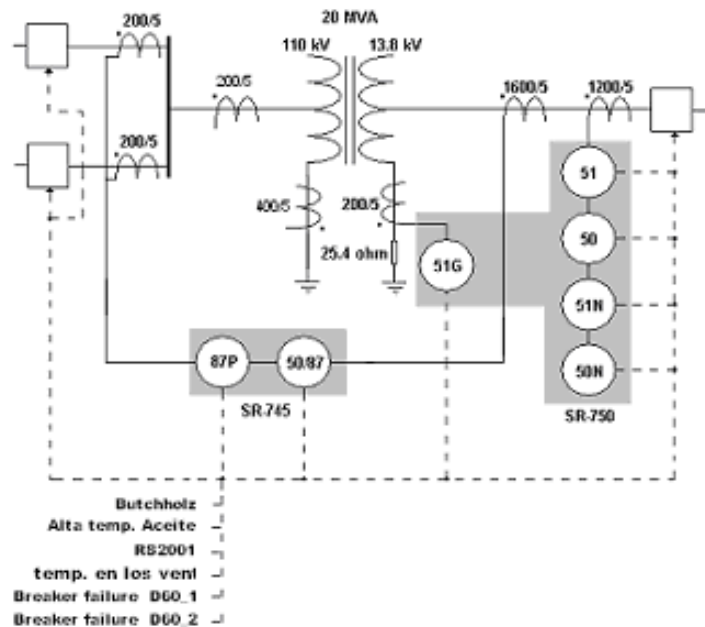


Figura 8.0. Esquema simplificado del sistema de protección del Transformador de la Subestación en la empresa Comandante Pedro Soto Alba, utilizando la simbología ANSI.

En la figura 9.0 se muestra el modelo creado en Simulink para la simulación de las protecciones eléctricas en el transformador de potencia de la PSA. Se simularon muchas averías tanto internas como externas, se simuló la magnetización durante las condiciones más severas, tanto por el primario como por el secundario, entre otros muchos regímenes para verificar el comportamiento de las protecciones instaladas.

Luego de realizada la simulación, se detectaron las siguientes dificultades:

1. Ajustes incorrectos en la función de Porcentaje Diferencial
2. Ajustes incorrectos en la función Diferencial Instantánea
3. Demoras excesivas para la acción contra cortocircuitos externos en el secundario

4. No existe protección contra Sobretensiones

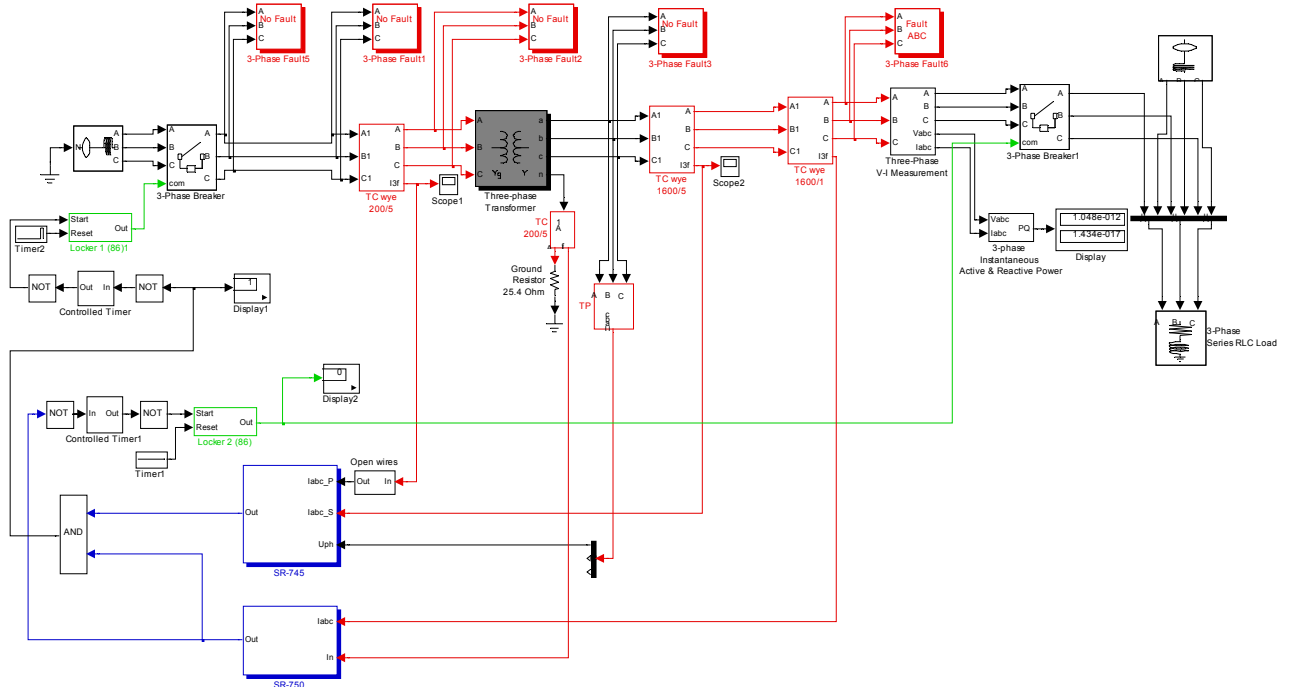


Figura 9.0. Esquema en Simulink para el análisis del comportamiento del transformador de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba.

Las dificultades en la función de Porcentaje Diferencial se refieren a tres aspectos relacionados con la corriente mínima, el nivel (%) de la segunda rampa y el mecanismo de bloqueo por armónicos. La corriente mínima está ajustada a un valor muy pequeño y se demuestra que este ajuste provoca la activación de esta función cuando un conductor del secundario de uno de los TCs está abierto y la carga aumenta por encima del 30% de la nominal. El ajuste relacionado con la segunda rampa es igualmente elevado y se demuestra que provoca la insensibilidad de la función de protección para cortocircuitos internos, si el interruptor del secundario está abierto. También se propone activar el mecanismo de bloqueo por segundos armónicos solo durante la magnetización, evitando con esto demoras de las protecciones si los cortocircuitos internos saturaran a los TCs.

Todas las deficiencias encontradas fueron demostradas utilizando regímenes de máximas y mínima sensibilidad a través de la simulación. Las recomendaciones no solo se limitaron al reajuste de algunas funciones de protección sino incluso a la selección de otras funciones que evitaran los retardos de tiempos. De la misma forma se ofrecieron otras sugerencias en aspectos relacionados con el trabajo y la función de los Relés de la familia SR.

Caso de estudio II. Protección del Transformador de Potencia perteneciente a la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECG).

El esquema de protecciones instalado en el Transformador de Potencia de esta empresa fue facilitado por los técnicos (especialistas) de la misma. Las conexiones del neutro en este caso son diferentes, así como existen más funciones activadas en cada Relé Multifunción. Se hicieron simulaciones a diferentes regímenes de los que se conocen que pueden afectar el correcto funcionamiento de las funciones de protección activadas.

Luego de simulado el sistema y sus protecciones, se descubrieron las siguientes dificultades:

1. No existe protección contra fallas a tierra en el devanado primario si el neutro está desconectado.
2. Incorrecta selección de las funciones de protección contra fallas a tierra en el devanado secundario.
3. Ajustes incorrectos en la función de Porcentaje Diferencial.
4. Ajustes incorrectos en la función Diferencial instantánea
5. No existe protección contra fallas multifásicas externas en el secundario
6. No existe protección contra Sobretensiones.

De la misma forma en que se realizó para el caso de estudio 1, todas las dificultades fueron demostradas a través de la simulación y se ofrecieron variantes para cada una de ellas. Igualmente cada una de las variantes fue verificada en las condiciones más severas de operación. En cada caso se ofrecieron los valores de ajustes correspondientes.

En este capítulo se evidenció la necesidad del empleo de la simulación adecuada para determinar las causas de las incorrectas operaciones de los sistemas de protecciones que ya están instalados, así como para proponer mejoras de forma rápida y eficaz evitando que se repitan en el futuro. Adicionalmente se muestra la eficacia del empleo de la Biblioteca Virtual de Protecciones Eléctricas creada sobre MATLAB/Simulink para la validación y comprobación de sistemas complejos de protecciones eléctricas, aún con la utilización de Relés Multifunción.

Capítulo IV. Protección de un Transformador de Potencia utilizando Redes de Neuronas Artificiales

En este capítulo se muestra la propuesta de un Relé basado en Redes de Neuronas Artificiales para la protección de un Transformador de Potencia, que no tiene las dificultades que aún muestran las protecciones convencionales basadas en la lógica booleana.

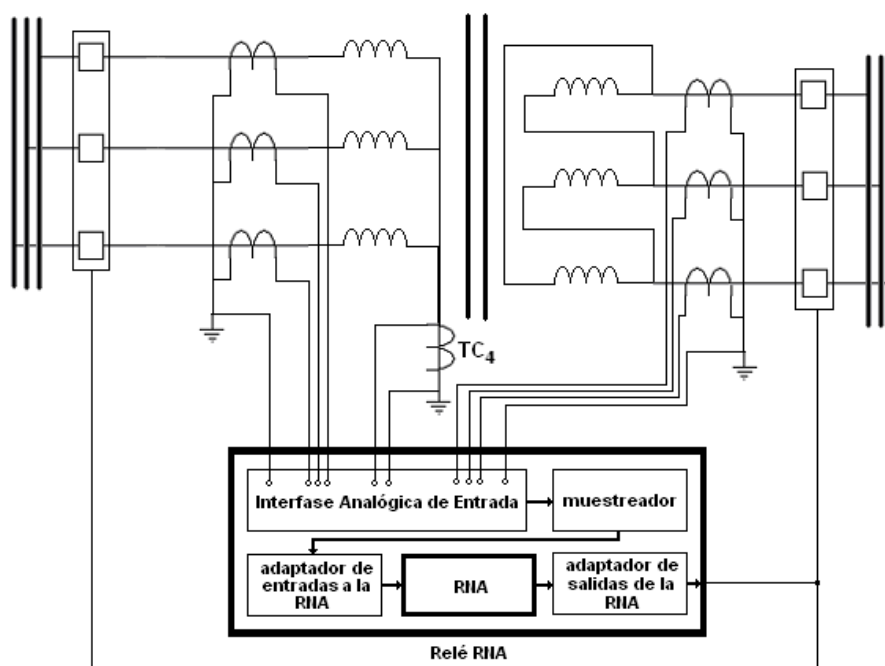


Figura 10.0. Diagrama en bloques de los componentes del Relé basado en RNA

Se escoge un Relé para la protección del transformador de potencia considerado en el caso de estudio II del capítulo III, que tiene el devanado del primario conectado en estrella y el secundario está conectado en delta. El Relé propuesto se muestra en la figura 10.0, el cual está conectado a los transformadores de corriente de las fases de ambos devanados y el neutro. Como se observa, la RNA es solo un bloque dentro del Relé.

Estructura de la RNA

En este trabajo se hizo énfasis fundamentalmente en los últimos 3 bloques, lográndose a través de subrutinas apropiadamente escritas en MATLAB. El bloque RNA está representado por una RNA de 2 capas ocultas, con 35 neuronas en la capa de entrada y 3 neuronas en la capa de salida, con la que se puede diferenciar entre un régimen normal (RN) un fallo interno (FI) o un fallo externo (FE). La primera capa oculta se construyó con 18 neuronas con función tangencial sigmoideal, al igual que la segunda capa oculta con 10 neuronas, pero en la capa de salida se utilizó la función logarítmica sigmoideal. Se empleó una Red multicapa con propagación hacia delante (MFNN). Se empleó una ventana de datos de 5 muestras para conformar la entrada de la RNA, a una frecuencia de muestreo de 960 Hz (16 muestras por ciclos)

Entrenamiento de la RNA

El entrenamiento se realizó a través de regímenes simulados en un modelo en MATLAB/Simulink, utilizando el método de entrenamiento supervisado con propagación del error hacia atrás. Las simulaciones fueron ejecutadas mediante el método ode23tb (stiff/TR-BDF2) con intervalos de temporización variables, pero que lograban un muestreo mucho más rápido que $6\mu\text{s}$. Cada régimen fue almacenado en ficheros con nombres codificados y almacenados en listas (celdas) de variables.

Se utilizaron 2652 regímenes entre cortocircuitos externos e internos que involucraron todas las fases, procesos de magnetización, regímenes normales, con ambos interruptores conectados o solo uno de ellos, el neutro desconectado o conectado y diferentes

conductores del secundario de los TCs en estado abierto. Esto generó un entrenamiento de 678912 patrones.

Luego de entrenada la RNA se comprobó su operación para regímenes diferentes a los que fue entrenada y su comportamiento fue satisfactorio. En ningún caso la red mostró resultados inadecuados o diferentes a la condición comprobada.

En la figura 11.0 se muestra el comportamiento de la RNA para el caso de un cortocircuito interno en el transformador que provoca la saturación profunda (errores de hasta el 20%) del TC del primario. Este caso puede provocar demoras excesivas en las protecciones convencionales dado que la onda deformada de la corriente del secundario, puede ser fuente de armónicos de segundo orden que puedan bloquear la operación de la función de Porcentaje Diferencial. En este caso, la RNA muestra claramente una salida indicando un cortocircuito interno sin demoras, después de leer 5 muestras de las señales de corriente de cada fase.

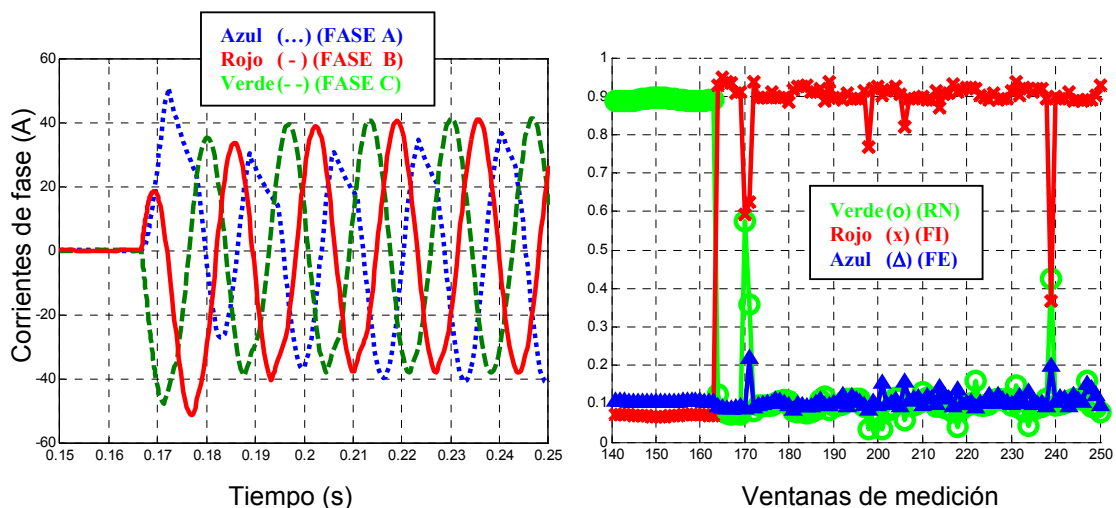


Figura 11.0. Ensayo de la RNA para un régimen normal seguido por cortocircuito trifásico interno, en condiciones de máxima generación que provocó la saturación profunda de los TCs del primario. a) Corrientes en las fases del primario, b) Salidas de la RNA para este ensayo.

En la figura 12.0 se muestra el comportamiento de la RNA para otro caso típico que puede provocar el incorrecto funcionamiento de las protecciones convencionales, un cortocircuito monofásico en el primario justo en el momento de la magnetización. En el proceso de magnetización se genera una cantidad de armónicos que puede demorar la operación de la protección de Porcentaje Diferencial. En este caso la RNA muestra claramente una salida indicando Fallo Interno (x FI).

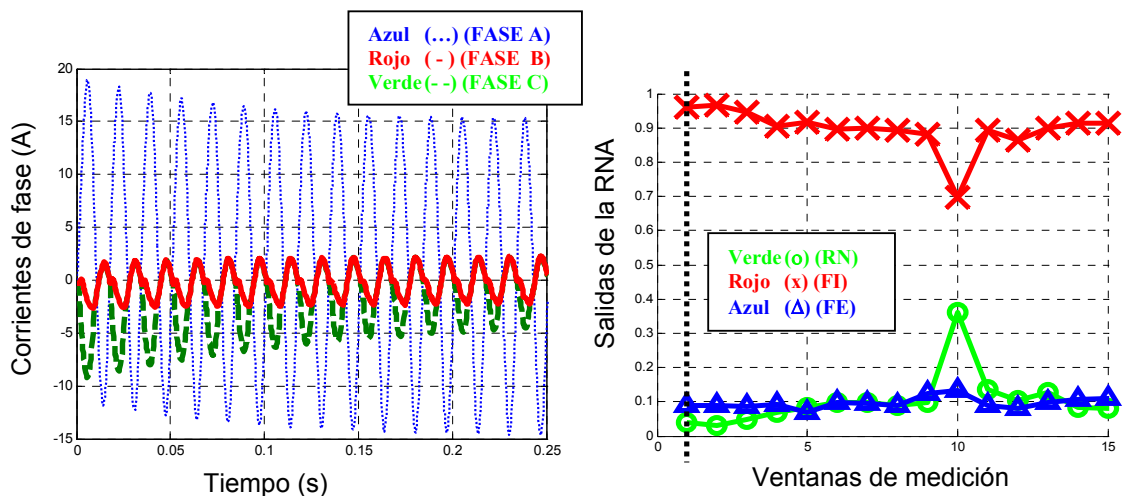


Figura 12.0 Ensayo de la RNA para un fallo monofásico en fase A, interno en el devanado primario, con el neutro conectado a tierra justo en el momento de la energización para las condiciones de mayor generación de armónicos. a) Corrientes referidas al secundario de los TC, b) Salidas de la RNA.

Un caso seguro de operación incorrecta de las protecciones convencionales son las sobrecorrientes si existe un conductor en el devanado secundario de los transformadores de corriente abierto. En la figura 13.0 se muestra la operación de la RNA para el caso de un cortocircuito externo a máxima generación, pero la fase A del secundario de los transformadores de corrientes está abierta. La salida de la RNA muestra claramente un cortocircuito externo.

Muchos fueron los casos complejos en los que fue comprobada la RNA y en todos los casos se comportó correctamente indicando el tipo de régimen que se estaba

comprobando. Incluyendo los casos de apertura de conductores en el secundario de los TCs que provoca inevitablemente disparos incorrectos en las funciones diferenciales.

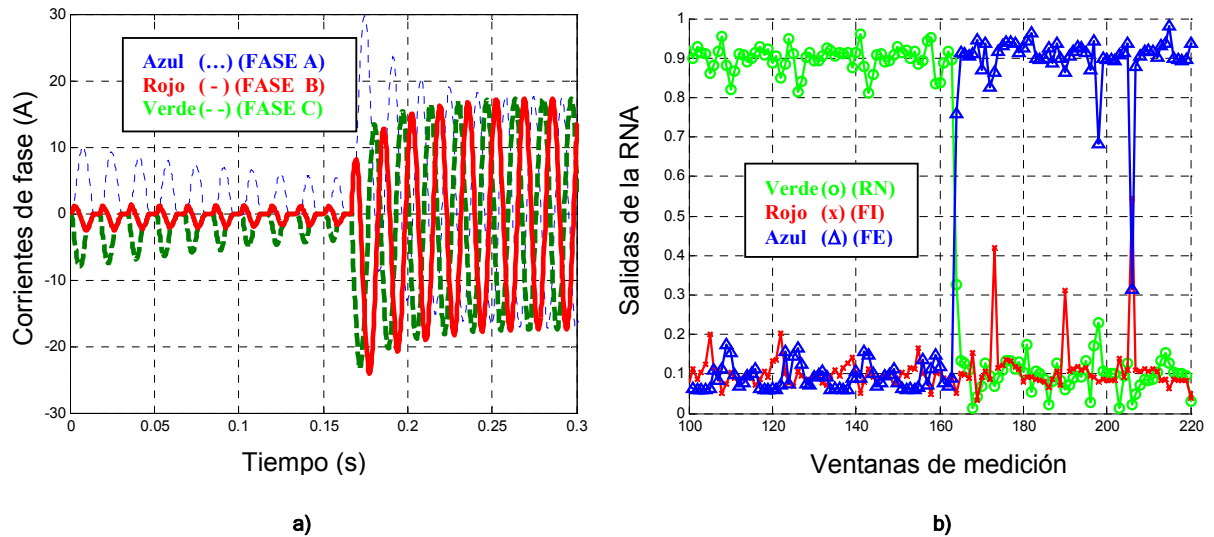


Figura 13.0. Ensayo de la RNA para una un cortocircuito trifásico externo en el secundario a 10 ciclos después de energizado el transformador de potencia, con la fase A del secundario de los TC, abierta. **a)** Corrientes en las fases, la fase A está solo mostrada virtualmente (línea de puntos). **b)** Salidas de la RNA para este ensayo.

En este capítulo se demuestra que los Relés basados en RNA son superiores a los convencionales, dado que son más eficaces y pueden ser entrenados para las condiciones más complejas y severas que pudieran provocar incorrectas operaciones en los dispositivos convencionales. Adicionalmente se corrobora que MATLAB es una herramienta adecuada para la implementación de la Biblioteca Virtual de Protecciones Eléctricas, dado que posee herramientas para el tratamiento de protecciones que utilizan las técnicas de Inteligencia Artificial.

Conclusiones Generales

- De los programas simuladores digitales analizados, MATLAB\Simulink fue seleccionado y demostró ser un programa informático adecuado para la simulación de modelos matemáticos de los dispositivos de protecciones tanto primarios como secundarios más empleados en la práctica nacional y además permite crear dispositivos virtuales basados en las Técnicas de Inteligencia Artificial.
- Los modelos matemáticos creados que conforman la Biblioteca Virtual de Protecciones en MATLAB\Simulink, demostraron operar iguales a sus homólogos prácticos, utilizando para ello las tarjetas interfases del sistema dSPACE en la protección computarizada de un motor de inducción.
- La aplicación de la Biblioteca Virtual creada por el autor permitió detectar numerosas deficiencias en las instalaciones de protección de los Transformadores de Potencia de las Empresas Comandante Pedro Soto Alba y Comandante Ernesto Che Guevara, así como proponer variantes de soluciones para cada deficiencia encontrada.
- Se confeccionó un Relé Inteligente para la protección del Transformador de Potencia de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. El Relé basado en una Red de Neuronas Artificiales con ventana de tiempo, con un total de 35 neuronas en la capa de entrada, 18 en la primera capa oculta, 10 en la segunda y con 3 neuronas de salida. Este Relé demostró la capacidad de diferenciar entre los regímenes normales, fallos internos y externos, incluyendo la apertura de un conductor en el circuito diferencial secundario, cuestión no analizada con anterioridad por otro autor.

Recomendaciones

Finalmente se recomienda lo siguiente:

- Continuar las investigaciones para introducir otros modelos en la Biblioteca Virtual representativos de nuevas funciones de protección como las Distancias dinámicas y las Direccionales con memoria, así como modelos de Relés basados en Redes de Neuronas Artificiales para la protección de redes y generadores eléctricos contra fallas monofásicas en sistemas aislados, entre otros.
- Continuar trabajando y perfeccionando la modelación matemática de los Transformadores de Corriente de tal forma que se pueda añadir a la Biblioteca Virtual, un modelo de Transformador de Corriente genérico con un proceso de histéresis que permita representar todos los fenómenos que ocurren en la realidad.
- Lograr una modelación matemática menos rigurosa de los elementos del Sistema Eléctrico de Potencia con el fin de ganar en velocidad de modelación y reducir las exigencias del hardware de la PC que se utilice.
- Adquirir un sistema dSPACE para fomentar la creación en el país de nuevos Relés Digitales con novedosas funciones de protección e iniciar la producción nacional de Relés Digitales Inteligentes.
- Utilizar la herramienta creada en la verificación de los sistemas de protección digitales multifunción, instalados en el Sistema Eléctrico de Potencia del país.

Bibliografía del autor:

1. TORRES, O. E. Et al. Simulación de Transformadores de Corrientes en MATLAB/SIMULINK. *Ingeniería Energética*. 1(3), 2004.
2. TORRES , O. E. Protección Computarizada de un motor de inducción utilizando el Sistema dSPACE y una biblioteca de protecciones eléctricas hecha en MATLAB/SIMULINK. *Ingeniería Energética*. 1(3), 2004.
3. DÍAZ, R. Y. Relé para la protección de un Transformador de Potencia basado en Redes Neuronales Artificiales. Orlys E. Torres Breffe (Tutor). Trabajo de Diploma. *ISMM. Dr Antonio Núñez Jiménez*, 2004._69h.
4. TORRES, O. E. TURSCHNER, D. Protección Computarizada de Motores. *IV Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales y el Desarrollo Sostenible: ELECMEC'2004._MOA*, 2004.
5. MULET, C. Relé para la Protección de Transformadores de Potencia basado en Lógica Difusa. Orlys E. Torres Breffe (Tutor). Trabajo de Diploma. *Instituto Superior Minero Metalúrgico*, 2004. 67p.
6. ORDÓÑEZ, J. G. Simulación de Transformadores de Corriente. Orlys Ernesto Torres Breffe (Tutor). Trabajo de Diploma. *Instituto Minero Metalúrgico*, 2004. 113p.
7. TORRES, O. E. Protección de Generadores Eléctricos. Conferencia para ingenieros electricistas. *Instituto Superior Minero Metalúrgico*, 2003. 13p.
8. TORRES, O. E. Protección de Motores Eléctricos. Conferencia para ingenieros electricistas. *Instituto Superior Minero Metalúrgico*, 2003. 15p.

9. TORRES, O. E. Protección de Transformadores Eléctricos. Conferencia para ingenieros electricistas. *Instituto Superior Minero Metalúrgico*, 2003. 13p.
10. TORRES, O. E. Dispositivos Virtuales, Alternativa para los costosos Laboratorios de Protecciones Eléctricas. *I Taller sobre la utilización de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) en la enseñanza de la Ingeniería Eléctrica* _La Habana. jun. 2003.
11. HERRERA, J. Librería Virtual de Protecciones Eléctricas en MATLAB. Orlys E. Torres Breffe (Tutor). Trabajo de Diploma. *Instituto Superior Minero Metalúrgico*, 2001. 70p.
12. TORRES, O. E. CORDOVÉZ, A. R. Selección y ajuste de la protección especial para las barras colectoras principales de la Che Guevara. *X Simposio del Centro de Investigaciones de la Literitas*_ MOA, 2001.
13. TORRES, O. E. Librería Virtual de Protecciones Eléctricas en “Power System Blockset” de MATLAB 5.2 (Simulink). *Conferencia Científica Internacional FIE 2000*_ Santiago de Cuba, 2000.
14. TORRES, O. E. LUCOBA, C. Relés Virtuales vs Relés Reales. *IX Simposio de Ingeniería Eléctrica: SIE'99*_ Santa Clara, 1999.
15. TORRES, O. E. Laboratorio Virtual de Protecciones Eléctricas en LabView. *XIV Conferencia Científico Metodológica del ISMM* _Moa, 1999.

Bibliografía:

1. KEZUNOVIC, M. GOU, Y. Modeling and Simulation of Power Transformer Faults and Related Relay Behavior. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000,15(1):44-50
2. KEZUNOVIC, M. et al. Bibliography of Relay Literature 1996. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 13(1).pp. 78-84, Jan. 1998.
3. KEZUNOVIC, M. KASZTENNY, B. GALIJASEVIC, Z. User-Friendly, Open-System software for teaching protective relaying application and design concepts. *IEEE Transaction on Power System*, 18(3), agt. 2003, pp. 886-992.
4. KEZUNOVIC, M. Fundamentals of Power System Protection. Academic Press, The Electrical Engineering Handbook, Chapter on Electric Power Systems, Wai-Kai Chen, pp. 787-804, *Academic Press*, 2005.
5. DEMETRIOUS, A. et al Mathematical Models for Current, Voltage and Coupling Capacitor Voltage Transformers. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 15(1) jan. 2000.
6. CHERNOBROVOV, N. Protective Relaying._ Moscow. Mir, 1974 _1789p.
7. FEDOSEEV, A. M. Protección por Relés de los Sistemas Eléctricos._ Moscow. [sn], 1984_743p.
8. ALTUVE, F. Héctor. Protección de Redes Eléctricas_ Santa Clara: Universidad de las Villas_1990, 254p.
9. FABRICANT, V. L. Protección de Distancia_ Moscow. [sn], 1986_249p.
10. MASSON, C Rusell. The Art and Science of Protective Relaying_ La Habana: Pueblo y Educación_ 1975, 585p.

11. L & K International VideoTraining. Introducción a Relés Estáticos. Ontario_ 1991.
12. GILEREST, G.B. ROCKEFELLER, G.D. UDREN, E.A. High-Speed Distance Relaying Using a Digital Computer. I - System Description. *IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing*, Portland, July 18-23_ 1971. pp. 1235 -1243.
13. ROCKEFELLER, G.D. High-Speed Distance Relaying Using A Digital Computer. II - Test Results. *IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing*, Portland, July 18-23_1971, pp. 1244 -1258.
14. KEZUNOVIC, M. FROWEN, C. W. Microprocessor - Based Overcurrent Relays. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 1E-33(1), feb. 1986.
15. MURTY, Y. V., FULLER J. F. Multiple Overcurrent Relays Using a Single Microprocessor. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 37(4), agt. 1990.
16. NOVELL, Jeff. GE: A history of progress in protection, control and substation automation. *GE Publication*.
Disponible en: <http://www.geindustrial.com/pm/pr/history.pdf>.
17. GE Power management (Canada)_ SR-750 Feeder Management Relay _2004.
18. GE Power management (Canada)_ SR-745 Transformer Management Relay _2004.
19. GE Power management (Canada)_ SR-489 Generator Management Relay _2004.
20. GE Power management (Canada)_ SR-469 Motor Management Relay _2004.
21. ABB (USA) SPAD 346 Stabilized Differential Relay_2004
22. SCHNEIDER (España)_ SEPAM 2000 Relé Multifunción _ 2004.
23. SIEMENZ (Alemania)_ Catálogo de Relé Multifunción SIEMENZ_ 2004.

24. LI, H. Y. SOUTHERN, E. P. CROSSLEY, P. A. A New Type of Differential Feeder Protection Relay. Using the Global Positioning System for Data Synchronization. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 12(3). July 1997.
25. SAHA, M. M. ROSOLOWSKI, E. IZYKOWSKI, J. Artificial Intelligent Application to Power System Protection. *Power Engineering Journal*. 2000
26. SONG, Y. H. ALLAN, T. J. Applications of Fuzzy logic in power systems. Part 3 Example applications. *Power Engineering Journal*. 1998.
27. KEZUNOVIC, M. A survey of neural net applications to protective relaying and fault analysis. *Engineering Intelligent Systems*, 5(4): 185-192, dic., 1997.
28. GE POWER MANAGEMENT (Canada)_ UR-T60 Transformer Management Relay _2004.
29. KEZUNOVIC, M. Artificial Neural Network Based Protection And Newer Design Philosophies. Disponible en: <http://cent1.tamu.edu/ee679/handouts.htm>
30. ALTUVE, F. H. BRAVO, de las Casas M. González, R. E. Relés Estáticos De Protecciones De Líneas Y Motores Eléctricos _ Santa Clara, Octubre 1986.
31. SINGH, M.S. et al. Digital IDTM Overcurrent Relays". *Proceeding of IEE 1980 DPSP Conference*, IEE Publication no. 185, pp. 84-87.
32. SCHWEITZER, E.O. Aliaga, A. Digital Programmable Time-Parameter Relay Offers Versatility and Accuracy. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*. 89(1), Jan./Feb. 1980, pp. 152-157.
33. MCLAREN, P.G. et al. Software Models for Relays. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 16(2), pp. 238-246, Apr 2001.

34. PENG, Z. Li, et al A Dynamic State Space Model of a MHO Distance Relay. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 104(12), 1985. pp. 3558-3564.
35. ANDRICHAK J. G., ALEXANDER G. E. Distance Relay Fundamentals. *General Electric Publication I* (New York), GER - 3966.
36. CAVERO, L.P. Computer Aided Evaluation and Application of Distance Relay. *IEE DPSP 93 Proceeding*, IEE Conference Publication No. 368.
37. IEEE Committee Report "Relay Performance Testing. *IEEE Special publication*, No.96 TP 115-0, pp. 1-25.
38. LUCAS, J.R. MCLAREN, P.G. Some Problems in Relaying Series Compensated Lines. *Proceedings of IEEE CCECE Conference*, Sep. 1990, p. 1.1.1
39. SACHDEV, M.S. NAGPAL, M. Adu, T. Interactive Software for Evaluation and Testing Digital Relaying Algorithms. *IEEE Transaction on Power System*, 5(1), Feb. 1990, pp. 346-352.
40. MCLAREN, P. G. et al. Using a Real Time Digital Simulator to Develop an Accurate of a Digital Relay. *Proceedings of ICDS'95*, College Station, Texas, U.S.A
41. WOOD, H.C. SACHDEV, M.S. SIDHU, T.S. Tools for Computer Aided Development of Microprocessor Based Power System Relays. *Proceedings of the IEEE IAS 1987*, Publication No. 87CH2499-2, Part-II, 1987, pp. 1733-37.
42. ALEXANDER G. E., ANDRICHAK J. G. Comparative Testing Using Analog Model Power Systems, Digital Model Power Systems and Portable Test Sets. *General Electric Publication I* (New York), GER - 3678.
43. BERDY, J. Loss of Excitation for Modern Synchronous Generators. *General Electric Publication_* (New York), GER - 3183.

44. BERDY, J. Out - Of - Step Protection for Generators. *General Electric Publication* _ (New York), GER - 3179.
45. EMTP Home Site. Disponible en: <http://www.emtp96.com/history.htm>, 2003.
46. MATLAB Reference Guide. Natick, M.A: The Mathworks, 2004.
47. KEZUNOVIC, M. CHEN, Q. A Novel Approach for Interacting Protection System Simulation. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 12(2), pp.668-675, Apr. 1997.
48. KEZUNOVIC, M. et al. Neural Network Applications to Real -Time and Off-Line Fault Analysis. Disponible en: <http://eent1.tamu.edu/ee679/handouts.htm>
49. 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.
50. DSPACE (Germany). Modular System Based on DS1005. Installation and Configuration Guide for DS1005 PPC Boards and I/O Boards. 2003.
51. REYES, S. L. RABILERO, M. Electricidad y Magnetismo _La habana: Ciencia y Técnica, 1980._523p.
52. FANDIÑO, E. A. Fundamentos de la Teoría de Circuitos Eléctricos II_ La Habana: ISPJAE, 1984._317p.
53. FONTI, P. Transformadores de Intensidad: como determinar sus especificaciones. *Biblioteca Técnica Schneider Electric* No. 194._España, agt. 2000. 36p.
54. FONTI, P. Transformadores de Intensidad: errores de especificaciones y soluciones. *Biblioteca Técnica Schneider Electric* No. 195._España, Dic. 2001. 21p.
55. MARTÍNEZ, A. Simulación de Transformadores de corriente en MATLAB. *Ingeniería Energética*, XI(2), 2001.

56. NC 62-13: 1983. Generadores que operan directamente en las barras: Protecciones por Relés.
57. BERTRAND, P. Protecciones Direccionales. *Biblioteca Técnica Schneider Electric*. España, ene. 2000. 23p.
58. GE Multilin (Canada)_ UR-D60 Distance Relay _2004.
59. De la Incera N. Carlos, Padilla C. Miguel. Protección de Máquinas Eléctricas de Bajo Voltaje._Facultad de Ingeniería Eléctrica. ISPJAE, 1990_104p.
60. LINE MATERIAL Company. Distribution System Protection and Apparatus Coordination. USA, 1962. 89p.
61. NC 62-11: 1983. Transformadores con devanado de alto voltaje de 2 kV y mayores: Protección por Relés.
62. FULCHIRON, D. Sobretensiones y Coordinación del Aislamiento. *Biblioteca Técnica Schneider Electric* No. 151._ España. Feb. 1994. 29p.
63. FERRACCI, P. La ferresonancia. Biblioteca Técnica Schneider Electric No. 190._ España. Oct. 2000. 31p.
64. ESPINOSA, R. Origen de las Sobretensiones y método de protección. ESPINOSA, R. Sistemas de Distribución. Noriega. México: Limusa, [sa]. pp. 553-636.
65. VASILIEV, A. A. et al. Parte Eléctrica de las centrales y Sub-centrales eléctricas. 2da. Moscú: Vneshtorgizdat, 1986. 995 p.
66. KUNIAKI YABE. Power Differential Method for Discrimination between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 12(3), July 1997.

67. ZAMAN, M. R. RAHMAN, M.A. Experimental testing of the Artificial Neural Network Based Protection of Power Transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(2), apr. 1998, pp. 510-517
68. EMPRESA PEDRO SOTO ALBA (Cuba). Catálogo del Transformador de la Subestación de Entrada. 2002.
69. KOSTENKO, M. PIOTROVSKY Y. L. Máquinas Eléctricas Tomo I. La Habana: Pueblo y Educación, 1982. 522p.
70. EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA (Cuba). Catálogo del Transformador 1T de la subestación de 110 kV. 1985.
71. SAHA, M. M. ROSOLOWSKI, E. IZYKOWSKI, J. Artificial Intelligent Application to Power System Protection.
72. SONG, Y. ALLAN, H. JOHNS, T. Applications of Fuzzy logic in power systems. Part 2 Comparison and integrations with expert system, neural networks and genetic algorithms. *Power Engineering Journal*. 1998.
73. VASILIC, S. KEZUNOVIC, M. Fuzzy ART Neural Network Algorithm for Classifying the Power System Faults. *IEEE Transaction on Power Delivery*, apr. 2005.
74. KEZUNOVIC, M. et al. Neural Network Applications to Real -Time and Off-Line Fault Analysis. Disponible en: <http://eent1.tamu.edu/ee679/handouts.htm>
75. ALTUVE, F. Héctor. et al. Aplicación de Redes de Neuronas Artificiales en Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia. (México) *Universidad Autónoma de Nuevo León*. p. 14
76. KEZUNOVIC, M. Artificial Neural Network Based Protection and Newer Design Philosophies. Disponible en: <http://eent1.tamu.edu/ee679/handouts.htm>

77. 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.
78. 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.
79. VILARAGUT, M Llanes. Curso de postgrado sobre Redes Neuronales._ La Habana. 2000.
80. THE MATHWORK, Inc. (USA) _ Neural Network Toolbox. 2003.
81. KASZTENNY, B. KEZUNOVIC, M. Digital Relay Improve Protection of Large Power Transformer. *IEEE Computer Applications in Power*, 11(4), pp.39-45. Oct. 1998.
82. GE Power Management (Canada). Substation Automation UR Application 1 Course. 2000.