



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero



División de Estudios de Posgrado e Investigación

Desarrollo de un algoritmo de protección de distancia en relevadores SIEMENS para disparos de alta velocidad, conjugando dos técnicas de análisis de fallas en línea de transmisión.

Para obtener el grado de: Maestro en Ingeniería Eléctrica

Presenta Ing. Carlos Abraham Soriano Rangel

Asesor y Coasesor Dr. Gastón Hernández Martínez M.C. Juan de Dios Rodríguez Cartagena

Cd. Madero, Tamaulipas

Noviembre 2012





Instituto Tecnológico de Ciudad Madero



División de Estudios de Posgrado e Investigación

Desarrollo de un algoritmo de protección de distancia en relevadores SIEMENS para disparos de alta velocidad, conjugando dos técnicas de análisis de fallas en línea de transmisión.

Para obtener el grado de: Maestro en Ingeniería Eléctrica

Presenta: Ing. Carlos Abraham Soriano Rangel

Jurado: PRESIDENTE: Dr. Gastón Hernández Martínez SECRETARIO: M.C. Rafael Castillo Gutiérrez VOCAL: M. C. Aarón González Rodríguez SUPLENTE: M. C. Hermenegildo Cisneros Villegas

Cd. Madero, Tamaulipas

Noviembre 2012



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Ciudad Madero, Tamps; a 25 de Octubre de 2012

OFICIO No.: U2.183/12 AREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

C. ING. CARLOS ABRAHAM SORIANO RANGEL P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE PROTECCIÓN DE DISTANCIA EN RELEVADORES SIEMENS PARA DISPAROS DE ALTA VELOCIDAD, CONJUGANDO DOS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE FALLAS EN LÍNEA DE TRANSMISIÓN"

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTA MENTE "Por mi patria y por mi bien"

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA

M. P. MARIA YOLANDA CHÁVEZ CINCO

JEFA DE LA DIVISIÓN



S.E.P. DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION I T C M

c.c.p.- Archivo c.c.p.- Minuta

MYCHC 'HCV ' jar





Ave. 1°. de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz, Col. Los Mangos, C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tels. (833) 3 57 48 20, Fax: (833) 357 48 20, Ext. 1002, email: itcm@itcm.edu.mx www.itcm.edu.mx

Dedicatoria

A Dios, a mis padres, a mis amigos, a mi familia, a mis profesores y seres queridos; por ser el motor que me impulsó durante esta importante etapa de mi vida.

Para todos ustedes.

Agradecimientos

A Dios, por concederme las gracias necesarias para alcanzar una meta más en mi vida y por nunca dejarme.

A mis padres, Carlos y Blanca, por el constante esfuerzo y su afán por lograr que sea una mejor persona cada día.

A Yuri por siempre apoyarme y comprenderme, por empujarme, motivarme y creer en mí; igualmente a Andrea por todo el apoyo brindado en estos dos años, muchas gracias.

A mí asesor, Dr. Gastón Hernández Martínez, por su valiosa enseñanza que obtuve en clases, en el laboratorio y en especial para el desarrollo de este trabajo de tesis, ya que todas sus aportaciones fueron indispensables para el desarrollo del proyecto.

También quiero agradecer a todos mis profesores de la maestría en ingeniería eléctrica, por sus horas de clase frente a mí, ya que sin ellos no sería posible haber finalizado este trabajo. Al Dr. Julio César Rosas Caro, Dr. Rubén Salas Cabrera, MC. Juan de Dios Rodríguez Cartagena, Ing. Rodolfo Castillo Ibarra, M.C Aarón González Rodriguez, MC. Rafael Castillo Gutiérrez, al MI. Alberto de León y MC. Hermenegildo Cisneros Villegas Coordinador de la maestría. A la M.P. Yolanda Chávez Cinco Jefa de la División de Estudios de posgrado e Investigación.

A mis compañeros Eduardo M. Bernal, Flavio García, Jesús E. Valdez Reséndiz, Jesús E. Flores Hernández, Diego A. Soto Monterrubio, Jonathan C. Mayo M., Hilda Torres, Guillermo Bernal C., Omar Cárdenaz R., al Sr. Rocha y Fernando.

A la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST), por el apoyo de las becas 022010204-PC y 20110000025 que se me otorgaron.

Resumen

Desarrollo de un algoritmo de protección de distancia en relevadores SIEMENS para disparos de alta velocidad, conjugando dos técnicas de análisis de fallas en línea de transmisión.

Presenta: Ing. Carlos Abraham Soriano Rangel Asesor: Dr. Gastón Hernández Martínez

Esta tesis propone una modificación a los algoritmos actuales de clasificación de fallas en las líneas de transmisión. Después de dialogar con personas involucradas en el área de protecciones de líneas de transmisión, se observa la necesidad de desarrollar un algoritmo que pueda atacar adecuadamente las fallas evolutivas también conocidas como fallas tipo Cross-Country.

Este tipo de fallas son las que comienzan siendo de un tipo y después cambian a otro, por ejemplo, de una línea a tierra cambian a dos líneas a tierra. Es importante identificar la evolución de las fallas ya que dentro de los algoritmos convencionales, primero se identifica el tipo de falla y después se pasan a calcular fasores que caracterizan a los voltajes y corrientes en el estado actual de la red para pasar después a tomar una decisión.

Se propone un algoritmo que dentro de una ventana de tiempo clasifique constantemente la falla, a la par de que calcule los fasores e impedancias aparentes de la línea de transmisión para poder tomar decisiones acertadas.

Abstract

Development of a distance-protection algorithm in SIEMENS relays with High-Speed triggering combining two fault analysis techniques on transmission lines.

Presents: Ing. Carlos Abraham Soriano Rangel Advisor: Dr. Gastón Hernández Martínez

This thesis proposes a modification to present fault clasification algorithms for transmission lines. After interviewing people who work on protection of transmission lines the need to develop an algorithm that can accurately identify and clear evolving faults, also known as Cross-Country faults, was observed.

These faults begin being one type and then change to another one, for example, single-line to ground evolving into two-line to ground faults. It's important to identify fault evolution because in conventional algorithms the fault is first identified or classified and then voltage and current phasor calculation takes place. Afther these phasors are calculated a decition is made by the relay.

An algorith that constantly classifies faults along with calculating phasors and apparent impedances of the transmission line is proposed. More accurate tripping decitions are expected.

Índice general

De	dicate	oria	II
Ag	radeo	cimientos	III
Re	sume	n	IV
Ab	ostrac	t	V
Ín	dice g	eneral	VI
Ín	dice d	e figuras	IX
Ín	dice d	e tablas	XI
1.	Introducción		
	1.1.	Antecedentes	2
	1.2.	Planteamiento del Problema	4
	1.3.	Justificación	5
	1.4.	Objetivos	6
		1.4.1. Objetivo General	6
		1.4.2. Objetivos específicos	6
	1.5.	Hipótesis	7
	1.6.	Alcances y Limitaciones	8
2.	Mar	co teórico	10
	2.1.	Historia de los relevadores	11
	2.2.	Relevadores electromecánicos	12
	2.3.	Relevadores Digitales	14

ÍNDICE GENERAL

	2.4.	Caracte	erísticas de la protección digital	15
		2.4.1.	Confiabilidad	15
		2.4.2.	Flexibilidad	15
		2.4.3.	Desempeño Operacional	15
		2.4.4.	Consideraciones Costo/Beneficio	15
		2.4.5.	Otros	16
	2.5.	Estruct	tura básica de los relevadores digitales	17
	2.6.	Releva	dores de Distancia	18
	2.7.	Modela	ado de Relevadores	20
	2.8.	Líneas	de Transmisión	22
3	Mod	elado d	e líneas	24
	3.1	Model	o de Referencia para Pruebas en Relevadores de Líneas de Transmisión	25
	5.11	311	Modelo de Sistema Básico	25
	3.2	Model	os de líneas de transmisión	26
	0.2.	3.2.1.	Procedimiento de las pruebas	20 27
		3.2.2.	Características de falla	27
	3.3.	Línea 7	Tres Estrellas (TTE) - Teotihuacan(TTH)	29
		3.3.1.	Estructura – Torre	29
		3.3.2.	Sistemas Equivalentes	29
	3.4.	Modela	ado en ATP-EMTP	32
		3.4.1.	Línea segmentada	32
		3.4.2.	Sistemas Equivalentes	36
		3.4.3.	Líneas de interconexión	37
		3.4.4.	Transformadores de Corriente	38
		3.4.5.	Transformadores de Potencial	41
		3.4.6.	Interruptor de falla	43
	3.5.	Resulta	ados de simulaciones	45
1	Algo	ritmo d	lal Palayadar	51
7.	Algu	Estruct	tura generalizada de un relevador numérico	52
	4.1. 1 2	Módul	α de aislamiento y escalamiento de señales	52 57
	4.2. 1 3	Módul	o de filtro anti-aliasing	56
	н.э. ЛЛ	Ferraci	\mathbf{u} and and analysing \ldots	50
	4.4.	Especi	$\mathbf{H}(\mathbf{a}_1) \mathbf{h}(\mathbf{b}_1) h$	57

ÍNDICE GENERAL

	4.5. Filtros Butterworth	59	
	4.6. Construccion de bloques de filtros digitales	62	
	4.7. Convertidor análogo digital	64	
	4.8. Muestreo y retención	65	
	4.9. Multiplexeo	66	
	4.10. Algoritmos de Estimación de Fasores	67	
	4.10.1. Tecnicas no recursivas de ventana corta	67	
5.	Diagrama a bloques	68	
6.	Conclusiones	71	
7.	Recomendaciones para Trabajos Futuros	72	
B	Bibliografía		

Índice de figuras

3.1.	Modelo básico de un sistema para pruebas de protecciones en Líneas de Trans-	
	misión.	25
3.2.	Torre 43T60 de Transmisión	30
3.3.	Cuadro de diálogo de la versión del ATP-EMTP	32
3.4.	Red completa modelada en ATP-EMTP	33
3.5.	Línea segmentada en 10 partes iguales	34
3.6.	Cuadro de diálogo de Línea	34
3.7.	Cuadro de diálogo de Línea	35
3.8.	Vista de una Red equivalente	36
3.9.	Cuadro de diálogo de la fuente	37
3.10.	Cuadro de diálogo de la red	38
3.11.	Cuadro de diálogo de la red	39
3.12.	Transformadores de Corriente	39
3.13.	Cuadro de diálogo de los Transformadores de Corriente	40
3.14.	Transformadores de Potencial	41
3.15.	Cuadro de diálogo de Transformadores de Potencial	42
3.16.	Interruptores de falla	43
3.17.	Cuadro de diálogo del interruptor de falla	44
3.18.	Voltajes y Corrientes de Falla Monofásica al 50 % de la línea	46
3.19.	Voltajes y Corrientes de Falla Bifásica al 50 % de la línea	47
3.20.	Voltajes y Corrientes de Falla Trifásica al 50 % de la línea	48
3.21.	Voltajes y Corrientes de Falla Cross-Country (AG-ABG) al 50 % de la línea	49
3.22.	Voltajes y Corrientes de Falla Cross-Country (ABG-ABCG) al 50 % de la línea	50
4.1.	Estructura generalizada de un relevador numérico	53
4.2.	Aislamiento y escalamiento analógico de una señal de voltaje	54

4.3.	Aislamiento y escalamiento analógico de una señal de corriente	55
4.4.	Especificaciones de un filtro pasa-bajos	57
4.5.	Respuesta en frecuencia de un Filtro Butterworth	61
4.6.	Elementos básicos para construir filtros digitales	63
4.7.	Representación gráfica de un ADC	64
4.8.	Operación de un circuito de muestreo y retención en el dominio del tiempo	65
4.9.	Esquema de un Multiplexor	66
5.1.	Diagrama a bloques del Algoritmo	70

Índice de tablas

3.1.	Tipos de fallas	27
3.2.	Datos de los sistemas equivalentes de red del modelo	31
3.3.	Datos de las líneas	31
5.1.	Ecuaciones de Cálculo de Impedancia Aparente para diferentes fallas	69

Capítulo 1

Introducción

En todo el proceso de la generación y transmisión de energía eléctrica se enfrentan diversos inconvenientes, como el elevado costo de la infraestructura y la construcción de las plantas y las líneas de transmisión, por lo cual un área de gran interés para las industrias que deciden invertir en la generación o transmisión de energía es la de las protecciones de las mismas.

1.1. Antecedentes

A lo largo de la historia se han buscado distintas maneras de proteger estas máquinas y equipos sensibles a las fallas o incidentes que puedan suceder en el diario operar de las redes eléctricas. Primeramente lo que se trata es el origen de las fallas o la naturaleza de las anomalías para después aplicar un método eficiente y adecuado para la situación de cada red eléctrica. [1] [2]

Por estos motivos se requiere de equipo de protección que sea capaz de detectar estos errores y de actuar con rapidez para evitar el daño de los equipos que representarían un gran costo de reparación en dado caso de que se afecten. [3]

La ciencia y tecnología cada día van realizando avances considerables en cuanto a los equipos de protección. Los primeros interruptores o dispositivos de seguridad que se diseñaron fueron los fusibles. Más adelante los dispositivos de protección dependían de acciones mecánicas y de detectores muy elementales, en los cuales la velocidad de reacción dependía de un elemento mecánico, como un resorte. Más adelante con la aplicación de las bobinas se eliminaron algunos elementos mecánicos y se comenzaron a utilizar los relevadores. Con la aparición y gran desarrollo de la electrónica se fue evolucionando hasta llegar a los sistemas de protección actuales cuyas reacciones son mucho más rápidas y eficientes. [1]

Sin embargo estos mismos presentan problemas mucho más complicados que los originales. Uno de ellos es el seleccionar y actuar de manera correcta cuando se presenten anomalías. Es común en las redes de nuestro país que los relevadores de protección que se utilizan al momento de una falla reaccionen en maneras incorrectas. Es decir que den falsos positivos. [3], [4]

En el desarrollo de este proyecto, se encontró un algoritmo eficaz para un tipo específico de relevadores, los relevadores de Protección a Distancia para Líneas de Transmisión marca SIE-MENS, que es capaz de reaccionar en un tiempo no mayor de tres ciclos de trabajo y conjugue dos técnicas de análisis de fallas de las que ya existen en la literatura del tema.

A diferencia de los relevadores convencionales, un relevador digital como el que se utilizó consiste de dos partes fundamentales: el software y el hardware. El tipo de software que se encuentra embebido en el relevador define no sólo sus características sino también su funciona-

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

miento. [2]

1.2. Planteamiento del Problema

El relevador de protección a distancia cuenta con muchas funciones para reaccionar en distintas situaciones a una gran variedad de fallas sin embargo, estas no son conjugables entre sí y es difícil obtener una respuesta en un corto tiempo.

Entrevistando a diversos operadores de protecciones que trabajan con este relevador se comenta que éste y otros relevadores del mismo segmento de distintos fabricantes se accionan en situaciones donde no deberían, es decir que dan falsos positivos, lo cual se debe a los constantes cambios e irregularidades en el cableado de las líneas de transmisión de nuestro país, además de las inclemencias del tiempo y de otras fallas debidas a la naturaleza.

Aún no se cuenta con la tabla de pruebas y resultados reales en cuanto a respuestas correctas e incorrectas. Ésta información será proporcionada por la empresa SIEMENS en cuanto sea posible para después atacar las respuestas incorrectas. Sin embargo, las fallas sobre las cuales se trabajó son de tipo cross-country, además de algunas fallas sencillas de línea a tierra.

Es por eso que la empresa SIEMENS Mesoamérica se interesó en desarrollar conjuntamente un algoritmo que sea aplicable a este tipo de relevadores de protección a distancia que ya se comercializa en nuestro mercado para corregir y ofrecer un equipo confiable y capaz de reaccionar adecuadamente a las características de nuestras redes eléctricas y a las de algunos otros países de Latinoamérica donde se presentan problemas similares.

1.3. Justificación

Una parte integral e importante del software es el algoritmo, el cual es un conjunto de instrucciones matemáticas utilizadas para procesar los voltajes entrantes y las corrientes para estimar parámetros del sistema tales como los valores eficaces de las señales, impedancia medida, frecuencia fundamental, corrientes diferenciales, etc. Estos parámetros calculados frecuentemente se utilizan para decidir si el sistema se encuentra en falla o no y consecuentemente iniciar la acción necesaria para aislar la falla en la sección pertinente.[2]

En los últimos 20 años se han utilizado diferentes tipos de algoritmos para la protección de los sistemas eléctricos de potencia, los cuales se pueden clasificar en cinco grandes ramas: [2]

- a. Algoritmos de forma de onda sinusoidal.
- b. De técnica de Fourier y de Walsh.
- c. El método de los mínimos cuadrados.
- d. Solución de ecuaciones diferenciales del modelo del sistema protegido.
- e. Métodos basados en onda viajera. [2]

Actualmente, los relevadores digitales que fabrica la empresa SIEMENS son en forma modular, lo cual implica que todos los esquemas de protección para una red eléctrica están almacenados en la memoria interna, compartiendo los mismos elementos primarios de control y sensado. Algunos de sus algoritmos son de aplicación general y esto propicia que sean inadecuados a ciertas condiciones de operación y configuración de las redes eléctricas sensibles a fallas, ruido, disturbios y transitorios. Por lo que se hace necesario el modelado y desarrollo de un algoritmo capaz de responder adecuadamente ante estas condiciones.

Es posible elegir de los distintos métodos que existen dos que puedan trabajar adecuada y rápidamente para dar solución a los problemas nacionales y latinoamericanos en sistemas eléctricos de potencia.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Modelar y desarrollar un algoritmo para disparos de alta velocidad para relevadores marca SIEMENS empleando dos técnicas simultáneas de análisis de fallas en líneas de transmisión, adecuando los métodos ya existentes para tal fin.

1.4.2. Objetivos especificos

- Seleccionar de las técnicas existentes en la literatura especializada, dos técnicas que puedan ser adecuadas para operar en menos de tres ciclos ante una falla tipo cross-country en líneas de transmisión.
- Modelar y analizar fallas en un esquema de línea de transmisión en ATP-EMTP. Caso de estudio.
- Modelar e implementar las técnicas seleccionadas en MATLab.
- Depurar el algoritmo generado interactuando con el caso de estudio en ATP.
- Optimizar el algoritmo depurado.

1.5. Hipótesis

Es posible conjugar dos tipos de algoritmos de protección a distancia para hacerlo más selectivo ante falsos positivos en redes sensibles como la de nuestro país.

Es posible diseñar un algoritmo selectivo que utilice los recursos con los que cuenta el relevador de protección a distancia marca SIEMENS y que tenga un tiempo de respuesta mínimo.

Es posible modelar el esquema de una línea de transmisión en ATP-EMTP adecuada para realizar las pruebas pertinentes al algoritmo del relevador de protección a distancia.

1.6. Alcances y Limitaciones

El presente trabajo se dedicará a trabajos modelados y simulaciones sin aplicación en campo. Esto debido a que aún se encuentra en fase de desarrollo e investigación.

El algoritmo que se generó es sólo para relevadores SIEMENS debido al compromiso establecido con la empresa aunque puede aplicarse a cualquier tipo de relevadores, y estará diseñado para operar en redes sensibles a fallas como las nacionales y las de algunos países latinoamericanos.

El modelo de línea de transmisión que se utilizó es un modelo de una línea real, llamada Tres Estrellas (TTE) - Teotihuacán (TTH) por los nombres de los nodos a los cuales conecta.

Las fallas sobre las cuales se realizaron pruebas al relevador de protección a distancia son las fallas de una sola línea a tierra y también las fallas evolutivas, que van de una línea a tierra a dos líneas a tierra, denominadas también fallas tipo cross-country.

Existen distintas maneras para que ocurran fallas tipo cross-country. La más simple es la falla que cambia para incluir más fases en esta falla. Por ejemplo, Una fase a tierra que cambia a dos fases a tierra; y dos fases a tierra que cambian a tres fases. Por lo tanto, se estará analizó la falla de una fase a tierra que evoluciona a dos fases a tierra.

En cuanto a la elección de los métodos a conjugar, se realizó un análisis y revisión de los existentes y se optó por sólo agregar además de la clasificación y análisis de falla normales, un lazo que estuviera verificando constantemente el tipo de falla al mismo tiempo que se calculaban las impedancias aparentes de la línea de transmisión.

Existen distintos métodos en la literatura especializada ya aplicados para la detección de fallas de tipo cross-country en líneas de transmisión para relevadores de protección a distancia como los mencionados en [5] donde se utiliza un método para detectar fallas en líneas de transmisión y en [6] dónde se propone un algoritmo para la detección de fallas en líneas de transmisión paralelas. En [11] se propone un método para la detección y clasificación de fallas tipo cross-country en líneas de transmisión.

Los resultados obtenidos en los modelos de MATLab y ATP-EMTP serán utilizados en un futuro como referencia para embeber el algoritmo a los relevadores SIEMENS que se construyan específicamente para solucionar las fallas mencionadas.

No se implementará el algoritmo en el relevador SIEMENS hasta que no sea probado, revisado y aprobado por SIEMENS Alemania.

Los resultados que se obtengan al implementar los algoritmos a un modelo en MATLab son aplicables a problemas reales y tangibles.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se habla sobre la historia de los relevadores y cómo se fue migrando a los relevadores digitales actuales. Además se exponen sus caracteristicas como Confiabilidad, Flexibilidad y otras.

Después se habla específicamente de su estructura básica y de los relevadores de distancia, finalizando con información acerca de cómo modelar los relevadores y las líneas de transmisión.

2.1. Historia de los relevadores

En los primeros días de la industria eléctrica los sistemas de potencia consistían de un pequeño generador aislado alimentando una carga local, y había la posibilidad en caso de falla de abrir un interruptor manualmente. [1]

Con el incremento de la potencia de las plantas generadoras se hizo necesario diseñar interruptores de potencia automáticos que fueran capaces de interrumpir los grandes arcos de energía en una fracción de segundos. [1]

Los primeros dispositivos automáticos que se emplearon para asilar fallas fueron los fusibles. Éstos tienen la desventaja que necesitan ser reemplazados antes de que la alimentación del circuito sea restablecida. [1]

Este inconveniente se resolvió con el diseño del interruptor de potencia automático, el cual tenía una bobina de disparo interconstruida que operaba por sobrecarga o baja tensión. [1]

El paso siguiente fue incorporar relevadores de protección selectivos independientes del interruptor, con contactos operando sobre su bobina de disparo. Con esta idea se desarrollaron los relevadores de protección de diferentes características dependiendo de la aplicación de los diversos componentes del sistema de potencia. La tecnología de diseño de estos primeros relevadores fue electromecánica. [1]

2.2. Relevadores electromecánicos

Los primeros relevadores que se desarrollaron fueron mecanismos con una armadura de atracción, un dispositivo de mecánico de amortiguamiento y otro de retardo con un tiempo definido. [1]

Como los sistemas eléctricos de potencia (SEP) se incrementaron en tamaño y complejidad fue necesario emplear relevadores con mecanismos más precisos y obtener selectividad sobre la base de operar con un tiempo inverso en donde el tiempo de operación fuera más corto al aumentar la magnitud de la corriente de tal modo que el interruptor de potencia aísle la falla rápidamente antes de que opere otro relevador más interno al sistema ocasionando una interrupción de energía mayor.[1]

El primer dispositivo que cubría estas características fue el disco de inducción el cual aún se utiliza para la medición de consumo de energía.[1]

Al aumentar los requerimientos de sensibilidad y selectividad surgieron los relevadores de alta velocidad de tipo diferencial para proteger el sistema de transmisión principal utilizándose los de sobre corriente para los sistemas de distribución o para respaldo.[1]

En los generadores, la potencia siempre fluye hacia afuera, excepto cuando el generador tiene una falla o pierde su excitación, tomando corriente del circuito. Para este tipo de fallas se diseñó el relevador direccional. En las líneas opera dependiendo del sentido del flujo de corriente. Estos relevadores trabajan sobre el producto de la corriente y el potencial. Si el producto es positivo el relevador opera, del otro modo permanece bloqueado. La utilización de este relevador siempre fue acompañada con un relevador de sobre corriente.

Cuando se hizo necesaria una selectividad que no fuera afectada por la variación de corriente por cambios en las condiciones de generación, carga, conmutación del sistema de potencia y tomando en cuenta además que la protección diferencial de línea resultaba una solución cara, surgieron los relevadores de distancia. [1]

En estos dispositivos la corriente es una línea de impedancia Z_L la cual producirá una tensión:

$$V = I * Z_L \tag{2.1}$$

En donde la condición de operación es:

$$Z_L > \frac{V}{I} \tag{2.2}$$

Donde Z_L es la impedancia de la línea.

Los primeros relevadores de distancia fueron electromecánicos y muchos de ellos están actualmente en uso. Estos relevadores electromecánicos utilizaron inicialmente la unidad de disco de inducción que fue posteriormente sustituida debido a los problemas que presentaba por otros tipos de unidades como por ejemplo los de copa de inducción.

Estos relevadores median la impedancia para falla entre fases comparando la diferencia vectorial del potencial entre fases y sus corrientes. De aquí que para la condición de operación de las fallas entre fases tenemos que:

$$\frac{V_{ab}}{I_a - I_b} < Z_{L_{ab}} \tag{2.3}$$

donde V_{ab} es el voltaje entre fases $I_a \in I_b$ son las corrientes de cada fase $Z_{L_{ab}}$ es la impedancia entre fases

2.3. Relevadores Digitales

El uso de relevadores digitales se contempló por primera vez en los 1960s. Se sugería en ese entonces que todos los equipos de sistemas de potencia en una subestación se podían proteger utilizando computadoras digitales, y desde entonces han sido atraídos muchos investigadores en cuanto a este tema. La investigación ha cubierto prácticamente todas las técnicas y muchos nuevos algoritmos se producen día a día. [2]

En 1971 se sugirió un algoritmo de protección a distancia basado en la predicción de valores pico de las ondas de corriente y voltaje utilizando una muestra y su derivada. La clave de esta suposición es que la corriente y el voltaje son ondas senoidales. En 1972 una técnica similar basada en la primera y segunda derivada se desarrolló conjuntamente por Westinghouse y Pacific Gas & Electric Company en los Estados Unidos. [2]

Con la llegada de los microprocesadores y su avance en cuanto a la rapidez de su operación y la tecnología digital de muestreo, filtrado, manejo de datos y cálculo. Se diseñaron los relevadores digitales para realizar la medición, comparación y operación del relevador cuando ocurre una falla. Estos algoritmos se pueden cambiar en algunos relevadores dependiendo de las características de la línea.[2]

Algunos de los relevadores de este tipo realizan la medición y lógica de operación igual que relevadores analógicos pero quien realiza la función es un microprocesador o varios trabajando en paralelo, llevando uno de ellos la coordinación de los demás y el muestreo de las señales.[2]

Estos relevadores digitales presentan la ventaja de operación más rápida. Ofrecen la posibilidad de tener un autodiagnóstico que puede enviar en forma remota a través de un canal de comunicación con el que se puede saber cuando un relevador tiene error de funcionamiento facilitando el mantenimiento siendo por lo mismo más confiables. Además algunos de estos dispositivos ofrecen la facilidad de enviar los datos de entrada, memoria de los datos de falla, cálculo de la distancia en donde ocurrió la falla y facilidad de ajuste en forma remota.

2.4. Características de la protección digital

Es reconocido que se obtienen muchos beneficios al momento de aplicar la protección digital, los cuales se pueden clasificar en cinco áreas. [2]

2.4.1. Confiabilidad

Los relevadores digitales se pueden diseñar para que se auto monitoreen constantemente. El proceso de monitoreo involucra ejecutar el software junto con un conjunto de datos específicos y comparando los resultados con aquellos esperados dado que el dispositivo funcione correctamente. Si no se obtienen estos resultados se mandan alarmas al operador. Este auto monitoreo se puede extender con más programación para que monitoree sus periféricos, es decir, sus instrumentos de medición. Cabe mencionar que este auto monitoreo provee datos acerca de su propio funcionamiento lo cual nos da un valor agregado a la confiabilidad que tenemos del equipo reduciendo los posibles errores de funcionamiento.[2]

2.4.2. Flexibilidad

Estos relevadores son generalmente más flexibles que los convencionales. Por ejemplo, estos relevadores son programables y es posible utilizar el mismo hardware para diversas tareas de protección y control. También es posible que a un relevador con diversas características después de ser instalado, modificarle sus parámetros de funcionamiento virtualmente sin cambios en la estructura del hardware.[2]

2.4.3. Desempeño Operacional

Experimentos de desarrollo y de campo han mostrado que estos relevadores trabajan y responden mucho mejor en aplicaciones complejas que los relevadores convencionales.[2]

2.4.4. Consideraciones Costo/Beneficio

El costo de relevadores convencionales se ha ido incrementando a lo largo de las últimas décadas y el costo/beneficio ha incrementado. Por otro lado, los avances en la tecnología microelectrónica han llevado a una reducción sustancial en el costo del hardware digital pero debe ser recordado, en particular, que el costo del software es lo que domina el costo en general. [2] Existen situaciones donde el costo del software sobrepasa al costo del hardware por lo cual el costo en general sobrepasa al de equipo convencional. En general, es cierto que las mejoras substanciales en el desempeño que son posibles por la aplicación de tecnología digital han resultado en una reducción gradual en el costo/beneficio para equipos de protección digital. [2]

2.4.5. Otros

Con la introducción de sistemas de protección basados en microprocesadores se han obtenido facilidades y características totalmente nuevas, que no tienen un análogo en la tecnología convencional.[2]

En particular, los relevadores digitales pueden programarse para proveer análisis post-falla de todos los fenómenos transitorios observados. Además, el equipo digital monitorea voltaje y corriente y puede programarse para calcular la distancia a una falla inmediatamente después de la falla. Esta información es muy útil para los equipos de mantenimiento en la inspección de las líneas. [2]

2.5. Estructura básica de los relevadores digitales

A diferencia de los relevadores convencionales, un relevador digital como el que utilizamos consiste de dos partes fundamentales: el software y el hardware. El tipo de software que se encuentra embebido en el relevador define no sólo sus características sino también su funcionamiento. [2]

Una parte integral e importante del software es el algoritmo, el cual es un conjunto de instrucciones matemáticas utilizadas para procesar los voltajes entrantes y las corrientes para estimar parámetros del sistema tales como los valores eficaces de las señales, impedancia medida, frecuencia fundamental, corrientes diferenciales, etc. Estos parámetros calculados frecuentemente se utilizan para decidir si el sistema se encuentra en falla o no y consecuentemente iniciar la acción necesaria para aislar la falla en la sección pertinente.[2]

En los últimos 20 años se han utilizado diferentes tipos de algoritmos para la protección de los sistemas eléctricos de potencia, los cuales se pueden clasificar en cinco grandes ramas:

- a. Algoritmos de forma de onda sinusoidal.
- b. De técnica de Fourier y de Walsh.
- c. El método de los mínimos cuadrados.
- d. Solución de ecuaciones diferenciales del modelo del sistema protegido.
- e. Métodos basados en onda viajera.[2]

2.6. Relevadores de Distancia

Cuando se quiere aplicar una protección selectiva en grandes redes no siempre resulta conveniente recurrir a la protección de máxima intensidad con tiempos escalonados, ya que los tiempos de ajuste de los relevadores de los escalones más altos podrían ser demasiado elevados. Esta situación no resultaría nada deseable cuando se presenta un cortocircuito en las proximidades de dichos relevadores. [4]

Este problema se resuelve con los relevadores de distancia, los cuales tienen un tiempo de actuación directamente proporcional a la distancia del defecto. El principio de accionamiento de estos relevadores está basado en la utilización de una bobina amperimétrica y otra voltimétrica. Cuando ocurre un cortocircuito sucede que la tensión es nula en el punto de defecto, mientras que conforme se aleja el observador de dicho punto, la tensión aumenta. [4]

Es fácil intuir, pues, que para la protección a distancia se aprovecha esta característica de la tensión ante un cortocircuito, es decir, la bobina voltimétrica del relé creará un par antagonista al creado por la bobina amperimétrica de tal forma que cuanto más alejado esté el relé del punto de defecto, mayor será el par antagonista y mayor será el tiempo invertido para conmutar los contactos del relé. Conviene recalcar que ante un cortocircuito, la corriente se mantiene prácticamente constante en el recorrido de la línea, por lo que el par motor generado por la bobina amperimétrica de la distancia a la que se encuentre, del punto de defecto, el relé de distancia.

Generalmente, los relevadores de distancia se montan en combinación con elementos de desbloqueo de máxima intensidad, o mínima impedancia, y con órganos direccionales. La protección de distancia se utiliza principalmente para líneas y también puede aplicarse para redes, permitiendo una gran libertad de explotación en las mismas.[7]

El problema de combinar la rápida actuación y la selección de fallas en una planta es uno de los puntos primordiales en la protección de los sistemas de potencia. Para cumplir con estos requisitos, los sistemas de protección de alta velocidad para transmisión y circuitos primarios de distribución que son adecuados para utilizar con fusibles automáticos están bajo continuo desarrollo y son muy aplicados hoy en día.[7]

La protección a distancia, es en su forma más básica, un sistema de protección no unitario que ofrece ventajas tanto económicas como técnicas. A diferencia de la protección de fase y la protección de sobrecorriente, la ventaja clave de la protección a distancia es que su cobertura de fallas del circuito protegido es virtualmente independiente de variaciones de la impedancia de la fuente.

2.7. Modelado de Relevadores

Un relevador de protección se modela utilizando una aproximación o un enfoque multinivel definiendo un cuadro de relevador, un tipo de relevador y un elemento de relevador. Utilizando modelos simplificados de Transformadores de Corriente (TC) y de Transformadores de Voltaje o Potencial (TP) se puede estudiar la respuesta en estado estable de una red utilizando simulación normal de Corto Circuito. [8]

El modelo de un relevador está conformado por tres niveles, el cuadro de relevador, el tipo de relevador y el elemento de relevador. [8]

El cuadro del relevador especifica la funcionalidad general del relevador utilizando un diagrama a bloques. Define cuantas etapas consiste el relevador y cómo interactúan. Los timers, elementos direccionales y elementos lógicos, incluyendo su interconexión se definen en este nivel. Sin embargo, una característica fundamental de este nivel es que no cuenta con "inteligencia", es decir, no se incluye ningún algoritmo.[8]

Cada bloque, denominado "slot" está definido por el número de señales de entrada y el número de señales de salida, y las líneas de señales definen como se interconectan dichos bloques o "slots".

El tipo de relevador se refiere a un cuadro de relevador específico. Éste define los contenidos de cada slot del cuadro. En este nivel, la función matemática o el tipo de características se especifican. Por ejemplo, los tipos de filtro utilizados para el procesamiento de las señales de entrada o las características de operación. Dado que muchos relevadores soportan más de un tipo de característica, un conjunto de características o funciones pueden ser definidas para cada slot. Además, el tipo de relevador especifica los rangos para las diferentes configuraciones del mismo, incluyendo si los parámetros son continuos o en pasos discretos (por intervalos).[8]

El elemento del relevador modela el relevador en un sistema eléctrico. Se refiere al tipo de relevador que provee la estructura del mismo completa incluyendo los valores fijos para todos los parámetros. La configuración del relevador, por ejemplo, la configuración de pick-up, forma parte de los elementos de configuración del relevador, considerando las limitaciones definidas por el tipo de relevador. [8]

Los modelos de TCs y TPs forman la conexión entre el elemento de relevador y la red eléctrica. Para la salida del relevador, una señal se envía directamente del elemento de relevador al sistema modelado. Para distintos tipos de protecciones, la salida del relevador se puede conectar a varios puntos del sistema modelado.

2.8. Líneas de Transmisión

Las líneas de transmisión constituyen el transporte de energía eléctrica a los puntos de consumo. La transmisión de potencia eléctrica puede ser por corriente alterna o corriente directa, con un diseño de línea que puede ser: [9]

a) Líneas aéreas

- b) Cables subterráneos
- c) Líneas con aislamiento de gas comprimido

En nuestro país las redes de transmisión de energía eléctrica tienden a una normalización de 5 niveles de voltajes que son:

- 13.8 kv Baja Tensión.
- 34.5 kv Baja Tensión.
- 115 kv Alta Tensión.
- 230 kv Alta Tensión.
- 400 kv Extra Alta Tensión.

Actualmente los conductores en las líneas de transmisión de corriente alterna de redes de potencia son de aluminio con alma reforzada.

La ventaja de los conductores de aluminio es su menor peso y bajo costo, comparados con los conductores de cobre de la misma capacidad.

De los tipos más usados se tienen:

- ACC.- Conductor de Aluminio.
- AAAC.- Conductor de Aluminio con Aleación.
- ACSR.- Conductor de Aluminio con Refuerzo de Acero.
- ACAR.- Conductor de Aluminio con Refuerzo de Aleación.

• ACSR/AS.- Conductor de Aluminio con Refuerzo de Acero con Aluminio Soldado.[9]

Estos conductores están compuestos por varios hilos trenzados lo que le da una buena flexibilidad con grandes áreas de sección transversal.[9]
Capítulo 3

Modelado de líneas

Es bien sabido que para asegurar que un relevador de protección actúe como se espera, debe ser probado bajo condiciones reales de un sistema de potencia. Esto generalmente significa que el relevador debe ser probado con datos generados de un programa de simulación transitoria electromagnética. Existen muchos programas disponibles, como el ATP-EMTP y el PSCAD. En cada uno de estos programas, el sistema de potencia que genera los datos transitorios puede ser modelado con detalle. También es posible simular diferentes escenarios de falla y configuraciones de sistemas.

3.1. Modelo de Referencia para Pruebas en Relevadores de Líneas de Transmisión

3.1.1. Modelo de Sistema Básico

En la figura 3.1 se muestra un modelo básico que es adecuado para pruebas en la mayoría de las aplicaciones de protección en líneas de transmisión. El modelo contiene varios componentes como líneas, transformadores, fuentes, etc. Existen tres fuentes en nuestro modelo, S1, S2 y S3. El ángulo de la fuente puede ser variado para simular flujos de cargas. Las líneas de transmisión consisten de un par de líneas mutuamente acopladas (entre los buses 1 y 2), de las cuales hay una terminal de tres líneas. [10]

Los nodos intermedios están en la línea de transmisión para que se puedan aplicar fallas en distintos lugares. Los fusibles y switches también se incluyen para simular distintas configuraciones. Este modelo puede ser expandido para incluir capacitores en serie, reactores shunt y capacitores.



Figura 3.1: Modelo básico de un sistema para pruebas de protecciones en Líneas de Transmisión.

3.2. Modelos de líneas de transmisión

Modelar líneas de transmisión que interconectan sistemas formando una red es uno de los primeros pasos que se deben realizar para probar nuevos algoritmos de relevadores de protección. En la actualidad, los departamentos de investigación y desarrollo de los distintos fabricantes modelan una red a partir de valores reales obtenidos por mediciones u otorgados por la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) para después insertar en el sistema modelado sus dispositivos de protección con nuevos algoritmos para verificar que su comportamiento sea el deseado en las situaciones de fallas.

En el presente trabajo se modela a partir de los datos otorgados por SIEMENS una línea de transmisión de 400kv, el nivel de tensión más alto en el país, los sistemas a los que se encuentra interconectada y los Transformadores de Corriente y Potencial con los cuales se adquieren los valores que el relevador analiza.

El modelo se realizó en el software ATP-EMTP, el cual es una potente herramienta de análisis de transitorios electromagnéticos con una interfaz gráfica y con la capacidad de crear modelos definidos por el usuario e interactuar con otras herramientas como MatLab.

La resistencia, inductancia y capacitancia de las líneas de transmisión aéreas están distribuidas equitativamente a lo largo de la longitud de la línea. Además, algunos parámetros de las líneas de transmisión también están en función de la frecuencia.

Para estudios de estado estable, como flujos de carga y análisis de corto circuito, los únicos parámetros que se requieren son los de secuencia positiva y secuencia cero, calculados de tablas y fórmulas simples en la frecuencia de generación.

Para estudios transitorios electromagnéticos los parámetros calculados de fórmulas simples no son adecuados, y los parámetros deben ser calculados utilizando subrutinas auxiliares disponibles en distintos programas de electromagnéticos transitorios.

3.2.1. Procedimiento de las pruebas

El modelo básico de la red de electromagnéticos transitorios de la figura 3.1 permite simular el estado transitorio y el estado estable de los eventos que un relevador se puede encontrar en situaciones de la vida real.

La evaluación de un relevador por el fabricante podría resultar en la aplicación de miles de casos dados el número infinito de condiciones variables que se pueden encontrar en la aplicación real. Sin embargo, se puede limitar el número de pruebas en el sentido de que se revisarán las condiciones que son más probables de encontrarse en la red a la que se aplicará la protección.

3.2.2. Características de falla

El relevador debería ser probado para fallas con diferentes características, las más importantes son el lugar de la falla, tipo de falla, resistencia de falla, evolución de la falla (fallas tipo cross-country), ángulo de inserción de la falla y carga al momento de la falla.[10]

Tipos de falla

El propósito de variar el tipo de falla es para probar las funciones internas relacionadas con la selección de falla del relevador.

Existen 10 tipos de falla básicos que involucran todas las combinaciones de fases A, B y C y la tierra (G). Estas se muestran en la tabla 3.1. Todos los tipos de fallas se deben aplicar para probar la capacidad del relevador de elegir la fase con falla y operar correctamente en cada lugar de la falla.[10]

							9			
	U	na Fa	se	I	Oos Fase	es	En	tre Fa	ses	Tres Fases
	a	1 Tierr	a		a Tierra	L				
Fase A	Х			Х		Х	X		X	X
Fase B		Х		Х	X		Х	X		Х
Fase C			X		X	Х		X	X	Х
Tierra	Х	Х	X	Х	X	Х				
Tipo de Falla	AG	BG	CG	ABG	BCG	CAG	AB	BC	CA	ABC

Tabla 5.1. Tipos de Talla	Tabla	Tipos de fa	allas
---------------------------	-------	-------------	-------

Fallas tipo Cross-country

Existen distintas maneras para que ocurran fallas tipo cross-country. El más simple es la falla que cambia para incluir más fases en esta falla. Por ejemplo, Una fase a tierra que cambia a dos fases a tierra; y dos fases a tierra que cambian a tres fases.[10]

Es muy importante definir estas fallas a parte de las fallas línea a tierra, bifásicas, entre fases y trifásicas ya que su comportamiento, a pesar de ser la combinación de dos de las anteriores no es igual a la suma de ambas condiciones. Es decir, el comportamiento de una falla cross-country linea a tierra (AG) que pasa a dos líneas a tierra (ABG) no es exactamente igual al comportamiento de una falla AG durante un tiempo y al de una falla ABG durante otro tiempo.

Esto se debe a que ocurre una falla con condiciones iniciales fuera del estado nominal de operación, por lo tanto los transitorios pueden ser más bruscos pero sobre todo, diferentes.

No es difícil identificarlas, sin embargo, cuando un algoritmo clasifica una falla procede a realizar otros cálculos y no verifica que la falla siga siendo la misma.

Estas fallas deben ser aplicadas interna y externamente a la línea protegida para asegurar la operación correcta del algoritmo.

3.3. Línea Tres Estrellas (TTE) - Teotihuacan(TTH)

La línea de Transmisión Tres Estrellas - Teotihuacan se encuentra ubicada en las regiones Central y Oriente de México, de acuerdo a la divisón que realiza la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Transmite una tensión de 400 kV y tiene una longitud de 242.8 km pasando por los estados de Hidalgo, Puebla, Veracruz y el Estado de México. [11]

3.3.1. Estructura – Torre

Las torres o estructuras son esencialmente elementos de soporte de los conductores y del hilo de guarda, las torres pueden ser fabricadas con materiales que van desde acero galvanizado hasta postes de madera y de concreto.

Las torres pueden ser autosoportadas o con retenidas para alta y baja tensión respectivamente.

La torre modelada es una torre 43T60 del Catálogo de Productos del Ramo Metalmecánico de Luz y Fuerza del Centro. [12]

La línea de transmisión Tres Estrellas - Teotihuacán cuyo nivel de tensión es de 400 Kv tiene una longitud de 242.8 km. Es una estructura de doble circuito con 3 conductores por fase. El calibre del conductor es 1113 ACSR, en la Figura 3.2 se muestra la estructura. [13]

3.3.2. Sistemas Equivalentes

Los sistemas equivalentes cercanos a la línea fueron modelados como una fuente de voltaje senoidal de 400kv y una impedancia equivalente. Estos valores fueron recibidos de parte de la empresa SIEMENS y se muestran en la Tabla 3.2 donde Z_1 son las impedancias de Secuencia Positiva y Z_0 son las impedancias de Secuencia 0. [13]

Las líneas que interconectan estos sistemas también fueron modeladas con los datos de la Tabla 3.3. [13]



Figura 3.2: Torre 43T60 de Transmisión

Sistema	Z_1	Z_0
ETS-400	$Z_1 = 0.0 + j0.09248$	$Z_0 = 0.0 + j0.02359$
FET-400	$Z_1 = 0.0 + j0.02595$	$Z_0 = 0.0 + j0.01178$
EAT-400	$Z_1 = 0.0 + j0.05881$	$Z_0 = 0.0 + j0.02359$
TEX-400	$Z_1 = 0,00296 + j0,00878$	$Z_0 = 0,00085 + j0,00708$
TUL-400	$Z_1 = 0,00125 + j0,008$	$Z_0 = 0,00029 + j0,00574$
PRD-400	$Z_1 = 0,00146 + j0,01316$	$Z_0 = 0,00263 + j0,01688$
MVA BASE = 100 MVA		

Tabla 3.2: Datos de los sistemas equivalentes de red del modelo

Tabla	3.3:	Datos	de l	as lí	íneas

LÍNEA	IMPEDANCIAS
ETS-TTE (03 KM)	Z1 = 0,00001 + j0,00007
	Z0 = 0,00005 + j0,00023
\mathbf{FFT} -TTE (06 KM)	Z1 = 0,00001 + j0,00013
	Z0 = 0,00012 + j0,00046
$EAT_TTE(0.3 KM)$	Z1 = 0,00001 + j0,00007
	Z0 = 0,00005 + j0,00023
TTH TEX (16 15 KM)	Z1 = 0,0003 + j0,00389
	Z0 = 0,00295 + j0,01253
TTH TILL (64.78 KM)	Z1 = 0,0012 + j0,01561
1111-10L (04.78 KWI)	Z0 = 0.01185 + j0.05025
DPD TTE (56 KM)	Z1 = 0,00071 + j0,01184
$\frac{1 \text{ KD-11E} (50 \text{ KW})}{1 \text{ KD-11E} (50 \text{ KW})}$	Z0 = 0.01059 + j0.03977
	Z1 = 0,00379 + j0,04876
1 KD-10L (202.37 KM)	Z0 = 0.04454 + j0.14344

3.4. Modelado en ATP-EMTP

El modelado de la línea, los TCs y TPs se llevó a cabo en el software ATP-EMTP. Hay diversas caracteristicas a considerar dentro de este software y a continuación se muestra brevemente lo que se hizo para poder introducir los datos anteriores en el software.

La versión de ATP-EMTP utilizada fue la versión 5.4p1 cómo se muestra en la figura 3.3



Figura 3.3: Cuadro de diálogo de la versión del ATP-EMTP

En la figura 3.4 se muestra la red completa modelada en ATP. En las siguientes secciones se ve parte por parte cómo se introducen los datos en el software para cada uno de los diferentes elementos que conforman el modelo.

3.4.1. Línea segmentada

La línea en cuestión se trata de una línea de 400kv de 6 conductores por cable de 242.8 km de longitud (Ver figura 3.5). Se segmenta para fines de simulación de fallas, para poder insertar las fallas de la tabla 3.1 en distintos puntos. [13]

El cuadro de diálogo del bloque de línea se muestra en la figura 3.6. Aquí se puede apreciar que la longitud de cada bloque es de 24.28 km, correspondiendo al 10% de la longitud total y que la frecuencia es de 60 Hz y es una línea aérea. [13]

En la figura 3.7 se muestran los datos introducidos de la línea correspondientes a la figura 3.2.



Figura 3.4: Red completa modelada en ATP-EMTP



Figura 3.5: Línea segmentada en 10 partes iguales.



Figura 3.6: Cuadro de diálogo de Línea

ŧ			Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
	1	0.8	1.6421	0.05214	5.15	37	31	45	180	2
2	2	0.8	1.6421	0.05214	5.15	31	25	45	180	2
3	3	0.8	1.6421	0.05214	5.15	25	19	45	180	2
4	4	0.8	1.6421	0.05214	8.1	37	31	45	180	2
5	5	0.8	1.6421	0.05214	8.1	31	25	45	180	2
6	6	0.8	1.6421	0.05214	8.1	25	19	45	180	2
7	0	0	0.47625	1.9001	5.15	43	37	0	0	0
3	0	0	0.47625	1.9001	8.1	43	37	0	0	0

Figura 3.7: Cuadro de diálogo de Línea

Los valores que se introdujeron en cada columna se explican a continuación:

Ph. no Aquí se van a enumerar las fases de los conductores que están en la línea de transmisión el numero 0 (cero) es para los hilos de guarda, como se puede ver al ser 6 fases se enumeran del uno al seis ya que es una estructura de doble circuito, así como dos hilos de guarda se utiliza como ya se había mencionado en número 0 (cero).

Rin [cm] Radio interior del conductor.

Rout [cm] Radio exterior del conductor, este valor se obtuvo de dividir en diámetro del conductor en dos para obtener el radio de acuerdo a calibre del conductor, tanto de las fases como del hilo de guarda.

Resis [ohms/m] Resistencia del conductor a la corriente directa la cual se obtuvo de los datos proporcionados.



Figura 3.8: Vista de una Red equivalente

Horiz [m] Distancia horizontal del centro del agrupamiento de conductores con respecto de una línea horizontal de referencia este valor se obtiene de la figura 3.2.

Vtower [m] Distancia vertical del arreglo de conductores en metros este dato también es obtenido de la figura 3.2.

Vmid [m] Distancia vertical del arreglo de conductores en la flecha máxima en metros. Se obtiene al restar la distancia de una línea de los valores de Vtower.

Separ [cm] Distancia entre los conductores en el arreglo en centímetros, dato obtenido de la figura 3.2.

Alpha Posición angular de uno de los conductores en el arreglo con respecto a una línea horizontal. Siendo dos conductores, este dato es 180°

NB Numero de conductores en el arreglo, los cuales son dos como se puede mencionó anteriormente.

3.4.2. Sistemas Equivalentes

Como se había mencionado anteriormente, las redes a las que está conectada la línea se modelaron como una fuente senoidal de 400kv y una impedancia equivalente, datos que fueron proporcionados por SIEMENS. Tabla 3.2

ATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Volt	400000	AC3	ABC	×0004
	Hz	60			
oha	Deg/Rad	0			
41		0			
Tstart	s	-1			
Tstop	S	1			
Tstop Copy F	s 'astellentire data	1 gid Resel	Order: D	Labet	
Tstop Copy F Co <u>m</u> ment	s	1 grid Resel 1	Order: D	Labet	
Tstop Copy F Comment	s	gid Resel	Order: D	Labet	
Tstop Copy F Comment: Type of sour	s 'aste entire data	1 grid Resel	Order: D	Labet	Hide
Eopy F Comment Type of sour Current	s 'aste entire data	grid Resel	Order: D	Labet	Hide

Figura 3.9: Cuadro de diálogo de la fuente

A continuación se muestra el cuadro de diálogo de la red equivalente EAT-400. Los datos que se introdujeron en cada red son de la tabla 3.2.

En la figura 3.9 se muestra el cuadro de diálogo de la fuente y en la figura 3.10 el de cada red.

3.4.3. Líneas de interconexión

En la figura 3.8 se puede apreciar además de la fuente y una carga que representa el equivalente de la red, el bloque de la línea.

Estos bloques son diferentes a los de la línea de interés ya que son de interconexión y no se analizarán a fondo.

En la figura 3.11 se muestra el cuadro de diálogo de dichas líneas. Los datos introducidos en éstos bloques son los de la tabla 3.3 [13].

TA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
0	Ohm/m	0	IN1	ABC	×0004
.0	Ohm/m	18.848	OUT1	ABC	×0039
+	Ohm/m	0			
.+	Ohm/m	41.52			
Сору	Paste entile dat	agid Reset 1	Order: 0	Label: FE	T-40D
Copy Commer	Paste entire dat	a grid Reset	Order: 0	Label: FE	T-40D

Figura 3.10: Cuadro de diálogo de la red

3.4.4. Transformadores de Corriente

Los datos introducidos al software ATP-EMTP de los transformadores se obtuvieron de los datos de placa de los Transformadores de corriente de 420 kV Marca AREVA Clase de precisión C400 que son de características muy similares a los utilizados por SIEMENS en la línea de interés.

En la figura 3.13 se muestran los datos introducidos de los transformadores de corriente y posteriormente se explica qué quiere decir cada fila.

Io Corriente de magnetización en estado estable.

Fo Flujo en estado estable.

Rmag Resistencia de magnetización en ohms.

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LÍNEAS

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
RO	Ohm/m	0.192	In	ABC	×0039
LO	Ohm/m	0.736	Out	ABC	×0002
CO	μF/m	0			
R+	Ohm/m	0.016			
L+	Ohm/m	0.208			
C+	μF/m	0			
	De de l'auties des				
Copy (Comme Lines Lengtł	Paste entire dat nt:	agrid Reset	Order: 0	Label: FE	T-TTE
Copy (Comme Lines Length	Paste entire dat nt:	agrid Reset	Order: 0	Labet FE	T-TTE Hide

Figura 3.11: Cuadro de diálogo de la red



Figura 3.12: Transformadores de Corriente

- **Rp** Resistencia en el devanado primario en ohms.
- Lp Inductancia en el devanado primario en ohms o en mili henrios.

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LÍNEAS

DATA	UNIT	VALUE	~	NODE	PHASE	NAME
lo	Valts	0.0274		P1	С	×0002
Fo	Vs	0.07504		P2	С	×0003
Rmag	Ohms	100		S1	1	IC
Rp	Ohms	0.0001		S2	1	∞0047
Lp	Ohm	0.004146				
Vrp	kV	0.001				
Rs	Ohms	0.01				
Ls	Ohm	0.04146				
Copy F Comment Output 0 - N	Paste entire da	ta grid Reset	Order	0	Label:	Hide

Figura 3.13: Cuadro de diálogo de los Transformadores de Corriente

Vrp Relación de Voltaje en el devanado primario en kilovolts.

Rs Resistencia en el devanado secundario en ohms.

Ls Inductancia en el devanado secundario en ohms o en mili henrios.

Vrs Relación de voltaje en el devanado secundario en kilovolts.

RMS Bandera que nos indica la característica No Lineal.

0 = Característica Corriente / Flujo.

1 = Característica Irms / Urms.

En la simulación la que se utiliza es la característica Irms / Urms.

3.4.5. Transformadores de Potencial

Los datos introducidos al software ATP-EMTP de los transformadores se obtuvieron de los datos de placa de los Transformadores de tensión Capacitivos de 72.5 a 765 kV Marca AREVA que son de características muy similares a los utilizados por SIEMENS en la línea de interés. Ver figura 3.14



Figura 3.14: Transformadores de Potencial

En la figura 3.15 se muestran los datos introducidos de los transformadores de potencial y posteriormente se explica qué quiere decir cada fila.

Io Corriente de magnetización en estado estable.

Fo Flujo en estado estable.

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LÍNEAS

DATA	LINUT	VALUE	1000	NODE	DUNCE	NAME
DATA	UNIT	VALUE		NUDE	PHASE	NAME
lo	Valts	0.002		P1	1	××0030
Fo	Vs	43.139	_	P2	1	
Rmag	Ohms	300000		S1	1	VA
Rp	Ohms	0.007		S2	1	
Lp	Ohm	0.1428				
Vrp	kΫ	11.656				
Rs	Ohms	0.0002				
Ls	Ohm	0.00396	and i			
		0.000				
Copy	Paste entile da	tagrid Reset	Order:	0	Label:	
Copy	Paste entile da t:	ta grid Reset	Order:	0	Label:	- Hide

Figura 3.15: Cuadro de diálogo de Transformadores de Potencial

Rmag Resistencia de magnetización en ohms.

- **Rp** Resistencia en el devanado primario en ohms.
- Lp Inductancia en el devanado primario en ohms o en mili henrios.
- Vrp Relación de Voltaje en el devanado primario en kilovolts.
- **Rs** Resistencia en el devanado secundario en ohms.
- Ls Inductancia en el devanado secundario en ohms o en mili henrios.
- Vrs Relación de voltaje en el devanado secundario en kilovolts.

RMS Bandera que nos indica la característica No Lineal.

- 0 = Característica Corriente / Flujo.
- 1 = Característica Irms / Urms.

En la simulación la que se utiliza es la característica Irms / Urms.

3.4.6. Interruptor de falla

En la figura 3.16 se muestran los interruptores de falla. En éstos simplemente se introduce el momento en el cual se activarán y si se restablecerán. Además hay que cambiar físicamente las conexiones antes de simular cada falla. En la figura 3.16 por ejemplo, están arreglados para simular una falla tipo Cross-Country entre las fases AG y después ABG.



Figura 3.16: Interruptores de falla

DATA	LINIT	MALLIE	NODE	DUACE	NAME
	UNIT	VALUE 0.025	Free	D D	NAME V0001
1-01 T. a. a.	5	2		1	×0001
n-op Imar	Ampo	100	10		muur
7 ab	ол	0	-		
Copy	Paste entire da	ta grid Reset (Drder: 0	Label	
Сору Г	Paste entile da	ta gid Reset (Drder: 0	Label:	
Copy F Comment	'aste entile da	ta gid Reset (Drder: 0	Label:	
Copy F Comment Output	^o aste] entile da	ta grid Reset (Drder: 0	Label:	
Copy F Comment Output	Paste entile da	ta gid Reset (Drder: 0	Label:	Hide

Figura 3.17: Cuadro de diálogo del interruptor de falla

3.5. Resultados de simulaciones

En esta sección se presentan los voltajes y corrientes en los secundarios de los TCs y TPs para algunas de las fallas simuladas en la red en el software ATP-EMTP. Se puede apreciar que los resultados son los esperados y que los datos están listos para utilizarse para probar algoritmos.

Por ejemplo en la Figura 3.18(a) se puede observar como el voltaje de la fase A que es la que presenta la falla se reduce en el tiempo de inserción de la falla y los demás voltajes aumentan.

En la Figura 3.18(b) se observa como la corriente aumenta significativamente, resultado claro de una falla en la fase.

En el caso de la falla Bifásica (Figura 3.19(a)) los voltajes de las fases A y B son los que se atenúan, comportamiento resultado de una falla bifásica a tierra y las corrientes (Figura 3.19(b)) de las fases A y B se incrementan.

En la figura 3.20(a) se puede observar una falla trifásica. Como podemos ver es una falla mucho más severa que las anteriores ya que aparenta incluso perder la frecuencia fundamental y el transitorio tiene una duración mayor. En la figura 3.20(b) incluso podemos ver como todas las corrientes se estabilizan en un valor de corriente de alrededor de 5 veces su valor nominal.

Finalmente en el caso de las Fallas Cross-Country (Figuras 3.21 y 3.22) el resultado de la simulación demuestra un comportamiento de voltajes y corrientes muy diferente al de las dos fallas independientes; ya sea una línea a tierra y dos líneas a tierra (Figura 3.21) o dos líneas a tierra y trifásica (Figura 3.22); lo que corrobora que es importante modificar el algoritmo de decisión de falla ya que puede dar pie a decisiones incorrectas.





Figura 3.18: Voltajes y Corrientes de Falla Monofásica al 50 % de la línea





Figura 3.19: Voltajes y Corrientes de Falla Bifásica al 50 % de la línea

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LÍNEAS





Figura 3.20: Voltajes y Corrientes de Falla Trifásica al 50 % de la línea



Figura 3.21: Voltajes y Corrientes de Falla Cross-Country (AG-ABG) al 50 % de la línea

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LÍNEAS





Figura 3.22: Voltajes y Corrientes de Falla Cross-Country (ABG-ABCG) al 50 % de la línea

Capítulo 4

Algoritmo del Relevador

El Algoritmo del relevador es la parte esencial del mismo, depende del algoritmo explotar a la máxima capacidad todos los recursos del relevador (hardware) y utilizarlos de manera eficiente.

Día a dia surgen nuevos algoritmos, sin embargo hay un gran trabajo previo que se debe de hacer para poder probar el algoritmo. Fuera de modelar la red y obtener simulaciones de fallas reales como las que se vieron en el capítulo 3, se deben modelar los dispositivos con los que se adquieren los datos, cómo se transforman a variables digitales y después la lógica del relevador para la toma de decisión de disparo.

4.1. Estructura generalizada de un relevador numérico

McLaren fue el primero que propuso el concepto de Protección con relevadores de sistema abierto, donde varias funciones de un relevador se pueden obtener del mismo hardware sólo con modificar la programación del microprocesador. La tecnología de relevadores moderna ha tendido hacia esta dirección. [7] [14]

El concepto generalizado de un relevador numérico consiste de un conjunto mínimo de módulos de hardware y funciones de relevadores digitales modernos y relevadores numéricos. Con el relevador numérico generalizado y con la cantidad de información comúnmente disponible es posible recrear la mayoría de los comportamientos de los relevadores digitales y su equipo.

Aislamiento y escalamiento de señales análogas. Las formas de onda de corriente y voltaje de los transformadores de instrumentación (TCs y TPs) se adquieren y se escalan a niveles convenientes de voltaje para utilizarlos en los relevadores digitales.

Filtros analógicos anti-aliasing Se utilizan los filtros de baja frecuencia para evitar el fenómeno de aliasing en el que las componentes de alta frecuencia de las entradas parecen ser partes de las componentes de frecuencia fundamental.

Conversión análogo-digital Debido a que los procesadores digitales trabajan con datos numéricos o lógicos las señales de onda de la entrada se deben de muestrear en tiempos discretos. Para lograr esto, cada señal análoga pasa a través de un módulo de muestreo y retención y después se pasa uno por uno a un convertidor análogo-digital por medio de un multiplexor.

Algoritmo de estimación de fasores Un algoritmo (software) implementado en un microprocesador estima la amplitud y fase de las formas de onda que se alimentan al relevador

Algoritmo del relevador y lógica de disparo Las ecuaciones y parámetros específicos para el algoritmo de protección y la lógica de disparo asociada se implementan en el software del microprocesador utilizado en el relevador. El microprocesador calcula los fasores que representan a las entradas, adquiere el estado de los switches, realiza cálculos de protección y finalmente da salidas para controlar los interruptores. El procesador puede que también soporte comunicaciones, auto-pruebas, displays, relojes y otras tareas. [14]



Figura 4.1: Estructura generalizada de un relevador numérico

En la figura 4.1 se muestra el esquema de una estructura generalizada de un relevador numérico. Las funciones de cada módulo se explicarán más a fondo en las secciones siguientes. En las secciones 4.2 - 4.9

4.2. Módulo de aislamiento y escalamiento de señales

El módulo de aislamiento y escalamiento de señales adquiere las señales de voltaje y corriente de los transductores del sistema de potencia. Este módulo brinda aislamiento eléctrico del sistema de potencia y escala las entradas adquiridas a niveles adecuados para el sistema de adquisición de datos. Dado que los convertidores análogo digital sólo aceptan señales de voltaje el módulo convierte las señales de corriente a voltajes equivalentes. [14]



Figura 4.2: Aislamiento y escalamiento analógico de una señal de voltaje

En la figura 4.2 se muestra un diagrama esquemático del circuito para el escalamiento y aislamiento de las señales de voltaje. La salida de un transformador de voltaje se aplica a un transformador auxiliar que reduce el nivel de voltaje y aisla eléctricamente al resto del equipo del relevador. Despues del transformador auxiliar, el voltaje se reduce con un potenciómetro a un nivel adecuado para el sistema de adquisición de datos. Un varistor de metal oxido, MOV por sus siglas en inglés (Metal Oxide Varistor), se utiliza en la entrada del transformador auxiliar para proteger el sistema de adquisición de datos de variaciones transitorias en las señales de entrada. [14]



Figura 4.3: Aislamiento y escalamiento analógico de una señal de corriente

En la figura 4.3 se muestra un diagrama esquemático del circuito para el escalamiento y aislamiento de las señales de corriente. La corriente de un transformador de corriente se reduce a un nivel menor por un transformador de corriente auxiliar. El secundario de dicho TC se pasa a través de una resistencia para convertir la corriente a un voltaje equivalente.[14]

4.3. Módulo de filtro anti-aliasing

Las entadas análogas se deben de pasar por un filtro pasa bajos y sus salidas deben ser muestreadas y cuantificadas. El uso de filtros pasa bajos se necesita para limitar los efectos del ruido y componentes de frecuencias no deseadas arriba de la mitad de la frecuencia de muestreo.

La naturaleza de la tarea de los relevadores dicta la cantidad de filtrado que se necesita. La protección a distancia se basa en mediciones de impedancia que están contenidas en las componentes de estado estacionario de 60 Hz. Por lo tanto, el filtrado debe conservar las componentes de estado estacionario y rechazar cualquier otra componente. Los filtros comunes pasa-bajos que se utilizan en estos relevadores son de tercer o quinto orden con una frecuencia de corte de alrededor de 90 Hz. El hecho de que se utilice esta frecuencia de corte implica que un periodo de muestreo de por lo menos 3 muestras por ciclo (180 Hz) se debe utilizar para que la información necesaria para realizar las funciones del relevador se retenga y los errores por aliasing se evitan. En la práctica, los periodos de muestreo deben ser por lo menos de 4 muestras por ciclo (240 Hz). [14]

En un relevador diferencial, las corrientes de inrush se pueden detectar checando los niveles de las segundas y quintas armónicas en la corriente diferencial. Una frecuencia de corte de 360 Hz es una elección práctica. Para garantizar la observación adecuada de las frecuencias fundamental, segunda y quinta armónicas y para evitar aliasing, se requiere un periodo de muestreo de por lo menos 720 Hz (12 muestras por segundo).

4.4. Especificaciones de filtro pasa-bajos

Los filtros están diseñados para pasar frecuencias, de cero a una frecuencia ω_P con aproximadamente una ganancia unitaria. El rango de frecuencia $[0, \omega_P]$ se llama la banda de paso del filtro. Altas frecuencias, de la frecuencia ω_S hacia arriba son atenuadas. El rango de frecuencia de $[\omega_s, \infty]$ se llama la banda de stop del filtro. El rango de frecuencia de $[\omega_P, \omega_s]$ se llama la banda de transición. [15]

Una descripción gráfica de las especificaciones de un filtro pasa bajos se muestra en la figura 4.4. Las áreas rayadas en gris en la banda de paso y en la banda de stop indican valores prohibidos de magnitud en éstas bandas. En la banda de transición no hay valores prohibidos pero usualmente se requiere que la magnitud disminuya constantemente en esta banda.[15]



Figura 4.4: Especificaciones de un filtro pasa-bajos

El parámetro δ_p es la tolerancia de la respuesta de la magnitud en la banda de paso. La magnitud deseada en esta banda es de 1. El parámetro δ_s es la tolerancia la respuesta de la magnitud en la banda de stop. La magnitud deseada en esta banda es 0. La frecuencia en la cual la ganancia es de -3 dB se llama la frecuencia de corte y se define com la frecuencia a la cual la

magnitud de la respuesta del filtro es $\frac{1}{\sqrt{2}}$ de su valor nominal en la banda de paso. [15]

4.5. Filtros Butterworth.

La amplitud de la respuesta $|H(\omega)|$ de un filtro pasa-bajos Butterworth de orden N está dado por la ecuación (4.1) [15]

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^{2N}}}$$
(4.1)

donde,

N es el orden del filtro ω_0 es la frecuencia de corte

El procedimiento para diseñar filtros Butterworth se empieza al calcular el orden del filtro utilizando la siguiente expresión: [15]

$$N \ge \frac{\log(10^{-G_s/10} - 1) - \log(10^{-G_p/10} - 1)}{2\log(\omega_s/\omega_P)}$$
(4.2)

donde,

 G_P es la ganancia de la banda de paso en dB G_S es la ganancia de la banda de stop en dB ω_P es la frecuencia de la banda de paso en radianes ω_S es la frecuencia de la banda de stop en radianes

Sabiendo el orden del filtro, la frecuencia de paso y la frecuencia de stop se puede calcular la frecuencia de corte utilizando las Ecuaciones 4.3 o 4.4 [15]

$$\omega_c = \frac{\omega_P}{(10^{-G_P/10} - 1)^{1/2N}} \tag{4.3}$$

$$\omega_c = \frac{\omega_S}{(10^{-G_S/10} - 1)^{1/2N}} \tag{4.4}$$
Las frecuencias de corte que dan las ecuaciones 4.3 y 4.4 son diferentes y se deben elegir a criterio del diseño y de los requerimientos de las bandas. [15]

Los polos de la funcion de transferencia normalizada se calculan con la siguiente ecuación

$$s_k = e^{\frac{j\pi}{2n}(2k+n-1)}$$
 $k = 1, 2, \dots, n$ (4.5)

La función de transferencia normalizada se determina por los valores de los polos utilizando la ecuacion 4.6

$$\hat{H}(s) = \frac{1}{(s-s_1)(s-s_2)\dots(s-s_n)}$$
(4.6)

La función de transferencia final del filtro se reemplaza con:

$$H(s) = \hat{H}(s/\omega_c) \tag{4.7}$$

En la figura 4.5 se muestra la frecuencia de respuesta de un filtro Butterworth de 3^{er} orden con frecuencia de corte de 180 Hz cuya función de transferencia es

$$H(s) = \frac{1446625279,519}{s^3 + 2261,9449s^2 + 2558197,2576s + 1446625279,519}$$



Figura 4.5: Respuesta en frecuencia de un Filtro Butterworth

4.6. Construccion de bloques de filtros digitales

Cualquier sistema digital lineal, invariante en el tiempo, racional y causal se puede realizar con tres tipos básicos de elementos [15].

Retardo Unitario Su propósito es mantener la entrada por una unidad de tiempo (físicamente es igual al intervalo de muestreo T) antes de que pase a la salida. Matemáticamente realiza la siguiente operación

$$y[n] = x[n-a] \tag{4.8}$$

El retraso unitario se muestra esquemáticamente en la figura 4.6 (a). La letra D (Delay en inglés) alguna vez se reemplaza con z^{-1} , el operador de retraso en el dominio z. El retraso unitario se puede implementar en el software en una variable de almacenamiento que cambie su valor cuando el programa lo diga. [15]

Sumador El propósito del sumador es sumar dos o más señales que aparecen a la entrada en un tiempo específico. Matemáticamente realiza la operación de la siguiente ecuación

$$y[n] = x_1[n] + x_2[n] + \dots$$
(4.9)

El sumador se muestra en la figura 4.6 (b).

Multiplicador El propósito de este elemento es multiplicar una señal (una cantidad variante) por una constante, tal como en la siguiente ecuación.

$$y[n] = ax[n] \tag{4.10}$$

El multiplicador se muestra en la figura 4.6 (c).



Figura 4.6: Elementos básicos para construir filtros digitales

4.7. Convertidor análogo digital

Un convertidor análogo-digital (ADC) toma el valor instantáneo de un voltaje análogo y lo convierte en un número binario de n-bits que puede ser fácilmente manipulado por un microprocesador. El número de n-bits es una fracción binaria que representa el cociente entre el voltage de entrada y el voltaje total del convertidor. Diferentes técnicas se utilizan para realizar esta conversión. Los rangos completos de voltaje para un ADC son típicamente de 0 a +5 o de 0 a +10 volts para operación unipolar y de -5 a +5 o de -10 a +10 volts para operación bipolar. [16]



Figura 4.7: Representación gráfica de un ADC

4.8. Muestreo y retención

La función básica de este módulo en un sistema de entrada analógica es capturar una señal de entrada y mantenerla constante durante el ciclo de conversión del ADC. [16]

En la figura 4.8 se muestra la operación de un sistema de muestreo y retención en el dominio del tiempo. Hasta T_1 la salida está en el modo de retención. En el tiempo T_1 se vuelve a adquirir la entrada. El tiempo de adquisición T_{AC} es el tiempo que se requiere para que la salida iguale a la entrada. La salida después sigue a la entrada hasta que el circuito se vuelve a poner en modo de retención. Durante este tiempo la señal de salida puede variar ligeramente del valor en T_2 . Esta variación se conoce como incertidumbre de apertura. Los valores típicos para tiempo de adquisición, tiempo de apertura e incertidumbre de apertura son 5, 0.005 y 0.001 microsegundos, respectivamente. [16]



Figura 4.8: Operación de un circuito de muestreo y retención en el dominio del tiempo

4.9. Multiplexeo

El multiplexor análogo consiste en un arreglo de interruptores controlados con lógica digital. Utiliza la logica de control digital para seleccionar una entrada analógica especifica y la mueve a su salida. En la figura 4.1 el multiplexor se aplica para seleccionar un canal del módulo de muestreo y retención a la vez para un escalamiento análogo y una conversión analógica digital. Durante un intervalo de muestreo el multiplexor trae todas las señales una por una para su conversión análogo-digital. El multiplexor no es relevante para el modelado de relevadores numéricos ya que no afecta las entradas analógicas. Se asume por lo regular que el proceso se lleva acabo sin problemas. [14]



Figura 4.9: Esquema de un Multiplexor

4.10. Algoritmos de Estimación de Fasores

La mayoría de los algoritmos existentes propuestos para relevadores numéricos se pueden agrupar en dos categorías. Los primeros son los que se basan en un modelo de la forma de onda. Los segundos implican un modelo del elemento a proteger, como una línea de transmisión en este caso. [14]

4.10.1. Tecnicas no recursivas de ventana corta

Las técnicas de ventana corta asumen que las señales son sinusoidales de frecuencia nominal y que la frecuencia del sistema es invariante. Dependiendo de la técnica sólo se necesitan una o dos muestras para estimar los fasores con estos algoritmos [14]. Un fasor es una representación de un voltage o una corriente sinusoidal de frecuencia nominal f_0 y su cruce por cero es θ radianes adelante del tiempo igual a cero. La representación matemática de este fasor es:

$$\vec{H} = |V|e^{j\theta} \tag{4.11}$$

$$= |V|(\cos\theta + j\sin\theta) \tag{4.12}$$

Las partes real e imaginaria del fasor se expresan como:

$$Re(\vec{V}) = |V|\cos\theta \tag{4.13}$$

$$Im(\vec{V}) = |V|\sin\theta \tag{4.14}$$

La magnitud y la fase del fasor se calculan utilizando las partes reales e imaginarias de la siguiente manera.

$$|V| = \sqrt{Re(\vec{V})^2 + Im(\vec{V})^2}$$
(4.15)

$$\tan \theta = \frac{Im(\vec{V})}{Re(\vec{V})} \tag{4.16}$$

Capítulo 5

Diagrama a bloques

En este capítulo se presenta un diagrama a bloques del algoritmo propuesto. El algoritmo principalmente propone un método recursivo de clasificación de falla para estimar adecuadamente el lugar de la falla. [17]

La primera parte del algoritmo consiste en detectar si existen condiciones de falla. Una vez que se detectan dichas condiciones se pasa a adquirir las señales como se describió en el capítulo 4.

De las señales de potencia se escalan, filtran, retienen y se convierten en señales digitales. Todo esto se da por entendido que lo realiza el software ATP-EMTP con los modelos de TCs y TPs y los voltmetros y amperímetros.

Posteriormente se convierten dichas señales adquiridas en los fasores que las representan para utilizarlas en el cálculo de la impedancia de falla.

Las impedancias aparentes de la línea se calculan de maneras distintas dependiendo del tipo de falla que se presente.

Debido a que el cálculo de la impedancia vista por el relevador es esencial para decidir si se dispara o no el interruptor, es de alta importancia que el relevador clasifique adecuadamente la falla. [17]

Tipo de Falla	Ecuación
AG	$V_A/(I_A + 3kI_0)$
BG	$V_B/(I_B + 3kI_0)$
CG	$V_C/(I_C + 3kI_0)$
AB o ABG	$(V_A - V_B) = (I_A - I_B)$
BC o BCG	$(V_B - V_C) = (I_B - I_C)$
CA o CAG	$(V_C - V_A) = (I_C - I_A)$
ABC	Las mismas que de fase a fase

Tabla 5.1: Ecuaciones de Cálculo de Impedancia Aparente para diferentes fallas

Es por eso que se propone que la subrutina de clasificación de falla se efectúe recursivamente hasta que se alcance un tiempo umbral en el cual se debe tomar la decisión. Las fallas tipo Cross-Country en este caso son detectadas adecuadamente y se puede realizar un cálculo de impedancia más certero y actuar de manera adecuada. [17]

El bloque de decision de i > n es el que le brinda al algoritmo un tiempo para seguir clasificando la falla. Si se detecta por ejemplo un tipo de falla AG y posteriormente evoluciona a un tipo ABG el algoritmo lo podrá discernir y entonces cambiar su ecuación de cálculo de impedancia de acuerdo a la tabla 5.1.



Figura 5.1: Diagrama a bloques del Algoritmo

Capítulo 6

Conclusiones

Se propuso un algoritmo que a la par de calcular las impedancias aparentes de la línea clasifique el tipo de falla.

Es importante tomar en cuenta los tiempos de operación del microprocesador del relevador para definir el tamaño de la ventana de estimación de fasores. Dependiendo de cómo se ajuste la ventana se puede obtener un algoritmo muy preciso pero lento o uno muy rápido pero que no sea tan preciso.

Trabajos similares han sido presentados en [18] pero para protección diferencial. En [19] se presenta un caso utilizando redes neuronales artificiales.

Se logró modelar adecuadamente la red con los datos proporcionados por SIEMENS y se observó un comportamiento adecuado.

El modelo de ATM-EMTP queda disponible para pruebas de algoritmos de trabajos futuros.

Fue posible modelar la red y se observaron los resultados que se presentaron en el Capítulo 3.

Capítulo 7

Recomendaciones para Trabajos Futuros

Aplicar la sugerencia en un algoritmo en MatLab con los datos obtenidos de las simulaciones en la red.

Probar el algoritmo en un relevador real de SIEMENS para comprobar que los resultados sean aceptablemente similares a los simulados.

Incluir otro tipo de protección en la simulación, por ejemplo la protección diferencial.

Bibliografía

- [1] J. O. G. Camiro, "Evolucion de los relevadores de protección," TECNOLAB, 1989.
- [2] A. Johns and S. Salman, *Digital Protection for Power Systems*. IEE Power Series, P. Peregrinus, 1997.
- [3] I. d. J. R. Cambrero, "Análisis y evaluación de dos métodos de protección modal de distancia," 2002.
- [4] M. S. R. Alanis, "Protección de sistemas eléctricos de potencia," 2005.
- [5] A. Osman and O. Malik, "Transmission line distance protection based on wavelet transform," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 515 523, april 2004.
- [6] A. Osman and O. Malik, "Protection of parallel transmission lines using wavelet transform," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 49 – 55, jan. 2004.
- [7] AREVA, Network Protection and Automation Guide. AREVA, 2002.
- [8] M. Pöller, B. Maier, and A. Dierks, "Modelling the steady state and transient behaviour of protection devices," *DIgSilent GmbH*, 1989.
- [9] A. M. Peña, "Comparación de funcionalidad de algoritmos de relevadores digitales para líneas de transmisión en condiciones ruidosas de la red," 2005.
- [10] I. P. S. R. Committee., "Emtp reference models for transmission line relay testing," *IEEE Power System Relaying Committee*.
- [11] C. F. de Electricidad, "Inventario nacional de líneas de transmisión."
- [12] L. y Fuerza del Centro, Catálogo de productos del ramo metalmecánico.

- [13] "Datos proporcionados por siemens mesoamérica."
- [14] P. McLaren, K. Mustaphi, G. Benmouyal, S. Chano, A. Girgis, C. Henville, M. Kezunovic, L. Kojovic, R. Marttila, M. Meisinger, G. Michel, M. Sachdev, V. Skendzic, T. Sidhu, and D. Tziouvaras, "Software models for relays," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 238–245, apr 2001.
- [15] B. Porat, A course in Digital Signal Processing. John Wiley and Sons Inc.
- [16] "Tutorial: Analog data acquisition technology part ii-analog-to-digital conversion," *Micro*, *IEEE*, vol. 2, aug. 1982.
- [17] "Ieee guide for determining fault location on ac transmission and distribution lines," *IEEE Std C37.114-2004*, 2005.
- [18] K. Solak and W. Rebizant, "Analysis of differential protection response for cross-country faults in transmission lines," in *Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium*, sept. 2010.
- [19] A. Jain, A. Thoke, R. Patel, and E. Koley, "Intercircuit and cross-country fault detection and classification using artificial neural network," in *India Conference (INDICON)*, 2010 Annual IEEE, dec. 2010.