

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



TOLERANCIA AL EFECTO DE IMPEDANCIA DE FALLA
EN RELEVADORES DE DISTANCIA

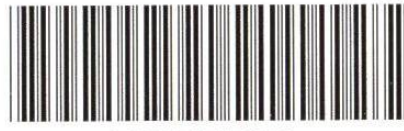
TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA:

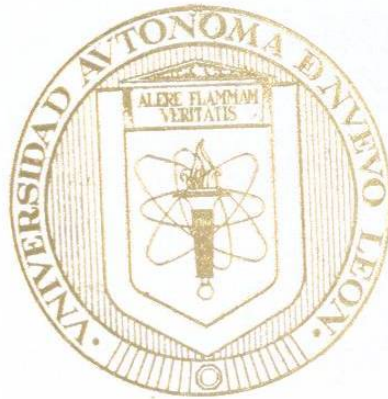
CATARINO ELIUD CANTU PEREZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. FEBRERO 2005



1020150659

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



TOLERANCIA AL EFECTO DE IMPEDANCIA DE FALLA
EN RELEVADORES DE DISTANCIA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA:

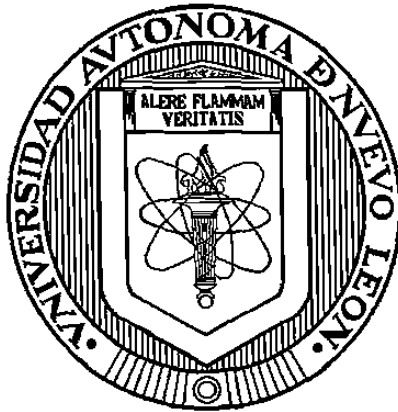
CATARINO ELIUD CANTU PEREZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. FEBRERO 2005

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**TOLERANCIA AL EFECTO DE IMPEDANCIA DE FALLA
EN RELEVADORES DE DISTANCIA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

P R E S E N T A:
CATARINO ELIUD CANTÚ PÉREZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.

FEBRERO, 2005

995612

f

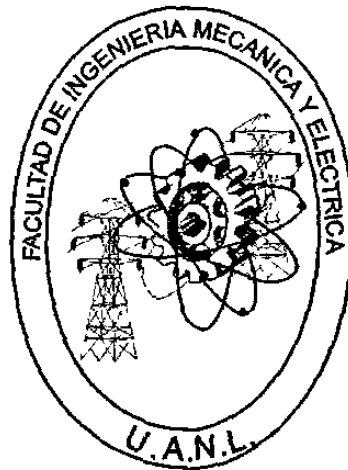
TM
Z5853
.M2
FINE
2005
C35



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**TOLERANCIA AL EFECTO DE IMPEDANCIA DE FALLA
EN RELEVADORES DE DISTANCIA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

P R E S E N T A:
CATARINO ELIUD CANTÚ PÉREZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.

FEBRERO, 2005

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Postgrado

Los miembros de comité de tesis recomendamos que la tesis **TOLERANCIA AL EFECTO DE IMPEDANCIA DE FALLA EN RELEVADORES DE DISTANCIA**, realizada por el alumno Catarino Eliud Cantú Pérez, matrícula 951607, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

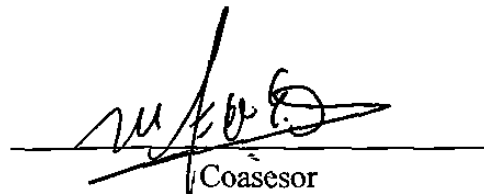
El comité de Tesis



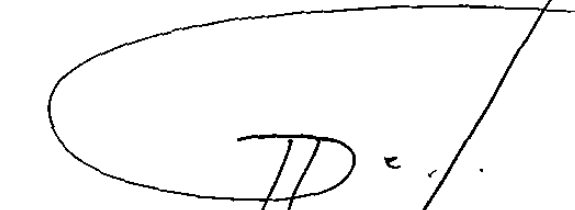
Asesor
Dr. Arturo Conde Enríquez



Coasesor
Dr. Ernesto Vázquez Martínez



Coasesor
Dr. Miguel Francisco Escalante Gutiérrez



Vo. Bó.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Postgrado

DEDICATORIA

Quiero agradecer de manera muy especial y con todo mi amor a mi padre Juan de Dios Cantú y a mi madre Rosa Elia Pérez por todo su cariño, comprensión y paciencia, gracias por darme la vida y enseñarme a vivirla con todos los valores que como familia me han inculcado. Además quiero agradecer a mis hermanos, mis mejores amigos, Juan Carlos, Eliézer Iván y Moisés Isaí gracias por su apoyo y por estar siempre a mi lado compartiendo los momentos de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido gozar de salud y darme la fuerza necesaria para llegar a la culminación de esta etapa de mi vida.

A mi familia por estar siempre a mi lado, gracias por su apoyo sin ustedes nunca hubiera llegado a la realización de este trabajo.

Al Dr. Arturo Conde Enríquez por su paciencia y por haberme permitido trabajar a su lado, por ser más que un asesor, gracias.

Al Dr. Ernesto Vázquez Martínez y al Dr. Miguel F. Escalante Gutiérrez, por sus comentarios y recomendaciones hacia este trabajo de tesis.

A los profesores del Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica, por compartir sus conocimientos, experiencias y valores.

A mis compañeros de la maestría por su amistad y apoyo siempre estarán a mi lado Gumaro, Fermín, Mauricio, Iván, Javier y Juan.

A las personas que compartieron sus vidas conmigo durante estos dos años gracias por su apoyo y ayuda Lupita, Elida, Víctor y Mauricio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado para la realización de este trabajo de tesis.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por ser mi segundo hogar en estos siete años.

RESUMEN

TOLERANCIA AL EFECTO DE IMPEDANCIA DE FALLA EN RELEVADORES DE DISTANCIA

Publicación No. _____

Catarino Eliud Cantú Pérez, M.C. en Ingeniería Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León, 2005

Profesor Asesor: Dr. Arturo Conde Enríquez

El modelado de los elementos que componen el sistema eléctrico de potencia constituye la parte medular de cualquier estudio de comportamiento dinámico. Desde la creación de los primeros relevadores electromecánicos de distancia se han estudiado las ventajas que presentan cada una de las características de operación, y se han realizado diferentes investigaciones sobre la manipulación de las señales eléctricas de entrada al dispositivo. Esto ha contribuido al desarrollo de nuevos métodos de comparación de señales y de nuevas características, además de los estudios sobre medición fasorial como estimador de estado. Todos estos estudios y trabajos han ayudado a tener una representación más exacta del comportamiento del relevador ante la dinámica del sistema. Dentro de la bibliografía son muy escasos los trabajos que abordan el modelado de relevadores de distancia y esto es debido principalmente a que estos trabajos han sido desarrollados por fabricantes los cuales no dan a conocer los algoritmos y metodologías para su desarrollo.

En la presente tesis se analizan las consideraciones para el diseño de relevadores de distancia partiendo de los esquemas de comparación, se desarrollan herramientas para el análisis y obtención de las características de operación. También se presenta un estudio comparativo del desempeño funcional de las diferentes características de operación de relevadores de distancia.

La impedancia medida por un relevador de distancia corresponde a la distancia de la línea entre el relevador y la falla solo si el circuito es libre de otras impedancias serie o

paralelo. Desafortunadamente, la impedancia serie de la falla, la impedancia paralelo de cargas y la impedancia inyectada por acoplamiento magnético mutuo de conductores cercanos pueden causar un error considerable, especialmente en las segundas y terceras zonas.

Arreglos especiales deben ser considerados en algunos casos para evitar efectos adversos de estos factores, pero no es aconsejable complicar los arreglos estándar de relevadores solo para algunos casos, los cuales están íntimamente ligados a líneas largas y relevadores de tierra. La característica de operación debe ser seleccionada para proporcionar una mejor discriminación entre fallas en la sección protegida y todas las condiciones restantes, y puede ser necesario emplear diferentes características para las tres zonas.

La compensación de las fuentes de error en el relevador de distancia permite incrementar los índices de calidad de la protección. Tradicionalmente esta problemática se ha intentado resolver modificando las características de operación del relevador a modo que sea menos inmune a estas condiciones. Los niveles de exigencia actuales del sistema eléctrico para los esquemas de protección, impiden en general que estos compromisos no sean resueltos, obteniendo como resultado protecciones susceptibles a un fallo de operación.

La originalidad de este trabajo consiste en la compensación de estos fenómenos desde el diseño de los relevadores, es decir, compensar estos fenómenos ya sea con información disponible en la localidad del relevador o con información transmitida desde una subestación central. El relevador resultante tiene características dinámicas de operación que se adaptan a las condiciones vigentes del sistema eléctrico de potencia. Para este fin, se establecieron los criterios de diseño para la modelación matemática de los relevadores convencionales y se propusieron algoritmos adaptivos que logran la compensación deseada para obtener un relevador de distancia con un grado de inmunidad mayor a estos fenómenos que los relevadores convencionales.

Los algoritmos propuestos se evalúan en condiciones reales de operación utilizando simuladores trifásicos de sistemas de potencia, la validación algorítmica se realiza evaluando el desempeño de los métodos propuestos, la viabilidad algorítmica para su implantación y su respuesta ante señales en tiempo real.

Se obtiene un relevador de distancia adaptivo cuadrilateral con mayor tolerancia al efecto resistivo y reactivo de la impedancia de falla que su similar convencional.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas de la investigación realizada y las recomendaciones de trabajos futuros.

INDICE

Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Índice de figuras.....	xi
Índice de tablas.....	xiii

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción.....	1
1.2 Análisis de relevadores de distancia.....	2
1.3 Reseña histórica.....	3
1.4 Objetivos del trabajo.....	5
1.5 Estructura de la tesis.....	6

Capítulo 2. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE RELEVADORES DE DISTANCIA

2.1 Introducción.....	8
2.2 Consideraciones de diseño.....	9
2.2.1 Señales eléctricas de entrada.....	9
2.2.2 Comparador de amplitud.....	10
2.2.3 Comparador de fase.....	10
2.2.4 Herramientas de análisis.....	11
2.3 Características de operación.....	14
2.4 Estructura funcional.....	19
2.5 Sistemas de prueba y resultados de validación.....	21
2.6 Conclusiones del capítulo.....	29

Capítulo 3. FUNCIONES DE ADAPTACION DE LA CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN

3.1 Introducción.....30

3.2 Efecto de fallas monofásicas a través de resistencia de falla.....30

3.3 Modificación adaptiva tolerante al efecto reactivo de la impedancia de falla.....33

 3.3.1 Formulación adaptiva.....35

 3.3.2 Formulación adaptiva propuesta.....39

3.4 Modificación adaptiva tolerante al efecto resistivo de la impedancia de falla.....43

 3.4.1 Adaptación en estado dinámico.....43

 3.4.2 Adaptación en estado estable.....45

 3.4.3 Efecto en la adaptación ante una transferencia de potencia.....48

3.5 Conclusiones del capítulo.....50

Capítulo 4. PRUEBAS FUNCIONALES

4.1 Introducción.....51

4.2 Pruebas a la modificación adaptiva tolerante al efecto reactivo de la impedancia de falla.....51

4.3 Pruebas a la modificación adaptiva tolerante al efecto resistivo de la impedancia de falla.....60

4.4 Conclusiones del capítulo.....68

Capítulo 5. CONCLUSIONES

5.1 Introducción.....69

5.2 Conclusiones generales.....69

5.3 Aportaciones.....70

5.4 Recomendaciones para trabajos futuros.....71

Referencias.....72

INDICE DE FIGURAS

No de Fig.	Descripción	Página
2.1.	Comparación de amplitud en el órgano de medición.....	10
2.2.	Comparación de fase en el órgano de medición.....	11
2.3.	Características de operación en el plano W	12
2.4.	Representación de $\bar{Z} = \bar{V} / \bar{I} = \bar{Z}e^{j\varphi}$	13
2.5.	Algoritmo para la obtención de las características de operación.....	15
2.6.	Características de operación del relevador de distancia.....	16
2.7.	Estructura funcional del relevador de distancia.....	19
2.8.	Estructura de implantación del relevador de distancia.....	19
2.9.	Panel del relevador virtual de distancia.....	20
2.10.	Sistema I para la validación de la operación del relevador de distancia.....	21
2.11.	Registro COMTRADE del evento real del sistema I.....	22
2.12.	Gráfico del evento del sistema I visto por la protección B.....	23
2.13.	Características de operación para el evento del sistema I.....	24
2.14.	Variante de la característica cuadrilateral para el evento del sistema I.....	25
2.15.	Sistema II para la validación de la operación del relevador de distancia.....	26
2.16.	Registro del evento del sistema II.....	26
2.17.	Gráfico del evento del sistema II visto por A.....	27
3.1.	Sistema de estudio de la implementación adaptiva.....	33
3.2.	Cambio adaptivo del lado superior de la característica cuadrilateral.....	35
3.3.	Parámetros de diseño de la característica cuadrilateral.....	39
3.4.	Parámetros de diseño la característica cuadrilateral adaptada.....	41
3.5.	Cambio adaptivo de la característica cuadrilateral tolerante al efecto resistivo.....	43
3.6.	Estructura funcional de la adaptación al efecto resistivo de acuerdo al flujo de carga.....	45

3.7. Adaptación de la característica cuadrilateral con impedancia de carga hacia atrás.....	46
3.8. Adaptación de la característica cuadrilateral con impedancia de carga hacia delante.....	47
3.9. Implementación de la adaptación al efecto resistivo.....	48
3.10. Cambio en la impedancia aparente visto por el relevador cuadrilateral debido a ΔP	49
4.1. Sistema de prueba-1 para la validación de la adaptación al efecto reactivo.....	53
4.2. Resultados gráficos del relevador A en el evento del sistema de prueba-1.....	54
4.3. Adaptación para X_f en la protección A con diferentes relaciones de Z_L/Z_S	56
4.4. Resultados gráficos del relevador A en el evento del sistema de prueba-1 modificando la diferencia angular entre los generadores a 45°	57
4.5. Resultados gráficos del relevador B en el evento del sistema de prueba-1.....	58
4.6. Sistema de prueba-2 para la validación de la adaptación al efecto resistivo.....	61
4.7. Corriente de secuencia positiva en la protección A del sistema de prueba-2.....	62
4.8. Corriente de secuencia negativa en la protección A del sistema de prueba-2.....	62
4.9. Estado del relevador adaptivo A ante una transferencia de potencia en el sistema de prueba-2.....	63
4.10. Estado del relevador adaptivo A ante una falla en el sistema de prueba-2.....	64
4.11. Cambio dinámico del detector en el sistema de prueba-2.....	65
4.12. Resultados gráficos del relevador adaptivo A en el sistema de prueba-2.....	66
4.13. Adaptación para R_f en la protección A con diferentes relaciones de Z_L/Z_S	67

INDICE DE TABLAS

No. de Tabla	Descripción	Página
A.1.	Tiempos de operación de los relevadores para el evento del sistema I.....	24
A.2.	Tiempos de operación de los relevadores para el evento del sistema II.....	28

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta de manera general la cronología en el modelado de los diferentes tipos de protección, en especial el de la protección de distancia. Se citan algunos de los desarrollos en las funciones de adaptación realizados en los últimos años; finalmente se describen objetivos y estructura del trabajo.

1.2 ANÁLISIS DE RELEVADORES DE DISTANCIA

El modelado de los elementos presentes en el sistema eléctrico de potencia constituye la parte fundamental de cualquier estudio de comportamiento dinámico; existen muchos estudios y trabajos referidos al modelado de elementos del sistema de potencia como lo son las líneas de transmisión, los generadores y transformadores; estos trabajos han tomado gran importancia y han sido motivo de estudio por muchos años dado que representan los grandes elementos del sistema de potencia. En los últimos años los trabajos de modelado se han referido a elementos más pequeños en tamaño pero no en importancia, estos trabajos son enfocados por ejemplo a los sistemas de compensación de voltaje, a los elementos de control en los generadores, y a los relevadores. Todos estos trabajos de modelado ayudan a entender el comportamiento conjunto que existe entre las diferentes condiciones en el sistema de potencia y estos elementos.

Los trabajos de modelado de estos elementos del sistema de potencia surgieron como una necesidad de resolver problemas presentes en estos dispositivos; de esta manera se podía entender el comportamiento que tenían ante condiciones anormales como lo son las oscilaciones de potencia, la pérdida de sincronismo, pérdida de carga, caída de voltaje, y otras condiciones. Los primeros trabajos de modelado en los sistemas de protección surgieron a la par de cada uno de los relevadores, pero es en la introducción de los primeros relevadores microprocesados en donde todos los trabajos empiezan a tener mayor importancia, pues estos nuevos relevadores introdujeron nuevas posibilidades de almacenamiento y de manejo de información, y se empieza a introducir el concepto de obtener información de otros puntos remotos del sistema eléctrico de potencia por medio de sistemas de comunicación. Esta tecnología digital requirió de un nuevo manejo de las señales, surgiendo de esta manera el concepto de estimación fasorial, con esta información se obtuvieron modelos más detallados de los sistemas de protección.

Dentro del modelado de los sistemas de protección podemos mencionar que los primeros elementos en ser modelados corresponden a los elementos de sobrecorriente, después podemos hablar de los trabajos realizados para modelar la protección diferencial y por último la modelación de la protección de distancia; todos los trabajos de modelación han servido para entender mejor el comportamiento de cada uno de ellos y para mejorar la funcionalidad y selectividad de cada una de las protecciones.

Las condiciones variables de operación de los sistemas eléctricos de potencia exigían requerimientos mayores de sensibilidad, confiabilidad y selectividad de las protecciones, los cuales no se llegaban a cumplir con las protecciones convencionales y sus ajustes fijos. Esto impulso el desarrollo de protecciones adaptivas las cuales presentaban la capacidad de variar sus parámetros de ajuste o sus características de operación para adaptarse de manera dinámica a las condiciones de operación del sistema eléctrico de potencia. Los primeros trabajos desarrollados al análisis de las posibles áreas de aplicación de la protección adaptiva estuvieron enfocados en la protección de sobrecorriente para posteriormente enfocarse en la protección de distancia.

1.3 RESEÑA HISTÓRICA

En los trabajos de modelación de los diferentes tipos de protección nos referimos en esta sección a la estrecha relación que guarda la modelación y la introducción de los relevadores microprocesados. Dentro de los primeros trabajos que tuvieron lugar en cuanto a estudiar las características de operación para relevadores de distancia tenemos los trabajos realizados por Warrington en el año 1946 [1], en estos trabajos se estudian las ventajas de las aplicaciones de los principios de la protección de distancia del tipo Mho, y este estudio estuvo referido a los primeros relevadores electromecánicos de distancia.

Los trabajos realizados por Warrington estuvieron dirigidos a obtener características de operación en base a comparar las señales en el órgano de medición de la protección por medio de una comparación de amplitud, posteriormente en 1949 se introduce la comparación por fase de las señales, la cual es la más usada actualmente; esta nueva metodología de diseño produjo una mayor diversidad de características de operación y originó el lanzamiento del primer relevador estático comercial en 1961.

Los relevadores diseñados por medio de circuitos integrados ocasionaron más estudios sobre la protección de distancia y sobre la adquisición y manejo de las señales en 1960-1970, entre estos trabajos podemos mencionar los realizados por Corson, Rowell [2] sobre adquisición de señales y Peach [3] sobre algoritmos de protección.

A partir de 1970 con la introducción de los primeros relevadores microprocesados se genera una gran cantidad de estudios dentro de los diferentes tipos de protecciones, se integran funciones de protección y de control, en 1980 se realizan mediciones fasoriales para estimación de estado, se establece la protección piloto de fibra óptica en 1984 y en 1987 se realizan los primeros trabajos de protección adaptiva.

Existen diferentes definiciones acerca de lo que es la protección adaptiva; Horowitz [4] la define como una metodología que permite y busca hacer ajustes al variar funciones de protección, para hacerlas más acordes con las condiciones de operación del sistema. Rockefeller, et. al. [5] considera que la protección adaptiva es una actividad en tiempo real que modifica la respuesta preferida de la protección ante cambios en las condiciones del sistema. Los cambios referidos en las protecciones adaptivas se ven reflejados en cambios en las características funcionales como la característica de operación o modificaciones adaptivas de los parámetros de ajustes.

Sobre los trabajos realizados en las funciones de adaptación encontramos las primeras referencias en 1988, es en este año cuando se define los conceptos básicos sobre protección adaptiva [5, 6] y se realizan los primeros experimentos sobre coordinación rápida [4].

En 1991 Z. Zhizhe et. al. [7] presentó un conjunto de métodos adaptivos para protección digital de distancia, y en 1994 A.G. Jongepier, et. al. [8] propuso una protección adaptiva de distancia para una línea de doble circuito. Recientemente en el 2000 D.V. Coury, et. al. [9] desarrolla funciones de adaptación para líneas multiterminal y M.J. Damborg, et. al. [10] propone funciones de adaptación como controles preventivos y de emergencia.

1.4 OBJETIVOS DEL TRABAJO

Hasta el momento son pocos o casi nulos los trabajos en cuanto al modelado de relevadores de distancia, se habla de las características de operación, de sus ventajas y desventajas, se tienen bien definidos los tipos de comparación para las señales eléctricas en los relevadores, se han realizado múltiples trabajos sobre la manipulación y el tratamiento digital sobre las señales de entrada al dispositivo, pero es necesario el tener todos los elementos de manera conjunta en un solo dispositivo de modelado que contenga el procesamiento digital de las señales, el diseño de todas las características de operación para una comparación tanto de fase como de amplitud, todo esto para evaluar la correcta funcionalidad y selectividad de las protecciones.

Los trabajos realizados dentro del área de protecciones están enfocados a problemas muy particulares; se desarrollan nuevos algoritmos de estimación fasorial con el fin de reducir los errores en el estado transitorio de falla para la reducción en el tiempo de operación de la protección; se analizan los sistemas de bloqueo en base a establecer puntos críticos de oscilaciones de potencia en base a características limitadoras ya establecidas. Los resultados de estos estudios se pueden presentar en un estado dinámico de operación, en una herramienta que modele las características de operación de los relevadores de distancia y la cual sea utilizada para evaluar estos algoritmos.

Un aspecto importante de analizar dentro del modelado de relevadores de distancia es la posibilidad de implementar conceptos de adaptación para variar las características de operación en base a información obtenida del sistema eléctrico.

De acuerdo a lo anterior, los objetivos de la presente tesis son:

- Realizar un compendio acerca de las consideraciones en el diseño de relevadores de distancia.

- Programar y desarrollar un relevador de distancia que contenga las características de operación más representativas.
- Evaluar la selectividad y funcionalidad de la protección en base a señales adquiridas en tiempo real, mediante la implementación algorítmica en una tarjeta DSP.
- Evaluar y proponer funciones de adaptación para la protección de distancia tolerable al efecto de la impedancia de falla.
- Desarrollar un relevador adaptivo de distancia en base a las funciones propuestas.
- Evaluar la funcionalidad del relevador adaptivo por medio de generación de señales.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente tesis esta estructurada en cinco capítulos y referencias bibliográficas; los contenidos de los capítulos se describen a continuación.

En el Capítulo 1 se presenta el panorama sobre el modelado y funciones de adaptación en relevadores de distancia, se presenta el desarrollo en forma cronológica, la importancia del modelado y los objetivos de la tesis.

En el Capítulo 2 se describen las consideraciones en el diseño de relevadores de distancia, se desarrolla el algoritmo de programación, se implementa la programación y se realizan pruebas funcionales al relevador de distancia.

En el Capítulo 3 se presentan las metodologías de las funciones de adaptación para la tolerancia al efecto reactivo y resistivo de la impedancia de falla, además de la estructura de implementación de las mismas.

En el Capítulo 4 se realizan las pruebas de validación al relevador adaptivo de distancia cuadrilateral.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones de la tesis, las aportaciones fundamentales y las recomendaciones para trabajos futuros en esta área.

CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE RELEVADORES DE DISTANCIA

2.1 INTRODUCCIÓN

La evaluación del desempeño de un relevador de distancia esta en función de su capacidad de detectar fallas dentro de su zona de protección. Los niveles actuales de operación de los sistemas eléctricos de potencia, cercanos a los límites de generación, propician operaciones incorrectas de la protección. Tratando de mejorar la selectividad y funcionalidad de la protección de distancia se han desarrollado características de operación más específicas para estos límites operativos. Características desarrolladas con dos comparadores, las cuales generan entre otras características a las características cuadrilaterales; la utilización de comparadores híbridos para la generación de características elípticas; el uso de comparadores multientradas y la utilización de características convencionales como limitadores de otras características [11].

En este capítulo se presenta la metodología llevada a cabo para la obtención de las características de operación más representativas de los relevadores de distancia. Estas características fueron desarrolladas y evaluadas en el lenguaje de programación de Matlab®; la etapa de implementación algorítmica fue desarrollada en una tarjeta DSP utilizando señales adquiridas en tiempo real. En este mismo capítulo se presentan las pruebas realizadas al relevador de distancia para la validación de la operación de las características programadas.

2.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La función principal de la protección es la de provocar una desconexión automática del elemento del sistema de potencia que ha experimentado una falla o régimen anormal de operación. Uno de estos dispositivos de protección es el relevador; el relevador transforma sus señales eléctricas de entrada, en señales discretas de salida que actúan sobre determinados sistemas controlados. El relevador puede considerarse formado por dos partes integrantes: la parte de medición, que contiene los órganos de medición y la parte lógica.

Los órganos de medición son elementos de primordial importancia en los relevadores de protección de sistemas eléctricos de potencia. Los órganos de medición de los relevadores originan una señal discreta de salida que depende del cumplimiento de determinadas condiciones por las señales eléctricas de entrada. Estos órganos de medición se dividen en tres grupos: los órganos de medición de una señal eléctrica de entrada, órganos de medición con dos señales de entrada y los órganos de medición con tres o más entradas de señales eléctricas.

Dentro del órgano de medición tiene lugar la comparación de las señales; esta comparación puede ser comparación de amplitud, comparación de fase y comparación de frecuencia. De la comparación realizada en el órgano de medición se genera una característica de operación dependiente de las señales eléctricas de entrada.

2.2.1 Señales eléctricas de entrada

Al órgano de medición se le aplican señales eléctricas que en base a una comparación generan una señal discreta de salida; estas señales pueden ser voltaje, corriente, o una función lineal de voltajes y de corrientes.

Para una comparación de amplitud las señales de entrada son la señal de operación generalmente voltaje \bar{E}_1 y la señal de restricción \bar{E}_2 ; bajo condiciones normales de operación E_2 es mayor que \bar{E}_1 evitando la operación del relevador [11]. Para una

comparación de fase las señales de entrada son la señal de operación \vec{E}_1 y la señal polarizante \vec{E}_2 .

Las señales eléctricas de entrada en los órganos de medición varían pero por lo general se manejan dispositivos con 2 o 3 señales de entrada.

2.2.2 Comparador de Amplitud

El comparador de amplitud en un órgano de medición que compara solo las magnitudes de las señales de entrada e ignora su ángulo de fase (ver Fig. 2.1). Se presenta la operación cuando la magnitud de la señal de operación es mayor que la magnitud de la señal de restricción $\vec{E}_1 > \vec{E}_2$.

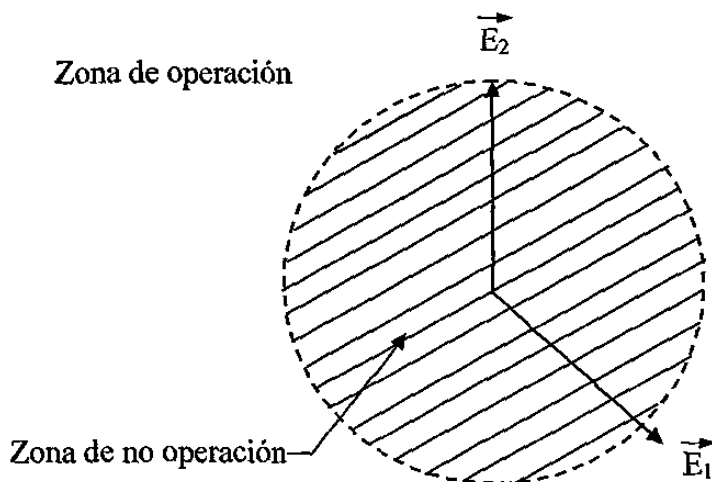


Fig. 2.1. Comparación de amplitud en el órgano de medición.

2.2.3 Comparador de Fase

Este tipo de comparación realizada en los órganos de medición responde únicamente a la relación de fase entre las dos cantidades de entrada \vec{E}_1 señal de operación y \vec{E}_2 señal polarizante sin tomar en cuenta su magnitud (ver Fig. 2.2); para características tanto lineales como circulares se presenta la operación cuando $90^\circ > \varphi > -90^\circ$, en donde φ es el ángulo entre las dos entradas.

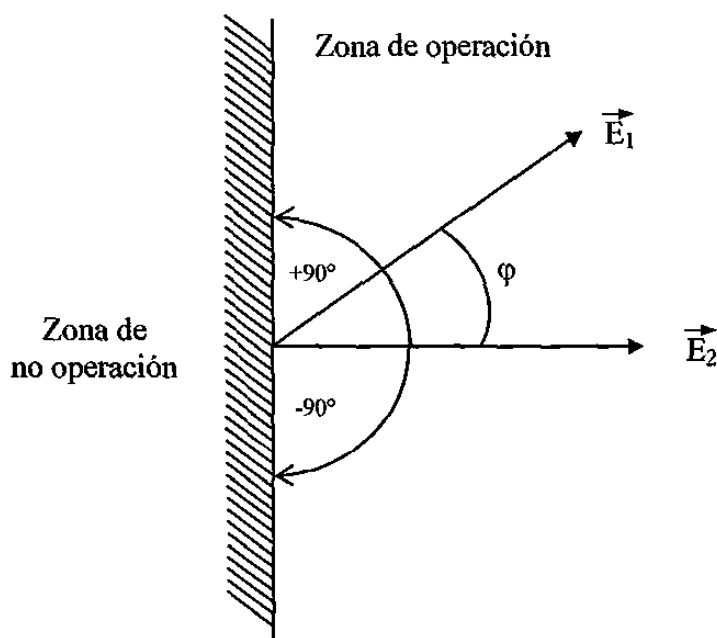


Fig. 2.2. Comparación de fase en el órgano de medición.

2.2.4 Herramientas de Análisis

Como herramienta fundamental del análisis en la protección de distancia se encuentra el uso de los planos de comparación W y de impedancia Z . El plano W es conocido como el plano de diseño del relevador pues en este plano las características no varían para un mismo esquema de comparación y esto facilita su diseño; mientras que en el plano impedancia se maneja la relación V/I presente en todos los órganos de medición y que corresponde a la impedancia vista por el relevador.

- Plano de comparación W

El plano W es un plano de comparación complejo que se forma por la comparación de las señales eléctricas de entrada al órgano de medición $\overline{W} = \overline{E_1} / \overline{E_2}$ (ver Fig. 2.3). Para una comparación de amplitud con dos señales de entrada se genera una circunferencia de radio unitario con centro en el origen de coordenadas como una característica de operación, la zona de operación es la exterior al círculo y la condición de no operación corresponde a la zona interior del mismo.

$$Abs. W = Abs. (\overline{E_1} / \overline{E_2}) = 1 \quad (1.1)$$

$$Arg. W = Arg. (\overline{E_1} / \overline{E_2}) = 90^\circ \quad (1.2)$$

Para una comparación de fase la característica de operación en el plano W esta formada por dos segmentos de recta que parten del origen de coordenadas caracterizadas por las ecuaciones:

$$Arg. W = Arg. (\overline{E_1} / \overline{E_2}) = \varphi_1 \quad (1.3)$$

$$Arg. W = Arg. (\overline{E_1} / \overline{E_2}) = \varphi_2 \quad (1.4)$$

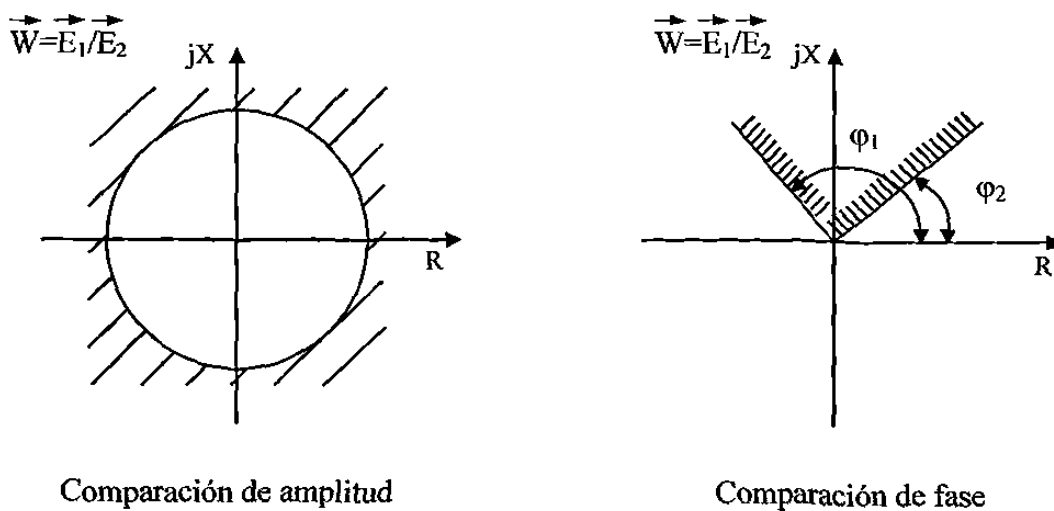


Fig. 2. 3. Características de operación en el plano W .

- Plano de impedancia Z

El comportamiento de muchos órganos de medición de dos señales eléctricas de entrada depende para valores absolutos suficientemente grandes de esas señales, de la relación compleja por cociente de las mismas $\bar{Z} = \bar{V} / \bar{I} = Ze^{j\varphi}$ (ver Fig. 2.4), por lo que se representa en el plano impedancia Z .

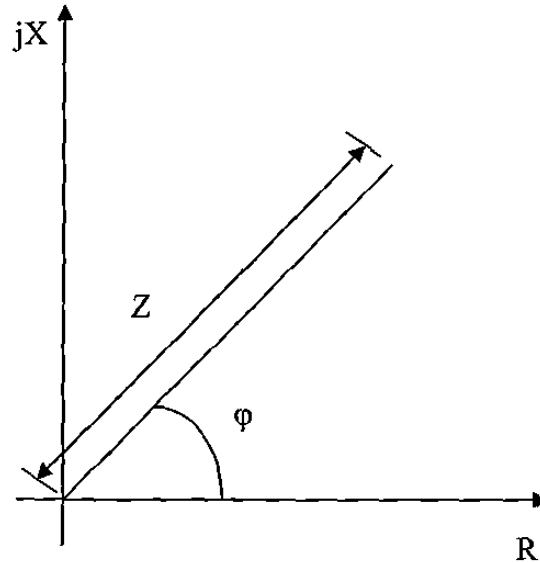


Fig. 2.4. Representación de $Z = \bar{V} / \bar{I} = Ze^{j\varphi}$.

En un órgano de medición de dos señales de entrada al esquema de comparación se aplican las señales \bar{E}_1 y \bar{E}_2 que dependen linealmente de las señales de entrada al órgano \bar{V} e \bar{I} de acuerdo a las expresiones siguientes:

$$\bar{E}_1 = \bar{K}_1 \bar{V} + \bar{K}_2 \bar{I} \quad (1.5)$$

$$\bar{E}_2 = \bar{K}_3 \bar{V} + \bar{K}_4 \bar{I} \quad (1.6)$$

en donde $\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3, \bar{K}_4$ son coeficientes constantes complejos.

La obtención de las magnitudes \bar{E}_1 y \bar{E}_2 a partir de \bar{V} e \bar{I} constituyen una transformación de señales de naturaleza continua o discreta y se efectúa en los esquemas de

medición del órgano. Las magnitudes obtenidas se representan por \overline{E}_1 y \overline{E}_2 ya que por lo general son voltajes, sin embargo también pueden ser corrientes.

La relación $W = E_1/E_2$ depende de la relación $\overline{Z} = \overline{V}/I$, esto se puede ver en la expresión:

$$\overline{W} = \frac{\overline{E}_1}{\overline{E}_2} = \frac{(\overline{K}_1\overline{V} + \overline{K}_2\overline{I})}{(\overline{K}_3\overline{V} + \overline{K}_4\overline{I})} = \frac{(\overline{K}_1\overline{Z} + \overline{K}_2)}{(\overline{K}_3\overline{Z} + \overline{K}_4)} \quad (1.7)$$

despejando Z :

$$\overline{Z} = \frac{(\overline{K}_4\overline{W} - \overline{K}_2)}{(\overline{K}_1 - \overline{K}_3\overline{W})} \quad (1.8)$$

por lo que a cada valor de W le corresponde un valor totalmente definido de Z . Las características de operación en los planos Z y W no coinciden debido a que se comparan las magnitudes \overline{E}_1 y \overline{E}_2 . La función de transformación del esquema de comparación esta determinada solamente por la característica en el plano W , al ser invariable el esquema de comparación es también invariable la característica en el plano W , debido a esto el plano W es conocido como el plano de diseño del relevador.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN

La característica de operación es el elemento que diferencia a cada uno de los relevadores de distancia y es lo que define el alcance de la protección. En el algoritmo desarrollado del relevador de distancia se pueden obtener las características de operación más representativas y usadas en la protección de distancia, estas características pueden ser obtenidas mediante una comparación de amplitud o de fase de las señales de entrada.

Para su obtención se desarrolló el siguiente algoritmo de programación (ver Fig. 2.5) el cual consta básicamente de la selección de la característica de operación y

sus ajustes para posteriormente diseñar la característica de operación en el plano W y finalmente realizar una transformación al plano impedancia.

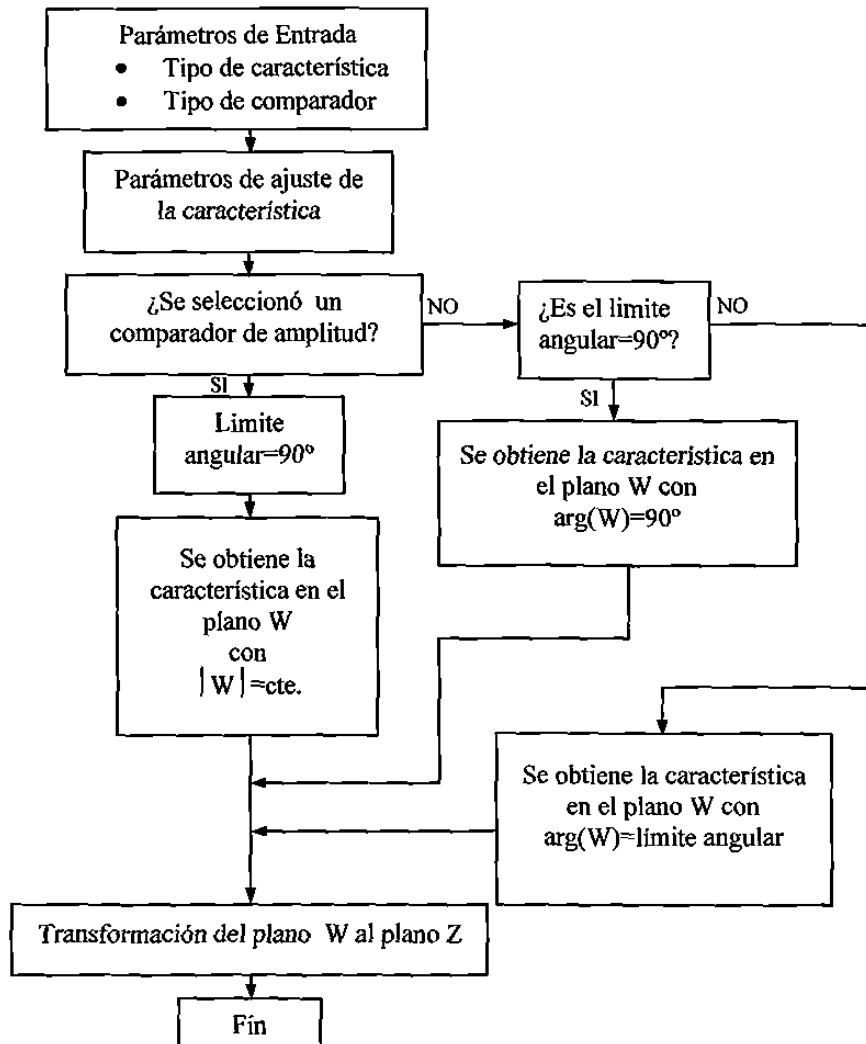


Fig. 2.5. Algoritmo para la obtención de las características de operación.

De cada uno de los órganos de medición y de los tipos de comparación que se realizan sobre las señales de entrada en el modelo matemático del relevador de distancia, se obtuvieron las siguientes características de operación; cada una se presenta tanto en el plano complejo Z como en el plano W (ver Fig. 2. 6).

..... Plano W
 — Plano Z

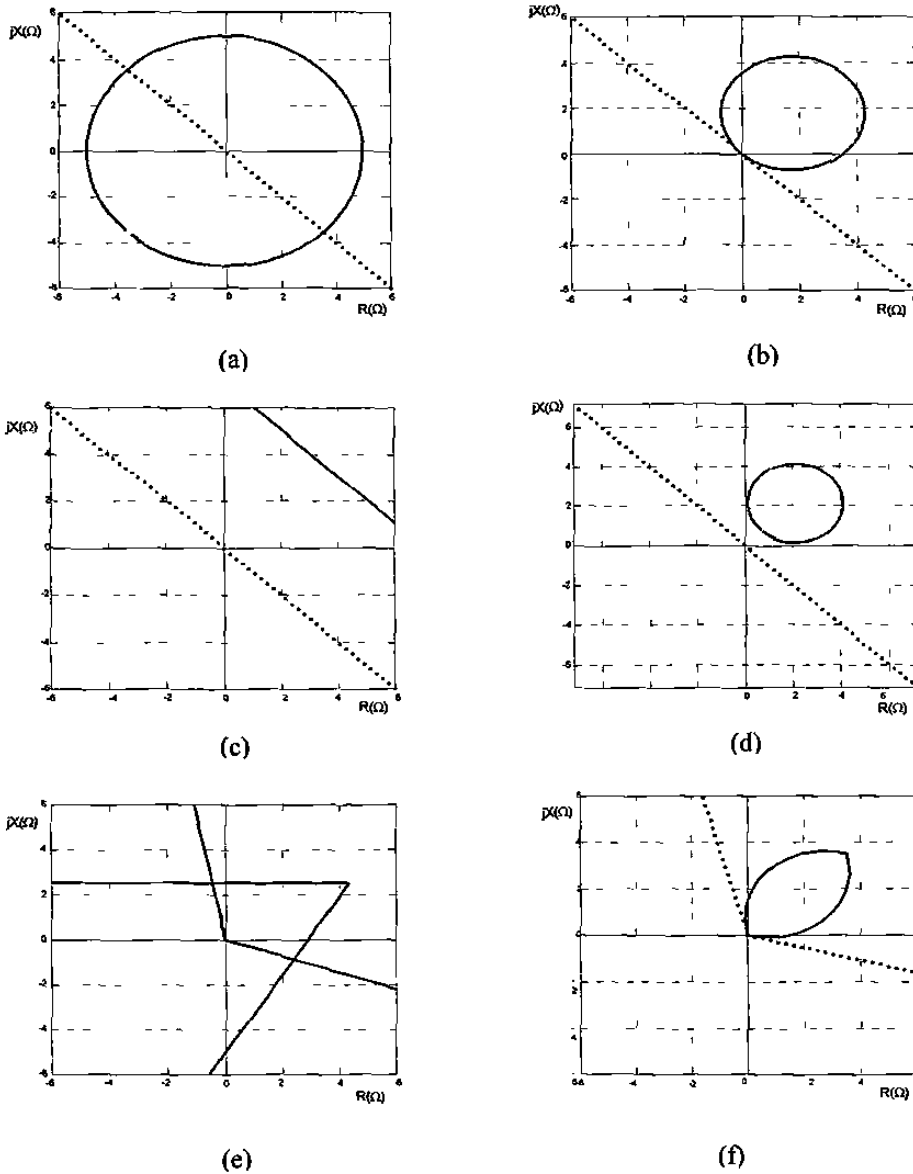


Fig. 2.6. Característica de operación del relevador de distancia:

a) tipo impedancia, b) tipo Mho, c) tipo impedancia ángulo,
 d) tipo mho desplazada, e) tipo cuadrilateral, f) tipo lente.

- Característica tipo impedancia

A partir de esta característica circular se pueden obtener otras características, su impedancia de arranque Z_{ar} es independiente de φ_r y por tanto carece de direccionalidad, la impedancia es inherentemente una comparación de amplitud entre la corriente y el

voltaje, el relevador dispara cuando $|Z| < Z_{ar}$; para una comparación de fase es más complicado porque requiere de la suma y la resta de $(I \cdot Z_{ar} + V)$ y de $(I \cdot Z_{ar} - V)$ si ψ es el ángulo entre las señales de entrada se presenta operación cuando $\pi/2 > \psi > -\pi/2$ (ver Fig. 2. 6a).

- Característica tipo Mho

Dentro de la comparación de fase y a partir de la característica de impedancia haciendo \bar{K}_3 igual a cero se puede obtener esta característica, sus parámetros de ajustes son $Z_{ar \max}$ y φ_{sm} , sus señales de entrada son $(I \cdot Z_{ar} - V)$ y (V) , el relevador opera cuando el ángulo entre estas señales es menor que 90° ; para una comparación de amplitud la señal de operación es $I Z_{ar}$ y la de restricción es $2V - I Z_{ar}$, el relevador opera cuando $2Z - Z_{ar} < Z_{ar}$ (ver Fig. 2.6b).

- Característica tipo impedancia ángulo

Esta característica es una línea recta que no cruza por el origen de coordenadas, la operación ocurre para valores constantes en ohms dado por el fasor de impedancia, esta característica es usada como limitadora de otras características; en una comparación de fase $(I \cdot Z_{ar} - V)$ es polarizada por $(I \cdot Z_{ar})$ y la operación se presenta cuando $90^\circ > \psi > -90^\circ$. En la comparación de amplitud la operación se da cuando $|Z| > |2Z_{ar} - Z|$ (ver Fig. 2.6c).

- Característica tipo Mho desplazada

Se trata de una característica tipo Mho, desplazada positivamente o negativamente por el valor de Z_d y φ_d , para la comparación de fase sus señales de entrada son $(I \cdot Z_{ar} - V)$ polarizada por $(V - I Z_d)$ y la operación se da cuando $(3/2) \cdot \pi > \psi > \pi/2$; para una

comparación de amplitud el relevador dispara cuando $|2Z - Z_{ar} - Z_d| < |Z_{ar} - Z_d|$ (ver Fig. 2.6d).

- Característica tipo cuadrilateral

Se trata de una característica especial, su lado superior forma un ángulo pequeño con el eje real y por tanto es semejante al relevador tipo reactancia en cuanto a la tolerancia a la resistencia de falla, los lados derecho e izquierdo de la característica evitan la operación incorrecta por régimen severo de carga o por oscilaciones de potencia, el lado inferior que tiene cierta inclinación hacia el cuarto cuadrante asegura la direccionalidad. Como una opción de diseño esta característica se forma de la combinación de la característica impedancia ángulo y la característica direccional por lo que su operación requiere de la operación conjunta de ambas características; la operación de la característica direccional en una comparación de fase y se da cuando $90^\circ > (\phi - \theta) > -90^\circ$ en donde ϕ es el ángulo entre V e I y θ es el ángulo de Z_{ar} (ver Fig. 2.6e).

- Característica tipo lente

Se trata de una característica circular con un límite angular menor de 90° , esto mejora la selectividad de la protección ante oscilaciones de potencia y régimen severo de carga, esta característica se puede obtener a partir de la característica tipo impedancia, de la mho o la mho desplazada; la operación estará ahora en función de los nuevos límites angulares $\alpha > \psi > -\alpha$, en donde α es el nuevo límite angular seleccionado (ver Fig. 2.6f).

2.4. ESTRUCTURA FUNCIONAL

En el relevador digital de distancia las entradas eléctricas al órgano de medición son cantidades analógicas alternas de voltaje y corriente (ver Fig. 2.7), por lo que es necesario el filtrado y la conversión A/D para extraer las componentes de frecuencia fundamental y después determinar los fasores de las señales.

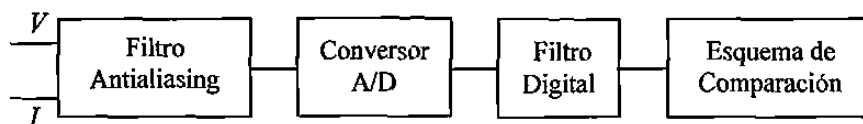


Fig. 2.7. Estructura funcional del relevador de distancia.

La estructura de implantación del relevador virtual de distancia (ver Fig. 2.8) fue evaluada utilizando como señal de prueba el registro de un evento real. Como se mencionó anteriormente, los ajustes del relevador virtual incluyen la modificación del tipo de característica, así como el esquema de comparación que se desea usar.

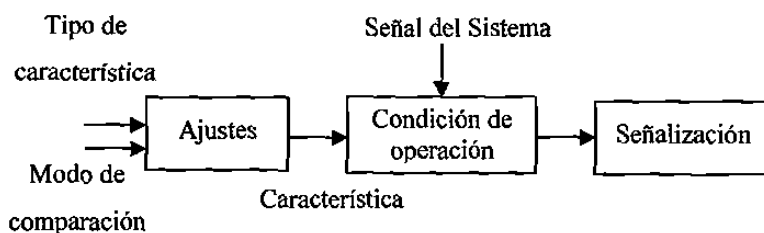


Fig. 2.8. Estructura de implantación del relevador de distancia.

La plataforma gráfica en la que se programó el relevador virtual de distancia es el LabView®, la estructura básica de la pantalla del relevador virtual se divide en cuatro componentes (ver Fig. 2.9), los cuales son:

- Ajustes del relevador, en los que se encuentran todos los parámetros requeridos para la obtención de las características de operación.
- Filtrado, este componente nos permite ajustar el orden del filtro antialiasing y su frecuencia de corte.
- Pantalla y señalización, este componente permite observar la característica de operación así como la impedancia del sistema en la misma gráfica en el plano Z , además de proveer una señal de disparo o de retención.
- Módulo de prueba, este componente permite llamar archivos en formato COMTRADE o archivos en formato txt, para la realización de pruebas de validación.

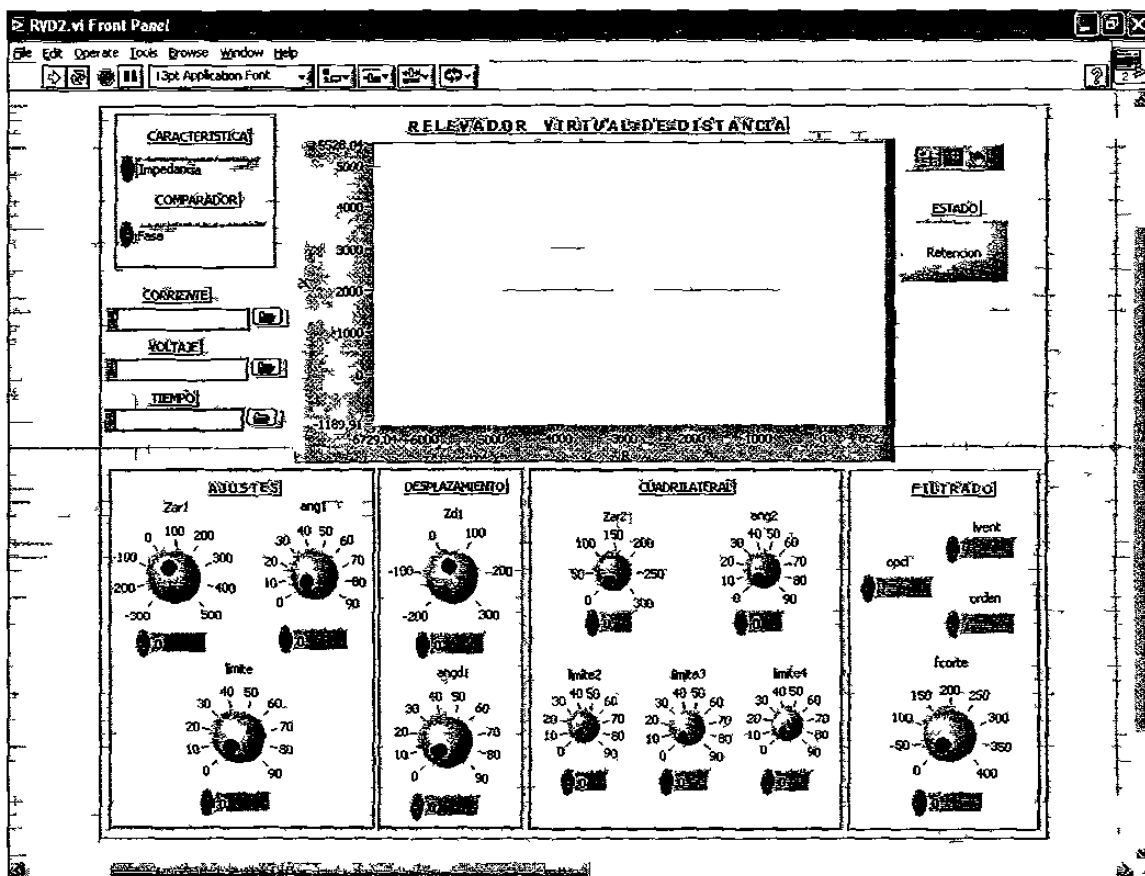


Fig. 2.9. Panel del relevador virtual de distancia.

2.5. SISTEMAS DE PRUEBA Y RESULTADOS DE VALIDACIÓN

A continuación se presentan las pruebas de validación realizadas al relevador de distancia; estas pruebas tienen como objetivo evaluar la correcta funcionalidad y selectividad de las características de operación del relevador, el analizar los diferentes niveles de sensibilidad y las ventajas presentes entre cada una de las características de operación en los tiempos de operación y la detección de fallas.

Del primer sistema de prueba se tiene el registro oscilográfico de un evento real en formato COMTRADE, los registros de voltaje y de corriente se ingresaron al relevador de distancia para realizar su tratamiento digital y posteriormente se evalúa la operación del relevador de distancia ante la operación del relevador 21D de la red eléctrica.

- Sistema I

El sistema eléctrico de prueba se muestra en la Fig. 2.10. Se trata de una línea de 230 kV representada por L_1 , el sistema de protección esta formado por los relevadores A y B, la falla que se presenta en el registro (ver Fig. 2.11) se trata de una falla monofásica en la fase a .

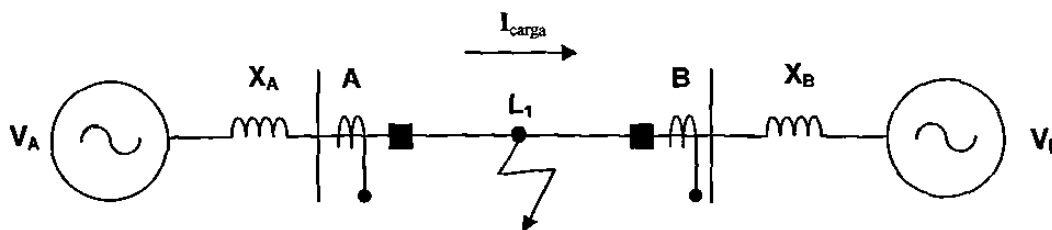


Fig. 2.10. Sistema I para la validación de la operación del relevador de distancia.

Como se puede observar en el registro oscilográfico, la secuencia de operación esta dada por la detección de la falla en el relevador analógico $1 \frac{1}{2}$ ciclo después de que esta se presenta. El relevador digital realiza la detección $4 \frac{1}{2}$ ciclos después de presentarse la falla y 3 ciclos después de que el relevador analógico la detectara, la apertura del polo α se realiza $6 \frac{1}{2}$ después de ocurrida la falla.

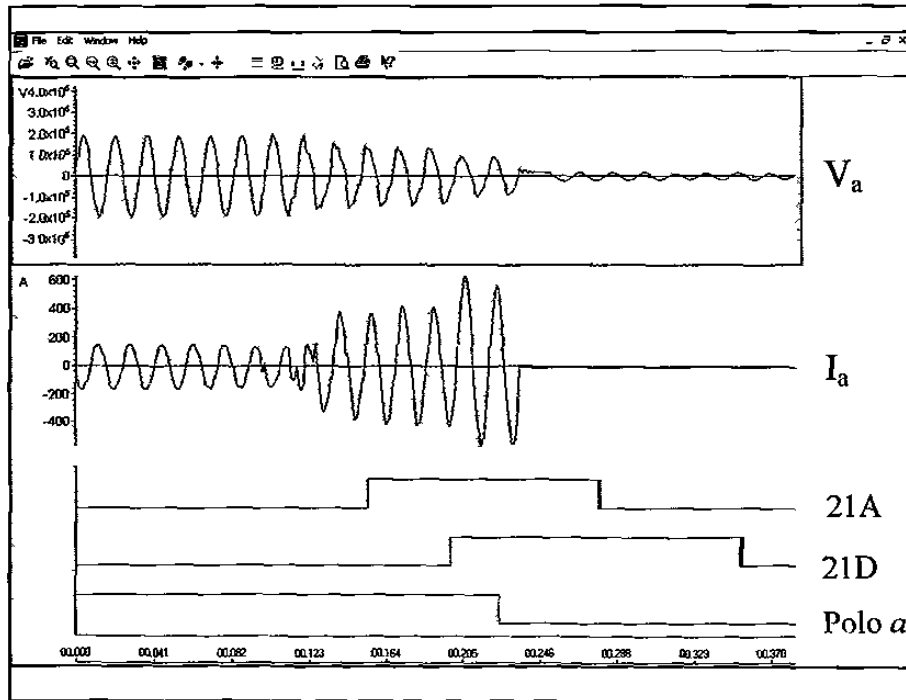


Fig. 2.11. Registro COMTRADE del evento real del sistema I.

La característica de operación seleccionada en el relevador de distancia es del tipo mho, con una impedancia de arranque al 80% de L_1 y de valor igual a $382 \angle 75^\circ \Omega$.

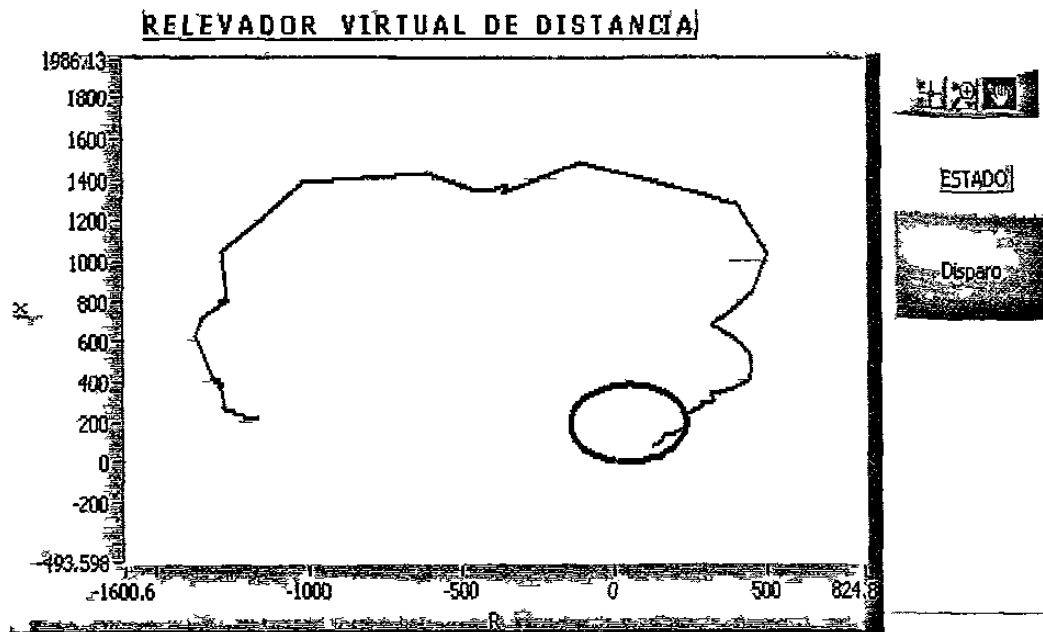


Fig. 2.12. Gráfico del evento visto por la protección B del sistema I.

Del resultado obtenido (ver Fig. 2.12), se pueden realizar las siguientes observaciones:

- El tiempo de operación del relevador de distancia virtual fue similar al relevador del evento real (21D).
- Al igual que en el registro del evento real el relevador virtual B operó viendo el evento atrás esto debido al flujo de potencia entrando al relevador.
- La trayectoria que presenta la impedancia de falla no es una línea recta por el filtrado digital que se realiza sobre las señales eléctricas de entrada, esto aumenta el tiempo de operación en el relevador digital, lo cual se puede también observar en el registro del evento.

Como se mencionó el relevador virtual tiene la flexibilidad de variar la característica de operación, esto nos da un mayor margen de análisis de la respuesta del relevador de distancia para el evento de prueba. Por ejemplo en el tiempo de operación de la protección (ver Fig. 2.13), se definen tres diferentes ajustes de la característica de operación los cuales nos generan tres diferentes tiempos de operación (Tabla A.1).

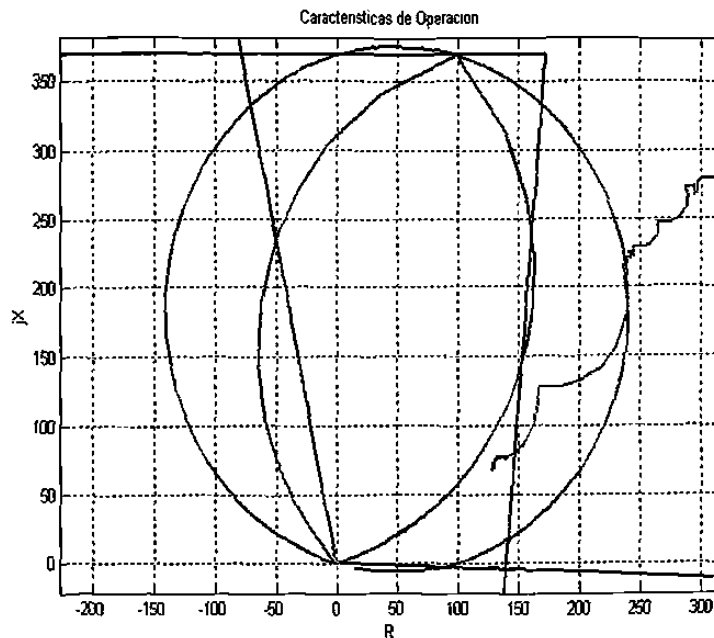


Fig. 2.13. Características de operación para el evento del sistema de prueba I.

Característica de operación	Número de Muestras	Tiempo de Operación (ciclos)
Mho	193	12
Lente	225	(NO OPERO)
Cuadrilateral	208	13

Tabla A.1. Tiempos de operación de los relevadores para el evento del sistema I.

Como se puede notar en la Tabla A.1 la característica cuadrilateral operó 1 ciclo después que la característica original de ajuste, la característica mho. Otro resultado que podemos obtener de variar las características de operación se encuentra al variar el límite angular de la característica mho y obtener la característica lente; de la Tabla A.1 podemos ver que una característica de este tipo con un límite angular de 60° no vio la falla presente en L_1 , por lo que se debe ser cuidadoso al seleccionar el tipo de característica de operación en el relevador de distancia. La variación del límite angular de la característica mho nos permite obtener características menos sensibles a condiciones severas de carga así como a las oscilaciones de potencia.

En este evento en particular en donde el flujo de potencia entra y la impedancia de carga esta hacia atrás del relevador, es posible aumentar el área de la característica cuadrilateral hacia el primer cuadrante sin que se arriesgue la operación ante un régimen de carga severo. Este cambio en la característica (ver Fig. 2.14) representa una reducción sustancial del tiempo de operación de la protección de 1 ciclo sobre el relevador analógico y de 3 ½ ciclos sobre el relevador digital (característica mho).

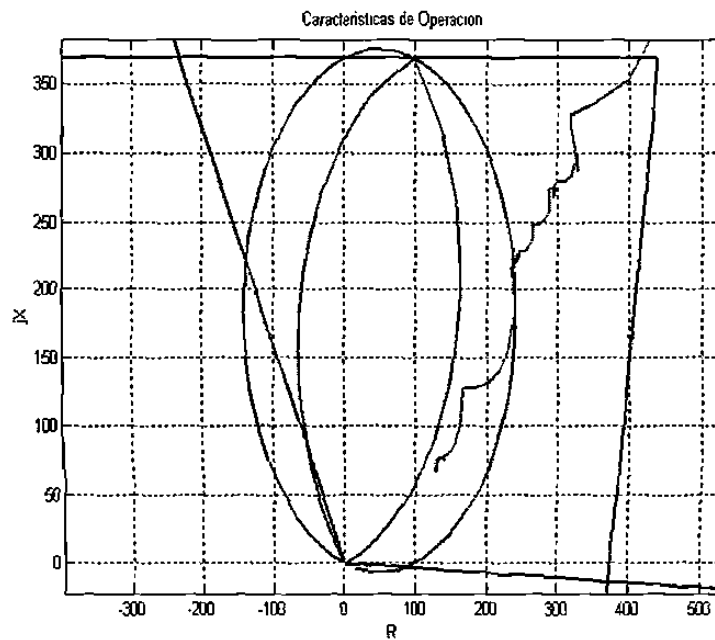


Fig. 2.14. Variante de la característica cuadrilateral para el evento del sistema I.

- Sistema II

El segundo sistema de validación fué un sistema creado en la plataforma computacional PSCAD® en donde se generó el siguiente sistema con las características mostradas en la Fig. 2.15.

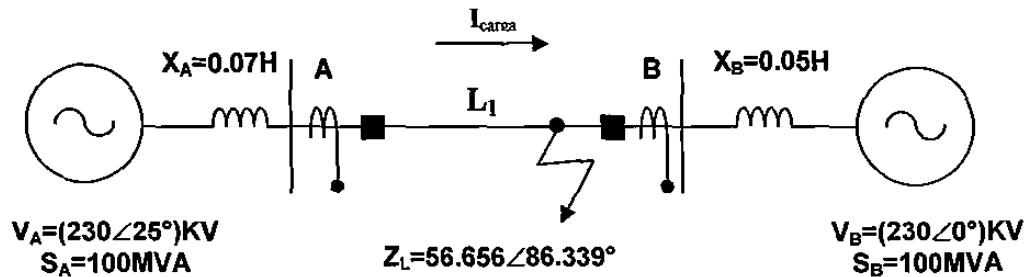


Fig. 2.15. Sistema II para la validación de la operación del relevador de distancia.

Para este evento se provocó una falla monofásica en la fase a por medio de una resistencia de 2Ω al 80% de L_1 (límite de ajuste de la 1ª zona de protección). La falla fue aplicada en $t=0.5\text{seg}$ y se liberó 0.15seg después (ver Fig. 2.16), la frecuencia de muestreo es de 32 muestras/ciclo.

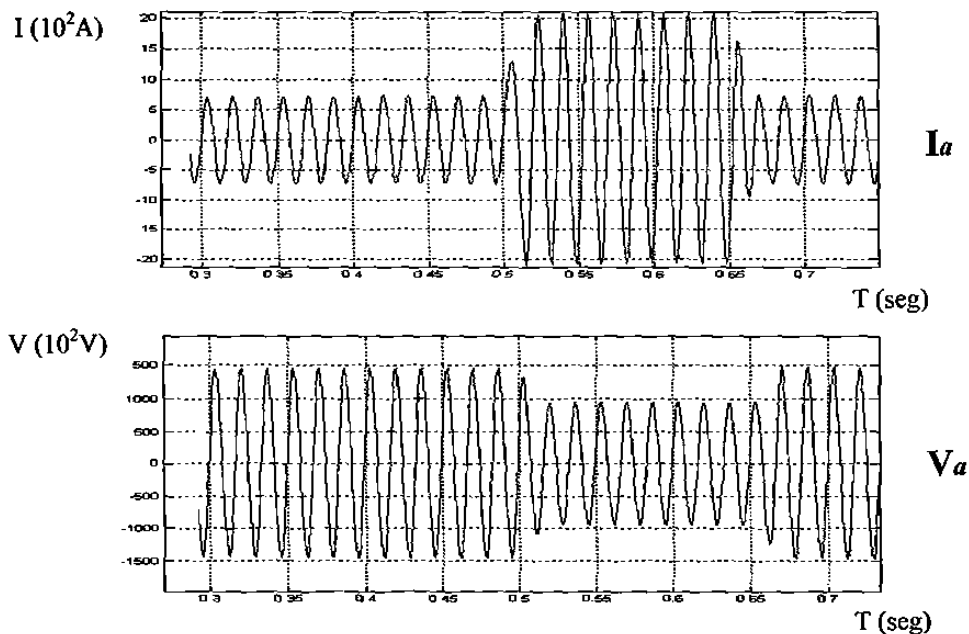


Fig. 2.16. Registro del evento del sistema II.

Para el sistema II se usó una característica tipo Mho ajustada al 80% de L_1 en la protección A. La ventaja de poder usar alguna plataforma computacional para generar los eventos de prueba nos permite tener un gran número de condiciones operativas controladas como: tener ruido en las señales, generar oscilaciones de potencia, variar las condiciones de flujo de potencia, y modificar la carga en el sistema entre otras. Todas estas condiciones son llevadas a la herramienta virtual para verificar la operación del relevador.

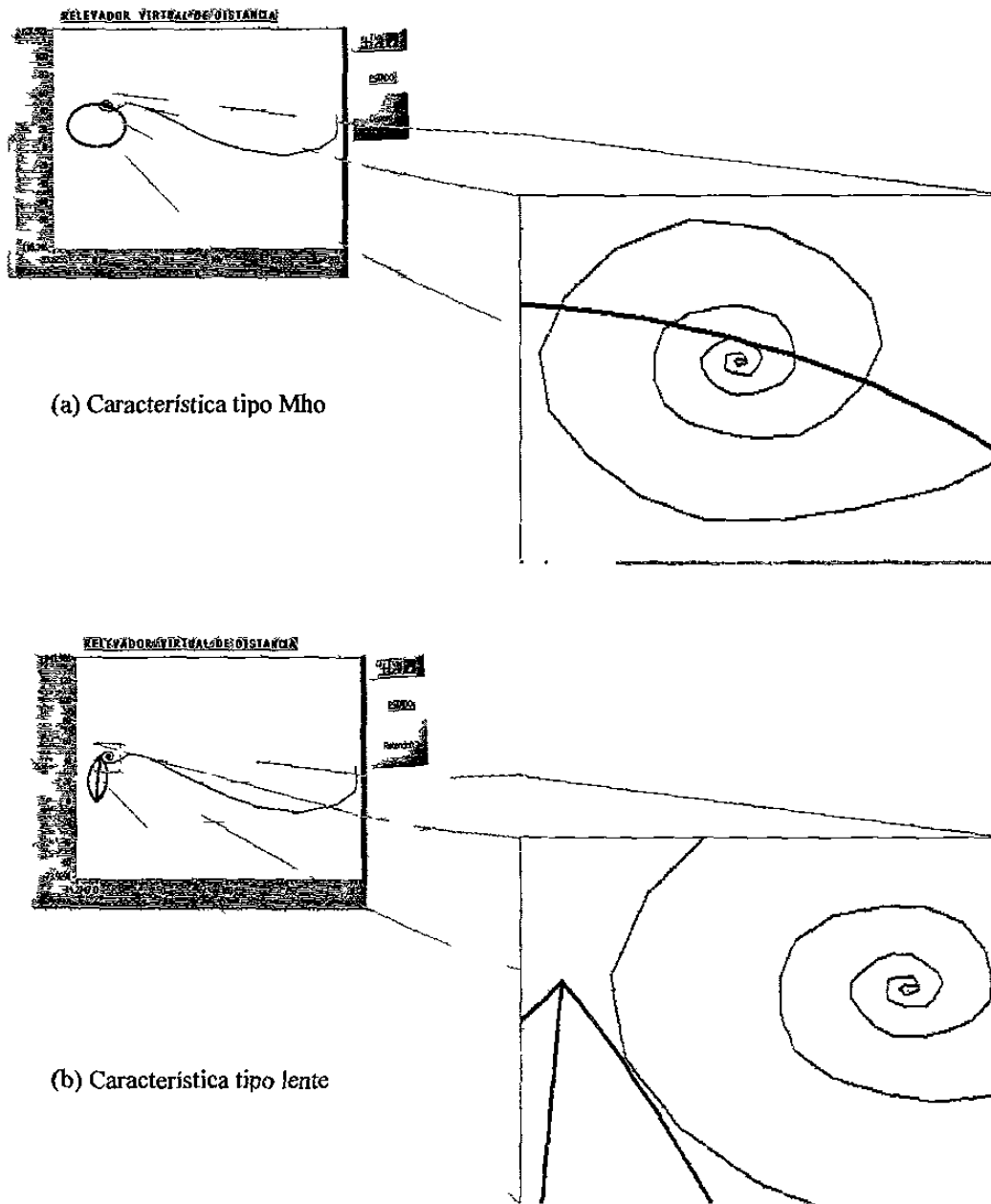


Fig. 2.17. Gráfico del evento del sistema II visto por A.

Dentro de los resultados se presentan los tiempos de operación para la característica Mho, así como para la misma característica mho pero con un límite angular de 35°.

Como en el evento del sistema I, la posibilidad de variar el límite angular de la característica Mho nos genera una característica lente (ver Fig. 2.17). En este evento en particular ese límite es de 35°; un valor angular tan pequeño provoca una pobre selectividad del relevador ante fallas cercanas a la zona de protección, este efecto se ve maximizado en esta prueba por las condiciones de flujo y la presencia de resistencia de falla. La importancia de evaluar los relevadores en condiciones controladas permite generar las condiciones más severas de operación y evitar estos errores en la detección de fallas.

Característica de operación	Número de Muestras	Tiempo de Operación (ciclos)
Mho	217	13 1/2
Lente	300	(NO OPERO)

Tabla A.2. Tiempos de operación de los relevadores para el evento del sistema II.

La variación de los ajustes de la protección en base a las condiciones del sistema nos da un mayor grado de sensibilidad y de selectividad; como se observó en el sistema I al aumentar el área de la característica cuadrilateral en su lado derecho bajo la consideración de que la impedancia de carga se encuentra atrás del relevador nos permitió disminuir el tiempo de operación de la protección. Es por esto que las funciones de adaptación son cada día más usadas y programadas dentro de los sistemas de protección.

2.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El diseño de relevadores de distancia nos permite entender el compromiso que existe en la funcionalidad, selectividad y sensibilidad de cada uno de ellos; en cuanto al diseño de cada una de las características de operación se enfatiza la importancia en el uso del plano W como el plano de diseño del relevador, es en este plano en donde podemos realizar manipulación de las señales de entrada al relevador.

La herramienta de diseño obtenida en el relevador de distancia nos permite desarrollar nuevas características de operación mediante la utilización de comparadores multientradas, estableciendo nuevos limitadores a las zonas de operación, utilizando comparadores híbridos, y variando los límites angulares en la comparación de fase.

El relevador de distancia desarrollado nos permite evaluar condiciones de operación en estado dinámico mediante señales de prueba generadas en otras plataformas, además de la posibilidad de evaluar otros relevadores mediante registros reales en formato comtrade.

La herramienta de análisis desarrollada nos presenta la posibilidad de incorporar funciones de adaptación en base a las condiciones de operación presentes en el sistema de potencia, variando de esta manera la característica de operación del relevador con el objetivo de asegurar una mejor discriminación y detección de fallas.

FUNCIONES DE ADAPTACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se analizó la operación y selectividad de los relevadores de distancia ante fallas presentes tanto en eventos reales como en eventos controlados. El ajuste en un relevador de distancia, el cual es invariable en el tiempo, limita la selectividad que la protección pueda llegar a tener ante diferentes condiciones anormales en el sistema eléctrico de potencia. Las funciones de adaptación en los relevadores toman información en tiempo real de las condiciones del sistema para variar sus ajustes; en este capítulo se analiza y se proponen funciones de adaptación en el relevador de distancia de tierra para reducir el error causado por la reactancia y la resistencia en fallas monofásicas.

3.2 EFECTO DE FALLAS MONOFÁSICAS A TRAVÉS DE RESISTENCIA DE FALLA

Cuando una falla ocurre a tierra a través de una resistencia de valor elevado, como cuando un conductor se colapsa y cae a tierra, el dominio de la impedancia en el circuito de falla es el del camino que existe entre el contacto a tierra y el mismo conductor. La resistencia de la falla a tierra es no lineal porque consiste particularmente de pequeños arcos entre las partículas conductoras y parte de los compuestos como lo son el silicón y el carbón los cuales tienen una resistencia no lineal del tipo $R \propto 1/I_n$ en donde I_n es la corriente nominal.

En un relevador de distancia la medición de la distancia eléctrica hasta la falla se hace determinando la longitud de la sección de línea comprendida entre el punto de ubicación del relevador y el punto de falla. Para ello es necesario calcular la reactancia inductiva o la inductancia de esa sección de línea, pero existen parámetros que afectan la medición de la distancia correcta a la falla [12]; uno de estos parámetros es la resistencia de falla por lo tanto el relevador determina una distancia aparente errónea, resultante de la medición que puede hacer a partir de la información de un solo extremo de la línea protegida.

Dentro de los algoritmos basados en modelos de la forma de onda de las señales de entrada como lo es en el relevador de distancia (sección 2.2) se estiman los fasores de voltaje y de corriente medidos, de donde puede calcularse la impedancia aparente:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_C + jV_S}{I_C + jI_S} = R + jX \quad (3.1)$$

En donde V_C y V_S son las componentes real e imaginaria de voltaje respectivamente e igualmente para la corriente donde I_C e I_S son sus componentes real e imaginaria. Las componentes real e imaginaria de la impedancia aparente son:

$$X = \frac{V_S I_C - V_C I_S}{I_C^2 + I_S^2} \quad (3.2)$$

$$R = \frac{V_S I_S + V_C I_C}{I_C^2 + I_S^2} \quad (3.3)$$

En una línea de transmisión trifásica pueden ocurrir diez tipos de cortocircuitos diferentes, con independencia de su tipo. En base a la estimación fasorial se puede calcular la impedancia de secuencia positiva Z_{L1} de la sección de línea comprendida hasta la falla, aplicando la ecuación apropiada según el tipo de falla.

Como ejemplo se tiene el cortocircuito de la fase a - t para el cual la impedancia de secuencia positiva de la línea se calcula por la siguiente ecuación [12].

$$Z_{L1} = \frac{V_a}{I_a + k_0 I_0 + \sum_{i=1}^n k_{mi} I_{0mi}} \quad (3.4)$$

En donde I_0 es la corriente de secuencia cero de la línea, I_{0mi} representa la corriente de secuencia cero de las líneas adyacentes que tienen acoplamiento magnético mutuo con respecto a la protegida, k_0 y k_{mi} son coeficientes complejos dados por:

$$k_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \quad (3.5)$$

$$k_{mi} = \frac{Z_{0mi}}{Z_{L1}} \quad (3.6)$$

En realidad el cálculo de Z_{L1} a partir de la ecuación no es exacto ya que no considera el efecto de fuente intermedia, ni la impedancia de falla. Esta impedancia incluye el efecto de contribución de corriente a la falla desde el extremo opuesto de la línea protegida. Estos errores en la medición de distancia son clásicos y no pueden evitarse con mediciones en un solo extremo de la línea, para su reducción es necesario incluir en el cálculo información de tiempo real proveniente de otros puntos del sistema, lo que demanda canales de comunicación de gran capacidad que combinado con el efecto aleatorio de la resistencia de falla hace impracticable el beneficio en la aplicación de este método. Lo que generalmente se hace es reducir el efecto de la resistencia de arco mediante una selección adecuada de la forma de la característica del relevador en el plano complejo impedancia. En este capítulo se proponen funciones de adaptación para aminorar el efecto reactivo y resistivo de la impedancia de falla, todo esto partiendo de una característica de operación base la cual se adapta dinámicamente a las condiciones presentes en el sistema para modificar sus ajustes.

3.3 MODIFICACIÓN ADAPTIVA TOLERANTE AL EFECTO REACTIVO DE LA IMPEDANCIA DE FALLA

Esta función de adaptación fue propuesta por Zhan Zhizhe y Chen Deshu [7] y se basa en el cambio dinámico del lado superior de un relevador cuadrilateral en base a la estimación del error en la medición de reactancia debido a la presencia de resistencia de falla, esta adaptación se realiza para evitar el posible sobrealcance o subalcance de la protección en fallas cercanas al límite de la zona de protección.

En el sistema de la Fig. 3.1 la fase *a* de una línea es aterrizada en el punto *Falla* a través de una resistencia R_f la impedancia medida de la fase *a* es:

$$Z_M = \frac{V_a}{I_a + K \cdot I_{0L}} = Z_{L1} + Z_R \quad (3.7)$$

$$Z_M = Z_{L1} + \frac{3 \cdot I_{0F}}{I_a + K \cdot I_{0L}} \cdot R_f \cdot e^{\frac{j \cdot I_{0F}}{I_a + K \cdot I_{0L}}} \quad (3.8)$$

En donde V_a , I_a , I_{0L} , son medibles en BUS-1 y K es dado.

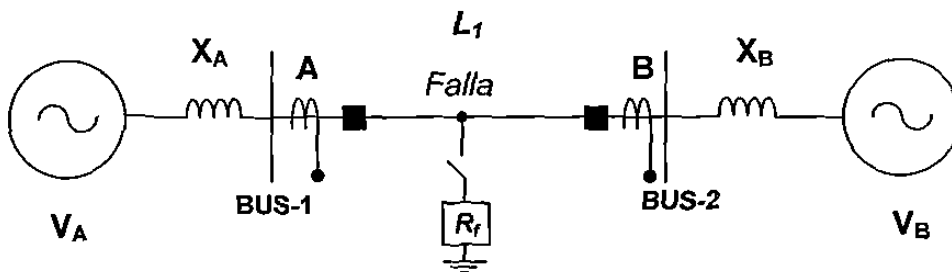


Fig. 3.1. Sistema de estudio de la implementación adaptiva.

En el caso de fallas cercanas al límite de protección A de la línea L_1 , Z_R incrementa su efecto causado por R_f , en este escenario los posibles errores en la protección de distancia son:

- a) Cuando la falla ocurre en la segunda zona de protección y se tiene la corriente de carga saliendo del relevador se produce un error en la medición de reactancia por el efecto de R_f igual a:

$$\text{Error } X_1 = \frac{I_B}{I_A} \cdot R_f \cdot \cos \theta \quad (3.9)$$

Este error es de tipo capacitivo debido a los flujos de corriente causando que el relevador sobrealcance.

- b) En el caso contrario cuando la falla ocurre en la primera zona de protección y se tiene la corriente de carga entrando al relevador se produce un error igual a:

$$\text{Error } X_2 = \frac{I_A}{I_B} \cdot R_f \cdot \cos \theta \quad (3.10)$$

Este error es de tipo inductivo causando que el relevador subalcance.

3.3.1 Formulación Adaptiva

Si el límite de la característica de operación XP del relevador cuadrilateral es girada a través de un ángulo α alrededor del vector punto Z_Y (impedancia de ajuste) como centro, la característica XPRO cambia a X'P'RO [7] como se muestra en la Fig. 3.2.

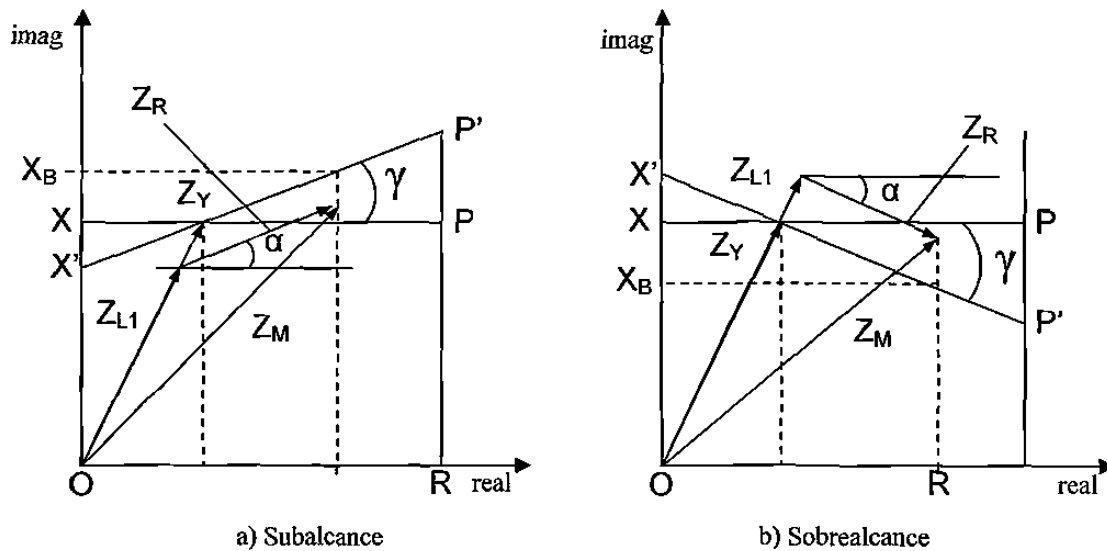


Fig. 3.2. Cambio adaptivo del lado superior de la característica cuadrilateral.

Debido a que I_{0F} no es medible, se utilizara I_{0L} para la compensación en el cálculo de α

$$\alpha = \text{Arg} \frac{I_{0F}}{I_a + K \cdot I_{0L}} \quad (3.11)$$

$$\alpha = \text{Arg} \frac{I_{0L}}{I_a + K \cdot I_{0L}} + \text{Arg}(\theta) \quad (3.12)$$

Donde θ es la diferencia angular de los equivalentes de impedancia de secuencia cero en ambos lados del sistema dividido por el punto *Falla*. θ varía con la locación del

punto de falla en la línea L_I pero al final Z_Y de la zona uno, varia solo pequeñamente bajo diferentes condiciones de operación en el sistema de potencia, por lo tanto puede ser calculado de antemano. Ahora se llamará θ_Y (Ec. 3.14).

Asumiendo:

$$\beta = \text{Arg} \frac{I_{0L}}{I_a + K \cdot I_{0L}} = \alpha - \theta \quad (3.13)$$

$$\gamma = \text{Arg} \frac{I_{0L}}{I_a + K \cdot I_{0L}} + \text{Arg}(\theta) = \beta + \theta_Y \quad (3.14)$$

El valor límite de la característica de operación X_B usado para la comparación con la reactancia de medición puede ser determinada de la siguiente manera:

$$X_B = X_M + (R_M - R_Y) \cdot \tan \gamma \quad (3.15)$$

$$X_M = \frac{V(t_n) \cdot i(t_n - T_1/4) - V(t_n - T_1/4) \cdot i(t_n)}{i^2(t_n) + i^2(t_n - T_1/4)} \quad (3.16)$$

$$R_M = \frac{V(t_n) \cdot i(t_n) + V(t_n - T_1/4) \cdot i(t_n - T_1/4)}{i^2(t_n) + i^2(t_n - T_1/4)} \quad (3.17)$$

En donde $V(t_n)$ e $i(t_n)$ son los valores de voltaje y de corriente en tiempo discreto mientras que $V(t_n - T_1/4)$ e $i(t_n - T_1/4)$ son los valores de voltaje y de corriente un cuarto de ciclo atrás del periodo fundamental T_1 , con esta ventana de muestreo de $1/4$ de ciclo obtenemos de manera aproximada los valores de X_M y de R_M [7].

Para simplificar las operaciones en el cálculo de γ se reemplazará por el cálculo de $\tan \gamma$.

$$\tan \gamma = \frac{\tan \beta + \tan \theta_{\gamma}}{1 - \tan \beta \cdot \tan \theta_{\gamma}} \quad (3.18)$$

Como θ_{γ} es dado $\tan \beta$ puede ser determinado por el siguiente método:

$$\tan \beta = \frac{i_{0L}(t_n) \cdot i_{a0L}(t_n - T_1/4) - i_{0L}(t_n - T_1/4) \cdot i_{a0L}(t_n)}{i_{0L}(t_n) \cdot i_{a0L}(t_n) + i_{0L}(t_n - T_1/4) \cdot i_{a0L}(t_n - T_1/4)} \quad (3.19)$$

Asumir que i_{0L} y i_{a0L} denotan los valores instantáneos de I_{0L} y de $I_a + k \cdot I_{0L}$ respectivamente y T_1 es el periodo fundamental de la corriente.

El cálculo de γ en el estado de falla nos permite de esta manera adaptar el lado superior de la característica cuadrilateral para evitar el sobrealcance o subalcance para fallas cercanas al límite de la zona de protección, esta adaptación se realiza en el estado de falla puesto que en el estado estable no es posible determinar el error en la medición de reactancia pues no se tiene el efecto que produce la R_f como lo tenemos presente en I_{0L} al presentarse el evento.

Como conclusiones del desarrollo algorítmico de esta propuesta de adaptación destacamos los siguientes aspectos:

- El proponer una función de adaptación requiere de una adecuada validación en donde se representen todos los escenarios posibles de error, en esta metodología no se define adecuadamente los alcances y límites de la adaptación, ya que en caso de tener fallas monofásicas en los límites de la zona de protección ante condiciones extremas de transferencia de potencia se presenta una sobrecompensación debido a la adaptación; sin un adecuado acotamiento en los límites de la adaptación se presentan serios problemas de confiabilidad en la protección, por lo que en este

trabajo de tesis definimos claramente los alcances y limitaciones presentes en la adaptación.

- Esta adaptación esta enfocada en el cambio del lado superior de la característica cuadrilateral, pero es necesario mencionar que la formulación de la adaptación [7] no especifica que se debe de tener un amplio compromiso en mantener constantes dos de los cuatro límites angulares presentes en esta característica; si no tenemos presente estos conceptos en el diseño de la característica perdemos totalmente los ajustes iniciales y por tanto los límites de la protección.
- Los criterios presentados en la formulación de la adaptación [7] asumen que errores en la medición de reactancia se encuentran en fallas dentro de un $\pm 3\%$ del limite de la zona de protección, pero existen condiciones presentes en los sistemas eléctricos de potencia los cuales pueden generar una sobrecompensación angular fuera de estos limites.
- En [7] no se especifican los límites de adaptación en las pruebas realizadas para su validación, no se presentan resultados que delimiten los alcances de la adaptación, y la propuesta es desarrollada únicamente en una característica de tipo reactancia.

Como aportación de este trabajo de tesis se diseñó un relevador adaptivo de tipo cuadrilateral tolerante al efecto reactivo de la impedancia de falla, también se desarrolló funciones para la tolerancia al efecto resistivo, la cual se presenta en la siguiente sección. Las pruebas realizadas nos permitirán establecer los límites de la adaptación, presentando de esta manera los alcances de la protección en base a los cambios propuestos, reduciendo el efecto de error que produce la reactancia de falla.

3.3.2 Formulación adaptiva propuesta

A partir de la formulación [7] se propone la siguiente metodología y consideraciones para el diseño del relevador adaptivo de tipo cuadrilateral. Una vez que se obtiene el valor de γ es necesario definir los cambios sobre la característica cuadrilateral original, en el relevador de distancia (sección 2.3) definimos que el relevador cuadrilateral se formaba de la combinación de la característica tipo impedancia ángulo y de la característica cuadrilateral. Como se rota solo el lado superior de la característica sobre un pivote, el cual es la impedancia de ajuste, la modificación sobre la característica cuadrilateral se verá reflejada en la modificación de la característica impedancia ángulo. De la característica cuadrilateral original tenemos los siguientes parámetros (ver Fig. 3.3):

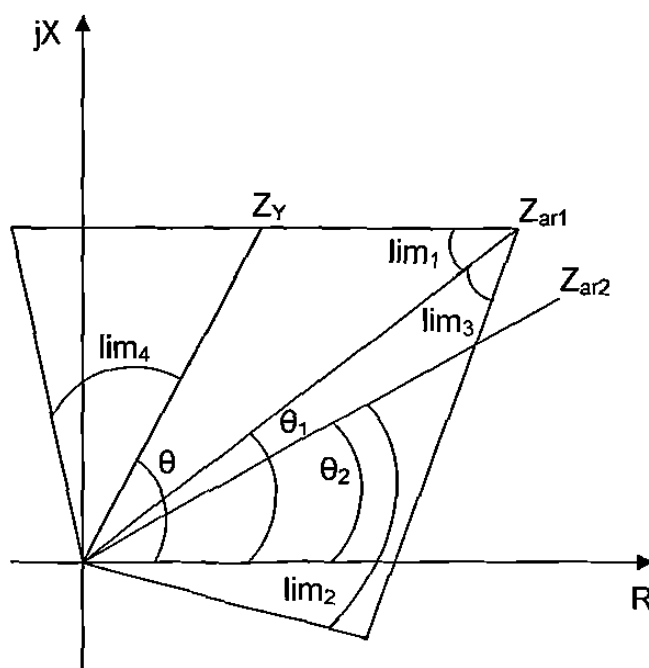


Fig. 3.3. Parámetros de diseño de la característica cuadrilateral.

$$Z_Y = Z_Y \angle \theta \quad (3.20)$$

$$Z_{ar1} = Z_{ar1} \angle \theta_1 \quad (3.21)$$

$$Z_{ar2} = Z_{ar2} \angle \theta_2 \quad (3.22)$$

Como valores constantes tenemos los siguientes:

$$\lim_1 = \theta_1 \quad (3.23)$$

$$\lim_2 = \theta_2 + 2^\circ \quad (3.24)$$

$$\theta_1 = \theta - 10^\circ \quad (3.25)$$

$$\theta_2 = \theta - 15^\circ \quad (3.26)$$

$$Z_{ar2} = Z_{ar1} | + 200 \quad (3.27)$$

Una vez que se tiene el dato de la impedancia de arranque Z_Y se procede a calcular los valores de la impedancia de ajuste de la característica impedancia ángulo Z_{ar1} .

$$Z_{ar1} = Z_{ar1} \angle \theta_1 = X_1 + j \cdot Y_1 \quad (3.28)$$

$$\theta_1 = \theta - 10^\circ \quad (3.29)$$

$$Y_1 = \text{sen } \theta \cdot |Z_Y| \quad (3.30)$$

$$Z_{ar1} = \frac{Y_1}{\text{sen } \theta_1} \quad (3.31)$$

Una vez calculado cada uno de los parámetros es posible construir la característica cuadrilateral en base al parámetro de ajuste Z_Y . En el diseño de la característica cuadrilateral podemos enumerar los siguientes pasos:

- Una vez que conocemos el valor de ajuste Z_Y se obtiene el valor de arranque de la característica impedancia ángulo Z_{ar1} .

- Los valores que definimos constantes son dos de los cuatro límites angulares así como la fase de las características impedancia ángulo y la direccional, para cuestiones de diseño estos valores pueden variar y aumentar el área de la protección en el caso de disminuir la fase de la característica impedancia ángulo, dar mayor direccionalidad a la característica al aumentar el \lim_2 , etc.
- Como parámetros de ajustes además de la impedancia Z_Y tenemos la posibilidad de variar los límites \lim_3 y \lim_4 la variación de estos parámetros es posible pues el diseño de la característica se realiza para una comparación de fase y cada una de las variaciones sobre estos parámetros se ven reflejados en los límites angulares en el plano W .

Una vez obtenida la característica cuadrilateral y el valor del ajuste angular γ realizamos un nuevo cálculo para obtener Z_{ar1} de la característica impedancia ángulo ya rotada sobre la impedancia de ajuste Z_Y (ver Fig.3.4).

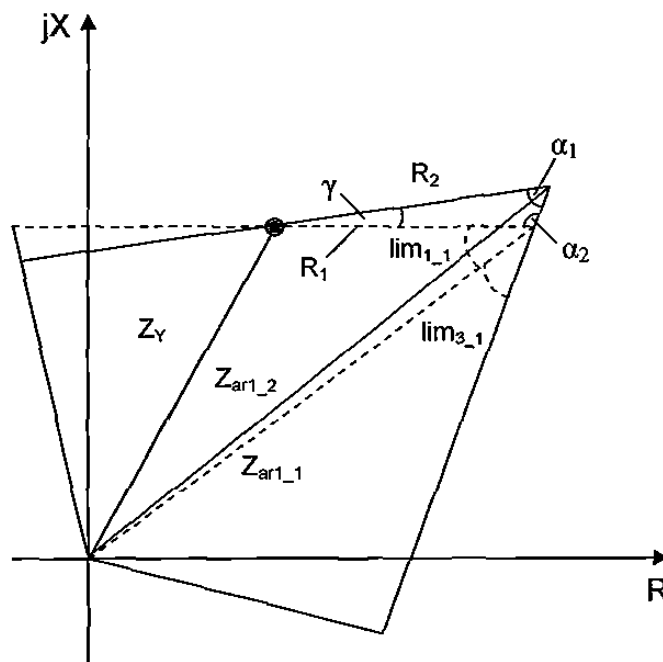


Fig. 3.4. Parámetros de diseño de la característica cuadrilateral adaptada.

$$R_1 = (Z_{ar1} \cdot \cos \theta_1) - (Z_Y \cdot \cos \theta) \quad (3.32)$$

$$\alpha_2 = 180^\circ - \lim_{1_1} - \lim_{3_1} \quad (3.33)$$

$$\alpha_1 = 180^\circ - \gamma - \alpha_2 \quad (3.34)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{\sin \alpha_1} \cdot \sin \alpha_2 \quad (3.35)$$

A partir de estos cálculos obtenemos el nuevo valor de Z_{ar1_2} .

$$\bar{Z}_{ar1_2} = Z_Y + R_2 \angle \gamma \quad (3.36)$$

Y los límites son ajustados.

$$\lim_{1_2} + \lim_{3_2} = \alpha_1 \quad (3.37)$$

$$\lim_{3_2} = \lim_{3_1} \quad (3.38)$$

$$\lim_{1_2} = \alpha_1 - \lim_{3_2} \quad (3.39)$$

Esta adaptación se realiza en estado dinámico por lo que requiere de un detector y clasificador de falla; en [7] se presentan algunas opciones para llevar a cabo estas funciones basadas en la medición de la corriente, en la siguiente sección se propone un detector y clasificador de falla el cual podemos utilizar para esta función de adaptación.

3.4 MODIFICACIÓN ADAPTIVA TOLERANTE AL EFECTO RESISTIVO DE LA IMPEDANCIA DE FALLA

3.4.1 Adaptación en estado dinámico

Otro caso de estudio es cuando se presentan fallas cercanas a la protección A, a partir de la metodología de adaptación propuesta para el lado superior de la característica cuadrilateral se presenta la siguiente adaptación para el lado derecho de la característica. Se propone para detectar fallas con alto valor de resistencia de falla cercanas a la ubicación del relevador. El método consiste en la comparación de X_M contra X_Y para establecer una compensación en base al valor de R_M .

Una vez obtenidos los valores de X_M y de γ se calcula el punto sobre la característica llamado R_{C1} y compensamos la diferencia en el eje real sobre la característica impedancia ángulo.

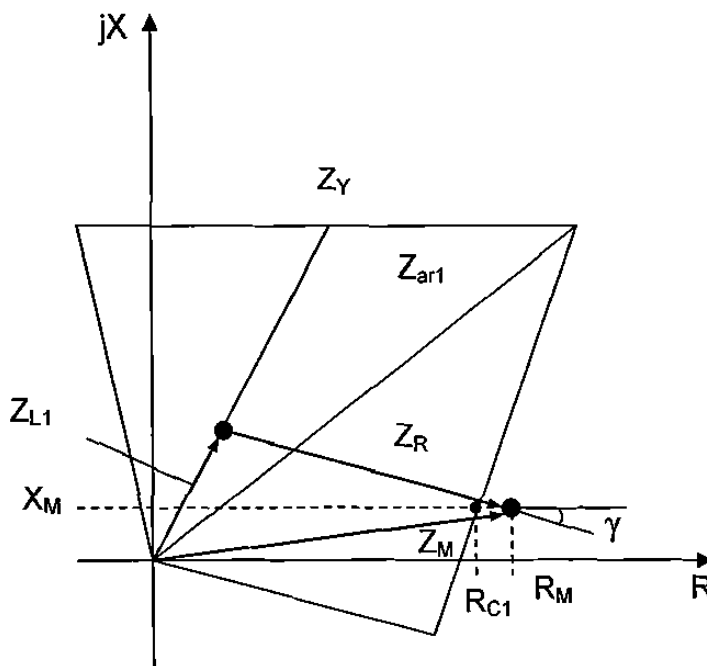


Fig. 3.5. Cambio adaptivo de la característica cuadrilateral tolerante al efecto resistivo.

Del valor medido de Z_M obtenemos sus componentes R_M y X_M , con este último valor y obtenemos el valor sobre el eje real de Z_{C1} .

$$Z_M = Z_{L1} + Z_R \quad (3.40)$$

$$Z_M = R_M + j \cdot X_M \quad (3.41)$$

$$Z_{C1} = R_{C1} + j \cdot X_{C1} \quad (3.42)$$

$$X_M = X_{C1} \quad (3.43)$$

La compensación se realiza sobre la característica impedancia ángulo la cual aumentamos en su parte real de acuerdo a la diferencia entre R_M y R_{C1} .

$$Z_{ar1} = Z_{ar1} \cdot \{[\cos\theta_{ar1} + (R_M - R_{C1})] + j \cdot \text{sen}\theta_{ar1}\} \quad (3.44)$$

Las funciones de adaptación aplicadas en el estado transitorio de falla implican un gran compromiso de funcionalidad en la protección ante errores en la estimación fasorial causados por componente aperiódica, armónicos, etc. La adaptación propuesta (sección 3.3) se realiza en estado dinámico debido a que realizarla en estado estable requeriría de canales de comunicación para obtener información del otro extremo de la línea, principalmente de la corriente en ese extremo y obtener la diferencia angular entre los dos sistema, pero aún con esta información no es posible estimar el error en la medición de la reactancia, ya que es necesario conocer el valor de la resistencia de falla.

3.4.2 Adaptación en estado estable

A continuación se presenta una adaptación en estado estable de la característica de operación cuadrilateral en su lado derecho para reducir el efecto de resistivo de la impedancia de falla.

El método se basa en establecer un área de compensación en base al estado de carga, y se actualizará cada cierto intervalo de tiempo para ajustarse a este nuevo estado y así asegurar la no operación bajo un régimen severo de carga. En la figura 3.6 se presenta la estructura funcional de la adaptación en base al flujo de carga en el sistema.

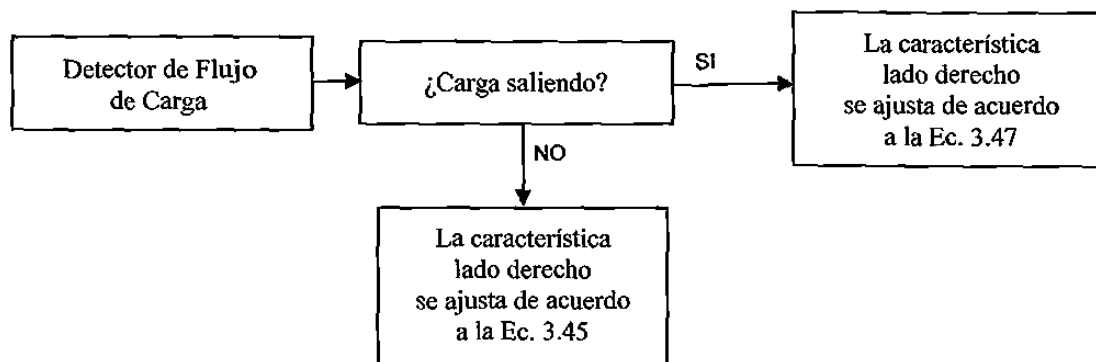


Fig. 3.6. Estructura funcional de la adaptación al efecto resistivo de acuerdo al flujo de carga.

Cuando se tiene la corriente de carga entrando al relevador no hay la desventaja de la operación por sobrecarga, lo que se debe de cuidar al aumentar el área de protección es que esta no opere por oscilaciones de potencia; para esto se propone aumentar el blinder o característica de bloqueo de la misma manera que lo realiza la característica de operación (ver Fig. 3.7). Así,

$$Z_{ar1} = Z_{ar1} \cdot \{[(\cos\theta_{ar1}) + n_{CLD}] + j \cdot \text{sen}\theta_{ar1}\} \quad (3.45)$$

$$n_{CLD} = FC1 \cdot Z_{ar1} \cdot \cos \theta_{ar1} \quad (3.46)$$

en donde FC1 es el Factor de compensación que ajustamos a 0.25 esto debido a que tenemos aproximadamente la característica de bloqueo ante oscilaciones al 0.35 de esa área por lo que al aumentar la característica de operación también aumentamos el área de bloqueo a un nuevo valor de 0.60, todo esto es un aumento del área del blinder hacia el primer cuadrante del plano impedancia en donde no tenemos el problema de que la carga penetre al área del blinder.

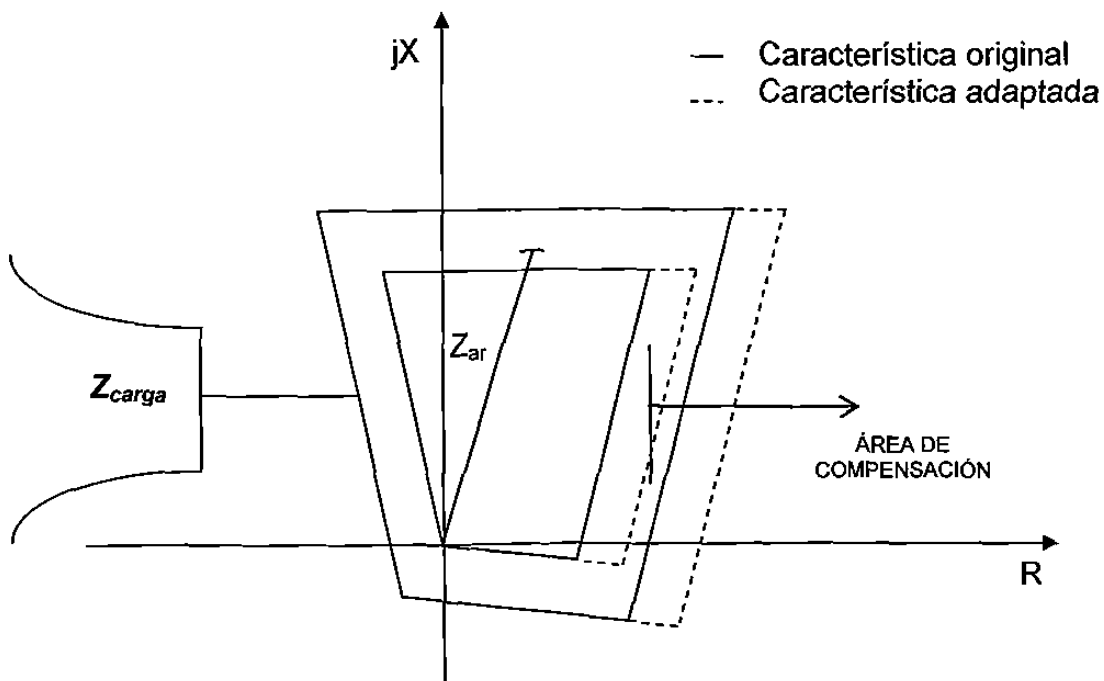


Fig. 3.7. Adaptación de la característica cuadrilateral con impedancia de carga hacia atrás.

En la condición con corriente de carga saliendo, la revisión de la impedancia aparente nos permite adaptar dinámicamente el área de la característica de operación y de esta manera asegurar la no operación del relevador por sobrecarga y dando una mayor sensibilidad ante fallas monofásicas con un alto valor de resistencia de falla; en la Fig. 3.8

se muestra la característica cuadrilateral la cual estamos adaptando, además del blinder el cual se encuentra ajustado al 1.35 de la impedancia de ajuste en la protección. Así,

$$Z_{ar1} = |Z_{ar1}| \cdot \{[(\cos \theta_{ar1}) + n_{CLI}] + j \cdot \text{sen} \theta_{ar1}\} \quad (3.47)$$

$$n_{CLI} = FC2 \cdot (Z_c \cdot \cos \theta_c - Z_{ar1} \cdot \cos \theta_{ar1}) \quad (3.48)$$

en donde FC2 es el Factor de compensación que ajustamos a 0.20 el cual es menor que FC1 pues ahora tenemos la posible operación por sobrecarga y con la presencia del blinder llegamos a ocupar el 55% de esa área, este porcentaje nos permite que la carga no penetre en el blinder.

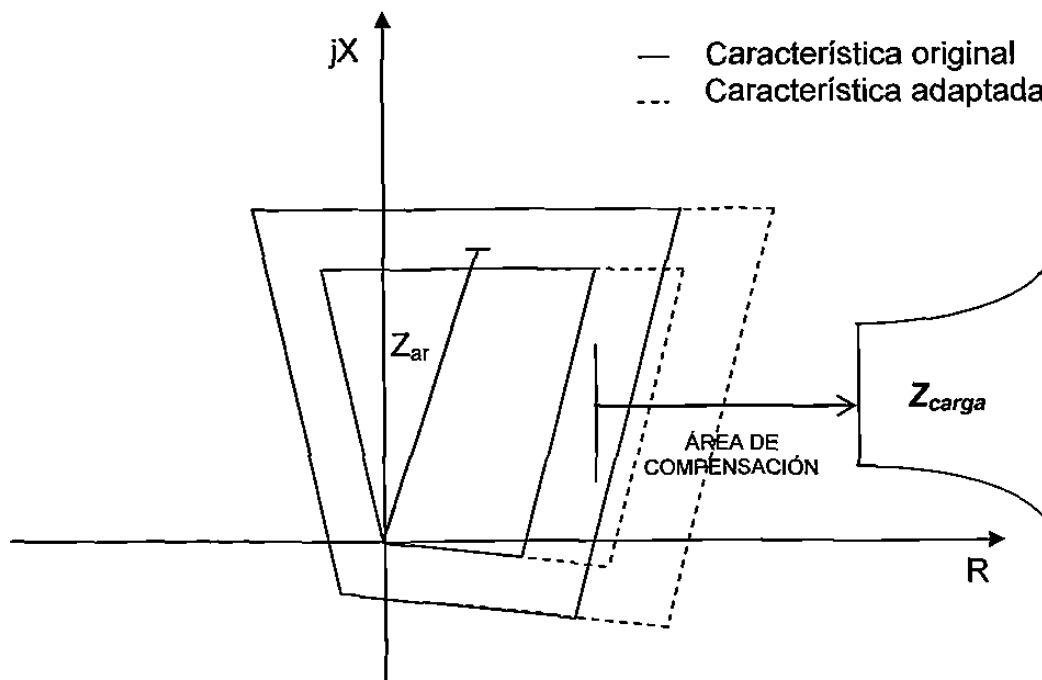


Fig. 3.8. Adaptación de la característica cuadrilateral con impedancia de carga hacia delante.

3.4.3 Efecto en la adaptación ante una transferencia de potencia

Para complementar la adaptación se analiza el problema de una transferencia de potencia la cual no puede ser detectada como una oscilación ni como una falla y produce un cambio instantáneo en la locación de la impedancia aparente vista por el relevador, este cambio puede propiciar una operación de la protección pues se tiene un área mayor en la característica de operación debido a la adaptación, a continuación se propone un método para eliminar este efecto en base a un blinder establecido según la condición de carga. El blinder usado se trata de una característica tipo impedancia con centro en la impedancia de carga, su ajuste esta en función de la dinámica de carga en el sistema; para detectar un cambio en la impedancia aparente la señal de operación se vuelve señal de restricción y la señal de restricción se vuelve señal de operación (ver Fig.3.9).

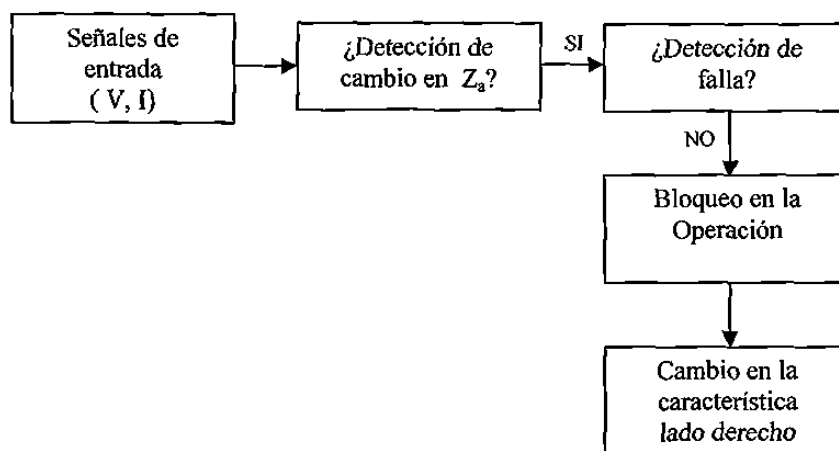


Fig. 3.9. Implementación de la adaptación al efecto resistivo.

Una vez que el blinder ha detectado cambio en la impedancia aparente y que se ha discriminado por medio del clasificador que no es debido a una falla, bloqueamos la operación del relevador hasta que se establece el nuevo punto de impedancia aparente, una vez que se localiza este punto se adapta nuevamente la característica de operación y retiramos el bloqueo en la operación (ver Fig. 3.10).

Debemos de mencionar que en el lapso de tiempo en el cual la operación permanece bloqueada, hasta que se establece el nuevo punto de impedancia aparente, no ponemos en riesgo alguno la funcionalidad del relevador pues tenemos activado el clasificador, el cual retirará el bloqueo del relevador en caso de presentarse una falla en ese lapso de tiempo.

El clasificador se basa en la revisión de las componentes de secuencia de la corriente; de esta manera para una falla monofásica o una falla bifásica tenemos presente la componente de secuencia negativa, en el caso de fallas trifásica tenemos que la componente de secuencia positiva es mayor que la originada por una condición de transferencia de potencia y para fallas a tierra tenemos la componente de secuencia cero.

Todo esto se realiza para asegurar la no operación del relevador ante cualquier evento anormal del SEP que no sea una falla. Como sabemos estas transferencias de potencia están presentes en los SEP por lo que las pruebas de validación demostrarán que el relevador adaptivo no opera ante estos eventos, además la revisión de carga evitará la operación ante una sobrecarga.

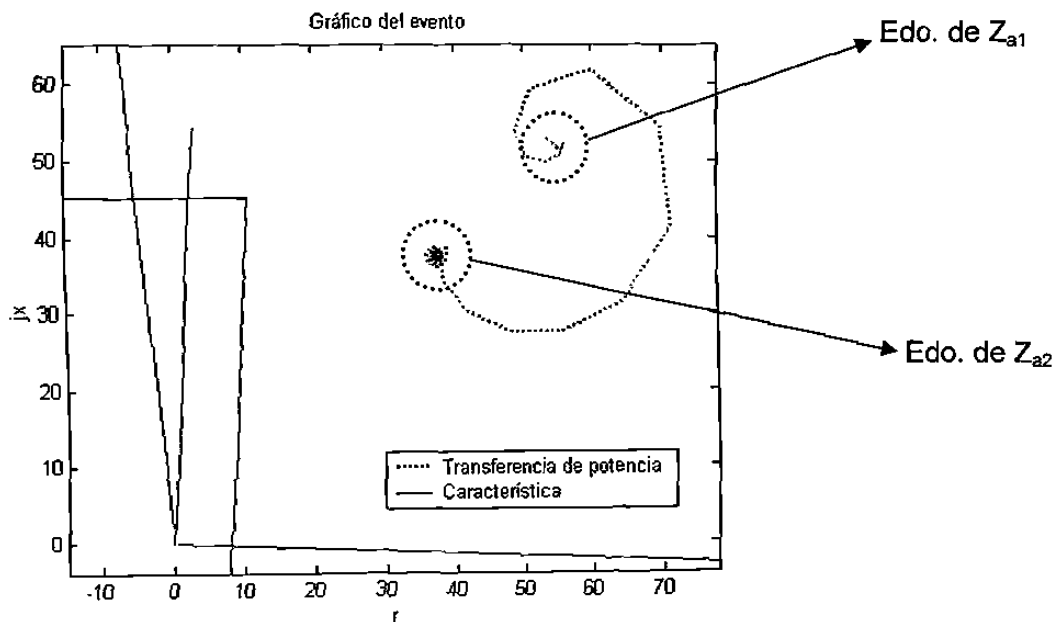


Fig. 3.10. Cambio en la impedancia visto por un relevador cuadrilateral aparente debido a ΔP

3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se analizaron y propusieron funciones de adaptación para reducir los efectos del error que producen la componente tanto reactiva como resistiva de la impedancia de falla.

La primera adaptación propuesta por Zhan Zhizhe y Chen Deshu fue llevada hacia la programación en un relevador con característica cuadrilateral, exponiendo y corrigiendo las limitaciones que presentaba este algoritmo, además se propuso en base a esa misma metodología una adaptación del lado derecho para la tolerancia al efecto resistivo.

Como se expuso, la adaptación para reducir el efecto reactivo se realizó en el estado transitorio de falla con todos los inconvenientes que esta metodología pueda tener; para la reducción del error debido al efecto resistivo se propuso una adaptación en base a la revisión de la carga en el estado estable; en esta metodología de adaptación se analizó la operación de la protección ante condiciones severas de carga, oscilaciones de potencia y cambios en la transferencia de potencia.

PRUEBAS FUNCIONALES

4.1 INTRODUCCIÓN

Como se presentó en el capítulo anterior el desarrollo de funciones de adaptación ayudan a reducir los efectos negativos de las fallas monofásicas a través de un valor elevado de resistencia de falla. En este capítulo se evalúan esas funciones de adaptación para verificar su funcionalidad ante este tipo de fallas, además de comprobar la correcta selectividad del relevador adaptivo ante otros estados de falla.

4.2 PRUEBAS A LA MODIFICACIÓN ADAPTIVA TOLERANTE AL EFECTO REACTIVO DE LA IMPEDANCIA DE FALLA

Las pruebas presentadas en este trabajo de tesis nos permitirán evaluar la dinámica en el alcance del relevador de distancia para fallas monofásicas cercanas al límite de la zona de protección; las pruebas están basadas en el análisis de la protección de una línea con alimentación por ambos extremos, este tipo de configuración es la base de nuestro estudio debido a que en un sistema radial no existe error en la medición de la reactancia de falla (ver Eq. 3.9 y 3.10).

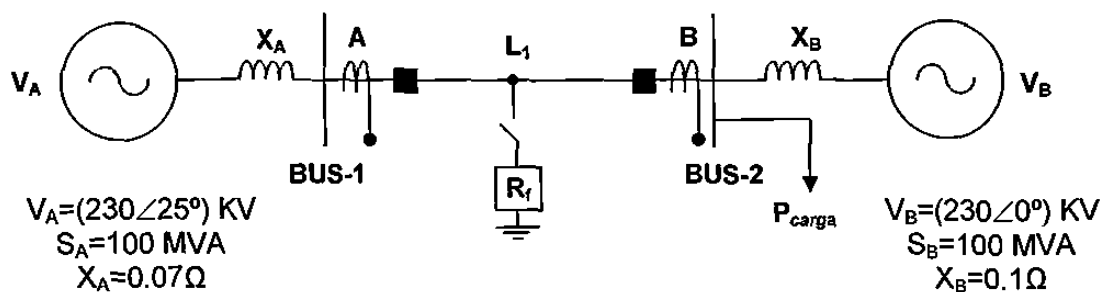
Los parámetros eléctricos de cada uno de los elementos del sistema de prueba serán los siguientes: para el generador se trata del modelo clásico, esto debido a que un modelo más detallado del generador no influye sobre el efecto reactivo y resistivo que produce la

impedancia de falla sobre la protección; los parámetros de la línea son parámetros concentrados, se utilizó el modelo de líneas medias para considerar el efecto capacitivo de las líneas de transmisión. Se presentan resultados de diferentes relaciones entre impedancia de línea e impedancia de generación en donde se puede observar el comportamiento del algoritmo ante la presencia de líneas largas. Para la carga del sistema usamos elementos R-L con un factor de potencia de 0.9 (-). Las señales son obtenidas del sistema de prueba simulado en EMTDC-PSCAD®.

Las señales de prueba del relevador de distancia son acondicionadas mediante un filtro antialiasing Butterworth de cuarto orden para eliminar las componentes de alta frecuencia de las señales, posteriormente se lleva a cabo la conversión analógica-digital para lo cual realizamos un diezmado razón 2 para tener 16 muestras/ciclo. Finalmente concluimos esta etapa de tratamiento de las señales con el filtrado digital de tipo Fourier para obtener los fasores de voltaje y de corriente.

Además de los parámetros de ajuste convencionales el relevador adaptivo nos permite tener dos grados de libertad adicional al momento de ingresar los datos de ajuste, estos corresponden a los límites angulares del lado derecho y del lado izquierdo de la característica de operación.

El objetivo principal de las pruebas presentadas es el de evaluar el efecto sobre el alcance del relevador de distancia convencional y adaptivo debido a la componente reactiva de la impedancia de falla.



Línea L_1 :
 $Z_L = 56.656 \angle 86.339^\circ$

$P_{\text{carga}} = 200 \text{ MW}$

Ajuste de la Protección A:

Al 80% de L_1

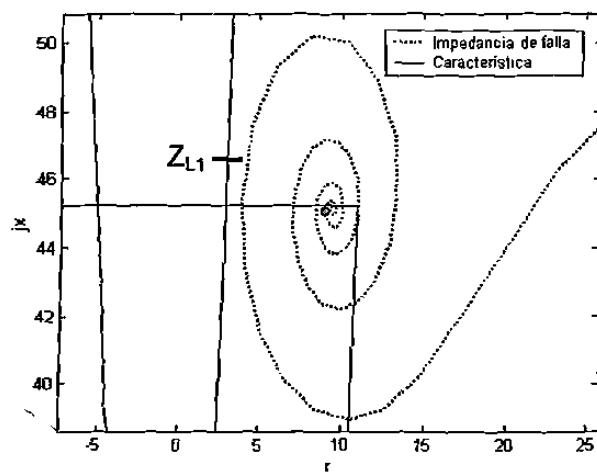
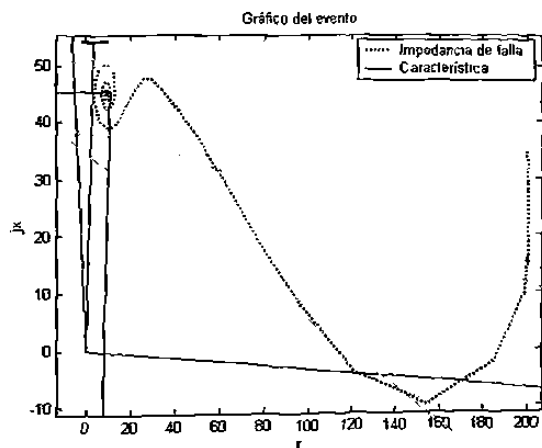
Datos de la Falla:

Falla $1\emptyset$ en A al 83% de LM con $R_f = 2 \Omega$

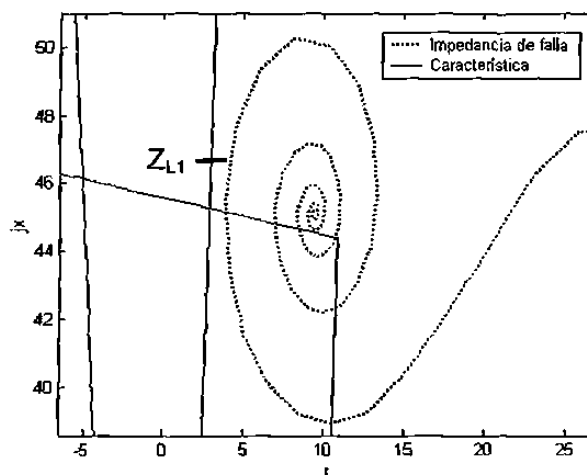
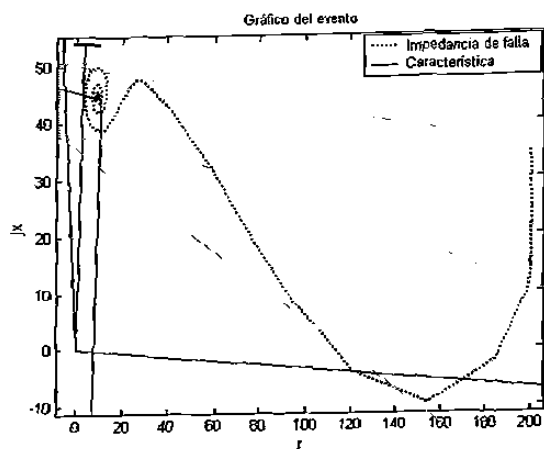
Fig. 4.1 Sistema de prueba-1 para la validación de la adaptación al efecto reactivo.

Del sistema de prueba (ver Fig. 4.1) tenemos que el sentido de la corriente de carga es del BUS-1 al BUS-2; en esta situación si la protección A se ajusta al 80% de L_1 se tendrían problemas de sobrealcance para fallas monofásicas que sobrepasen el 50% de la línea, este problema se agudiza si la falla ocurre en el límite de la zona de protección pues se detectarían fallas monofásicas con un valor de resistencia de falla la cual presenta una reactancia de falla que corresponden a otra zona de operación. En esta prueba la falla fue aplicada al 83% de L_1 correspondiendo a otra zona de protección debido al efecto reactivo de la impedancia de falla, que para el sistema de prueba-1 es de tipo capacitivo, pues la corriente en I_A esta adelantada con respecto a I_B , originando sobrealcance en la protección A.

En la siguiente figura se presentan los resultados de este evento para un relevador sin adaptación y para el relevador adaptivo, para ambos relevadores se implementó un postfiltrado de $\frac{1}{4}$ de ciclo (ver Fig. 4.2).



a) Relevador sin adaptación $T_{op}=0.5193$ seg •



b) Relevador con adaptación $T_{op}=\infty$ seg

Z_{L1} corresponde a la impedancia de falla al 83% de L_1

Fig. 4.2 Resultados gráficos del relevador A en el evento del sistema de prueba-1.

De los resultados gráficos presentados, se observa que el relevador de distancia convencional (ver Fig. 4.2a) opera debido a que el efecto reactivo de la impedancia de falla ocasiona una penetración hacia la característica de operación perdiéndose la selectividad de la protección. En el caso del relevador adaptivo (ver Fig. 4.2b) la falla queda fuera de la zona de protección debido a la adaptación angular y no opera, esto nos permite tener mayor selectividad ante fallas monofásicas.

Como se puede observar en los resultados gráficos, al presentarse una falla monofásica con un valor de 2Ω como resistencia de falla, la componente real de la impedancia medida en falla corresponde a un valor cercano a 10Ω , esto es debido al efecto SIR [12], presente en los SEP's y que para nuestro caso de estudio es el siguiente:

$$Z_M = Z_{1L} + k \cdot R_f \quad (4.1)$$

$$Z_{1L} \text{ al } 83\% \text{ de } L_1 = 3 + 46.9j \quad (4.2)$$

$$Z_L / Z_S = 8.09 \therefore k = 3.6 - 1.1j \quad (4.3)$$

$$Z_M = 3 + 46.9j + [(3.6 - 1.1j) \cdot (2)] = 9.6 + 44.7j \quad (4.4)$$

A continuación se presenta un gráfico (ver Fig. 4.3) en donde se aplicaron diferentes niveles de resistencia de falla, a diferentes relaciones de impedancia de línea e impedancia de fuente, a partir de los cuales se muestra la relación de X_M entre X_B como una medida del alcance de la adaptación; X_M corresponde al valor medido de reactancia por el relevador, mientras que X_B corresponde al valor de reactancia sobre la característica cuadrilateral en su lado superior, este valor se obtiene por medio de R_M . Cuando X_B excede a X_M la relación es menor que 1 y se presenta un sobrealcance, por lo que el valor de 1 en la relación es nuestro umbral entre la correcta operación de la protección y el efecto de sobrealcance causado por la reactancia de la resistencia de falla.

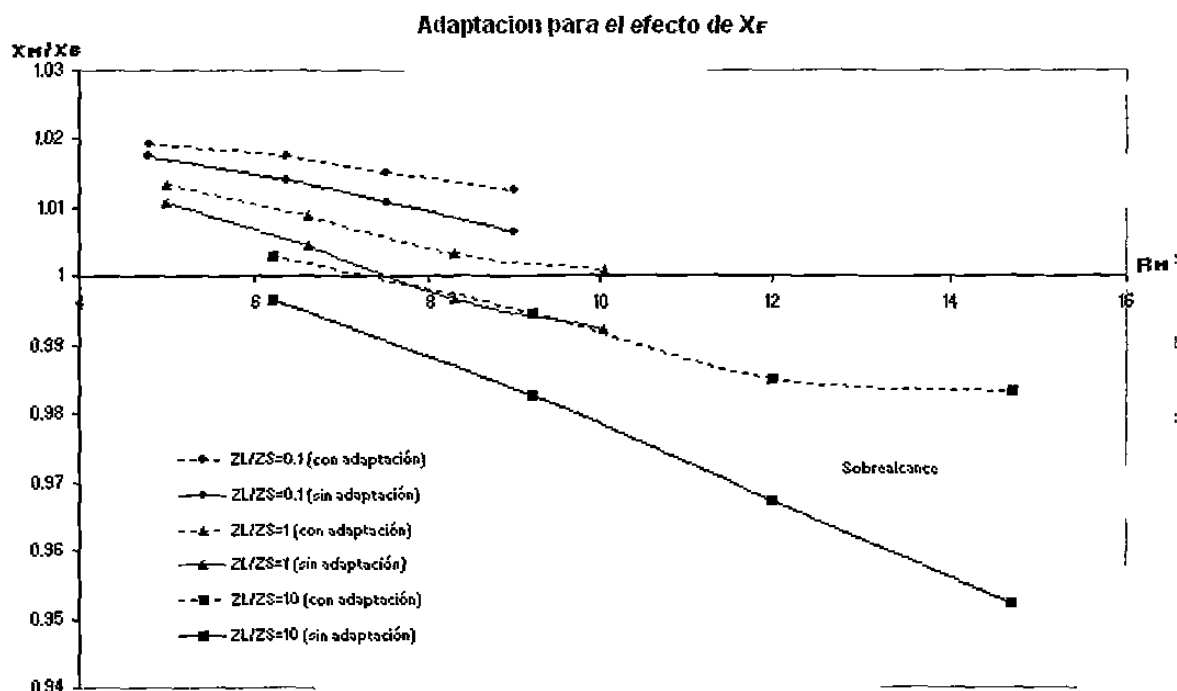


Fig. 4.3 Adaptación para X_f en la protección A con diferentes relaciones de Z_L/Z_S .

Como se observa (ver Fig. 4.3) el relevador adaptivo fue más tolerable al efecto de la reactancia debido a la resistencia de falla; de estas pruebas podemos concluir lo siguiente:

El modelo de adaptación [7] para el efecto reactivo de la resistencia de falla es funcional, pero es necesario el proponer límites de adaptación puesto que podríamos llegar a tener una adaptación mayor a la necesaria. Los límites de la adaptación los logramos definir tomando en cuenta que el error en la reactancia medida es directamente proporcional al valor de R_f y que de acuerdo al SIR para fallas mayores al 80% de la línea tenemos un valor de $k > (2-1j)$ por lo que para valores de líneas reales este error representa alrededor de un $\pm 5\%$ de su longitud. De esta manera ese valor de 5% representa el límite de adaptación.

Es necesario mencionar que de las pruebas realizadas, concluimos que esta adaptación ayuda a reducir el efecto de reactancia causada por la resistencia de falla, pero no en todos los casos elimina el problema de sobrealcance. A continuación se presenta una prueba en donde se varió el límite angular entre los dos generadores a un valor de 45° (ver Fig. 4.4), en este caso en particular la adaptación no evita el sobrealcance, aunque valores tan elevados de diferencia angular entre máquinas pone en riesgo la estabilidad del sistema, por lo que es difícil que la función de adaptación sea operable bajo esta condición de operación extrema.

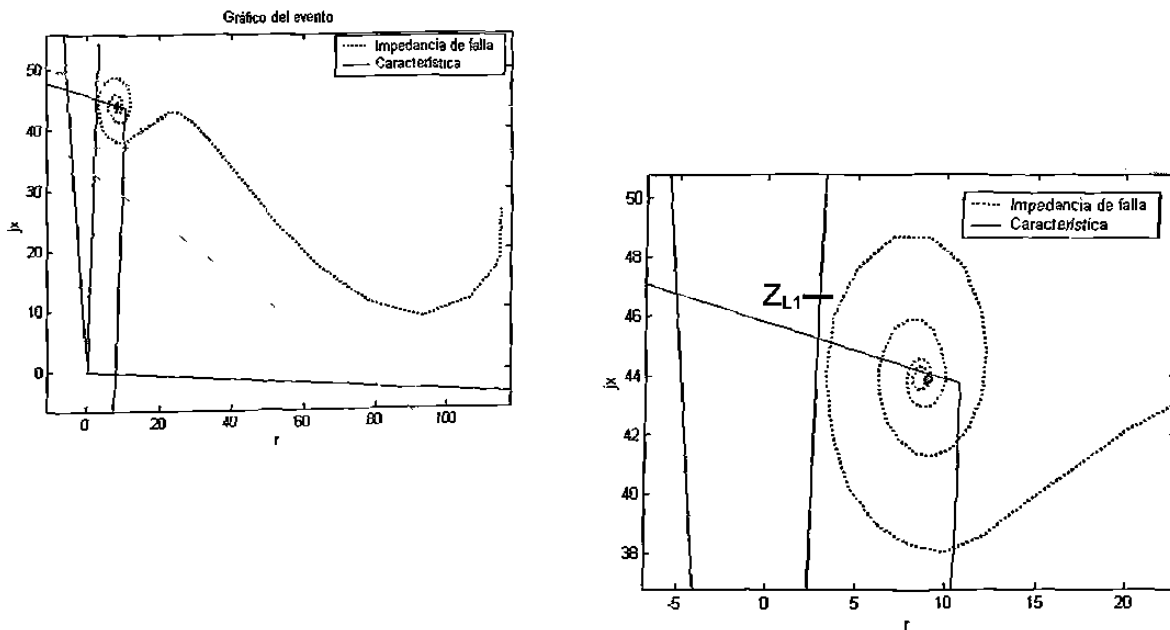
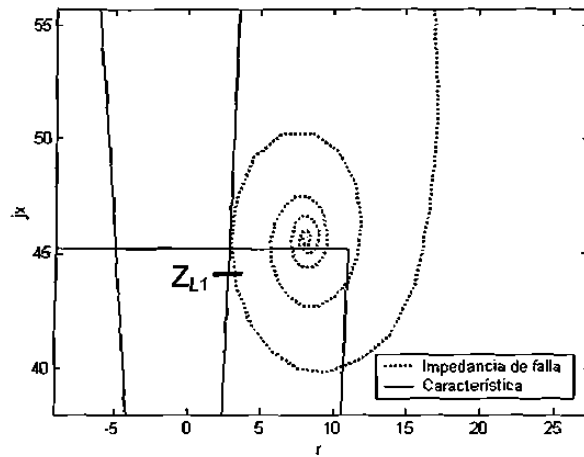
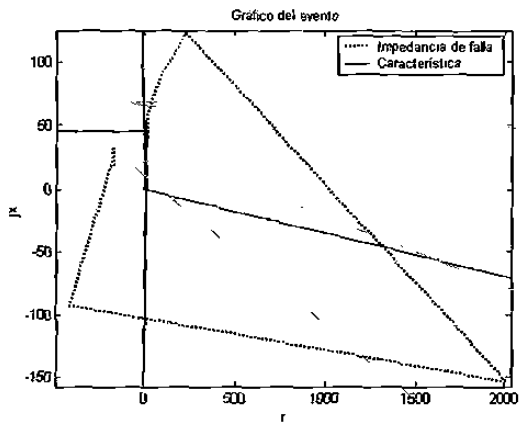
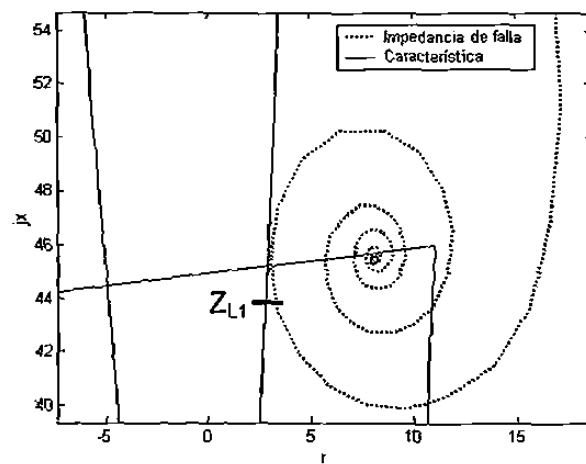
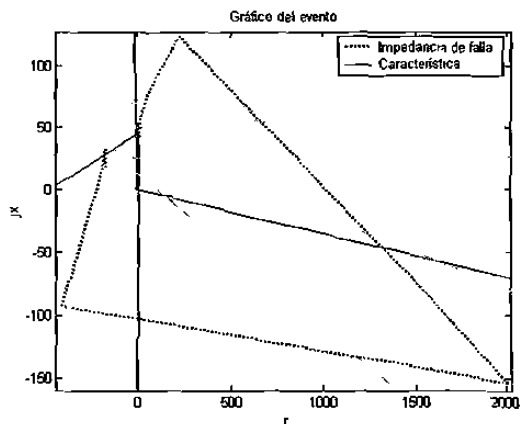


Fig. 4.4 Resultados gráficos del relevador A en el evento del sistema de prueba-1 modificando la diferencia angular entre los generadores a 45° .

Por último concluimos esta serie de pruebas con el análisis de la protección B del sistema propuesto (ver Fig. 4.1), analizar esta protección nos permite evaluar que el método adaptivo es funcional para cuando se tiene un efecto de tipo inductivo causado por la reactancia de la resistencia de falla, para este caso de estudio la falla monofásica se encuentra al 77% del alcance de la protección B.

a) Relevador sin adaptación $T_{op} = \infty$ segb) Relevador con adaptación $T_{op} = 0.5203$ seg

Z_{L1} corresponde a la impedancia de falla al 77% de L_1

Fig. 4.5 Resultados gráficos del relevador B en el evento del sistema de prueba-1.

De los resultados gráficos, se puede observar que el relevador de distancia convencional (ver Fig. 4.5a) no opera, pues el efecto reactivo de la impedancia de falla ocasionó que la falla vista por B quede fuera de la característica de operación perdiéndose la selectividad de la protección. En el caso del relevador adaptivo (ver Fig. 4.5b) la falla quedo dentro de la zona de protección debido a la adaptación angular operando correctamente y manteniendo la selectividad en la protección.

Como conclusiones de las pruebas realizadas tenemos lo siguiente:

- El relevador adaptivo fue más tolerable que el relevador convencional ante fallas monofásicas; logrando con esto una mayor selectividad y funcionalidad en el *relevador adaptivo*.
- El algoritmo de adaptación presentó la misma funcionalidad en la reducción del sobrealcance y subalcance ante fallas monofásicas.
- De las pruebas realizadas con *diferentes relaciones de impedancia de línea e impedancia de generación* se demostró que la adaptación redujo en todos los casos el efecto de sobrealcance.
- Se establecieron y comprobaron límites bien definidos en la adaptación; sin la presencia de estos límites se demostró que se pierde el compromiso de diseño de la característica de operación.

4.3 PRUEBAS A LA MODIFICACIÓN ADAPTIVA TOLERANTE AL EFECTO RESISTIVO DE LA IMPEDANCIA DE FALLA

Como se mencionó en el capítulo anterior otro caso de estudio dentro de la adaptación es el efecto resistivo causado por la resistencia de falla, este efecto causa que las fallas cercanas a la locación del relevador queden fuera de la característica de protección. Este problema se ve agudizado puesto que tenemos una característica de operación cuadrilateral, la cual presenta reducción en su área de protección mientras más se acerca a la locación del relevador.

La correcta operación en esta función de adaptación se encuentra en la funcionalidad presente en el detector, además de la correcta discriminación que realice el identificador de falla y finalmente del bloqueo que se lleva a cabo cuando existe la operación del detector debido a una condición diferente a una falla.

Para evaluar estos componentes del relevador adaptivo se propone el siguiente sistema de prueba (ver Fig. 4.6) el cual consta de dos líneas en paralelo; este sistema nos permitirá evaluar la correcta detección y clasificación entre un estado de falla y una transferencia de potencia.

Como parte inicial de las pruebas realizadas es necesario el definir como se realiza la detección entre el estado de falla y una transferencia de potencia; todo esto se logra en el clasificador del relevador adaptivo por medio del análisis de las componentes de secuencia de la corriente. Al presentarse una transferencia de potencia al igual que en una falla trifásica la componente de secuencia positiva de la corriente es la que nos ayuda a discriminar entre estos dos estados; mientras que para una falla trifásica, este valor es mucho más grande que el que se presenta para una transferencia de potencia, un umbral de 3 veces la corriente de secuencia positiva en el estado estable nos permite hacer una correcta discriminación y detectar fallas con resistencias de hasta 100Ω . Para fallas desbalanceadas del tipo monofásicas o bifásicas la componente de secuencia negativa de la corriente es la que nos ayuda a discriminar entre un estado de falla y una transferencia de

potencia; para una transferencia de potencia, la cual es una condición balanceada, la componente de secuencia negativa es dada únicamente por el desbalance natural del sistema de potencia, por lo que podemos realizar una correcta discriminación si seleccionamos un umbral en la componente de secuencia negativa de la corriente igual a $\frac{1}{4}$ de la corriente de secuencia positiva en estado estable, debido al estudio de estabilidad en el sistema de prueba, condiciones máximas de transferencia de potencia no exceden este umbral.

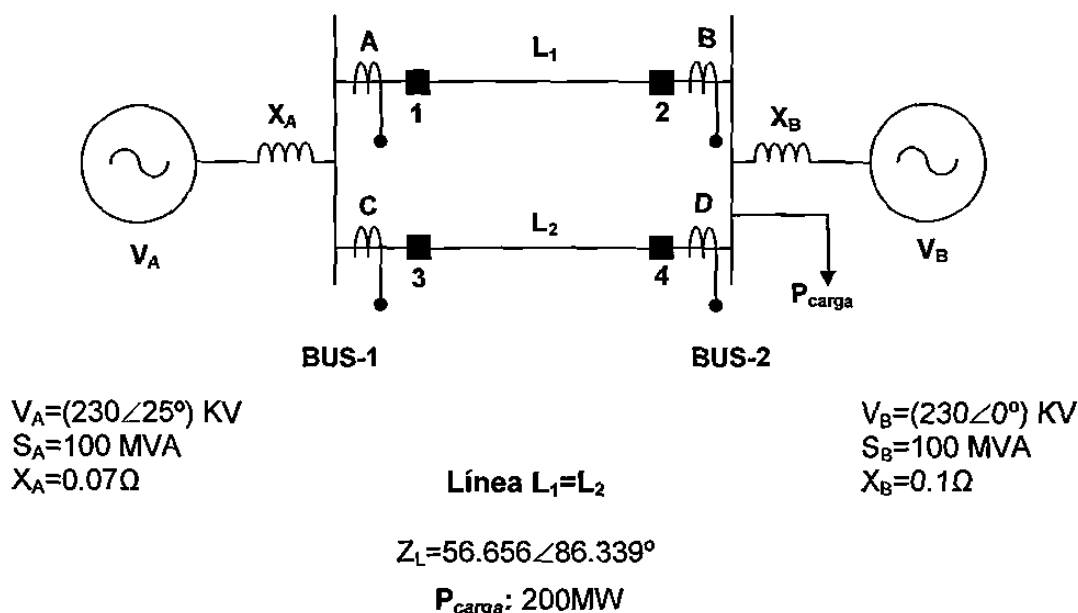
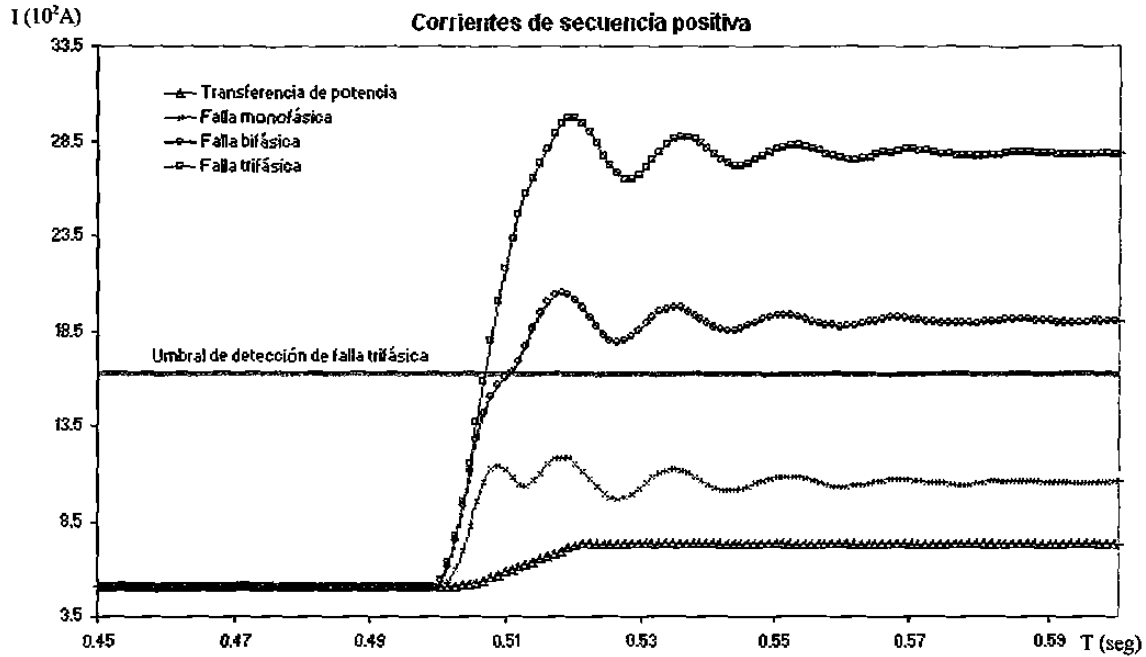


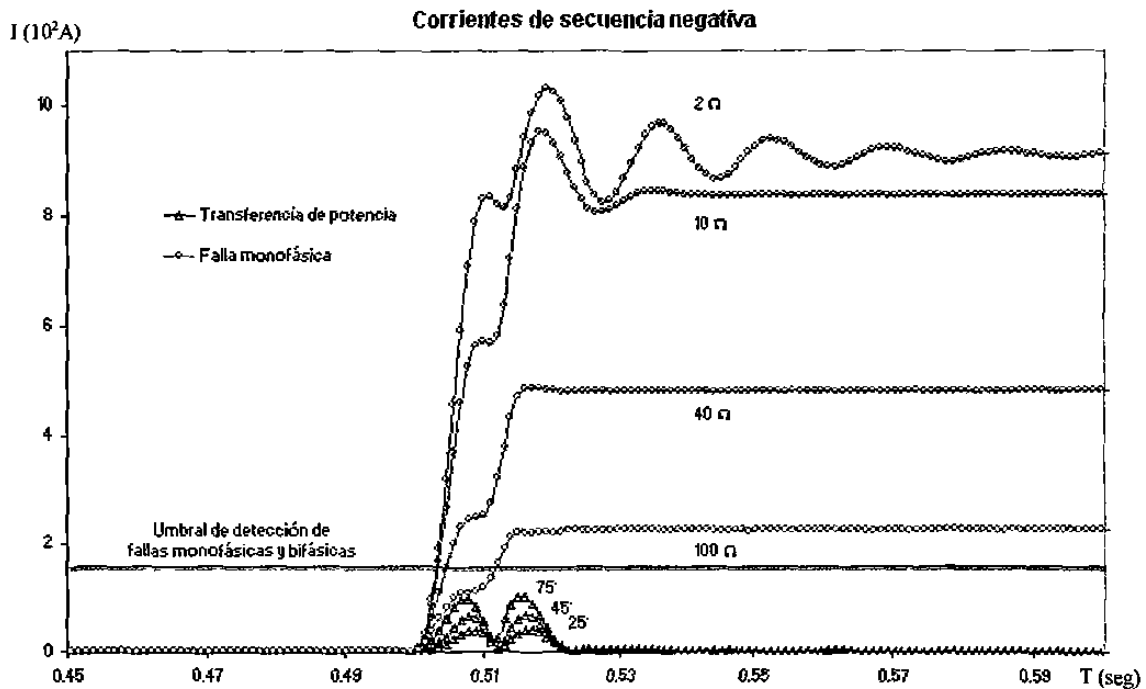
Fig. 4.6 Sistema de prueba-2 para la validación de la adaptación al efecto resistivo.

En la figura 4.7 se presenta los diferentes niveles de corriente de secuencia positiva presentes en la protección A de la línea L_1 en el sistema de prueba 2 ante una transferencia de potencia debido a la desconexión de la línea L_2 por medio de los interruptores 3 y 4, además de fallas monofásica, bifásica y trifásica en L_1 con una resistencia de falla de 2Ω .

El umbral de detección de fallas trifásicas cuenta con el respaldo del umbral de fallas monofásicas pues si este no fuera suficiente para realizar la discriminación el umbral monofásico si lo realizaría; por su parte el umbral de fallas monofásicas es ajustado a un valor mayor a cero para asegurar su correcta operación.



Para complementar estas pruebas de los umbrales de detección aplicamos fallas monofásicas en L_1 con diferentes niveles de impedancia de falla y aumentamos la diferencia angular entre los generadores para incrementar la transferencia de potencia al realizar la desconexión de L_2 .



Como se observa en la figura anterior el umbral seleccionado para el detector de secuencia negativa clasifica adecuadamente las condiciones de cortocircuito y transferencia de potencia.

En la siguiente figura (ver Fig. 4.9) se pueden observar los estados que guardan tanto el detector, como el clasificador y el elemento de bloqueo del relevador adaptivo ante una transferencia de potencia en el sistema de prueba 2 debido a la desconexión de la línea L_2 .

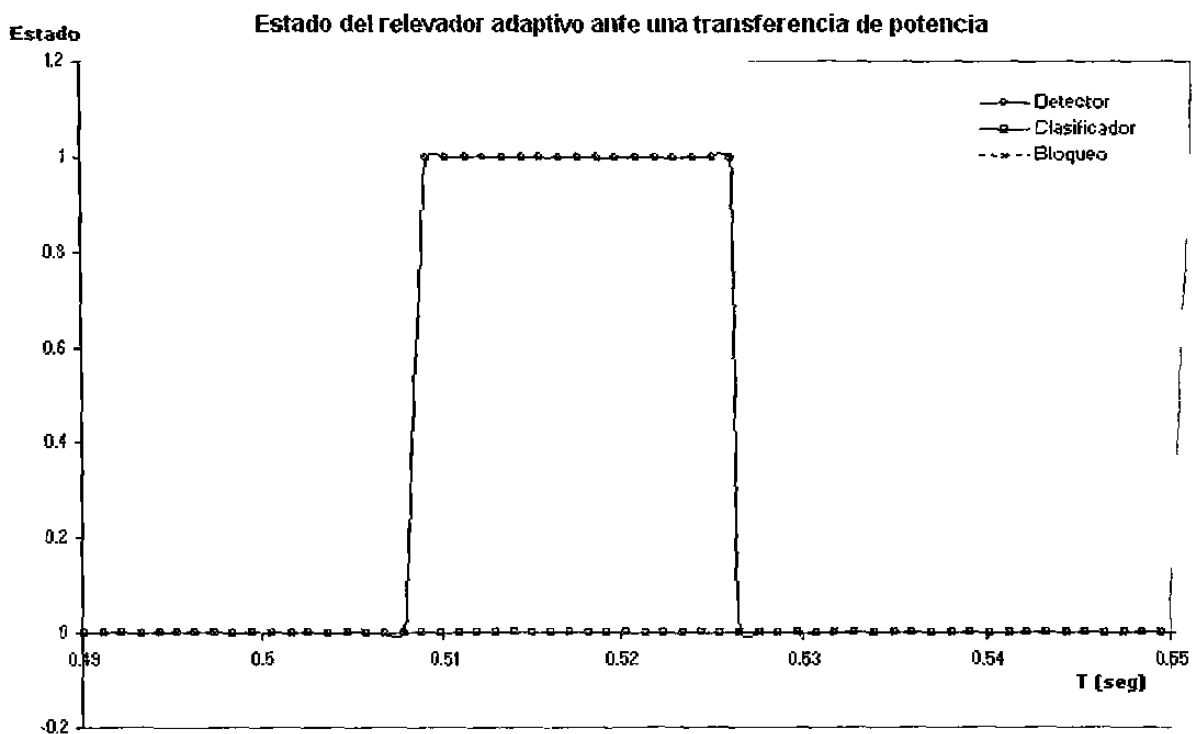


Fig. 4.9 Estado del relevador adaptivo A ante una transferencia de potencia.

Como se puede observar ante una transferencia de potencia debido a la desconexión de la línea L_2 en $t=0.5$ segundos; el detector operó al mismo tiempo que el bloqueo esperando a que se establezca el nuevo punto de impedancia aparente en $t=0.527$ segundos, mientras tanto el clasificador no vio este cambio como una falla y se mantuvo en cero.

Ahora en la siguiente figura (ver Fig. 4.10) presentamos el comportamiento de los elementos del relevador adaptivo ante una falla monofásica en la línea L_1 .

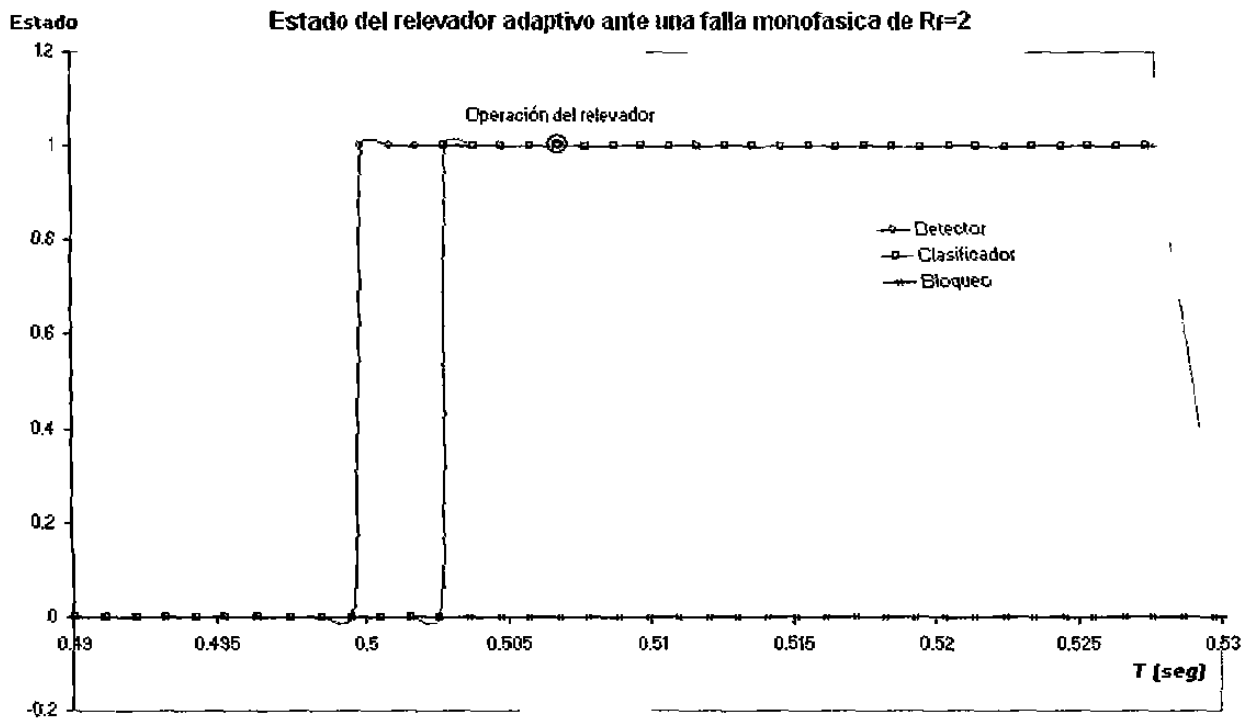


Fig. 4.10 Estado del relevador adaptivo A ante una falla.

Como se observa en la figura anterior ante una falla el detector opera instantáneamente, al clasificador le toma 4 muestras hacer la discriminación que, básicamente es el número de muestras que le toma cruzar el umbral de clasificación, se observa que este tiempo que le toma al clasificador no afecta la operación de la protección la cual se ilustra en la figura, finalmente el bloqueo de la protección no se presenta en esta condición.

Un elemento muy importante del relevador adaptivo lo constituye el detector; este detector se trata de una característica tipo impedancia como órgano de máxima la cual tiene su centro en un determinado valor de la impedancia aparente, el centro de la característica varía de acuerdo con la carga del sistema, para lo cual se varía dinámicamente cada 15

minutos para ajustarse al valor de carga actual en el sistema, este periodo de tiempo corresponde al utilizado por la mayoría de las empresas eléctricas para fines de facturación.

En la siguiente figura (4.11) se ilustra el cambio dinámico del detector ante la variación de la carga de $t=0$ min. hasta $t=45$ min.

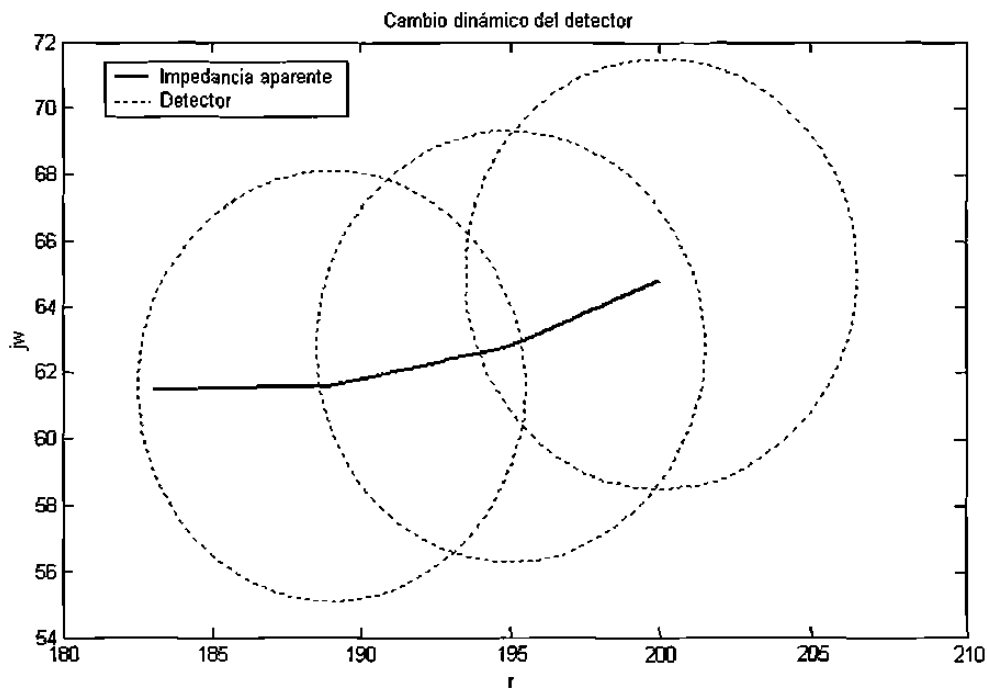


Fig. 4.11 Cambio dinámico del detector en el sistema de prueba-2.

Finalmente analizamos la función de adaptación utilizando el sistema de prueba 2, las fallas que se analizarán en todos los casos son cercanas al relevador, puesto que proponer fallas mayores al 50% de la línea no muestra el error causado por el efecto resistivo de la resistencia de falla. El resultado gráfico que se muestra (ver Fig. 4.12) corresponde a una falla $1\emptyset$ en la fase a al 20% de L_1 con un valor de $R_f=10\Omega$, como podemos observar sin adaptación la falla queda fuera de la característica de operación del relevador A, al contrario, al correr este evento en el relevador adaptivo la característica se adaptó a la condición de carga previa, ($t=1$ seg en la figura) y cuando la falla fue insertada en el sistema en $t=1.5$ seg, la adaptación provocó la correcta operación del relevador.

Debemos mencionar que el primer cambio adaptivo se realiza en un periodo corto de tiempo al iniciarse la corrida del evento pues necesitamos insertar el detector en la impedancia aparente en el sistema y después realizar los cambios adaptivos cada 15 minutos, de acuerdo a la variación de carga.

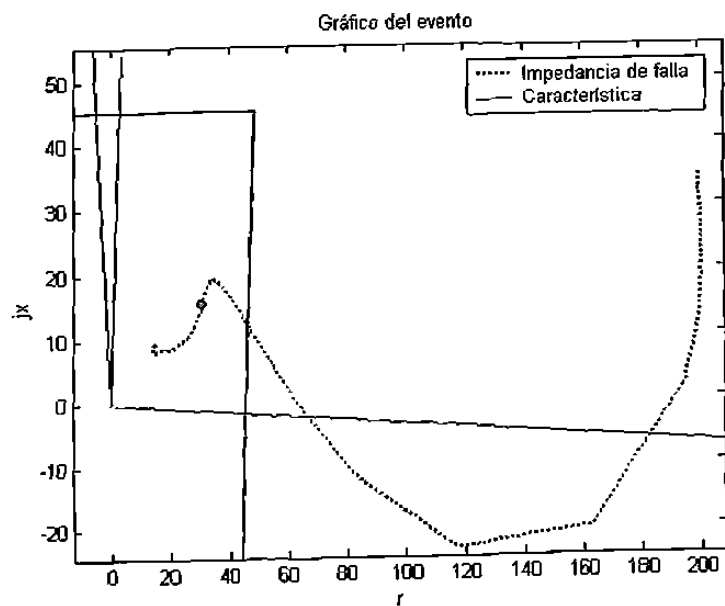
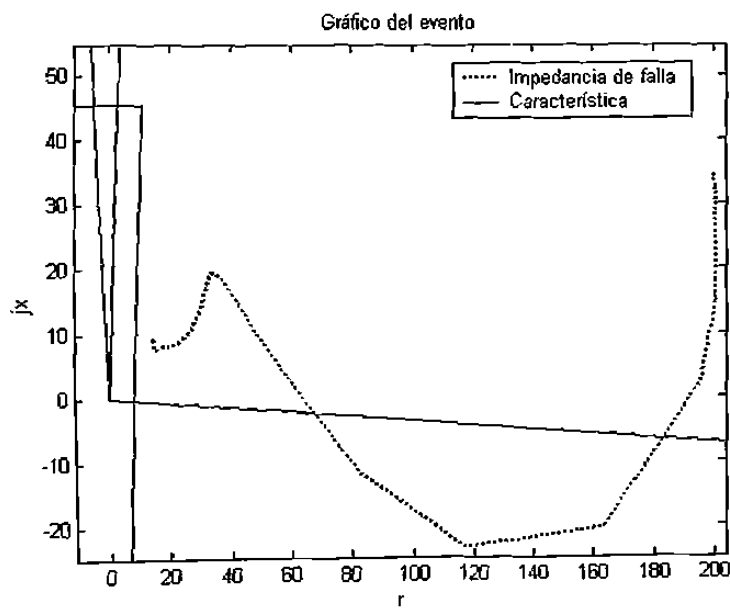


Fig. 4.12 Resultados gráficos del relevador adaptivo A para una falla monofásica en L_1 en el sistema de prueba-2.

Al igual que en la pruebas de la adaptación anterior se presenta ahora un gráfico con diferentes valores de R_f graficados contra R_B/R_M para diferentes relaciones de impedancia de línea entre impedancia de la fuente, el valor de R_B corresponde al valor de resistencia sobre la característica cuadrilateral en su lado derecho obtenido a partir de X_M ; al igual que la gráfica anterior nuestro umbral que define la correcta operación del relevador es el valor de 1 en el eje vertical.

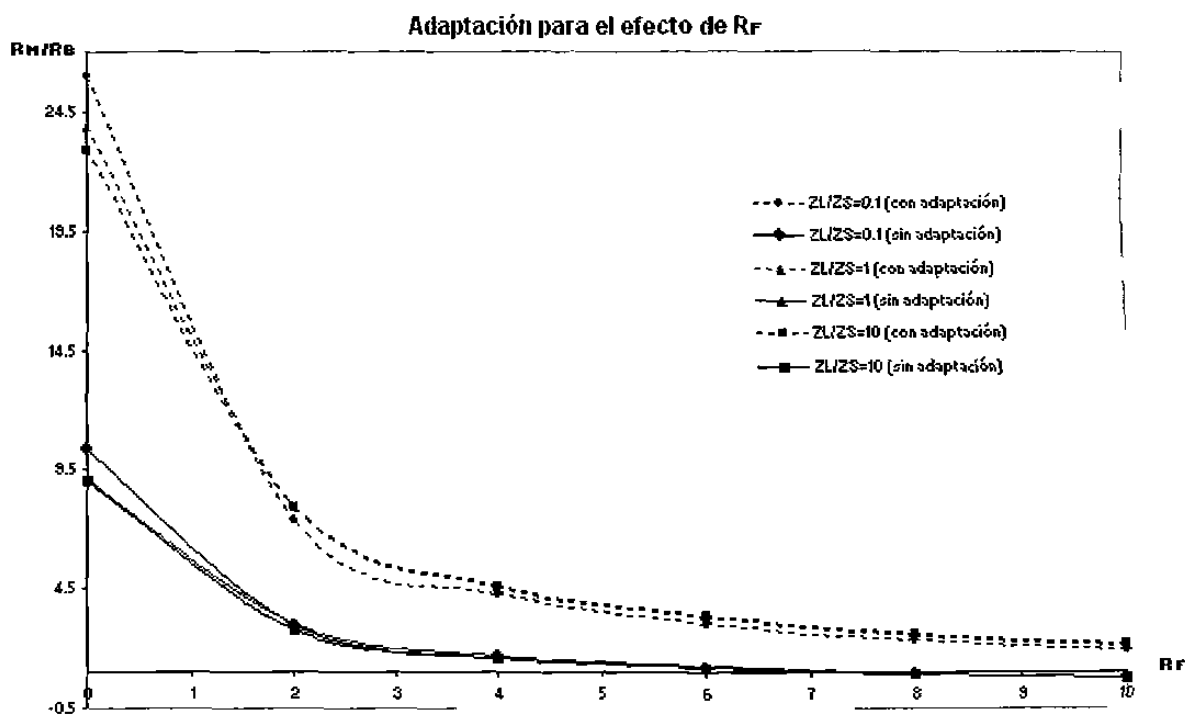


Fig. 4.13 Adaptación para R_f en la protección A con diferentes relaciones de Z_l/Z_s .

Como se puede observar el relevador con adaptación fue más tolerable al efecto resistivo de la impedancia de falla mientras que el relevador sin adaptación presentó problemas de funcionalidad para fallas con resistencias mayores de 6.5Ω . De estos resultados podemos concluir que es posible realizar adaptaciones a la característica de operación para reducir estos efectos, para esto debemos de tomar en cuenta el no comprometer la operación del relevador ante condiciones extremas de carga, cambios en la transferencia de potencia y oscilaciones de potencia.

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se realizaron las pruebas de validación de las funciones de adaptación propuestas en el capítulo 3; se puede apreciar que las funciones de adaptación tienden a reducir los errores en la funcionalidad de los relevadores pues se adaptan a las condiciones presentes en los sistemas de potencia.

El primer error analizado es debido al efecto de la reactancia de la impedancia de falla esto causa que fallas en el límite de la zona de protección ocasionen problemas de sobrealcance o de subalcance en el relevador, con la función de adaptación propuesta para el relevador cuadrilateral se tuvo una mayor tolerancia ante este efecto; como se vio esta adaptación ayuda a reducir los efectos causados por la reactancia pero no hace inmune al relevador a estos errores, ya que cuando una falla ocurre ante límites de estabilidad la adaptación no es suficiente para eliminar el error.

Finalmente cuando se tiene el efecto resistivo de la impedancia de falla se demostró que la adaptación permite detectar mayor número de fallas, que sin la adaptación quedaban fuera de la característica de operación, el compromiso ante esta adaptación es el de no operar ante un régimen severo de carga lo que se evitó con la revisión del estado de carga. La no operación ante oscilaciones de potencia se logra realizando la misma adaptación para la característica de bloqueo, finalmente se evita la operación ante una transferencia de potencia por medio del detector, del clasificador y del elemento de bloqueo. Esta formulación adaptiva puede ser aplicada a la protección de distancia de fase, además de presentar la ventaja de asegurar la no operación por carga en segunda y tercera zona debido a la revisión que se tiene de la carga.

CONCLUSIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones generales, así como las recomendaciones para trabajos futuros y las principales aportaciones de este trabajo. Se inició con las consideraciones y el modelado del relevador de distancia, una vez probada su funcionalidad se evaluó y desarrolló funciones de adaptación las cuales fueron programadas para obtener un relevador adaptivo de distancia cuadrilateral. Finalmente se realizaron pruebas al relevador adaptivo para evaluar su funcionalidad y selectividad.

5.2 CONCLUSIONES GENERALES

- El análisis y desarrollo para el diseño de relevadores de distancia presentado, permite la evaluación dinámica para diversas condiciones de operación de relevadores de distancia con diferentes características de operación.
- El análisis en estado dinámico de relevadores de distancia es factible mediante el uso de herramientas computacionales las cuales pueden generar señales de prueba o utilizar registros reales.
- La incorporación de funciones adaptivas al relevador de distancia permite reducir errores en la medición de impedancia provocadas por impedancia de falla.

- La forma más conveniente de adaptación de un relevador de distancia con mayor tolerancia a impedancia de falla es mediante dos funciones adaptivas independientes. La primera tolerante al efecto reactivo y la segunda tolerante al efecto resistivo.
- Las funciones adaptivas propuestas reducen el error causado por la componente reactiva y resistiva de la impedancia de falla.
- Es factible la implementación del relevador adaptivo de distancia con característica de operación cuadrilateral en un ambiente de programación gráfico, utilizando señales de prueba provenientes de registros de fallas reales o de programas computacionales que permitan la generación controlada de eventos.

5.3 APORTACIONES

- Se presenta la metodología completa para el diseño de relevadores de distancia, se enfatiza el diseñar los relevadores en el plano complejo W pues en este plano los cambios realizados en las características de operación son fácilmente transferidos a las señales eléctricas de entrada, los resultados se presentan en el plano de impedancia.
- Se presentan las limitaciones y problemáticas referentes a la implementación del modelado de relevadores de distancia, dentro de estas limitaciones se encuentra la desventaja que se presentan en muchos relevadores comerciales en cuanto a los grados de libertad que se tienen al realizar los ajustes de la protección.
- Se programan y desarrollan los relevadores de distancia en el lenguaje de programación Matlab[®].
- En base a la interfaz que existe entre las plataformas de programación Matlab[®] y Lab-View[®] el relevador de distancia fue programado como un instrumento virtual para

la evaluación de la funcionalidad del relevador por medio de la adquisición de señales en tiempo real.

- Se desarrolló un relevador de distancia cuadrilateral adaptivo en base a dos funciones de adaptación las cuales tienden a reducir el error causado tanto por la reactancia como por la resistencia de falla.
- Los resultados de validación demostraron que el relevador adaptivo fue más tolerable que el relevador convencional equivalente ante los errores causados por la impedancia de falla. Por lo tanto el relevador diseñado presenta un mayor grado de selectividad y sensibilidad sin comprometer en lo absoluto funcionalidad alguna.

5.4 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Hacer combinaciones de características o programar características especiales para obtener nuevos relevadores más tolerables a efectos de error causados por oscilaciones de potencia.
- Adaptar la característica de bloqueo de manera independiente para mejorar la discriminación de oscilaciones de potencia.
- Desarrollar nuevas funciones de adaptación analizando otros posibles escenarios de error.
- Probar la funcionalidad del relevador de distancia en tiempo real.

REFERENCIAS

- [1] A.R. van C. Warrington, "Application of the Ohm and Mho Principles to Protective Relays," *Transactions A.I.E.E.* 65, July 1946, pp. 378-386.
- [2] A.J. Corson and R.M. Rowell, "New Concepts in Systems for Electrical Measurement," *Electrical Engineering*, 82, March 1963, pp. 214-219.
- [3] N. Peach, "Protective Relaying," *Power*, August 1961, pp. 67-90.
- [4] S.H. Horowitz, A.G. Phadke, and J. S. Thorp, "Adaptive Transmission System Relaying," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, October 1988, pp. 1436-1445.
- [5] G.D. Rockefeller, C.L. Wagner, and J. R. Linders, "Adaptive Transmission Relaying Concepts for Improved Performance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, October 1988, pp. 1446-1458.
- [6] A.K. Jampala, S.S. Venkata, and M.J. Damborg, "Adaptive Transmission Protection: Concepts and Computational Issues," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, January 1989, pp. 177-185.
- [7] Z. Zhizhe, and C. Deshu, "An Adaptive Approach in Digital Distance Protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 1, January 1991, pp. 135-142.
- [8] A.G. Jongepier, and L. Vander Sluis, "Adaptive Distance Protection of a Double-Circuit Line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3 July 94, pp. 1289-1295.
- [9] D.V. Coury, "Agent technology Applied to Adaptive Relay Settings for Multi-Terminal Lines," *IEEE 2000 Summer Meeting*, pp. 1196-1208.

- [10] M.J. Damborg, M.G. Kim, "Adaptive Protection as Preventive and Emergency Control," *IEEE 2000 Summer Meeting*, pp 1208-1214.
- [11] V. Cook, *Analysis of Distance Protection*, Letchworth, Hertfordshire, England: Research Studies Press Ltd., 1985.
- [12] A.R. van C. Warrington, *Protective Relays their theory and practice volume two*, England: Chapman and Hall Ltd., 1974.
- [13] H.J. Altuve, *Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia*, Universidad Autónoma de Nuevo León y Comisión Federal de Electricidad, Monterrey, México, 1992.
- [14] Walter A. Elmore, *Protective Relaying Theory and Applications*, Coral Springs, Florida: ABB Power T & D Company Inc., 1994.
- [15] H.J. Altuve, *Introducción a los Relevadores y Sistemas Digitales de Protección*, Programa Doctoral de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León , Monterrey, N.L., México, Noviembre de 1993.
- [16] C.R. Mason, *The Art and Science of Protective Relaying*, John Wiley and Sons, Inc., New York, New York, 1979.
- [17] J.L. Blackburn, *Protective Relaying: Principles and Applications*, New York and Bassel: Marcel Dekker Inc., 1987.
- [18] A. Conde, *Protección Adaptiva de Sobrecorriente*, Tesis de Maestría en Ciencias, FIME-UANL, Febrero 1996.
- [19] Y.G. Paithankar, *Transmission Network Protection*, Visvesvaraya Regional College of Engineering Nagpur, India.

[20] E.O. Schweitzer and Jeff Roberts, "Distance Relay Element Design," *Forthy-Sixth Annual Conference for Protective Relay Engineers Texas A&M University College Station, Texas*, April 12-14, 1993.

[21] A. Conde, *Fundamentación Teórica y Desarrollo de Algoritmos para un Relevador Adaptivo de Sobrecorriente*, Tesis de Doctorado, FIME-UANL, Septiembre 2002.

[22] A.P. Sakis Meliopoulos and George J. Cokkinides, "A Virtual Environment for Protective Relaying Evaluation and Testing," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no.1, February 2004.

[23] Westinghouse Electric Corporation, *Applied Protective Relaying*, 1979.

[24] National Instruments, *Labview user guide ver. 7.0*, National Instruments Corporation, Austin 2004.

