CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Protección adaptiva de sobrecorriente

Las protecciones de sobrecorriente son las protecciones más sencillas, pero las más difíciles de aplicar en el sistema de potencia. Los requerimientos básicos de la protección de sobrecorriente de líneas de transmisión son: a) la detección de cualquier falla presente en la línea protegida o la adyacente; b) la operación selectiva ante estas fallas; c) la operación segura ante condiciones normales de carga y fallas fuera de la zona protegida. En las protecciones convencionales de sobrecorriente existe un compromiso en la discriminación entre una condición de cortocircuito mínimo y una condición de carga máxima, ya que en líneas largas estos valores de corriente pueden ser comparables. Así, la protección debe ajustarse por encima de la corriente de carga máxima, pudiendo ser insensible a fallas mínimas, que, al no ser eliminadas, pueden agravarse e involucrar otras fases o elementos del sistema; este criterio de ajuste insensibiliza y reduce el alcance de la protección ante condiciones de carga inferiores a la máxima, que es el estado operativo más frecuente. La coordinación de la protección de sobrecorriente se realiza garantizando un intervalo de tiempo ΔT (0.3 a 0.4 s), entre los tiempos de operación de la protección respaldada y la propia para una falla trifásica máxima inmediata al relevador respaldado. En niveles de corriente de cortocircuito inferiores al que garantiza la coordinación, el intervalo de tiempo entre las dos protecciones es mayor, provocando tiempos de operación elevados para la protección de respaldo.

La introducción de criterios adaptivos en protecciones de sobrecorriente para redes de subtransmisión y distribución puede disminuir de manera considerable la falta de sensibilidad y velocidad de operación de la protección, debido a la dificultad de discriminar entre corrientes de falla y altos niveles de corriente de carga, y la necesidad de coordinar

dispositivos con características de operación muy diversas, tales como relevadores de sobrecorriente, fusibles y restauradores.

En este trabajo se propone introducir dos criterios adaptivos en el relevador de sobrecorriente para resolver los problemas anteriormente mencionados: a) adaptación de la corriente de arranque, con el objetivo de incrementar la sensibilidad del relevador; b) adaptación del tiempo de operación del relevador, para reducir el tiempo de operación de la protección al mínimo permitido.

1.2 Antecedentes

Los sistemas de protección tienen una función muy importante en la confiabilidad de los sistemas eléctricos modernos. La degradación en el desempeño de los sistemas de protección es muy evidente ante cambios en la topología de la red. Las limitaciones fundamentales de los sistemas de protección son atribuidas a las filosofías de protección anticuadas y diseños poco flexibles en tecnologías electromecánicas o electrónicas analógicas. Aún los relevadores digitales modernos tienen capacidades limitadas para adaptarse a cambios en el sistema eléctrico de potencia.

El primer trabajo reportado sobre la conveniencia de adaptar el ajuste de los relevadores fue realizado por Dy Liacco [1] en 1967. En este trabajo Dy Liacco propone modificar los ajustes de relevadores en correspondencia con los cambios de las condiciones del sistema, como una acción preventiva para mejorar la estabilidad de éste.

Un grupo de trabajo de CIGRE [2] estableció en 1984 un conjunto de posibles áreas de aplicación de la protección adaptiva.

S.L. Nilsson, et. al. [3] propuso en 1984 añadir a un programa de cálculo de parámetros de ajuste de protecciones la opción de recalcularlos ante cambios debidos a actividades de mantenimiento o a influencias de las estaciones de año.

S.H. Horowitz, et. al. [4] presentó en 1988 alternativas de utilización de técnicas digitales para adaptar la protección y el control del sistema de transmisión en tiempo real a cambios del sistema de potencia.

G.D. Rockefeller, et. al. [5] presentó en 1988 algunos conceptos de protección adaptiva que pueden implementarse en líneas de transmisión.

A.K. Jampala, et. al. [6] estableció en 1989 criterios para la protección adaptiva de redes de transmisión, identificando los requerimientos de "hardware" y de comunicación de estos sistemas.

Se han desarrollado trabajos más específicos sobre protección adaptiva de sobrecorriente o protección adaptiva de subestaciones de distribución. K.R. Shah, et. al. [7] analiza la factibilidad y economía de un sistema adaptivo de protección de redes de distribución (ADPS); este sistema realiza funciones de diagnóstico y alarma, supervisión, protección, control y restauración del sistema de distribución. El ADPS está estructurado en tres niveles jerárquicos: computadora central del sistema, computadora de subestación y computadora de relevador de sobrecorriente (COR). La interconexión de cada nivel del ADPS es realizada a través de canales de comunicación. Las COR tienen algoritmos de protección, supervisión y comunicaciones; las computadoras son instaladas en cada alimentador y en ubicaciones de conexiones de líneas multiterminales; cada COR realiza funciones de supervisión y análisis de los valores de voltajes y corrientes de la línea, provee una protección mas rápida y confiable.

M.S. Sachdev, et. al. [8,9,10] describió entre 1995 y 1996 un sistema de protección adaptivo diseñado para la red de distribución de la ciudad de Saskatoon, Canadá. El sistema de protección (APS) es definido en tres niveles jerárquicos: control central, supervisión y control de la subestación, y protección. La computadora central determina la topología de la red, estima el estado del sistema, calcula los niveles de falla y determina los ajustes de los relevadores. Los cambios en el nivel de operación o en la configuración del sistema son detectados por la computadora de la subestación y enviados a la computadora central a través

de sistemas de comunicación. Los relevadores procesan señales de voltaje y corriente y transmiten la información a las computadoras de subestación, las cuales también supervisan el estado de los interruptores. La computadora central determina los niveles de operación y los cambios en la configuración del sistema y los transmite a la computadora central. Esta computadora determina los ajustes de los relevadores, los cuales son adaptados a la condición vigente del sistema y enviados a los relevadores a través de la computadora de subestación. El sistema se adapta a los cambios en la red, modificando los ajustes de relevadores en intervalos de una hora, en respuesta a los cambios de carga o del nivel de generación. También hace adaptación en tiempo real a los cambios de topología del sistema. Se propone además un método de ajuste local para la adaptación de los relevadores de sobrecorriente, como medida de emergencia temporal ante fallas en los canales de comunicación hacia la computadora central del sistema o la computadora de la subestación. Este método consiste en modificar la corriente de arranque en base a los valores de corriente de carga medidos en la ubicación del relevador. La nueva curva de tiempo es calculada multiplicando la curva de tiempo vigente en proporción linealmente inversa a la variación en el valor de ajuste de la corriente de arranque. Este método de ajuste local es válido para intervalos cortos de tiempo únicamente debido a que requiere de la información calculada antes del fallo del canal de comunicación.

J. Eisman, et. al. [11] describe procesos de adaptación para relevadores de sobrecorriente utilizando canales de comunicación con otros relevadores y efectuando bloqueos o disparos remotos. Un primer proceso permite la operación del elemento instantáneo del relevador de respaldo cuando el relevador respaldado no arranca; el elemento instantáneo del relevador de respaldo es bloqueado utilizando un canal de comunicación cuando el relevador respaldado arranca. El tiempo de coordinación es reducido de 0.3-0.4 segundos a 0.1-0.2 segundos. Un segundo proceso consiste en la aceleración del disparo de un relevador de sobrecorriente de tierra; este relevador es usado para disparar ante fallas internas o externas a un transformador con conexión Y -Δ. La selectividad entre este relevador y los relevadores direccionales de tierra instalados en otros alimentadores paralelos al circuito del transformador ha sido muy problemática. Es posible reducir el tiempo de

disparo de este relevador conectando la unidad instantánea, y permitiendo el bloqueo si un relevador direccional arranca. Un tercer proceso modifica los ajustes de la protección de respaldo cuando el proceso de autodiagnóstico de la protección respaldada detecta un fallo en el sistema de protección; los cambios en los ajustes consisten en acelerar la operación e incrementar la sensibilidad de la protección.

De los trabajos específicamente realizados en protección adaptiva de sobrecorriente anteriormente analizados, se observa que todas las variantes de adaptación propuestas requieren canales de comunicación entre el relevador y las computadoras que realizan el procesamiento de información y la determinación de los ajustes de los relevadores. En [8] se presentó una alternativa de adaptación con información disponible en el relevador como medida de emergencia ante la pérdida de comunicación con la computadora central o la computadora de subestación. Los criterios de adaptación para esta alternativa son válidos únicamente durante períodos cortos de tiempo debido a que requieren de información previa a la pérdida del canal de comunicación.

En este trabajo de tesis se proponen nuevos conceptos adaptivos de protección de sobrecorriente que solo requieren la información disponible en el relevador y no tienen restricciones por el tiempo de ejecución de estos. El procesador del relevador calcula el valor adaptivo de la corriente de arranque en base al valor de la corriente de carga. Para la adaptación del tiempo de operación se parte de la característica tiempo-corriente del dispositivo respaldado y se garantiza un intervalo de tiempo de coordinación constante para cualquier nivel de corriente de cortocircuito y cualquier estado operativo del sistema. La aplicación de este relevador es recomendable en subestaciones rurales o en la industria, donde no se justifica económicamente la instalación de canales de comunicación.

1.3 Objetivos del trabajo

En las propuestas anteriores de protección adaptiva para relevadores de sobrecorriente [7,8,9,10,11] se sugiere la aplicación de una lógica adaptiva a nivel de subestación, en que los parámetros de ajuste del relevador son calculados por una computadora central de

subestación en dependencia del estado y configuración del sistema eléctrico, y enviados al relevador en forma de grupos de ajustes a través de canales de comunicación. En redes aisladas o rurales en donde no se dispone de una estructura de comunicación adecuada, es necesario realizar la adaptación del relevador a nivel local, sin necesidad de canales de comunicación y sin una computadora central que supervise la operación de la subestación.

En este trabajo se propone un relevador adaptivo de sobrecorriente con nuevos criterios de adaptación, más sensible a los cambios que ocurren en el sistema eléctrico que el relevador adaptivo propuesto en la literatura, y que no requiere canales de comunicación para modificar sus parámetros de ajuste.

El relevador adaptivo de sobrecorriente de tiempo inverso debe tener la capacidad de variar su corriente de arranque en función de la corriente de carga de la línea protegida, y ajustar su tiempo de operación en función del tiempo de operación del dispositivo respaldado, utilizando sólo la información obtenida en la ubicación del propio relevador.

La variación adaptiva de la corriente de arranque debe representar el estado operativo vigente del sistema; la lógica de adaptación debe reconocer y discriminar los diferentes estados operativos del sistema eléctrico, como son: variación normal de la corriente de carga, estado de falla en el sistema, así como apertura o cierre de la línea. La lógica adaptiva debe garantizar la sensibilidad del relevador para los diferentes estados del sistema de potencia, ofrecer un nivel adecuado de seguridad al sistema de protección y ser factible de implementar en los procesadores actuales utilizados en relevadores digitales. La lógica adaptiva de la corriente de arranque debe ser sometida a pruebas con señales reales para validar su desempeño.

El objetivo de la adaptación del tiempo de operación es lograr una operación coordinada, conservando un intervalo ΔT de tiempo de coordinación constante (0.3 0.4 seg) con respecto al tiempo de operación del dispositivo respaldado para cualquier valor de corriente. El relevador adaptivo debe coordinar con dispositivos de protección tales como relevadores electromecánicos, fusibles y restauradores, los cuales no tienen definida en forma

analítica su característica de operación; es necesario, por tanto, desarrollar algoritmos de ajuste de curvas para poder obtener la expresión analítica de las características de estos dispositivos.

Deben analizarse aspectos de diseño y aplicación del relevador adaptivo, se utilizará una versión virtual del relevador en una computadora personal equipada con una tarjeta de adquisición de datos. Los algoritmos del relevador se programan en la computadora, lo que da gran facilidad para realizar y probar las modificaciones que resultan del proceso de pruebas de laboratorio.

1.4 Estructura de la tesis

La tesis está estructurada en ocho capítulos, un listado de referencias bibliográficas y tres apéndices, donde se incluyen aspectos complementarios al trabajo principal de la tesis. Los contenidos de los capítulos se describen a continuación:

En el Capítulo I se discuten los resultados de trabajos de investigación anteriores a esta tesis, dedicados al estudio de la protección adaptiva de sobrecorriente. Se establecen también los objetivos principales de la tesis y se describe su estructura.

En el Capítulo II se describen los dispositivos de protección de sobrecorriente y se resumen los criterios para la selección de los parámetros de ajuste y coordinación de relevadores, fusibles, restauradores y seccionalizadores.

En el Capítulo III se estudia la representación matemática de los elementos de tiempo inverso e instantáneo de relevadores de sobrecorriente analógicos y digitales. Se proponen también herramientas gráficas para la representación de las características de operación y reposición del relevador.

En el Capítulo IV se presentan las consideraciones y la lógica de control necesaria para la adaptación de la corriente de arranque de los elementos instantáneo y de tiempo inverso del relevador. Se proponen dos alternativas para lograr tal adaptación: utilizar la

magnitud del fasor de componente fundamental de la corriente, o utilizar el valor de corriente de demanda. Para ambos casos se presentan las consideraciones prácticas, los resultados obtenidos y un estudio comparativo entre estos dos criterios.

En el Capítulo V se presenta la adaptación del tiempo de operación del elemento de tiempo inverso. Se analizan dos alternativas de adaptación, se presentan resultados de cada alternativa y un estudio comparativo entre ellas. Se describe también el algoritmo de ajuste de curvas requerido para garantizar la coordinación del relevador adaptivo con relevadores electrónicos y electromecánicos, fusibles y restauradores. Se presentan los resultados obtenidos en forma tabular y gráfica.

En el Capítulo VI se presentan la estructura funcional y características del relevador adaptivo de sobrecorriente, también se realiza un estudio comparativo del relevador adaptivo con relevadores de sobrecorriente convencionales y de secuencia negativa.

En el Capítulo VII se describe el desarrollo para la aplicación del relevador adaptivo de sobrecorriente en sus dos variantes de adaptación de la corriente de arranque. Se presentan los resultados obtenidos mediante tres variantes de los datos introducidos: adquisición de datos en tiempo real, archivo de señales y generación interna de señales.

En el Capítulo VIII se presentan las conclusiones generales del trabajo, así como las aportaciones y las recomendaciones para trabajos futuros en esta área.

CAPÍTULO II

PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE

2.1 Introducción

La protección de sobrecorriente se diseña para operar cuando la magnitud de la corriente en el elemento protegido es mayor que una magnitud predeterminada. Los valores anormales de corriente pueden ser provocados por sobrecargas en el sistema y por cortocircuitos. Estos niveles excesivos de corriente pueden provocar daño térmico o mecánico a los elementos del sistema, afectan la calidad del servicio eléctrico por caídas de voltaje y, en ciertas condiciones, pueden afectar la estabilidad del sistema eléctrico de potencia.

Los dispositivos de protección de sobrecorriente incluyen relevadores, fusibles, restauradores, seccionalizadores e interruptores de bajo voltaje. Estos dispositivos carecen de direccionalidad, por lo que su aplicación se limita a sistemas radiales, donde el flujo de potencia es unidireccional. Muchos sistemas de distribución son radiales y constituyen el campo principal de aplicación de la protección de sobrecorriente. En estos sistemas la corriente de falla decrece con la distancia entre la subestación y el punto de falla. Esto permite definir las zonas de protección utilizando un criterio de nivel de corriente.

En este capítulo se presentan las consideraciones de diseño y aplicación de los dispositivos de sobrecorriente que junto con el relevador adaptivo formarán parte del esquema de protección. El procedimiento de cálculo de parámetros de ajuste de dispositivos de protección convencionales presentado en este capítulo será un marco de comparación para evaluar los beneficios del relevador adaptivo de sobrecorriente respecto a relevadores convencionales.

2.2 Principios de operación de la protección de sobrecorriente

La protección de sobrecorriente de una línea debe funcionar como protección primaria de la línea y como respaldo remoto de las líneas adyacentes. La operación de la protección de sobrecorriente en los límites de su zona protegida no es muy exacta, pudiendo tener una cobertura menor que su zona protegida (subalcance) o tener una cobertura mayor que su zona (sobrealcance). Este problema se ilustra en la Fig. 2.1. La protección en la subestación A debe operar sin retardo de tiempo (protección instantánea) para todas las fallas en la línea AB. La falla F_1 está en la zona primaria, pero las fallas F_2 y F_3 son externas y deben ser liberadas por otra protección; sin embrago, en la protección A las corrientes para las tres fallas son de magnitudes muy similares ($I_{F_1} \cong I_{F_2} \cong I_{F_3}$) por lo que, la protección en A no puede distinguir la ubicación de la falla utilizando solo información de corriente. La solución a este problema es retardar la operación de la protección en A para fallas en el límite de su zona protegida (protección de respaldo). Este retardo permite que la protección respaldada B libere la falla. Debido a que se deben tomar en cuenta factores de seguridad para evitar operaciones simultáneas de las protecciones A y B para la falla $F3$, el valor de ajuste para la protección en A es calculado al 120% del valor de corriente de falla máxima en B; esto significa que fallas en el extremo remoto de la línea serán liberadas con retardo de tiempo. El proceso de ajuste de las protecciones para esta solución es llamado coordinación.

La coordinación entre dispositivos de protección de sobrecorriente es obtenida con la verificación y asignación de valores de corriente (protección instantánea) o de tiempo de operación (protección con retardo). El proceso de coordinación empieza con el dispositivo de protección de sobrecorriente más cercano a la carga; se verifican y asignan valores incrementales en tiempo y/o corriente de arranque a cada dispositivo de protección de sobrecorriente en forma ascendente hacia la fuente de generación del sistema. El proceso termina con el último dispositivo de protección de sobrecorriente a coordinar.

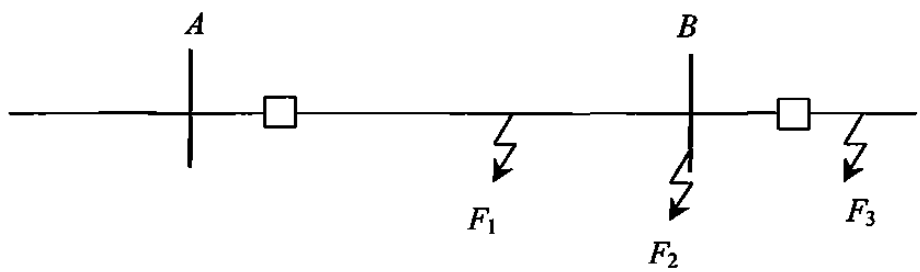


Fig. 2.1. Operación de la protección de sobrecorriente para fallas cercanas al final de la línea protegida.

La coordinación por corriente se realiza sobre la base, de que, en un sistema radial, el nivel de corriente de cortocircuito se reduce a medida que aumenta la impedancia del sistema hacia la carga. Se verifica que la protección que efectúa funciones de respaldo, no sea más sensible que la protección que respalda; y se establecen márgenes de seguridad adecuados para evitar operaciones simultáneas entre protecciones; por ejemplo, las protecciones A y B para la falla F_3 en la Fig. 2.1.

Para la coordinación por tiempo, se verifica que exista un intervalo de tiempo adecuado entre las características de operación de las protecciones de sobrecorriente; el método comúnmente usado es el gráfico. La verificación se realiza para el régimen de operación crítico y los niveles de cortocircuitos máximos en el sistema eléctrico de potencia.

La forma de la característica de operación es propia del tipo de dispositivo de sobrecorriente (relevador, fusible o restaurador); esta característica representada en un plano tiempo-corriente refleja el principio de operación del mismo. En un relevador se tienen tres tipos de características de operación: de tiempo inverso, tiempo definido e instantánea. En un relevador electromecánico la característica de operación inversa es obtenida con el desplazamiento electromecánico de un disco de inducción afectado por un muelle de retención (relevador de inducción); la velocidad angular de giro es proporcional a la magnitud de la corriente de entrada, y el recorrido del disco hasta el cierre del contacto define el tiempo de operación del relevador. La operación instantánea del relevador de sobrecorriente se obtiene mediante la atracción electromagnética de un elemento ferromagnético hacia un núcleo laminado, donde la magnitud del campo magnético es proporcional a la corriente circulante por el núcleo. La operación de tiempo definido de un relevador de sobrecorriente es obtenida con la combinación de un relevador de sobrecorriente instantáneo supervisado por un relevador temporizador. En un fusible la característica inversa es obtenida mediante la fundición de una laminilla de estaño, cobre o plata; el calor generado en la laminilla es proporcional al cuadrado de la corriente por su resistencia. El tiempo de fundición de la laminilla y la extinción del arco eléctrico determinan el tiempo de operación del fusible. En un restaurador, la característica inversa es obtenida mediante el movimiento

de un émbolo afectado por un campo electromagnético que provoca un desplazamiento proporcional a la magnitud de la corriente.

En la Fig. 2.2 se muestran las características de operación de los dispositivos de sobrecorriente antes mencionados. Las características de operación son representadas en un plano bilogarítmico tiempo-corriente.

En el Apéndice A se muestra el principio de funcionamiento y los parámetros de ajuste de dispositivos protección de sobrecorriente, se analiza el relevador de sobrecorriente de tiempo inverso, el relevador instantáneo de sobrecorriente, fusibles, restauradores y seccionalizadores.

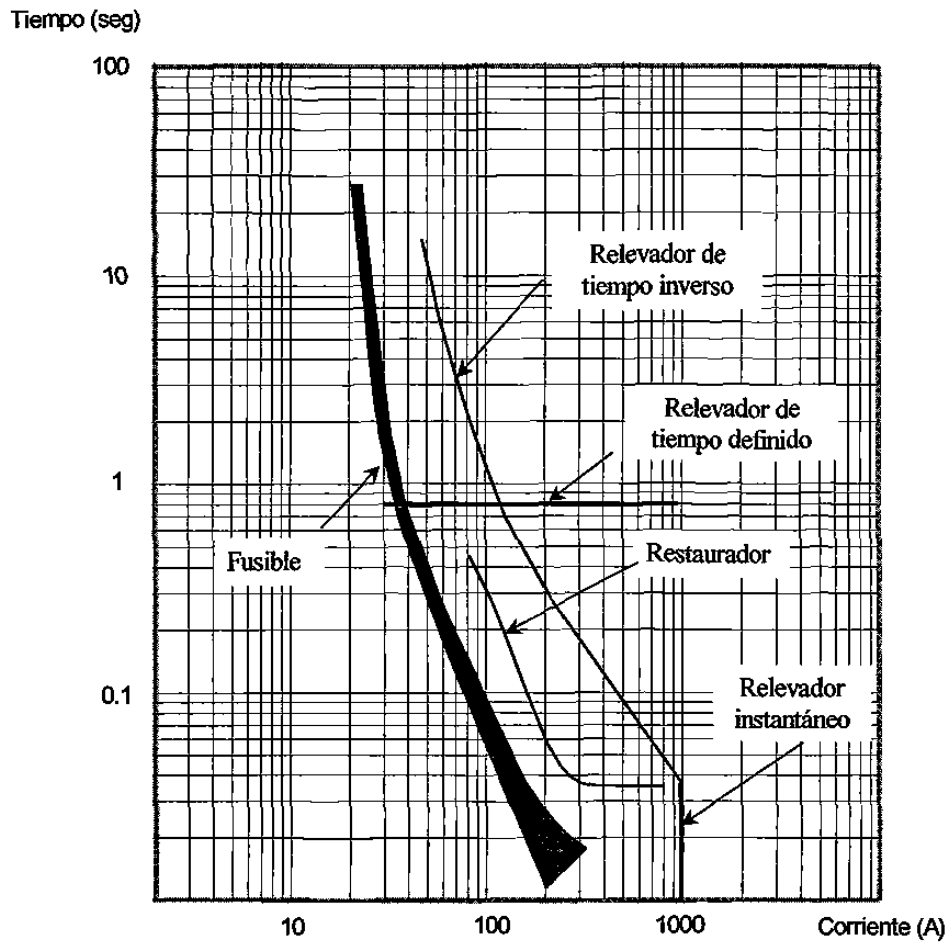


Fig. 2.2. Características de operación de dispositivos de sobrecorriente.

En las siguientes secciones se analizan los criterios de coordinación de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso e instantáneo; por la semejanza funcional con el relevador instantáneo el relevador de tiempo definido no se analizará. Los criterios de coordinación para un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso respaldando a fusibles, restauradores y seccionalizadores también serán analizados.

Los interruptores de bajo voltaje son aplicados en niveles de bajo voltaje del circuito, para estos niveles de voltaje no es justificable económicamente el uso de relevadores, por lo que no se tratarán en la presente tesis.

2.3 Coordinación de dispositivos de sobrecorriente

En un estudio de coordinación de protecciones se debe hacer una selección adecuada de los dispositivos a utilizar. El sistema de protección debe distinguir entre condiciones normales y anormales, permitir una operación selectiva y coordinada de cada dispositivo.

Los principales elementos a proteger en una subestación de distribución son: transformadores, líneas de subtransmisión y alimentadores. Para el transformador, el sistema de protección depende de la capacidad e importancia del mismo, la Comisión Federal de Electricidad (especificación CFE-G0000-62) **[18]** considera dos arreglos básicos dependiendo si el transformador es mayor o menor a 10 MVA. Para transformadores mayores a 10 MVA se utiliza protección diferencial y relevadores de sobrecorriente como protección de respaldo; para transformadores menores a 10 MVA se utilizan fusibles en el lado primario y relevadores de fase y tierra en baja tensión. El sistema de protección para líneas de subtransmisión de 69kV a 138 kV (especificación CFE-G0000-65) se define en función de su longitud; líneas menores de 10 km se utiliza protección diferencial (87L) y protección direccional de sobrecorriente a tierra (67N); para líneas mayores de 10 km se utiliza protección de distancia (21) y protección direccional de sobrecorriente a tierra (67N). La protección para alimentadores de circuitos de distribución de 13.8 kV a 34.5 kV (especificación CFE-G0000-65) se realiza dependiendo del tamaño y tipo de subestación;

alimentadores de circuitos de distribución en subestaciones áreas y rurales con capacidades instaladas inferiores a los 5 MVA, se utilizan restauradores automáticos con protección contra sobrecorriente de fallas entre fases y a tierra; para alimentadores en subestaciones con capacidades instaladas mayores a 5 MVA se utiliza protección de sobrecorriente 50/51-50N/51N, y función de recierre automático (79).

Los criterios de coordinación de dispositivos de sobrecorriente **[16,18]** establecen y recomiendan rangos o márgenes de aplicación, los cuales pueden ser modificados en función de la experiencia acumulada y conocimiento del sistema eléctrico.

En esta sección se analizarán los criterios de coordinación para la protección de líneas de subtransmisión y de alimentadores. La protección de transformadores **[16]** queda fuera del propósito de este trabajo de tesis. Se utilizó un programa de análisis de sistemas eléctricos **[19]** para la coordinación entre los dispositivos de protección de sobrecorriente.

2.3.1 Coordinación relevador-relevador

La coordinación entre relevadores se da fundamentalmente entre dispositivos ubicados en una misma subestación (protección de transformadores en alta - baja tensión y protección de transformador-protección de alimentador), también puede presentarse en líneas de subtransmisión radiales o líneas que alimentan subestaciones escalonadas. La coordinación de dispositivos de tierra y fase se realiza de forma independiente.

El criterio para definir el grado de inversión de las curvas de operación de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso depende del tipo de dispositivo a respaldar o proteger, de la cercanía de la fuente de generación y de las maniobras que se realicen en el circuito eléctrico. Se recomienda seleccionar la característica tiempo-corriente del dispositivo primario con un grado de inversión similar a la del dispositivo de respaldo, para evitar un cruce de curvas en valores de cortocircuito inferiores al nivel máximo utilizado para coordinación. Las curvas extremadamente inversas generalmente son usadas para respaldar

fusibles. Para el respaldo de restauradores se utilizan curvas inversas generalmente. En sistemas donde la magnitud de corriente de cortocircuito depende de la ubicación de la falla al relevador y ligeramente afectado por la generación en servicio, se recomienda utilizar curvas muy inversas para obtener disparos rápidos. Si la magnitud de corriente de cortocircuito es dependiente fuertemente de la capacidad del sistema de generación en el instante de la falla, se recomienda utilizar curvas muy inversas. Esta característica muy inversa es también aplicable cuando se tienen puestas en servicio que generan corrientes comparables con las corrientes de falla (carga fría).

Se considera un margen mínimo de coordinación de 0.3 a 0.4 segundos entre las curvas de las características tiempo-corriente de los dispositivos de protección, para la máxima corriente de cortocircuito común a ambos equipos. El criterio anterior se ilustra en la Fig. 2.3, donde se muestra un ejemplo de coordinación para una línea radial de distribución; la coordinación se verifica en el nivel máximo de corriente de cortocircuito del relevador respaldado.

La aplicación de relevadores de sobrecorriente es generalmente más difícil y menos permanente que para otro tipo de relevadores. Esto se debe a que la operación de relevadores de sobrecorriente es afectada por variaciones en la magnitud de cortocircuitos causados por cambios en la operación y configuración del sistema.

2.3.2. Coordinación relevador - fusible

El esquema más común de protección de alimentadores es el relevador - fusible, la aplicación de este arreglo se da fundamentalmente entre dispositivos ubicados en diferentes localidades; el relevador en una subestación como protección de un circuito de distribución, y el fusible como protección de un ramal sobre la línea de distribución. El fusible solo operará para fallas permanentes en su ramal, el relevador como dispositivo de respaldo, debe permitir la operación del fusible. Es necesario considerar el sobreviaje del disco del relevador electromecánico, si esta información es disponible.

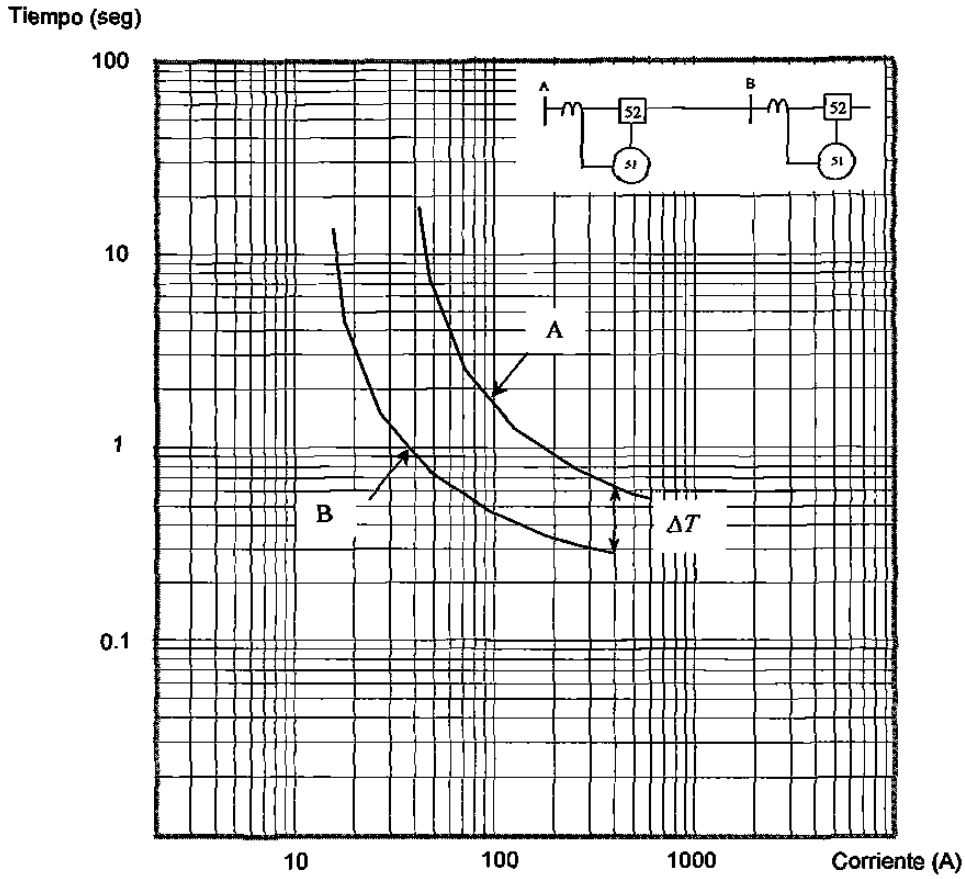


Fig. 2.3. Ejemplo de coordinación entre relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso.

El criterio de coordinación establece un margen mínimo de 0.3 segundos entre la curva de máximo tiempo de liberación y la característica del relevador para la máxima corriente de cortocircuito común a ambos dispositivos.

En la Fig. 2.4a se muestra un sistema radial de distribución de 13.8 kV que servirá como base para realizar las consideraciones de coordinación entre relevador –fusible. Si el ramal B-C es muy importante, puede utilizarse un restaurador; si el empleo del restaurador no es justificado se permite la operación del elemento instantáneo del relevador para cualquier falla en ese ramal; posteriormente se efectúa la reenergización el circuito, y se bloquea el elemento instantáneo. Si la falla persiste se fundirá el fusible. Con este esquema existe posibilidad de mantener el servicio en el ramal para fallas temporales, sacrificando la alimentación a los ramales restantes en la operación del elemento instantáneo (Fig. 2.4b).

Cuando no es deseable la desenergización de los otros alimentadores, la alternativa utilizada consiste en limitar el ajuste del elemento instantáneo del relevador, evitando el traslape con el fusible (Fig. 2.4c). Cuando el ramal esté a poca distancia del ubicación del relevador es necesario bloquear el elemento instantáneo (Fig. 2.4d).

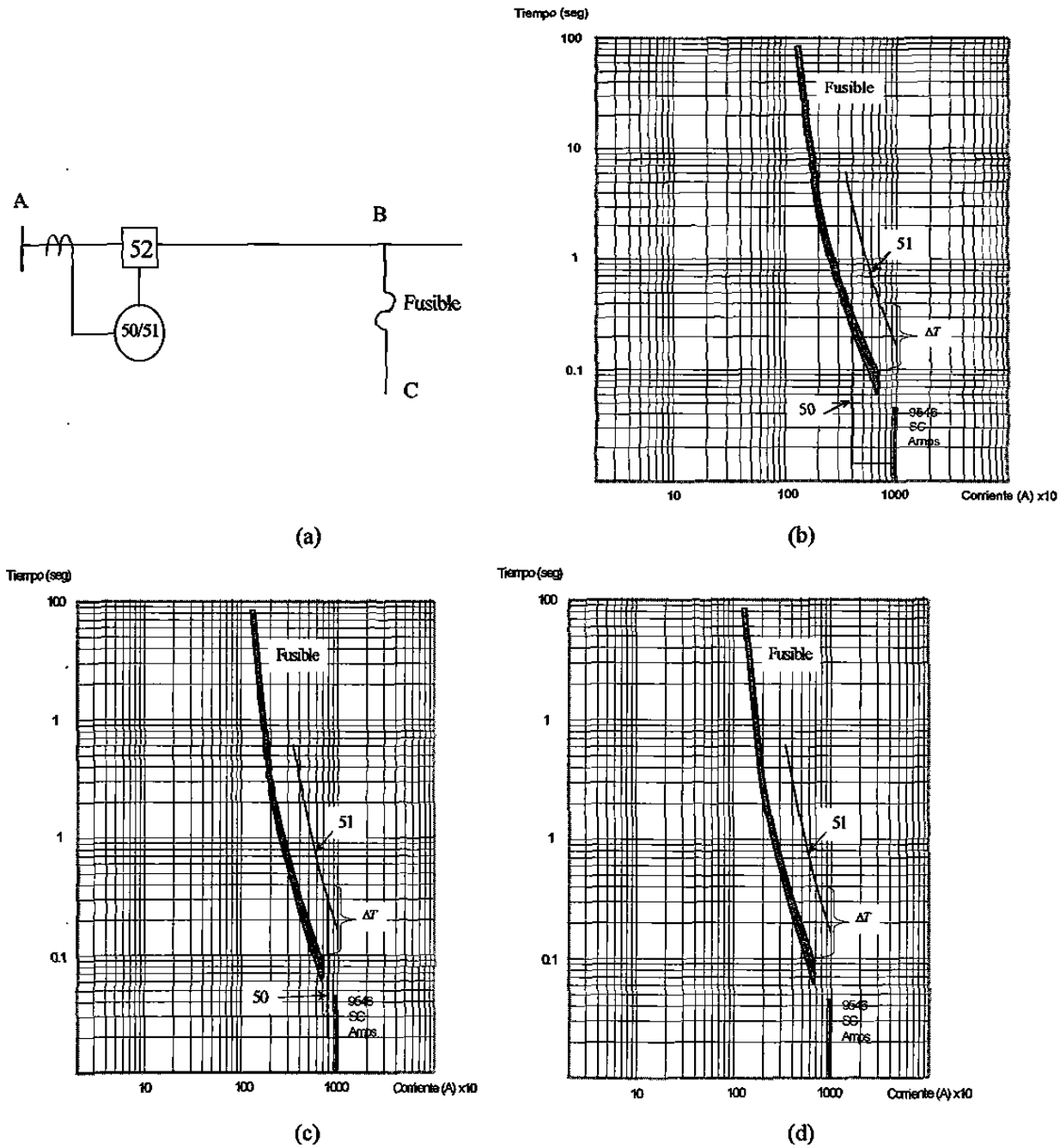


Fig. 2.4. Coordinación Relevador-Fusible. a) diagrama unifilar, b) elemento instantáneo con recierre, c) elemento instantáneo hasta el fusible, y d) sin elemento instantáneo.

2.3.3. Coordinación relevador - restaurador

Los relevadores deben ser ajustados con el retraso suficiente para permitir toda la secuencia de operaciones del restaurador. Un factor importante para obtener esta selectividad es el tiempo de reposición de los relevadores, si el relevador no tiene tiempo de reposicionarse completamente, la siguiente secuencia iniciará con cierto viaje en el disco. Como regla, es posible obtener la selectividad si el tiempo de operación del relevador para cualquier corriente es menor que el doble de la característica con retardo del restaurador.

El tiempo de reposición es constante. El fabricante ofrece al usuario el máximo ajuste de la palanca de tiempo del relevador. En la Fig. 2.5 se presenta un ejemplo, las curvas A y B son las curvas correspondientes a las secuencias instantáneas y con retardo de tiempo del restaurador respectivamente. Es recomendable que la primera secuencia del restaurador no sea instantánea, estudios han reflejado que la posibilidad de eliminar fallas temporales en el primer tiempo muerto del restaurador es más alta, si un tiempo (2 segundos) es permitido para permitir la deionización del aire. El criterio de coordinación establece que debe existir un margen mínimo (0.3 a 0.4 segundos) entre las características tiempo-corriente para la máxima corriente de cortocircuito común a ambos equipos.

A continuación se muestra un ejemplo de verificación para que el relevador de sobrecorriente de tiempo inverso permita toda la secuencia de operación de un restaurador **[15]**. Los tiempos de operación del relevador y restaurador están indicados a continuación:

Restaurador 35 Amp	Relevador Muy Inverso
Instantáneo-0.036 sec	Corriente de arranque-0.65
Retardo-0.25 sec	Curva de Tiempo- 1.0
Secuencia de operación - 2A-2B	Tiempo de reposición curva 10 - 60 seg
	Tiempo de reposición curva 1 - (1.0/10)(60)=6.0 sec

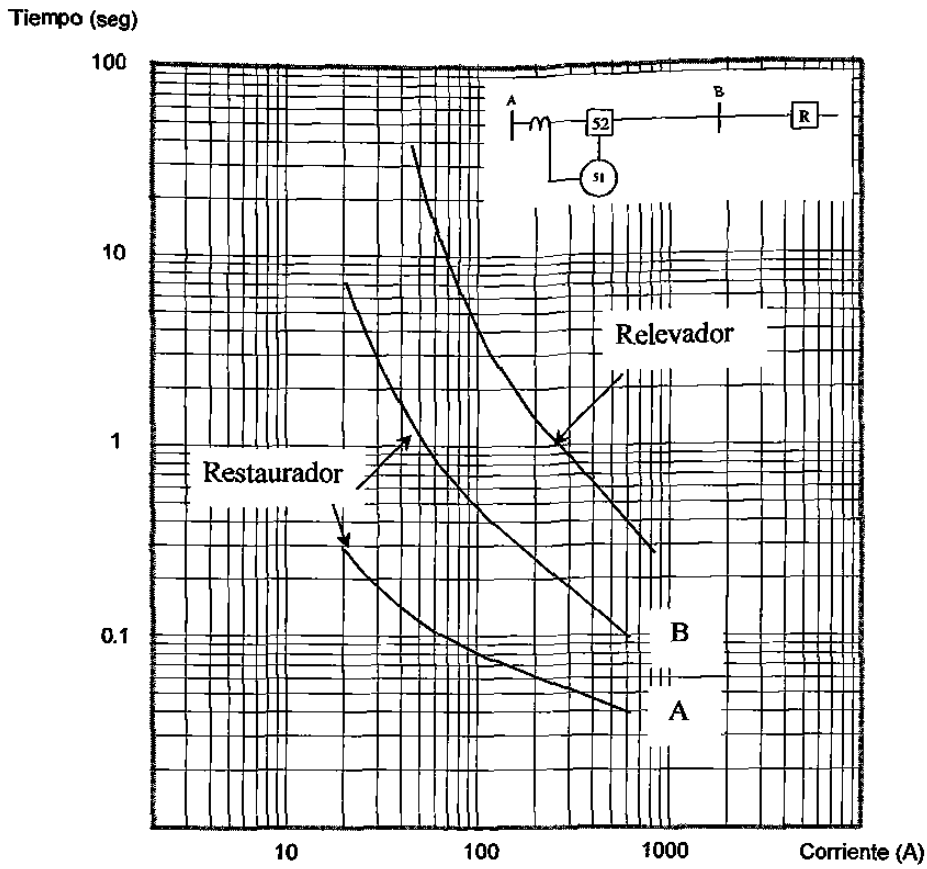


Fig. 2.5. Ejemplo de coordinación relevador - restaurador.

La información del porcentaje de recorrido del relevador se muestra en las siguientes tablas. El valor del viaje con signo positivo indica el recorrido hacia el disparo, y el signo negativo indica el recorrido hacia la reposición del relevador.

Operación de restaurador	Porcentaje de viaje del relevador
Disparo instantáneo	(0.036/0.65)(100)= +5.5%
Apertura de un segundo	(1/6)(100)= -16.7%
Recorrido del relevador	0%

Primer disparo con retardo	(0.25/0.65)(100)= +38.5%
Apertura de 1 segundo	(1/6)(100)= -16.7%
Segundo disparo con retardo	(0.25/0.65)(100)= +38.5
Recorrido del relevador	40%

Al relevador le falta 40% aproximadamente (0.24 segundos) para completar el recorrido.

Otra alternativa es realizar la coordinación con el relevador de sobrecorriente y la curva acumulada del restaurador (Fig. 2.6).

2.3.4 Coordinación relevador - seccionalizador

La aplicación de este arreglo se da entre el relevador en una subestación, como protección de un circuito de distribución y el seccionalizador como protección de un ramal sobre la línea de distribución. Esta aplicación representa una alternativa de solución para aquellas situaciones donde las características de los dispositivos de sobrecorriente no permiten establecen los márgenes de coordinación.

Para fallas permanentes, si la corriente que fluye a través del seccionalizador es mayor del 160% de la capacidad nominal de su bobina y el dispositivo de respaldo interrumpe la corriente de falla, el seccionalizador realizará una cuenta. Este proceso se

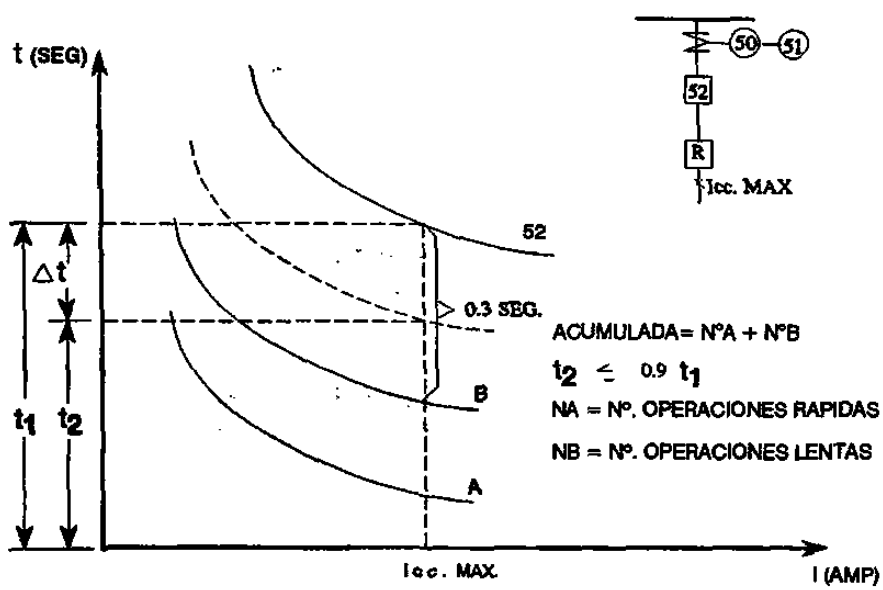


Fig. 2.6. Coordinación entre un relevador - restaurador.

repite hasta llegar a la cantidad preseleccionada de recuentos, abriendo sus contactos. Si la falla es transitoria, el seccionalizador se repone a su estado original, por lo que requiere un determinado tiempo que depende del número de conteos efectuados; para seccionalizadores hidráulicos es de aproximadamente un minuto y para los electrónicos puede ser seleccionable.

Como los seccionalizadores no tienen una característica de operación tiempo – corriente, su coordinación con un relevador no requiere la aplicación de un criterio donde se definan márgenes de tiempo entre curvas. El criterio de coordinación establece que solamente es necesario cumplir con los siguientes aspectos (Fig. 2.7):

- Asegurar que el número máximo de conteos ajustados en el seccionalizador sea igual o menor al número de recierres ajustados en el relevador.

- Vigilar que la mínima corriente de falla en la zona de cobertura del seccionalizador sea superior al 160% de su capacidad nominal.

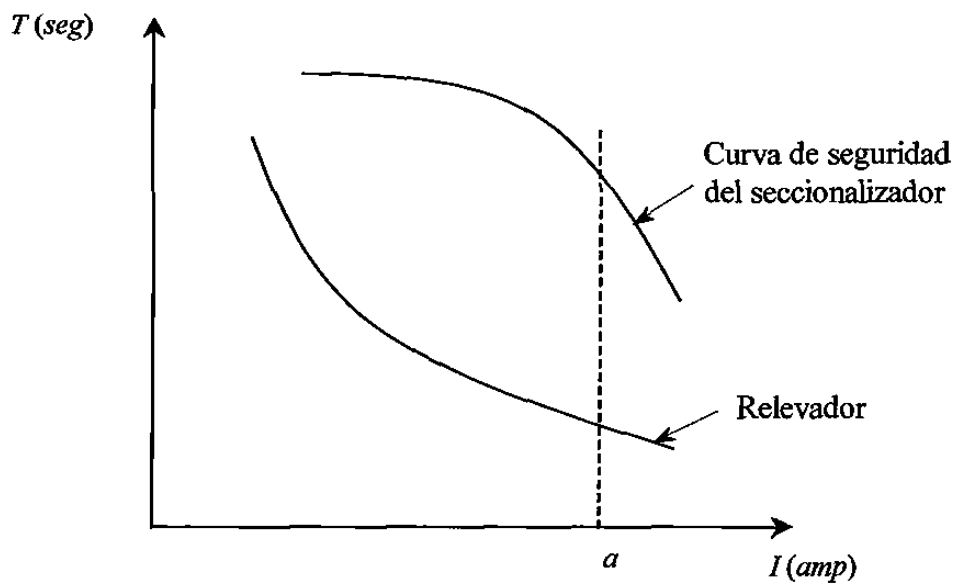


Fig. 2.7. Coordinación relevador – seccionalizador.

- Vigilar que cualquier falla dentro de la zona de cobertura del seccionalizador, sea detectada por el relevador.

- Verificar que la curva de daño del seccionalizador se encuentre por arriba de la característica tiempo-corriente del relevador, para el valor máximo de corriente de cortocircuito común a ambos dispositivos.

Para el caso específico donde el seccionalizador se encuentre ajustado a un solo conteo es importante asegurar que no se emplee un ajuste de instantáneo para el primer recierre del interruptor; con lo anterior se evita el re-encendido de la corriente de falla a través de los contactos del seccionalizador al no terminar su reposición.

2.4 Conclusiones

- La protección de sobrecorriente se diseña para operar cuando un incremento en la magnitud de corriente (mayor que una cantidad predeterminada) fluye hacia una porción del sistema eléctrico de potencia.

- Las zonas de protección son definidas sobre la base de que la corriente de falla decrece como la distancia de la subestación se incrementa. La selectividad en la protección de sobrecorriente es obtenida mediante el proceso de ajuste de parámetros llamado coordinación.

- Los relevadores fueron una de las primeras formas de protección en sistemas eléctricos de potencia y en la actualidad son una de las formas básicas de protección empleado en el sistema. Es un dispositivo capaz de actuar ante la aparición de fallas o disturbios y de actuar de forma automática en la emisión de señales de disparo y/o señales de alarma.

- Las funciones básicas de los fusibles son sensar las condiciones actuales del sistema, interrumpir una falla y coordinar con otros dispositivos de protección. El proceso de interrumpir la corriente que se origina en el fusible consta de tres etapas básicas: iniciación del arco eléctrico, eliminación del arco e interrupción de corriente.

- El restaurador automático provee funciones de disparo y recierre, eliminando prolongadas puestas fuera de servicio en sistemas de distribución debidos a fallas temporales o condiciones transitorias de sobrecorriente. Si la falla es permanente el restaurador permanecerá abierto después de un número predeterminado de operaciones (disparo y recierre) para aislar la sección fallada del resto del sistema. La operación de un restaurador es muy similar a la de un interruptor y un relevador, la principal diferencia entre los dos dispositivos es que el restaurador tiene menor capacidad de interrupción de corriente y su costo es considerablemente menor.

- El seccionalizador es un dispositivo de protección usado en conjunción con un restaurador o un relevador. El seccionalizador no interrumpe corrientes de falla, este cuenta el número de operaciones del dispositivo restaurador y abre mientras este dispositivo de respaldo esté abierto. Esto permite a los dispositivos de respaldo cerrar para restaurar la potencia a las secciones no falladas de la línea. Si la falla es temporal, el seccionalizador se restaurará después de un período de tiempo definido.

- Los elementos de protección que operan con el principio de sobrecorriente, son los dispositivos de protección con principio de operación más sencillos, pero son los más afectados por los regímenes cambiantes de operación y configuración del sistema eléctrico de potencia. Esto dificulta el proceso de ajuste y coordinación de la protección, sometiéndola a compromisos que degradan la calidad de la misma.

CAPÍTULO III

REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DE RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE

3.1 Introducción

El sistema de protección de un sistema eléctrico de potencia está compuesto por dispositivos que realizan acciones de protección, control y supervisión ante los diferentes estados operativos que afectan la calidad de servicio del sistema. En el caso específico de las redes de distribución, los dispositivos de protección operan por lo general bajo el principio de sobrecorriente, presentando respuestas dinámicas similares ante los diferentes disturbios existentes en el sistema; esto permite garantizar la selectividad de la protección.

Los dispositivos de protección de sobrecorriente comúnmente utilizados en sistemas de distribución aérea son: relevadores electromecánicos, relevadores analógicos de estado sólido, relevadores digitales, fusibles y restauradores. Los relevadores digitales de sobrecorriente deben emular la dinámica rotacional del disco de inducción de relevadores electromecánicos, el efecto de carga de capacitores de relevadores estáticos, y presentar una respuesta similar al efecto térmico originado en los fusibles y al efecto electromecánico de los restauradores hidráulicos.

El diseño de los relevadores digitales de sobrecorriente tiene como objetivo emular la operación de los restantes dispositivos de protección de sobrecorriente tanto en su respuesta dinámica de operación ante corrientes de falla variables en el tiempo, como en el estado de restauración que se origina al ser eliminada la falla, ya sea por el mismo dispositivo o por otra protección.

En este capítulo se muestra la representación matemática de un relevador de sobrecorriente convencional; esta formulación servirá de base para la representación del relevador adaptivo de sobrecorriente (capítulos 4 y 5). Se presenta la ecuación generalizada de la zona completa de funcionamiento del relevador de sobrecorriente compuesta por la zona de operación, ya reportada en la literatura [**21**], y la zona de reposición, presentada por primera vez en este trabajo.

3.2 Diagrama funcional de un relevador digital de sobrecorriente

En la Fig. 3.1 se representa el diagrama funcional de un relevador digital de sobrecorriente, en el que por simplicidad no se muestra el procesamiento analógico y la conversión análogo-digital de la señal. El filtro digital recibe como entrada las muestras digitalizadas $(i_r)_k$ de la señal de entrada, y entrega a su salida, para cada instante de muestreo, el módulo $(I_r)_k$ del fasor que representa la componente fundamental de $(i_r)_k$. Los elementos instantáneos y de tiempo inverso del relevador procesan la señal $(I_r)_k$ y, en su caso, emiten señales de disparo, que son procesadas y amplificadas por el elemento de salida.

3.3 Elemento instantáneo

En la Fig. 3.2 se muestra el diagrama funcional del elemento instantáneo del relevador, que consta básicamente de un comparador de amplitud y un contador. El comparador emite una señal de disparo en cada instante de muestreo en que la señal de entrada $(I_r)_k$ rebasa un umbral de operación I_a^i , que representa la corriente de arranque del elemento instantáneo:

$$(I_r)_k \geq I_a^i \tag{3.1}$$

Una vez activado el comparador, se mantiene emitiendo señales de disparo mientras $(I_r)_k$ no caiga por debajo de su umbral de reposición I_b^i , que constituye la corriente de reposición del relevador:

$$(I_r)_k \geq I_b^i \tag{3.2}$$

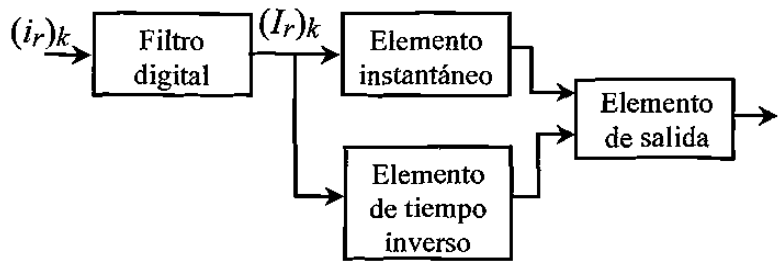


Fig. 3.1. Diagrama funcional simplificado de un relevador digital de sobrecorriente.

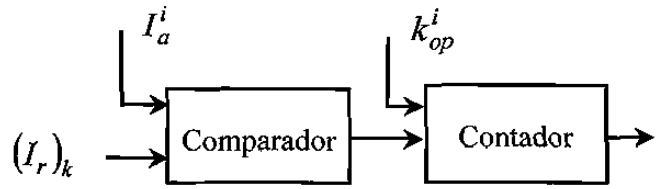


Fig. 3.2. Diagrama funcional del elemento instantáneo.

Es decir, el comparador tiene una pequeña histéresis, lo que asegura una operación confiable aún para corrientes variables cercanas al valor de arranque.

El contador de la Fig. 3.2 compara el número de señales de disparo consecutivas recibidas con un cierto umbral k_{op}^i ; cuando se alcanza ese umbral, emite la señal definitiva de disparo. Si el comparador interrumpe la emisión de señales de disparo antes del llenado del contador, éste reposiciona su contenido a cero. Con esto se mejora aún más la seguridad del elemento instantáneo. Si se denomina Δt el período de muestreo, el tiempo de operación T^i del elemento instantáneo está dado por:

$$T^i = k_{op}^i \, \Delta t \tag{3.3}$$

3.4 Elemento de tiempo inverso

En el diseño de los relevadores digitales de sobrecorriente de tiempo inverso se reproduce la dinámica de los demás dispositivos de protección de sobrecorriente y, en particular, la de los relevadores electromecánicos de disco de inducción. La versión digitalizada del relevador de sobrecorriente analógico debe emular el comportamiento dinámico del relevador ante corrientes de falla variables en el tiempo y el estado de reposición de operación al reducirse la corriente del sistema por debajo de la corriente de reposición del relevador.

Existen varios estándares que proponen normas para la representación analítica de las características tiempo-corriente de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso. Dos estándares aceptados internacionalmente son el IEEE Std C37.112-1996 [**13**] y el IEC Std. 255-4 [**20**].

3.4.1 Relevador analógico de sobrecorriente de tiempo inverso generalizado

Las características de operación tiempo-corriente de los relevadores analógicos de sobrecorriente son obtenidas utilizando funciones internas no lineales, que hacen complejo el diseño. En [**21**] se propone una expresión generalizada del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso para la zona de operación del relevador, que permite resolver en forma simple las tareas de análisis y diseño del relevador, aún en presencia de funciones no lineales. Para tener una representación completa del relevador es necesario extender el análisis para incluir la zona de reposición del relevador.

En este trabajo se introduce por primera vez el concepto de funcionamiento del relevador como un concepto general que incluye la operación y reposición. Así por ejemplo, un relevador electromecánico opera cuando funciona para abrir contactos tipo *b* (normalmente abiertos) y/o para cerrar contactos tipo *a* (normalmente cerrados). El relevador se reposiciona cuando funciona para abrir contactos tipo *a* y/o cerrar contactos tipo *b*.

El esquema estructural generalizado de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso analógico se presenta en la Fig. 3.3. El generador de funciones recibe como entradas la corriente I_r y el dato de ajuste de corriente I_{ajuste}, y forma las señales de salida $H(I)$ y $J(I)$, donde $I=I_r/I_{ajuste}$ es la corriente de entrada al relevador, normalizada con respecto a la corriente de ajuste. El integrador, representado en la Fig. 3.3 por su respuesta impulsional $G(t)$, es el elemento que introduce la variable tiempo en el proceso; genera la función de salida $G\{H(I),t\}$, que es su respuesta a una entrada escalón de magnitud $H(I)$. En el caso general, para un valor dado de $H(I)$, y cualquier configuración del integrador, se cumple la expresión:

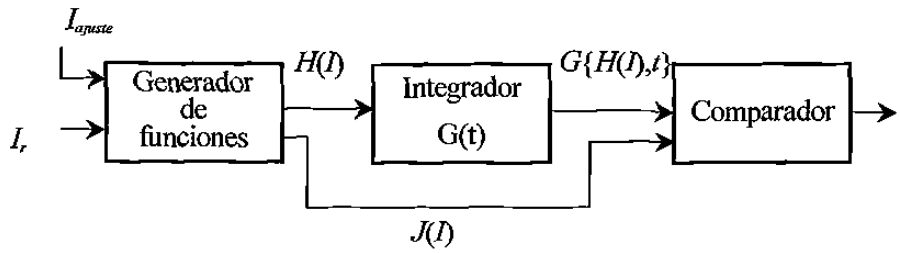


Fig. 3.3. Diagrama funcional de un relevador analógico de sobrecorriente de tiempo inverso generalizado.

$$G\{H(I),t\} = H(I)\,G(t) \tag{3.4}$$

donde $G(t)$ es la función de respuesta del integrador a una función escalón unitario de entrada.

El comparador (Fig. 3.3) utiliza la función $J(I)$ como valor de referencia de funcionamiento. La condición de funcionamiento se cumple cuando la señal $G\{H(I),t\}$ alcanza el valor de la función $J(I)$; en ese instante $t=T$, donde T es el tiempo de funcionamiento del relevador para ese valor de I. Tomando en cuenta (3.4), la condición de funcionamiento puede expresarse:

$$H(I)\,G(T) = J(I) \tag{3.5}$$

La característica tiempo-corriente del relevador puede expresarse por la ecuación $T=F(I)$, por lo que de (3.5) se obtiene:

$$G[F(I)] = \frac{J(I)}{H(I)} \tag{3.6}$$

La expresión (3.6) es la ecuación generalizada que describe el principio de funcionamiento de un relevador analógico de sobrecorriente de tiempo inverso. Esta ecuación expresa la relación funcional existente entre el generador de funciones ($H(I)$, $J(I)$), el integrador ($G(T)$) y la característica tiempo-corriente $T=F(I)$.

Es posible considerar dos casos particulares de (3.6): $J(I)=K$ y $H(I)=K$, donde K es un valor constante. En la Tabla 3.1 se dan las ecuaciones correspondientes a los casos particulares de (3.6) [**21**].

Cuando $I > 1$, el primer caso particular ($J(I)=K$) da lugar a una característica tiempo-corriente que es una hipérbola equilátera; en el segundo caso ($H(I)=K$) se obtiene una característica lineal (Fig. 3.4). Para $I < 1$ se obtiene una hipérbola desplazada del origen para $J(I)=K$ y una característica lineal para $H(I)=K$ (Fig. 3.5). Para obtener características diferentes de la hiperbólica o la lineal se requieren generadores de funciones no lineales.

TABLA 3.1. Casos particulares de la ecuación generalizada.

	$J(I)=K$	$H(I)=K$
Integrador ($G(t)=t$)	$G[F(I)]=\frac{K}{H(I)}$ $T=F(I)=\frac{K}{H(I)}$	$G[F(I)]=\frac{J(I)}{K}$ $T=F(I)=\frac{J(I)}{K}$

Por simplicidad en el diseño, la mayoría de los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso analógicos pertenecen al caso particular de $J(I)=K$, y tienen un integrador que puede representarse en forma simplificada por $G(t)=t$. En este caso la ecuación de la característica tiempo-corriente (ver Tabla 3.1) es:

$$T=F(I)=\frac{K}{H(I)} \tag{3.7}$$

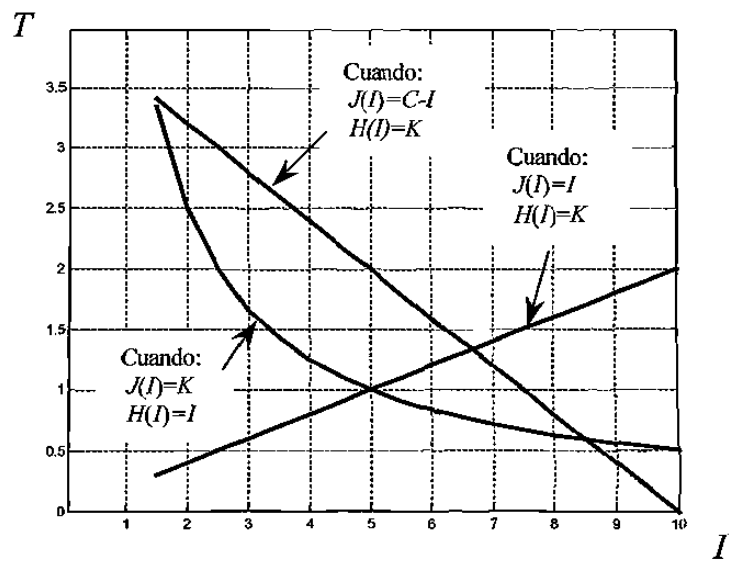


Fig. 3.4. Características de operación tiempo-corriente de un relevador con generador de funciones e integrador lineales ($I > 1$).

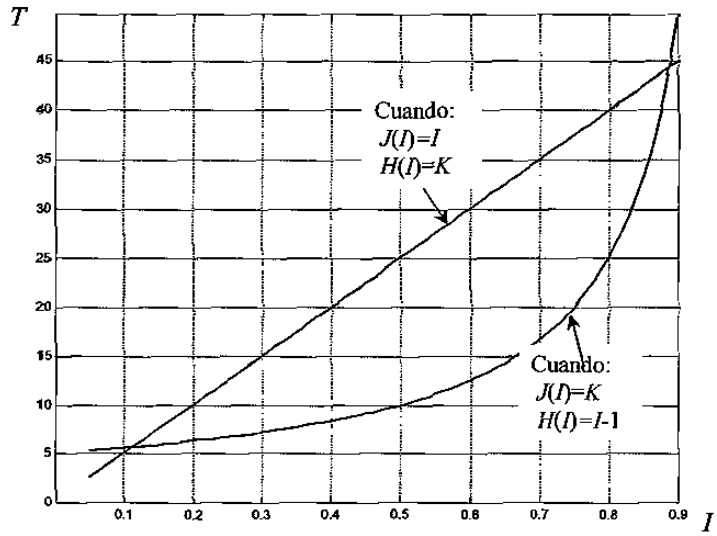


Fig. 3.5. Características de reposición tiempo-corriente de un relevador con generador de funciones e integrador lineales (I<1).

La ecuación generalizada (3.6) y su caso particular (3.7) son válidas para un valor constante de I. Si durante la falla I varía con el tiempo, (3.4) debe escribirse como una integral de convolución:

$$G\{H(I),t\} = \int_0^t H(I)dt \tag{3.8}$$

donde $H(I)$ es variable con el tiempo. La condición de funcionamiento $G\{H(I),t\}=J(I)=K$ para este caso, según (3.8), es:

$$\int_0^T H(I)dt = K \tag{3.9}$$

Si $H(I)$ es constante, (3.9) se reduce a (3.7). La ecuación (3.8) emula la posición del disco de un relevador electromecánico de sobrecorriente de tiempo inverso, o el voltaje de salida del integrador de un relevador electrónico analógico. Por su parte para $I > 1$, (3.9) representa el momento en que el disco completa el recorrido y el relevador cierra su contacto, o el voltaje del integrador alcanza el valor umbral del detector de nivel, y para $I < 1$ representa el regreso del disco hacia su posición de accionamiento después de una operación previa o la descarga del capacitor. Ambas ecuaciones son válidas para corrientes de entrada variable con el tiempo.

La expresión (3.10), propuesta por la norma IEEE Std C37.112-1996 **[13]**, emula la dinámica del disco de inducción de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso ante corrientes de falla variables. Esta expresión puede ser obtenida de (3.9) y (3.7) para $T=T_0$.

$$\int_0^{T_0} \frac{1}{F(I)}\, dt = 1 \tag{3.10}$$

donde $F(I)$ es la expresión analítica que define el tiempo de operación del relevador para cualquier valor de entrada I.

Se ha propuesto una representación gráfica de la ecuación generalizada (3.6) para la zona de operación **[21]**, en este trabajo se efectúa la representación de la zona de reposición en la misma base gráfica. Se utiliza un sistema de coordenadas cartesianas de cuatro cuadrantes. El primer cuadrante corresponde a la característica tiempo-corriente $T=F(I)$; en el segundo cuadrante se representa la función $G(T)$ del integrador; el tercer cuadrante sirve para representar las funciones $H(I)$, $J(I)$ y $J(I)/H(I)$ del generador de funciones; el cuarto cuadrante no se utiliza. De esta forma, el eje de ordenadas entre los cuadrantes primero y segundo es el tiempo de operación T; el eje de abscisas entre el primero y el cuarto cuadrantes, y el de ordenadas entre el tercero y el cuarto, son ejes de corriente I; el eje de abscisas entre el segundo y el tercer cuadrante tiene doble significación, y garantiza la igualdad de ambos miembros de (3.6): hacia el segundo cuadrante, el eje representa a $G(T)$, que equivale a $G[F(I)]$, y hacia el tercer cuadrante, representa a $J(I)/H(I)$, aunque también se utiliza para $J(I)$ ó $H(I)$.

Zonas de funcionamiento

Los relevadores de sobrecorriente son dispositivos de una señal eléctrica de entrada; la representación de su zona de funcionamiento puede realizarse sobre un eje numérico **[22]**. Los relevadores de sobrecorriente se comportan como elementos de máxima en su zona de operación, ya que operan para valores de señal mayores a un ajuste predefinido, y como elementos de mínima en su zona de reposición, ya que se reposicionan (retorno del disco de inducción o su equivalente electrónico o digital a su posición inicial) para valores de corriente menores a un valor establecido por el diseño del relevador electromecánico o programado en un relevador digital. Las zonas de operación y reposición se muestran en la Fig. 3.6.

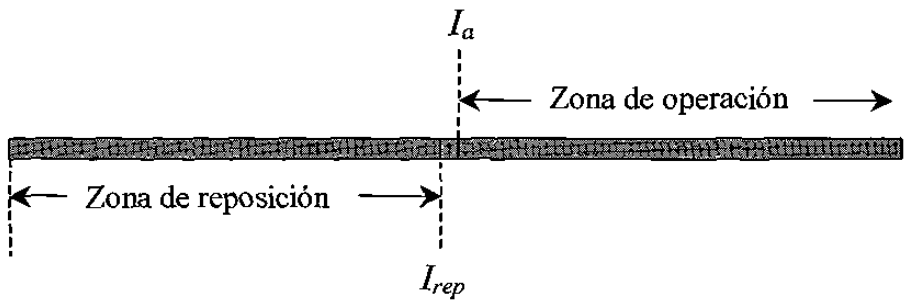


Fig. 3.6. Zonas de operación y reposición de un relevador de sobrecorriente.

Zona de operación. Es el conjunto de valores de corriente para los cuales el relevador efectúa la acción de cierre de contactos para el disparo del interruptor; comprende el intervalo de corrientes desde el valor de arranque hasta el cierre de contactos del relevador. El valor de I_{ajuste} para la zona de operación es $I_{ajuste} = I_a$ donde I_a es la corriente de arranque del relevador. Por razones de diseño y para evitar tiempos de operación excesivamente grandes, el múltiplo I toma valores a partir de 1.5; la norma IEEE Std. C37.112-1996 **[13]** define el intervalo de valores en zona de operación de $1.5 \leq I \leq 20$.

En la Fig. 3.7 se representa la característica de operación tiempo-corriente denominada "Muy Inversa" por la norma IEEE Std. C37.112-1996:

$$T_O = F_O(I) = \frac{A}{I^n - 1} + B \tag{3.11}$$

Donde, de acuerdo con (3.6):

$$J_O(I) = A, \qquad H_O(I) = I^n - 1, \qquad G[F_O(I)] = F_O(I) \tag{3.12}$$

Zona de reposición. La característica de reposición es la curva $T=F(I)$ que define el tiempo requerido para que la integral de la función de corriente $F(I)$ retorne a cero para valores de corriente inferiores al de reposición, cuando la integral tiene inicialmente el valor correspondiente a una condición de operación. Para la zona de reposición el valor de I_{ajuste} es $I_{ajuste} = I_{rep}$ donde I_{rep} es la corriente de reposición del relevador. La norma IEEE Std. C37.112-1996 define el siguiente intervalo de valores de I para la zona de reposición: $0.05 \leq I \leq 0.9$.

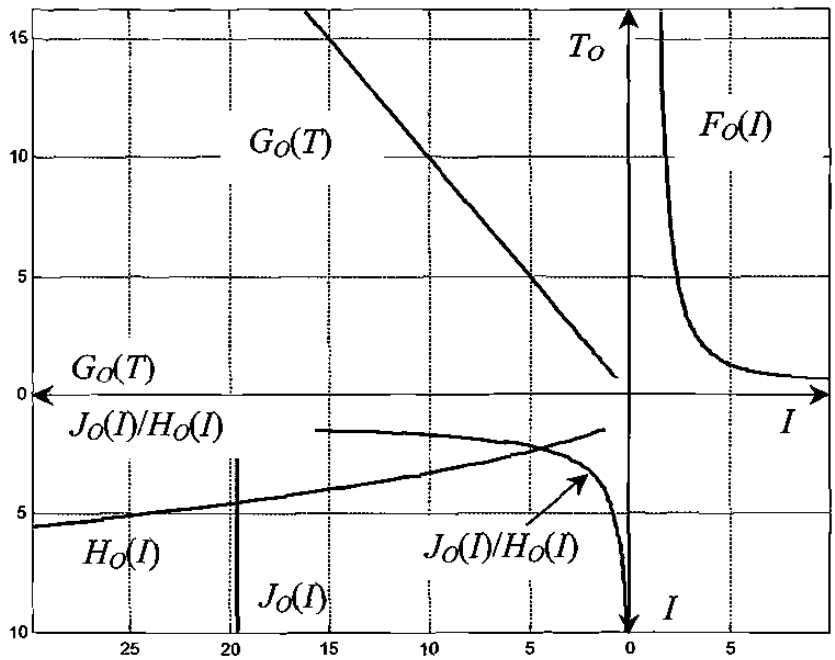


Fig. 3.7. Representación gráfica de la ecuación generalizada.

El tiempo de reposición puede ser importante en la coordinación con restauradores rápidos o para fallas repetitivas en cortos períodos de tiempo. Por lo general en la coordinación con fusibles y relevadores con tiempos de reposición elevados no son deseables tiempos reducidos de reposición. Los relevadores de disco de inducción típicamente inician su reposición cuando la corriente cae por debajo del 60% del valor de ajuste; esto complica su aplicación cuando el relevador realiza funciones de respaldo o cuando se utiliza como detector de fallas.

La norma IEEE Std. C37.112-1996 define la expresión para la característica de reposición de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso. Esta expresión puede ser obtenida de (3.6), siendo $J_R(I) = t_r$ el valor de tiempo de reposición para I=0, y $H_R(I)=I^2-1$.

$$T_R(I) = \frac{t_r}{I^2 - 1} \tag{3.13}$$

La representación gráfica utilizada para la característica de operación [**21**] puede ser extendida a la característica de reposición. La Fig. 3.8 representa la característica de reposición tiempo-corriente de un relevador con característica de operación "Muy Inversa" según la norma IEEE Std. C37.112-1996. Se observa que en la representación gráfica no están definidos valores negativos de las funciones; la función $H_R(I)$ se representa en su valor absoluto.

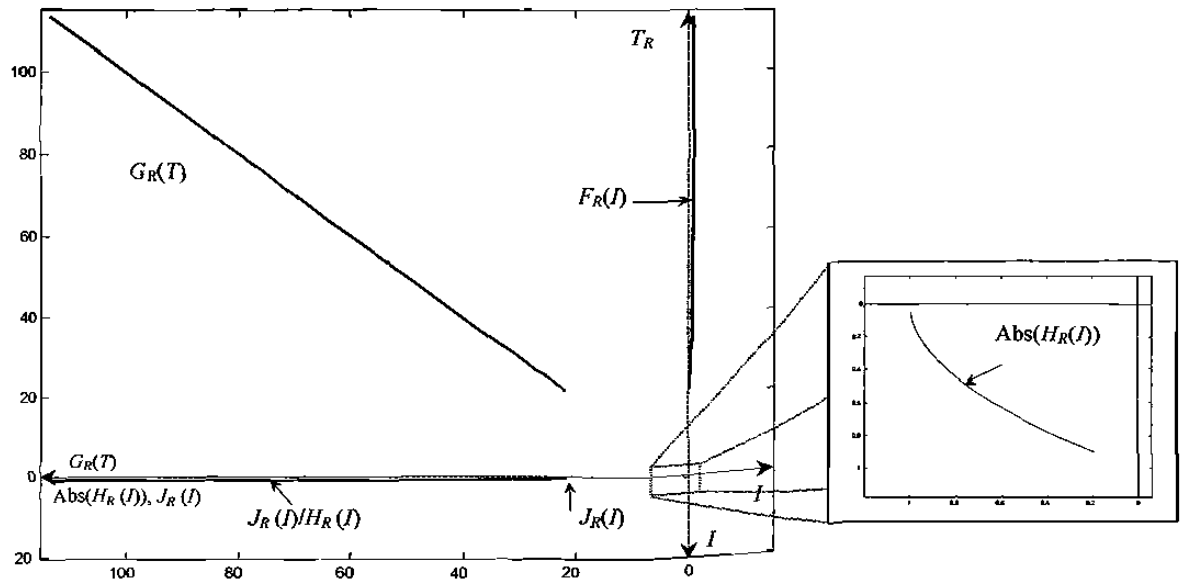


Fig. 3.8. Representación gráfica de la característica de reposición.

En la Fig. 3.9 se muestran las características de operación y reposición en un mismo plano.

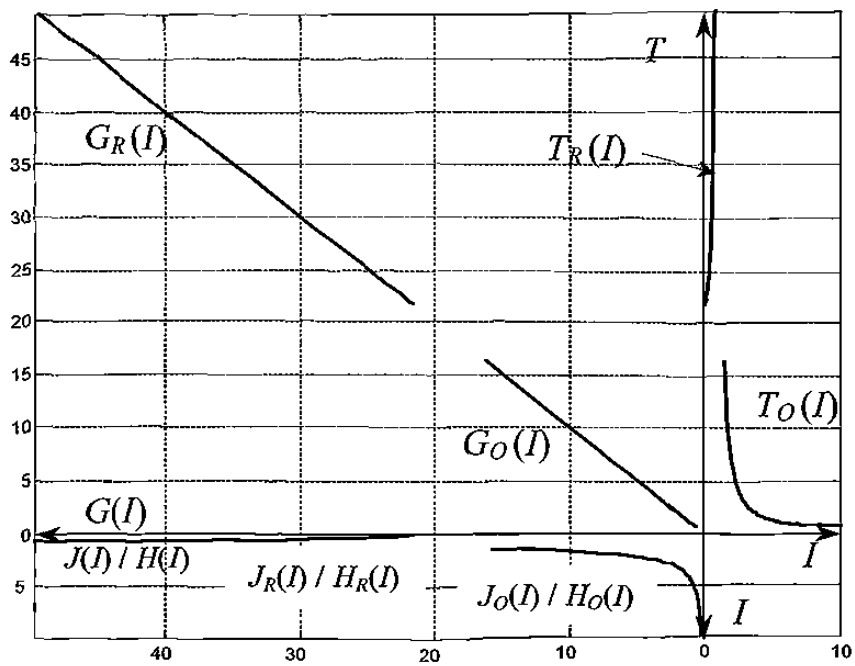


Fig. 3.9. Representación gráfica de las características de operación y reposición.

La ecuación generalizada (3.6) y su representación gráfica (Fig. 3.9) permiten resolver tareas de análisis y de diseño. Así por ejemplo, si se conocen las funciones de salida del generador de funciones ($H(I)$, $J(I)$) y del integrador ($G(T)$), es posible obtener la característica tiempo-corriente $T=F(I)$ del relevador, que es una tarea de análisis. Por el contrario, se puede partir de la característica $T=F(I)$ deseada para diseñar el relevador, encontrando sus funciones $H(I)$, $J(I)$ ó $G(T)$.

3.4.2 Relevador digital de sobrecorriente de tiempo inverso generalizado

El diagrama funcional simplificado de una versión generalizada del relevador digital de sobrecorriente de tiempo inverso se presenta en la Fig. 3.10. El generador de funciones recibe como entradas el fasor $(I_r)_k$, que representa la componente fundamental de la corriente, y el dato de valor de ajuste I_{ajuste}, y forma las señales de salida $H(I_k)$ y $J(I_k)$, donde $I_k = (I_r)_k / I_{ajuste}$ es la magnitud del fasor, normalizada con respecto a la corriente de ajuste. No se representa en la Fig. 3.10 el filtro digital, que estima los fasores a partir de las muestras de corriente. La señal de salida del integrador lineal es la aproximación discreta de la integral (3.8):

$$G_k = \sum_{k=1}^{k} H(I_k)\Delta t = \Delta t \sum_{k=1}^{k} H(I_k) \tag{3.14}$$

donde G_k representa el valor acumulado del integrador en el instante de procesar la muestra k y Δt es el período de muestreo. El valor de la función generada $H(I_k)$ depende de la magnitud del fasor de corriente al procesar la muestra k; por tanto, la expresión descrita en (3.14) considera el comportamiento dinámico del relevador de sobrecorriente ante corrientes de falla variables. Esta ecuación es la base del relevador digital.

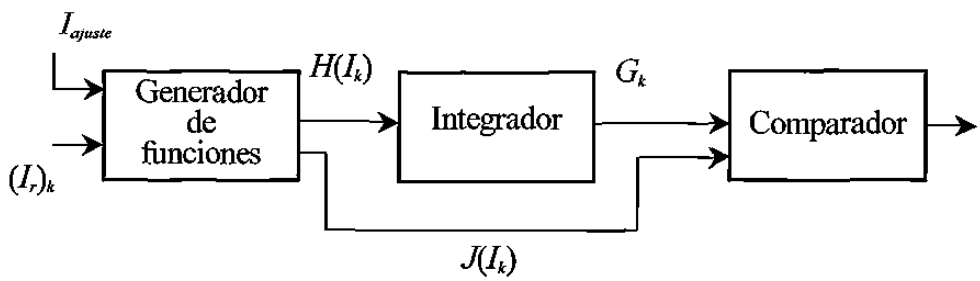


Fig. 3.10. Versión digital de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso generalizado.

En el comparador se hace la comparación de amplitud de la señal G_k con el valor $J(I_k)$. La condición de funcionamiento se cumple cuando:

$$G_{k_F} = \Delta t \sum_{k=1}^{k_F} H(I_k) = J(I_{k_F}) \tag{3.15}$$

El funcionamiento del relevador tiene lugar en el instante en que k alcanza un valor igual a k_F y se cumple la ecuación (3.15). El tiempo de funcionamiento está dado por:

$$T = k_F \Delta t \tag{3.16}$$

Despejando Δt en (3.15) y sustituyendo en (3.16):

$$T = k_F \frac{J(I_{k_F})}{\sum_{k=1}^{k_F} H(I_k)} \tag{3.17}$$

Si para fines de análisis se considera constante la corriente durante la falla (I_k=I, $H(I_k)$=$H(I)$, $J(I_k)$=$J(I)$), (3.17) se reduce a la versión de la ecuación generalizada (3.6) en que el integrador es lineal ($G(t) = t$):

$$T = F(I) = \frac{J(I)}{H(I)} \tag{3.18}$$

Dentro de cada período de muestreo la corriente permanece constante en el valor calculado en la muestra anterior. Por tanto, la ecuación (3.18) también puede escribirse para I=I_k (período de muestreo correspondiente a la muestra k):

$$F(I_k) = \frac{J(I_k)}{H(I_k)} \tag{3.19}$$

Despejando $H(I_k)$ en (3.19) y sustituyendo en (3.15), se tiene:

$$\frac{J(I_{k_F})}{\Delta t \sum_{k=1}^{k_F} \left[\frac{J(I_k)}{F(I_k)} \right]} = 1 \tag{3.20}$$

La ecuación (3.20) es la ecuación generalizada del relevador digital de sobrecorriente de tiempo inverso. Esta ecuación equivale al caso particular de (3.6) en que el integrador es lineal. Como en los relevadores analógicos, en los relevadores digitales de sobrecorriente por lo general

se hace la simplificación de $J(I_k) = J(I_{k_F}) = K$. Sustituyendo esta condición en (3.20), se obtiene la forma digital de la expresión dinámica (3.10), propuesta en [**13**].

$$\sum_{k=1}^{k_F}\left(\frac{1}{F(I_k)}\right)\Delta t = 1 \tag{3.21}$$

3.4.3 Función integrador

La relación funcional descrita en (3.6) y su forma discreta (3.19) son válidas tanto para la zona de operación como para la zona de reposición de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso. La función $H(I_k)$ representa el comportamiento dinámico del disco de inducción provocado por el par mecánico de origen electromagnético en zona de operación ($H_O(I_k)$), y por el muelle de retención del relevador en zona de reposición ($H_R(I_k)$). La función $J(I_k)$ representa la palanca de tiempo en zona de operación ($J_O(I_k)$) y el tiempo de retorno del disco de inducción hacia la posición de accionamiento desde la posición de operación ($J_R(I_k)$). Las fuerzas presentes en cada zona establecen expresiones diferentes para las funciones $H(I_k)$ y $J(I_k)$ para cada zona de operación.

Aunque para cada zona están definidas expresiones diferentes para $H(I_k)$ y para $J(I_k)$, el proceso de integración descrito en (3.14) es igual para ambas zonas. La integración de la función $H(I_k)$ para valores $I_k \geq 1$ es positiva, emulando un avance del disco de inducción hacia la posición de operación para relevadores electromecánicos. La integración de la función $H(I_k)$ para valores $0 \leq I_k < 1$ es negativa, representando un retorno del disco de inducción hacia su posición inicial. Por tanto, el valor de I_k determina el valor y el signo de la integral, y el valor acumulado del integrador G_k. En (3.22) se muestra la expresión de la integración para cada zona.

$$\Delta G_k = \begin{cases} \Delta t \; H_O(I_k) & I_k \geq 1 \quad \textit{Zona de Operación} \\ \Delta t \; H_R(I_k) & 0 \leq I_k < 1 \quad \textit{Zona de Reposición} \end{cases} \tag{3.22}$$

$$\textit{donde}: \quad G_k = G_k + \Delta G_k$$

La representación del valor acumulado del integrador (G_k) o, análogamente, la posición del disco de inducción de un relevador electromecánico en cualquier instante, está definida por (3.14), donde la función $H(I_k)$ está definida para cada zona. En la zona de operación la integración de la función es positiva, incrementando el valor acumulado en el integrador (recorrido del disco hacia la posición de disparo); en la zona de reposición la integración de la función es negativa y decrementa el valor acumulado en el integrador (retorno del disco hacia la posición de accionamiento).

La condición de operación y reposición se satisface cuando:

$$G_k = \sum_{k=1}^{k_{op}} H_O(I_k)\Delta t = 1 \;, \; G_k = \sum_{k=1}^{k_{rep}} H_R(I_k)\,\Delta t = 0 \tag{3}$$

donde k_{op} y k_{rep} son las muestras de operación y reposición respectivamente.

El contenido del integrador está limitado entre valores de cero y uno:

$$G_k \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 1 \end{cases} \tag{3.23}$$

Cuando el contenido del integrador está en cero, el relevador está en su posición inicial; cuando el contenido del integrador es igual a uno, el relevador opera. Si durante el viaje de reposición del disco ocurre una nueva condición de disparo, por ejemplo la segunda operación no exitosa de un restaurador, el contenido del integrador G_k comenzará a aumentar de nuevo e indicará la posición relativa del disco de inducción.

3.5 Limitaciones de la protección convencional de sobrecorriente

La protección de sobrecorriente utiliza la corriente como parámetro indicador del lugar del cortocircuito, teniendo en cuenta que su magnitud depende de la distancia eléctrica hasta el punto de falla. Sin embargo, hay dos problemas fundamentales: a) la corriente de cortocircuito depende también del tipo de falla y del régimen de operación del sistema; b) la corriente de carga o de pre-

falla puede ser comparable con la de cortocircuito, lo que dificulta la discriminación entre el régimen normal y el de falla. De estos problemas se derivan las limitaciones de la protección de sobrecorriente.

En la Fig. 3.11 se representa una red radial (Fig. 3.11a) y la gráfica de variación de la corriente de cortocircuito como función de la distancia eléctrica l hasta el punto de falla (Fig. 3.11b). La curva 1 corresponde al nivel máximo de corriente de cortocircuito, y la 2, al nivel mínimo. En la Fig. 3.11 también se muestran las gráficas $T=f(l)$ que reflejan la relación entre el tiempo de operación T y la distancia l a la falla para los relevadores n y n-1, que cuentan con un elemento instantáneo y otro de tiempo inverso. En el relevador n las corrientes de arranque son I_a^i para el elemento instantáneo, e I_a para el elemento de tiempo inverso.

Una limitación de la protección de sobrecorriente es que su alcance (longitud de la zona de protección) depende del tipo de cortocircuito y del régimen de operación del sistema. En la Fig. 3.11 puede observarse que el alcance del elemento instantáneo de la protección n se moverá entre los límites $l_{mín}^i$ y $l_{máx}^i$, lo que introduce incertidumbre en la longitud de línea que cuenta realmente con protección primaria; puede darse incluso el caso de que la zona de protección instantánea desaparezca completamente en condiciones de generación mínima. El alcance del elemento de tiempo inverso también se desplaza entre los límites $l_{mín}$ y $l_{máx}$, pudiendo llegar a dejar de respaldar debidamente a la línea adyacente para generación mínima, como se muestra en la Fig. 3.11. Esto es particularmente probable en la protección de fase, en que la corriente de carga máxima establece un límite inferior al valor de la corriente de arranque del relevador, limitando así su sensibilidad para la detección de fallas en condiciones de generación mínima.

Una alternativa para mejorar la sensibilidad de la protección de sobrecorriente de fase es añadir retención o control por voltaje; esta solución es clásica en la protección de respaldo para fallas externas en generadores **[23,24]**, pero no resulta adecuada en la protección de líneas de transmisión. En este caso un cortocircuito bifásico en una de las líneas que sale de una barra reduce por igual el voltaje de todas las líneas, y en las líneas no falladas la corriente durante la falla puede ser mayor que la nominal; esto se debe a que la impedancia de secuencia negativa de los motores de la carga es menor que la de secuencia positiva. En estas condiciones las protecciones de sobrecorriente de las líneas no falladas pueden operar incorrectamente, aún cuando tengan retención por voltaje.

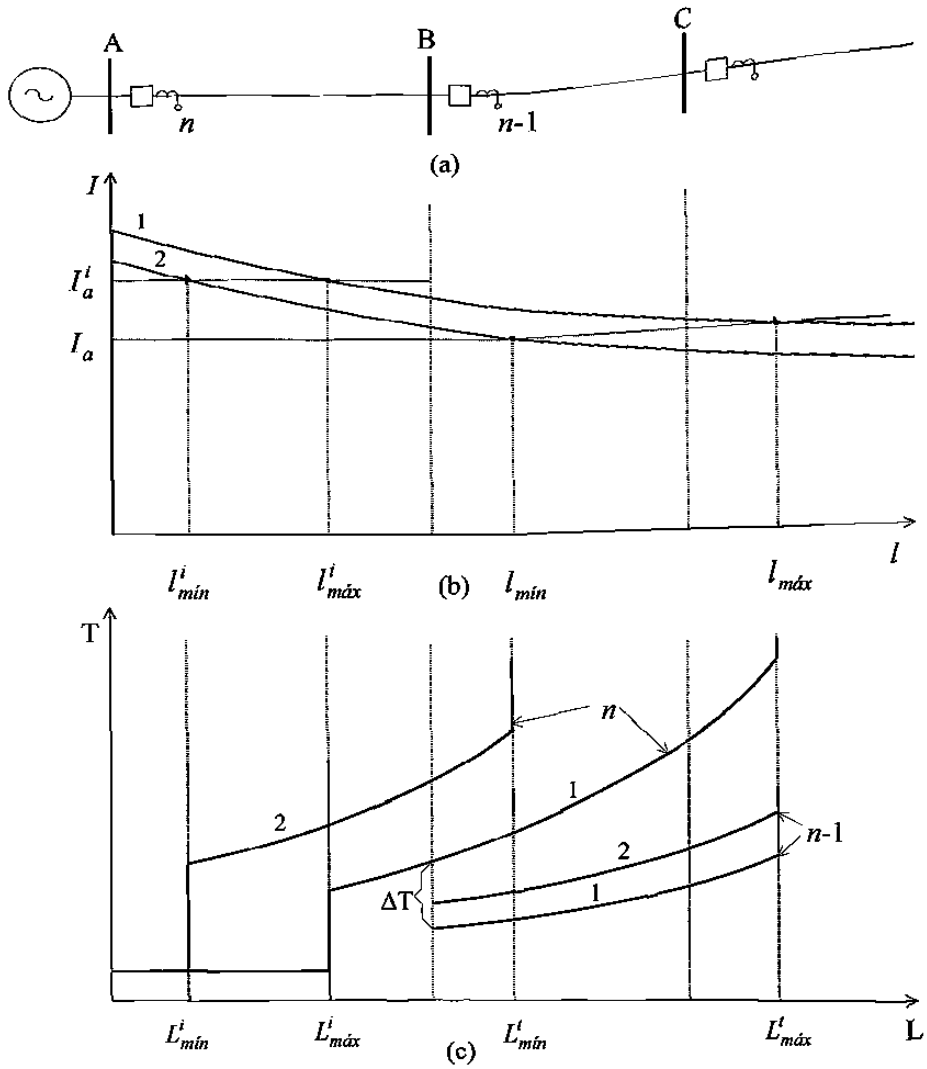


Fig. 3.11. Protección de sobrecorriente de una red radial: a) esquema de la red; b) gráficas de corriente de cortocircuito en función de *l*; c) gráficas *T=f(l)*.

En el caso de las protecciones de sobrecorriente contra fallas a tierra no existen problemas de sensibilidad asociados a la corriente de carga, pues responden únicamente a la componente de secuencia cero de la corriente.

Una segunda limitación de la protección de sobrecorriente es que el tiempo de operación depende también del tipo de falla y del régimen de operación del sistema. Esta situación se ilustra en las gráficas *T=f(l)* de la Fig. 3.11c, en las que se aprecia que las curvas para generación mínima (curvas 2) representan tiempos de operación mayores que para generación máxima (curvas 1). La coordinación entre los relevadores *n* y *n*-1 se garantiza para condiciones de generación máxima

mediante el intervalo de selectividad ΔT, pero el margen de coordinación es mucho mayor para otros regímenes de operación.

Una alternativa clásica para la solución de estos problemas y, en particular, el referido a la insuficiente sensibilidad de la protección de sobrecorriente de fase en redes con niveles bajos de corriente de cortocircuito, es la utilización de relevadores de distancia. La medición de impedancia permite una mejor discriminación entre los estados de carga y de falla por dos razones básicas: a) la magnitud de la impedancia varía más que la de la corriente cuando ocurre una falla (debido a que el voltaje se reduce por efecto de la falla); b) el ángulo de la impedancia varía al ocurrir la falla, lo que sirve como un indicador adicional del estado de falla. Dado que la coordinación de relevadores de sobrecorriente y de distancia es difícil, en las redes de distribución se han utilizado elementos de distancia para supervisar los elementos de sobrecorriente.

Una solución que resuelve el problema de sensibilidad y parcialmente el problema de tiempo de operación es utilizar la corriente de secuencia negativa en el relevador de sobrecorriente. Este método presenta una alta sensibilidad, debido a que su valor de ajuste no es afectado por la corriente de carga. La protección de sobrecorriente de secuencia negativa se analiza en detalle en el Capítulo VI.

3.6 Criterios adaptivos para el elemento de tiempo inverso

Una alternativa de solución a las limitaciones de la protección de sobrecorriente es dotarla de la capacidad de variar automáticamente sus parámetros de ajuste dependiendo del régimen de operación del sistema, es decir, convertirla en adaptiva.

Un relevador de sobrecorriente adaptivo de tiempo inverso debe tener la capacidad de variar su corriente de arranque y su curva de tiempo en función de la corriente de carga de la línea protegida. La adaptación del relevador requiere dos lógicas adaptivas: a) adaptación de la corriente de arranque, para mejorar la sensibilidad de la protección; b) adaptación del tiempo de operación, para garantizar que la ecuación de coordinación se cumpla para cualquier nivel de corriente de falla.

3.7 Conclusiones

- La expresión generalizada del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso tanto para la zona de operación como de reposición del relevador propuesta en este trabajo de tesis, permite resolver en forma simple las tareas de análisis y diseño del relevador, aún en presencia de funciones no lineales.

- Se propone una representación gráfica de la ecuación generalizada para la zona de operación y la zona de reposición. La ecuación generalizada y su representación gráfica permiten resolver tareas de análisis y de diseño. Así por ejemplo, si se conocen las funciones de salida del generador de funciones y del integrador, es posible obtener la característica tiempo-corriente $T=F(I)$ del relevador. Si se parte de la característica $T=F(I)$ deseada para diseñar el relevador, es posible determinar las funciones $H(I)$, $J(I)$ ó $G(T)$.

- La protección de sobrecorriente tiene el inconveniente de que su alcance y su tiempo de operación dependen en gran medida del tipo de cortocircuito y del régimen de operación del sistema. Esto se manifiesta en limitaciones de sensibilidad en la protección de fase y en tiempos de operación elevados, sobre todo para niveles reducidos de generación.

- La introducción de conceptos adaptivos es una alternativa para la solución de las limitaciones funcionales de un relevador de sobrecorriente, y permite conservar la compatibilidad con las protecciones de sobrecorriente convencionales.

- La expresión generalizada propuesta del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso es adecuada para realizar la representación matemática del relevador adaptivo de sobrecorriente, ya que considera la zona completa de funcionamiento y a que su análisis se basa en la consideración de funciones independientes en el relevador.

- La versión adaptiva del relevador de sobrecorriente debe ser capaz de modificar las corrientes de arranque de los elementos instantáneo y de tiempo inverso y la curva de tiempo del elemento de tiempo inverso.

CAPÍTULO IV

ADAPTACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE

4.1 Introducción

En el Capítulo III se propuso como solución a las principales limitaciones de la protección de sobrecorriente dotarla de la capacidad de variar automáticamente sus parámetros de ajuste en dependencia del régimen de operación del sistema, es decir, convertirla en adaptiva. Un relevador de sobrecorriente adaptivo debe tener la capacidad de variar su corriente de arranque y su curva de tiempo en función de la corriente de carga de la línea protegida.

La adaptación de la corriente de arranque de un relevador de tiempo inverso se puede realizar utilizando dos valores de corriente: el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente de fase, y el valor de demanda de la corriente. La diferencia en la utilización de estas dos alternativas radica en el grado de complejidad de la lógica que controla la operación del relevador. En la primera alternativa se utiliza una lógica de control de la corriente de arranque basada en un algoritmo detector de fallas para discriminar entre los diferentes escenarios operativos del sistema, y se modifica el ajuste del relevador de acuerdo con el estado vigente del sistema. En la segunda alternativa el relevador realiza el cálculo de demanda de la corriente; la lógica de operación se simplifica, al no requerir la detección del instante de falla. La evaluación de las alternativas para la adaptación de la corriente de arranque del relevador de tiempo inverso se realiza analizando su comportamiento ante señales de prueba que representan diferentes escenarios operativos.

La adaptación del elemento instantáneo del relevador de sobrecorriente se realiza utilizando el ajuste de corriente de arranque del elemento de tiempo inverso como indicativo indirecto del nivel de generación del sistema eléctrico de potencia.

4.2 Principio básico de adaptación de la corriente de arranque

La solución a la falta de sensibilidad del relevador de sobrecorriente es dar a la corriente de arranque del relevador un comportamiento dinámico. Esto puede realizarse con grupos de ajuste [7,8]; para esta alternativa es necesario contar con una computadora central que calcule y envíe a través de canales de comunicación los nuevos ajustes, esta variante es costosa y con poco incremento de sensibilidad debido a la cantidad limitada de ajustes definidos en cada grupo. En este trabajo se propone hacer variable la corriente de arranque I_a del elemento de tiempo inverso en función de la corriente de carga I_c ; para tal fin se propone aplicar un valor constante aditivo o multiplicativo a la corriente de carga. Con este proceso se obtiene un valor dinámico en la corriente de arranque del relevador. Al variar este ajuste, se varía también la sensibilidad del relevador: durante regímenes de carga mínimos el relevador convencional presenta menor sensibilidad y el relevador adaptivo tendrá mayor sensibilidad. En la Fig. 4.1 se presentan las dos alternativas de adaptación. Se observa que en la variante multiplicativa ($I_a= k\ I_c$) el margen de flotación es variable, dependiendo de la magnitud de la corriente de carga; esta variante surge del cálculo establecido del relevador convencional de sobrecorriente donde se propone que en lugar de la corriente de carga máxima ($I_{cmáx}$) sea la corriente vigente de carga (I_c). En la variante aditiva ($I_a= I_c+\Delta I$) se mantiene este margen constante; este procedimiento propuesto por primera vez en este trabajo, es realizado debido a que no es necesario que el margen entre I_a e I_c varíe con el estado de carga del sistema eléctrico. En demanda mínima con el principio multiplicativo el margen es menor, e incluso con valores muy pequeños de corriente, este margen reducido puede comprometer la seguridad del relevador ante variaciones sustanciales de la corriente de carga.

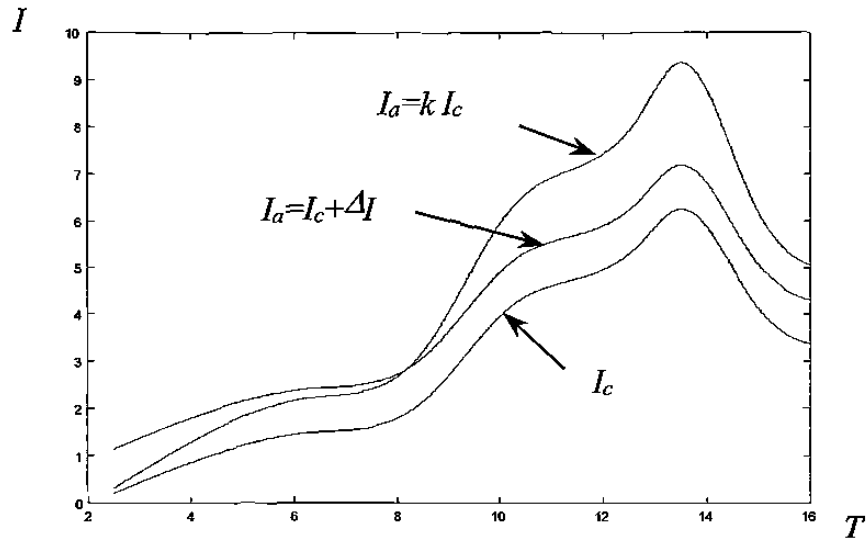


Fig. 4.1. Corriente de arranque adaptiva: aditiva y multiplicativa.

La variante aditiva de adaptación de la corriente de arranque es la más adecuada para la seguridad del relevador al mantener un margen constante. Esta alternativa es coherente con el hecho de que la magnitud del incremento (ΔI) que puede experimentar la carga en un momento dado es relativamente independiente del valor de la carga (I_c) en ese momento.

Sobre la base del estudio anterior se propone utilizar la variante aditiva para al adaptación de la corriente de arranque:

$$I_a = I_c + \Delta I \tag{4.1}$$

donde ΔI representa un margen de seguridad, con un valor típico del 15% de la corriente de carga máxima, considerando 5% de error en el sistema de protección y 10% de factor de seguridad.

La ecuación (4.1) asegura que el elemento de tiempo inverso tiene en todo momento la corriente de arranque mínima necesaria para evitar la operación incorrecta por efecto de la carga. Esto le confiere una gran sensibilidad, pues en condiciones de demanda mínima (que es cuando hay niveles de cortocircuito reducidos) el valor de I_a también es pequeño.

Es necesario establecer un límite máximo del valor de la corriente de arranque adaptiva del relevador para efectos de coordinación; este valor de arranque máximo es el asignado a un relevador convencional:

$$I_{a\,conv} = k\, I_{c\,máx} \tag{4.2}$$

donde k es un factor que considera el margen de seguridad antes mencionado y el crecimiento futuro de la carga (valores típicos de k son 1.5 a 2) e $I_{c\,máx}$ es el valor de corriente de carga máxima. La lógica del relevador de sobrecorriente adaptivo debe garantizar que la corriente de arranque no rebase el valor máximo dado por (4.2):

$$I_a \leq I_{a\,conv} \tag{4.3}$$

La adaptación de la corriente de arranque de un relevador de tiempo inverso, se puede realizar utilizando dos valores de la corriente de carga I_c en (4.1): el valor eficaz fundamental de la corriente de fase, y el valor de demanda de la corriente. A continuación se estudian ambas alternativas para determinar cual de ellas presenta mejores características para el relevador adaptivo.

4.3 Valor eficaz fundamental de la corriente de fase

El criterio de adaptación de la corriente de arranque basado en el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente, realiza un proceso de actualización constante del valor de arranque del relevador. La actualización puede hacerse, por ejemplo, en cada ciclo de frecuencia fundamental; el valor de ajuste presenta prácticamente la misma dinámica que el valor eficaz fundamental de la corriente del elemento protegido. Con este principio, se obtiene una alta sensibilidad a los cambios en el régimen de operación en estado estable del sistema eléctrico de potencia.

Se requiere una cierta lógica de control para discriminar entre variaciones de carga y fallas en el sistema. Esta lógica debe mantener constante el valor de I_a cuando ocurra un cortocircuito y actualizar su valor durante los estados normales de carga en la línea protegida.

La lógica para el control adaptivo de la corriente de arranque incluye una función de detección de fallas, para identificar los estados de carga y de falla, y un conjunto de funciones orientadas a controlar el valor de la corriente de arranque.

4.3.1. Detección de fallas

La detección del instante en que ocurre la falla es la base para el control adaptivo de la corriente de arranque del relevador de sobrecorriente; la detección del inicio de la falla puede hacerse a partir del cambio abrupto en la señal de corriente. Un detector de fallas debe tener dos características fundamentales: a) suficiente sensibilidad para detectar fallas con corrientes reducidas; b) inmunidad al ruido presente en la corriente de falla.

Se analizaron dos alternativas básicas para detectar la discontinuidad provocada por la falla en las señales de entrada al relevador. En una de ellas [5] se establece una comparación que permite determinar si ocurre un incremento en la amplitud de la señal; en este trabajo se denomina diferencia periódica de corriente a esta alternativa. El otro método es el denominado detector transitorio [25]. A continuación se presentan y comparan ambos métodos.

4.3.2. Diferencia periódica de corriente

Este método consiste en comparar los valores de la corriente correspondientes a dos instantes separados un tiempo igual a un período de frecuencia fundamental. La forma típica de esta comparación es la instantánea, es decir, muestra a muestra, aunque no se excluye la posibilidad de comparar los valores medios o eficaces de la corriente para dos ciclos consecutivos.

El método parte de los valores de las muestras y no realiza un filtrado efectivo, por lo que los resultados pueden alterarse si hay ruido presente en la corriente de falla. El valor del incremento de corriente $\Delta i[k]$ en el instante correspondiente a la muestra k es:

$$\Delta i[k] = i[k] - i[k-N] \tag{4.4}$$

donde N es el número de muestras por ciclo de frecuencia fundamental.

El comportamiento del detector de fallas dado por (4.4) para diferentes señales de prueba, se presenta en la Fig. 4.2. El sistema de prueba utilizado para generar las señales de prueba se describe en [26]. Se aplicaron señales de fallas obtenidas para modelos del sistema con diversas representaciones de líneas (cortas y largas), con y sin componente aperiódica

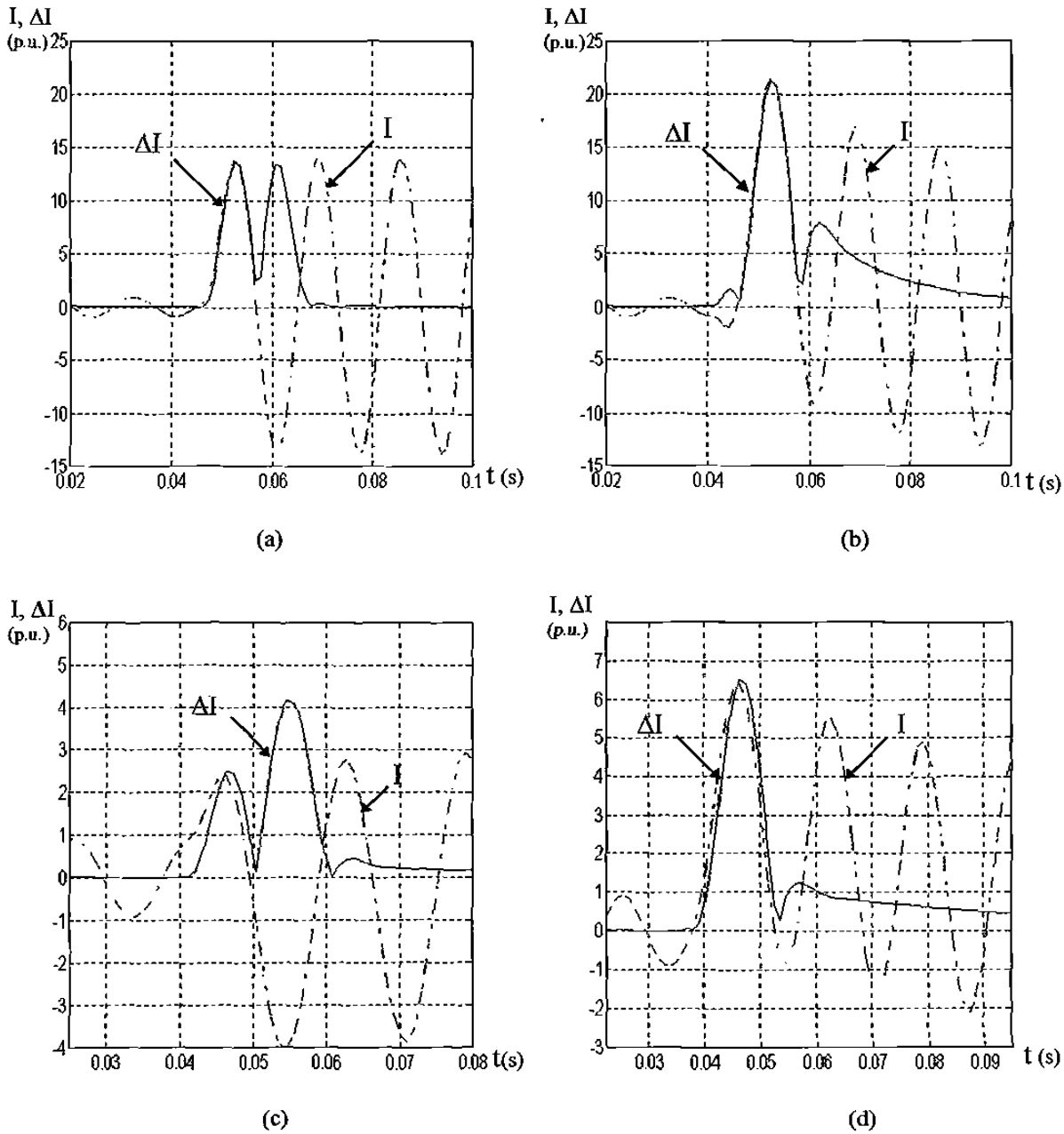


Fig. 4.2. Salidas del algoritmo de diferencia periódica de corriente: a) falla sin componente aperiódica en una línea corta; b) falla con componente aperiódica en una línea corta; c) falla con componente aperiódica en una línea larga; d) falla con máxima componente aperiódica en una línea larga.

exponencial. El comportamiento requerido para el detector de fallas en la aplicación dada en este trabajo es que la señal resultante del algoritmo tenga un valor apreciable, con una duración cercana al tiempo que dura el cruce de la ventana de datos por la discontinuidad de la señal provocada por la falla. Es decir, la señal de salida del detector debe adquirir valores elevados desde que comienza el cruce de la ventana de datos por la discontinuidad, y debe caer abruptamente a valores cercanos a cero cuando el cruce termina, con independencia de la posible presencia de ruido en las señales de falla. Ese comportamiento se observa en la Fig. 4.2a, en que la corriente de falla es simétrica (no contiene componente aperiódica exponencial). En la Fig. 4.2 se denota por I la corriente de falla y por ΔI la salida del detector.

En las Fig. 4.2 b,c,d se observa que el método de diferencia periódica de corriente no filtra la componente aperiódica exponencial de la señal de entrada, lo que se traduce en un error en la señal resultante del algoritmo, que se manifiesta durante varios ciclos después de ocurrir la falla; como se mostrará más adelante, este comportamiento genera problemas para la aplicación en la lógica de operación del relevador adaptivo de sobrecorriente.

4.3.3. Detector transitorio

Si se aplica un algoritmo de estimación mínimo-cuadrática para obtener los parámetros de las componentes de la corriente de entrada al relevador, el estimado tendrá un error apreciable cuando la ventana de datos está cruzando por la discontinuidad que la falla provoca en la señal. Ello se debe a que los datos contienen información de los estados de pre-falla y de falla, lo que deteriora el estimado. El detector transitorio [**25**] utiliza esta particularidad para detectar la presencia de la falla. La idea básica consiste en calcular los valores de las muestras ficticias que resultan del estimado de la señal, y comparar estos valores con los de las muestras reales.

La señal de entrada $y(t)$ a un relevador digital puede en general expresarse por:

$$y(t) = \sum_{n=1}^{M} Y_n s_n(t) + \varepsilon(t) \tag{4.5}$$

donde $s_n(t)$ representa el conjunto de señales elementales que se supone están presentes en $y(t)$, Y_n son sus coeficientes y $\varepsilon(t)$ representa los errores. En aplicaciones de protección $s_n(t)$ incluye típicamente la componente de frecuencia fundamental, una componente aperiódica exponencial, y un conjunto de armónicas [**25,27**]. El problema de estimación de parámetros consiste en estimar los M valores de Y_n a partir de un conjunto de N_m muestras de las mediciones $y[k]$, de tal manera que $\varepsilon[k]$ sea mínimo. Es decir, hay que resolver (4.5) para el mínimo error:

$$\begin{bmatrix} y[1] \\ y[2] \\ \vdots \\ y[N_m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(\Delta t) & s_2(\Delta t) & \cdots & s_M(\Delta t) \\ s_1(2\Delta t) & s_2(2\Delta t) & \cdots & s_M(2\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1(N_m \Delta t) & s_2(N_m \Delta t) & \cdots & s_M(N_m \Delta t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{N_m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon[1] \\ \varepsilon[2] \\ \vdots \\ \varepsilon[N_m] \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

La ecuación (4.6) puede escribirse en forma matricial como:

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{Y} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{4.7}$$

donde la matriz $\boldsymbol{S}$ representa el conjunto de señales elementales que se supone están presentes en $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{Y}$ son sus coeficientes y ε representa los errores. Si se considera que los errores correspondientes a muestras diferentes no están correlacionados, y que la matriz de covarianza es un múltiplo de la matriz unitaria, la solución mínimo-cuadrática [**25,28,29**] es:

$$\hat{\boldsymbol{Y}} = \left(\boldsymbol{S}^T \boldsymbol{S}\right)^{-1} \boldsymbol{S}^T \boldsymbol{y} = \boldsymbol{S}^+ \boldsymbol{y} \tag{4.8}$$

donde $\hat{\boldsymbol{Y}}$ es el vector de los coeficientes estimados de $s_n(t)$ y $\boldsymbol{S}^+$ es la matriz pseudo-inversa de $\boldsymbol{S}$.

Los elementos de la matriz $\boldsymbol{S}$ dependen de las señales elementales que se seleccionen para representar la señal $y(t)$, así como de la frecuencia de muestreo, la longitud de la ventana

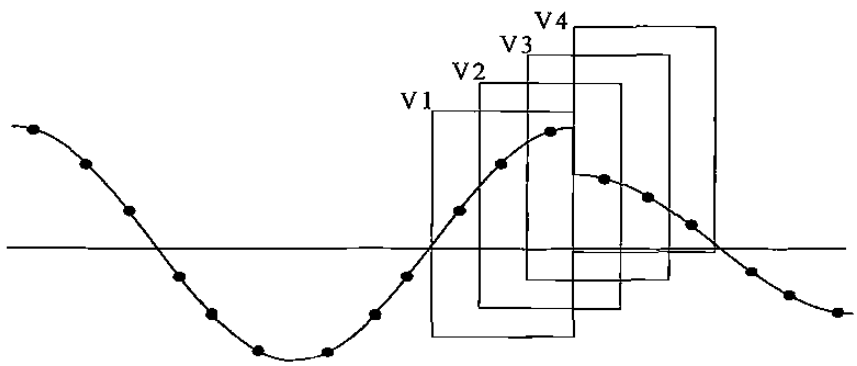
y la referencia de tiempo que se adopte, es decir, el instante de muestreo que se designe como t=0.

Cuando la ventana de datos atraviesa el instante de inserción de la falla, como se muestra en la Fig. 4.3, los resultados de la estimación presentan error, debido a que la ventana de datos contiene muestras de prefalla y de falla; el estimador está tratando de ajustar a un solo modelo de señal una información que en realidad pertenece a dos modelos diferentes, como se muestra en la Fig. 4.3 para las ventanas V2 y V3.

Utilizando la solución de mínimos cuadrados dada por (4.8), es posible estimar los valores de las muestras ficticias, según:

$$\tilde{y} = S\hat{Y} = S\left(S^T S\right)^{-1} S^T y \tag{4.9}$$

Los vectores $\tilde{y}$ y y difieren debido a dos factores; uno de ellos es el conjunto de errores de medición que tiene lugar en el proceso. El otro factor es el error de estimación, en el que influye el ruido presente en la señal, y el cruce de la ventana de datos por la discontinuidad de magnitud y/o fase provocada por la falla en la señal. El error de estimación provocado por el cruce de la ventana de datos es mucho mayor que los restantes, por lo que si $\tilde{y}$ tiene valores significativamente diferentes a los de y, es lógico suponer que está ocurriendo la transición del estado de prefalla al de falla. Un ejemplo de la diferencia de los vectores $\tilde{y}$ y y ante una discontinuidad se ilustra en la Fig. 4.4, en que la señal de entrada se representa por una línea continua, con las muestras reales $y[k]$ indicadas por círculos (la



0150646

Fig. 4.3. Cruce de la ventana de datos por la discontinuidad que la falla provoca en la señal.

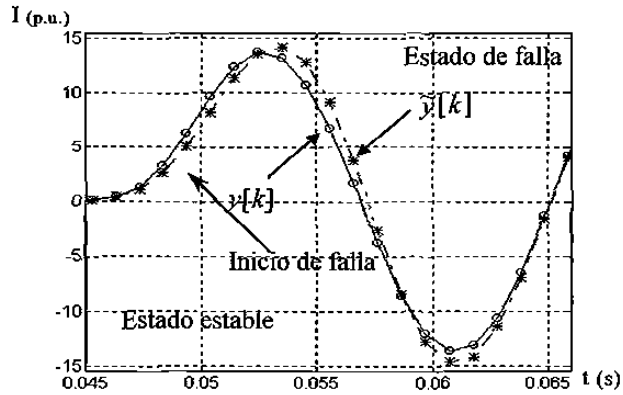


Fig. 4.4. Estimación de la señal de corriente ante una discontinuidad.

frecuencia de muestreo es 16 muestras por ciclo). Las muestras reconstruidas $\tilde{y}[k]$ se representan por asteriscos. Puede observarse que en este caso en que no hay ruido en la señal de falla, la falta de coincidencia entre las muestras reales y las reconstruidas está presente solo durante los 16 instantes de muestreo correspondientes al cruce de la ventana de datos por una discontinuidad provocada por el inicio de falla.

Puede calcularse un vector de residuales:

$$\boldsymbol{r} = \tilde{\boldsymbol{y}} - \boldsymbol{y} = \left[\boldsymbol{S}\left(\boldsymbol{S}^T\boldsymbol{S}\right)^{-1}\boldsymbol{S}^T - \boldsymbol{I}\right]\boldsymbol{y} \tag{4.10}$$

La función del detector transitorio puede formarse en distintas variantes a partir del vector de residuales $\boldsymbol{r}$. En [**30**] se presenta un estudio comparativo entre tres tipos diferentes de modelos para esta función; en (4.11) se presenta el modelo del detector recomendado; este modelo, además de contar con una excelente sensibilidad, tiene un efecto reductor en los errores del estimado antes y después del paso de la ventana de datos por la discontinuidad.

$$t[k] = \left[\sum_{j=k-N}^{k} |r[j]|\right]^2 \tag{4.11}$$

En (4.11), $t[k]$ es la función del detector transitorio correspondiente a la muestra k, $r[j]$ es el residual calculado según (4.10) para la muestra j, y N es el número de muestras en la ventana de datos. Para la detección de la falla se hace la comparación del valor $t[k]$ del detector transitorio con un cierto valor umbral, que debe ser suficientemente alto para que $t[k]$ no lo rebase por efecto del ruido presente en la corriente de falla.

Un aspecto importante en la concepción del detector transitorio es la selección de las componentes de la señal a incluir en el modelo del estimador mínimo-cuadrático. El modelo debe cumplir con dos requisitos básicos:

- Representar con fidelidad la forma de onda de la corriente de falla, para evitar errores en el estimador por una representación inadecuada en su modelo. Con esto se logra que la salida del detector transitorio caiga a valores cercanos a cero al concluir el cruce de la ventana de datos por la discontinuidad.

- No mermar la sensibilidad del detector, es decir, ofrecer valores altos en su salida cuando la ventana está cruzando por la discontinuidad.

Para cumplir con el primer requisito hay que considerar el tipo de contaminación que puede estar presente en la corriente de falla. En las señales de entrada a los relevadores durante cortocircuitos pueden esperarse, entre otras, las siguientes componentes [**27**]: componente fundamental, componente aperiódica exponencial y componentes oscilatorias amortiguadas de alta frecuencia. Sin embargo, en la señal de corriente las componentes de alta frecuencia tienen por lo general valores reducidos [**31**]. Adicionalmente, el filtro anti-aliasing tiende también a suprimir las componentes de alta frecuencia cuando su frecuencia de corte es baja.

En [**30**] se presenta un estudio comparativo para determinar el modelo de señal más adecuado para el detector transitorio. Se selecciona el modelo que cumple no solamente con el requisito de representación fiel de la corriente de falla, sino también con el de sensibilidad del detector transitorio para detectar el cruce de la ventana de datos por la discontinuidad. El mejor modelo de señal para el estimador mínimo-cuadrático del detector transitorio para esta aplicación es el formado por la componente fundamental y la componente aperiódica exponencial.

En la Fig. 4.5 se presenta el comportamiento del detector transitorio para las mismas señales que dieron lugar a la Fig. 4.2. Se utilizó el modelo de detector dado por (4.11), y se incluye la componente fundamental y la componente aperiódica exponencial en el modelo de señal del estimador. En general se observa una señal de respuesta del detector con buena sensibilidad, prácticamente libre del efecto de la componente aperiódica exponencial, lo que hace recomendable su utilización en la lógica de operación del relevador adaptivo.

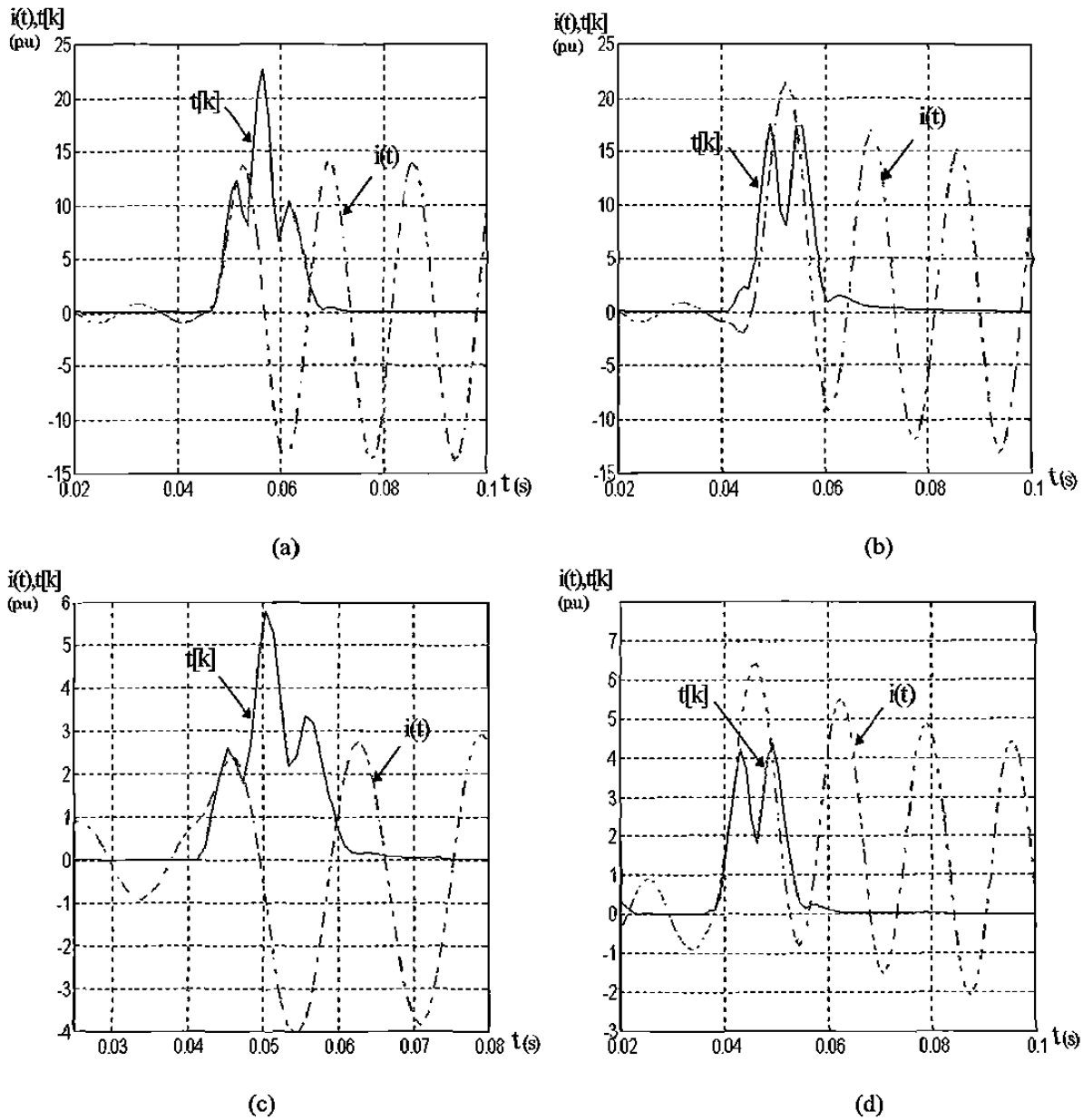


Fig. 4.5. Salidas del detector transitorio: a) falla sin componente aperiódica en una línea corta; b) falla con componente aperiódica en una línea corta; c) falla con componente aperiódica en una línea larga; d) falla con máxima componente aperiódica en una línea larga.

En el Apéndice B se presenta un estudio comparativo entre los dos algoritmos para la detección de la falla. De los resultados obtenidos se concluye que el algoritmo detector transitorio presenta un comportamiento muy superior al del detector de diferencia periódica de corriente. El detector transitorio presenta una alta sensibilidad para detectar fallas de baja corriente y no resulta afectado por la presencia de ruido en la corriente de falla. Con este método puede detectarse tanto el inicio como el fin del cortocircuito, que son informaciones necesarias para la lógica de control de I_a. En este trabajo se utiliza este algoritmo para la detección de fallas.

4.3.4. Funciones de la lógica de control

La lógica de control de la corriente de arranque del relevador adaptivo de sobrecorriente se resume en el diagrama de bloques de la Fig. 4.6. Estas funciones deben considerar los siguientes estados de operación: a) estado estable, en el que se tiene un régimen normal de operación del sistema de potencia; b) estados transitorios provocados por la ocurrencia de fallas; c) condiciones en que la línea protegida está desconectada.

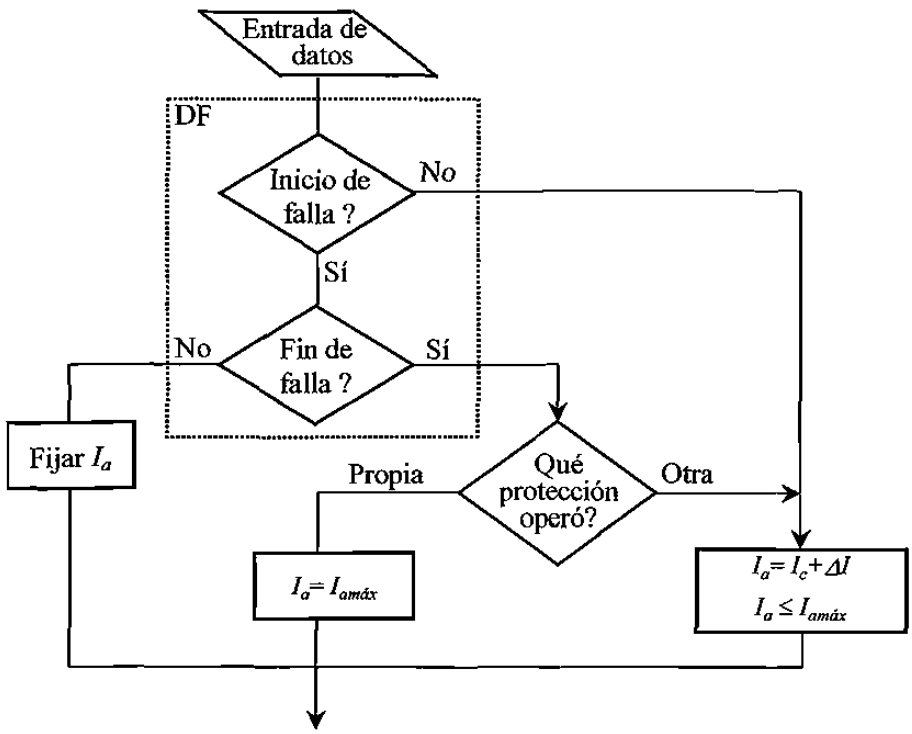


Fig. 4.6. Diagrama de bloques de la lógica de control de I_a.

La lógica del relevador adaptivo en un estado normal de operación debe: a) permitir que la corriente de arranque varíe con el régimen de operación según (4.1); b) supervisar continuamente que la corriente de arranque del relevador no viole el límite máximo establecido (Ecuación (4.3)).

Los estados transitorios asociados a fallas o a operaciones de cierre y apertura de la línea son detectados por el detector transitorio. Esto debe activar una lógica con las siguientes funciones: a) fijar la corriente de arranque en su valor vigente en el momento de ocurrir la falla, para permitir que la corriente debida a la falla sobrepase el valor de ajuste del relevador; b) retornar al régimen de variación de la corriente de arranque si la falla es eliminada por otra protección o si se autoextingue; c) fijar la corriente de arranque en su valor máximo en caso de que la falla sea eliminada por el disparo del propio relevador adaptivo (apertura de la línea protegida).

En general, cuando la línea protegida esté fuera de servicio, la corriente de arranque debe ser fijada al valor máximo, para desde ahí comenzar el régimen de flotación sobre la corriente de carga, una vez que se restablece el servicio. Esto da al relevador una cierta inmunidad a los valores elevados que puede tener la corriente de carga (carga fría) durante el estado transitorio asociado al restablecimiento del servicio eléctrico después de una interrupción prolongada del mismo.

Durante tiempos prolongados de fuera de servicio de un sistema eléctrico donde se esperan corrientes de restablecimiento de varias veces la corriente nominal, es necesario realizar modificaciones transitorias a los valores de ajuste de la protección para que no dispare ante esta condición operativa. Tradicionalmente se evita la operación del sistema de protección, bloqueando los elementos de protección que puedan ser sensibles o tener la oportunidad de operar ante este incremento de corriente; se bloquea la primera zona para relevadores de distancia, y el bloqueo del elemento instantáneo y/o elemento de tiempo inverso para relevadores de sobrecorriente.

En relevadores digitales es posible asignar un grupo de ajustes, que consta de varias etapas de valores de corriente de arranque y tiempo. Los valores de ajuste son programados de tal forma que se adapten a la corriente de restablecimiento y protejan de forma más adecuada al sistema eléctrico durante fallas en esta condición. Esta función de tolerancia al restablecimiento de carga fría es implementada en el relevador adaptivo.

4.3.5. Evaluación

A partir de estas consideraciones se confeccionó un programa en MATLAB® que simula la lógica del relevador adaptivo. Para la realización de las pruebas se desarrolló un programa de simulación, utilizando también MATLAB®. El programa permite generar señales de corriente de carga (incluyendo regímenes de carga variable con el tiempo), así como la aparición de fallas y su ulterior liberación por la apertura del interruptor propio o de algún otro interruptor. Las señales generadas son aplicadas al relevador como una secuencia de muestras que representan los valores instantáneos de la corriente.

En la Fig. 4.7 se muestra el comportamiento de la lógica para el caso en que ocurre una falla en la línea, que es liberada por el propio relevador adaptivo, y posteriormente tiene lugar un recierre exitoso del interruptor. Se trata de gráficas en que se representa la variación con el tiempo del valor eficaz de las corrientes de carga I_c y de cortocircuito I_{cc}, así como de la corriente de arranque I_a del elemento de tiempo inverso del relevador adaptivo. En las Fig. 4.7b,c (que son acercamientos de la gráfica de la Fig. 4.7a), se incluye también la salida del detector transitorio $t[k]$.

En la Fig.4.7a puede observarse que en los regímenes normales de prefalla y postfalla la corriente de arranque I_a está en régimen de flotación por encima de la corriente de carga I_c, que varía con el tiempo. En la Fig. 4.7b se muestra la lógica adaptiva de la corriente de arranque durante la energización de la línea. Durante el estado desenergizado el valor de I_a es fijado a su valor máximo permitido (4.2); después del instante de la energización la salida del detector de falla ($t[k]$) está presente con un retardo máximo de 2 ms; I_a se mantiene en su valor

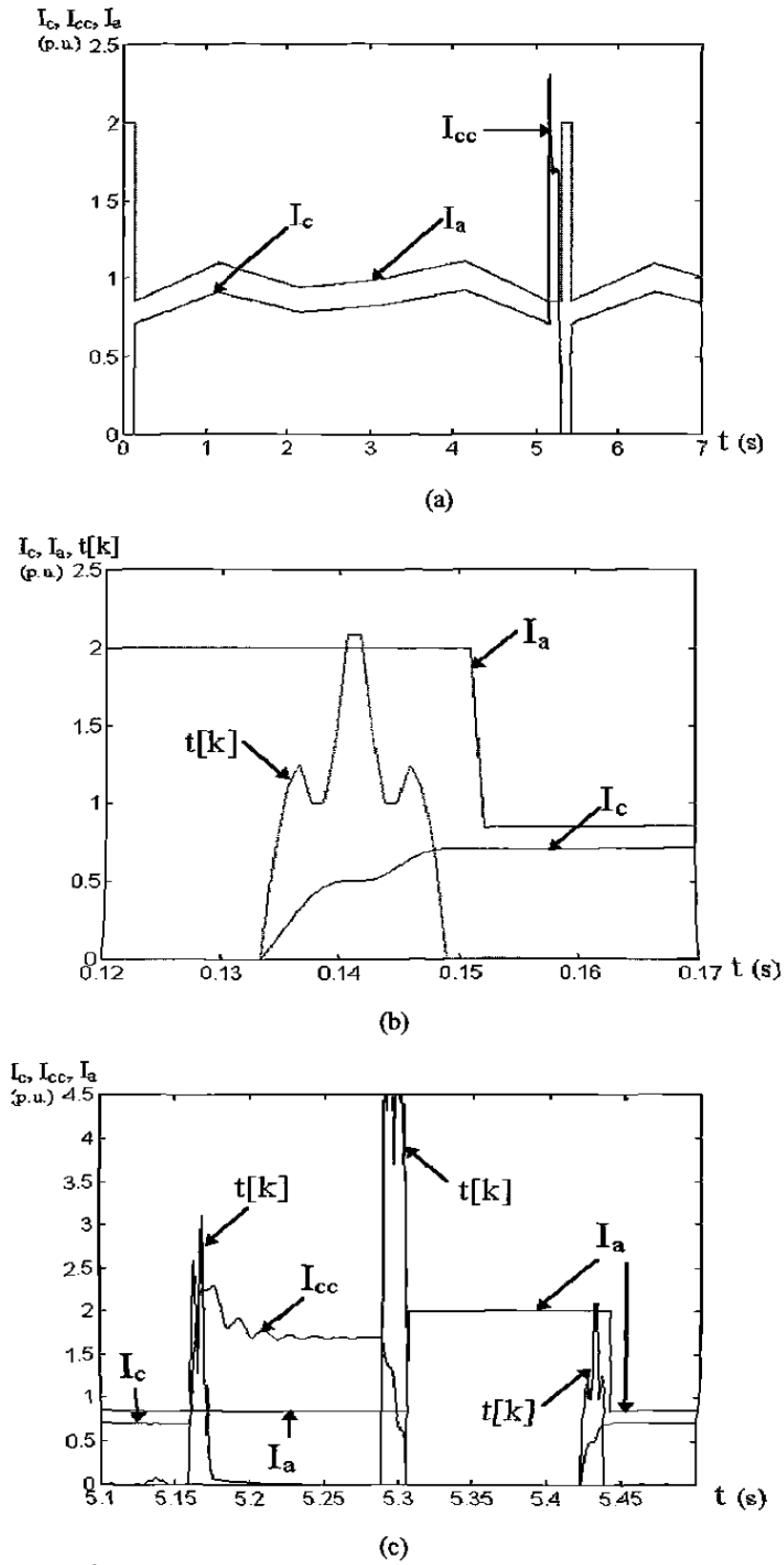


Fig. 4.7. Liberación de la falla por apertura de la línea (a), energización (b) e inserción de falla y recierre (c).

máximo durante dos ciclos, permitiendo que la señal del detector desaparezca, a partir de la cual el valor de I_a es calculado según (4.1). Durante el estado de falla (Fig. 4.7c) el valor de I_a permanece constante en el último valor de prefalla, y el valor de corriente de cortocircuito es mayor que I_a, permitiendo el inicio de la operación del relevador. Después del disparo de la protección y la apertura del interruptor de potencia, la lógica adaptiva se comporta como en el caso representado en la Fig. 4.7b.

En la Fig. 4.8 se presenta un resultado de simulación en que la falla es eliminada por la apertura de otro interruptor. Puede observarse que en este caso la corriente de arranque es fijada en su valor de prefalla durante la falla, y retorna al régimen de flotación sobre I_c cuando desaparece la corriente de falla.

En la Fig. 4.9 se muestra el comportamiento de la lógica para el caso en que ocurre una falla evolutiva en la línea, que es liberada por el propio relevador adaptivo. Obsérvese que el detector se activa por segunda vez con el incremento súbito de la corriente provocado por la evolución de la falla. En este estado la lógica adaptiva realiza una comparación entre la magnitud de la corriente de falla y el último valor de corriente de prefalla; si el valor de falla es mayor, la lógica adaptiva mantiene el valor constante de la corriente de arranque, con lo que el relevador mantiene activada su condición de operación.

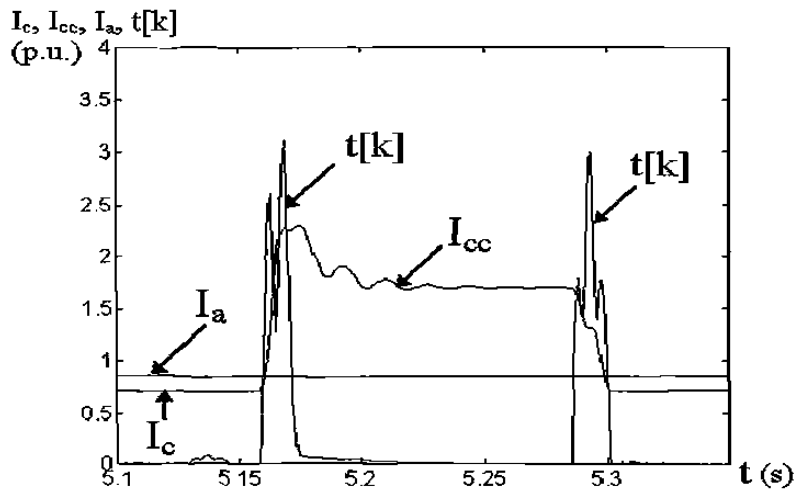


Fig. 4.8. Liberación de la falla por apertura de otro interruptor.

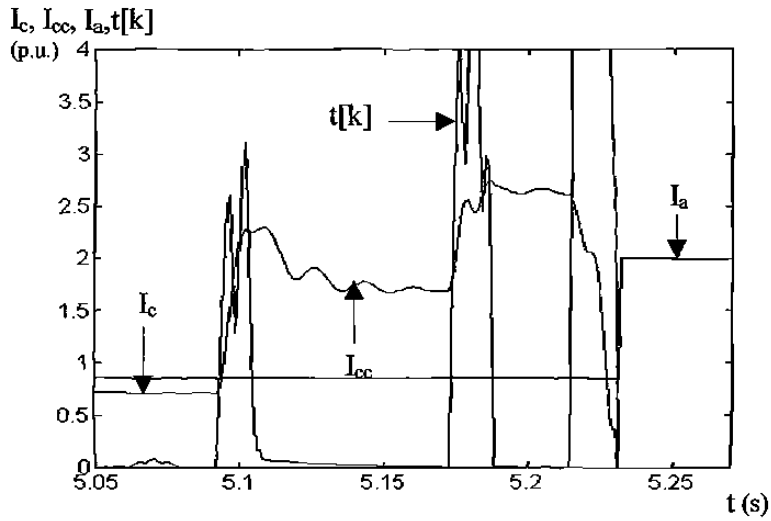


Fig. 4.9. Comportamiento de la lógica de control ante una falla evolutiva.

En la Fig. 4.10 se muestra el comportamiento del relevador adaptivo cuando se activa un grupo de ajustes para tolerar los efectos de restablecimiento de carga fría. El relevador adaptivo cuenta con una función de tolerancia a la carga fría, esta función cuando es activada, asigna un grupo de ajustes en un número de etapas definidas por el usuario. El grupo de ajustes consta por omisión de dos pasos de ajuste de corriente de arranque con un tiempo de vigencia de cada paso. La señal de prueba representa el arranque de un motor de 250 HP a 13.8 kV sin arrancador conectado.

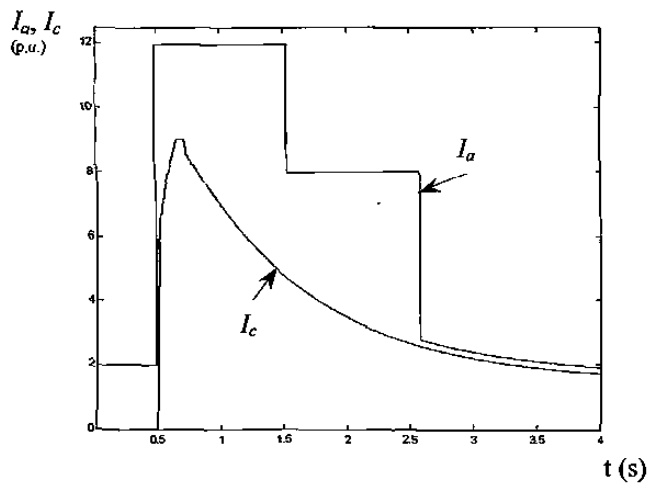


Fig. 4.10. Comportamiento de la lógica de control ante corrientes de restablecimiento de carga fría.

4.4 Concepto de Demanda

El criterio de adaptación de la corriente de arranque basado en el concepto de demanda de corriente **[32]** realiza un proceso de actualización de la corriente de arranque del relevador en los intervalos definidos para el cálculo del valor de demanda. La corriente de arranque vigente del relevador se calcula sobre la base del valor de demanda calculado en el intervalo anterior; por tanto, no es necesaria la utilización de algoritmos de detección de fallas, lo que simplifica la lógica de control de la corriente de arranque del relevador adaptivo. La demanda de corriente es el valor promedio de la corriente en un cierto intervalo de tiempo:

$$I_c = \frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} I_j \tag{4.12}$$

donde N_d debe seleccionarse de modo que el intervalo N_d (Δt) tenga una duración del orden de uno o varios minutos. Por ejemplo, para la determinación de la demanda de potencia se utilizan intervalos típicos de 5 y 15 minutos. Estos intervalos garantizan que el valor de demanda no sea afectado significativamente por variaciones transitorias de corta duración en la potencia o la corriente, como es el caso del arranque de un motor de gran capacidad o la aparición de un cortocircuito. Para el cálculo de demanda de corriente en el relevador se recomienda utilizar intervalos menores a los anteriores con la finalidad de lograr un seguimiento más cercano a la variación normal de la carga. Sobre la base de que la duración de un cortocircuito típico en redes de distribución es de unos cuantos segundos, el intervalo recomendado para el cálculo de demanda de corriente es de 1 a 5 minutos; con este intervalo el valor de demanda calculado en el intervalo que contiene la falla no es afectado en forma significativa.

Sustituyendo (4.12) en (4.1) se obtiene la expresión de la corriente de arranque para este caso:

$$I_a = \frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} I_j + \Delta I \tag{4.13}$$

La ecuación (4.13) representa un filtro de promedio deslizante en que las ventanas de datos no se traslapan. Es decir, durante el intervalo N_d (Δt) se está formando la sumatoria, y el valor promedio se obtiene cuando $j=N_d$. Durante todo el intervalo está vigente en el relevador el valor de I_a calculado al final del intervalo anterior. Es decir, I_a varía en forma escalonada siguiendo la curva de carga del alimentador. La acción de filtrado pasabajos inherente en el concepto de demanda de corriente simplifica la lógica del relevador adaptivo, como se verá en la próxima sección.

4.4.1 Funciones de la lógica de control

En la Fig. 4.11 se muestra el diagrama de bloques de la lógica de control de las corrientes de arranque del elemento de tiempo inverso I_a y del elemento instantáneo I_a^i del relevador. La función básica de la lógica de control es determinar si la línea está en operación o está abierta, lo que puede hacerse comparando la corriente del relevador con un valor cercano a cero. Cuando hay corriente en la línea, se hace en forma continua el cálculo de las corrientes de arranque I_a e I_a^i. Por el contrario, al desaparecer la corriente (condición de línea abierta), se fijan en sus valores máximos ambas corrientes de arranque o se activa un grupo de ajustes, y estos valores son mantenidos hasta un cierto tiempo después de restablecerse la corriente. Con esto se mantienen insensibilizados los dos elementos del relevador durante un cierto tiempo

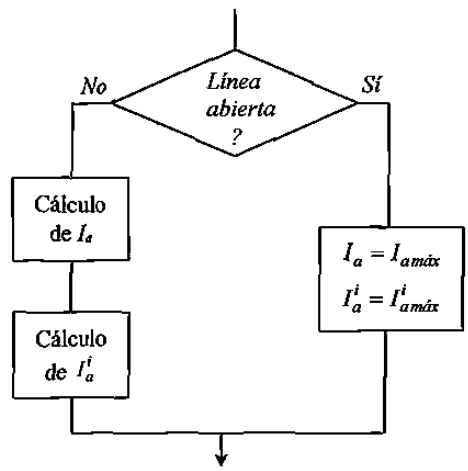


Fig. 4.11. Diagrama de bloques simplificado de la lógica de control de las corrientes de arranque.

posterior al restablecimiento, lo que evita posibles operaciones incorrectas por los valores transitorios elevados que puede tomar la corriente del alimentador en esa condición.

El procedimiento de cálculo de la corriente de arranque del relevador adaptivo se ilustra en la Fig. 4.12. El proceso consiste en calcular I_a según (4.13), y garantizar que cumpla con la restricción (4.3). S_d representa el valor acumulado de las muestras de corriente en el intervalo N_d; al término de cada intervalo de demanda (j=N_d), el valor de S_d es utilizado para calcular I_a según (4.13); el valor calculado de I_a pasa por una lógica que garantiza el cumplimiento de (4.2). El valor de I_a resultante se mantiene vigente hasta que cambie nuevamente, es decir, en todo momento el valor vigente de I_a es el obtenido para el período anterior de cálculo de demanda.

En la Fig. 4.13 se muestra el diagrama de bloques de la lógica de control de la corriente de arranque del relevador de tiempo inverso (I_a). La función básica de la lógica de control es discriminar entre diferentes estados operativos posibles para adecuar el ajuste del relevador a esas condiciones.

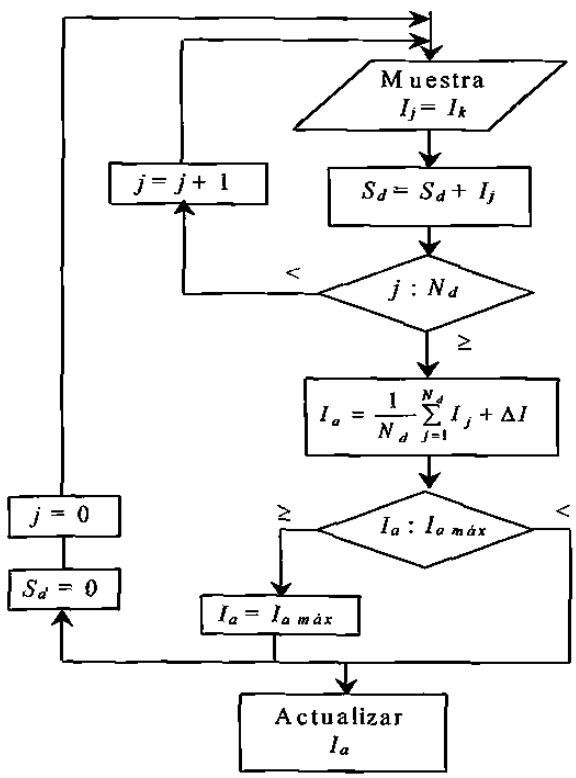


Fig. 4.12. Diagrama de bloques para el cálculo de I_a

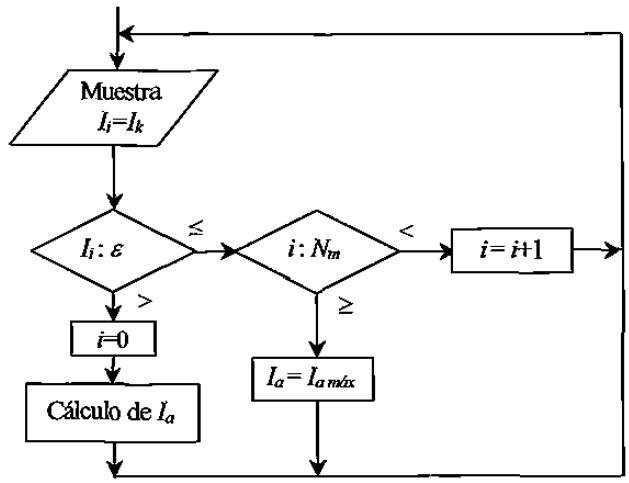


Fig. 4.13. Lógica de control de I_a.

La ausencia de corriente en la línea protegida se evalúa comparando cada muestra de corriente I_i (donde I_i=I_k) con un cierto valor umbral pequeño ε y comprobando que la condición $I_i \leq \varepsilon$ se mantenga durante un cierto número de muestras N_m; con esto se garantiza una identificación confiable de la ausencia de la corriente. En ese caso, I_a se fija en su valor máximo $I_{a\,máx}$, y se mantiene en ese valor hasta que, una vez restablecido el servicio, se complete un nuevo cálculo de I_a. Es decir, al restablecerse el servicio, es $I_a = I_{a\,máx}$ durante todo un intervalo de cálculo de demanda de corriente. Por otra parte, mientras exista corriente en la línea ($I_i > \varepsilon$), el valor de I_a se está calculando según el procedimiento de la Fig. 4.11, es decir, I_a se mantiene flotando sobre la corriente de carga del alimentador (ver Fig. 4.13).

4.4.2 Evaluación

Se elaboró un programa en MATLAB® que simula la lógica del relevador adaptivo. El programa que genera las señales de prueba es el mismo utilizado para las pruebas con el algoritmo de detector transitorio (Sección 4.3.2).

En las pruebas realizadas se evalúo el funcionamiento de la lógica de control, se verificó que operara en forma adecuada ante los diferentes estado operativos del sistema, tales como: energización, variación de corriente de carga, falla y disparo. Las pruebas realizadas a la lógica fueron satisfactorias en todos los casos. A modo de ejemplo, a continuación se muestran gráficas que ilustran el comportamiento de la corriente de arranque I_a del relevador aplicando el concepto de demanda de corriente (ecuación 4.13).

En la Fig. 4.14 se representa el caso en que I_a se calcula para intervalos de demanda de 1 minuto, y la falla que ocurre tiene 30 seg de duración. Se supone que la falla es eliminada por otra protección, y se restablece la carga. En línea continua se representan los valores instantáneos de la corriente de carga (I_c) y de cortocircuito (I_{cc}). La falla ocurre después del minuto 6 de la gráfica. En línea discontinua se representa la corriente de arranque I_a, que varía escalonadamente en intervalos de 1 minuto. En cualquier instante de tiempo está vigente el valor de I_a calculado al final del intervalo anterior. En la Fig. 4.14 puede observarse que al ocurrir la falla el relevador mantiene constante el valor de I_a, asegurando la sensibilidad necesaria sin que se requiera un detector de fallas. En el intervalo de demanda siguiente a la falla, el valor de I_a aumenta significativamente, pues la corriente de falla fue considerada en el cálculo de demanda del intervalo anterior. Esto pudiera considerarse como un problema, pero en realidad no es así, según se analiza a continuación.

En primer lugar, el incremento de I_a va a estar limitado al valor de $I_{a\ máx}$ por la lógica del relevador; esto no se muestra en la Fig. 4.13, pues solo se representa el valor calculado de I_a según (4.13), sin aplicar la restricción (4.3). Esto implica que lo más que se va a insensibilizar el relevador durante el intervalo de demanda siguiente a la falla es al nivel de sensibilidad de un relevador convencional (que tendría un ajuste fijo igual a $I_{a\ máx}$). En segundo lugar, el caso mostrado en la Fig. 4.14 es una condición extrema, en que la falla tiene una duración igual a la mitad del intervalo de demanda. En la Fig. 4.15 se muestra el caso en que se extiende el intervalo de demanda a 5 minutos, y se aplica una falla de 30 seg; el incremento de I_a es mucho menor en este caso.

Un comentario adicional es que el incremento de I_a en el intervalo posterior a la falla no necesariamente es perjudicial, pues puede contribuir a que el relevador no opere incorrectamente por el aumento transitorio de la corriente que tiene lugar al recuperarse el voltaje después de una falla, como consecuencia del frenado que experimentan los motores durante la falla.

En los casos representados en las Fig. 4.14 y 4.15 el tiempo de falla transcurre completamente dentro de un intervalo de cálculo de demanda. También puede ocurrir que ese tiempo de falla comprenda el fin del intervalo, de modo que, durante la falla, el relevador cambie su valor de I_a. Esta situación se ilustra en la Fig. 4.16, para las mismas condiciones de la Fig. 4.14. En este caso I_a aumenta considerablemente (no está aplicado el límite $I_{a\ máx}$), pues en el cálculo de I_a durante el intervalo anterior fueron tomados en cuenta valores de corriente correspondientes a la falla. Sin embargo, en la Fig. 4.17 se confirma que un intervalo de demanda de 5 minutos también reduce significativamente este efecto.

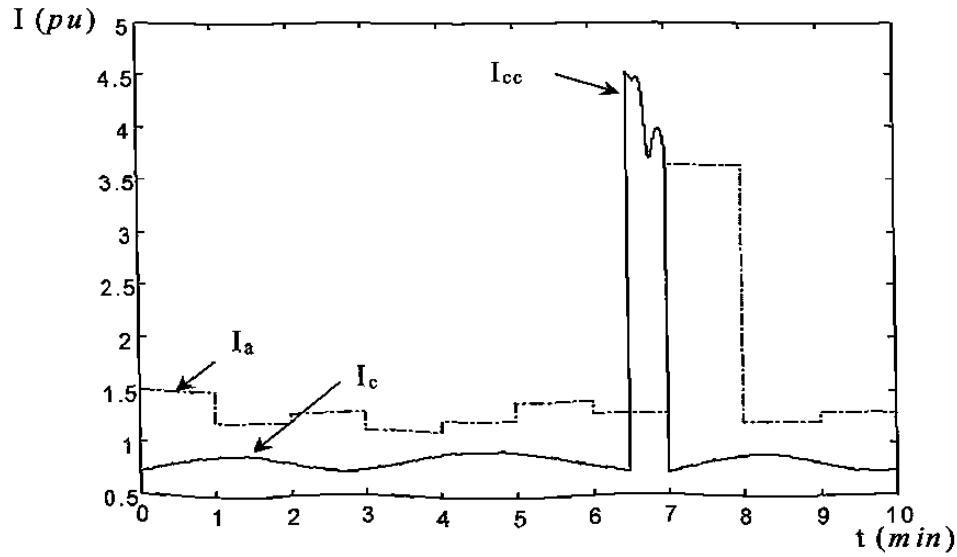


Fig. 4.14. Valores calculados de I_a con intervalos de un minuto para una carga variable interrumpida por una falla de 30 seg de duración.

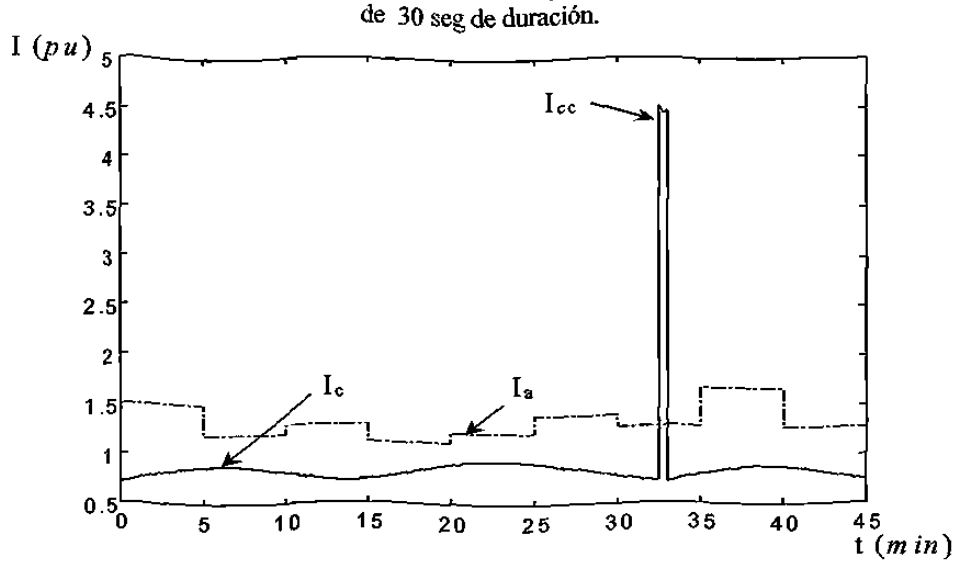


Fig. 4.15. Valores calculados de I_a con intervalos de 5 minutos para una carga variable interrumpida por una falla de 30 seg de duración.

En general el cambio de I_a durante la falla no afecta la coordinación, pues los valores de $H(I_k)$ o $J(I_k)$ calculados por el generador de funciones (Fig. 3.10) toman implícitamente en cuenta el nuevo valor de I_a calculado por el controlador de corriente de arranque.

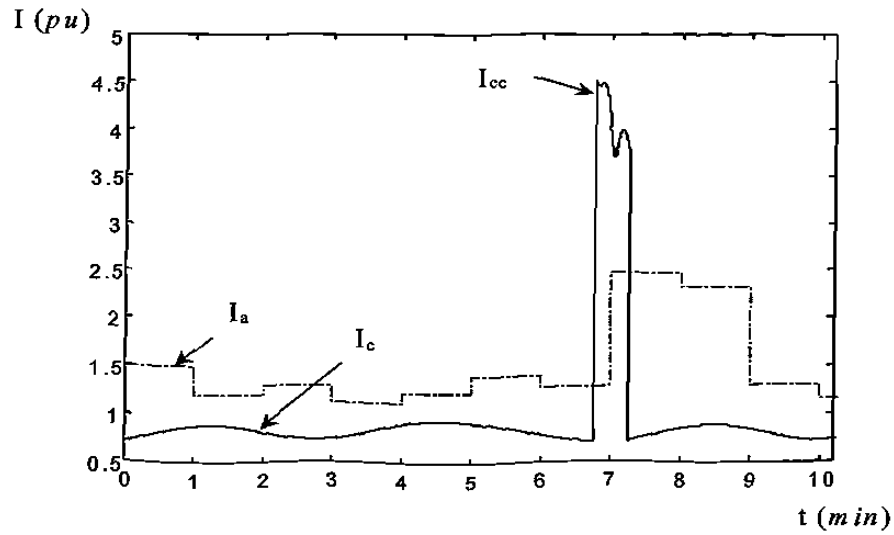


Fig. 4.16. Valores calculados de I_a con intervalos de 1 minuto para una carga variable interrumpida por una falla de 30 seg de duración que comprende el fin del intervalo de integración.

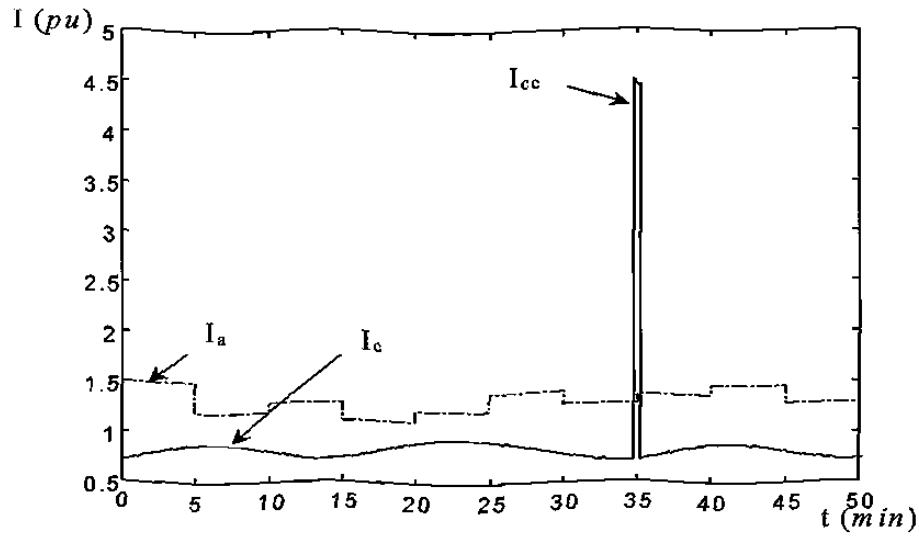


Fig. 4.17. Valores calculados de I_a con intervalos de 5 minutos para una carga variable interrumpida por una falla de 30 seg de duración que comprende el fin del intervalo de integración.

La Fig. 4.18 muestra el resultado de aplicar una restricción a la corriente de arranque cuando la corriente de entrada sea mayor al valor de corriente de ajuste ($I_{cc} > I_a$) indicando un estado de falla. Con esta restricción se evita la insensibilización innecesaria del relevador (mostrada en la Fig. 4.16). Durante el tiempo de duración de la falla, I_a será fijado al valor correspondiente al momento del inicio de la falla. En la Fig. 4.17 se observó que el incremento de I_a durante la falla con períodos de cálculo de demanda de 5 minutos es mínimo, por lo que esta restricción es recomendable para períodos de un minuto en el cálculo de demanda.

También se evaluó el comportamiento de la lógica del relevador utilizando el programa de simulación mostrado en la Sección 4.3.4. Se simularon los mismos casos mostrados en esa sección en las Fig. 4.7 a 4.9, donde se representa la variación con el tiempo del valor eficaz de las corrientes de carga I_c , la corriente de demanda I_c^d , la corriente de cortocircuito I_{cc}, así como de la corriente de arranque I_a del elemento de tiempo inverso del relevador adaptivo. En la Fig. 4.19 se muestra el comportamiento de I_a para la misma secuencia de eventos mostrados en la Fig. 4.7; se observa que el comportamiento de la lógica basada en la corriente de demanda presenta un comportamiento adecuado. Se observa que aunque el valor de corriente de arranque del relevador es calculado sobre la base de la corriente de demanda (línea discontinua), la verificación de operación se realiza con el valor eficaz fundamental de la corriente.

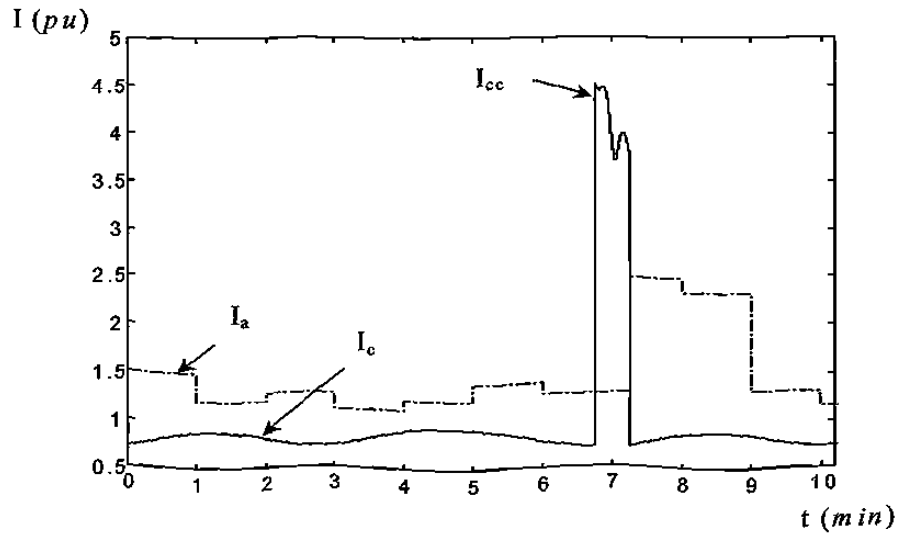


Fig. 4.18. Valores calculados de I_a limitada en su magnitud cuando $I_{cc} > I_a$.

Cuando la línea es energizada el valor calculado de demanda vigente durante la energización es cero, este valor provoca que la lógica de la corriente de arranque del relevador tenga un tiempo de espera de hasta dos períodos de demanda (2 a 10 minutos), esperando que el valor de corriente de demanda alcance valores representativos de estado estable del sistema. Una posible solución es asignar un valor de corriente de demanda cuando se detecte corriente debajo de un umbral en la línea, esto no afecta al cálculo de corriente de arranque debido a que en estado desenergizado su valor es fijado en su límite máximo. Este valor asignado de corriente de demanda no es conveniente que sea introducido por el usuario, ya que tendrá que ser actualizado cuando se tengan incrementos en la demanda; para conservar las características de adaptabilidad, la lógica del relevador debe determinar este valor. El valor asignado de corriente de demanda puede ser determinado a partir del valor límite de corriente de arranque (4.2) asignado al relevador cuando existe ausencia de corriente.

En las presentes simulaciones el tiempo de espera después de la energización de la línea es de 2 ciclos. Esto se observa en la Fig. 4.19b donde la corriente de arranque del relevador empieza su régimen de flotación después de la energización.

En la Fig.4.19a puede observarse el régimen de flotación de I_a por encima de la corriente de carga I_c. En la Fig. 4.19b se muestra el comportamiento de la lógica adaptiva de la corriente de arranque durante la energización de la línea. Se observa que el valor de corriente de demanda cuando la línea esta desenergizada es $1/k$ veces la corriente de arranque máxima. El proceso de flotación se efectúa después de 2 ciclos (16 muestras/ciclo) similar al algoritmo basado en el detector (Fig. 4.7b). Durante el estado de falla (Fig. 4.19c) la lógica de operación del relevador se comporta de forma satisfactoria.

En la Fig. 4.20 se simula la operación de una protección respaldada. La corriente de arranque es afectada por el cálculo del período de demanda que abarca la inserción de la falla. El análisis de este comportamiento se realizó en las Fig. 4.16 y 4.17. En la Fig. 4.21 se simula una falla evolutiva en la línea, la lógica de operación basada en demanda no es afectada y no requiere algoritmos adicionales para tolerar este tipo de falla.

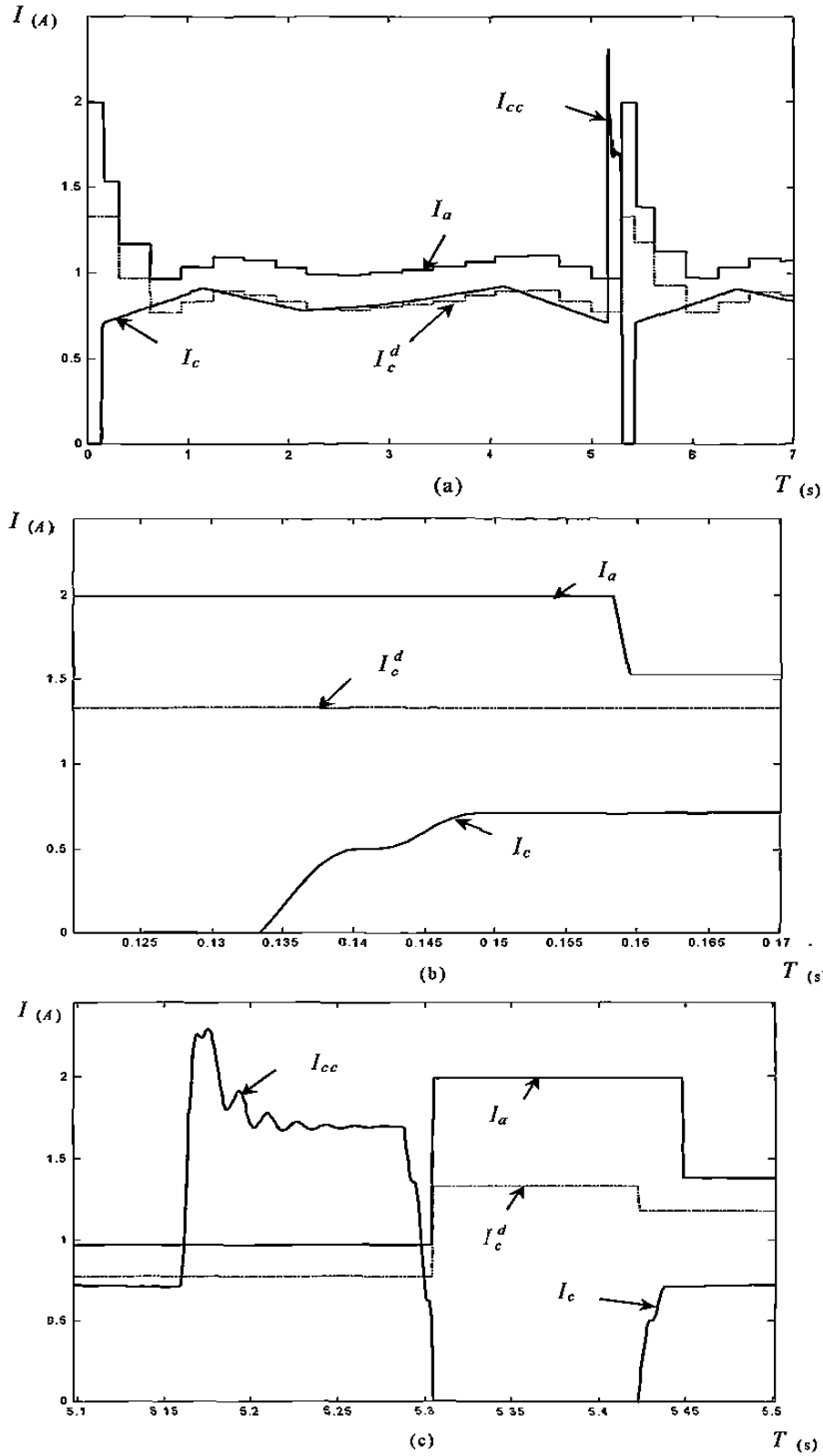


Fig. 4.19. Corriente de demanda. Liberación de la falla por apertura de la línea (a), energización (b) e inserción de falla y recierre (c).

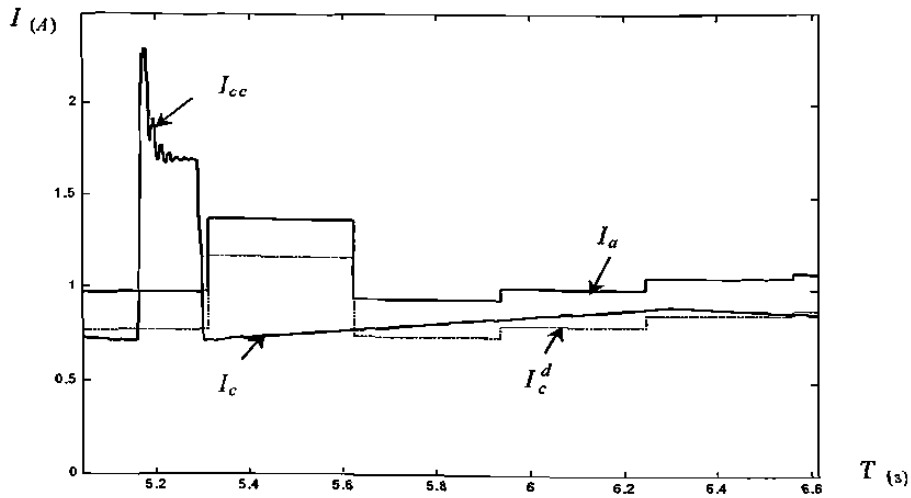


Fig. 4.20. Corriente de demanda. Liberación de la falla por apertura de otro interruptor.

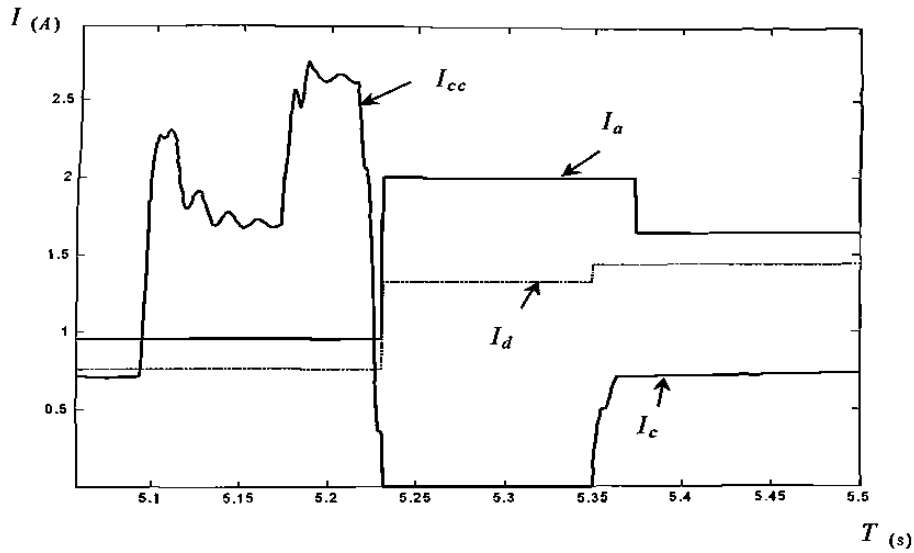


Fig. 4.21. Corriente de demanda. Comportamiento de la lógica de control ante una falla evolutiva.

En la Fig. 4.22 se muestra el comportamiento de la lógica del relevador cuando se activa el grupo de ajustes para tolerar efectos de carga fría. Se utilizó la señal de prueba de la Fig. 4.10. El comportamiento de la lógica adaptiva de la corriente de arranque también es satisfactoria.

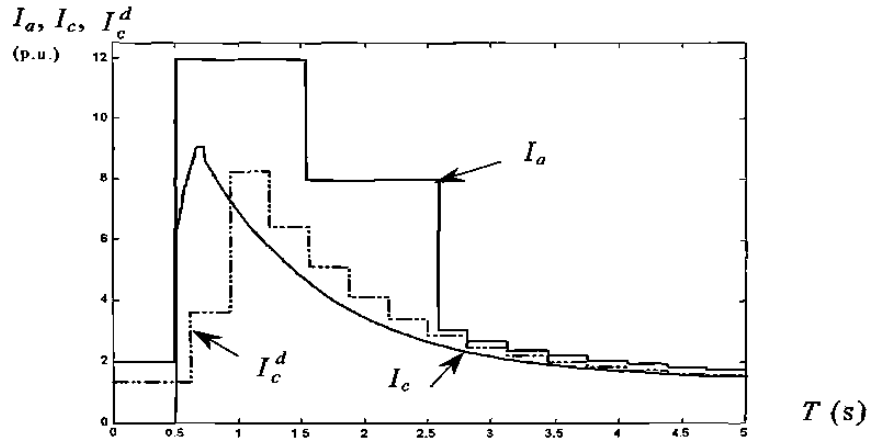


Fig. 4.22. Corriente de demanda. Comportamiento de la lógica de control ante corrientes de restablecimiento de carga fría.

4.5 Comparación entre los dos valores de corriente utilizados en la lógica adaptiva

El principio de adaptación de la corriente de arranque se basa en aumentar la sensibilidad del relevador, principalmente durante regímenes de demanda mínima, donde existe más probabilidad que el relevador convencional no tenga la sensibilidad suficiente para la detección de la falla. El proceso de adaptación de la corriente de arranque incluye la lógica de operación necesaria para que el relevador pueda identificar las diferentes situaciones operativas del sistema y pueda adecuarse a estos estados operativos. Sobre la base de lo anterior, se consideraron los criterios de sensibilidad, dependabilidad, seguridad, y requerimientos de "software", como base para la comparación entre las dos alternativas para la adaptación de la corriente de arranque del relevador adaptivo.

El algoritmo basado en detección de falla realiza un proceso de adaptación con mayor sensibilidad a los cambios en las variables del sistema que el algoritmo basado en corriente de demanda. En la práctica esta situación no es importante, debido a que la dinámica lenta de la corriente de demanda hace que la diferencia en sensibilidad entre estos dos algoritmos sea prácticamente nula. Sobre la base a los resultados presentados en las Secciones 4.3.4 y 4.4.2 se observa que, para los diferentes escenarios operativos que se utilizaron para evaluar las lógicas de operación, ambos algoritmos presentan resultados satisfactorios.

La dependabilidad es el grado de certeza de que el sistema de protección opere correctamente cuando ocurre una falla. El algoritmo basado en un detector de falla presenta mayor riesgo de no detectar fallas de alta impedancia que el algoritmo basado en corriente de demanda. Esta posible falta de dependabilidad del algoritmo de detector de falla se debe básicamente a la tolerancia que hay que dar al detector de falla y que impacta directamente en la sensibilidad del relevador.

La seguridad es el grado de certeza de que el sistema de protección no operará incorrectamente. El algoritmo basado en demanda presenta mayor riesgo de operación incorrecta ante incrementos sustanciales y rápidos de corriente de carga, aunque de las pruebas realizadas se concluye que el margen definido para (4.1) es adecuado.

Con relación a los requerimientos de "software", la variante de corriente de demanda, al prescindir de un algoritmo de detección de fallas, presenta ventajas claras respecto a la variante que utiliza el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente; pues además de requerir del algoritmo de detección de falla, la lógica de control del relevador descrita en la Fig. 4.6, es más compleja en términos algorítmicos que la lógica de la primera variante descrita en la Fig. 4.13.

De lo anterior se puede concluir que el algoritmo de demanda es el más conveniente para implementarse y es el que se toma como base para la concepción del relevador.

4.6 Característica adaptiva del relevador de sobrecorriente

La propiedad de adaptabilidad de la corriente de arranque (I_a) descrita en este capítulo hace que el tiempo de operación del relevador adaptivo dependa, no solo de la distancia eléctrica a la falla (que puede expresarse en términos de la impedancia Z desde la fuente hasta la falla), sino también del valor de corriente de arranque I_a vigente en el momento de la falla. Es conveniente, por tanto, representar la operación del elemento adaptivo de tiempo inverso mediante una característica de operación $T=F(Z, I_a)$; esta característica, a diferencia del caso

del relevador convencional, posee dos variables independientes, por lo que debe representarse en forma tridimensional.

En la Fig. 4.23 se muestra el diagrama unifilar de un sistema radial de 34.5 kV, en el que también se indican los niveles de cortocircuito en el bus A para generación máxima y mínima, y las demandas máxima y mínima de cada subestación. En la misma figura se representan las características $T=F(Z)$ para el relevador n, considerando que es convencional. Se utiliza la característica dada por la IEC **[20]**, con $\eta=2$ y $K=80$, y un valor de corriente de arranque de 50.2 A. Aunque la representación es tridimensional, como base para la comparación con el caso adaptivo, las características en realidad están en el plano correspondiente a I_a=50.2 A. El plano está delimitado por la curva correspondiente a corriente de cortocircuito máxima en la parte inferior, y por la curva de corriente de cortocircuito mínima en la parte superior. Es decir, para corrientes de falla máxima se obtiene el tiempo de operación mínimo y para fallas mínimas, el tiempo de operación de la protección es mayor.

En la Fig. 4.24 se muestran las características $T=F(Z, I_a)$ del relevador n, considerado como adaptivo. Las dos superficies están delimitadas por el intervalo de variación de la corriente de arranque I_a del relevador ($I_{a\,máx}$=50.2 A, $I_{a\,mín}$=25 A). Se observa que en generación mínima hay mayor sensibilidad (menor I_a) y menor tiempo de operación del relevador para los diferentes estados operativos del sistema; este comportamiento se manifiesta en la gráfica como una reducción del espacio entre las dos superficies al reducirse I_a. Este incremento de sensibilidad elimina el compromiso que se presenta en el ajuste de los relevadores convencionales.

Si se supone una dependencia lineal entre el nivel de cortocircuito de la fuente y la demanda de la carga, se tendrá la zona operativa ilustrada en la Fig. 4.25. Esta superficie constituye una transición entre las dos superficies de la Fig. 4.24. Por ejemplo, en demanda máxima se tiene una impedancia de generación correspondiente a ese estado operativo (curva inferior), una corriente de arranque máxima (50.2 A) y un tiempo menor de operación (ψ en la Fig. 4.24). De las consideraciones anteriores se obtiene una curva que diagonaliza el espacio entre las dos superficies de la Fig. 4.24.

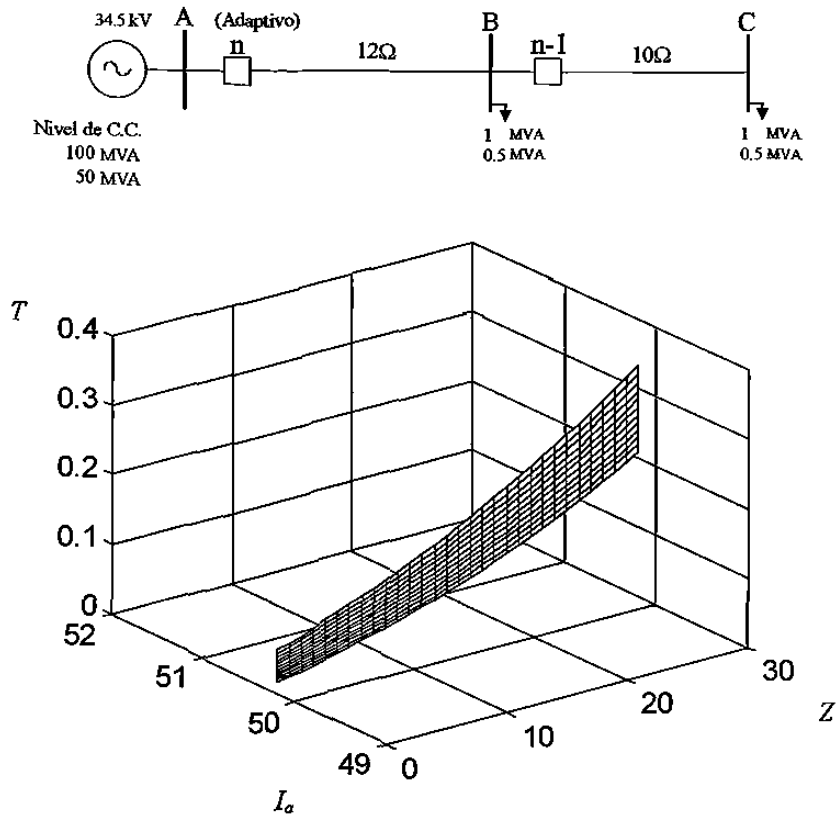


Fig. 4.23. Curva $T=f(Z)$ de un relevador convencional.

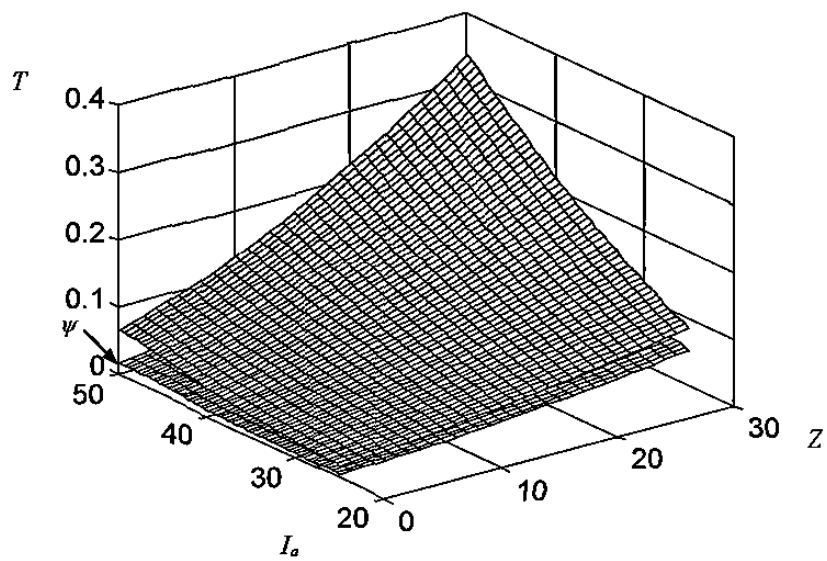


Fig. 4.24. Características $T=f(Z,I_a)$ de un relevador adaptivo.

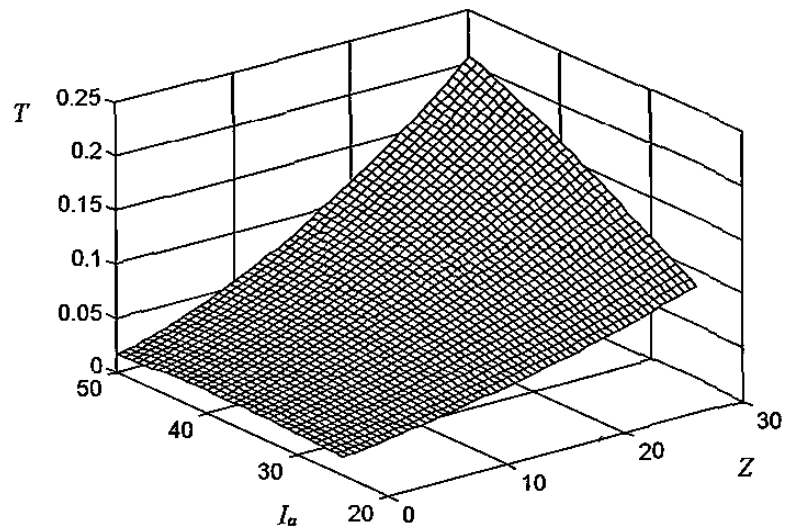


Fig. 4.25. Característica $T=f(Z,I_a)$ con criterio de dependencia lineal entre carga y generación para un relevador adaptivo.

Un estado de operación en la curva inferior para demanda mínima (25 A) representaría una condición en que la impedancia de la fuente es muy pequeña en comparación con la impedancia total hasta el punto de falla. Esto implica que el nivel de falla es relativamente independiente del nivel de generación del sistema.

4.7 Relevador adaptivo instantáneo

La corriente de arranque del elemento instantáneo de una protección de sobrecorriente convencional se calcula por (4.14), y su alcance varía entre ciertos límites, que en la Fig. 4.26 aparecen señalados como I^i_{min} y $I^i_{máx}$. En (4.14) k_i toma un valor mayor que la unidad; un valor típico es 1.25. En una protección adaptiva la corriente de arranque puede hacerse variar de modo que el alcance tienda a permanecer constante. En condiciones de generación mínima la corriente de arranque del elemento instantáneo adaptivo puede calcularse según (4.15).

$$I^i_{a\,máx} = k_i\, I_{cc_B máx} \tag{4.14}$$

$$I^i_{a\,min} = k_i\, I_{cc_B min} \tag{4.15}$$

En la Fig. 4.26 se representa gráficamente el criterio de selección de los valores límites de la corriente de arranque I_a^i del elemento instantáneo adaptivo de la protección n-1. La curva 1 corresponde a la falla trifásica en régimen de generación máxima, y la 2 a la falla bifásica en generación mínima.

La ecuación (4.14) coincide con el criterio correspondiente a protecciones convencionales; de quedar fija I_a^i en este valor, en condiciones de generación mínima el alcance sería $l_{mín}^i$. Sin embargo, si en esa condición el valor de arranque vigente es el dado por (4.15), el alcance se conserva en un valor cercano a $l_{máx}^i$ (Fig. 4.26).

Un problema a resolver en el diseño del relevador es encontrar una ley de variación de I_a^i entre los límites ya establecidos, para niveles de generación intermedios. Esta ley puede basarse en la corriente de carga como indicador indirecto del nivel de generación existente en el sistema. Una posible alternativa es llevar un registro en el relevador de los valores máximo y mínimo de la corriente de carga en el día anterior como base para el algoritmo. Sin embargo, esto requiere un procesamiento adicional de información. Otra solución es utilizar a ese fin los valores actual I_a y máximo $I_{a\,máx}$ de la corriente de arranque del elemento de tiempo inverso, que son explícitamente conocidos; en esta alternativa el algoritmo se basa en las ecuaciones:

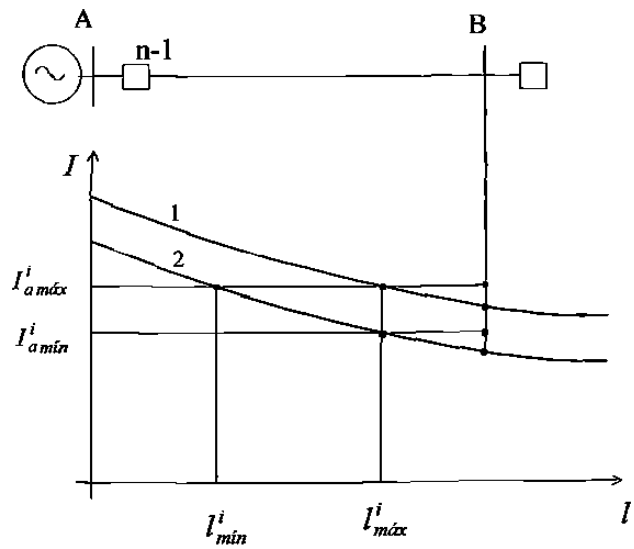


Fig. 4.26. Límites de la corriente de arranque del elemento instantáneo adaptivo.

$$I_a^i = I_{a\,máx}^i \frac{I_a}{I_{a\,máx}} \tag{4.16}$$

$$I_a^i \geq I_{a\,min}^i \tag{4.17}$$

La corriente de arranque debe estar determinada por (4.16), siempre que no se viole (4.17); en caso contrario, se fija en el límite mínimo, según (4.15). Es importante observar que este algoritmo es propio del relevador, por lo que no implica cálculos adicionales por el usuario.

En la Fig. 4.27 se presenta el resultado de las pruebas realizadas al sistema descrito en la Fig. 4.23, con el objetivo de analizar la cobertura de la protección instantánea en función de la variación del nivel de corriente de cortocircuito. Se observa que el alcance del elemento instantáneo convencional es reducido al disminuir el nivel de corriente de cortocircuito; por ejemplo, para una falla bifásica ($0.707*I_{cc\ trifásico}$) el alcance del elemento instantáneo para el sistema analizado se reduce a un 70% de la línea protegida. El elemento instantáneo adaptivo conserva su alcance constante al 90% de la línea protegida; para reducciones de la magnitud de corriente de falla a valores menores de 68% el alcance es limitado según la restricción (4.17). Este proceso de adaptación, como se puede observar en (4.16), solo es válido cuando la impedancia de la fuente es significativa con la impedancia equivalente del sistema al punto de falla; este caso se presenta cuando la fuente de generación es cercana, por ejemplo en circuitos con cogeneración.

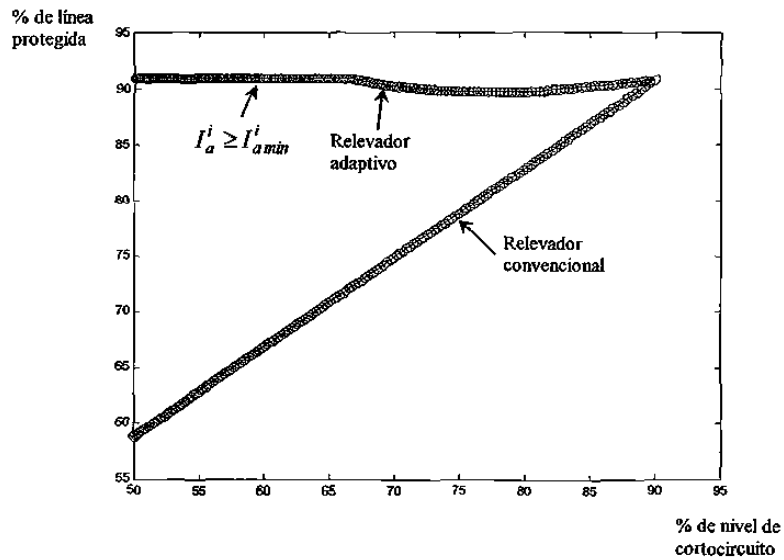


Fig. 4.27. Comportamiento del elemento instantáneo al variar el régimen de operación.

4.8 Conclusiones

- La adaptación de la corriente de arranque del relevador de tiempo inverso se obtiene variando la corriente de arranque en función de la corriente de carga. Se proponen y estudian dos criterios para la adaptación de la corriente de arranque: multiplicativo y aditivo de la corriente de carga. El aditivo es el criterio de adaptación con mejores características.

- Para el cálculo de la corriente adaptiva de arranque del elemento de tiempo inverso se proponen y analizan dos valores de corriente: valor eficaz de la componente fundamental de la corriente de fase, y valor de demanda de corriente. Se concluye que la variante que utiliza el valor de demanda de corriente, debido a que realiza un proceso de actualización del valor de ajuste del relevador en intervalos definidos para el cálculo del valor de demanda y no requiere la utilización de algoritmos de detección de fallas, es la que simplifica en mayor medida la lógica de operación del relevador adaptivo de sobrecorriente.

- Se estudiaron dos algoritmos de detección del instante de la inserción de la falla. El algoritmo de detector transitorio presenta una alta sensibilidad para detectar fallas de baja corriente y no resulta afectado por la presencia de ruido en la corriente de falla. Con este método puede detectarse tanto el inicio como el fin del cortocircuito, que son informaciones necesarias para la lógica de control de I_a. De los resultados obtenidos se concluye que el algoritmo detector transitorio presenta un comportamiento muy superior al del detector de incremento de corriente para la aplicación realizada en este trabajo. Se utiliza este algoritmo para la detección de fallas.

- Las pruebas realizadas a las dos alternativas de control adaptivo de corriente de arranque fueron satisfactorias en todos los casos.

- De los estudios realizados se puede concluir que el algoritmo de demanda es el más adecuado ya que no requiere algoritmos detectores de falla con lo cual simplifica la lógica de operación del relevador adaptivo. Este algoritmo es el que se toma como base para la concepción del relevador.

- La representación de la zona operativa de un relevador adaptivo comprende tres variables, se utiliza un plano tridimensional para representar adecuadamente la zona de operación del relevador adaptivo de sobrecorriente de tiempo inverso.

- La adaptación del elemento instantáneo del relevador de sobrecorriente es posible cuando la impedancia de la fuente de generación tiene un valor significativo con respecto a la impedancia total al punto de falla, como es el caso de redes con cogeneración.

- El criterio adaptivo para el elemento instantáneo mantiene una cobertura de protección instantánea constante de la línea protegida ante variaciones en la magnitud de la corriente de cortocircuito.

CAPÍTULO V

ADAPTACIÓN DEL TIEMPO DE OPERACIÓN

5.1 Introducción

En el Capítulo IV se demostró que la adaptación de la corriente de arranque I_a mejora la sensibilidad del elemento de tiempo inverso y reduce en cierta medida su tiempo de operación. Sin embargo, para lograr que el relevador reduzca al mínimo su tiempo de operación para cualquier estado operativo, es necesario hacer también adaptable su curva de tiempo.

En el presente capítulo se establecen los criterios y la formulación matemática requerida para la adaptación del tiempo de operación del relevador de sobrecorriente. El concepto adaptivo consiste en dar al relevador de sobrecorriente información sobre la característica de operación (expresión analítica) y la corriente de arranque del dispositivo respaldado, ya sea relevador, fusible o restaurador; con esta información, el relevador adaptivo reproduce el comportamiento dinámico del dispositivo respaldado, y ajusta automáticamente el intervalo de tiempo ΔT de coordinación. Con lo anterior se logra un margen constante de coordinación entre el relevador adaptivo y el elemento respaldado para cualquier valor de corriente de falla. Esto permite minimizar el tiempo de operación del relevador adaptivo.

El criterio de adaptación se implementa en el bloque generador de funciones del relevador adaptivo de sobrecorriente (Fig. 3.3). Se proponen dos alternativas para lograr la adaptación del relevador: modificar la función $H(I)$ o la función $J(I)$ de acuerdo con el estado vigente de carga del sistema. En este capítulo se realiza un estudio comparativo entre estas dos alternativas.

El proceso de adaptación se realiza mediante la obtención de expresiones analíticas que representan el carácter variable de la función $J(I)$ o la función $H(I)$ en el relevador. Para lo anterior, se requiere la representación analítica de la característica de operación del dispositivo respaldado. En relevadores electromecánicos, relevadores analógicos de estado sólido, fusibles y restauradores con control hidráulico, no se dispone de una expresión analítica de la característica del elemento; solo se dispone de la curva de operación (representada típicamente en escala bilogarítmica), dada por el fabricante; para estos dispositivos se desarrolló un programa de ajuste de curvas en que se selecciona de manera automática el mejor ajuste posible de un conjunto de expresiones propuestas en la literatura. Así se obtiene una representación analítica de la característica de operación tiempo-corriente para ser incluida dentro de la formulación de adaptación del tiempo de operación. Cuando la expresión analítica de la característica de operación del elemento respaldado está disponible (como es el caso de muchos relevadores digitales), el proceso de adaptación se simplifica.

5.2. Adaptación de la curva de tiempo

Tomando como referencia la red radial mostrada en la Fig. 5.1a, la idea básica de la adaptabilidad de la curva de tiempo de la protección de sobrecorriente se ilustra en la Fig. 5.1b; se representan diferentes curvas de tiempo de operación de las protecciones n y n-1, expresadas en función de la impedancia Z del sistema hasta el punto de falla. Se trata de lograr que las curvas de las protecciones n y n-1 tengan una separación ΔT en el punto de coordinación para cualquier nivel de corriente de falla. En este caso se supone que n es un relevador adaptivo, y que n-1 es convencional. En la Fig. 5.1b puede apreciarse que la misma separación ΔT existe para el nivel máximo de corriente de cortocircuito (curvas 1), el nivel mínimo de corriente de cortocircuito (curvas 3) y cualquier estado intermedio (curvas 2).

En la Fig. 5.2 se muestra parte de una familia de curvas típica de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso; n es el relevador adaptivo, y respalda al relevador n-1; las curvas denominadas 1, 2, 3 y 4 corresponden a cuatro valores diferentes del dial de tiempo. Si se supone que el relevador convencional n-1 tiene por ajuste la curva 1, la ecuación de esta característica puede escribirse:

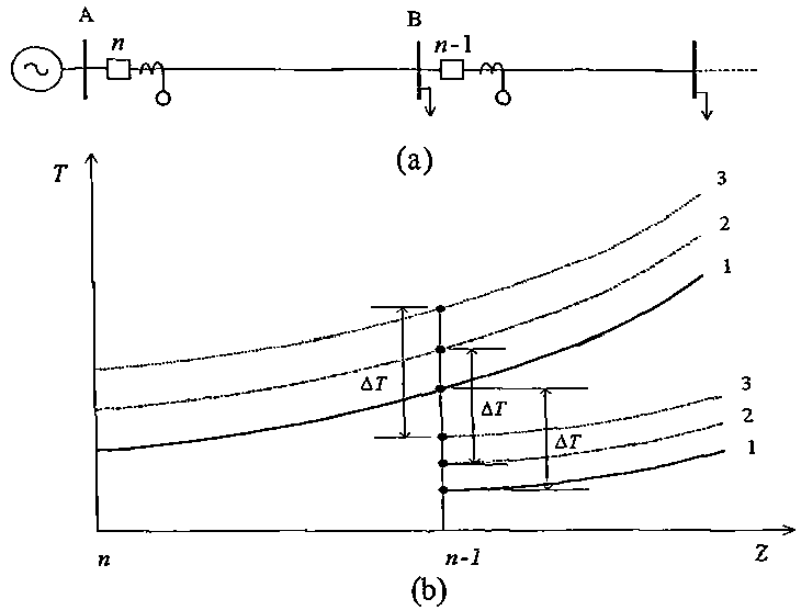


Fig. 5.1. a) Sistema radial; b) características tiempo-corriente del elemento de tiempo inverso adaptivo y del relevador respaldado.

$$T_{n-1} = F_{n-1}(I) \tag{5.1}$$

La idea básica de la adaptación de la curva de tiempo es que el tiempo de operación T_n del relevador adaptivo tenga una separación ΔT con respecto al tiempo de operación T_{n-1} de relevador respaldado, para cualquier valor de corriente:

$$T_n = T_{n-1} + \Delta T \tag{5.2}$$

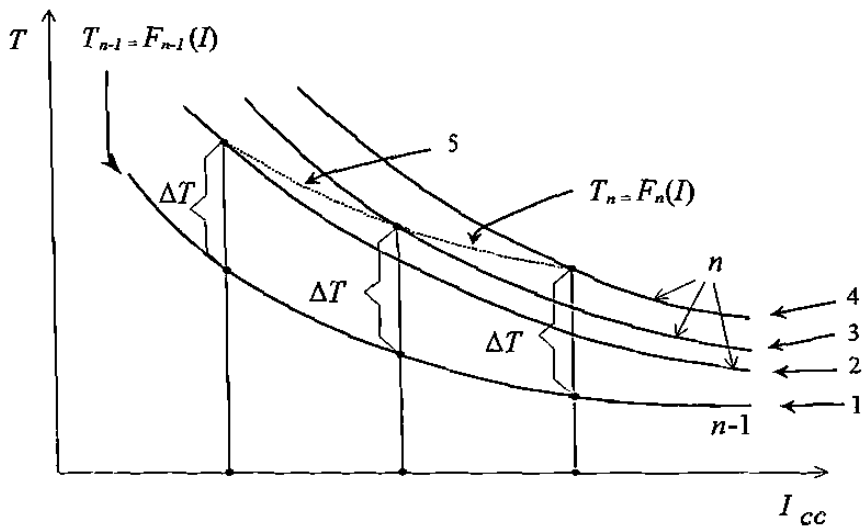


Fig. 5.2. Características tiempo-corriente del elemento de tiempo inverso adaptivo y del relevador respaldado.

donde la característica tiempo-corriente del relevador adaptivo n puede escribirse en forma similar a (5.1). De (5.2) se obtiene:

$$F_n(I) = F_{n-1}(I) + \Delta T \tag{5.3}$$

De (5.3) resulta que la característica $T_n = F_n(I)$ del relevador adaptivo se obtiene gráficamente sumando ΔT a la característica $T_{n-1} = F_{n-1}(I)$ del relevador respaldado; esta es la curva en línea de puntos denominada 5 en la Fig. 5.2. Puede observarse que 5 es una curva de tipo diferente a las del relevador respaldado. La curva 5 no se obtiene moviendo la palanca de tiempo de la característica definida en el relevador n-1 (curva 1), debido a que para valores grandes de corriente de falla, las curvas de la misma familia tienden a ser convergentes, lo que reduce el intervalo de tiempo de separación entre ellas.

Es necesario diseñar el relevador adaptivo de modo que su característica inherente sea como la curva 5, es decir, diferente a la del relevador respaldado.

Sustituyendo (3.17) en (5.3) se tiene:

$$\frac{J_n(I)}{H_n(I)} = F_{n-1}(I) + \Delta T \tag{5.4}$$

La ecuación (5.4) sugiere dos variantes para la adaptación de la curva de tiempo del relevador: modificar $J_n(I)$ o $H_n(I)$; estas son las dos posibilidades que se comentaron en relación con la Fig. 5.2. El múltiplo de corriente es determinado con el valor de corriente de arranque del dispositivo respaldado: $I = (I_{cc})/I_{a\,n\text{-}1}$.

Para la alternativa de variar $J_n(I)$, de (5.4) puede escribirse:

$$J_n(I) = H_n(I)[F_{n-1}(I) + \Delta T] \tag{5.5}$$

En este caso el elemento de tiempo inverso adaptivo tiene una característica tiempo-corriente predefinida (se conoce $H_n(I)$), y también debe conocerse en forma analítica la característica $T_{n-1} = F_{n-1}(I)$ del relevador respaldado.

Es posible escribir la versión discreta de (5.5), válida para cada instante de muestreo k:

$$J_n(I_k) = H_n(I_k)\left[F_{n-1}(I_k) + \Delta T\right] \tag{5.6}$$

Sustituyendo (5.6) en (3.14) se obtiene la ecuación que expresa la condición de operación del elemento de tiempo inverso adaptivo para este caso:

$$\Delta t \sum_{k=1}^{k_F} H_n(I_k) = H_n(I_{k_F})\left[F_{n-1}(I_{k_F}) + \Delta T\right] \tag{5.7}$$

Este método equivale a ajustar en tiempo real el dial de tiempo del relevador electromecánico de tiempo inverso o el valor umbral del detector de nivel del relevador estático, para que su tiempo de operación para la falla en cuestión tenga un margen de selectividad ΔT con respecto al relevador respaldado, para cada valor de corriente de falla.

La segunda alternativa de adaptación de la curva de tiempo que se deriva de (5.4) es variar $H_n(I)$:

$$H_n(I) = \frac{J_n(I)}{F_{n-1}(I) + \Delta T} \tag{5.8}$$

En este caso puede hacerse $J_n(I) = K_n$:

$$H_n(I) = \frac{K_n}{F_{n-1}(I) + \Delta T} \tag{5.9}$$

Este método consiste en determinar la función $H_n(I)$ del elemento adaptivo de tiempo inverso para que opere con un retardo de tiempo ΔT con respecto al relevador respaldado, para cualquier valor de corriente. Esto significa modificar la forma de la curva de tiempo del relevador, y su equivalente en relevadores analógicos sería modificar el diseño del relevador.

La ecuación de operación del relevador resulta en este caso de sustituir la versión de (5.9) para una muestra en (3.14), tomando en cuenta que $J_n(I_k) = K_n$:

$$\Delta t \sum_{k=1}^{k_{op}} \frac{1}{F_{n-1}(I_k) + \Delta T} = 1 \tag{5.10}$$

Cuando la curva del relevador respaldado es conocida analíticamente, la adaptación del relevador se realiza sustituyendo $F_{n-1}(I_k)$ por su ecuación. Cuando no se dispone de la ecuación de la característica tiempo-corriente del relevador respaldado, es posible obtener parejas de valores (I, T) de la gráfica de la característica de operación dada por el fabricante, y utilizar un procedimiento de ajuste de curvas fuera de línea para obtener $F_{n-1}(I_k)$.

En resumen, el procedimiento para este caso es:

- Obtener parejas de valores (I, T) de la curva tiempo-corriente del relevador respaldado.
- Aplicar un procedimiento de ajuste de curvas para obtener el modelo de ecuación y los coeficientes de la función de aproximación $F_{n-1}(I_k)$ para ser utilizada en $H_n(I_k)$ según (5.10) o en $J_n(I_k)$ según (5.7).
- Introducir el modelo de ecuación y sus coeficientes como datos al relevador adaptivo.

5.3 Resultados de adaptación del tiempo de operación

La evaluación de las alternativas de adaptación del tiempo de operación descritos en la sección anterior se realizó para valores de corriente de falla constantes y variables. Para corrientes de falla constantes se presentan las características T=$F(I)$ para el relevador convencional y el adaptivo, y se muestra el proceso de adaptación cumpliendo con el criterio de coordinación para cada valor de corriente. Para corrientes de falla variables se evalúa el comportamiento del relevador durante el proceso de integración y en el instante de operación de ambos relevadores.

5.3.1 Corriente de falla constante

En la Fig. 5.3 se ilustra el proceso de adaptación para la primera y segunda alternativas descritas en la Sección 5.2. En la Fig. 5.3a se presenta la primera alternativa, en que (5.2) se hace cumplir variando la función $J(I)$. Para cada valor constante considerado de corriente de falla se muestra la característica $T=F(I)$ obtenida ajustando la función $J(I)$. Se representan con asteriscos los puntos que garantizan (5.2) mediante las curvas $T=F(I)$ obtenidas variando la función $J(I)$ para cada determinado valor de corriente.

Para la segunda alternativa (Fig. 5.3b), $H(I)$ se calcula según (5.8), y se obtiene una característica en que se cumple (5.2) para cada valor de I. La función $H(I)$ genera una característica única $T=F(I)$ que garantiza el cumplimiento de (5.2) para cualquier valor de corriente; esta característica es igual a la formada en la Fig. 5.3a por el conjunto de asteriscos. Puede observarse que esta característica es una curva de tipo diferente a la del relevador respaldado.

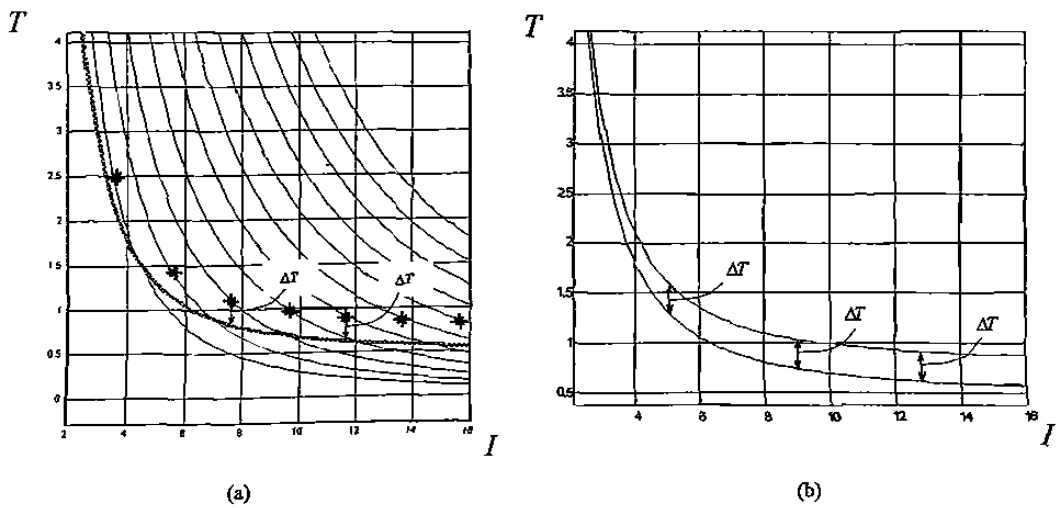


Fig. 5.3. Adaptación de la curva de tiempo para corriente constante: a) Función $J(I)$, b) Función $H(I)$.

5.3.2. Corriente de falla variable

En las pruebas realizadas se evalúa el proceso de integración del relevador adaptivo ante corrientes de falla variables. En la Fig. 5.4 se ilustra la corriente de falla (I_{cc}) de prueba (esc: 1:15) utilizada en la evaluación. El comportamiento del valor acumulado del integrador del relevador respaldado se ilustra con la línea de trazo grueso ($G_{k\,(n\text{-}1)}$), el integrador del relevador adaptivo en la primera variante $G_{k\,J(I)}$ coincide con esta característica debido a que esta alternativa solo representa un movimiento del dial de tiempo. En el caso de $G_{k\,H(I)}$ la característica del relevador adaptivo difiere de la del convencional, por tanto el proceso de integración también es diferente. La diferencia en el instante de operación es 866-576=288 muestras a una razón de 16 muestras por ciclo, lo que representa 0.3 seg.

El valor de las funciones $J(I)$ y $H(I)$ que hace el cumplimiento de (5.4) se ilustra en la Fig. 5.5. Se observa que la dinámica de las funciones $J(I)$ y $H(I)$ es similar al de la corriente de falla.

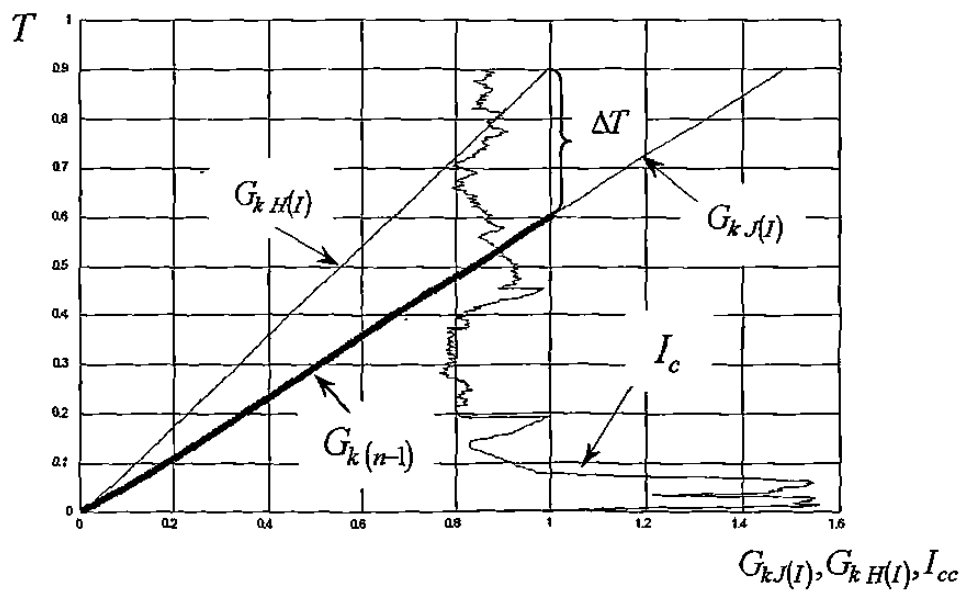


Fig. 5.4. Integración de las funciones $H(I)$ y $J(I)$, para una corriente de falla I_{cc}.

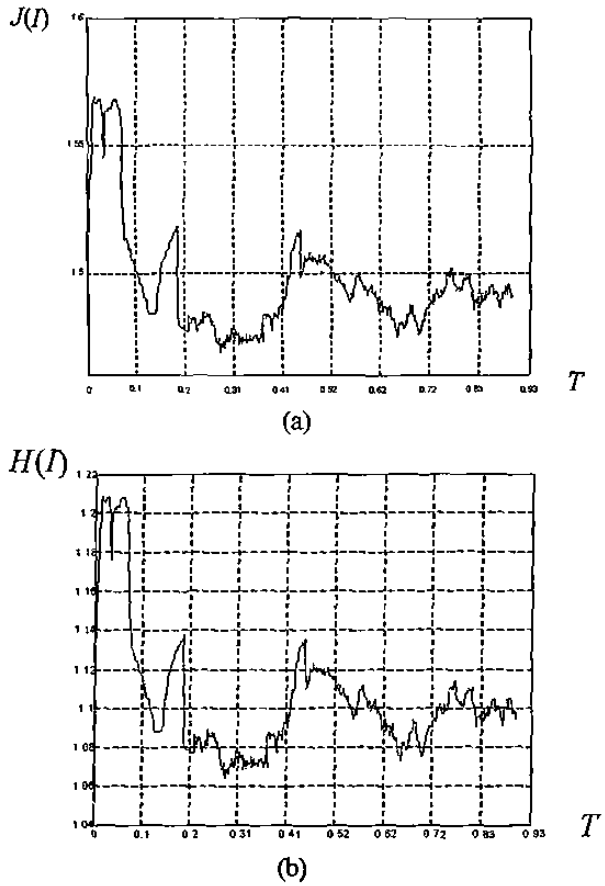


Fig. 5.5. Comportamiento de las funciones adaptivas: a) $J(I)$ y b) $H(I)$.

De estos resultados se observa que las dos funciones adaptivas $J(I)$ y $H(I)$ cumplen con el criterio requerido. La alternativa de la función $J(I)$ exige un procesamiento adicional del relevador de sobrecorriente en el instante de falla, ya que el valor de la función $J(I)$ se actualiza en dependencia del valor de corriente de falla, presenta una clara desventaja algorítmica. La segunda alternativa presenta características más atractivas para su aplicación.

5.4 Ajuste de curvas

Las características tiempo-corriente de los relevadores electromecánicos de sobrecorriente de tiempo inverso se dan en forma de familias de curvas publicadas por los fabricantes. Esas curvas reflejan por lo general valores promedio obtenidos por pruebas a los

relevadores. Los relevadores electrónicos analógicos y digitales se diseñan para emular las características de los relevadores analógicos con el objetivo de facilitar la coordinación.

Las características tiempo-corriente de los relevadores de sobrecorriente electromecánicos están determinadas por la dinámica del desplazamiento del disco de inducción [**13,33,34,35,36**]. La posición del disco corresponde a la integral de la velocidad angular, que a su vez depende de la diferencia entre el par electromecánico y el del muelle de retención. El par electromagnético es proporcional al cuadrado del flujo magnético originado por la corriente. Si el circuito magnético es lineal, el tiempo de operación depende en forma inversa del cuadrado de la corriente. En realidad en el diseño del relevador se utiliza la saturación del circuito magnético para conformar la característica tiempo-corriente. En los relevadores electrónicos analógicos el proceso de carga de un capacitor hace la función de integración. El voltaje de entrada al integrador tiene una relación funcional no lineal con la corriente, que sirve para conformar la característica tiempo-corriente. Los relevadores digitales emulan en forma numérica la integración y dan una gran flexibilidad para conformar las características tiempo-corriente.

La modelación matemática de las características tiempo-corriente es necesaria para la representación digital de esas características en programas de coordinación [**37,38,39,40,41,42,43,44**]. Dos problemas básicos a resolver en un programa de coordinación de relevadores de sobrecorriente son: determinar un valor de tiempo de operación del relevador correspondiente a un valor de corriente para determinados ajustes (corriente de arranque y palanca de tiempo), y determinar la palanca de tiempo requerida para obtener un cierto tiempo de operación para una corriente dada, conociendo la corriente de arranque.

En el diseño de relevadores digitales de sobrecorriente [**45,46,47,48,49,50,51**] también se requiere la modelación matemática de las características tiempo-corriente. A partir de la ecuación de la característica deseada, se determina la función no lineal de la corriente que es objeto de integración.

Se han propuesto diversos modelos matemáticos para las características de los relevadores de tiempo inverso. Wylie, et. al. [38] utilizó tablas de pares de valores de tiempo y corriente para representar las características. Knable [37] propuso un modelo basado en determinar la pendiente de la característica en diferentes puntos. Warrington [52,53] y Hieber [39] propusieron ecuaciones de tipo exponencial para las características. Radke [40], Albrecht, et. al. [42], Sachdev, et. al. [44], Singh, et.al. [54] y Damborg, et. al. [55] sugirieron el uso de ecuaciones polinomiales. La norma IEC 255-4 [20] y, más recientemente, la norma IEEE Std C37.112-1996 [13] proponen ecuaciones de tipo exponencial para las características tiempo-corriente de los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso.

Para la modelación de la familia de curvas (en que la palanca de tiempo es un parámetro) se han utilizado dos enfoques básicos. Uno de ellos es modelar una de las características de la familia de curvas y utilizar una ecuación independiente (en función de la palanca de tiempo) para calcular el tiempo de operación correspondiente a otra característica [44]. La otra posibilidad es modelar toda la familia de curvas mediante un polinomio único, que expresa el tiempo de operación en función de la corriente y de la palanca de tiempo [42,55].

En este trabajo se reportan los resultados de una evaluación comparativa de los principales modelos matemáticos de las características tiempo-corriente de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso. Se elaboró un programa de ajuste de curvas en MATLAB®, que se utilizó para estudiar las características de un conjunto de relevadores electromecánicos y digitales. Este programa contiene los modelos de ajuste propuestos en la literatura y realiza una comparación estadística entre ellos para determinar el mejor ajuste. El estudio se concentra en la modelación de una sola característica de la familia, por lo que no se consideraron los modelos polinomiales que incluyen la palanca de tiempo. Los resultados obtenidos demuestran que no existe una ecuación única que ofrezca el mejor ajuste de las características de todos los relevadores.

5.4.1 Ecuaciones de las características tiempo-corriente

Se ha establecido [**56**,**44**] que las ecuaciones de ajuste de las características tiempo-corriente de los relevadores de sobrecorriente deben cumplir los requisitos siguientes: a) tener un error de ajuste reducido; b) las curvas resultantes deben ser asintóticas a la corriente de arranque; c) las curvas deben ser asintóticas a un cierto valor de tiempo de operación (lo que implica reproducir con fidelidad la forma de la curva del relevador en un intervalo amplio de corrientes); d) las ecuaciones deben ser sencillas en la medida de lo posible. A continuación se presentan las ecuaciones más generalmente aceptadas para el ajuste de una sola característica tiempo-corriente. El tratamiento matemático de la generación de la familia de curvas no es objeto de estudio de este trabajo.

A. Ecuaciones de tipo exponencial

La norma IEC 255-3 [**20**] propone la ecuación:

$$T = \frac{A}{I^n - 1} \tag{5.11}$$

donde T es el tiempo de operación, $I = I_r / I_a$ es la corriente de entrada al relevador I_r, expresada en múltiplos de la corriente de arranque I_a, y A y n son constantes. Esta norma establece tres tipos de características: inversa (n = 0.02), muy inversa (n = 1) y extremadamente inversa (n = 2).

La norma IEEE Std C37.112-1996 [**13**] propone la ecuación:

$$T = \frac{A}{I^n - 1} + B \tag{5.12}$$

donde A y B son constantes. La ecuación (5.11) es un caso particular de (5.12). Las curvas resultantes de ambas ecuaciones son asintóticas a la corriente de arranque. La curva (5.12) es asintótica a un cierto valor de tiempo de operación, lo que facilita la coordinación con fusibles (el tiempo de extinción del arco le da un carácter de tiempo definido para grandes

múltiplos a la característica de tiempo de eliminación de falla del fusible). Por el contrario, la curva (5.11) es asintótica al eje de corriente. Esta característica es típica en Europa y Japón, donde las redes de distribución están compuestas por líneas cortas de tres hilos en que prácticamente no se utilizan fusibles [**36,13**].

La norma IEEE Std C37.112-1996 [**13**] establece tres tipos de características, que se denominan características moderadamente inversa, muy inversa y extremadamente inversa. La norma especifica los valores de A, B y n (ecuación (5.12)) que describen una curva básica para cada tipo de característica. Multiplicando los tiempos de esas curvas básicas por 1.15 y 0.85 se obtienen las bandas que permiten clasificar las características en los tres tipos antes indicados. Los valores de n correspondientes son $n = 0.02$ para la curva moderadamente inversa, y $n = 2$ para las curvas muy inversa y extremadamente inversa.

Heiber [**39**] propuso una ecuación de ajuste de tipo exponencial de mayor complejidad que (5.11) y (5.12):

$$T = C + \frac{K}{\left(I - h + wI^{-2I}\right)^q} - b\left(\frac{I}{50}\right)^n \tag{5.13}$$

donde C, K, h, w, q, b y n son constantes.

B. Ecuaciones polinomiales

Radke [**40**] propuso el polinomio logarítmico:

$$\log(T - B) = A_0 + A_1(\log I) + A_2(\log I)^2 + \cdots \tag{5.14}$$

donde B, A_0, A_1, A_2, ... son constantes. La ecuación (5.14) no es asintótica a la corriente de arranque. Además, el tiempo de operación no decrece monotónicamente a medida que la corriente aumenta. Sachdev y colaboradores [**44**] añadieron un término a (5.14) para resolver el primero de los dos problemas anteriormente señalados:

$$\log(T - B) = \frac{A_{-1}}{\log I} + A_0 + A_1(\log I) + A_2(\log I)^2 + \cdots \tag{5.15}$$

donde A_{-1} es otra constante. La ecuación (5.15) mantiene el inconveniente de que el tiempo no decrece monotónicamente con la corriente, lo que ha limitado su aplicación.

Tres ecuaciones polinomiales que resuelven los dos problemas anteriores son las propuestos por Sachdev, et. al. [44] y Singh, et. al. [54]:

$$\log T = A_0 + \frac{A_1}{\log I} + \frac{A_2}{(\log I)^2} + \cdots \tag{5.16}$$

$$T = A_0 + \frac{A_1}{I-1} + \frac{A_2}{(I-1)^2} + \cdots \tag{5.17}$$

$$T = A_0 + \frac{A_1}{I-1} + \frac{A_2}{I^2-1} + \cdots \tag{5.18}$$

También es interesante evaluar un polinomio en el que el tiempo T es una función del logaritmo de la corriente:

$$T = A_0 + \frac{A_1}{\log I} + \frac{A_2}{(\log I)^2} + \cdots \tag{5.19}$$

5.4.2 Ecuaciones de los relevadores digitales de sobrecorriente

Los fabricantes de relevadores digitales de sobrecorriente publican las familias de curvas de sus relevadores, pero por lo general también dan las ecuaciones correspondientes. En el diseño del relevador la familia de curvas se genera a partir de la ecuación de una característica, y se utiliza un coeficiente de multiplicación para obtener las restantes curvas de la familia. Ese coeficiente, denominado D en las siguientes ecuaciones, es el equivalente digital de la palanca o dial de tiempo. A continuación se presentan las ecuaciones de ocho relevadores digitales de sobrecorriente, obtenidas a partir de la información de fabricante.

$$T = \frac{5.67D}{I^2-1} + 0.352D \tag{5.20}$$

$$T = 0.2D\left(\frac{28.2}{I^2 - 1} + 0.1217\right) \tag{5.21}$$

$$T = 0.2D\left(\frac{0.0515}{I^{0.02} - 1} + 0.114\right) \tag{5.22}$$

$$T = \frac{0.4797D}{I^{1.5625} - 1} + 0.21359D + 0.028 \tag{5.23}$$

$$T = \left(\frac{2.93}{I^2 - 1.026} + 0.0112\right)(2.244)(14D - 5)/9 \tag{5.24}$$

$$T = \frac{120D}{I - 1} \tag{5.25}$$

$$T = \frac{91.2011D}{I^{1.96}} \tag{5.26}$$

$$T = D\left(A_0 + \frac{A_1}{I + B} + \frac{A_2}{I^2} + \frac{A_3}{I^3}\right) \tag{5.27}$$

donde A_0, A_1, A_2, A_3 y B son constantes.

Las ecuaciones (5.20), (5.21), (5.22) y (5.23) son versiones de (5.12). La ecuación (5.24) constituye una ligera modificación de (5.12), que la hace asintótica a I = 1.026. La ecuación (5.25) es una versión de (5.11), mientras que (5.26) es una modificación de (5.11), que no es asintótica a la corriente de arranque, sino al eje de tiempo. Finalmente, (5.27) es una ecuación polinomial que tiene ciertas diferencias con respecto a (5.18).

5.4.3 Programa de ajuste de curvas

Existen dos métodos para representar digitalmente las características tiempo-corriente [57]. Uno de esos métodos consiste en almacenar en memoria pares de valores de tiempo y corriente y determinar el tiempo de operación correspondiente a un valor de corriente por interpolación directa. Este método es aplicable a dispositivos con características

relativamente fijas y con pocos ajustes. Para dispositivos con muchos ajustes, como relevadores, se requiere mucha memoria para el almacenamiento de datos. El segundo método es el de ajuste de curvas, que consiste en seleccionar una ecuación apropiada y determinar y almacenar los coeficientes que producen un ajuste satisfactorio. Este es el método más utilizado, y es el que se aplica en este trabajo.

Existen en general dos métodos para el ajuste de curvas, cuya aplicación depende del error asociado con los datos [57]:

Regresión de mínimos cuadrados: Es apropiada para datos de entrada con ruido. Se deriva una curva que representa la tendencia general de los datos. Debido a que puntos individuales de datos pueden ser incorrectos, el algoritmo no trata de intersectar cada punto.

Interpolación: Es apropiada cuando los datos de entrada se conocen con exactitud. El proceso consiste en ajustar una o varias curvas que pasen directamente a través de cada uno de los puntos. Se hace una estimación de valores entre puntos discretos bien determinados.

El diagrama de bloques de la Fig. 5.6 presenta la clasificación de los algoritmos de ajuste de curvas. El objetivo de los algoritmos de regresión mínimo-cuadrática es reducir el error entre los valores estimados y los datos, utilizando técnicas de optimización mínimo-cuadrática. En la regresión lineal el modelo depende linealmente de los coeficientes o parámetros a determinar. La ecuación de ajuste puede ser una línea recta (regresión lineal simple) o un polinomio (regresión polinomial). También existe la regresión lineal múltiple, en que se tienen dos o más variables independientes en la función. En la regresión no lineal el modelo es una función no lineal de los parámetros o coeficientes.

Los algoritmos de interpolación son apropiados para ajustar valores intermedios entre datos exactos. Para lograr tal propósito se utilizan polinomios; el algoritmo de Newton es preferible cuando el orden del polinomio es desconocido; cuando se conoce el orden, el algoritmo de Lagrange es el más adecuado. El algoritmo denominado Splines utiliza

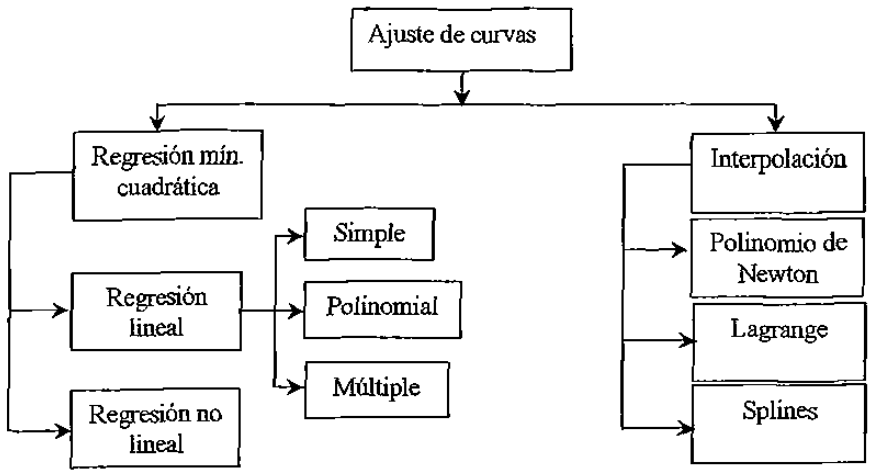


Fig. 5.6. Clasificación de algoritmos de ajuste de curvas.

polinomios de orden pequeño para interpolar subconjuntos de datos. Es adecuado cuando los datos tienen cambios abruptos.

Las características tiempo-corriente de los relevadores de sobrecorriente publicadas por los fabricantes tienen pequeños errores. Una fuente de error es que esas características son curvas promedio, resultantes de pruebas a relevadores. También se introducen errores en la lectura de los valores a partir de las curvas, que por lo general son de tipo logarítmico. Para reducir el efecto de esta última fuente de error, el Comité de Protecciones del IEEE ha recomendado que los fabricantes den tablas de valores de tiempo-corriente, además de las curvas de los relevadores [56]. Muchos fabricantes de relevadores digitales publican las ecuaciones de las características tiempo-corriente, lo que resuelve este problema.

La presencia de estos errores en los datos hace recomendable utilizar técnicas de regresión mínimo-cuadrática para el ajuste de curvas de relevadores. En este trabajo se utiliza la regresión no lineal para el ajuste de ecuaciones de tipo exponencial, y regresión lineal polinomial para el ajuste de ecuaciones de tipo polinomial. La formulación de estos dos algoritmos de ajuste se presenta en el Apéndice C. No obstante lo anterior, también se han utilizado técnicas de interpolación, como el algoritmo Splines, en programas comerciales de coordinación de relevadores.

En la Fig. 5.7 se muestra el diagrama de flujo del programa de ajuste de curvas elaborado en MATLAB® en este trabajo. El programa cuenta con subrutinas de regresión no lineal y regresión polinomial, que incluyen varias ecuaciones de cada tipo. En particular, en regresión no lineal se dispone de las ecuaciones (5.11), (5.12) y (5.13), entre otras. La regresión polinomial incluye las ecuaciones (5.16), (5.17), (5.18) y (5.19). En esta subrutina el programa selecciona automáticamente el orden del polinomio que da el mejor ajuste. El programa permite obtener los resultados del ajuste para una determinada ecuación, y determinar automáticamente el mejor ajuste resultante de todas las ecuaciones disponibles. Esta segunda opción es de gran valor, pues por lo general no se conoce de antemano la ecuación que da el mejor ajuste de la característica de un determinado relevador. También es importante esta opción para el ajuste de características de otros dispositivos de protección de sobrecorriente, como fusibles o restauradores automáticos.

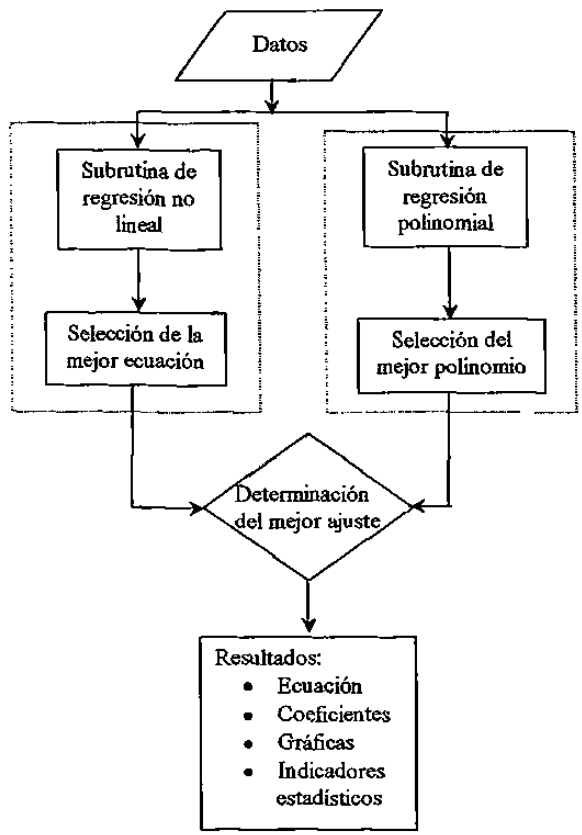


Fig. 5.7. Diagrama de flujo del programa de ajuste de curvas.

El programa presenta los resultados en forma tabular y gráfica. Las tablas incluyen los coeficientes de la ecuación de ajuste y los indicadores estadísticos que dan una medida del error. Las gráficas incluyen las curvas tiempo-corriente reales y ajustadas, y curvas de errores en función de la corriente.

Los indicadores estadísticos son: a) Suma de los cuadrados de los errores, S; b) Media del error, *EMED*; c) Desviación máxima del error, *EMAX*; d) Desviación standard del error, σ.

5.4.4. Ajuste de curvas de relevadores

A continuación se reportan algunos de los resultados obtenidos de la aplicación del programa al estudio de características de relevadores comerciales de sobrecorriente. Se analizaron curvas de ocho relevadores digitales para efectos de validación del algoritmo de ajuste, que son los descritos por las ecuaciones (5.20) a (5.27). Denominaremos A, B, C, D, E, F, G y H a esos relevadores, en el orden dado por las ecuaciones. Se estudiaron también las curvas de cuatro relevadores electromecánicos de sobrecorriente, que denominaremos relevadores I, J ,K y L.

Para los relevadores digitales se utilizaron las ecuaciones (5.20) a (5.27) para generar los pares de valores tiempo-corriente. Para los relevadores electromecánicos esos valores fueron obtenidos de las curvas publicadas por los fabricantes, lo que introduce un error de apreciación. Se tomaron 10 puntos correspondientes a los valores de corriente con espaciamiento uniforme en escala logarítmica, recomendadas en el reporte del Comité de Protecciones del IEEE [**56**].

No existen definiciones de criterios de exactitud, pero se acepta [**56,40,41,44**] como un buen ajuste aquel en que, para cualquier valor de corriente, el tiempo calculado por la ecuación tenga un error no mayor de tres ciclos con respecto al valor exacto (tomado de la curva publicada, por ejemplo). Para corrientes que representan múltiplos elevados de la corriente de arranque, el error puede exceder este límite, pero no debe ser mayor del 5%. Estos requerimientos de exactitud se aplican por lo general a partir del múltiplo 2, aún cuando los fabricantes dan las características tiempo-corriente comenzando en el múltiplo 1.5. Se considera que la región de las curvas para múltiplos entre 1 y 2 tiene cierta incertidumbre, y no es de utilidad para coordinación [**56,44**]. No obstante lo anterior, en este trabajo se evaluaron las curvas en todo el intervalo de valores de corriente dado por los fabricantes.

Las Tablas 5.1 y 5.2 muestran los indicadores estadísticos de los errores resultantes de la aplicación de las ecuaciones de ajuste a las características de los relevadores estudiados. La Tabla 5.1 se refiere a las ecuaciones exponenciales, y la Tabla 5.2, a las polinomiales. Los mejores resultados de ajuste aparecen resaltados en negrita en ambas tablas. Puede concluirse lo siguiente:

- De las tres ecuaciones exponenciales estudiadas en este trabajo, la ecuación (5.13), propuesta por Hieber [**39**], es la que en general da los mejores ajustes para relevadores electromecánicos. La ecuación (5.12), propuesta por la norma IEEE Std C37.112-1996 [**13**] da en general buenos resultados, excepto para el relevador G. La ecuación (5.11), propuesta por la norma IEC 255-4 [**20**] da también ajustes razonablemente buenos, excepto para el relevador G.

- La ecuación polinomial (5.18) da en general resultados deficientes. Aunque la media del error no es elevada, hay desviaciones significativas y altos valores del cuadrado de los errores.

- Las ecuaciones polinomiales (5.16), (5.17) y (5.19) ajustan bien las características de los relevadores electromecánicos. Sin embargo, esas ecuaciones dan errores significativos en el ajuste de las curvas de algunos relevadores digitales (relevadores E, F y G, por ejemplo, excepto (5.17) para F).

- La ecuación (5.19), propuesta por primera vez en este trabajo, es claramente superior a (5.18) y ajusta mejor que (5.16) y (5.17) las curvas de los relevadores digitales. Para estos relevadores, no obstante, es inferior a las ecuaciones exponenciales (5.13), (5.12) y (5.11).

- Las expresiones exponenciales en general presentan valores muy pequeños de las desviaciones y la media del error, manifestándose en un ajuste cerrado a la curva de entrada. Las expresiones logarítmicas presentan desviaciones y media del error muy grandes para los relevadores digitales, y valores aceptables para relevadores electromecánicos, excepto para (5.18).

La Fig. 5.8 muestra la salida gráfica del programa para el mejor ajuste de cada característica. Para cada relevador se presentan las curvas real y ajustada de tiempo de operación (T, en segundos) en función del múltiplo de la corriente de arranque (I). También se muestra la curva del error (E_r, en ciclos), en función de I. Puede observarse que los errores nunca sobrepasan el límite de tres ciclos, excepto parta el relevador E, pero para un múltiplo inferior a 2. Dado la exactitud del ajuste, en la Fig. 5.8 no es posible distinguir la curva real y la ajustada. En el caso del relevador J, que tiene una característica de tiempo inverso, se observó que el error de ajuste es altamente sensible a la exactitud con la que se miden los valores de tiempo en la curva publicada por el fabricante.

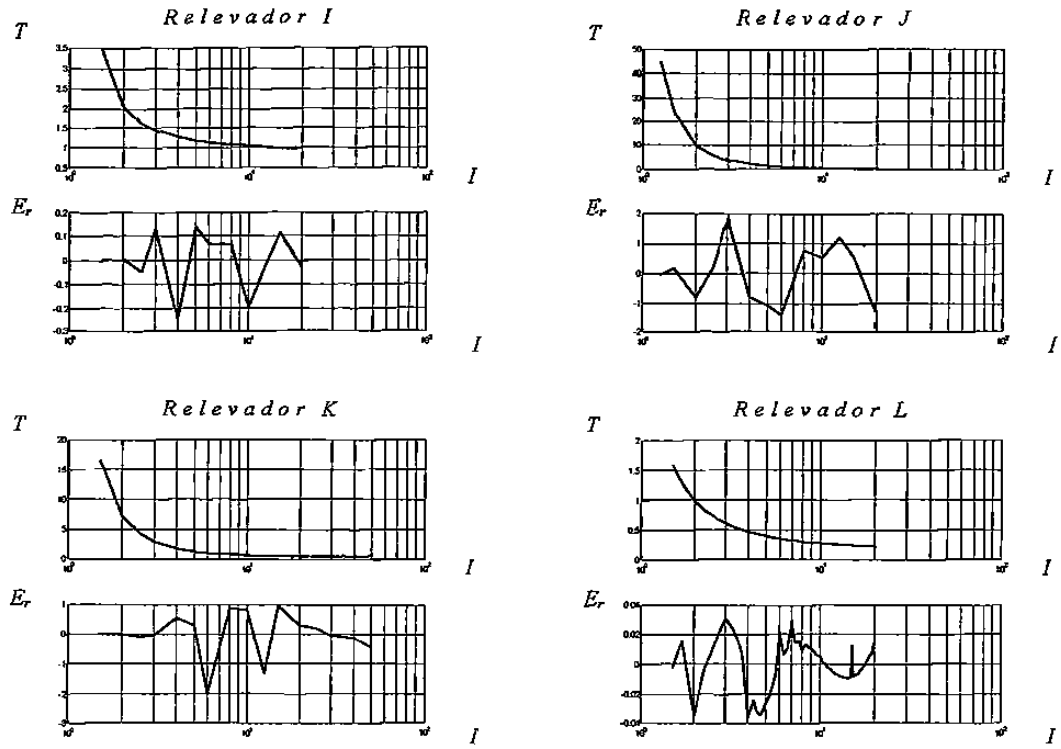


Fig. 5.8. Resultados gráficos para relevadores digitales (A, B, C, D, E, F, G, H) y electromecánicos (I, J, K, L). (Continuación).

Tabla 5.1. Resultados del ajuste con ecuaciones exponenciales.

Relev.	Ecuación (5.11)				Ecuación (5.12)				Ecuación (5.13)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
A	0.092	-0.181	0.047	0.115	**0.000**	-0.000	**0.000**	**0.000**	0.031	-0.061	0.077	0.125
B	0.05	-0.143	0.034	0.084	**000**	**000**	**000**	**000**	0.034	-0.064	0.081	0.131
C	0.006	-0.04	0.009	0.03	**000**	**000**	**000**	**000**	0.006	0.02	0.035	0.055
D	0.006	0.042	0.012	0.031	**000**	**000**	**000**	**000**	000	-0.006	0.008	0.013
E	0.947	-0.152	0.31	0.367	**0.21**	**0.174**	**0.20**	**0.187**	0.859	-0.319	*0.411*	*0.655*
F	**000**	**000**	**000**	**000**	000	**000**	**000**	**000**	4.9e4	-145.02	94.27	157.12
G	61.81	-2.55	2.33	2.97	51.30	-3.29	2.203	2.92	**000**	**000**	**000**	**000**
H	0.012	-0.041	0.03	0.041	0.009	-0.044	0.028	0.039	0.002	0.016	0.018	0.031
I	0.062	0.003	0.132	0.083	0.005	000	0.031	0.026	000	000	0.004	0.003
J	6.90	0.089	2.23	0.83	6.504	000	2.11	0.85	**0.003**	**000**	**0.03**	**0.026**
K	1.65	-0.18	0.429	0.357	0.028	000	0.081	0.048	0.003	000	0.038	0.021
L	0.010	000	0.043	0.012	0.010	000	0.053	0.011	**000**	**000**	**000**	**000**

Tabla 5.2. Resultados del ajuste con ecuaciones polinomiales.

Relev.	Ecuación (5.16)				Ecuación (5.17)				Ecuación (5.18)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
A	10.07	-1.26	1.508	1.586	0.408	-0.278	0.212	0.241	193.55	17.978	5.431	6.956
B	13.107	-1.476	1.819	1.619	0.43	-0.291	0.216	0.247	209.15	19.465	5.547	7.231
C	0.027	-0.05	0.079	0.067	0.03	0.08	0.055	0.07	13.55	4.603	1.358	1.841
D	0.008	0.033	0.041	0.041	0.003	-0.02	0.018	0.021	3.045	2.305	0.663	0.872
E	250.82	-5.78	9.927	7.082	19.99	-1.78	1.932	1.69	4e4	320.69	76.35	100.61
F	4.7e4	-91.10	99.57	88.69	000	000	000	000	5.9e5	989.49	288.19	384.41
G	1.8e3	-18.64	18.15	17.32	108.43	-4.71	3.22	3.93	1.8e4	171.27	50.38	67.95
H	0.249	-0.119	0.262	0.249	0.001	-0.019	0.012	0.015	3.668	2.333	0.697	0.957
I	000	000	0.004	0.002	000	000	0.004	0.002	10.69	000	2.553	1.335
J	0.017	000	0.079	0.049	0.004	000	0.04	0.025	8.3e4	000	73.96	34.57
K	0.005	000	0.039	0.023	0.002	000	0.033	0.015	742.55	000	21.43	8.617
L	0.001	000	0.012	0.003	000	000	0.003	0.001	4.034	000	1.078	0.241

Tabla 5.2. (Continuación)

Relev.	Ecuación (5.19)			
	S	EMED	EMAX	σ
A	0.028	0.036	0.091	0.069
B	0.023	0.026	0.083	0.062
C	000	000	000	000
D	0.004	0.023	0.028	0.028
E	25.95	-2.051	2.17	1.92
F	545.2	-10.12	6.841	8.82
G	55.43	2.32	3.64	3.03
H	0.001	-0.008	0.026	0.018
I	000	000	0.004	0.002
J	0.035	000	0.03	0.022
K	-0.002	000	0.036	0.016
L	000	000	0.005	0.001

En el relevador E (Fig. 5.8) se presenta un error mayor a 15 ciclos para múltiplos inferiores a 2; este ajuste no es aceptable. Si se compara la ecuación (5.24) del relevador E con la expresión (5.12) dada por **[13]**, se observa que presentan una estructura similar, con la diferencia de que la expresión (5.24) es asintótica a un valor diferente de la unidad; esta es la fuente del error de ajuste de (5.24) para múltiplos cercanos a la unidad. Añadiendo grados de libertad para el ajuste, se llega a una versión generalizada de (5.12):

$$T = \frac{A}{I^n - C} + B \tag{5.28}$$

En la Fig. 5.9 se aprecia la reducción drástica del error a 0.4 ciclos al utilizar esta variante. Se recomienda remplazar la función (5.12) por (5.28); este reemplazo no degrada los ajustes obtenidos con (5.12), porque son asintóticos a la unidad.

5.4.5 Ajuste de curvas de fusibles

En muchos sistemas de protección para circuitos de distribución el relevador tiene que coordinarse con otros dispositivos de protección de sobrecorriente, tales como fusibles y restauradores. En la sección anterior se evaluó el proceso de ajuste de curvas y la obtención de la expresión analítica de la característica de operación para relevadores. En esta sección y la siguiente se evalúa el algoritmo descrito en la Sección 5.4.3 para el ajuste de características T=$F(I)$ para fusibles y restauradores.

La obtención de la expresión analítica de las características de operación de fusibles y restauradores, y la aplicación de dichas expresiones al relevador, no presenta complicaciones adicionales en el proceso de coordinación, ya que, como se verá en detalle en el Capítulo VI, el relevador adaptivo no requiere coordinarse.

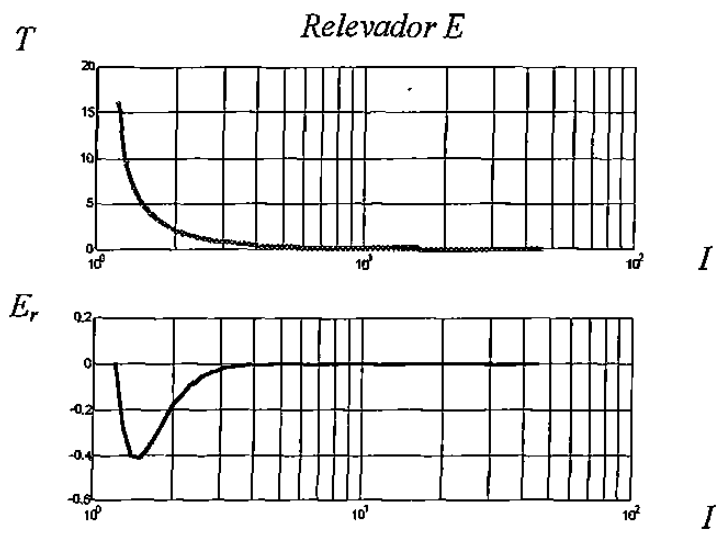


Fig. 5.9. Ajuste modificado del relevador descrito por (5.24) usando (5.28).

Para el ajuste de curvas de las características de operación de fusibles comerciales, se utilizó el algoritmo descrito en la Sección 5.4.3 y los modelos de curvas descritos en la Sección 5.4.1. Las características de fusibles no están definidas analíticamente, por lo que el proceso de validación del ajuste resultante se realiza respecto a los valores tiempo-corriente introducidos. Estos valores fueron obtenidos de tablas dadas en programas de análisis de sistemas de potencia comerciales [**19**, **58**]. Se tomaron 10 puntos uniformemente distribuidos [**56**]. No existen criterios de exactitud para fusibles, por lo que se toman como referencia los criterios utilizados para relevadores (Sección 5.4.4). En el ajuste de fusibles, a diferencia de los relevadores, no existe una región crítica para el ajuste en que se puedan definir otros criterios de exactitud; en un fusible todo el intervalo de corriente es crítico y la curva de la característica de operación es más variable en su forma que la de los relevadores. En este trabajo se propone ampliar los criterios de exactitud utilizados en relevadores para el caso de ajuste de fusibles; se propone como aceptable un ajuste de 10 ciclos, que representa una incertidumbre máxima de 166 ms, y se analiza todo el intervalo de valores utilizados por los fabricantes.

En la Fig. 5.10 se muestran los resultados gráficos obtenidos del programa de ajuste de curvas. En cada caso se presenta la curva tiempo-corriente de entrada y la ajustada, la desviación del error (ΔE) y el error en ciclos (E_r). Se observa que el ajuste para todos los fusibles es deficiente.

En las Tablas 5.3 y 5.4 se muestran los indicadores estadísticos de los errores resultantes de la aplicación de los algoritmos de ajuste. Los mejores resultados de ajuste aparecen resaltados en negritas en ambas tablas. Puede concluirse lo siguiente:

- Las ecuaciones exponenciales ofrecen en general malos resultados de ajuste, debido a que fueron desarrolladas para ajustar curvas de relevadores. No son adecuadas para ajustar curvas con grados de inversión menores a los de relevadores.

- Las expresiones polinomiales son más adecuadas para realizar el ajuste de curvas para fusibles que las expresiones exponenciales. Las ecuaciones polinomiales (5.16) y (5.17) dan en general los mejores ajustes para fusibles.

- No es posible lograr errores de ajuste aceptables para fusibles con este algoritmo. Es recomendable explorar la variante de ajuste basada en la función $H(I)$.

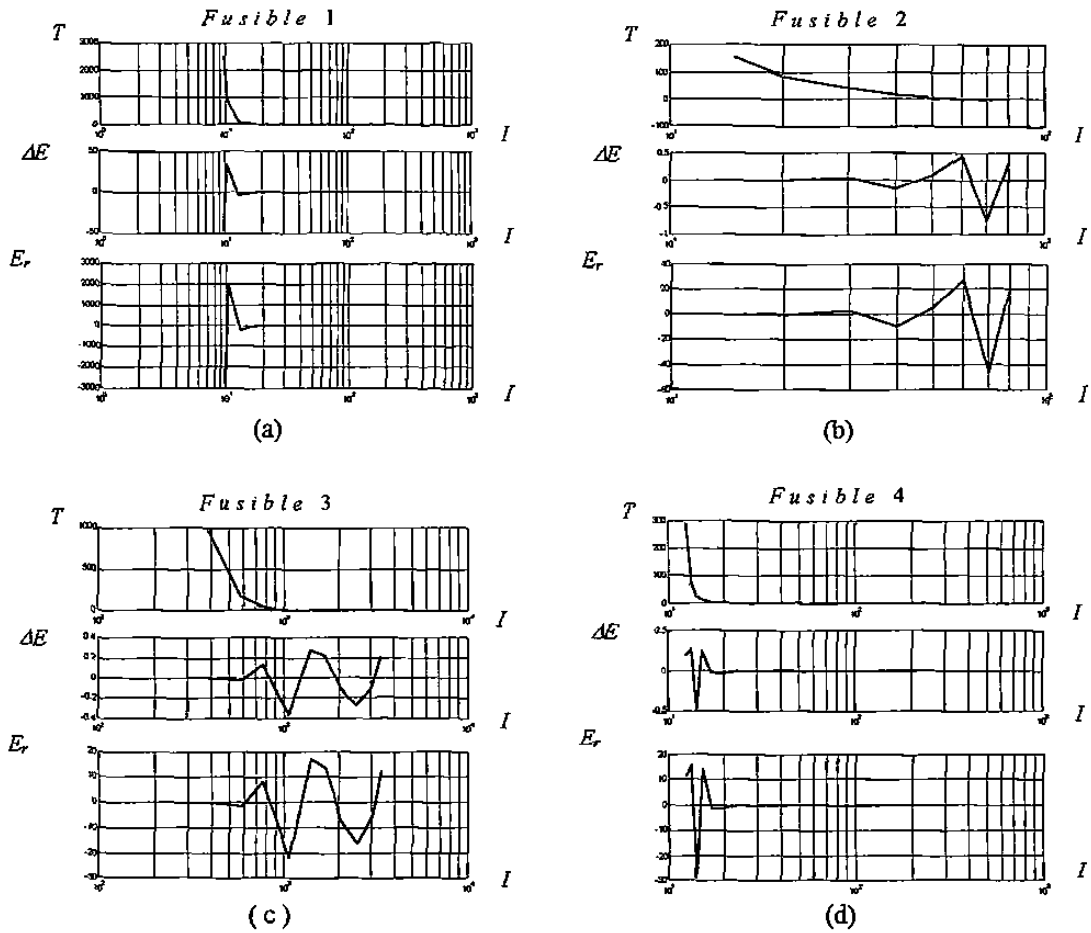


Fig. 5.10. Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para fusibles comerciales.

Tabla 5.3. Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones exponenciales.

Fusible.	Ecuación (5.11)				Ecuación (5.12)				Ecuación (5.13)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	8.1e5	62.101	562.32	342.06	5.9e6	000	2.1e3	1.0e3	3.5e6	-0.71	1.5e3	1.3e3
2	148.48	1.679	7.039	5.449	3.0e3	7.967	30.99	31.99	19.79	000	2.58	Inf
3	9.6e4	44.37	180.9	117.32	8.3e5	000	850.32	407.93	808.8	000	18.93	20.11
4	2.6e4	12.57	117.43	61.27	7.2e4	000	248.33	120.33	0.43	000	0.382	0.46

Tabla 5.4. Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones polinomiales.

Fusible	Ecuación (5.16)				Ecuación (5.17)				Ecuación (5.18)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	3.2e3	-1.576	45.78	28.51	1.4e3	000	69.89	60.92	1.3e5	000	615.40	589.06
2	74.55	0.283	7.33	6.105	0.95	000	0.767	0.691	1.0e3	000	20.77	23.34
3	17.15	0.362	3.84	2.071	0.416	000	0.363	0.322	1.3e3	000	27.174	18.64
4	0.399	0.017	0.482	0.315	1.0e3	000	21.11	15.97	7.4e3	000	62.55	43.197

Tabla 5.4. (Continuación)

Fusible	Ecuación (5.19)			
	S	EMED	EMAX	σ
1	9.7e3	000	187.48	155.87
2	1.776	-0.001	0.946	0.942
3	1.14	-0.015	0.761	0.534
4	2.1e3	000	31.88	23.19

5.4.6 Ajuste de curvas de restauradores

En esta sección se presentan los resultados del proceso de ajuste de características de restauradores comerciales. Se analizaron características de operación de tres restauradores. Los valores de los pares tiempo-corriente fueron obtenidos de tablas dadas en programas de análisis de sistemas de potencia comerciales [19]. Se tomaron 10 puntos uniformemente distribuidos [56]. Los criterios de exactitud utilizados son los mismos que para relevadores.

La Fig. 5.11 muestra la salida gráfica del programa de ajuste de curvas descrito en la Sección 5.4.3; se presentan las curvas de operación real y ajustada, y el porciento del error (E_r) en ciclos. Se aprecia que en general se obtienen buenos resultados de ajuste. El restaurador 3 presenta una característica de operación en que parte de la curva se comporta como de tiempo definido para valores grandes de corriente.

Las Tablas 5.5 y 5.6 muestran los indicadores estadísticos de los errores resultantes de la aplicación de los algoritmos de ajuste. Puede concluirse lo siguiente:

- El ajuste de curvas para el restaurador 1 es aceptable solo para la expresión exponencial (5.12); el restaurador 2 presenta buenos resultados tanto para expresiones exponenciales como polinomiales. La ecuación exponencial (5.13) presenta el mejor ajuste para el restaurador 1, la ecuación polinomial (5.19) ofrece el mejor ajuste para los restauradores 2 y 3.

- Las características de los restauradores son muy similares a las de los relevadores, obteniéndose ajustes aceptables para estos tipos de dispositivos de sobrecorriente.

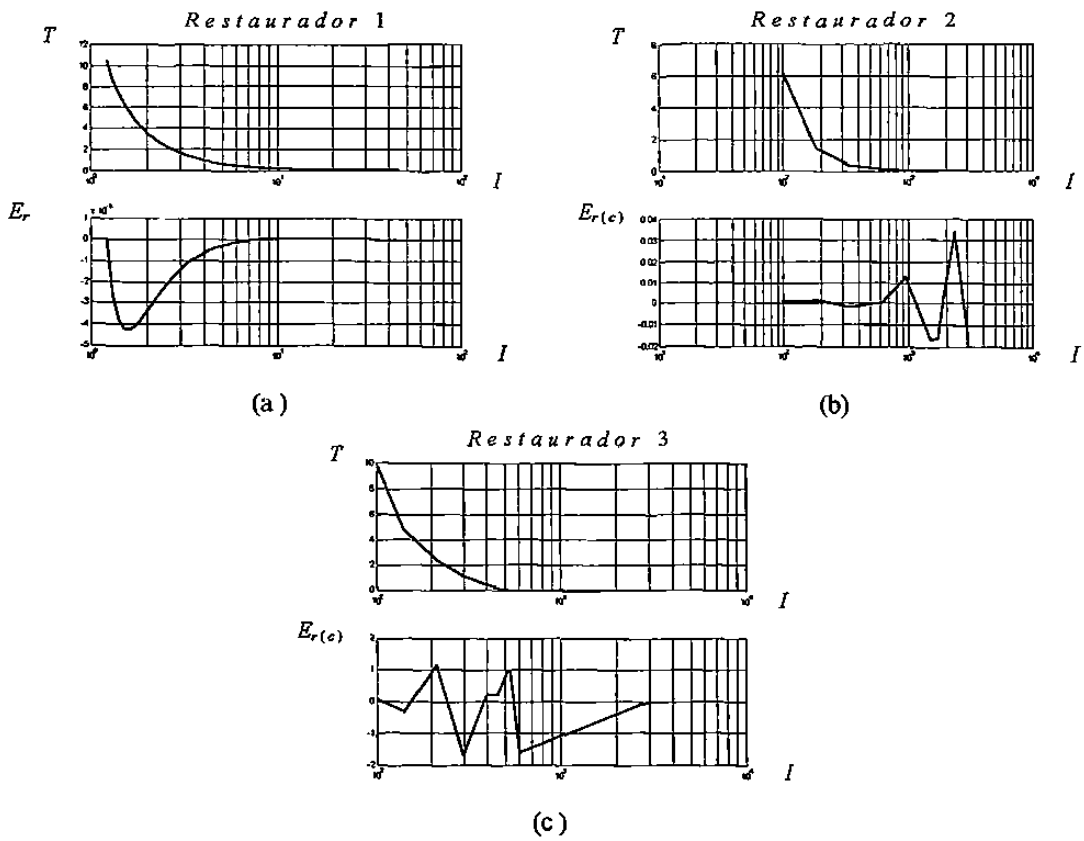


Fig. 5.11. Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para restauradores comerciales.

Tabla 5.5. Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones exponenciales.

Restaurador	Ecuación (5.11)				Ecuación (5.12)				Ecuación (5.13)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	33.32	-2.609	2.063	2.182	000	000	000	000	0.129	-0.131	0.149	0.254
2	0.014	-0.029	0.047	0.044	000	000	0.005	0.003	000	000	0.002	0.002
3	0.369	0.065	0.311	0.229	90.11	000	7.83	4.245	0.031	000	0.091	0.124

Tabla 5.6. Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones polinomiales.

Restaurador	Ecuación (5.16)				Ecuación (5.17)				Ecuación (5.18)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	336.98	-7.98	8.673	8.209	25.60	-2.236	1.791	1.91	1.7e4	204.15	49.56	66.52
2	000	000	0.001	0.001	000	000	0.001	0.001	0.09	000	0.254	0.113
3	0.01	000	0.05	0.051	0.008	000	0.06	0.044	0.791	000	0.733	0.336

Tabla 5.6. (Continuación)

Restaurador	Ecuación (5.19)			
	S	EMED	EMAX	σ
1	5.671	-3.28	2.736	2.846
2	000	000	000	000
3	0.002	000	0.028	0.024

5.4.7 Ajuste de curvas utilizando la función $H(I)$

Otra alternativa para realizar el proceso de ajuste de la característica de operación de dispositivos de protección de sobrecorriente, es utilizar la función $H(I)$. Se realizó el proceso de ajuste de curvas al conjunto de dispositivos presentados en las Secciones 5.4.4 a 5.4.6. Se consideraron los relevadores digitales B y D, los cuales presentaron ajustes aceptables, los relevadores electromecánicos J y K, presentaron en general los mayores errores, así como los fusibles 1 y 2, y los restauradores 1 y 3.

En la Fig. 5.12 se muestran los resultados gráficos del programa de ajuste de curvas utilizando la alternativa de ajuste de la función $H(I)$. Para cada relevador seleccionado se presenta la función $H(I)$ de la curva real y la ajustada, y la gráfica del porciento del error en ciclos (Er). Se considera aceptable un ajuste con un error no mayor a tres ciclos.

En las Tablas 5.7 y 5.8 se presentan los resultados del ajuste para relevadores. Se puede concluir lo siguiente:

- De los resultados obtenidos se observa que los algoritmos de regresión no lineal en general ajustan mejor las curvas de los relevadores digitales que los algoritmos de regresión polinomial, excepto para la expresión exponencial (5.11). La ecuación (5.12) es la que da los mejores resultados.

- Las expresiones polinomiales obtuvieron malos ajustes para los relevadores digitales B y D, excepto la expresión (5.19), que ajusta bien la curva del relevador D.

- Para los relevadores electromecánicos se obtienen en general buenos ajustes, excepto para la ecuación polinomial (5.16), que presentó resultados deficientes para todos los casos estudiados.

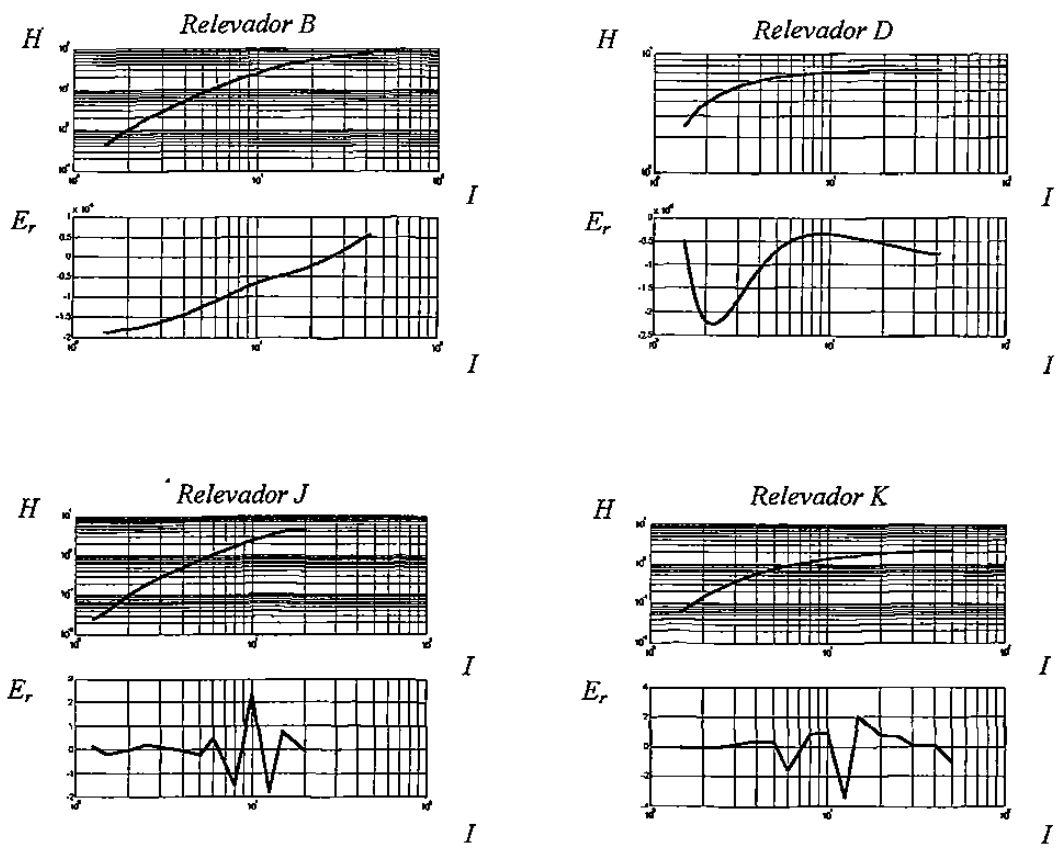


Fig. 5.12. Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para relevadores con $H(I)$.

Tabla 5.7. Resultados del ajuste de relevadores con ecuaciones exponenciales con $H(I)$.

Relev.	Ecuación (5.11)				Ecuación (5.12)				Ecuación (5.13)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
B	7.2e3	14.847	8.269	32.125	000	000	000	000	0.109	0.169	0.087	0.233
D	2.671	-0.626	0.213	0.617	000	000	000	000	0.082	0.117	0.105	0.202
J	0.684	0.054	0.403	0.261	0.046	000	0.114	0.076	0.003	000	0.041	0.024
K	0.293	0.030	0.204	0.150	0.006	000	0.060	0.024	28.60	-1.088	2.15	1.89

Tabla 5.8. Resultados del ajuste de relevadores con ecuaciones polinomiales con $H(I)$.

Relev.	Ecuación (5.16)				Ecuación (5.17)				Ecuación (5.18)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
B	1.0e6	1.8e3	71.61	345.94	15.681	-1.272	0.328	1.319	3.5e4	65.619	18.61	62.69
D	1.4e4	239.81	6.231	39.971	28.88	2.69	1.002	1.791	117.77	10.86	2.975	3.617
J	9.7e7	-806.5	9.8e3	2.8e3	0.004	000	0.043	0.0189	4.454	000	1.095	0.609
K	7.6e6	-175.3	2.7e3	712.20	0.008	000	0.062	0.023	1.289	000	0.506	0.293

Tabla 5.8. (Continuación)

Relev.	Ecuación (5.19)			
	S	EMED	EMAX	σ
B	48.169	0.552	0.971	2.313
D	0.005	-0.026	0.026	0.024
J	0.014	000	0.082	0.035
K	0.005	000	0.056	0.019

En la Fig. 5.13 se muestran los resultados para el ajuste de curvas de fusibles. Los errores obtenidos en general fueron mucho menores que los obtenidos con la variante de ajustar $T(I)$. Para el fusible 1 el error se redujo de más de 2000 ciclos a 2 ciclos utilizando el ajuste con $H(I)$. En el fusible 2 el error se redujo de 40 ciclos a 8 ciclos.

En las Tablas 5.9 y 5.10 se presentan los resultados del ajuste de curvas de fusibles. Se concluye lo siguiente:

- Las expresiones exponenciales ajustan mal las curvas de los fusibles. Un comportamiento similar se obtuvo con el ajuste de la función $T(I)$.

- La ecuación polinomial (5.17) es el mejor modelo de ajuste para los casos estudiados.

- La ecuación polinomial (5.16) es la que peores resultados obtuvo.

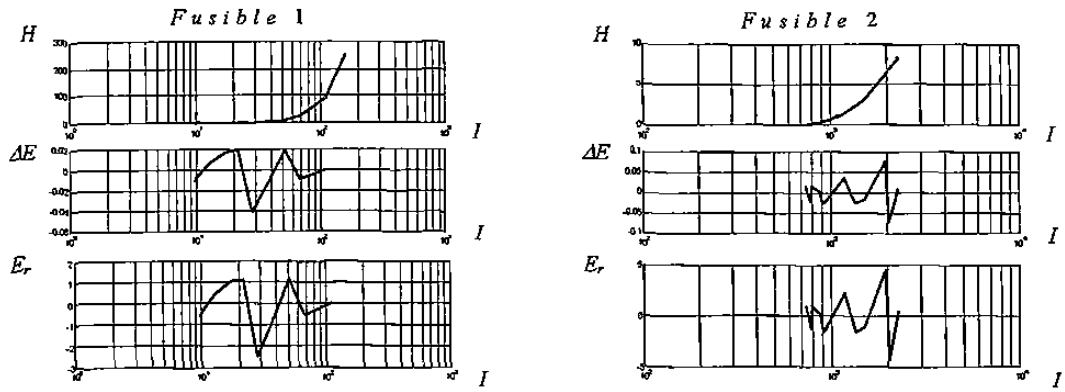


Fig. 5.13. Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para fusibles con $H(I)$.

Tabla 5.9. Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones exponenciales con $H(I)$.

Fusible	Ecuación (5.11)				Ecuación (5.12)				Ecuación (5.13)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	1.848	0.254	0.851	0.513	0.687	000	0.471	0.370	7.0e4	-34.07	249.99	188.10
2	2.982	0.318	0.669	0.546	0.176	000	0.251	0.148	171.82	-2.36	8.33	5.862

Tabla 5.10. Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones polinomiales con $H(I)$.

Fusible	Ecuación (5.16)				Ecuación (5.17)				Ecuación (5.18)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	7.0e4	36.54	248.99	88.598	0.003	000	0.041	0.018	117.87	000	6.73	3.618
2	130.66	1.583	6.66	3.299	0.015	000	0.076	0.035	0.021	000	0.078	0.042

Tabla 5.10. (Continuación)

Fusible	Ecuación (5.19)			
	S	EMED	EMAX	σ
1	5.96	000	1.46	0.813
2	0.019	-0.002	0.082	0.039

En la Fig. 5.14 se muestran los resultados para el ajuste de restauradores. Para el restaurador 1 se logran buenos ajustes con las expresiones exponenciales (5.12) y (5.13). Para el restaurador 3 no se logran ajustes aceptables con ningún modelo. En las Tablas 5.11 y 5.12 se presentan los resultados del ajuste para restauradores.

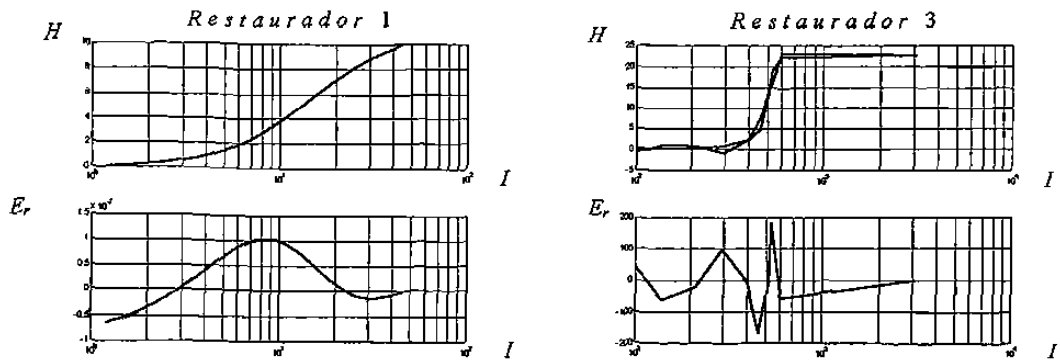


Fig. 5.14. Resultado gráfico del programa de ajuste de curvas para restauradores con $H(I)$.

Tabla 5.11. Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones exponenciales con $H(I)$.

Restaurador	Ecuación (5.11)				Ecuación (5.12)				Ecuación (5.13)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	121.25	1.99	1.113	4.16	000	000	000	000	000	0.011	0.005	0.0152
3	413.39	0.566	11.91	7.684	200.14	0.180	7.411	6.326	1.6e3	-8.73	22.72	28.45

Tabla 5.12. Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones polinomiales con $H(I)$.

Restaurador.	Ecuación (5.16)				Ecuación (5.17)				Ecuación (5.18)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	1.1e9	-3.2e3	3.4e4	1.1e4	0.862	-0.372	0.107	0.309	645.27	9.489	2.725	8.467
3	1.4e3	7.758	21.68	12.66	22.503	000	3.04	1.581	31.95	000	3.79	1.884

Tabla 5.12. (Continuación)

Restaurador	Ecuación (5.19)			
	S	EMED	EMAX	σ
1	2.62	0.616	0.312	0.539
3	24.97	000	3.609	1.665

5.4.8 Comparación de ajustes de curvas utilizando las funciones $H(I)$ y $T(I)$

El ajuste de curvas obtenido en términos generales con la característica de operación expresada con $T(I)$ y $H(I)$ fue aceptable para todos los casos estudiados. En cada dispositivo analizado siempre se logró una representación analítica adecuada.

En los relevadores digitales el ajuste fue aceptable en todos los casos, tanto para $T(I)$ como para $H(I)$. En relevadores electromecánicos se obtuvieron errores menores a 3 ciclos. En el ajuste en fusibles se presentó una marcada diferencia entre los ajustes con $T(I)$ y $H(I)$; la función $T(I)$ presentó errores de ajuste muy grandes de hasta 300 segundos, en cambio la función $H(I)$ se obtuvieron errores menores. En restauradores los ajustes obtenidos fueron aceptables para las dos variantes.

No se presentó un comportamiento uniforme de los modelos de ajuste propuestos, ya que el resultado depende en gran medida del tipo de curva a analizar y del número de datos introducidos. Por ejemplo la ecuación polinomial (5.16) presentó ajustes aceptables para características de relevadores con $T(I)$ y deficientes para relevadores con $H(I)$, para fusibles la variante de $H(I)$ fue en mucho superior a $T(I)$. Para el restaurador 3 con $T(I)$ se obtuvo un ajuste aceptable y con $H(I)$ el ajuste fue deficiente. Se determinó que con 10 puntos de la curva se obtiene un ajuste aceptable; en el caso de relevadores el ajuste no presenta una mejora sustancial con un número de puntos mayor, para fusibles el ajuste puede empeorar o no mejorar significativamente con un número mayor de datos y para restauradores el comportamiento es similar al de los relevadores.

Utilizando ambas variantes de ajuste ($T(I)$ y $H(I)$) se logra una representación analítica adecuada de la característica de operación de relevadores, fusible y restauradores. De los resultados obtenidos se observa que no existió una función ($H(I)$ o $J(I)$) que presentara mejores resultados para todos los casos, la respuesta de los algoritmos y de los modelos de ecuaciones es altamente dependiente de la curva de entrada.

La mejor opción para obtener una representación analítica adecuada para el dispositivo de sobrecorriente es utilizar ambas variantes dentro del programa de ajuste; este proceso se realiza fuera de línea por lo que la carga computacional no es importante para este fin.

En el Apéndice D se presenta un estudio para evaluar la conveniencia de incluir el intervalo de coordinación dentro de la pareja de valores tiempo-corriente, para obtener expresiones analíticas más exactas del programa de ajuste de curvas, y para reducir la carga computacional del relevador adaptivo. Para efectos de aplicación y de acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda realizar el ajuste de curvas con la variante de incluir ΔT, para reducir la carga computacional del relevador, manteniendo la alternativa de ajustar sin este intervalo, como algoritmo de reserva en caso de no cumplir con los criterios mínimos de error establecidos para el ajuste de curvas.

5.5 Resultados de coordinación

En la Fig. 5.15a se presenta un ejemplo de coordinación entre un relevador convencional (n-1) respaldado por un relevador adaptivo $(n)_1$ y para fines de comparación un relevador convencional $(n)_2$. En la Fig. 5.15b se presenta la gráfica bilogarítmica T-I, en donde se ilustra el resultado de la coordinación.

Se observa que el relevador adaptivo presenta mayor sensibilidad y menor tiempo de operación que el convencional; la característica obtenida coordina con el relevador para cualquier valor de corriente en un intervalo constante ΔT, obteniéndose un tiempo de operación menor que el convencional.

Si el relevador adaptivo presenta un ajuste menor que el respaldado, existen dos criterios a seguir: el primero, sacrificar el ajuste del relevador adaptivo fijando su valor mínimo en el valor de ajuste del convencional respaldado; el segundo, es permitir un ajuste más sensible al adaptivo; esto permitiría al relevador adaptivo ser más sensible que el respaldado sobre todo en esquemas donde la falta de sensibilidad no se cumple para ambos relevadores. La aplicación del relevador adaptivo permite solucionar los problemas de sensibilidad en ambas ubicaciones de relevadores, sacrificando de manera conveniente la selectividad del sistema de protección.

Para esta segunda alternativa, en el intervalo donde el ajuste del adaptivo es menor que el convencional, la característica *T-I* del respaldado no está definida y no existen compromisos de coordinación. Esto permite incrementar la sensibilidad del relevador adaptivo hasta donde el elemento respaldado por el convencional lo permita.

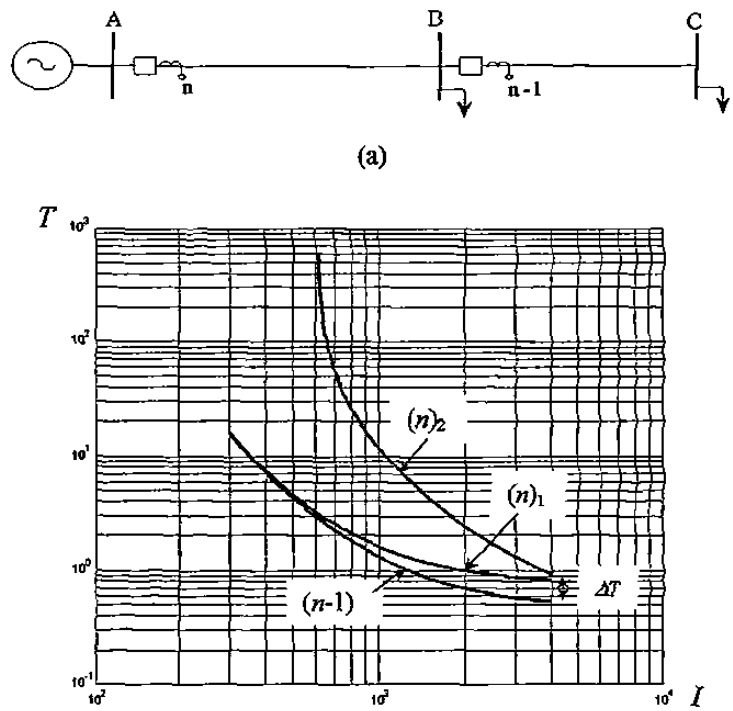


Fig. 5.15. Ejemplo de coordinación entre un relevador convencional, respaldado por un relevador adaptivo.

5.6. Conclusiones

- La adaptación del tiempo de operación del relevador se realiza en el bloque generador de funciones del relevador de sobrecorriente (Fig. 3.3). Se proponen dos alternativas para lograr la adaptación del relevador: modificar la función $H(I)$ o la función $J(I)$ de acuerdo con el estado vigente de carga del sistema.

- Las dos funciones adaptivas $J(I)$ y $H(I)$ cumplen con el criterio de adaptación requerido. La alternativa de la función $J(I)$ exige un procesamiento adicional del relevador de sobrecorriente en el instante de falla, por tanto presenta una clara desventaja algorítmica. La segunda alternativa presenta características más atractivas para su aplicación.

- De las tres ecuaciones exponenciales estudiadas en este trabajo, la ecuación (5.13), propuesta por Hieber [**39**], es la que en general da los mejores ajustes. La ecuación (5.12), propuesta por la norma IEEE Std C37.112-1996 [**13**] da en general buenos resultados, excepto para el relevador G. La ecuación (5.11), propuesta por la norma IEC 255-4 [**20**] da también ajustes razonablemente buenos, excepto para el relevador G.

- La ecuación polinomial (5.18) da en general resultados deficientes. Las ecuaciones polinomiales (5.16), (5.17) y (5.19) ajustan bien las características de los relevadores electromecánicos; aunque dan errores significativos en el ajuste de las curvas de algunos relevadores digitales. La ecuación (5.19) es claramente superior a (5.18) y ajusta mejor que (5.16) y (5.17) las curvas de los relevadores digitales. Para estos relevadores, no obstante, es inferior a las ecuaciones exponenciales (5.13), (5.12) y (5.11).

- Las expresiones exponenciales en general presentan valores muy pequeños de las desviaciones y la media del error, manifestándose en un ajuste cerrado a la curva de

entrada. Las expresiones logarítmicas presentan desviaciones y media del error muy grandes para los relevadores digitales, y valores aceptables para relevadores electromecánicos, excepto para (5.18).

- Las ecuaciones exponenciales ajustan mal curvas de fusibles, debido a que fueron desarrolladas para ajustar curvas de relevadores. Las expresiones polinomiales son más adecuadas para realizar el ajuste de curvas para fusibles que las expresiones exponenciales. Las ecuaciones polinomiales (5.16) y (5.17) presentan menos errores de ajuste para fusibles. No es posible lograr errores de ajuste aceptables para fusibles con este algoritmo.

- El ajuste de curvas para el restaurador 1 es aceptable solo para la expresión exponencial (5.12); el restaurador 2 presenta buenos resultados tanto para expresiones exponenciales como polinomiales. La ecuación exponencial (5.13) presenta el mejor ajuste para el restaurador 1, la ecuación polinomial (5.19) ofrece el mejor ajuste para los restauradores 2 y 3. Las características de los restauradores son muy similares a las de los relevadores, obteniéndose ajustes aceptables para estos tipos de dispositivos de sobrecorriente.

- En el ajuste de curvas de relevadores utilizando la función $H(I)$ se concluye lo siguiente: los algoritmos de regresión no lineal en general ajustan mejor las curvas de los relevadores digitales que los algoritmos de regresión polinomial; las expresiones polinomiales obtuvieron malos ajustes para los relevadores digitales B y D; y para los relevadores electromecánicos se obtienen en general buenos ajustes.

- Las expresiones exponenciales ajustan mal las curvas de los fusibles utilizando la función $H(I)$. Un comportamiento similar se obtuvo con el ajuste de la función $T(I)$. La ecuación polinomial (5.17) es el mejor modelo de ajuste para los casos estudiados. La ecuación polinomial (5.16) es la que peores resultados obtuvo.

- Para el restaurador 1 se logran buenos ajustes (función $H(I)$) con las expresiones exponenciales (5.12) y (5.13). Para el restaurador 3 no se logran ajustes aceptables con ningún modelo.

- No se presentó un comportamiento uniforme de los modelos de ajuste propuestos, ya que el resultado depende en gran medida del tipo de curva a analizar y del número de datos introducidos. Se determinó que con 10 puntos de la curva se obtiene un ajuste aceptable.

- En relevadores digitales el ajuste fue aceptable en todos los casos, tanto para $T(I)$ como para $H(I)$. En relevadores electromecánicos se obtuvieron errores menores a 3 ciclos. En el ajuste en fusibles se presentó una marcada diferencia entre los ajustes con $T(I)$ y $H(I)$; la función $T(I)$ presentó errores de ajuste muy grandes de hasta 300 segundos, en cambio la función $H(I)$ se obtuvieron errores menores. En restauradores los ajustes obtenidos fueron aceptables para las dos variantes.

- El ajuste de curvas con la variante de incluir ΔT reduce la carga computacional del relevador. Es conveniente mantener la alternativa de ajustar sin el intervalo como algoritmo de reserva en caso de no cumplir con los criterios mínimos de error establecidos para el ajuste de curvas.

- De los resultados obtenidos se concluye que no existe una única ecuación que proporcione el mejor ajuste para todos los dispositivos de protección estudiados. Esto confirma la importancia de que el programa de ajuste de curvas propuesto tenga varios modelos de ajuste y seleccione el modelo más adecuado para cada característica analizada.

CAPÍTULO VI

ESTRUCTURA FUNCIONAL Y CARACTERÍSTICAS DEL RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECORRIENTE

6.1 Introducción

En este capítulo se presenta la estructura funcional propuesta para el relevador adaptivo de sobrecorriente. Se analizan dos alternativas de diseño. En la primera alternativa el relevador adaptivo requiere de la actualización de datos de entrada por parte del usuario. En la segunda se propone un relevador adaptivo que no requiere la actualización de datos de entrada por parte del usuario.

Se presentan las consideraciones necesarias para la coordinación del relevador adaptivo de sobrecorriente con otros dispositivos de protección. Se realiza un estudio comparativo entre tres tipos de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso, basado en los principales índices de calidad de la protección: sensibilidad, selectividad, tiempo de operación, seguridad, dependabilidad y simplicidad. El primer tipo de relevador de sobrecorriente es un relevador convencional de tiempo inverso que opera para la corriente de fase del sistema eléctrico; el segundo tipo es un relevador de secuencia negativa que opera para la componente de corriente de secuencia negativa originada por fallas asimétricas; y el tercer tipo es un relevador adaptivo de sobrecorriente de tiempo inverso propuesto en la presente tesis. Por último se presentan las consideraciones de ubicación del relevador adaptivo dentro del esquema de protección de redes de distribución.

6.2 Estructura funcional de un relevador adaptivo de sobrecorriente

El diagrama funcional de un relevador adaptivo de sobrecorriente (RASC) se muestra en la Fig. 6.1, se presentan los bloques funcionales del elemento instantáneo y del elemento de tiempo inverso. Por simplicidad no se muestra el procesamiento analógico y la conversión análogo-digital de la señal. El filtro digital recibe como entrada las muestras digitalizadas $(i_r)_k$ de la señal de entrada, y entrega a su salida, para cada instante de muestreo, el módulo $(I_r)_k$ del fasor que representa la componente fundamental de $(i_r)_k$.

El bloque controlador de corrientes de arranque recibe como señales de entrada el valor máximo de ajuste permitido (ecuación 4.2) de la corriente de arranque del relevador adaptivo $I_{amáx\,(n)}$ y el módulo del fasor $(I_r)_k$. Con estos valores de entrada determina la corriente de arranque para el elemento de tiempo inverso (I_a) como base para discriminar la existencia de una falla. A su salida forma el valor de corriente de arranque para el elemento instantáneo (I_a^i), el valor de corriente de arranque (I_a) para el elemento de tiempo inverso según se expone en (Sección 5.5) y la señal (T/F). Si se ha detectado una falla $(I_{cc} > I_a)$ el bloque controlador de corrientes de arranque forma a su salida la orden permisiva T, que establece la condición de arranque y da inicio al proceso de integración por parte del bloque del elemento de tiempo inverso. La señal F es una orden de bloqueo que impide el arranque del relevador. El bloque controlador de corrientes de arranque también verifica que no se violen los límites establecidos para las corrientes de arranque, y aplica la lógica de control que se describe en el Capítulo IV.

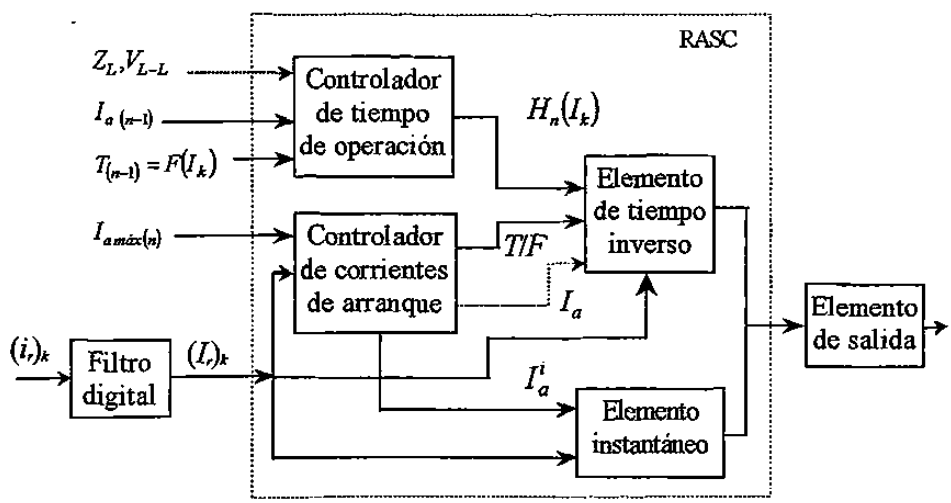


Fig. 6.1. Diagrama funcional simplificado de un relevador adaptivo de sobrecorriente.

El controlador de tiempo de operación recibe el valor de ajuste de la corriente de arranque $I_{a(n-1)}$, la expresión analítica de la característica $T_{(n-1)} = F(I_k)$, y la función $J_n^p(I_k)$ (palanca de tiempo para relevadores) del dispositivo respaldado. También recibe los valores de la impedancia de línea y voltaje del sistema para el cálculo de la corriente de cortocircuito en la ubicación del dispositivo respaldado. Calcula el valor de la función $H_n(I_k)$ para ser integrada por el elemento de tiempo inverso (Sección 5.2). Este proceso de integración establece el comportamiento dinámico del relevador ante corrientes de falla variables.

Por último, en el elemento de salida se verifica la condición de disparo tanto del elemento de tiempo inverso como del elemento instantáneo, y se emite la señal de salida al interruptor de potencia.

Los bloques de control para la adaptación de la corriente de arranque y el tiempo de operación pueden ser implementados de forma independiente, esto se aprecia en la Fig. 6.1, donde la información de entrada y salida de cada bloque es independiente. Un mayor nivel de adaptación es obtenido con la utilización combinada de estos dos criterios adaptivos.

En el Capítulo V se evaluaron los principales modelos matemáticos y los algoritmos de ajuste para obtener la expresión analítica de la característica de operación de dispositivos de sobrecorriente con resultados aceptables. La expresión analítica, requerida como información de entrada por el bloque controlador de tiempo de operación, puede ser introducida al relevador adaptivo a través de un puerto serial o en forma remota a través de canales de comunicación. Es posible diseñar un programa fuera de línea que tenga en una base de datos las expresiones analíticas de los principales dispositivos de protección actualmente utilizados, el usuario únicamente seleccionará el dispositivo por marca y tipo; el programa puede procesar y transmitir en forma transparente para el usuario la expresión analítica seleccionada junto con la información de entrada requerida por el relevador adaptivo indicada en la Fig. 6.1, a la ubicación del relevador. Si el dispositivo respaldado no está disponible en la base de datos será posible introducir la pareja de valores tiempo-corriente de la característica de operación en forma manual, y el programa calculará la expresión analítica para posteriormente ser transmitida al relevador.

6.3 Aplicación del relevador adaptivo de sobrecorriente

En el Capítulo IV se propusieron dos variantes para la adaptación de la corriente de arranque, valor eficaz fundamental y valor de demanda. Se realizó un estudio comparativo donde se describe la complejidad de cada variante en términos de aplicación; se concluye que la adaptación de la corriente de arranque sobre la base del concepto de demanda es la que mejor característica presenta, y se recomienda para ser implementada en el relevador adaptivo. En el Capítulo V se concluye después de un estudio comparativo para la adaptación del tiempo de operación del relevador adaptivo, que la alternativa de adaptación de la función $H_n(I_k)$ es la más adecuada para la adaptación del tiempo de operación. Estas dos consideraciones fueron incluidas en la aplicación del relevador.

Los datos de entrada del relevador adaptivo están en función del tipo de dispositivo de sobrecorriente que respalda. Si el dispositivo respaldado es un relevador, se requiere la corriente de arranque, la expresión analítica de la característica de operación y/o la palanca de tiempo; para fusibles y restauradores se requiere además de la expresión analítica de la característica de operación, la capacidad continúa de corriente de carga y la corriente de arranque respectivamente; esta información de entrada requiere actualizarse únicamente cuando el dispositivo respaldado es sustituido. Además, el relevador adaptivo requiere un valor máximo posible de corriente de arranque, este valor es utilizado como ajuste transitorio ante líneas desenergizadas por ejemplo, y como seguridad del propio relevador (Capítulo IV).

En el presente estudio se consideran dos alternativas de diseño del relevador adaptivo. Se tomó como base del criterio de diseño la capacidad del relevador para adaptarse utilizando la mínima información de entrada. La información de la corriente de arranque y la expresión analítica del dispositivo respaldado son necesarias para ambas alternativas. La corriente máxima en cambio, es un valor que puede ser introducido por el usuario (primera alternativa) o puede ser calculado y actualizado por el propio relevador (segunda alternativa).

6.3.1 Primer alternativa de aplicación

La primera alternativa consiste en un relevador adaptivo de sobrecorriente que requiere además de la información de los ajustes del dispositivo respaldado, el valor máximo de corriente de arranque por parte del usuario. Este valor es el mismo que el calculado para la corriente de arranque de un relevador convencional de sobrecorriente. En la Fig. 6.2 se muestra la estructura funcional del relevador adaptivo en la primera variante de aplicación. El bloque funcional del RASC es el descrito en la Fig. 6.1.

El procedimiento para obtener el valor máximo posible de la corriente de arranque ($I_{amáx}$), se realiza considerando que el RASC es un relevador convencional; la corriente de arranque del relevador convencional es la $I_{amáx}$ para el relevador adaptivo. Cuando se presenten cambios en la topología o de operación de la red, el usuario necesitará actualizar la corriente de arranque máxima posible ($I_{amáx}$). El requerimiento de actualización de la $I_{amáx}$ por parte del usuario simplifica la lógica del relevador, pero incrementa la información requerida por el relevador.

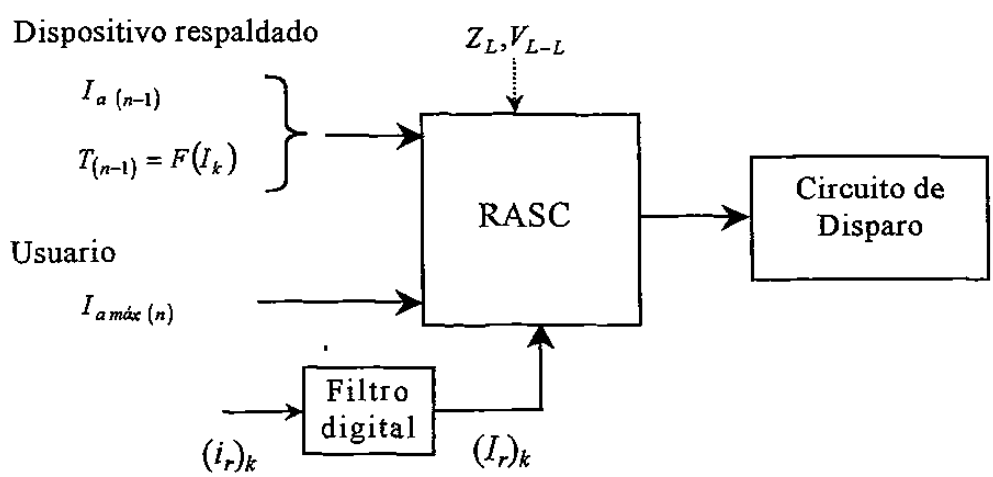


Fig. 6.2. Estructura funcional de un relevador adaptivo (primer alternativa).

6.3.2 Segunda alternativa de aplicación

La aplicación del RASC en la segunda alternativa se realiza incorporando además de los adaptadores de corriente de arranque y tiempo de operación, un bloque de cálculo del valor máximo de ajuste. En la primera alternativa este valor es suministrado por el usuario, para esta alternativa el mismo relevador debe realizar este proceso para obtener un nivel de adaptación total. Este bloque se ilustra en la Fig. 6.3; se utilizan dos algoritmos de detección de falla combinados a través de una lógica OR y la condición de nivel de corriente ($I_k > I_{amáx}$), esta condición se cumple para un cortocircuito o cuando se presentan incrementos de demanda en el sistema por cambios de topología. Para discriminar entre estos dos estados y ejecutar la actualización de $I_{amáx}$, se introduce la salida de la condición de nivel de corriente y la ausencia de salida del sistema detector de falla a una compuerta AND. Ante la presencia de una falla, el sistema de detección manda una señal de salida (T) que bloquea el proceso de actualización de $I_{amáx}$.

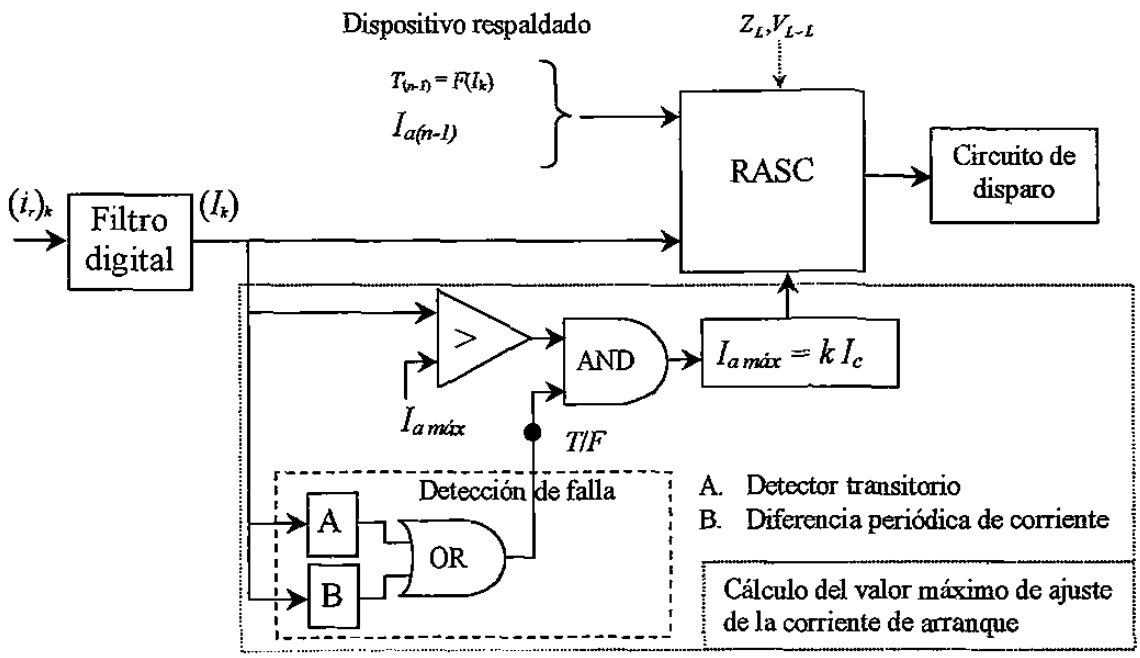


Fig. 6.3. Estructura funcional de un relevador adaptivo (segunda alternativa).

Esta variante no requiere ningún proceso de cálculo de parámetros de ajuste; sus propiedades adaptivas permiten que su funcionamiento sea totalmente adaptable al sistema y al estado operativo vigente. El nivel de complejidad algorítmica para este relevador es un tanto mayor que el de la primera alternativa.

De las características de estas dos variantes de diseño del relevador adaptivo, se propone la primera alternativa para la etapa inicial por sus bajos requerimientos de "hardware".

6.4 Criterio de coordinación

La coordinación del relevador adaptivo con el dispositivo que respalda, como se indicó en el Capítulo V, se realiza en forma automática. Es necesario definir los criterios para el ajuste del relevador que respalde al relevador adaptivo; estos criterios deben de ser válidos cuando el relevador adaptivo respalda a un relevador, fusible o restaurador. Dependiendo de las herramientas disponibles para realizar la coordinación, es posible que la curva del relevador adaptivo pueda o no representarse en forma gráfica. Cuando la representación gráfica es posible, el proceso de coordinación se realiza directamente con la curva de operación del relevador adaptivo con los criterios convencionales de coordinación. Si no es posible la representación gráfica del relevador adaptivo, la coordinación puede realizarse con el elemento respaldado por el adaptivo al nivel de corriente de cortocircuito en la ubicación del relevador adaptivo. Para relevadores y restauradores este criterio se cumple prolongando la característica de operación del dispositivo respaldado por el relevador adaptivo hasta el nivel de cortocircuito indicado para la coordinación entre el adaptivo y su respaldo. Para fusibles el criterio se cumple desplazando su característica hasta el nivel de cortocircuito del relevador adaptivo. Para ambos casos se utiliza $2\Delta T$ como intervalo de coordinación.

6.4.1. Coordinación relevador convencional – relevador adaptivo – relevador convencional

En la Fig. 6.4 se ilustra la coordinación para los relevadores de sobrecorriente *n*, *n*-1 y *n*-2; se considera al relevador *n*-1 como adaptivo o convencional. Las características de los relevadores tienden a ser convergentes hacia la fuente y divergentes hacia la carga. Si el relevador *n*-1 tiene la misma característica del relevador *n*-2 más un ΔT (relevador adaptivo), para corrientes mayores del punto de coordinación entre los relevadores *n*-1 y *n*-2 (punto *a* en la Fig. 6.4a) el tiempo de operación del relevador adaptivo es menor que la de un relevador convencional *n*-1; sin embargo, el tiempo de operación del relevador adaptivo es mayor que la del relevador convencional *n*-1 en la zona de protección primaria del relevador *n*-2, en esta zona de respaldo la curva de la característica de operación del relevador adaptivo *n*-1 no es convergente con la del relevador *n*-2. Aunque en esta zona el relevador *n*-1 efectúa funciones de respaldo de respaldo teniendo poco impacto en la seguridad del esquema, sí provoca que el tiempo de operación para el punto de coordinación (punto *b* en la Fig. 6.4a) de las protecciones *n* y *n*-1 sea mayor para el relevador *n*-1 adaptivo (punto A), que el relevador *n*-1 convencional (punto B); resultando un incremento en el tiempo de operación de la protección *n* (línea continua en la Fig. 6.4a).

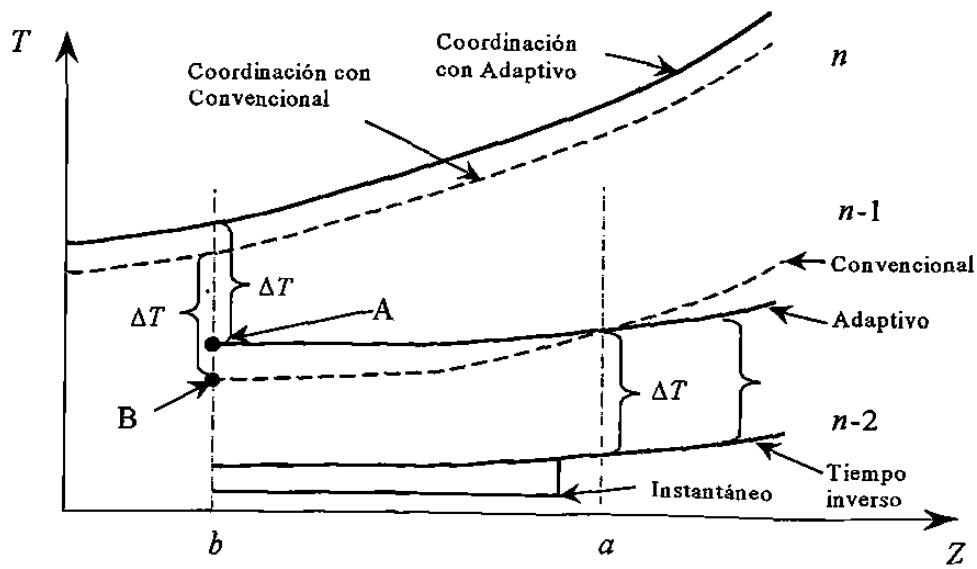


Fig. 6.4. Coordinación de relevadores convencionales y adaptivo.

Ejemplo de coordinación

En el sistema radial de 13.8 kV mostrado en la Fig. 6.5 se muestra un ejemplo de coordinación entre relevadores convencionales (n-2 y n) y el relevador (n-1) que para fines de comparación se define como convencional y adaptivo. Se ilustran los niveles máximos de corriente de cortocircuito para cada punto de coordinación entre protecciones.

En la Fig. 6.6 se muestra el resultado de la coordinación de los relevadores, el proceso de coordinación fue efectuado con un "software" comercial de análisis de sistemas eléctricos [19]. El relevador n-2 tiene incorporados los elementos de tiempo inverso e instantáneo; para fines de comparación se muestran dos curvas para la protección ubicada en el bus A, la curva $(n\text{-}1)_1$ para un relevador convencional y la curva $(n\text{-}1)_2$ para un relevador adaptivo. La curva del relevador adaptivo se obtuvo editando la característica de operación del relevador n-2 con el editor de relevadores del mismo programa comercial; el proceso es el siguiente: se copia la característica de operación del relevador respaldado (n-2), se edita la característica sumando el intervalo ΔT (0.3 a 0.4 seg) a los valores de tiempo (10 puntos) que describen esta característica, los valores de corriente permanecen sin cambio; finalmente la curva resultante es almacenada con otro nombre. Se muestran los resultados de la coordinación entre el relevador n y el relevador convencional $(n\text{-}1)_1$; se indica el valor de la palanca de tiempo y la corriente de arranque resultantes de la coordinación.

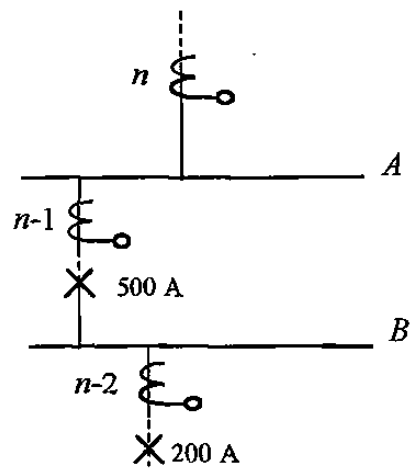


Fig. 6.5. Sistema radial.

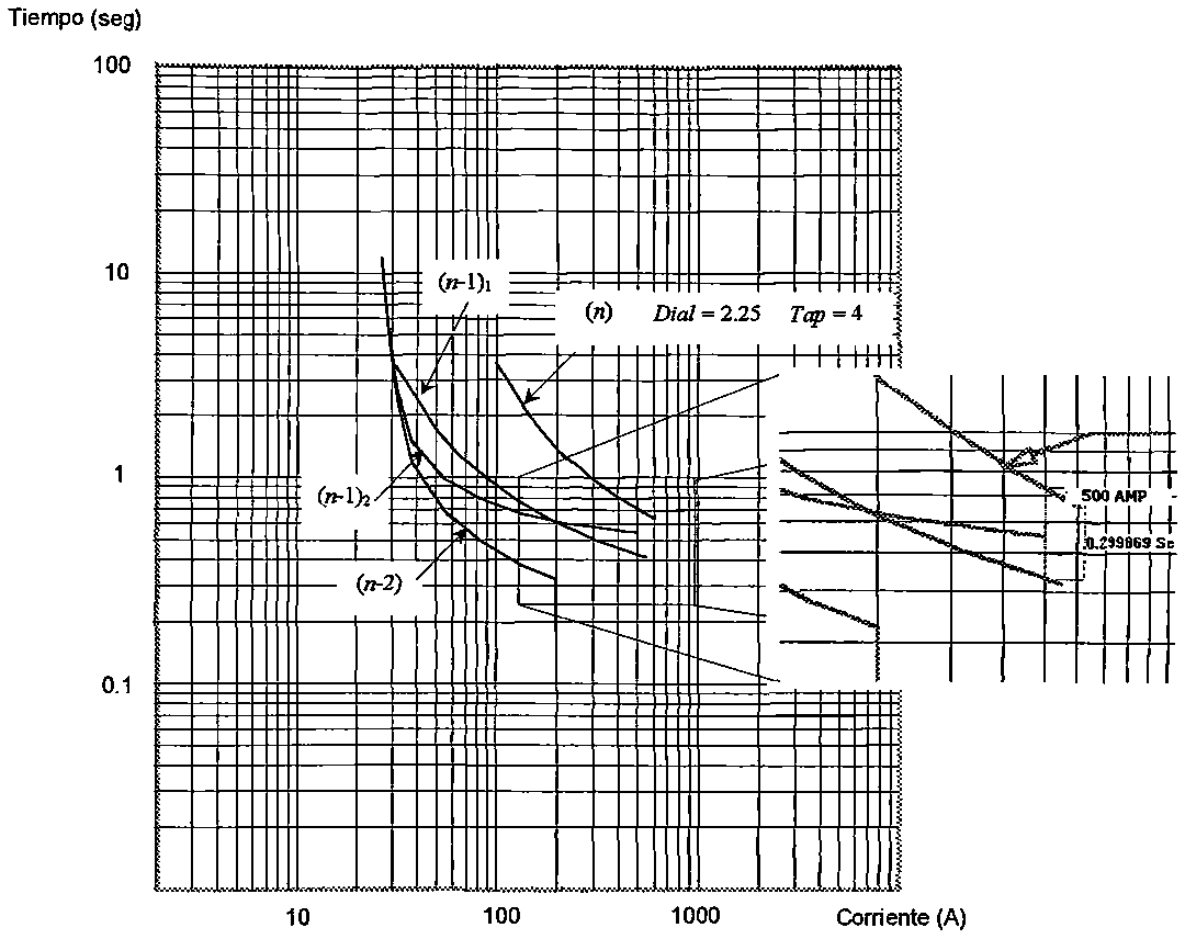


Fig. 6.6. Ejemplo de coordinación con un relevador convencional.

Se observa la reducción en el tiempo de operación de la protección $(n\text{-}1)_2$ en la zona de respaldo para n-2, con una disminución máxima de tiempo de 1.0 segundo. También se observa que para el punto de coordinación con n-2 (ajuste del elemento instantáneo = 200A) ambas protecciones conservan un intervalo de 0.3 segundos.

En la Fig. 6.7 se muestra el resultado de la coordinación en el caso de $(n\text{-}1)_2$; la coordinación con el relevador adaptivo provoca un incremento en la palanca de tiempo del relevador n de 2.25 a 2.6 para este ejemplo.

En la Fig. 6.8 se muestra la coordinación en donde el relevador n es coordinado con el relevador n-2 prolongando la característica de este relevador hasta el punto de coordinación del relevador n (Bus A); con este criterio la palanca de tiempo de la protección n es de 2.6.

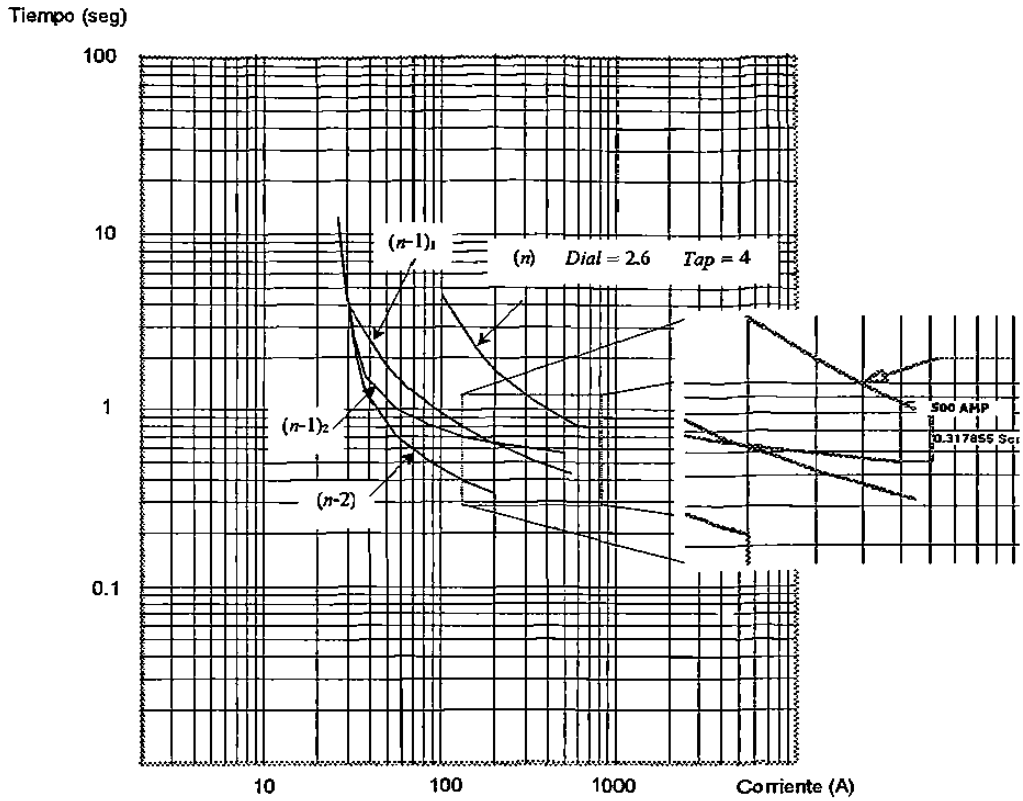


Fig. 6.7. Ejemplo de coordinación con un relevador adaptivo.

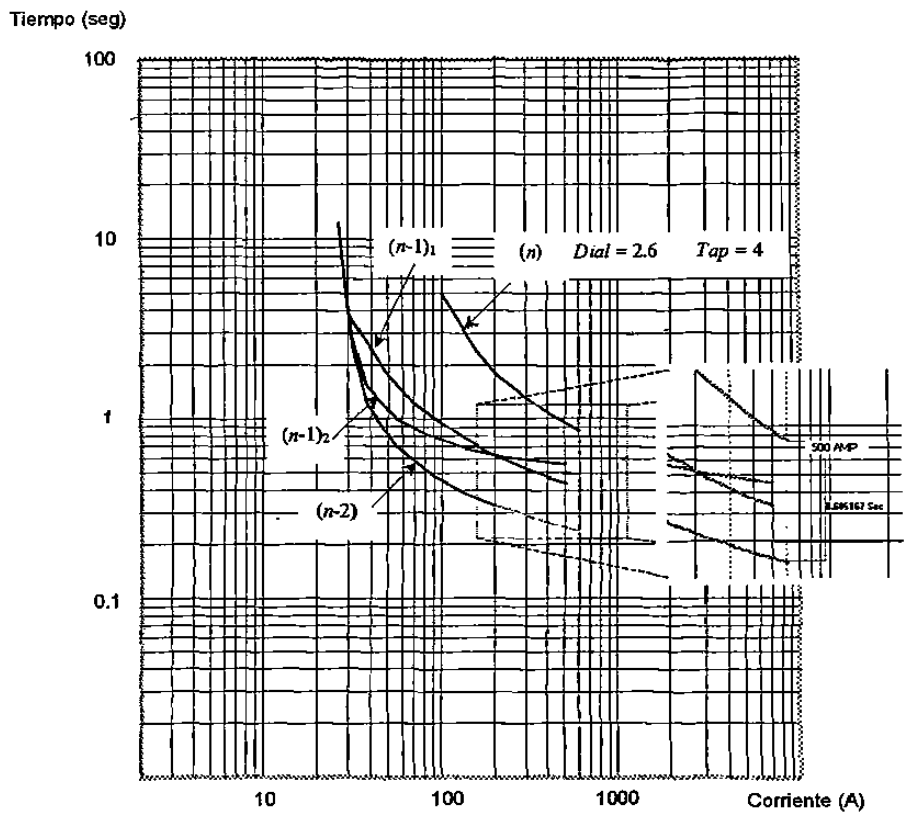


Fig. 6.8. Ejemplo de coordinación con la característica prolongada de n-2.

De los ejemplos de coordinación anteriores, se observa que el efecto de introducir el relevador adaptivo provoca un ligero incremento en el tiempo de operación del relevador *n*. Las ventajas de sensibilidad y reducción en el tiempo de operación del relevador adaptivo (Capítulo 4 y 5) justifican su uso y el incremento de tiempo de operación del relevador que lo respalda.

6.4.2 Coordinación relevador convencional – relevador adaptivo - fusible

En esta sección se presenta un ejemplo de coordinación entre un fusible (*n*-2), un relevador adaptivo (*n*-1) y un relevador convencional. En la Fig. 6.9 se muestra el sistema radial de 13.8 kV donde se indican los niveles máximos de corriente de cortocircuito, se considera que el cable del alimentador entre los buses A-B es de poca longitud por lo que los niveles de cortocircuito son comparables. Como se indicó en el Capítulo V, el relevador adaptivo presenta la réplica en forma analítica de la curva de liberación máxima del fusible más el ΔT de coordinación, la curva del relevador adaptivo es obtenida mediante el "software" de análisis [**19**] con el mismo proceso que se utilizó para relevadores.

En la misma figura se muestra el resultado de la coordinación. El relevador convencional *n* puede coordinar con el relevador adaptivo directamente, si existe representación gráfica de él; o se puede coordinar directamente con el fusible utilizando un intervalo de coordinación de $2\Delta T$.

6.4.3. Coordinación relevador convencional – relevador adaptivo - restaurador

En el diagrama de la Fig. 6.10 se muestra una red radial de 13.8 kV donde se tiene un restaurador (*n*-2), un relevador adaptivo (*n*-1) y un relevador convencional (*n*). En la misma

figura se presenta el resultado de la coordinación; se considera la curva acumulada del restaurador para efectos de coordinación, de esta forma no es necesario considerar el tiempo de restauración y el efecto de sobreviaje del disco. El relevador adaptivo duplica la característica de operación de la curva acumulada del restaurador más el ΔT de coordinación, así mismo la curva del relevador adaptivo es obtenida mediante el "software" de análisis [19] con el mismo proceso que se utilizo para relevadores y fusibles. La coordinación del relevador convencional puede realizarse en forma directa con la curva del relevador adaptivo, o puede realizarse directamente con el restaurador n-2.

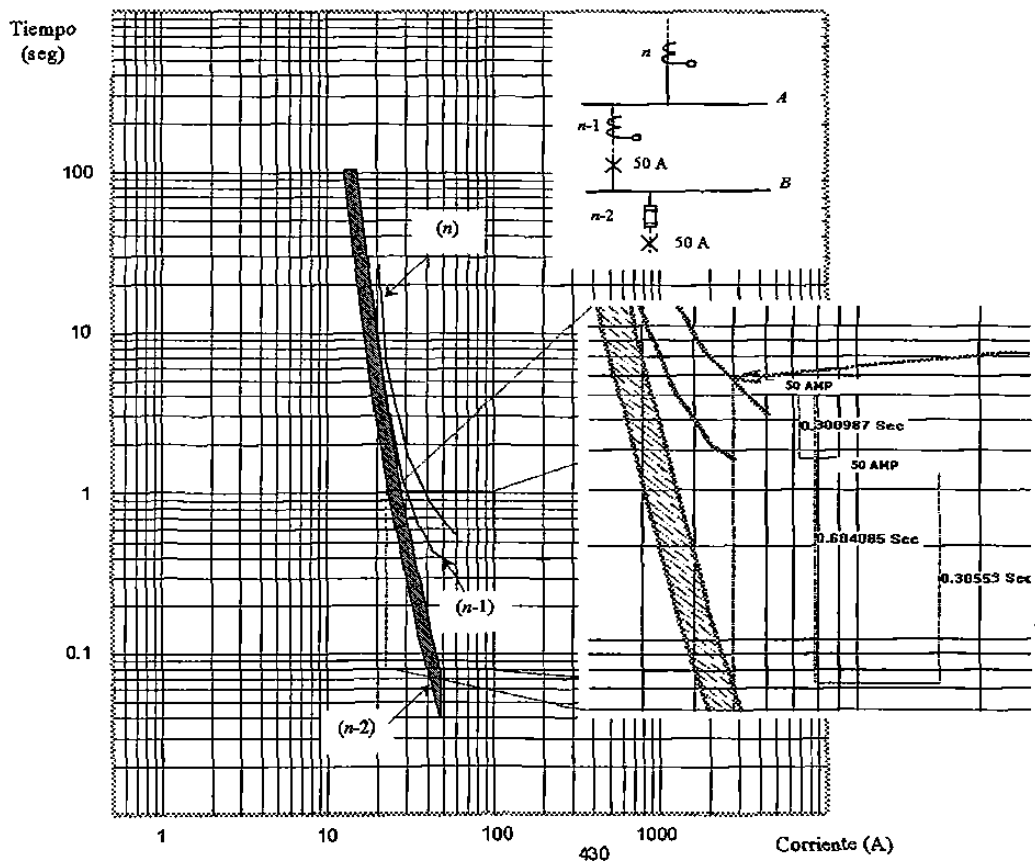


Fig. 6.9. Ejemplo de coordinación relevador convencional – relevador adaptivo – fusible.

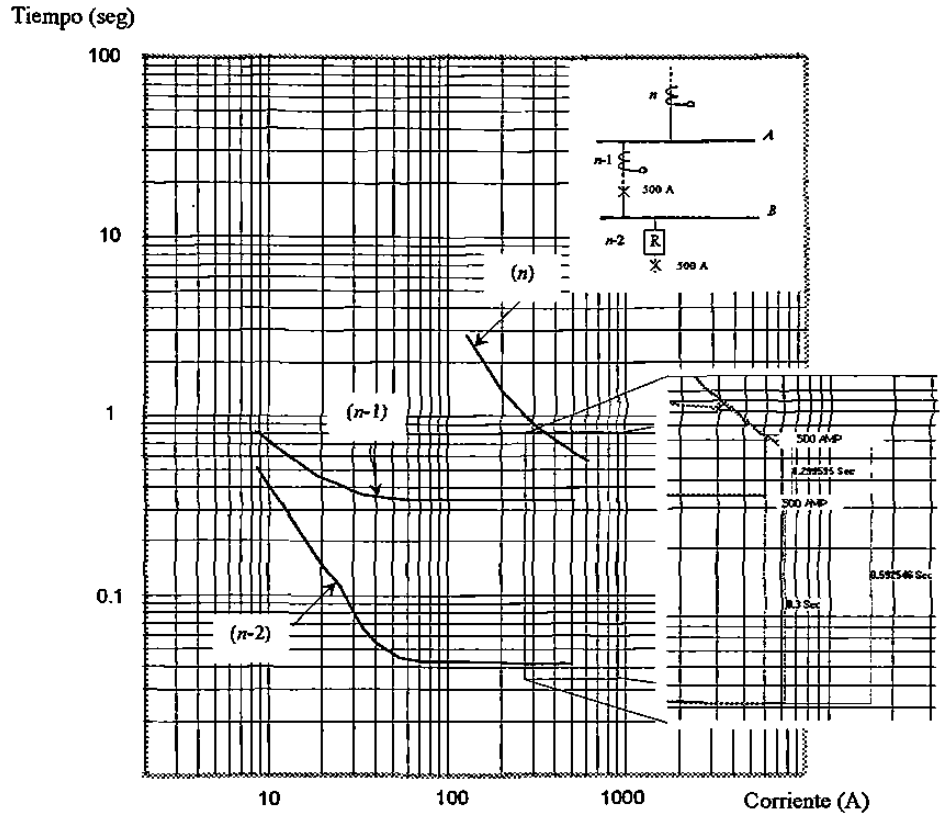


Fig. 6.10. Ejemplo de coordinación relevador convencional – relevador adaptivo - restaurador.

6.5 Tipos de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso

Los relevadores de sobrecorriente deben operar tanto para fallas simétricas como asimétricas. Para fallas asimétricas que involucran conexión con tierra (monofásicas y bifásicas a tierra) es aceptado el uso de la componente de secuencia cero; esta componente al no ser afectada por la corriente de carga presenta una excelente sensibilidad para la detección de fallas. Los relevadores que trabajan bajo este principio son denominados relevadores de tierra. Para la detección de fallas bifásicas y trifásicas son utilizados los relevadores que responden a la corriente de fase. Otra alternativa para la protección de fallas bifásicas es utilizar la componente de secuencia negativa de la corriente [59], que en forma similar a la componente de secuencia cero no es afectado por la corriente de carga y es altamente sensible. Los relevadores que trabajan bajo este principio se denominan relevadores de secuencia negativa.

En el presente estudio se realiza un análisis comparativo entre los relevadores de sobrecorriente utilizados para la detección de fallas bifásicas y trifásicas. Los tres tipos de relevadores de sobrecorriente que serán analizados son: relevador de sobrecorriente convencional, que opera con la corriente de fase del sistema y puede ser sometido a compromisos en su ajuste que limitan su sensibilidad y velocidad de operación; relevador de sobrecorriente de secuencia negativa, que como su nombre lo indica opera con la componente de secuencia negativa de la corriente, esto le ofrece una gran sensibilidad para la detección de fallas bifásicas debido a que es insensible a la corriente de carga del sistema; relevador adaptivo de sobrecorriente, consiste de funciones adaptivas para la corriente de arranque (Capítulo IV) y el tiempo de operación (Capítulo V), con ajustes variables acorde al estado de carga del sistema.

A continuación se presenta un análisis funcional para cada tipo de relevador considerado en el estudio comparativo.

6.5.1 Relevador convencional de sobrecorriente

El alcance o longitud de la zona de protección de un relevador de sobrecorriente es la distancia eléctrica hasta el punto de la línea en que, para un cortocircuito en ese punto, la corriente de falla es igual a la de arranque de la protección. En general para el punto de alcance de un relevador de fase puede plantearse:

$$I_a = I_{cc} = \frac{E}{Z_S + Z_{la}} \tag{6.1}$$

$$Z_{la} = \frac{E}{I_a} - Z_S \tag{6.2}$$

donde I_a es la corriente de arranque del relevador (sea instantánea o con retardo de tiempo), E es el voltaje de fase del sistema, Z_S es la impedancia de la fuente equivalente detrás del relevador, y Z_{la} es la impedancia de la sección de línea hasta el punto del alcance, lo que constituye una expresión del alcance en términos de impedancia.

En un relevador de sobrecorriente convencional la única variable de (6.2) es Z_S; al reducirse la demanda o disminuir el nivel de cortocircuito producto de una falla bifásica Z_S aumenta, y el alcance Z_{la} del relevador disminuye linealmente, tanto para el elemento instantáneo, como para el de tiempo inverso. El alcance del relevador depende estrechamente del nivel de corriente de cortocircuito o del nivel de generación.

Las características de operación inversas de relevadores de sobrecorriente se logra con funciones no lineales, que por simplificación en el diseño son ubicadas en el denominador de las ecuaciones que describen la característica de operación del relevador (Tabla 3.1). Los parámetros de ajuste del relevador son determinados en la situación con mayor nivel de corriente de cortocircuito (fallas trifásicas). En niveles de corriente de cortocircuito menores (fallas bifásicas y bifásicas a tierra), el múltiplo de corriente $I=I_{cc}/I_a$ es menor, aumentando el tiempo de operación del relevador en estos niveles de falla (Fig. 3.9). Es por esta razón que el proceso de coordinación se realiza en el estado del sistema con mayor nivel de corriente de cortocircuito para garantizar la secuencia de operación en el estado donde la operación de la protección es más rápida.

Los ajustes del relevador convencional deben ser calculados para los niveles máximos de corriente de carga, condición que se presenta solo unos cuantos minutos al día; el resto del tiempo las condiciones de carga son menores, provocando poca sensibilidad y tiempos de operación elevados en el relevador.

6.5.2 Relevador de sobrecorriente de secuencia negativa

El relevador de sobrecorriente de secuencia negativa opera para la componente de secuencia negativa de la corriente, y es altamente sensible para fallas bifásicas.

Se presenta un análisis de fallas [59] en un sistema radial de distribución (Fig. 6.11). Se considera que el relevador de secuencia negativa opera para una magnitud de corriente de

secuencia negativa de $3I_2$. La comparación de las razones de $|3I_2/I_p|$ para fallas monofásicas (AG), bifásicas (BC) y bifásicas a tierra (BCG) es mostrada en la Tabla 6.1 [59].

El relevador de sobrecorriente de secuencia negativa operando con $3I_2$ con un ajuste a $\sqrt{3}$ veces el valor de arranque del dispositivo de fase tiene la misma sensibilidad para fallas bifásicas y menor o igual sensibilidad para otros tipos de fallas cuando es comparado con el mismo dispositivo de fase. Es necesario realizar consideraciones especiales para la coordinación del relevador de secuencia negativa y los relevadores convencionales. La siguiente guía [59] muestra el procedimiento para el ajuste del relevador de secuencia negativa.

1. Iniciar con el elemento de secuencia negativa más alejado de la subestación.

2. Identificar el dispositivo de sobrecorriente de fase más insensible (restaurador, fusible) ha ser respaldado por el relevador de secuencia negativa.

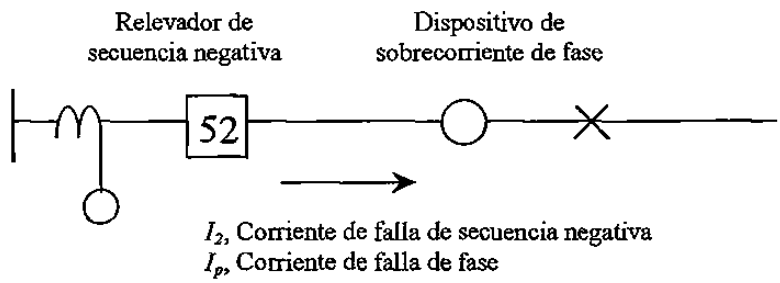


Fig. 6.11. Fallas en un sistema radial de distribución.

Tabla 6.1. Fallas en un sistema radial de distribución.

Falla	$\lvert 3I_2/I_p \rvert$
AG	1
BC	$\sqrt{3}$
BCG	$\leq\sqrt{3}$

3. Considerar el elemento de secuencia negativa como un elemento de sobrecorriente equivalente de fase. Obtener el ajuste el dial de tiempo, tipo de curva para este elemento equivalente. Las consideraciones de carga pueden ser ignoradas cuando se deriven los ajustes del relevador equivalente.

4. Multiplicar el ajuste del elemento de sobrecorriente de fase por $\sqrt{3}$, obteniendo el ajuste del elemento de secuencia negativa. La palanca de tiempo, tipo de curva o tiempo de retardo calculados para el elemento equivalente es también usado para el elemento de sobrecorriente de secuencia negativa.

Arranque del elemento de sobrecorriente de secuencia negativa	$=\sqrt{3}\bullet$	Arranque del elemento equivalente de sobrecorriente de fase

5. Ajustar el elemento de sobrecorriente de secuencia negativa con el primer elemento respaldado de secuencia negativa.

El relevador de secuencia negativa, al ser ajustado con los criterios anteriores necesarios para efectos de coordinación con relevadores convencionales, presenta una reducción en su alcance al disminuir el nivel de cortocircuito pero en menor medida que un relevador convencional. Debido a que este relevador no es afectado por la corriente de carga, la curva de tiempo de operación puede ser más rápida que un similar convencional [**59**].

6.5.3 Relevador de sobrecorriente adaptivo

El proceso de adaptación del relevador de sobrecorriente se realiza haciendo variable la corriente de arranque I_a del elemento de tiempo inverso en función de la corriente de carga I_c (4.1); este proceso asegura que el elemento de tiempo inverso tenga en todo momento la corriente de arranque mínima necesaria para evitar la operación incorrecta por efecto de la

carga. Esto le confiere una gran sensibilidad, pues en condiciones de demanda mínima (niveles de cortocircuito reducidos) el valor de I_a es también pequeño.

Sustituyendo (4.1) en (6.2) se obtiene la expresión del alcance para la protección adaptiva de tiempo inverso:

$$Z_a = \frac{E}{(\Delta I + I_c)} - Z_S \tag{6.3}$$

En este caso la disminución de la demanda o menor nivel de corriente de cortocircuito provoca un aumento de Z_S, pero también una disminución de I_c. El resultado es que el alcance del relevador de tiempo inverso se conserva constante o se incrementa con la disminución del nivel de corriente de cortocircuito.

El relevador adaptivo presenta un alcance mayor en niveles de carga bajos del sistema, y un ajuste similar al del convencional en niveles de carga máximos; este estado máximo de carga se presenta solo en unos minutos al día, el resto del tiempo el relevador adaptivo presenta un comportamiento mucho más sensible que un relevador convencional. El tiempo de operación adaptivo (Capítulo V) está definido para garantizar un intervalo ΔT constante de coordinación para cualquier valor de corriente de falla, obteniéndose una coordinación automática con el dispositivo respaldado.

6.6 Influencia de la impedancia de generación

La influencia de la impedancia de generación en la impedancia total del sistema, establece cierta dependencia entre el valor de corriente de cortocircuito y el valor de corriente en estado estable del sistema. En (6.1) se presenta la expresión analítica que define la aportación del sistema a una falla.

Si el valor de impedancia de generación (Z_s) es representativo en la impedancia total hasta el punto de falla, se tiene cierta dependencia entre el valor de corriente de cortocircuito (I_{cc}) y de corriente de carga (I_c). Durante las variaciones normales de carga del sistema, la impedancia de generación es variable, esto da cierta dependencia lineal entre el valor de corriente de carga y la aportación a la falla para el valor vigente de la impedancia Z_s.

En muchos sistemas de distribución la impedancia del sistema está ubicada en transformadores y líneas más que en los mismos generadores, la magnitud de la corriente de falla no difiere mucho de las condiciones de generación máxima y mínima, teniendo una independencia entre la corriente de cortocircuito (I_{cc}) y la corriente de carga (I_c). En el siguiente análisis comparativo se evalúan estas dos posibles alternativas.

6.7 Estudio comparativo de relevadores de sobrecorriente

Para el estudio comparativo se analizan los tres tipos de relevadores de sobrecorriente antes mencionados, relevador convencional, relevador de secuencia negativa y relevador adaptivo. El estudio se realiza sobre la base de los índices que califican la calidad de la protección en un sistema eléctrico. Estos índices son: sensibilidad, se refiere a la habilidad de la protección a operar confiablemente bajo las condiciones cambiantes del sistema de potencia; selectividad, es la habilidad de la protección para operar aislando la menor sección del sistema ante una falla; velocidad, es la habilidad de la protección para operar en el período de tiempo requerido falla; seguridad, la seguridad de un esquema de protección se refiere al grado de certeza de que un esquema de protección no opere incorrectamente; dependabilidad, es el grado de certeza de que la protección opere en forma correcta liberando todas las fallas en el sistema; y simplicidad, un sistema de protección debe ser lo más simple como sea posible, sin degradar la calidad de la misma.

6.7.1. Análisis de sensibilidad

El relevador en un sistema radial debe ser suficientemente sensible para operar bajo la condición de mínima corriente de falla. El análisis de alcance se realiza sobre la simulación digital del sistema radial de distribución de 34.5 kV de la Fig. 6.12. Se tienen cargas variables en los nodos *C* y *D*, para simular efectos de líneas multiterminales y variaciones de carga en estado estable. En el nodo *C* se tiene un relevador convencional (*n*-1) como relevador respaldado, en el bus *B* se ubican los tres tipos de relevadores para analizar. Se consideran variaciones de las cargas del 50-150% del valor nominal. La variación del estado de generación se realiza con la misma variación de ambas cargas. Para las líneas multiterminales se permite la variación de la carga conectada en *C*, dejando la carga en *D* fija, es decir el relevador (*n*-1) opera para la carga fija en *D*, y la carga conectada en *C* simula la aportación del sistema a otros alimentadores.

La comparación entre los tres tipos de relevadores se realiza en términos del alcance. Se grafica el alcance de los relevadores en un plano de tres dimensiones, variación de carga (I_c), variación de la impedancia equivalente de la fuente (Z_s) y alcance de la protección (Z_{la}). En la Fig. 6.13 se presentan los resultados del estudio considerando variaciones en el estado de generación del sistema, las cargas mostradas en la Fig. 6.12 presentan la misma dinámica. El relevador convencional es 1, el relevador de secuencia negativa es 2 y el relevador adaptivo 3 en la gráfica. En la Fig. 6.13a se observa que para este estudio el relevador adaptivo logra un mayor alcance en condiciones de demanda mínima, donde precisamente se requiere una mayor sensibilidad del relevador. El relevador de secuencia negativa presenta una disminución en su alcance no mayor que el relevador convencional y para un pequeño rango en demanda máxima presenta mayor sensibilidad que el relevador adaptivo.

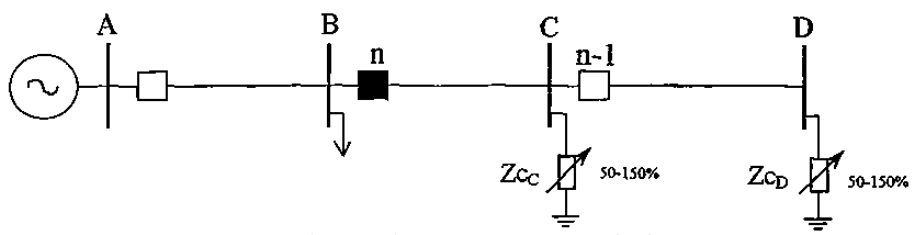
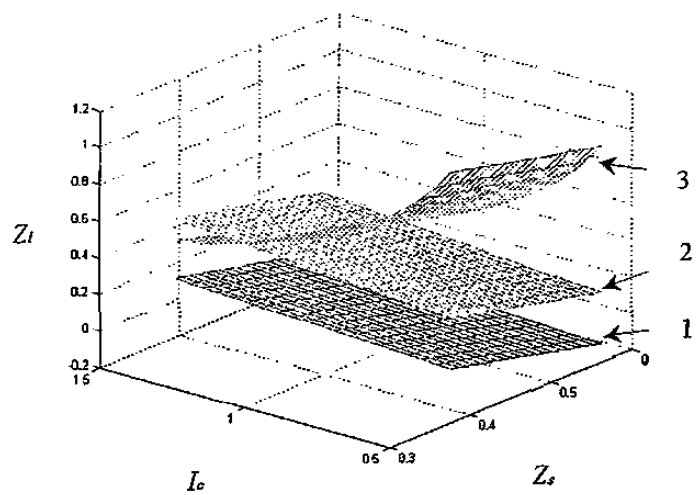
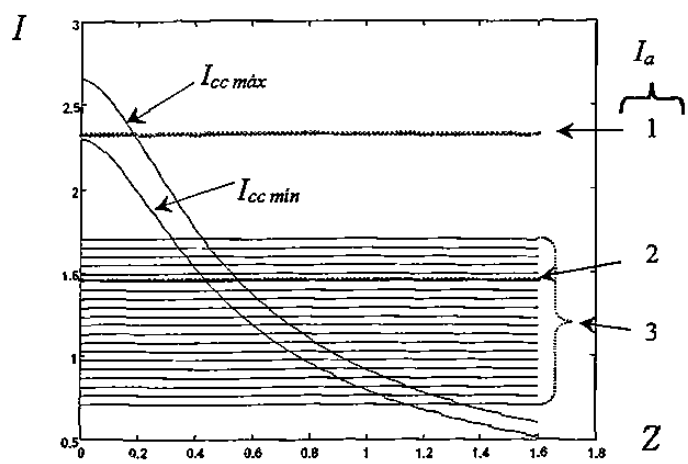


Fig. 6.12. Sistema de prueba para análisis de alcance.

En la Fig. 6.13b se muestra la variación de la corriente de arranque para los tres tipos de relevadores analizados. En un plano corriente impedancia se observa que el relevador convencional presenta un ajuste menos sensible; incluso su ajuste no es lo suficiente sensible para detectar una falla mínima inmediata a la ubicación del relevador, sólo detecta fallas máximas hasta una distancia eléctrica de 0.2 Ω para este ejemplo (Fig. 6.13b). Aunque los relevadores de secuencia negativa y adaptivo se traslapan, el relevador adaptivo presenta un ajuste más sensible en condiciones de demanda de carga mínima.



(a)



(b)

Fig. 6.13. Características de operación de los tres tipos de relevadores de sobrecorriente analizados.

En la Fig. 6.14 se muestran los resultados para el caso de tener una línea multiterminal, este caso se simula variando la carga en el bus C y manteniendo fija la carga del bus D en la Fig. 6.12. Para este caso el relevador que presenta mayor alcance es el de secuencia negativa (Fig. 6.14a), esto se debe a que se coordina con el relevador con mayor ajuste de la línea multiterminal, con n-2. El relevador adaptivo presenta un ajuste máximo en mínima demanda, es en este punto donde iguala el alcance del adaptivo, pero en demanda máxima que es el caso más critico para este tipo de redes, la diferencia entre el de secuencia negativa y el adaptivo es mayor. En general el relevador de secuencia negativa es el que presenta un comportamiento mejor. En la Fig. 6.14b se observa que la corriente de arranque del relevador de secuencia negativa es menor que el relevador adaptivo presentando mayor sensibilidad; dados los compromisos de ajuste el relevador convencional es el que menor sensibilidad presenta.

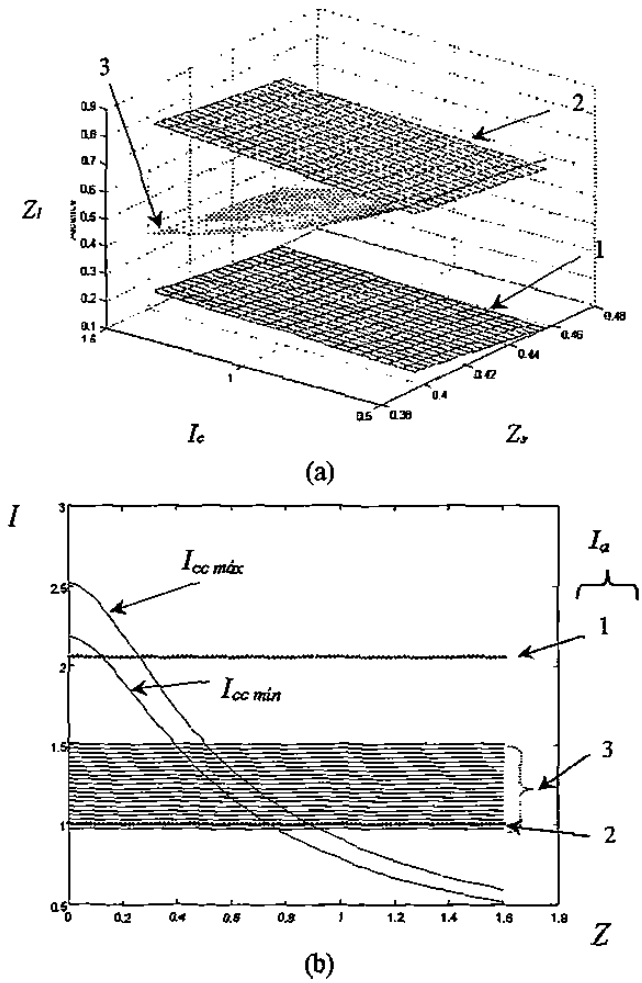


Fig. 6.14. Características de operación para los tres tipos de relevadores de sobrecorriente analizados (Alimentador).

En la Fig. 6.15 y Fig. 6.16 se presentan los casos mostrados en la Fig. 6.13 y 6.14 pero con la consideración de que la Z_S es significativa respecto a la del sistema. Con esta consideración los valores de corriente de cortocircuito dependen de la corriente de carga. La característica del relevador adaptivo es descrita con una trayectoria lineal para esta consideración. Para los relevadores convencional y de secuencia negativa la representación se realiza en un plano donde se definen los diferentes valores de ajuste de corriente de arranque que puedan tener. Se observa que los resultados obtenidos tienen un comportamiento es similar a los casos mostrados en las Fig. 6.13 y 6.14.

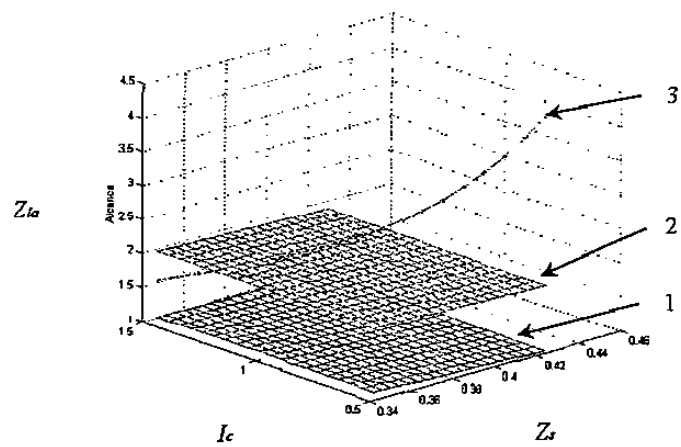


Fig. 6.15. Características de operación para los tres tipos de relevadores de sobrecorriente analizados considerando la impedancia de generación.

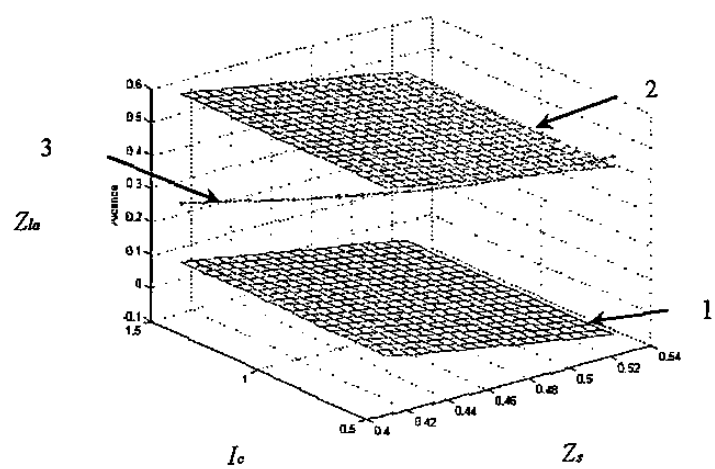


Fig. 6.16. Características de operación para los tres tipos de relevadores de sobrecorriente analizados considerando la impedancia de generación (Alimentador).

De los resultados obtenidos se concluye que el relevador convencional está en clara desventaja respecto al relevador de secuencia negativa y el relevador adaptivo. El relevador de secuencia negativa tiene mayor sensibilidad en líneas multiterminales, ya que sólo es necesario garantizar que su ajuste no sea mayor a la protección de alimentador con mayor ajuste. El relevador adaptivo tiene mayor sensibilidad en líneas radiales, su ajuste al ser dependiente del nivel de corriente de carga es más sensible en condiciones de carga mínima, donde precisamente es requerida mayor sensibilidad.

La comparación entre los tres tipos de relevadores es efectuada en condiciones de estado estable e independiente del tipo de cortocircuito. Es importante considerar que el relevador de secuencia negativa únicamente es utilizado para la detección de fallas bifásicas, en cambio, los relevadores convencional y adaptivo son utilizados para fallas bifásicas y trifásicas.

6.7.2 Análisis de selectividad

La selectividad es la habilidad de la protección para operar aislando la menor sección del sistema ante una falla. La selectividad puede ser establecida con retardo de tiempo para fallas en los elementos respaldados. La selectividad se establece sobre un rango completo de magnitudes de corriente de cortocircuito.

La selectividad está íntimamente relacionada con la sensibilidad de la protección. Un dispositivo muy sensible puede sobrealcanzar la operación de los dispositivos de protección respaldados, provocando operaciones simultáneas y la pérdida de selectividad del esquema de protección. Cuando el dispositivo de protección tiene poca sensibilidad se reduce el alcance de la protección (subalcance); este subalcance, que es mas frecuente, provoca reducción en la zona de protección dejando de ofrecer protección primaria o de respaldo.

El alcance del dispositivo de protección se realiza planteando la magnitud máxima de corriente de cortocircuito posible para el escenario operativo más crítico. Esta consideración evita que la zona de protección se traslape y sobrealcance la operación de otro dispositivo de protección. En regímenes de operación menores al máximo, la zona de protección del relevador puede reducirse, presentando un subalcance; para el elemento instantáneo esto representa una reducción en la zona primaria de protección y para el elemento de tiempo inverso, representa una pérdida de la protección de respaldo para fallas al final de la línea adyacente.

Esta pérdida de selectividad se presenta en mayor medida en relevadores convencionales; en los relevadores de secuencia negativa su alta sensibilidad reduce la posible pérdida de selectividad. El relevador adaptivo tiene una corriente de arranque que varia de forma proporcional al régimen de operación del sistema, y esta alta sensibilidad evita condiciones de subalcance y la consecuente pérdida de selectividad. La lógica de adaptación de tiempo del operación del relevador adaptivo descrita en el Capítulo V, evita problemas de selectividad por sobrealcance.

6.7.3 Análisis de tiempo de operación

El tiempo de operación es la habilidad de la protección para operar en el período de tiempo requerido. La operación del elemento instantáneo debe ser lo más pronta posible, para el elemento de tiempo inverso el tiempo de operación debe ser tal que permita la operación del dispositivo respaldado y que opere en un tiempo de retardo previamente definido.

Este estudio se realiza sobre la base de la configuración de la Fig. 6.17 que considera que el dispositivo respaldado es un relevador convencional. En la Fig. 6.18 se observa la carta de coordinación tiempo – corriente. Se ilustra la característica del relevador respaldado (n-1), y las características de tiempo para las tres variantes de relevadores estudiados (n). Se observa que el relevador de secuencia negativa presenta menor tiempo de operación y mayor

sensibilidad que el convencional; el relevador adaptivo coordina con el relevador convencional con un intervalo constante ΔT para cualquier valor de corriente, obteniéndose un tiempo de operación menor que las otras dos variantes.

Si la corriente de cortocircuito es menor que la corriente de arranque del dispositivo respaldado, se activa la corriente de arranque calculada por el relevador adaptivo. Este ajuste permitiría que el relevador adaptivo tenga mayor sensibilidad que el dispositivo respaldado, solucionando los problemas de falta de sensibilidad para ambas protecciones. Este criterio permite la pérdida de selectividad del sistema de protección donde la protección respaldada

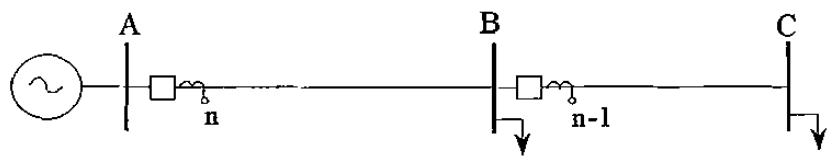


Fig. 6.17. Ejemplo de coordinación entre relevadores (n) convencional, secuencia negativa y adaptivo respaldando a un relevador convencional (n-1).

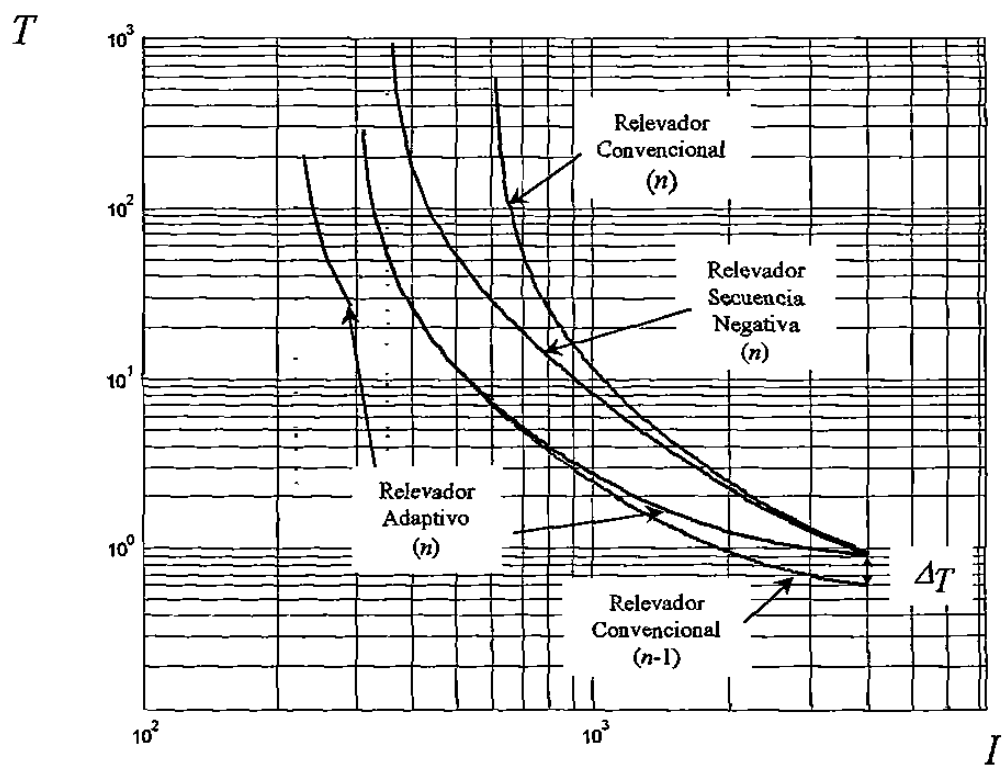


Fig. 6.18. Características de relevadores de sobrecorriente (n): convencional, secuencia negativa y adaptivo respaldando a un relevador convencional (n-1).

no podrá eliminar la falla. La característica de operación del dispositivo respaldado no está definida para valores de corriente de arranque menores a su ajuste; por tanto, no es posible coordinar. El criterio de coordinación asignado al relevador adaptivo no es necesario, y el relevador operará acorde a la característica tiempo-corriente del dispositivo respaldado previamente asignada. Este proceso se puede ver como un corrimiento de la característica del respaldado hasta la sensibilidad del adaptivo. En la Fig. 6.18 se observa el resultado de este criterio. El relevador respaldado presenta una corriente de arranque de 300 A y el adaptivo de 220 A; para el intervalo de 220 a 300 A la característica de operación vigente es la del dispositivo respaldado calculada por el adaptivo sin el ΔT de coordinación.

6.7.4 Análisis de seguridad

La seguridad de un esquema de protección se refiere al grado de certeza de que un esquema de protección no opere incorrectamente. Es la habilidad para evitar operaciones innecesarias durante operaciones controladas del sistema o por operación de otras protecciones.

En sistemas de distribución, la pérdida de seguridad del sistema de protección se presenta con operaciones incorrectas ante incrementos de carga. Comúnmente estas operaciones no deseadas se originan por falta de actualización de ajustes de la protección ante incrementos en la carga instalada y/o, cambios en la topología del sistema eléctrico.

En la segunda variante de aplicación del relevador adaptivo sus ajustes no requieren ser actualizados, el proceso de actualización se realiza de forma automática en el mismo relevador. Con este proceso el relevador no presenta riesgo alguno de pérdida de seguridad en su operación. Para la primera alternativa del relevador adaptivo, el usuario realiza la actualización del valor máximo permitido de la corriente de ajuste del relevador; este valor no es utilizado para la detección de la falla, sino como valor limite máximo de la corriente adaptiva de arranque y como ajuste en situaciones de línea abierta, es factible definir un valor

de corriente de arranque máxima con un factor de seguridad un tanto mayor que el convencional, reduciendo así el riesgo de pérdida de seguridad.

Los relevadores convencionales y de secuencia negativa presentan riesgo de pérdida de seguridad al carecer de actualización automática de su corriente de arranque, y por que la definición de este valor impacta directamente en su sensibilidad y coordinación con otros dispositivos de protección.

6.7.5 Análisis de dependabilidad

La dependabilidad, es el grado de certeza de que la protección opere en forma correcta liberando todas las fallas en el sistema. El problema de dependabilidad en redes de distribución se origina comúnmente cuando se presentan fallas de alta impedancia en condiciones de demanda mínima; en estas condiciones los niveles de corriente de carga y de cortocircuito pueden ser comparables. En este estado operativo la protección tiene poca sensibilidad y puede no operar permitiendo tiempos elevados de falla con el consecuente daño de equipo.

En condiciones de demanda mínima como se aprecia en la Fig. 6.13 y 6.14, el relevador presenta mayor sensibilidad que los relevadores convencionales y de secuencia negativa. Así el grado de dependabilidad para la protección de sobrecorriente, definiéndolo por su sensibilidad en demanda mínima, es mayor para el relevador adaptivo, que para los relevadores convencional y de secuencia negativa.

6.7.6 Análisis de simplicidad

Un sistema de protección debe ser lo más simple posible, sin degradar la calidad de la misma. Cada unidad adicional de protección debe ser considerada y analizada

cuidadosamente. Cada adición al sistema es una fuente potencial de falla y mantenimiento adicional.

La protección de sobrecorriente es la protección más sencilla desde el punto de vista funcional, pero la más difícil de ajustar y coordinar adecuadamente por compromisos a los que se ve sujeta la protección cuando los niveles de carga y cortocircuito son comparables. El ingeniero de protecciones se ve sometido a compromisos en el ajuste de las protecciones que degradan el funcionamiento y buen desempeño de las mismas.

Un dispositivo que realice una coordinación automática con otros dispositivos de protección, que tenga mayor sensibilidad y menor tiempo de operación, presenta características muy atractivas de aplicación. Esta simplicidad del relevador adaptivo es claramente superior a cualquiera de las otras dos alternativas estudiadas.

Del estudio comparativo realizado se puede concluir que los relevadores de secuencia negativa y adaptivo superan claramente al relevador convencional. El relevador de secuencia negativa presenta mayor alcance que el adaptivo en líneas multiterminales, pero menor que el relevador adaptivo en líneas con un solo alimentador. El relevador adaptivo presenta ventajas claras en términos de tiempo de operación, seguridad, dependabilidad y simplicidad.

6.8 Consideraciones sobre la ubicación de la protección adaptiva de sobrecorriente en una red radial

La selección del punto de ubicación de una protección adaptiva de sobrecorriente en una red radial depende fundamentalmente de dos factores: a) la medida en que se requiere la solución adaptiva en los diferentes puntos de la red; b) la coordinación de la protección adaptiva con las convencionales.

Desde el punto de vista del primer factor mencionado anteriormente, el criterio de aplicación es ubicar la protección adaptiva en aquellos puntos en que la protección

convencional confronta dificultades, particularmente de sensibilidad. La mayor sensibilidad de la protección adaptiva puede hacer que opere para fallas que quedan fuera del alcance de la protección convencional respaldada. Esto en realidad constituye un respaldo incidental de la protección adaptiva para fallas que escapan a la sensibilidad de la protección respaldada.

La coordinación del relevador adaptivo con dispositivos convencionales de coordinación es obtenida en forma automática, esto representa una ventaja en el tiempo de operación de la protección, una simplificación considerable en la aplicación de relevadores de sobrecorriente y una reducción de errores humanos.

Por tanto, la recomendación definitiva es ubicar la protección adaptiva de sobrecorriente en aquellos puntos de la red radial en que la protección convencional confronta dificultades de aplicación.

6.9 Conclusiones

- Los algoritmos para el control adaptivo de la corriente de arranque y el tiempo de operación pueden ser implementados de forma independiente. La utilización combinada de estos dos algoritmos de protección adaptivos es conveniente ya que mejora los índices de calidad de la protección.

- Se proponen dos alternativas para la aplicación del relevador adaptivo. La primera alternativa presenta mejores características. El nivel de complejidad algorítmica de la segunda alternativa es un tanto mayor que el de la primera alternativa.

- En un estudio de sensibilidad se concluye que la protección convencional esta en clara desventaja respecto a los dos métodos restantes. La protección de secuencia negativa, es claramente ventajosa en líneas con varios alimentadores, ya que solo es necesario garantizar que su ajuste no sea mayor a la protección de alimentador más insensible. El

relevador adaptivo cuenta con un bloque de adaptación de tiempo de operación, que hace posible declarar su valor de ajuste menor al del dispositivo respaldado, aumentando así la confiabilidad del sistema, y logrando un ajuste más sensible.

- La pérdida de selectividad se presenta en mayor medida en relevadores convencionales; en los relevadores de secuencia negativa su alta sensibilidad reduce la posible pérdida de selectividad. El relevador adaptivo tiene una corriente de arranque que varia de forma proporcional al régimen de operación del sistema, esta alta sensibilidad evita condiciones de subalcance y la consecuente pérdida de selectividad. La lógica de adaptación de tiempo del operación del relevador adaptivo evita problemas de selectividad por sobrealcance.

- En un estudio de tiempo de operación se concluye que el relevador de secuencia negativa presenta menor tiempo de operación y mayor sensibilidad que el convencional; el relevador adaptivo coordina con el relevador convencional con un intervalo constante ΔT para cualquier valor de corriente, obteniéndose un tiempo de operación menor que las otras dos variantes.

- Los relevadores convencionales y de secuencia negativa presentan riesgo de pérdida de seguridad al carecer de actualización automática de su corriente de arranque, y por que la definición de este valor impacta directamente en su sensibilidad y coordinación con otros dispositivos de protección. En la segunda variante los relevadores adaptivos no requieren ser actualizados. Para la primera alternativa el usuario requiere realizar la actualización; es posible definir este valor con un factor de seguridad un tanto mayor que el convencional.

- En condiciones de demanda mínima el relevador adaptivo presenta mayor sensibilidad que los relevadores convencionales y de secuencia negativa. Así el grado de dependabilidad para la protección de sobrecorriente, definiéndolo por su sensibilidad en demanda mínima, es mayor para el relevador adaptivo, que para los relevadores convencional y de secuencia negativa.

- La simplicidad del relevador adaptivo es claramente superior a las otras dos alternativas estudiadas.

- Del estudio comparativo realizado se puede concluir que los relevadores de secuencia negativa y adaptivo superan claramente al relevador convencional. El relevador de secuencia negativa presenta mayor alcance que el adaptivo en líneas multiterminales, pero menor que el relevador adaptivo en líneas con un solo alimentador. El relevador adaptivo presenta ventajas claras en términos de tiempo de operación, seguridad, dependabilidad y simplicidad.

- El criterio de aplicación del relevador adaptivo es donde la protección convencional confronta dificultades de aplicación, particularmente de sensibilidad.