

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA DETENCIÓN DE REGÍMENES ANORMALES EN TRANSFORMADORE DE POTENCIA"

TESIS DE GRADO PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECÁNICO

AUTOR:

Julio Geovanny Maza Pinza

DIRECTOR:

Ing. Norman Augusto Jiménez León

LOJA – ECUADOR 2008

CERTIFICACIÓN

Ing. Norman Augusto Jiménez león **DIRECTOR DE TESIS**

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación, bajo el tema **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA BSADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA DETECCIÓN DE REGÍMENES ANORMALES EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA"**, realizado por el **EGRESADO: Julio Geovanny Maza Pinza**, la misma que cumple con la reglamentación e investigación, por lo que autorizo su presentación.

Loja, Enero del 2008

Ing. Norman Augusto Jiménez León DIRECTOR DE TESIS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Julio Geovanny Maza Pinza, autor de este trabajo de tesis de grado autorizo al Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

El autor.

PENSAMIENTO

"En la tierra hace falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más y que esperen recibir menos y dar más, que digan mejor ahora que mañana"

José Ernesto Guevara

AGRADECIMIENTO

Dejo constancia de mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja, Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, en la carrera de Ingeniería Electromecánica, a sus catedráticos, quienes me han impartido sus valiosos conocimientos, durante mi vida estudiantil. De manera especial al Ing. Norman Augusto Jiménez León, en calidad de Director de Tesis, quien con sus conocimientos muy acertados se ha contribuido en el pilar fundamental durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al personal docente del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa – Cuba, de manera especial al Dr. Luis Delfín Rojas Purón.

Al personal docente del Centro de Investigaciones de protecciones Eléctricas (Habana - Cuba), de manera especial al Dr. Orlys Ernesto Torres Breffe.

En fin a todos que de una u otra manera han colaborado con sus sugerencias e ideas para la culminación del presente trabajo.

El Autor

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a Dios quien me ha entregado a mis seres queridos, los cuales me han dado el apoyo permanente para poder culminar con mi carrera de Ingeniería:

Mis Padres: Julio Maza Chamba y Carmen Judith Pinza Mis Hermanos: Washington Patricio, Rocío Elizabeth, José Francisco

Mis familiares y amigos.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como tema fundamental: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN** SISTEMA BSADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA DETECCIÓN DE REGÍMENES ANORMALES EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA".

Debido a que existen regímenes normales que se parecen mucho a los regímenes anormales y otros defectos menos grave, las protecciones convencionales pueden operar incorrectamente. El present trabajo, con fines de investigación, demuestra que las redes neuronales artificiales creadas, entrenadas y simuladas correctamente en Matlab (Señales de simulación) e implementadas en LabVIEW con el uso de dos tarjetas de adquisición de datos (Señales eléctricas reales), son capaces de diferenciar los regímenes que se presentan en los Transformadores de Potencia. Los resultados obtenidos se registraron mediante intercambio dinámico de datos de Excel.

La estructura está dada en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

El primer capítulo establece las herramientas que nos permiten comprender los métodos convencionales y actuales que se utilizan para proteger a los Transformadores de Potencia contra fenómenos que provocan regímenes transitorios. Además se presenta un breve resumen sobre las redes neuronales artificiales y sus fundamentos.

El segundo capítulo tiene como objeto la estructuración de la parte experimental de un relé que protege a un transformador de potencia ante los regímenes de averías más típicas en un sistema de potencia.

El tercer capítulo plantea los resultados de la experimentación del relé digital inteligente para la protección de transformadores de potencia.

El Relé Inteligente propuesto detecta los regímenes anormales de cortocircuito internos y externos al transformador de potencia y no opera incorrectamente durante el proceso De magnetización, entre otras ventajas si se comparan con los dispositivos convencionales actualmente utilizados.

SUMMARY

The present work has as fundamental topic: "IMPLEMENTATION OF A SISTEM BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE DETECTION OF ANORMAL REGIMES IN TRANSFORMES OF POWER".

Since there are normal regimes similar to anormal regimes and other less seriores faults, the conventional portections can operate incorrectly. The present work with investigation ends demonstrates that the Artificial Neuronal Net (ANN) created, trained and feigned correctly in Matlab they are able the regimes that show up in the Transformes of Power ti differ. It is achieved in this mediating application the use of LabVIEWa d a system of Acquisition of Data to reproduce the work of a ANN Multilayer Feedforward for this objetive. After having trained the net in Matlab it was implemented in LabVIEW. This Solution was proven their operation with real signs in having reeled primary and Secondary of transformers. The obtained Results Registered by means of dynamic exchange of data in Excel.

The Structure is based on the introduction, there chapters, conclusions, recommendations, bibliography and appendixes.

The first chapter establishe the tools that allow us to understand the conventional and actual methods that are use to protect the transformers of power against phenomenons that cause transitory regimes. Besides it is presented a Brief summary About the artificial networks neuronal and their foundations.

The second chapter has as goal the structuration of the experimental part of a rele that protects a transformer of power against the most Typical regimes of breakdown in a power system.

The third shows the Results of the experimentation of the Intelligent digital rele for the protection of transformers of power.

The inteligente rele detects the anormal regimes of External and internal short circuits to the transformer of power and it does nor operate incorrectly during the process of magnetization, between other adventages compared with conventional dispositives that are used now.

Introducción general

Los transformadores de potencia, son máquinas eléctricas de amplia utilización en los sistemas eléctricos de potencia con corriente alterna. Existen de varias potencias, tensiones e importancia. Se pueden encontrar en la distribución, la subtransmisión y en la generación de la energía.

En los transformadores de potencia pueden ocurrir defectos graves y de menor magnitud. Son muy comunes y están siendo ampliamente investigadas las fallas incipientes que constituyen los orígenes de los graves defectos que ulteriormente aparecen.

Los transformadores de potencia también pueden trabajar en regímenes anormales que pueden ser perjudiciales para su vida útil en caso de que permanezcan mucho tiempo operando en este tipo de condiciones anormales.

Tanto los defectos como los regímenes anormales que se presentan en los transformadores de potencia son perjudiciales para su vida útil y por tanto se debe evitar que el transformador continúe operando bajo cualquiera de estas condiciones. Si se presentan defectos el transformador de potencia debe ser desconectado inmediatamente, mientras que si se presenta un régimen anormal, entonces se puede esperar un tiempo prudencial y aplicar alguna medida técnica para eliminarlo.

Las protecciones eléctricas son las encargadas de detectar y desconectar el transformador de potencia si se presentan estas condiciones anormales o defectos graves. Estas han evolucionado mucho durante el siglo pasado, pasando de tecnologías electromagnéticas a los actuales relés digitales basados en microprocesadores.

Muchos son los métodos de protección empleados en los transformadores de potencia. Relé de sobrecorriente, relé diferencial, térmico, de gas, entre otros. Todos empleados para detectar los defectos o regímenes anormales que puedan ocurrir y desconectar la energía al Transformador de Potencia.

El problema radica en que existen regímenes normales que se parecen mucho a los regímenes anormales y otros defectos menos graves y por tanto las protecciones convencionales pueden operar incorrectamente.

Desde hace mucho tiempo los hombres han estudiado y tratado de imitar la inteligencia humana. El cerebro humano es aún una incógnita que fascina al hombre, pero se ha avanzado mucho en su conocimiento. La Inteligencia Artificial es la ciencia que se encarga del estudio y la imitación de la inteligencia humana.

Hoy día son muchas las aplicaciones que se encuentran de la Inteligencia Artificial en la electricidad y el resto de las ciencias. Técnicas como los Sistemas Expertos, Lógica Difusa, Algoritmos Genéticos y Redes de Neuronas Artificiales muestran resultados positivos en la solución de problemáticas complejas en los sistemas eléctricos de potencia.

En las protecciones eléctricas estas técnicas de inteligencia artificial han encontrado amplia aplicación, pero aun no se fabrican ni se comercializan equipos de protecciones basados en técnicas de inteligencia artificial. Aunque algunos de los más modernos utilizan métodos de Inteligencia Artificial para opciones muy específicas y aisladas.

Los actuales relés de protección que se aplican en los transformadores de potencia, constituyen protecciones integrales contra la mayoría de los defectos y regímenes anormales que se puedan presentar.

Estos combinan en su interior todos los métodos convencionales utilizando la lógica booleana. Aunque se están investigando con gran entusiasmo en la comunidad internacional, la utilización de las técnicas de Inteligencia artificial para sustituir los métodos convencionales.

Las Redes Neuronales Artificiales es una de las técnicas de Inteligencia Artificial que mayor aplicación ha encontrado en la protección de los transformadores de potencia y el resto de las máquinas eléctricas. Se han realizado estudios de modelación y simulación de relés que detecten los defectos y regímenes anormales empleando esta técnica de imitación de la inteligencia.

Redes Neuronales Artificiales de varias capas ocultas, con varias neuronas de entrada y salida han sido creadas en las computadoras, entrenadas y simuladas para detectar y diferenciar los regímenes anormales y los defectos de los regímenes normales que tanto se le parecen.

La comunidad científica internacional tiene mucha expectativa de que las Redes Neuronales Artificiales sean capaces de resolver el problema de la detección y diferenciación de los regímenes en los transformadores de potencia y está enfrascada en la conformación de tecnologías basadas en estas técnicas.

Problema

"Métodos Convencionales de Protección actúan inadecuadamente frente a regímenes anormales en los Transformadores de Potencia".

Hipótesis

Si se emplean las Redes de Neuronas Artificiales se podrá generar una tecnología que diferencie los regímenes normales y anormales en los transformadores de potencia.

Objetivo general

Implementar un sistema que diferencie los regímenes normales y anormales tolerables en los transformadores de potencia.

Objetivos Específicos

- Actualizar la información existente sobre el tema de la protección de transformadores.
- Estudiar y Evaluar el método de las Redes Neuronales Artificiales para la protección de los Transformadores de Potencia.
- Adquirir datos en tiempo real en una plataforma interactiva.
- Evaluar una Red Neuronal Artificial que detecte y diferencie Regímenes anormales en Transformadores de Potencia.
- Socializar los Resultados de la Investigación.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Los transformadores de Potencia son los equipos más importantes del sistema de potencia. Su fiabilidad no solo afecta la disponibilidad de la energía eléctrica del área a alimentar, sino también afecta el desarrollo económico de una utilidad.

Los efectos o consecuencias que los procesos transitorios pueden provocar pueden ser variadas y están relacionadas con la variación que experimentan los parámetros eléctricos durante la ocurrencia del fenómeno en sí [6].

En el presente capitulo se introducirán herramientas que nos permitan comprender los métodos convencionales y actuales que se utilizan para proteger a los Transformadores de Potencia contra fenómenos que provocan regímenes transitorios.

Cualquier evento que ocurra en el sistema que lo lleve a operar con límites incomprensibles, puede ser seguido por una serie de acciones futuras que impliquen que otros componentes estén fuera de servicio por la acción de sus respectivas protecciones, de forma tal que si este proceso de fallas en cascada continua, el sistema entero o gran parte de este puede colapsarse completamente [15].

El monitoreo de los transformadores de potencia provee a los operadores con información actualizada sobre las condiciones del transformador. La operación efectiva de éste requiere de las mediciones de tensión, corriente, posición de tap's, etc. Con mucha más información tele medida simultáneamente, ningún operador podría verificarla en un tiempo razonablemente rápido, por esta razón es necesario diseñar herramientas de cómputo que se instalen en los centros de control, para recopilar dicha información, procesarla y colocarla en bases de datos, para que posteriormente los operadores puedan desplegar esta información en grandes pantallas y monitores. Dichas herramientas de cómputo se han convertido en una herramienta básica para la operación, mantenimiento y protección de los transformadores de potencia con un aceptable nivel de precisión, siendo aún más importante el hecho de que estas herramientas pueden verificar dicha información y compararla contra ciertos límites operativos preestablecidos presentando alarmas a los operadores sobre elementos próximos a estar sobrecargados o corrientes y tensiones próximos a estar fuera de límites. [13]

1.2 Estudios precedentes sobre el desarrollo tecnológico de las protecciones eléctricas por Relés

Los primeros dispositivos de protección se desarrollaron hace más de 130 años, cuando se iniciaron los primeros proyectos de electrificación. [14]

Por aquel entonces, los dispositivos de protección se basaban en principios electromecánicos y actuaban de forma completamente mecánica. Todavía hoy existen muchos de estos relés electromecánicos en muchos sistemas eléctricos instalados por todo el mundo.

Las necesidades de continuidad del servicio eléctrico aumentaban a principios del siglo XX y los dispositivos creados (fusibles) no respondían a las exigencias del momento.

Desde los comienzos del siglo XX los sistemas eléctricos de potencia han crecido considerablemente con la finalidad de poder satisfacer la demanda de energía eléctrica que requiere la sociedad. Este crecimiento desmedido a dado lugar a que se diseñen técnicas cada vez más eficientes que permitan a los sistemas de potencia ser operados de forma tal, que cualquier evento de falla simple, no lleve a los otros componentes del sistema a una sobrecarga.

Esa situación condujo a la aparición, en 1905, del "Relé de Protección", en su primera variante "Electromecánico", el cual se conecta al secundario de transformadores de corriente y/o de tensión y envía una señal de desconexión a un interruptor de mayor potencia.

Existe mucha información sobre el funcionamiento de los Relés de Sobrecorriente del tipo inducción y electromecánico. Todos los trabajos encontrados en la primera mitad del siglo XX se dedican al diseño y construcción de unidades de temporización, así

como a analizar las características constructivas generales de los Relés de Sobrecorriente electromecánicos, sin abordar la temática de la modelación matemática.

Para la construcción de Relés con características complejas (Relés Direccionales y de Distancia) se ha utilizado hasta estos días un algoritmo creado desde las primeras variantes electromecánicas [4]. Ellos son conocidos como modelos que comparan la magnitud o la fase de alguna combinación de las señales de entrada. Aunque es cierto que este algoritmo resolvió el problema de la construcción de diferentes tipos de Relés complejos utilizando para ello un mismo circuito magnético, también incorpora coeficientes adicionales para realizar el ajuste práctico de dichos Relés, alejados y no relacionados directamente con los ajustes teóricos de los mismos.

A medida que surgieron nuevas tecnologías de componentes electrónicos y de semiconductores, surgieron también nuevas posibilidades de proteger los sistemas eléctricos y se diseñó una segunda generación de dispositivos de protección con componentes electrónicos. Estos relés de estado sólido habilitaron nuevas aplicaciones que incorporaban mejores funciones de protección, además de mediciones de potencia, disparo de alarmas y análisis de tendencias básicas.

En 1960 se desarrollaron los primeros Relés Electrónicos que utilizaban la electrónica analógica, por lo cual se conocen como "Relés Electrónicos". Los avances de la electrónica de mediados del siglo XX desarrollaron la tecnología de los Relés, comenzando por Relés mixtos que utilizaban componentes electromagnéticos y electrónicos, hasta Relés que funcionaban completamente con dispositivos electrónicos que se conocen como "Relés Estáticos" [9]. Para esta fecha se crea la primera computadora e inmediatamente se piensa en la idea de la utilización de las computadoras como dispositivos de protección.

Gilcrest y Rockefeller en 1971 describen el uso de una Computadora P-2000 de la firma Westinghouse para la creación de una Protección de Distancia de alta velocidad. La instalación fue llamada Prodat 70 y contaba con varios módulos electrónicos de adquisición y exportación de datos. En 1971se modelo el funcionamiento de los Relés de Distancia aunque no se dan detalles de la conformación de la zona de operación de estos Relés.

Gracias a la disponibilidad comercial de microprocesadores en los primeros años ochenta del pasado siglo, surgió la protección numérica. La tecnología de microprocesadores ha puesto a nuestra disposición una gran profusión de nuevas funciones. Estos dispositivos numéricos integrados ofrecen actualmente ventajas esenciales en cuanto a protección, control, monitorización y autosupervisión, así como para la comunicación de datos. [8]

En 1985 se fabrica el primer Simulador Analógico de Potencia comercial utilizando componentes electrónicos. Estos son conocidos como simuladores electrónicos o analógicos que muestran mayor velocidad de simulación comparados con los digitales de hoy día que utilizan potentes computadoras.

Muchos dispositivos que ejecutan pocas funciones de protección (fundamentalmente de sobrecorrientes) garantizan el proceso de extracción de las componentes de una señal dada, mediante el hardware; esto le permitirá ganar en velocidad y utilizar microprocesadores menos veloces y costosos.

En la década del 90, debido a la disminución de los precios de las unidades procesadoras inteligentes se crean nuevos órganos de medición. Gran parte de las tareas en el proceso de extracción de las componentes de las señales, son tratadas mediante software, utilizando para ello convertidores análogos - digitales más rápidos que muestrean las señales sinusoidales varias veces por ciclos. Luego son obtenidas, mediante Procesamiento Matemático (Digital Signal Processing DSP), las componentes necesarias de las muestras correspondientes a la señal medida en un ciclo. Esta variante es muy utilizada hoy día en la fabricación de Relés que realizan varias funciones de protección en un mismo dispositivo. La Transformada Discreta de Fourier (Fast Fourier Transformation FFT) y filtros recursivos se implementan en los dispositivos digitales modernos.

A partir de 1994 se generaliza la aplicación de los microprocesadores en los Relés de Protección, creándose dispositivos que no solo hacen la función de protección conocida,

sino incluso otras funciones de control requeridas. En 1994 se introduce un nuevo concepto de Protección Diferencial de línea que utiliza la comunicación digital entre dispositivos, reemplazando los cables pilotos que existían hasta el momento. En 1996 se introduce un Relé de Distancia de alta velocidad para Líneas de Transmisión. Alrededor de 1998 comienzan a aparecer en el mercado los dispositivos multifunción, es decir, dispositivos que incluyen muchas funciones de protección y control, que pueden ser empleados en diferentes elementos del sistema. A partir del 2000, se introducen las soluciones totalmente automatizadas para subestaciones. Esta tecnología permite que una subestación eléctrica trabaje con todos sus dispositivos de forma aislada o incluso atendida de forma externa mediante la comunicación por computadoras. Los SCADA están incluidos en estos paquetes.

Los Relés basados en Microprocesadores, como ventaja a los digitales clásicos, además de poseer las anteriores características, permiten almacenar eventos, se comunican con otros dispositivos de protección y permitirán la aplicación de Técnicas de Inteligencia Artificial (IA) en la detección de averías, tales como: la Lógica Difusa y las Redes Neuronales Artificiales (RNA) que están demostrando, desde el punto de vista teórico, mejores comportamientos en cuanto a la velocidad de operación, la sensibilidad y la selectividad necesaria para diferentes casos. Aunque en la actualidad no se encuentran implementados, a escala industrial, Relés que solo basen su funcionamiento en las IA, se conoce que los Relés Digitales modernos han comenzado a utilizar estas técnicas, por ejemplo: en la detección de la saturación de los transformadores de corriente para evitar la incorrecta operación de las protecciones diferenciales de Transformadores de Potencia.[1][12]

Los Relés a microprocesadores han incorporado nuevos métodos y algoritmos de protección, pero los postulados básicos son las bases para la comprensión de todos los dispositivos que hasta el momento están en funcionamiento (dispositivos convencionales). Los Relés que basan su funcionamiento en las Técnicas de IA (dispositivos inteligentes) están amenazando con cambiar estas invariantes. Los dispositivos basados en IA tendrían la capacidad de aprender.[1]

1.3 Generalidades del Transformador de Potencia

.....

En las centrales eléctricas modernas, habitualmente se genera corriente alterna y para transportarlas a los consumidores a través de líneas y redes eléctricas, es necesario cambiar el voltaje y la corriente. Este cambio o transformación de la corriente alterna, se realiza mediante equipos que se llaman Transformadores.[6]

El transformador de potencia (Figura 1.1) es una máquina estática de inducción o electromagnético, utilizado para la conversión de corriente alterna de un voltaje, en corriente alterna de otro voltaje a la misma frecuencia. Cualquiera que sea el uso que se haga del transformador, se llama primario el circuito que recibe la energía, y secundario el que la suministra a los aparatos receptores.



Figura 1.1.- Imagen de un transformador de gran potencia

Un transformador de potencia es un dispositivo muy confiable que está diseñado para lograr una vida útil de 20 - 35 años y una vida mínima de 25 años a temperaturas de funcionamiento comprendidas entre 65 °C y 95 °C. Aunque en la práctica la vida de un transformador de potencia podría llegar a 60 años con un mantenimiento adecuado y en función de la fecha de fabricación, ya que se ha observado en transformadores

producidos recientemente una edad promedio al fallo de 14,9 años en idénticas condiciones de trabajo.[5]

Generalmente los transformadores de Potencia son trifásicos, esto es, los devanados primarios y secundarios de cada fase están enrollados en 3 columnas de un núcleo común de hierro, todo sumergido en un mismo tanque con aceite aislante. Los transformadores monofásicos son también usados conectados para formar un banco trifásico, cualquier combinación de conexión Y - Δ ó Δ - Y el transformador es conectado normalmente de manera que el lado de alto voltaje se está adelantado al correspondiente de bajo voltaje en 30 grados, esto de acuerdo a las normas IEEE.[10]



Figura 1.2.- Campos de Aplicación a diferentes niveles de tensión del transformador de potencia

Son usados a través de todo el sistema eléctrico de potencia y en todos los niveles, su potencia está Los transformadores de potencia se fabrican de potencia de 3kVA hasta 500 MVA en formas trifásicas y monofásicas a frecuencias de 50 y 60 Hz.

Desde la generación eléctrica (Figura 1.2) se utiliza los transformadores de gran potencia recibiendo y transformando niveles de tensión elevados como por ejemplo 400kV, para luego continuar la transmisión y subtransmisión de elevados niveles de tensión a largas distancias (caídas de tensión), al elevar la tensión, la corriente disminuye y consigo, también disminuyen las pérdidas en las líneas de transmisión permitiendo transportar mayores cantidades de energía a largas distancias.

En la subestación, grandes transformadores de potencia aislados con aceite convierten los niveles de tensión desde una tensión de transmisión de 240 kV a 110 kV, por ejemplo.

La subestación de distribución primaria realiza las mismas funciones que una subestación de transmisión pero a niveles inferiores de tensión. Transformadores más pequeños de potencia convierten los niveles de tensión de 110 kV a 38 kV, por ejemplo.

La subestación de distribución secundaria está situada más cerca de los consumidores y opera a niveles más bajos de tensión. Puede incluir o no un transformador, y el sistema completo es considerablemente menos complejo que en una subestación primaria.[8]

1.4 Procesos Transitorios en los Transformadores de Potencia

Los procesos transitorios en los transformadores y en las máquinas eléctricas, surgen cuando existen variaciones rápidas del régimen de trabajo de estos (conexión a la red, variaciones de la carga, cortocircuitos, sobretensiones, etc.).

Todo cambio de uno o varios de los valores fundamentales del funcionamiento del transformador (tensión, frecuencia, etc.) da lugar a una transición de un estado estacionario o de régimen a otro.

Ordinariamente esta transición dura solo un tiempo muy corto (Régimen Transitorio Permisible), pero no obstante puede ir acompañada de efectos muy considerables y peligrosos para el transformador como son la aparición de grandes esfuerzos mecánicos entre arrollamientos o parte de ellos, la distribución extremadamente alterada de las tensiones entre las secciones de los arrollamientos e incluso entre las espiras, el excesivo calentamiento de los arrollamientos, etc. Estos inconvenientes son debidos tanto a problemas de funcionamiento como a fallas en los transformadores; y provocan la perdida de las características mecánicas y dieléctricas del sistema de aislamiento com

la consiguiente disminución del tiempo de vida esperado del transformador así como de su confiabilidad.

Esencialmente los problemas de funcionamiento se diferencian de las fallas debido a que no ocasionan la puesta fuera de servicio inmediato del transformador mientras que una falla sí; sin embargo si su presencia es prolongada puede debilitar sustancialmente el sistema de aislamiento quedando el transformador más propenso a sufrir una falla.[19]

1.4.1 Regímenes Transitorios Permisibles

Los regímenes transitorios permisibles son aquellos que ocurren en los sistemas eléctricos para los cuales no debe perderse el correcto funcionamiento. Estos son regímenes para los cuales la carga no debe perder el suministro de energía. Es importante destacar que al ser transitorios solamente duran un periodo determinado de tiempo. Los regímenes transitorios que se mencionaran a continuación son: la corriente de magnetización (Inrush), la carga fría y las sobrecargas temporales.

1.4.1.1 La corriente de magnetización

Cuando un transformador es energizado, se presenta una corriente de magnetización transitoria. Despreciando las pérdidas, esta corriente de magnetización es la que establece el flujo en el núcleo y circula principalmente por la rama de excitación del transformador, es decir, es una corriente que circula sólo por el devanado primario. Esta corriente de magnetización transitoria puede ser de 8 a 20 veces la corriente nominal del transformador. Los factores que determinan la duración y magnitud de la corriente de magnetización son:

- El tipo de hierro usado en el núcleo del transformador y su densidad de saturación,
- El tipo y capacidad de carga que alimenta el transformador, si se trata de una carga de baja potencia o no existe carga, la corriente de Inrush se hará presente con elevada intensidad.
- Sobretensiones o el Nivel de tensión con que se alimenta al transformador, determina la magnitud de la corriente de Inrush.
- La impedancia de la fuente de alimentación y la reactancia del núcleo en el devanado energizado determinan la magnitud de la corriente Inrush cuando el

núcleo se satura. Sin embargo, la probabilidad de que se presente la máxima corriente Inrush es muy baja.

- La capacidad del transformador define en gran medida la duración y magnitud de la corriente Inrush. La constante de tiempo para este transitorio utilizada con gran aproximación en cálculos, es de 0.1 s. para transformadores con capacidades menores a 100 kVA y arriba de 0.1 s. para transformadores de mayor capacidad. Se ha observado que en transformadores de gran capacidad, la corriente Inrush aún permanece después de 30 minutos de haberse energizado.
- La resistencia e inductancia de la línea de transmisión en el sistema de potencia desde la fuente al transformador.
- En transformadores de nucleó acorazado, la magnitud de la corriente Inrush es mayor en el devanado interno que en el externo. En el primer caso la corriente Inrush alcanza valores de 10 a 20 veces la corriente nominal, mientras que en el segundo, de 5 a 10 veces. Usualmente, el devanado de alto voltaje es externo y el de bajo voltaje es interno. [3]

El valor de la corriente Inrush depende del punto en la onda de CA donde se cierran los polos del interruptor. El máximo valor de la corriente Inrush se presenta cuando el interruptor cierra sus polos en el momento en que el voltaje es cero y el nuevo flujo magnético de la corriente Inrush toma la misma dirección que el flujo remanente. La corriente Inrush es pequeña cuando los flujos toman direcciones opuestas. La energización de grandes transformadores de potencia usualmente se realiza mediante el cierre simultáneo de los tres polos de un interruptor, dejando al azar el instante de la conexión, este proceso origina la presencia de grandes corrientes Inrush es diferente en cada fase del transformador, debido a que en sistemas trifásicos las ondas de voltaje correspondientes a las fases están separadas 120° eléctricos y el cierre del interruptor de potencia es simultaneo en los tres polos, por lo que en el momento del cierre del interruptor, las tres ondas de voltaje se encuentran en diferentes puntos.

Cuando ocurre una falla en un sistema de potencia el voltaje disminuye rápidamente hasta llegar a cero al aislarse la falla, sin embargo, cuando se restablece el sistema, el voltaje aumenta repentinamente hasta su valor nominal, repitiéndose un proceso similar al de energización inicial. Sin embargo, al ser muy rápido el proceso de restablecimiento de energía, La corriente Inrush es menor que la inicial.

Cuando un segundo transformador de potencia es energizado en paralelo con otro que está en servicio, se presenta una corriente Inrush en el primer transformador de menor valor al de la energización inicial.

La forma de onda de una corriente de magnetización se muestra en la Figura 1.3. El tiempo que esta corriente está presente depende de la constante de tiempo del sistema $(\tau = L/R)$, pudiendo ser del orden de segundos hasta minutos. [18]



Figura 1.3.- Forma de onda de una corriente de magnetización Fuente: [18]

1.4.1.2 La carga fría:

La carga fría es el resultado de la combinación de cargas conectadas en el circuito y que en el momento de energizar dicho circuito pueden intervenir. Experimentalmente muchos especialistas han demostrado que las protecciones en los transformadores de subestaciones deben quedar por encima de varios puntos de tiempo contra corriente, los cuales se muestran en la tabla 1:

Valor de corrienteTiempo (s)6 In13 In102 In15 - 60

Tabla 1.1 Puntos de la curva de la carga fría

Los fusibles del primario de los transformadores de las subestaciones son sometidos a sobreintensidades de corriente de larga duración que ocurren debido a la pérdida de diversidad de la carga después de una interrupción extendida (30 minutos o más). Estas sobreintensidades de larga duración son las causantes de la carga fría. Las corrientes de

carga fría suelen tener una duración de hasta 30 minutos después del re-avivamiento. Este fenómeno ocurre desde cargas eléctricas grandes tales como acondicionadores de aire, refrigeradores y los calentadores eléctricos que se controlan por termostatos.

Se debe evitar para este régimen una operación del fusible conectado al primario del transformador. Este debe ser capaz de soportar la corriente del transformador expuesto a la sobreintensidad de corriente transitoria provocada por la carga fría.

1.4.1.3 Sobrecargas Temporales

Una sobrecarga es causada comúnmente por cargar en exceso el sistema eléctrico, como lo podemos apreciar al instalar demasiados equipos, tales como muchos consumidores en una línea, etc. Los elementos de un sistema eléctrico son construidos para soportar un tiempo determinar de sobrecargar. Al ser llamadas sobrecargas temporales el dispositivo de protección no debe operar ante su aparición.

1.4.2 Regímenes transitorios no permisibles.

En éste tipo de regímenes los Transformadores de Potencia deben soportar las fallas que se pueden presentar, pero sólo por un tiempo limitado hasta que actúen las protecciones adecuadas. Dicho tiempo generalmente breve puede variar desde algunos milisegundos, hasta algunas horas, dependiendo del tipo de falla.

Existen muchas causas que pueden perturbar el servicio normal de los transformadores de potencia de las cuales enunciaremos algunas de ellas:

1.4.2.1 Los cortocircuitos

Los cortocircuitos son fallas que en la mayoría de los casos provocan el paso de corrientes muy elevadas, que pueden sobrecalentar y hasta destruir totalmente los arrollamientos involucrados o someterlos a sobretensiones peligrosas.

Estos cortocircuitos pueden producirse en el interior o en el circuito exterior del transformador. Los que ocurren en el interior son menos probables, pero más dañinos que los que ocurren en el exterior.

Los esfuerzos a que se expone un transformador durante los cortocircuitos externos varían con la distancia de ocurrencia y la cantidad de fases involucradas en dichos

cortocircuitos. Un cortocircuito más cercano al transformador es más peligroso para su vida útil y por tanto debe ser desconectado más rápidamente. De esto se encargan las protecciones externas al transformador.

Cuando ocurren cortocircuitos internos, sin importar la magnitud y el número de fases involucradas en el mismo, el transformador de potencia debe ser desconectado instantáneamente. Por tal razón, en los transformadores de potencia, se instalan protecciones especiales (Protección Diferencial) para estos tipos de cortocircuitos.

Cuando el cortocircuito se produce en el interior (Figura 1.4) del transformador estos pueden ser:

- Espira Espira.
- Fase Fase.
- Fase Tierra.
- Alta Baja Tensión.



Figura 1.4.- Cortocircuitos que se pueden dar en el interior de un transformador trifásico, (a) espira – espira, (b) fase – fase, (c) fase tierra.

En el primer caso es perceptible solo cuando están involucradas varias **espiras** ya que se altera la razón de transformación, sin embargo aunque no provocan sobretensiones es importante porque crea "Puntos Calientes" y con el tiempo puede afectar el aislamiento de las espiras aledañas.

El cortocircuito **Fase** – **Fase** es poco probable que se presente debido a que las fases dentro del transformador se encuentran bien separadas y sumergidas en el aceite aislante; de todas formas cuando se presentan pueden provocar corrientes muy elevadas si se produce entre dos puntos o espiras finales de cada fase o muy pequeñas e imperceptibles si estos puntos son iníciales; lógicamente eso depende del tipo de conexión entre los arrollamientos.

El cortocircuito **Fase** – **Tierra** puede o no inducir corrientes elevadas, esto depende también del tipo de conexión en los arrollamientos, en todo caso produce desequilibrios en el sistema que pueden dar lugar a sobretensiones.

Los cortocircuitos entre arrollamientos de **alta y baja tensión** se deben mayormente a errores en la proyección y dimensionamiento de los arrollamientos y aislamiento de ambos devanados; son muy peligrosos debido a que se expone al devanado de baja tensión a la alta tensión del otro, que no solamente afectaría al transformador sino también a su circuito de carga.

Cuando los cortocircuitos se producen en el exterior del transformador, ya sea en las líneas de distribución como en las de alimentación estos pueden ser:

- Fase Fase.
- Fase Tierra.
- Fase Neutro.
- Trifásico.

En los cortocircuitos **Fase** – **Fase** (Figura 1.5) la corriente que se produce estará limitada solamente por las impedancias en serie de cada fase y también por la impedancia de la línea.



Figura 1.5.- Cortocircuito Externo Fase – Fase.

En el tipo **Fase – Tierra** (Figura 1.6) influye mucho el tipo de conexión por ejemplo si se tiene un sistema trifásico con neutro a tierra, se originan corrientes elevadas que solo

están limitadas por la impedancia de Fase – Tierra; mientras que si se trata de un sistema con neutro aislado, la falla puede pasar desapercibida hasta que otra fase haga tierra, en cuyo caso la situación sería la misma de un cortocircuito Fase – Fase; mientras no suceda esto las fases no involucradas quedan sometidas a tensiones tres veces mayores y la otra estará al potencial de tierra produciéndose grandes esfuerzos dieléctricos.



Figura 1.6.- Cortocircuito Externo fase - tierra

El cortocircuito **Fase** – **Neutro**, existe en los sistemas con neutro distribuido, la corriente en este caso queda limitada solamente por la impedancia de fase más la de la línea del neutro.

En los cortocircuitos trifásicos (Figura 1.7) de manera similar a los de Fase – Fase la corriente queda limitada por las impedancias serie de cada fase más la de las líneas.



Figura 1.7.- Cortocircuito externo trifásico

1.4.2.2 Sobretensiones

Las sobretensiones son de dos tipos.

• Internas

Aquellas debidas a maniobras de apertura o cierre de circuitos o a defectos de aislamiento y de continuidad.

Son peligrosas debido a los grandes esfuerzos dieléctricos que se producen en los aislantes que muchas veces originan descargas parciales.

• Externas

Las descargas atmosféricas son impulsos eléctricos muy elevados de corta duración. Estos fenómenos son causas de excitaciones y mecánicas, en algunos casos a pesar de la intervención de los dispositivos de protección pueden causar la perforación de los aislamientos entre dos fases debido a que la elevada tensión vence la rigidez dieléctrica del aceite.

La magnitud del daño por las descargas atmosféricas depende de entre otras cosas, de si tales descargas son directas o indirectas según se produzcan sobre el sistema o fuera de él. [15]

I.4.2.3 Problemas de Funcionamiento

Sobreexcitación

La sobreexcitación que se produce tanto en generadores como en transformadores al sobrepasar el nivel del flujo de excitación previsto en funcionamiento permanente no debe sobrepasar el 110 % del flujo máximo de diseño ya que la máquina puede saturarse y circular por determinadas partes del transformador, flujos que no han sido diseñados para niveles altos de su densidad. Las sobretensiones producidas por los niveles altos de densidad de flujo, pueden producir perforaciones de los aislamientos de la chapa magnética e igualmente, crear puntos calientes debido al incremento de las corrientes inducidas, causas ambas perjudiciales y foco de posibles averías.[16]

• Los Sobrecalentamientos

Este tipo de problema se debe fundamentalmente a dos factores:

- Error en la proyección de la máquina.
- Paso de sobrecorrientes.

Los errores en la proyección pueden ser tan diversos como un mal dimensionamiento de los arrollamientos o del núcleo que causaría pérdidas dieléctricas o también del sistema de refrigeración.

Para corregirlos, es necesario actuar directamente sobre la estructura interna de la máquina, si se trata de los arrollamientos o del núcleo, o sobre su estructura externa si se trata del sistema de refrigeración.

El paso de sobrecorrientes un poco de las nominales se deben mayormente cuando la máquina trabaja en condiciones de carga superiores a las normales, este problema se corrige disminuyendo la carga de la máquina.

Siendo la distribución de temperatura no uniforme en toda la máquina hace que el problema de sobrecalentamiento sea bastante serio debido a la existencia de zonas localizadas llamadas "Puntos calientes" que alcanzan temperaturas de 10 a 40 grados más altos que las partes restantes.

• Descargas Parciales

Se denomina así a las descargas eléctricas que se suceden entre zonas de elevado gradiente de potencial eléctrico debido a:

- Una distribución anormal del campo eléctrico.
- Por la presencia de partículas conductoras o aislantes con rigidez dieléctrica menor que la del aire.

El primer caso se presenta especialmente entre espiras periféricas pertenecientes a fases distintas o a lados de baja y alta tensión en la misma fase.

El segundo caso, generalmente se presenta por la presencia de partículas auriformes o burbujas de gas producidas por múltiples causas, como la sobresaturación de los gases disueltos tanto atmosféricos como aquellos provenientes de fallas anteriores o del normal envejecimiento del sistema de aislamiento, fenómenos electroquímicos, gasificación del aceite o sólidos aislantes a causa de las elevadas temperaturas en los puntos calientes.

• Accidentes Operacionales

Los accidentes operacionales son muy diversos y frecuentes se podría decir que la mayoría de los casos son involuntarios o producidos por falta de conocimientos en la manipulación de la máquina. Pueden producirse por:

- Conmutación bajo carga.
- Interrupción intempestiva del funcionamiento debido a un cortocircuito externo.
- Presencia de impulsos de sobretensión con interrupción de los descargadores.
- Cambio de ubicación física del transformador.

1.5 Métodos de Protección Convencionales

Para la protección de grandes transformadores contra todos los defectos descritos anteriormente, generalmente se emplean dispositivos selectivos, sensibles y de acción rápida, es decir, la protección diferencial y la protección Buchholz. En el caso de pequeñas unidades y de transformadores de mediana potencia para alimentación únicamente unilateral, bastará con la protección Buchholz y fusibles, o bien, con relés temporizados de máxima intensidad y fusibles. La protección contra sobrecargas puede realizarse con imágenes térmicas y con relés térmicos. Finalmente, resulta muy conveniente la vigilancia de la temperatura del aceite, para lo que se utilizan termómetros especiales.



Figura 1.8.- Esquema de protecciones eléctricas en un transformador de potencia Fuente: [16]

1.5.1 Contra cortocircuitos multifásicos Internos

Para proteger los transformadores y autotransformadores de gran potencia contra cortocircuitos en el interior de los devanados, en sus terminales y en las conexiones ubicadas hasta de los interruptores se usan las protecciones diferenciales longitudinales de corriente.

1.5.1.1 Protección Diferencial

La protección diferencial se basa en un principio selectivo que detecta las faltas, comparando las magnitudes eléctricas, normalmente intensidades, en todos los extremos del elemento a proteger en un sistema, cumpliendo la primera ley de Kirchoff que indica que la suma vectorial de las corrientes que concurren a un nudo debe de ser cero.

El principio de corriente diferencial es el más utilizado y lo que hace es comparar las corrientes de entrada y de salida al elemento protegido, actuando para una determinada diferencia entre ellas.

Para la detección de faltas internas entre fases y de fase a tierra en grandes transformadores, es práctica usual la utilización de relés diferenciales de porcentaje de alta velocidad que se representan en la Figura 1.8 (87 según la norma ANSI ver tabla 7 de Anexo). Estos relés diferenciales son considerados específicos para transformadores, ya que deben evitar disparos indebidos en el momento de la energización del transformador en su conexión a la red. Debido al coste un tanto elevado, se instalan en grandes transformadores. En la actualidad con las tecnologías digitales, pueden reconsiderarse ya que al no dispararse sus costes, estas protecciones diferenciales con frenado de armónicos pueden ser interesantes para su aplicación en transformadores hasta de 5 MVA.

Hace pocos años atrás se han utilizado relés de sobreintensidad en montaje diferencial y también, relés diferenciales de intensidad de porcentaje clásicos con frenado solamente por la intensidad de paso. Pero todos estos equipos tenían que ser desensibilizados durante la conexión del transformador para evitar posibles disparos indebidos con grave riesgo para la máquina, al quedar sin protección durante este período de inserción del transformador a la red. En la actualidad, es impensable no dotar a los transformadores de cierta potencia y responsabilidad con protecciones diferenciales sin frenado por armónicos.

1.5.1.2 Protección diferencial con frenado por armónicos

En el momento de la energización de un transformador, existe una corriente de magnetización que puede alcanzar hasta doce veces su corriente nominal. La corriente de magnetización aparece solamente en uno de los devanados del transformador pudiendo ello, provocar la actuación de un relé diferencial convencional. Para evitar la operación no deseada del relé pero sin excluir que haya protección incluso en el momento de su energización, se utiliza la condición de que la corriente de magnetización del transformador en su periodo transitorio tiene un alto contenido de armónicos, incluso hasta un 65% de 2º armónico.

Los armónicos contenidos en la corriente de Inrush de conexión del transformador se filtran y se introducen en el circuito de frenado del relé. Por ello, estos relés se denominan Relés Diferenciales de Porcentaje con Frenado de Armónicos y son muy utilizados en las protecciones de alta velocidad de grandes transformadores.



Figura 1.9.- Esquema simplificado del diferencial con frenado de armónicos

En el esquema simplificado de la Figura 1.9 podemos observar el sistema de protección diferencial con frenado de armónicos. La diferencia respecto de una diferencial normal de porcentaje de las ya descritas anteriormente, es que además del frenado por las corrientes de paso, lleva un frenado adicional de armónicos que son segregados a través de un circuito resonante $L_2 - C_2$ paralelo y sintonizado a la frecuencia fundamental que Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

bloquea la corriente a esta frecuencia fundamental, dando paso solamente a los armónicos y que debidamente rectificados actúan sobre la bobina de frenado. Por otro lado, se dispone otro filtro serie $L_1 - C_1$ sintonizado igualmente a la frecuencia fundamental y que permite solamente el paso de la corriente a esta frecuencia siendo la que alimenta la bobina de operación.

La intensidad primaria y secundaria de un transformador son diferentes y además, sus ángulos de fase tampoco son coincidentes. Para que cumplan con las reglas de oro de las protecciones diferenciales, las intensidades en los secundarios de los transformadores de intensidad deben ser iguales y estar en fase. Para lograr estas condiciones es frecuente disponer los TC's en triángulo en el lado de la estrella del transformador de potencia y en estrella en el lado del triángulo y tener la precaución de organizar las conexiones según el grupo de conexión de estos, para que sus intensidades secundarias estén en fase. Por otro lado será preciso elegir las relaciones de transformación más adecuadas dentro de sus valores normalizados, para igualar lo más posible las corrientes secundarias. A pesar de todas estas precauciones los relés incluyen dispositivos para afinar esta igualación.

Los relés diferenciales de transformadores tienen normalmente posibilidades de selección del porcentaje del margen, entre los valores desde el 15 hasta el 60% y el usuario deberá hacer el ajuste, cuidando de que el margen elegido cubra los errores y las diferencias en las intensidades secundarias por las inexactitudes debidas a los ajustes de las relaciones de transformación y los márgenes debidos a los reguladores automáticos de tensión.

La peculiaridad del alto contenido de armónicos en la corriente transitoria de magnetización de los transformadores y la prevención de provocar disparos indebidos por la acción de un frenado de los mismos, le da a esta protección su carácter selectivo.

También podría haber disparos indebidos al eliminar una falta en el sistema próxima al transformador, ya que después de un descenso importante de la tensión en el instante de la prefalta, esta llega a alcanzar otra vez su valor normal al ser despejada la falta, produciéndose un fenómeno semejante al de una energización del transformador con corrientes de alto contenido en armónicos.

Para probar la bondad de los relés diferenciales de transformador con frenado de armónicos, una prueba consistía en hacer su conexión y desconexión al menos diez veces para analizar en esta fase el comportamiento de la protección. A esta prueba se le

ha llamado el bautismo de fuego de la protección diferencial del transformador y en cierta forma, comprueba la fiabilidad de este tipo de protección.

1.5.1.3 Relé Buchholz

El relé buchholz es simple y eficaz, y debería emplearse en todos los transformadores en aceite, equipados con depósito de expansión y cualquiera que fuera su potencia. Sin embargo, como no detecta más que los defectos originados en el interior del transformador, debe completarse con dispositivos para la protección de los defectos que se originan en el exterior de la cuba del transformador.

La acción del relé Buchholz está basada en detectar los primeros síntomas de la perturbación y avisar el hecho mediante una señal acústica u óptica; no es necesario, en este caso, poner el transformador inmediatamente fuera de servicio sino tener en cuenta la circunstancia y desacoplar el transformador cuando lo permitan las condiciones de la explotación.[14]

1.5.2 Contra cortocircuitos externos

1.5.2.1Relés de Sobrecorriente

Está generalizada la utilización de Relés de Sobrecorriente que cumplan las condiciones de coordinación. Muchas veces se utilizan las de tiempo definido y tiempo inverso, pero solo en aquellos casos en donde las protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso por razones de coordinación no ofrezcan una rápida protección contra cortocircuitos cercanos al transformador.

Las curvas de sobrecorrientes de tiempo inverso siempre deben de quedar a la izquierda de la curva de daño del transformador para que cumpla algún objetivo, porque si no actuarán tardíamente afectando el tiempo de vida útil del transformador.

1.5.3 Contra sobretensiones

En el caso de sobretensiones que son originadas por oscilaciones transitorias o permanentes del sistema eléctrico se protege el transformador utilizando relés de sobretensión (59 norma ANSI). Si se trata de sobretensiones originadas por descargas atmosféricas los dispositivos más utilizados en la actualidad son los entrehierros o

descargadores, los pararrayos valvulares y los pararrayos de oxido metálico. Los entrehierros o descargadores constituyen el equipo más elemental y barato de los usados en la protección contra las sobretensiones aunque tiene serias limitaciones. Su uso más extendido es en los sistemas de distribución.

Una de las limitaciones más importantes de estos dispositivos es que ellos no son capaces, en la mayoría de los casos, de interrumpir la corriente de frecuencia de potencia que se establece después de su operación, por lo que el circuito en que estén instalados debe ser desenergizado para limpiar la falla a tierra establecida. Por esta razón es por la cual su uso se recomienda en zonas de bajo nivel y en sistemas con recierre automático para limitar el tiempo de interrupción del servicio que su operación provoca. También se usan como protección de respaldo.

1.5.4 Contra sobrecarga

Para la protección contra sobrecarga suelen utilizarse solo como una señal para la conexión automática o manual del mecanismo de enfriamiento. Muchas veces se conectan termómetros en el aceite para medir la temperatura del mismo.

La protección contra sobrecarga de un transformador, se hace por lo general, por medio de la protección por sobrecorriente.

La detección de la protección contra sobrecorriente, se hace para fallas de fase y/o a tierra, esta protección constituye una protección primaria para unidades pequeñas opara cualquier unidad que no tenga protección diferencial opera también como protección de respaldo en grandes unidades protegidas con relé diferenciales, las unidades de alrededor de 10 MVA y menores se puede usar una protección primaria a base de fusibles.

Las corrientes de alto valor que pasan en el transformador, pueden causar daños térmicos y mecánicos, los valores de temperatura elevados, pueden acelerar el deterioro del aislamiento, las fuerzas físicas debidas a las altas corrientes, pueden producir compresión en el aislamiento, falla de aislamiento y problemas de fricción.

Por ende, contra sobrecargas también se utilizan dispositivos que protejan los aislantes de sus arrollamientos contra los desgastes provocados por un calentamiento inadmisible, estos son: Imágenes térmicas y Relés térmicos (según norma ANSI 49, ver tabla 7 de Anexos).

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

Por imágenes térmicas, este procedimiento es más costoso que el de los relés térmicos. Por esta razón, se emplean solamente en grandes transformadores para los cuales se considera importante, poder medir o registrar a distancia, la temperatura del arrollamiento. Por regla general, se utilizan tres o más imágenes térmicas situadas sobre los arrollamientos del transformador. Las imágenes térmicas permiten seguir desde el exterior la evolución de la temperatura en el punto del arrollamiento donde están situadas.

Los relés térmicos se emplean para proteger a transformadores de mediana potencia, autotransformadores y, muchas veces también, transformadores de gran potencia (por ejemplo, cuando no han sido equipados de imágenes térmicas desde su construcción), parece preferible emplear relés térmicos; para potencias superiores a los 1.000 kVA se aconseja utilizar relés térmicos secundarios. Con una elección correcta de las constantes de tiempo, el calentamiento del relé térmico sigue las fluctuaciones de la temperatura del arrollamiento con una diferencia tan pequeña que, con este medio tan sencillo, se obtiene una buena aproximación de una perfecta protección contra las sobrecargas. En caso de carga simétrica sobre las tres fases (o sea, cuando las corrientes de fase difieren entre sí de menos de 10 %), basta instalar un relé térmico en una de las fases, preferentemente, la central.

1.5.5 Contra sobreexcitación

Ha sido práctica usual la utilización de un relé de tensión, cuya operación era función de los V/Hz discriminados por un circuito resonante L-C adecuado. Hoy día, sobre todo en los diseños digitales de las protecciones diferenciales de transformador, se segrega el **5**º armónico de la corriente del transformador para que opere la protección al sobrepasar este armónico sus valores normales, ya que ello es indicativo de la existencia de sobreexcitación.

Como resumen señalaremos que es una práctica muy usual en grandes transformadores y en aquellos que cubren servicios de gran importancia en el sistema, utilizar protecciones de detección de gas, de presión de aceite, térmicas, sobreintensidad y diferenciales de alta velocidad, además de otras protecciones eléctricas de apoyo.[8]

1.6 Actualidad de los Métodos de Protecciones Eléctricas para Transformadores de Potencia

1.6.1 Métodos de protección mediante relés digitales

En la actualidad existen relés de protección de alta velocidad para transformadores de potencia basados en microprocesadores. Estos relés combinan elementos de protección diferencial porcentual, sobreintensidad, frecuencia y sobreexcitación, junto a la monitorización de los distintos armónicos, y la distorsión armónica total (THD) en un solo equipo. [16]

El frenado por armónicos adaptable está dirigido al problema de falsos disparos durante la magnetización. Los elementos de sobreintensidad temporizada adaptables, reajustan sus valores de arranque basándose en la capacidad calculada del transformador en caso de suministro de corrientes de carga con alto contenido en armónicos.

La corrección del error de relación del transformador de corriente monitoriza la posición de toma de carga y la corrige automáticamente.

Permiten programar ecuaciones de tipo PLC basadas en entradas lógicas y elementos de protección para asignarlas a cualquiera de las salidas.

Ofrece una potente herramienta de pruebas y simulación. Esta permite al ingeniero de protección comprobar la funcionalidad del relé basándose en datos oscilográficos recogidos o generados por ordenador. Estos datos pueden convertirse a un formato digital y cargarse en el buffer de simulación para su reproducción. Asimismo, incorpora una función de captura oscilográfica, que recoge datos oscilográficos en condiciones de falta, magnetización o alarma.

La función de auto-configuración elimina la necesidad de conexiones especiales a los transformadores de corriente, ya que conecta todos ellos en estrella.


1.6.2 Método de Protección mediante redes neuronales artificiales RNA

Figura 1.10.- Relé de protección aplicando una red neuronal artificial

Desde las RNA se pueden abastecer un excelente patrón de reconocimiento, ellas están propuestas por muchos investigadores para ser implementadas en los relés que protegen transformadores de potencia. La aplicación común de una RNA se ilustra en la Figura 1.10, donde:

- Las RNA están alimentadas por las corrientes de ambas fases, en coordenadas de restricciones diferenciales. El desplazamiento de la ventana de datos, consistente en el muestreo reciente y el consiguiente del historial, alimenta las RNA.
- La decisión de las muestras son codificadas desde la salida de la RNA.
- Los patrones de entrenamiento expuestos a las RNA's estén usualmente bajo las condiciones de la corriente Inrush, para los fallos internos y externos. Solo esta seleccionado las posiciones de los datos de la ventana para el entrenamiento típico.
- Un post procesamiento puede ser aplicado adicionalmente. Las RNA pueden también aproximarse a reproducir un tipo de fenómeno específico. En primer lugar, la red es entrenada para averías internas diferenciadas de las otras fallas. En segundo lugar, la red es entrenada para distinguir entre una falla interna y un patrón de una falla específica no interna (por ejemplo un Inrush). También, las

RNA's son propuestas para ciertas funciones auxiliares tales como la reconstrucción de las formas de ondas de la corriente del secundario del transformador, distorsionada por la saturación de los transformadores de corrientes. [1]

Los relés basados en Redes Neuronales para transformadores de potencia muestran cualidades de seguridad y dependencia.

Las figuras 1.11 y 1.12 presentan la salida desde RNA's entrenadas para proteger el mismo transformador como en el ejemplo para un esquema donde se utiliza la lógica fuzzy.¹



Figura 1.11.- Operación de las salidas de relés basados en RNA y lógica fuzzy durante la transición de un proceso de energización a régimen de avería

La RNA es alimentada por la mitad de los ciclos de la ventana de datos del entrenamiento de las corrientes desde todas las fases. La red tiene 30 neuronas de entrada, 15 capas ocultas y una neurona de salida. En la figura 1.11 presenta un muestreo de 18 ms, la figura 1.12 muestra un muestreo de 12 ms.

¹ Lógica Fuzzy o Lógica Difusa, emula la manera en que el cerebro razona o piensa, permite tratar información imprecisa.

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

1.6.3 Método de protección mediante TC's ópticos y otros sensores (futuro de la protección diferencial en transformadores de potencia)

Los TC's ópticos tienen algunas ventajas esenciales sobre los TC's clásicos por ejemplo estos no poseen el efecto de saturación, el cual puede ayudar a resolver algunos problemas en los relés diferenciales, además no requieren un sistema de aislamiento fuerte y por otra parte no poseen de algunos materiales inflamables tales como el aceite.



Figura 1.12.- Operación inmediata del relé Fuzzy y relé RNA en condiciones extremas de avería

Los TC's ópticos son de dos tipos:

- TC de bulbo óptico, el cual usa un ring de cristal cómo sensor.
- TC de fibra óptica: usan una fibra óptica como sensor.

Los esfuerzos en estas áreas de los TC's ópticos relacionados con problemas de zonas birefrigerantes lineales donde las fibras prevean el decremento de la sensibilidad de los TC's

Los núcleos de Rogowski's, que son dispositivos medidores de corrientes que producen una baja potencia de salida, pero ofrece algunas ventajas sobre los TC's clásicos, es otra de las opciones para mejorar las condiciones de operación para la protección del transformador.

También, dispositivos nuevos de mediciones están bajo investigación. La medición integrada como unidad para la tensión y la corriente es un buen ejemplo. El principio de operación basado en el Teorema de Poynting's el cual define como la energía electromagnética en términos de la intensidad de los campos magnéticos y eléctricos en un punto en el espacio. La corriente es medida por un sensor en el campo magnético en su componente tangencial. La tensión es medida por sensores en el campo eléctrico en su componente radial en la región de alta tensión.

Avances en el área d sensores de medición pueden contribuir a mejorar la calidad de la protección de los sistemas de potencia.

1.7 Redes Neuronales Artificiales

.....

Las redes neuronales artificiales (RNA) constituyen la forma más genérica de Inteligencia Artificial para emular al pensamiento humano y su gran ventaja es, precisamente, la orientación al procesamiento distribuido al tener en su estructura elementos de cálculo más simples interconectados entre sí lo que trae como consecuencia mucha mayor rapidez en el trabajo, además de mucha mayor confiabilidad pues si falla uno de sus elementos el sistema continúa trabajando adecuadamente.

La RNA está basada en la estructura y funcionamiento del sistema nervioso humano, donde la neurona es el elemento fundamental. Es conveniente entonces conocer de forma muy simple el modelo biológico de la neurona humana. [19]

1.7.1 El modelo Biológico

Una neurona es una célula viva y, como tal, contiene los mismos elementos que forman parte de todas las células biológicas, además de otros elementos muy característicos. Como se muestra en la figura 1.13, consta de un cuerpo celular o núcleo, del que salen una rama principal o línea de transmisión llamada axón, que transporta la señal de salida hacia el exterior, hacia otras neuronas interconectadas con ésta, y varias ramas más cortas o zonas receptivas, llamadas dendritas, que acarrean las señales al interior de la neurona. A los puntos de conexión de una neurona con otra se les conoce como sinapsis o unión sináptica.



Figura 1.13.- Diagrama esquemático de una neurona biológica.

1.7.2 El modelo artificial

Las neuronas artificiales o simplemente neuronas, que están interconectadas entre sí y que tienden a simular el sistema nervioso del cerebro humano.

Son realizadas usando componentes electrónicas aunque también pueden ser simuladas por un software en una microcomputadora digital. Como se verá más adelante, las RNA procesan la información que les llega directamente por sus entradas y la almacenan en una memoria local que poseen, denominada peso sináptico.

Se asemejan al cerebro en dos aspectos fundamentales:

- Adquieren el conocimiento a través de un proceso de aprendizaje para lo cual se utilizan los llamados algoritmos de aprendizaje, cuya función es modificar los pesos sinápticos de la red en forma ordenada, de manera que se logre el objetivo deseado.
- Las conexiones interneurónicas, conocidas como pesos sinápticos o simplemente pesos, son usadas para almacenar el conocimiento.

1.7.3 Estructura de la red neuronal artificial

La neurona artificial es la unidad fundamental de procesamiento de la información de cualquier modelo de RNA y a partir de ahora la identificaremos con la letra k. Su modelo se muestra en la figura 1.14 y en ella se identifican tres elementos básicos:



Figura 1.14.- Modelo no lineal de una neurona artificial.

- Un conjunto de sinapsis o conexiones provenientes de otras neuronas o del exterior. Cada conexión está caracterizada por un peso o fortaleza propio, cuya función es análoga a la de la unión sináptica de la neurona biológica, y que se identificará, a partir de este momento, con la letra W con dos subíndices, el primero se refiere a la neurona analizada y el segundo a la entrada de la sinapsis a la cual se refiere el peso. El peso W_{kp}, por ejemplo, corresponde a la conexión entre la neurona k y la neurona p de la capa previa, y es positivo si la sinapsis asociada es excitadora, negativo, si es inhibidora y 0 si la conexión no existe.
- Un sumador (Σ) para sumar las señales de entrada, pesadas por sus respectivas conexiones. Específicamente, una señal X_p que se encuentra a la entrada de la sinapsis p que la conecta a la neurona k, es multiplicada por el peso sináptico W_{kp} Estas entradas ponderadas son sumadas constituyendo esta operación una combinación lineal, que se identifica en la figura como NET_k.
- Una función de activación (F) para limitar la amplitud de la salida (A k) de la neurona k. Esta función limita el rango de amplitud permisible de la señal de salida a valores finitos, motivo por el cual también se conoce como función 'squashing'. Típicamente el rango de amplitud normalizado de salida de una neurona es el intervalo cerrado [0,1] o el intervalo [-1,1].

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

El modelo de la neurona puede además incluir una entrada adicional aplicada externamente a la función de activación.

En términos matemáticos, la salida (Ak) en este caso será igual a:

$$A_k = F (NET_k + \Theta_k)$$
(1.1) [19]

F(.) es la función de activación.

El trabajo de la neurona artificial puede resumirse entonces de forma muy simple:

Una neurona k recibe un conjunto de entradas X ₁, X ₂, ... X _p (cada una de las cuales representa la salida de otra neurona de una capa previa o, simplemente, proviene del exterior), y calcula un valor de salida A _k (que envía a otras neuronas). Para ello, cada entrada es multiplicada por un peso (análogo a la fortaleza sináptica de la conexión que une la neurona k con la señal X), que es la potencia con que dicha entrada afecta a la neurona, y todas las "entradas pesadas" son entonces sumadas para determinar el nivel de activación o combinación lineal de la neurona (NET_k), siendo:

$$NET_{k} = \sum_{j=1}^{p} W_{kj} X_{j}$$
 (1.2) [18]

donde W_{k1}, W_{k2},...,W_{kp}, son los pesos sinápticos de las conexiones que llegan a la neurona k.

Finalmente, una función de activación determina el valor de salida, utilizando la expresión vista anteriormente para la salida A_k .

1.7.4 Funciones de activación más usadas en las redes modernas.

La función de activación, denotada por F en las figuras 1.14, define la salida de la neurona en términos del nivel de actividad de sus entradas.

Existen cuatro tipos básicos de funciones de activación que dan lugar a distintos tipos de neuronas artificiales. Ellas son:

- Función escalón o umbral.
- Función lineal.

- Función sigmoidal.
- Función gaussiana.

La función escalón o umbral únicamente se utiliza cuando las salidas de la red son binarias

Cuando la combinación lineal NET_k (suma de las entradas pesadas) es mayor o igual que cierto valor umbral o cuando el nivel de activación interna $V_k \ge 0$, la salida es 1, de lo contrario, la salida es 0 (o -1 si es tipo signo), tal como se muestra en la figura 1.15.



Figura 1.15.- Función de transferencia en escalón.

La función lineal responde a la expresión F(x) = a * x para x entre - 0.5 y 0.5 En estas neuronas si el nivel de activación interna es menor que un límite inferior, la salida se define como 0 (o -1), y si es mayor que un límite superior se define como 1. Si el nivel de activación interna está comprendido entre ambos límites, entonces la salida se define como una función lineal, y por lo general, el factor de amplificación de la región lineal se asume igual a 1. La figura 1.16 muestra un ejemplo.



Figura 1.16.- Función de transferencia lineal.

En las RNA modernas es la función de activación más usada pues es la que permite simular más exactamente las características transferenciales no lineales de la neurona biológica.



Figura 1.17.- Función de activación sigmoidal.

Una función de este tipo comúnmente usada hoy día es la función logística, conocida simplemente como función "sigmoide" (significa en forma de S), y se muestra en la Figura 1.17 a).

Otra función de activación sigmoidal muy común es la tangente hiperbólica (es a menudo usada en el campo de la ingeniería). La salida de esta función tiene valor 0 cuando V_k es 0 (ver Figura 1.17 b).

La tangente hiperbólica tiene un valor bipolar de la salida A_k , lo cual es muy beneficioso en ciertas redes. De forma similar ambas garantizan que grandes señales puedan ser procesadas sin saturación por la red, mientras que pequeñas señales se procesen sin atenuación excesiva.

Matemáticamente la función sigmoide es expresada como:

$$F(V_k) = \frac{1}{1 + e^{-a.V_k}}$$
(1.3) [18]

donde "a" es el coeficiente o ganancia que determina la pendiente de la zona lineal de la función. Matemáticamente la tangente hiperbólica sería,

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia



Figura 1.18.- Función de activación gaussiana.

La función de activación gaussiana se muestra en la figura 1.18. Como su centro y anchura pueden ser adaptados, mapeos que pueden requerir dos capas ocultas al utilizar funciones sigmoidales, en ocasiones pueden requerir sólo una si se utilizan funciones gaussianas.

1.7.5 Clasificación de las redes neuronales artificiales

En general se pueden identificar diferentes arquitecturas neuronales dependiendo de la forma en que se conectan las neuronas. Ellas son:

- Redes de alimentación hacia adelante o feedforward.
- Redes recurrentes.
- Redes con estructuras enrejadas.

Debe señalarse que alrededor del 90 % de las RNA que se utilizan en ingeniería hoy día, en nuestras aplicaciones, tienen arquitectura Feedforward, por tal razón, en este capítulo y en el presente proyecto haremos referencia a esta arquitectura.

1.7.5.1 Redes de alimentación hacia adelante o feedforward.

El flujo de señales siempre va hacia adelante, desde la entrada hacia la salida. Pueden ser simple capa o multicapa. Se conoce como **capa o nivel** a un conjunto de neuronas cuyas entradas provienen de la misma fuente y cuyas salidas se dirigen al mismo destino (que puede ser otra capa de neuronas o la salida de la red). Se asume que los pesos de las conexiones están asociados con las neuronas de la capa siguiente, luego una

capa consiste de un conjunto de pesos y de las neuronas subsiguientes. Veamos a continuación las características de cada una de estas RNA.

Redes simple capa.

Es la red más sencilla y agrupa varias neuronas colocadas en una capa, como se muestra en la figura 1.19. Los pequeños nodos cuadrados de la izquierda sirven sólo para distribuir las entradas, ellos no realizan cálculos por lo que no constituyen neuronas artificiales como las explicadas hasta ahora, también se agrupan formando una capa a la que muchos autores se refieren como capa 0.



Figura 1.19.- Diagrama de flujo de una red neuronal simple capa.

Un patrón de entradas X tiene cada uno de sus elementos conectados a cada neurona artificial a través de pesos separados. La salida de cada neurona simple es la suma pesada de las entradas, en las cuales se incluye el bias o umbral, afectada por la función de activación.

Verdaderamente una red no tiene que tener todas las conexiones mostradas en la figura, sólo se muestran todas para tener el caso más general.

La programación se realiza en forma matricial, por lo que se puede plantear que: $A = F(W^*X, B)$,

donde:

- F: es la función de activación.
- W: es la matriz de los pesos sinápticos, de orden (k, p) es decir, k (número de neuronas de la capa) filas y p (número de entradas) columnas, de forma tal que

 W_{21} por ejemplo, corresponde al peso de la conexión de la primera entrada con la segunda neurona de la capa.

- X: es la matriz de las entradas, de orden (p, z) es decir, p (número de entradas) filas y z (número de patrones de entrada) columnas, de forma tal que X ₅₃ por ejemplo, corresponde a la entrada número 5 del tercer patrón de entrenamiento.
- B: es un vector columna donde cada fila corresponde al bias de la neurona correspondiente de la capa.
- A: es la matriz de las salidas de la red, de orden (k , z) es decir, k (número de neuronas de la capa) filas y z (número de patrones de entrada) columnas, de forma tal que A ₃₂ por ejemplo, corresponde a la salida de la neurona número 3 de la capa al aplicar a la red el segundo patrón de entrenamiento.

Redes multicapa.

Se distinguen por la presencia de una o más capas ocultas. Consisten de un conjunto alternado de neuronas y pesos. Están formadas por la conexión en cascada de un grupo de capas simples, siendo la salida de una capa la entrada de la capa siguiente, de manera que los nodos fuente en la capa de entrada suministran los respectivos elementos del patrón de activación (vector de entrada) el cual constituye las señales aplicadas a las neuronas de la primera capa oculta, las señales de salida de estas son usadas como entradas de la siguiente capa y así ocurre en toda la red. El conjunto de señales de salida de las neuronas de la capa de salida constituye la respuesta de la red al patrón de activación suministrado. Los nodos de cálculo son entonces correspondientemente llamados neuronas o unidades ocultas o neuronas de salida.

En la Figura 1.20 se muestra el diagrama esquemático de una red de dos capas totalmente conectada, y, como en la figura anterior, se incluye la capa de entrada o capa 0. Existe además una capa de neuronas ocultas y una capa de salida. Se dice que la red de la figura 1.20 es una red multicapa 4-4-2 porque tiene 4 nodos de entrada, 4 neuronas en la primera capa oculta y 2 neuronas en la capa de salida. Aunque no tiene que coincidir el número de entradas de un mismo patrón (lo que hemos identificado hasta el momento con la letra p, y que en la figura se representan con pequeños cuadrados en la

capa 0) con el número de neuronas de la primera capa oculta, es frecuente que esto ocurra. Es común que las redes multicapa se identifiquen con el código:

$$p - h_1 - h_2 - \dots - q$$

donde:

p: es el número de nodos fuente, h_i es el número de neuronas ocultas de la capa i, y
q: es el número de neuronas de la capa de salida.



Figura 1.20.- Gráfico arquitectónico de una red neuronal de dos capas.

Se dice que una red multicapa está totalmente conectada si cada neurona de una capa de la red está conectada a cada una de las neuronas de la capa siguiente, en otro caso están parcialmente conectadas. Un caso particular de esta última es la red localmente conectada, un ejemplo de la cual se muestra en la figura 1.21 en la que existe una simple capa oculta cuyas neuronas se conectan a un conjunto local de nodos fuente que se encuentran situados en sus alrededores inmediatos y una capa de salida en que cada neurona está conectada a un conjunto local de neuronas ocultas. Como se observa, la red feedforward multicapa localmente conectada tiene una estructura especializada en la cual cada neurona oculta responde a las variaciones locales de la señal fuente.

En una red multicapa las capas de neuronas ocultas son particularmente importantes cuando el tamaño de la capa de entrada es grande.



Figura 1.21.- Gráfico arquitectónico de una red feedforward localmente conectada.

Si se utilizan funciones de activación lineales con ganancia a=1 entonces se pueden multiplicar los pesos de las distintas conexiones en cascada dando lugar a una red equivalente de una sola capa. Estas redes tienen grandes limitaciones por lo que se utilizan frecuentemente las funciones de activación no lineales sigmoidales explicadas anteriormente.

Para el trabajo matemático o de programación de una red multicapa en cada capa de neuronas se aplican las mismas matrices explicadas para la red monocapa.

1.7.6 Aplicaciones de las redes neuronales en la Ingeniería Eléctrica.

- Análisis de seguridad (Red de Hopfield)
 - Determinación del tiempo crítico de despeje.
 - Estimación de la seguridad estática.
 - Estimación de la seguridad dinámica.
 - Estimación de la seguridad de voltaje.
- Predicción de demanda (Perceptrón multicapa y mapas autoorganizativos de Kohonen)
 - Predicción de armónicos de voltaje.
 - Predicción de demanda en una semana.
 - Predicción de demandas diarias máxima y mínima.
- Detección y diagnóstico de fallas (Perceptrón multicapa).
 - Detección de fallas de alta impedancia en alimentadores de distribución.

- Detección incipiente de fallas en máquinas rotatorias (particularmente de inducción).
- Detección de fallas en transformadores.
- Diagnóstico de fallas ante perturbaciones.
- Detección de fallas en sistemas de transmisión AC-DC.
- Operación (Perceptrón multicapa).
 - Análisis de corrientes de fuga.
 - Análisis en línea de estabilidad dinámica.
 - Clasificación de formas de onda de perturbaciones.
 - Despacho económico.
 - Detección y control de líneas sobrecargadas.
 - Detección del efecto de magnetización de corriente Inrush en transformadores.
 - Monitorización de fuentes armónicas.
 - Planificación de la expansión.
 - Procesamiento de alarmas.
 - Switching óptimo de capacitores.
- Modelación y control de máquinas (Perceptrón multicapa).
 - Análisis de estabilidad en generadores sincrónicos.
 - Análisis de estabilidad transitoria.
 - Análisis en régimen permanente de máquinas sincrónicas.
 - Análisis de vibraciones.
 - Control adaptivo de generadores sincrónicos.
 - Control de convertidores de potencia.
 - Estimación de ondas distorsionadas.
 - Modulación por ancho del pulso.
 - Control de excitación en máquinas sincrónicas.
 - Control de motores de CD.
 - Control en tiempo real de capacitores de distribución.
 - Diseño de estabilizadores.
 - Monitoreo y control de calderas.

- Identificación de fuentes armónicas.
- Identificación y control de motores de CA con campo orientado.
- Observadores de flujo para accionamientos de motores de inducción.
- Modelación de máquinas sincrónicas.
- Regulación de turbogeneradores.
- Filtros activos para eliminación de armónicos de voltaje.
- Plantas de generación (Perceptrón multicapa).
 - Detección de cambios en modos de operación.
 - Diagnóstico de condiciones anormales.
 - Diagnóstico de transitorios.
 - Modelación termodinámica de la generación.
 - Monitorización de plantas, de válvulas, control de calderas.
 - Validación de señales.
 - Predicción de la potencia térmica.

1.8 Conclusiones parciales

- Del estudio precedente y los reportes prácticos en los sistemas de potencia, se han seleccionado como averías más frecuentes y dañinas en la operación de los transformadores de potencia:
 - Cortocircuitos internos
 - Cortocircuito externo en el lado secundario del transformador.
- Resulta importante diferenciar en el trabajo de los relés digitales, la ocurrencia natural de los Inrush en comparación con las corrientes de cortocircuitos.
- Se propone utilizar las redes neuronales artificiales como herramienta, para el desarrollo del algoritmo del relé digital por ofrecer estas adecuadas prestaciones en proteger los transformadores de potencia ante regímenes de averías.
- Se propone utilizar una red neuronal artificial con estructura Feedforward con alimentación hacia delante.

CAPÍTULO II DISEÑO EXPERIMENTAL DEL RELÉ DIGITAL INTELIGENTE BASADO EN UNA RED NEURONAL

2.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objeto la estructuración de la parte experimental de un relé que protege a un transformador de potencia ante los regímenes de averías más típicas en un sistema de potencia.

Se hace necesario señalar, que aunque se ha avanzado mucho en la modelación de estos sistemas, en ocasiones resultan insuficientes los modelos matemáticos formulados desde postulados físicos que tratan de explicar el comportamiento real del objeto; y para esto se establece sus variables y parámetros de operación, que en ocasiones no son bien conocidas, y es por esto que la inteligencia artificial ayuda al desarrollo de algoritmos de cálculos y simulación sin necesidad obligatoria de conocer todo el sistema.

Es por esto que una de las técnicas de inteligencia artificial más utilizadas son las redes neuronales artificiales, adecuadamente fundamentadas en el primer capítulo.

Una de las razones esenciales de su uso radica en su cualidad de aprender. El término aprender implica cómo el procedimiento neuronal interpreta los datos recolectados desde el sistema para su entrenamiento, y cómo éste es modificado y devuelve una respuesta o predicción del sistema mejorado.

Por otra parte, es bueno indicar, la posible incoherencia de tener casos en que la descripción física del fenómeno secundario no concuerda o es difícil introducir en el modelo, es decir, el sistema no puede ser modelado con suficiente exactitud, porque no es posible tener en cuenta con precisión los efectos de determinados fenómenos (efectos de histéresis, saturación magnética del objeto); entonces en este contexto es necesario resolver con otros modelos que permitan una representación desde la observación directa de la funcionalidad del sistema, y de esta forma se realiza la incorporación de otras cualidades dentro del modelo sobre la base de los datos experimentales.

2.2 Datos de los Equipos

Los datos de los transformadores y de los elementos con los que se realizaron las pruebas, son importantes por la razón de que en función de estos parámetros se simularan en el Simulink de Matlab los patrones de entrenamiento para la Red Neuronal Artificial.

• Sondas Amperimétricas

La medición de las corrientes del primario y secundario del transformador de potencia objeto a proteger, debe realizarse de una manera confiable.

Esta sonda permite ingresar las señales de corriente del transformador en los niveles a los cuales la tarjeta de adquisición de datos USB 6009 lo establece (+/- 20VCA; 50mA). De esta manera se establece la comunicación y control entre el relé inteligente y el transformador de potencia.



Figura 2.1.- Sonda amperimétrica Fluke modelo i400s

Se utilizaron 2 pinzas transductoras amperimétricas marca Fluke modelo i400s (Figura 2.1) cuya relación de conversión es 10 mV/A – 40 A, aplicándolas en todas las experimentaciones realizadas.

Para la comprobación del relé inteligente se realizaron 3 experimentaciones en las cuales se introdujeron regímenes normales y anormales.

Experimentación # 1 Detección y Protección contra Regímenes de cortocircuito.

Esquema eléctrico:



Figura 2.2.- Esquema eléctrico de control del Experimento 1.



Figura 2.3.- Esquema de Fuerza del Experimento 1

Estos equipos se encuentran en el laboratorio de protecciones eléctricas del Centro de investigaciones de protecciones eléctricas (CIPEL - La Habana). El esquema del circuito de control que se empleo en la práctica se muestra en la figura 2.2. La figura 2.3 muestra el esquema eléctrico de fuerza, en el cual el relé inteligente (RNA) está conectado a las pinzas amperimétricas, la tensión de alimentación es 220 V.

• Transformador.

Marca:	VEB TRANSFORMER
Fases:	3
Potencia Nominal [KVA]:	16
Tensión Nominal [V]:	440 / 225
Corriente Nominal [A]:	21 / 41
Tensión de Cortocircuito [%]:	3,7
Peso [kg]:	140
Grupo de Conexión:	DY5
Frecuencia [Hz]:	50 / 60
Motor de Inducción	
Marca:	ENERGO (Rusia)
Fases:	3
Potencia eléctrica [KW]:	0,75
Conexión:	Y
Tensión Nominal [V]:	220
Corriente Nominal [A]:	3,8
Velocidad retórica [r.p.m]:	1640

Factor de potencia [cos φ]:	0,73
Rendimiento [%]:	72,0
Carga resistiva trifásica (falla a tierra o cort	tocircuito)
Tensión nominal [V]:	220
Resistencia eléctrica/fase [Ω]:	4
Corriente Nominal [A]:	54

Experimentación # 2 Registro de Regímenes normales e Inrush

Estos equipos se encuentran en el laboratorio de maquinas eléctricas del Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM - Moa), el esquema del circuito de fuerza se muestra en la figura 2.4, el secundario del autotransformador esta en vacio. En circuito se encuentra el relé inteligente (RNA) el cual procesara la corriente del devanado primario del autotransformador. La tensión de alimentación al sistema eléctrico es de 243 V y en la figura 2.5 se muestra el diagrama de conexión del autotransformador.



Figura 2.4.- Esquema de fuerza del experimento 2.

• Autotransformador.

Fases:	3
Potencia Nominal [KVA]:	7
Tensión Nominal [V]:	220
Corriente Nominal [A]:	23
Frecuencia [Hz:	60

 Carga resistiva trifásica (falla a tierra o cortocircuito) Tensión nominal [V]: 220 Resistencia eléctrica/fase [Ω]: 7,90 Corriente Nominal [A]: 25

Esquema de Conexiones:



Figura 2.5.- Esquema de la conexión del autotransformador

Experimentación #3

Estos equipos se encuentran en el laboratorio de maquinas eléctricas del Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM - Moa), el esquema del circuito de fuerza se muestra en la figura 2.6, la tensión de alimentación al sistema eléctrico es de 243 V.



Figura 2.6.- Esquema eléctrico de fuerza del experimento 3

• Transformador.

Marca:	Lothar Schroder Weiman
Fases:	1
Potencia Nominal [kVA]:	1
Tensión Nominal [V]:	120/240
Corriente Nominal [A]:	10/4,1
Frecuencia [Hz]:	60

2.3 Simulación del modelo del transformador de Potencia

Se utilizó el software Matlab y específicamente su simulador Simulink

2.3.1 Simulink.



Figura 2.7.- Modelo de un sistema de potencia trifásico en Simulink de Matlab.

Figura 2.8.- Modelo de un sistema de potencia monofásico en Simulink de Matlab.

En el Simulink de Matlab se modela los sistemas de potencia para obtener las simulaciones de las corrientes del primario y secundario del transformador de potencia. Las graficas de las corrientes obtenidas en simulación deben tener relación con los regímenes a los cuales la RNA debe diferenciar por lo tanto los datos que se ingresen en los bloques de cada elemento deben estar en concordancia con los datos nominales de los elementos del sistema eléctrico a experimentar. Las figuras 2.7 y 2.8 muestran modelos de un sistema trifásico y

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

monofásico respectivamente, con los que se obtuvieron las simulaciones fundamentales para obtener: regímenes normales (Rn), corrientes de cortocircuito (CcK) y corrientes de magnetización o Inrush (In). Las simulaciones son fuente de datos para el reconocimiento de averías o no averías para el relé inteligente a crear en este proyecto.

El tiempo de análisis de la simulación de los regímenes fue de 16 ciclos por segundo con intervalos de temporización variables, utilizando el método ode23tb (stiff/TR-BDF2), pero los intervalos generados automáticamente son inferiores a 1 µs.

El resultado de cada simulación es un régimen normal o anormal por lo tanto se salva en ficheros con el mismo formato dentro en los cuales están las variables de corriente del primario (Ipri) y del secundario (Isec), además los nombres de los ficheros deben ser de fácil identificación, he aquí un ejemplo del comando salvar en Matlab y su codificación en los ficheros.

>> save Rn.mat	Ipri Isec	; Regimen Normal
>> save In.mat	Ipri Isec	; Proceso de energización o Inrush
>> save CcK2max.n	nat Ipri Isec	; Cortocircuito interno primario máximo
>> save CcK3min.n	nat Ipri Isec	; Cortocircuito interno secundario mínimo
>> save CcK4max.n	nat Ipri Isec	; Cortocircuito externo máximo

Figura 2.9 Esquema de ubicación de los cortocircuitos con su respectivo código.

La figura 2.9 nos muestra la ubicación de los cortocircuitos en el sistema de potencia, entonces se crearon una amplia gama de simulaciones de cortocircuito en las cuales se varía la resistencia de falla, teniendo como máxima 4 Ω (CcKmax) y mínima de 8 Ω (CcKmin). Para obtener simulaciones de corrientes que contengan Inrush como por ejemplo lo muestra la figura 2.10, no se aplica carga al sistema modelado, además se caracteriza el bloque de generación con tensiones mayores a la nominal del sistema y su ángulo de fase debe ser diferente de 90°.

Figura 2.10.- Inrush simulado en Matlab / Simulink

Por experiencia se dedujo que los Inrush que contienen magnitudes elevadas (25 veces mayor a la nominal) se dan cuando se parametriza el ángulo de fase a 0° (cresta positiva) y 180° (cresta negativa).

Para obtener simulaciones de régimen normal se parametriza el bloque de carga variando su potencia en activa como en reactiva, el ángulo de fase del bloque de generación se lo ubica en 90°.

2.4 Descripción de la arquitectura del Relé RNA

.....

El proceso de diseño del Relé RNA consiste en los siguientes pasos: [17]

- Preparación de los datos para el entrenamiento.
- Selección adecuada de la estructura de la red.
- Entrenamiento de la red
- Simulación o Evaluación de la red con patrones no utilizados en el entrenamiento.

Los datos los obtenemos de las simulaciones realizadas en el Simulink de Matlab, en fin estos datos resultan ser las entradas (neuronas artificiales) de la RNA.

Se aplica un muestreo a las dos corrientes medidas determinando el rango de entrada de la red, por ejemplo si se toma cinco muestras por las dos señales que ingresan al relé, se multiplican y dan 10 entradas (10 neuronas en la primera capa de entrada).

El número de neuronas en las capas varía, esto depende de la complejidad de los regímenes que le ingresemos a la RNA. La capa de salida tendrá como respuesta dos neuronas, cada neurona controlara un interruptor de disparo el mismo que está ubicado en la fase del primario (Ipri) y secundario (Isec) del transformador de potencia.

No existe una metodología para establecer la cantidad de neuronas en las capas ocultas y menos aun el número de capas ocultas a emplear en la RNA. Por lo general, la cantidad de las capas ocultas, el número de neuronas en las capas ocultas y el tipo de función de transferencia se las establece en base a una metodología de prueba – error (experiencias que se dan en la simulación y el decrecimiento del error).

El algoritmo utilizado para la preparación de los datos es la función Preparar_Dif (tabla 1 del anexo 1), esta basado en tres etapas: Filtrado de las Muestras (tabla 2 del anexo A), Ventana de Muestras (tabla 3 del anexo A) y por último la preparación propiamente dicha de las muestras.

El filtrado consiste en una subrutina que extrae una cantidad determinada de muestras por ciclos. La función Filter (tabla 2 del anexo1) se creó para filtrar a una frecuencia de 1KHz,

es decir una ventana de 16 muestras por ciclos. Este algoritmo elimina los intervalos de tiempos diferentes de 0,001 s, dado que la variable de entrada In contiene a Ipri y Isec, estas últimas están conformadas con una fila que es el tiempo de simulación, se verifica utilizando un lazo iterativo (comando For) el intervalo de tiempo de cada instante y se eliminan, los diferentes a "a*1e⁻³". Los múltiplos de 0,001 s (1 ms) son pasados a la variable "s".

La siguiente etapa consiste en acoplar las muestras a la red mediante una ventana de muestras para luego realizar un barrido de muestras mediante las ventanas lo que se le denomina el ventaneo.

La Función Patron (tabla 3 del anexo 1) crea las ventanas de muestras en la matriz In. Para el presente proyecto se hizo un arreglo de 5 muestras por ventana, mediante un clico for, se realiza un ventaneo imbricado (figura 2.11), cada vez que la iteración se incrementa en 1 la variable "s" carga una ventana de 5 muestras, o sea desde la primera a la quinta muestra, la siguiente ventana será de la muestra #2 a la muestra #6 y así sucesivamente hasta que el ciclo for por medio de la iteración cumpla la siguiente condición i = 1: n(1,1)-Ventana. Estas ventanas serán los patrones de entrada a la RNA por lo tanto se le entregara 5 muestra de Ipri y 5 muestra de Isec, entregándole a la RNA un total de 10muestras.

Figura 2.11.- Ventaneo imbricado, las ventanas contiene 5 muestras

Ya con los patrones para la creación de la RNA se establece las variables Reg y Status, la variable Reg contiene los diferentes regímenes es decir estos llegan a ser los patrones mientras que la variable "Status" son la salida de la RNA. Esta salida contiene dos respuestas de estado lógico. Por ejemplo si se considera como patrón un régimen normal o una corriente de magnetización, la respuesta será [0;0] (interruptor del primario cerrado; interruptor del secundario cerrado). Si se considera como patrón un cortocircuito interno en el lado primario o secundario del transformador la salida será [1;1] (disparo del interruptor del primario; disparo del interruptor del secundario) y si se toma como patrón un cortocircuito externo en la salida se tiene [0;1] (interruptor del primario cerrado; disparo del interruptor del secundario). La salida se puede interpretar como interruptores del lado primario y secundario de un transformador.

La preparacion propiamente dicha se lo hace mediante el comando [P,T]=Preparar_Dif(Reg,Status,samples). El algoritmo Preparar_Dif carga los datos que tiene la variable Reg ubicarlos en una sola matriz P, asi mismo los datos que tiene la variable Status los incorpora en una matriz T. Samples significa el numero de muestras de la ventana.

El comando <u>nntool</u> facilita el trabajo con la red neuronal, permite crearla, inicializarla, entrenarla, simularla entre otras funciones a partir de los datos almacenados en variables (workspace).

El comando nntool (Figura 2.12) permite de una forma adecuada seleccionar la estructura de una RNA. En la ventana principal del comando nntool se importa desde el workspace de Matlab la matriz P que corresponde a las entradas (Inputs) y la matriz T que corresponde a la salida (Targets).

📣 Network/Data Manag	ier			
Inputs:	Networks:	Outputs:		
Ρ	net_10_8_3_2			
Targets:		Errors:		
т				
Input Delay States:		Layer Delay	K Create New Network	
		\square	Network Name: network1	
			Network Type: Feed-forward backprop	
Networks and Data	/		Input ranges: [0 1;-1 1]	Get from input: 🔽
Help	New Data New	Network	Training function: TRAINLM	▼
			Adaption learning function: LEARNGDM	✓
			Performance function: MSE	✓
Networks only		、 、	Number of layers: 2	
Initialize	Simulate Train	Adapt	Properties for: Layer 1	
			Number of neurons:1	
			Transfer Function: TANSIG	
			View Defaults	Cancel Create

Figura 2.12.- Ventana principal del Comando nntool de Matlab.

Mediante el nntool caracterizamos la red de la siguiente forma: el nombre de la red (Network Name), el tipo de red (Network Type) que en particular se trabajo con una red de neuronas artificiales feed-forward backpropagation (FFN), es decir propagación hacia delante, el rango de la entradas (Inputs Range), la funcion de entrenamiento (Training Function), tipo de función de aprendizaje (Adaption Learning Function), tipo de función de ejecución (Performance Function), número de capas (Number of Layer), cantidad de neuronas por capa (Number of Neurons), tipo de función de las neuronas de cada capa (Transfer Function). Se debe indicar que las funciones de transferencia utilizadas en la estructura de la red neuronal son: Tansig (capas ocultas) y Logsig (capa de salida).

Luego de haber ingresado los requisitos anteriormente citados, el comando nos permite ver la estructura de la RNA (Figura 2.13) para luego confirmar la creación, exportarla para el workspace de Matlab y salvarla. [11]

Este comando también permite entrenar (Train), inicializar (Init), simular (Simular) y poder visualizar los valores de los pesos y bias de cada capa (Weights).

Figura 2.13.- Estructura de una RNA desde el comando nntool.

Para entrenar, inicializar y simular la red creada con el comando nntool se utilizo algoritmos creados en Matlab los cuales facilitan el entrenamiento, inicialización de los pesos y simulaciones consecutivos ya que para obtener una RNA excelente se debe realizar muchas pruebas y estas están en función de variar regímenes conocidos o desconocidos por la red.

Dado que se almacenaron ficheros y por la posible creación de nuevos ficheros, en el presente trabajo se utilizaron comandos para el entrenamiento, la inicialización y la simulación de la red, estos comandos se explicaran a continuación.

El comando net=Entrenar(net,Reg,Status,samples) y mediante la función Entrenar_Dif (tabla 4 del anexo 1) permite el entrenamiento de la red ya estructurada desde el comando nntool.

- net: nombre de la variable o de la red que se dio en el comando nntool, además almacenará los pesos, bias y todas las características con que se cree.
- samples: número de muestras de una señal que puede ser Ipri, en el caso de esta experimentación es 5.

En el proceso de entrenamiento se utilizó un error promedio de 1x10-3 con 10000 iteraciones como máximo.

Para la simulación de la red se utilizo el comando Simular_Dif(net, Reg, samples) (tabla 5 del Anexo 1). Para la simulación se puede aplicar ficheros existentes como también comprobar la red con nuevos ficheros.

Donde:

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

net:	nombre de la red.
Reg:	nombre del régimen a simular en la red.
Samples:	numero de muestras.

El algoritmo del comando de simulación es el siguiente:

Luego de la simulación de comprobación ante el régimen dado, observaremos una grafica con dos señales como lo muestra la Figura 2.14 las cuales nos indican la respuesta de la RNA.

Figura 2.14.- Respuesta de la red luego de la simulación ante un cortocircuito externo.

Una vez entrenada y simulada la RNA se procede a extraer los pesos y bias. Además se guarda estos valores en ficheros de Excel. Para todo lo expresado en este párrafo se sigue el siguiente proceso considerando de que se trata de una red con 10 neuronas en la capa de entrada, 8 neuronas en la primera capa oculta, 3 neuronas en la segunda capa oculta y dos neurona en la capa de salida, El nombre de esta red es net_10_8_3_2 >> net_10_8_3_2

```
Columns 1 through 3
```

$0.00560440749554 \ -0.03437923544164 \ \ 0.02438637542618$	
-0.01164517421767 -0.27802935470452 -0.35376874608539	
0.02964276805031 0.15503872310938 1.49730211293500	
-0.11837598972790 -0.19193179581789 -0.31763196028934	
0.12571993497420 0.08894605240614 0.08210543021993	
0.07737109014236 0.00838051634058 -0.02678335149238	
$0.10153580034118 \ -0.07974213168937 \ -0.13376992720466$	
-0.08632297423240 0.05378437109422 -0.08485608054061	
Columns 4 through 6	
-0.01840308761962 0.00385838671023 -0.21450842350238	
-0.24611552989159 -0.09552001526423 0.00284830975567	
$0.23141476448180 \ -0.01451765633222 \ \ 0.41258387500018$	
-0.05371616619179 -0.09763948408772 0.16976251662520	
0.02060062394025 0.06831422461482 0.00181530705224	
-0.02201662308556 -0.43429775885261 0.39491268703894	
-0.09244887014644 -0.14614837757438 0.00303291400294	
-0.00581087212217 -0.01617746065871 0.10412594933413	

Columns 7 through 9 -0.16126730426603 -2.66501722690053 -0.88009787328970 -0.02754397625535 -0.04478754737361 0.10251187490349 -0.81669239822115 -0.06731493038030 0.03885740198089 0.10134838388026 0.29611375494294 0.43399753843432 -0.04002718828289 -0.12079488273923 0.17515070867062 0.03306059517343 -0.01355606135888 -0.15856777334839 0.04520336491805 0.03637353671924 0.01379229843807 0.32346224377231 8.62936273174018 1.00991132442103 Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos = [] [] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos (2,1) ;pesos capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos (2,1] ;pesos capa oculta 2 method (2,1) ;pesos					
-0.16126730426603 -2.66501722690053 -0.88009787328970 -0.02754397625535 -0.04478754737361 0.10251187490349 -0.81669239822115 -0.06731493038030 0.03885740198089 0.1013483838026 0.29611375494294 0.43399753843432 -0.04002718828289 -0.12079488273923 0.17515070867062 0.03306059517343 -0.01355606135888 -0.15856777334839 0.04520336491805 0.03637353671924 0.01379229843807 0.32346224377231 8.62936273174018 1.00991132442103 Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) :salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW :pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [] [3x8 double] [] [] >> pesos{2,1} :pesos capa oculta 2 y capa salida pesos =	Columns 7 through	9			
-0.02754397625535 -0.04478754737361 0.10251187490349 -0.81669239822115 -0.06731493038030 0.03885740198089 0.10134838388026 0.29611375494294 0.43399753843432 -0.04002718828289 -0.12079488273923 0.17515070867062 0.03306059517343 -0.01355606135888 -0.15856777334839 0.04520336491805 0.03637353671924 0.01379229843807 0.32346224377231 8.62936273174018 1.00991132442103 Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) :salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW :pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} :pesos capa oculta 2 ans =	-0.16126730426603	3 -2.6650172	2690053	-0.88009787328970	
-0.81669239822115 -0.06731493038030 0.03885740198089 0.10134838388026 0.29611375494294 0.43399753843432 -0.04002718828289 -0.12079488273923 0.17515070867062 0.03306059517343 -0.01355606135888 -0.15856777334839 0.04520336491805 0.03637353671924 0.01379229843807 0.32346224377231 8.62936273174018 1.00991132442103 Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) :salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW :pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} :pesos capa oculta 2 ans =	-0.02754397625535	5 -0.0447875	4737361	0.10251187490349	
0.10134838388026 0.29611375494294 0.43399753843432 -0.04002718828289 -0.12079488273923 0.17515070867062 0.03306059517343 -0.01355606135888 -0.15856777334839 0.04520336491805 0.03637353671924 0.01379229843807 0.32346224377231 8.62936273174018 1.00991132442103 Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [] [3x8 double] [] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	-0.81669239822115	5 -0.0673149	3038030	0.03885740198089	
-0.04002718828289 -0.12079488273923 0.17515070867062 0.03306059517343 -0.01355606135888 -0.15856777334839 0.04520336491805 0.03637353671924 0.01379229843807 0.32346224377231 8.62936273174018 1.00991132442103 Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	0.10134838388026	0.2961137	5494294	0.43399753843432	
0.03306059517343 -0.01355606135888 -0.15856777334839 0.04520336491805 0.03637353671924 0.01379229843807 0.32346224377231 8.62936273174018 1.00991132442103 Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) :salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW :pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} :pesos capa oculta 2 ans =	-0.04002718828289	-0.1207948	8273923	0.17515070867062	
0.04520336491805 0.03637353671924 0.01379229843807 0.32346224377231 8.62936273174018 1.00991132442103 Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	0.03306059517343	-0.0135560	6135888	-0.15856777334839	
0.32346224377231 8.62936273174018 1.00991132442103 Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	0.04520336491805	0.0363735	3671924	0.01379229843807	
Column 10 -0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	0.32346224377231	8.6293627	3174018	1.00991132442103	
-0.08611616748770 0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	Column 10				
0.24995279094142 0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [] [3x8 double] [] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	-0.08611616748770)			
0.03778979432365 -0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	0.24995279094142				
-0.30206766439971 0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	0.03778979432365	i			
0.05889027332665 -0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	-0.30206766439971	l			
-0.09194747541306 -0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	0.05889027332665	i			
-0.00428330422593 0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	-0.09194747541306	5			
0.12063126555664 >> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	-0.00428330422593	3			
<pre>>> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] [3x8 double] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =</pre>	0.12063126555664	ŀ			
<pre>>> xlswrite('pesos1.xls',net_10_8_3_2.IW{1,1}) ;salva en .xls los pesos capa oculta 1 >> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] [3x8 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =</pre>					
>> pesos=net_new_10_8_3_2.LW ;pesos de la capa oculta 2 y capa salida pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	>> xlswrite('pesos1.x	als',net_10_8	_3_2.IW{	$\{1,1\}$; salva en .xls los pesos capa o	culta 1
pesos = [] [] [] [3x8 double] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	>> pesos=net_new_1	.0_8_3_2.LW	/	;pesos de la capa oculta 2 y capa sal	ida
[] [] [] [3x8 double] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	pesos =				
[] [] [] [3x8 double] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =					
[3x8 double] [] [] [] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	[]	[]	[]		
[] [2x3 double] [] >> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =	[3x8 double]	[]	[]		
<pre>>> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =</pre>	[] []	2x3 double]	[]		
>> pesos{2,1} ;pesos capa oculta 2 ans =					
ans =	>> pesos{2,1}			;pesos capa oculta 2	
	ans =				

Columns 1 through 5

```
0.54903825415444
                   0.42346495638504
                                        -0.18934796772487
                                                             1.18565914755420
                                                                                  -0.62385363679734
-2.40552104046897
                   2.11252012226514
                                         -0.53910985127176
                                                              1.56543695218634
                                                                                  1.57274493374629
-0.88598691712881
                   0.33527501938240
                                        -0.34985764642813
                                                             -1.01291267363998
                                                                                  0.84998027058083
Columns 6 through 8
0.47226397880473
                   -0.86798766383860
                                        -2.60448847205272
1.02409022515419
                   -1.17837091401983
                                        0.56208296309631
0.72766570041712
                   -0.94759674136847
                                        1.95341434257357
>> xlswrite('pesos2.xls',net_10_8_3_2.LW{2,1})
                                                          ;salva en .xls los pesos de capa 2
>> pesos{3,2}
                                                       ;pesos capa salida
ans =
  8.41268843392461
                        -3.68443798922322
                                                9.39552143403411
  5.59889035154772
                        0.13286741861180
                                                       4.81945527120804
>> xlswrite('pesos3.xls',net_10_8_3_2.LW{3,2}) ;salva en .xls los pesos de capa salida
>> bias=net_10_8_3_2.b
                                                           ;bias de la red
bias =
  [8x1 double]
  [3x1 double]
  [2x1 double]
>> bias\{1,1\}
                                                               ;bias de la primera capa oculta
ans =
 -0.41244972571734
 -11.23580958946055
  2.61950526952326
 -0.16831697799700
  0.08070801767190
```

```
-8.65002286846135
  2.06351579049847
 -0.16329595562349
>> xlswrite('bias1.xls',net_10_8_3_2.b{1,1}')
                                                    ;salva en .xls los bias de capa oculta 1
>> bias\{2,1\}
                                                    ;bias de la segunda capa oculta
ans =
 -1.53012513299597
 -2.81076647183400
 -1.51178152301327
>> xlswrite('bias2.xls',net_10_8_3_2.b{2,1}')
                                                    ;salva en .xls los bias de capa oculta 2
>> bias{3,1}
                                                    ;bias de la capa de salida
ans =
  0.73585483813732
  5.63433813110216
```

>> xlswrite('bias3.xls',net_10_8_3_2.b{3,1}')

;salva en .xls los bias de capa salida

El comando xlswrite se utilizo para salvar en formato *.xls los valores de los pesos y bias en forma de una cadena matricial, lo cual por medio de VI's en LabVIEW permitirá ingresar los valores de pesos y bias de las respectivas capas de manera segura y rápida.

2.5 Validación de la red neuronal artificial

doctoral [1][Torres, 2005], las redes validadas son las siguientes:

Se crearon, entrenaron y evaluaron 4 RNA multicapas diferentes, con procesamiento hacia delante (Multilayer Feedforward Neural Networks MFNN) aspecto validado desde la tesis

net_10_8_3_2
net_10_8_2

 $net_8_8_2$

net_8_5_2

Estas estructura de red están disponibles para ingresar sus pesos, bias y funciones de transferencia a los respectivos VI's de LabVIEW.

2.6 Aspectos sobre LabVIEW

LabVIEW es un software basado en programación grafica o en G. Está diseñado para la construcción de los llamados sistemas SCADAS, que resuelve el monitoreo, supervisión y control de sistemas preferentemente industriales, pero también académicos e investigativos. Tiene además muy bien elaborada la instrumentación virtual con protocolos de comunicación muy cómodos y flexibles con sensores y transductores en campos.

.....

Los programas de LabVIEW se denominan instrumentos virtuales o VI's, debido a que su apariencia y operación imita a los instrumentos físicos, tales como osciloscopios y multímetros convirtiéndose en una interfase de usuario, o panel frontal, con controles e indicadores. Los controles son texto, botones de acción, perillas, y otros dispositivos de entrada. Los indicadores son gráficas, LED, y otros despliegues. Después de que ha construido su interfase, le agrega código utilizando los VI's y estructuras para controlar los objetos del panel frontal. Cada vez que se inserta uno de estos controles en la ventana Panel Frontal, automáticamente aparece un símbolo que lo representa en la Ventana Diagrama de bloques. En esta ventana es donde se realizan o confeccionan los programas. Un programa en LabVIEW está formado por una serie de símbolos relacionados o conectados entre sí de una forma lógica que responda a un algoritmo dado.

Estos símbolos pueden representar a los controles que han sido insertados en la Ventana Panel u otras funciones intrínsecas de LabVIEW, a las cuales se pueden acceder mediante el menú.

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

Después de construir un VI y de crear su icono y su conector, éste puede ser utilizado en otro VI. Un VI dentro de otro VI es llamado un subVI.

En LabVIEW la fortaleza de sus funciones matemáticas permiten crear la estructura e implementar las características fundamentales (bias y pesos sinápticos) de una RNA que fue creada entrenada y simulada en MATLAB.

LabVIEW como la interfaz de usuario cumple con los requerimientos de fácil integración con el sistema de **Adquisición de Datos**, despliegue de datos, manejo de interrupciones y almacenamiento de datos. La interrelación de la RNA de LabVIEW con los sistemas de adquisición de datos ofreció una solución económica y flexible para la experimentación.



Figura 2.15.- Tarjeta de Adquisición de Datos USB 6009 National Instruments™

Para el experimento se utilizaron 2 tarjetas USB 6009 (figura 2.15) a las que llamaremos ADQ-1 y ADQ-2, esta tarjeta dispone de canales de entrada y salida tanto analógicos como digitales de los cuales utilizamos 2 canales analógicos (AI0, AI1) con un nivel de voltaje de ± 10 V y dos canales del puerto de salida digital (PO.0, PO.1) con nivel de voltaje de 5 V a una corriente de 200mA. La configuración de estas tarjetas lo explicaremos con más detalle en los VI's donde se utilizaron.

Con el propósito de proteger el transformador y registrar los regímenes transitorios como muestra de lo ocurrido se realizo 2 VI's que tengan como fin lo antes mencionado. Estos programas se denominan:

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

- VI Guardar Regímenes ADQ 1
- VI RNA-ADQ 2

2.6.1 VI GUARDAR REGIMENES – ADQ1

El trabajo de este VI es registrar eventos que pueden ocurrir en un transformador, tales como:

Cortocircuitos Internos

Cortocircuitos Externos

Corrientes de Magnetización

Régimen Normal sin carga

Régimen Normal con carga

Y también la combinación de estos eventos para la validación del relé inteligente (RNA)

El panel frontal y el diagrama de bloques se muestran en la figura 2.16 y figura 2.17 respectivamente.



Figura 2.16.- Panel frontal del VI GUARDAR REGIMENES – ADQ1

Este programa consiste en guardar regímenes justo en el momento que se da en el interruptor virtual GUARDAR, estos eventos se clasifican en ciclos totales, CICLOS DE PREEVENTO y CICLOS DE POSTEVENTO.

Por ejemplo si damos como datos:

CICLOS TOTALES: 180 (3 segundos a guardar)

CICLOS PREEVENTO: 20 (0,33 segundos antes de guardar)

Tendremos como resultado 160 CICLOS DE POSTEVENTO (2,67 segundos después de guardar), estos regímenes son los registros de lo ocurrido y prueba del comportamiento de la RNA por lo tanto antes de previo a activar el interruptor GUARDAR debemos seleccionar en un Combobox el tipo de régimen y luego asignar en un Path la ubicación en donde se va almacenar la información en formato *. xls (Excel).

El detalle del diagrama de bloques se da en dos etapas, la primera funciona cuando el Case Structure se encuentra en False (figura 2.17) y la segunda etapa (figura 4) funciona cuando el Case Structure está en True.

Case Structure "False"

Cuando el interruptor virtual esta en false (0), ingresan las señales por medio de la tarjeta ADQ1 guardándose en un array llamado MEMORIA los datos de las muestra de los ciclos de preevento.

Case Structure "True"

Cuando se lleva el interruptor a True, se captura la cantidad de muestras por ciclos de postevento sumándolos a los ciclos de preevento guardados en el array MEMORIA dándonos como resultado los ciclos totales que hemos configurado en el panel frontal. En este VI hemos utilizado un Flat Sequence Structure el cual permite secuenciar: el ingreso de nuevos datos (señales), agregar los nuevos datos al array MEMORIA y salvarlos en una dirección para luego culminar el proceso llevando a False el interruptor virtual.

La velocidad de muestreo de la tarjeta ADQ1 es 960 Hz [17], siendo variable el número de ciclos totales (60 ciclos = 1 segundo) que se guardaran en formato de Excel para su posterior visualización de la forma de onda. Los canales de ingreso de voltaje analógico que se utilizaron en este VI fueron AI0, AI1.





Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia I Julio Geovanny Maza Pinza



Figura 2.18.- Diagrama de Bloques del VI GUARDAR REGIMENES – ADQ1 con la condición de un Case Structure en TRUE



Figura 2.19.- (a) Panel frontal y (b) Diagrama de bloques del VI RNA_ADQ2

2.6.2 VI RNA-ADQ2

El VI RNA_ADQ 2 (figura 2.19), tiene 3 etapas fundamentales:

- a. Adquirir
- b. Procesar
- c. Controlar

Adquirir: Mediante la tarjeta ADQ1 se obtiene 16 muestra por ciclo de cada señal de corriente del transformador a una frecuencia de muestreo de 960 Hz, ingresando las corrientes del primario y del secundario del transformador por los canales de voltaje diferencial AI0 (entrada analógica 0) y AI1 (entrada analógica 1), estas muestras serán las entradas que la RNA procesara.

Procesar: El procesamiento de las señales empieza con la preparación de las muestras o los datos que serán las entradas para la RNA. En esta etapa opera el VI RNA 10Ventana, denominado así porque prepara ventanas de datos. La ventana se denomina a la entrega de 5 muestras de la corriente del primario y 5 muestras de la corriente del secundario del transformador.

La programación del VI RNA10Ventana.vi dice que en la data dinamic se tienen los datos o valores instantáneos de las corrientes del primario y secundario del transformador. Por medio de un Index Array extraemos la fila 0 (corriente del primario) y fila 1 (corriente del secundario) para luego ingresarlas a un for loop en el cual realizaremos el ventaneo a cada fila. El ventaneo consiste en extraer de las 16 muestras del ciclo que registro la ADQ se toma las primeras 5 muestras, estas son las primeras entradas para la RNA, luego se extrae las siguientes 5 muestras que son de segunda muestra a la sexta muestra y así sucesivamente hasta que el contador del foor loop lo determine. El contador del for loop está condicionado por el tamaño de la fila menos una constante que en este caso es 5. Entonces por cada iteración del for loop tenemos 10 muestras que ingresaran al VI RNA y a la salida de este VI se tendrá 2 resultados los cuales salen del for loop, y sacaremos el

promedio de las iteraciones que se dieron al analizar un ciclo de cada corriente luego se la compara: si es mayor a 0,5 se encenderán los leds indicadores A y B, caso contrario no encenderán.

Dentro del VI RNA10Ventana se encuentran otros subVI's que tienen como característica principal ser el cerebro del relé inteligente. Estos subVI's son:

RNA new_10_8_3_2.vi

CapaNeurona.vi

Neurona.vi

Tansig.vi

2.6.2.1 RNA 10_8_3_2.vi

El VI RNA 10_8_3_2.vi tiene 1 array (1 muestras de la ventana) como entrada y un array como salida (dos respuestas), se lo denomina así, porque su configuración está basada en un grupo de VI's Capa Neurona que se asemejan a la estructuración de una RNA. Cada VI's capa neurona tienen 4 entrada y una salida. La salida del VI Capa Neurona es la entrada de la siguiente VI Capa Neurona.

Las entradas del VI Capa Neurona son: El array de entradas, los datos de pesos, los datos de bias y la función de transferencia. Los datos de pesos y bias se originan del entrenamiento que se le hizo a la RNA en Matlab.

La salida del último VI Capa Neurona es un array de dos filas (dos respuestas), las mismas que son comparadas con un valor mayor o igual que 0,5. Si es mayor que 0,5 se enciende el led Interruptor A o B caso contrario permanecerá apagado dicho indicador.

RNA 10_8_3_2 lleva el nombre de esta manera porque la RNA creada en Matlab e ingresada en LabVIEW tiene la siguiente estructura: 10 neuronas en la capa de entrada, 8 neuronas en la primera capa oculta, 3 neuronas en la segunda capa oculta y 2 neuronas en la capa de salida.

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

Como este tipo de VI se realizaron otras más con las siguientes estructuras:

VI RNA 10_8_2.vi

VI RNA 8_5_2

VI RNA 8_8_2.

2.6.2.2 Capa Neurona.vi



Figura 2.20.- VI Capa Neurona

El VI Capa Neurona mostrado en la figura 2.20 constituye la red más sencilla y agrupa varias neuronas colocadas en una capa, en este VI se ha utilizado una función For Loop, en el cual se realiza las operaciones matriciales de los elementos que ingresan a la neurona.

2.6.2.3 Neurona.vi

El VI Neurona mostrado en la figura 1 fue construido según el modelo de Neurona Perceptron que se muestra en la expresión (2.1). Este modelo hará que LabView se comporte según los conocimientos de neuronas artificiales explicados en el capítulo I y de forma similar a como fueron creadas y entrenadas en MATLAB en el presente capitulo.



Figura 2.21 VI Neurona

$$A = f\left(\sum_{i=1}^{n} P_{(i)} x W_{(i)}\right) + b$$
(2.1) [20]

Donde:

A: salida de la neurona

f: función transferencial que pueden ser de diferentes tipos (hardlim, tansig, logsig)

- P_(i): Entradas de la Neurona
- W_(i): Pesos de cada entrada
- b: bias

Las entradas del VI Neurona son 4: las entradas de la Neurona (Inputs), los pesos de cada entrada (Pesos), el bias de la Neurona (Bias) y finalmente el tipo de función transferencial que se ha escogido para dicha neurona. La salida es una sola y representa el resultado de la ecuación.

El ciclo iterativo utilizado hace la multiplicación de las entradas con sus respectivos pesos. La función Σ suma los productos obtenidos al bias y luego se hace pasar por la función transferencial escogida.

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

En la figura 2.22 se muestra el VI tagsig representa la función transferencial tagsig muy utilizada en la creación de redes de neuronas artificiales. Al igual que este VI se han creado otros VI para la conformación de las otras funciones transferenciales. La función tangencial sigmoidal (tagsig) sigue la expresión (2.2). Todas las funciones transferenciales siguen ecuaciones muy sencillas que se pueden obtener en el Toolbook Neural Network de MATLAB y fueron construidas para LabVIEW.



Figura 2.22.- VI tagsig

 $y = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \tag{2.2} [20] [11]$

Donde:

- y: salida de la función transferencial
- x: entrada de la función transferencial

Controlar: Las dos salidas o respuestas de la RNA serán comparadas con 1 lógico, si cumple con la igualdad encenderán los leds booleanos del panel frontal y a su vez sacara 5 V por el puerto de salida digital PO.0 y PO.1 de la tarjeta ADQ2 entonces mandaran abrir los interruptores de protección del transformador según el tipo de avería ocurrida caso contrario permanecerán los interruptores cerrados como muestra de que es un régimen normal.

En esta etapa se utilizo 2 VI's denominados Retención, uno por cada interruptor su misión es de mantener encendidos los leds booleanos en el caso de que ocurrió la falla así esta pase a estado de régimen normal, solo pasa a pagarse los leds si se resetea con el interruptor del panel frontal RESET.

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia

2.7 Circuito de salida para el esquema de potencia

Manejo de los interruptores (apertura y cierre de los interruptores)

La configuración de salida de la tarjeta USB – 6009 de National Instruments permite una corriente de salida digital de 200 mA y una tensión máxima de 5 V. Por lo anterior no es posible, ni recomendable realizar con la tarjeta el control de apertura y cierre de los interruptores primario y secundario del transformador de potencia.

En la figura 2.23 se presenta las conexiones adecuadas del puerto digital (PO.0 y PO.1) de la tarjeta USB 6009 a una conexión de fuente o sourcing.

Con esta conexión se puede controlar los interruptores de un transformador de 5 KVA a 220 V. Se utilizara dos relés electromagnéticos que interrumpirán la corriente del primario y la corriente del secundario del transformador cuando el relé inteligente detecte un régimen anormal de avería.

Las características del relé electromagnético son:

24 VDC y 200 mA para la alimentación de la bobina; los contactos permiten la conmutación hasta 40 Amperios.

El voltaje de alimentación que requiere la bobina del relee electromagnético, así como la corriente que consume, está muy por encima de las características de salida que permite la tarjeta USB 6009, por lo tanto se necesita controlar la bobina del relé, con un transistor NPN, para usar la conexión sourcing de la figura 2.23, con una ganancia de corriente (hfe) superior a 500. Este tipo de ganancias de corrientes altas se consigue con un transistor tipo Darlington, o utilizando dos transistores en cascada. El diodo D se utiliza para cortocircuitar la corriente de la bobina en el momento de la desconexión y evitar la generación de picos o transitorios de voltaje que pueden destruir al transistor o propagarse por la fuente de alimentación.



Figura 2.23.- Esquema eléctrico de la adquisición y control de las corrientes del transformador.

2.8 Conclusiones Parciales

- Resultó adecuado utilizar una RNA que presenta la siguiente estructura Feedforward alimentación hacia delante a la cual se la nombro net_10_8_3_2 por que posee 10 neuronas en la capa de entrada, 8 neuronas en la primera capa oculta con función de transferencia tansig, tres neuronas en la segunda capa oculta con función de transferencia tansig y 2 neuronas en la capa de salida con función de transferencia Logsig para el procesamiento digital de las señales del relé digital inteligente basado en el Matlab.
- La RNA aprende con un mínimo de información desde la adquisición de datos en los procesos transitorios.
- Se elaboraron dos software en LabVIEW, con sus interfaces a dos tarjetas de National Instruments USB 6009, que propician la implementación práctica del relé digital inteligente.

- Se verificó la identificación del relé digital inteligente en diferenciar cuando está en presencia de cortocircuitos y cuando está en presencia de Inrush, porque opera atendiendo la forma de onda.
- La RNA diseñada esta entrenada de acuerdo al tipo, y forma de conexiones del transformador de potencia.

CAPITULO III: ANÁLISIS DE LA EXPERIMENTACIÓN DEL RELÉ DIGITAL INTELIGENTE

3.1 Introducción

En este capítulo se plantean los resultados de la experimentación del relé digital inteligente para la protección de transformadores de potencia.

Para esto se establece una comparación entre el comportamiento de la simulación del relé desde el Matlab y LabVIEW con respecto a los gráficos obtenidos a partir de las mediciones de las señales en tiempo real.

Usando el Software Matlab se logro entrenar la red neuronal para las condiciones de protección diferencial del transformador, esto sirvió para elaborar en LabVIEW una red neuronal semejante y que está implementada sobre dos tarjetas de adquisición de datos y control de National Instruments. De esta forma se obtuvieron resultados experimentales en tiempo real.

A continuación vamos a ilustrar los resultados y su comparación con respecto a lo visto en la simulación.

3.2 Estructura del relé inteligente (RNA)

Los bloques de la figura 3.1 muestran el esquema de 4 redes neuronales artificiales multicapas con alimentación hacia delante (feed-forward backpropagation, FFN) con las cuales probaremos diferentes regímenes normales y anormales de laboratorio. Estas redes se diferencian por el número de neuronas en la capa de entrada, el número de capas, el número de neuronas en la capa oculta pero mantenemos una identidad entre estas redes por el número de neuronas en la capa de salida (2 neuronas), la función de transferencia en las capas ocultas (Tansig) y la función de transferencia en la capa de salida (Logsig).



Figura 3.1.- Redes neuronales artificiales entrenadas

La figura 3.1 (a) se muestra una red FFN a la cual llamaremos net_8_5_2 y está estructurada de la siguiente forma: ocho entradas multiplexadas que van al peso (IW{1,1}) de la capa de entrada que conjuntamente con el bias (b{1}) de la capa de entrada se suman y dicha señal entra a la primera capa oculta de cinco neuronas con función de activación tangencial-sigmoidal, seguida de sus pesos (LW{2,1}) y de su bias (b{2}). Por último la capa de salida constituida por dos neuronas con función de activación logarítmica-sigmoidal, tiene 2 salidas porque la red enviara dos señales [0;0] para cuando es régimen normal y [1;1] para cuando es un fallo para la cual dispararía.

En la figura 3.1 (b) muestra la red net_8_8_2, está estructurada de la siguiente forma: 8 entradas multiplexadas que van al peso ($IW\{1,1\}$) de la capa de entrada que conjuntamente con el bias (b{1}) de la capa de entrada se suman y dicha señal entra a la primera capa oculta de 8 neuronas con función de activación tangencial-sigmoidal, seguida de sus pesos

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia Julio Geovanny Maza Pinza

(LW{2,1}) y de su bias (b{2}). Por último la capa de salida constituida por dos neuronas con función de activación logarítmica-sigmoidal.

En la figura 3.1 (c) muestra la red net_ 10_8_2 , está estructurada de la siguiente forma: 10 entradas multiplexadas que van al peso (IW{1,1}) de la capa de entrada que conjuntamente con el bias (b{1}) de la capa de entrada se suman y dicha señal entra a la primera capa oculta de 8 neuronas con función de activación tangencial-sigmoidal, seguida de sus pesos (LW{2,1}) y de su bias (b{2}). Por último la capa de salida constituida por dos neuronas con función de activación logarítmica-sigmoidal.

En la figura 3.1 (d) muestra la red net_ $10_8_3_2$, está estructurada de la siguiente forma: 10 entradas multiplexadas que van al peso (IW{1,1}) de la capa de entrada que conjuntamente con el bias (b{1}) de la capa de entrada se suman y dicha señal entra a la primera capa oculta de 8 neuronas con función de activación tangencial-sigmoidal, seguida de sus pesos (LW{2,1}) y de su bias (b{2}); luego le sigue la segunda capa oculta de 3 neuronas con función de activación tangencial-sigmoidal, seguida de sus pesos (LW{3,2}) y de su bias (b{3}) y por último la capa de salida constituida por dos neuronas con función de activación logarítmica-sigmoidal.

3.3 Gráficos de la Simulación de la RNA desde el Matlab

Mediante el Matlab se obtuvo el entrenamiento exitoso de la RNA para el relé digital. A continuación se muestra el gráfico de aprendizaje durante el entrenamiento de una red:

• net_8_5_2

El proceso de aprendizaje (Figura 3.2) indica que la red aprendió durante 8565 epoch donde alcanza un error en el orden de 10^{-3} . Es significativo indicar que la red aprendió con poca información.



Figura 3.2.- Comportamiento del error durante el aprendizaje de la red net_8_5_2

• net_8_8_2



Figura 3.3.- Comportamiento del error durante el aprendizaje de la red net_8_8_2

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia Julio Geovanny Maza Pinza

Esta red contiene 3 neuronas más en la capa oculta que la red net_8_5_2. Cuando a la red se le incorpora un mayor número de neuronas le resulta más eficiente el aprendizaje de los patrones dados.

El proceso de aprendizaje (Figura 3.3) indica que la red aprendió durante 403 epoch donde alcanza un error en el orden de 10^{-3}



• net_10_8_2

Figura 3.4.- Comportamiento del error durante el aprendizaje de la red net_10_8_2

El proceso de aprendizaje de la net_ 10_8_2 (Figura 3.4) muestra una trayectoria lineal a partir del epoch 300 culminando su aprendizaje a 1496 epoch con un error de 10^{-3} .

• Net_10_8_3_2

Esta red neuronal contiene una capa más que las otras redes, con ello mejora el reconocimiento de los datos dando como resultado baja demora en el entrenamiento llegando a un epoch de 218 y con el mismo rango de error de las anteriores redes.



Figura 3.5.- Comportamiento del error durante el aprendizaje de la red net_10_8_2

En Matlab fueron obtenidas las señales patrones para la RNA, desde la figura 3.6 a la figura 3.8 se muestran señales patrones a:

- Régimen normal en el transformador (figura 3.6)
- Régimen de cortocircuito interno en el transformador (figura 3,7)
- Régimen de cortocircuito externo en el transformador (figura 3.8)



Figura 3.6.- Simulación de las corrientes a régimen normal de trabajo



Figura 3.7 Simulación de las corrientes a régimen de cortocircuito interno

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia Julio Geovanny Maza Pinza



Figura 3.8.- Simulación de las corrientes a régimen de cortocircuito externo

Las respuestas a cada uno de los patrones se muestran desde la Figura 3.9 a la Figura 3.11 que corresponden a los regímenes mencionados anteriormente.



Figura 3.9.- Respuesta de una red neuronal ante un régimen normal



Figura 3.10.- Respuesta de una red neuronal ante un cortocircuito interno



Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia Julio Geovanny Maza Pinza

3.4 Gráficos de la Simulación en LabVIEW

Los paneles frontales hechos en LabVIEW están preparados para visualizar los resultados de la simulación de la señal sinusoidal pura (panel izquierdo) y para las condiciones o regímenes normales y bajo averías (panel derecho). Desde la figura 3.12 a la figura 3.14 se visualizan los diferentes regímenes normal y de avería del transformador.

Por ejemplo, la figura 3.12 representa un régimen normal de trabajo del transformador, y de igual forma:

- Figura 3.13 representa un régimen anormal de cortocircuito interno.
- Figura 3.14 representa un régimen anormal de cortocircuito externo.

Usualmente en los lados derechos de los paneles se representan el régimen normal (la señal cercana a cero, se observa el nivel de ruido, o puede observarse también un Inrush); y a régimen de cortocircuito cuando la señal va a uno.



Figura 3.12.- Panel de las señales de ingreso a la RNA.



Figura 3.13.- Simulación de un cortocircuito interno mediante LabVIEW



Figura 3.14.- Régimen anormal de cortocircuito externo

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia Julio Geovanny Maza Pinza

3.5 Gráficos obtenidos desde LabVIEW en tiempo real

La implementación del software en LabVIEW con la configuración de las tarjetas USB 6009 de National Instruments permitió registrar las señales en tiempo real para los siguientes regímenes de operación en el transformador de potencia.

3.5.1 Corrientes de cortocircuito en la Experimentación, Disparos inmediatos

La experimentación fue realizada sobre la base de validar o probar en tiempo real la respuesta de la red neuronal implementadas en las tarjetas.

Para esto tiene interés los diferentes regímenes.

Cortocircuito Interno Sin Carga





Figura 3.15 (a).- Corriente durante un cortocircuito interno sin carga del transformador de 5 kVA











Figura 3.15 (c).- Corriente durante un cortocircuito interno sin carga del transformador de 5 kVA





Figura 3.15 (d).- Corriente durante un cortocircuito interno sin carga del transformador de 5 kVA

Los gráficos muestran un mejor desempeño del relé neuronal cuando se utilizaron mayor cantidad de neuronas, es decir respondió más rápido, como es el caso de la figura 3.15 (d)







Figura 3.16 (a).- Corriente durante un cortocircuito interno con carga del transformador de 5 kVA





Figura 3.16 (b).- Corriente durante un cortocircuito interno con carga del transformador de 5 kVA











Figura 3.16 (d) Corriente durante un cortocircuito interno con carga del transformador de 5 kVA De las figuras 3.16 (a), (b), (c) y (d), se puede apreciar un buen desempeño de la red neuronal para las diferentes estructuras de las redes, que devolvieron adecuadas respuestas como sistema de protección.

• Cortocircuito Externo Sin Carga











Figura 3.17 (b).- Corriente durante un cortocircuito externo sin carga del transformador de 5 kVA





Figura 3.17 (c).- Corriente durante un cortocircuito externo sin carga del transformador de 5 kVA







Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia Julio Geovanny Maza Pinza

Lo más significativo de estas figuras 3.17 (a), (b), (c) y (d), es que aun con falta de información el relé neuronal actúa adecuadamente.



Cortocircuito Externo Con Carga







Figura 3.18 (b).- Corriente durante un cortocircuito externo con carga del transformador de 5 kVA





Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia Julio Geovanny Maza Pinza





Figura 3.18 (d).- Corriente durante un cortocircuito externo con carga del transformador de 5 kVA

Para régimen de cortocircuito externo con carga se observa en las figuras 3.18 (a), (b), (c) y (d), la influencia de esta en las magnitudes máximas que han crecido y el desfasaje entre la corriente primaria y secundaria del transformador.



3.5.2 Experimentación del proceso de energización del transformador (Inrush)

Figura 3.19 Corriente de Inrush del transformador de 1 kVA

Como se observa en la figura 3.22, la red neuronal dejo pasar la señal a régimen normal sin actuar hacia la protección del transformador, por lo que es capaz de diferenciar un Inrush de una corriente de cortocircuito.

El Inrush alcanzo un pico apreciable de 120 Amperes, lo que significa que la red neuronal actuó en base a la forma de onda.

A continuación la figura 3.22 muestra el comportamiento de la corriente ante una interrupción de alimentación del transformador de potencia, correctamente registrada por las tarjetas de adquisición USB 6009 de National Instruments.



Figura 3.20 Corriente de interrupción del transformador de 1 kVA

3.5.3 Experimentación aplicando al relé inteligente 3 procesos: en Vacio, proceso de energización con carga y cortocircuito.

El relé inteligente fue puesto a prueba durante 3 procesos:

La figura 3.21 muestra los tres procesos:

Primer proceso: durante 0,5 segundos no se registran corrientes.

Segundo proceso: desde 0,5 segundos hasta 1,7 segundos se energiza el transformador con una carga (motor de inducción) trifásica marcando la corriente del devanado primario 6 amperes y la corriente del devanado secundario 8 amperes.

Tercer proceso: en el tiempo 1,7 se aplica un régimen de cortocircuito interno en el lado de alta tensión es decir entra al sistema una carga resistiva trifásica de 4 ohmios en el devanado primario causando una elevación de la corriente del devanado primario en 28 Amperes, esto transita durante 3 ciclos luego cae a cero las dos corrientes dado que actuó de manera eficiente el relé inteligente.

Este proceso se volvió aplicar al transformador pero con un régimen de cortocircuito externo, la figura 3.22 muestra luego de los 2 segundos una elevación de las dos corrientes (primario y secundario) en 45 amperes durante 2 ciclos, finalmente el relé inteligente actuó mostrándose una caída de las corriente a cero.


Figura 3.21.- Corrientes del transformador durante 3 procesos: en Vacio, con carga y en cortocircuito interno.

Implementación de un sistema basado en Inteligencia Artificial para la detección de regímenes anormales en transformadores de potencia Julio Geovanny Maza Pinza



Figura 3.22 Corriente en del transformador durante 3 procesos: en Vacio, con carga y en cortocircuito externo.

3.6 Valoración Económica

La presente valoración económica tiene su fundamento en el hardware y software dado que se trata de una investigación con resultados experimentales.

Item	Cantidad	Descripción	Valor Unitario (USD)	Valor Total (USD)
1	1	Software LabVIEW 7.5 Versión Estudiantil	100.00	100.00
2	2	Tarjeta ADQ USB 6009 NI	396.00	792.00
3	2	Sonda Amperimétricas Fluke i400s	240.00	480,00
4	1	Computador portátil	1,500.00	1,500.00
Total (USD)				2,772.00

 Tabla 3.1 Costo de Hardware y Software

Los elementos que se muestran en la tabla de la valoración económica cumplieron con las necesidades practicas, lo ventajoso del proyecto es que se logro comprobar la funcionalidad del relé inteligente con un valor económico bajo con respecto a equipos industriales de alta tecnología

3.7 Conclusiones Parciales

- Mediante el Matlab se obtuvo el entrenamiento exitoso de la RNA para el relé digital.
 - Mediante LabVIEW se alcanzo reproducir la RNA del relé digital
 - Se desarrollo la aplicación de la RNA en condiciones de tiempo real donde el relé digital actuó de forma inteligente detectando los diferentes regímenes de avería
 - Se verificaron las señales puras de las corrientes obtenidas en LabVIEW y que reproducen las producidas en Matlab.
 - Las corrientes en los regímenes de avería típicas fueron registradas correctamente en LabVIEW en tiempo real.
 - Se obtuvieron las corrientes Inrush en varias pruebas en transformadores de potencia.

• Se validó la operación inteligente del relé neuronal para la protección diferencial del transformador de potencia.

- Con la utilización de las redes neuronales artificiales se desarrollo el algoritmo del relé digital inteligente que ofrece satisfactorias prestaciones en la protección de transformadores de potencia.
- Resultó importante diferenciar en el trabajo del relé digital inteligente la ocurrencia natural de los Inrush en comparación con las corrientes de cortocircuito.
- Resultó adecuado utilizar una RNA que presenta la siguiente estructura Feedforward alimentación hacia delante a la cual se la nombro net_10_8_3_2 por que posee 10 neuronas en la capa de entrada, 8 neuronas en la primera capa oculta con función de transferencia tansig, tres neuronas en la segunda capa oculta con función de transferencia tansig y 2 neuronas en la capa de salida con función de transferencia Logsig para el procesamiento digital de las señales del relé digital inteligente basado en el Matlab.
- Se elaboraron dos software en LabVIEW, con sus interfaces a dos tarjetas de National Instruments USB 6009, que propician la implementación práctica del relé digital inteligente.
- Se verificó la identificación del relé digital inteligente en diferenciar cuando está en presencia de cortocircuitos y cuando está en presencia de Inrush, porque opera atendiendo la forma de onda.
- La RNA diseñada esta entrenada de acuerdo al tipo, y forma de conexiones del transformador de potencia.
- Se desarrollo la aplicación de la RNA en condiciones de tiempo real donde el relé digital actuó de forma inteligente detectando los diferentes regímenes de avería.
- El relé digital inteligente logra libramientos de falla en un tiempo de 1,5 a 5 ciclos contribuyendo a proteger el transformador de potencia.
- Se valido la operación de interrupción del relé neuronal para la protección diferencial del transformador de potencia.

- Se debe continuar la investigación sobre la base de incorporar un modulo a la RNA que permita su reentrenamiento para diferentes tipos, y formas de conexiones del transformador de potencia.
- Valorar el nivel de sensibilidad del relé digital diseñado.
- Determinar los pesos y las funciones de activación en el modelo neuronal del relé empleando la lógica fuzzy para mejorar su funcionamiento.

- [1] BOGDAN, Kasztenny; MLADEN, Kezunovic. 2001. Improved power transformer protection using numerical relays. Texas A&M University. USA. 17 p.
- [2] CIELO F., Manuel S. 1989. Estudio del comportamiento térmico electrodinámico del transformador de potencia en condiciones de cortocircuito. (Tesis Ing. Electromecánico). Piura Perú. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. 94 p.
- [3] DIAZ, Yordilexis; PELIER, Leonardo. 2007. Metodología para la selección y coordinación de Dispositivos de Protección en los Circuitos de Distribución. (Tesis de Ing. Eléctrico). Holguín Cuba. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Facultad Metalurgia-Electromecánica Departamento de Eléctrica. 108 p.
- [4] FABRICANT, V. L. 1986. Protección de Distancia. Moscow. 249 p.
- [5] FLORES, W.; MOMBELLO, E.; RATTÁ, G.; JARDINI, José Antonio. 2007. Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. IEEE Latin America Transaction, Vol. 5, nº 1: 5 p.
- [6] GAUDENCIO, Júdez. 1979. Estaciones transformadoras y de distribución, su estudio, montaje, regulación y ensayo. España, Editorial Gustavo Gili. 839 p.
- [7] GE MULTILIN, 745. 2004. Transformer management relay instruction manual. Canadá. 348 p.
- [8] KOMEL, Scherrer. 2006. Protección Integrada de Energía. Revista ABB. nº 2: 18– 22.
- [9] L&K INTERNATIONAL [videograbación] Mississauga Canadá, VISUAL, 1991. Video digital (CD), (35 min), Introducción a Relés Estáticos.
- [10] L&K INTERNATIONAL [videograbación] Mississauga Canadá, VISUAL, 1990.1 video digital (CD), (45 min), Protecciones de transformadores PSP-6.
- [11] MATHWORKS. Neuronal Network Toolbox User's Guide.
- [12] MURARI, Saha; KASZTENNY, Bogdan; ROSOLOWSKI, Eugeniusz.1998.
 Protección de transformador basada en lógica difusa. Revista ABB. nº 1: 41-48.
- [13] RAMIREZ, Carlos. 2006. Modernización de esquemas de protección como una estrategia de confiabilidad del sistema de potencia. México. 3 p.

- [15] TORRES, Orlys. 2003. Protección de Maquinas Eléctricas. Conferencia para ingenieros electricistas. *Instituto Superior Minero Metalúrgico*. 15 p.
- [16] TORRES, Orlys. 2003. Protección de Transformadores Eléctricos. Conferencia para ingenieros electricistas. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa Cuba. 13 p.
- [17] TORRES, Orlys. 2005. Desarrollo de herramientas para la creación, modelación y comprobación de protecciones eléctricas. (Tesis Doctoral) Moa Cuba, Instituto Superior Minero Metalúrgico. Facultad de Ciencias Eléctricas. 138 p.
- [18] VÁSQUEZ M., Ernesto. 2003. Aplicación de RNA en la Identificación de corrientes de Inrush en transformadores. (Tesis doctoral en Ing. Eléctrica). Nuevo León México. Vol. VI. 28 p.
- [19] VENIKOV, V. 1985. Procesos transitorios electromecánicos. Ed. Mir Moscu, 438 p.
- [20] VILARAGUT L., Miriam. 2004. Curso de postgrado sobre redes neuronales. La Habana, Cuba. 68 p.