

Desarrollo de un relevador de sobrecorriente con capacidades dinámicas de ajuste

Arturo Conde Enríquez
FIME-UANL
con_de@yahoo.com



RESUMEN

En este artículo se propone una lógica funcional para un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso, la cual ofrece mayor sensibilidad y menor tiempo de operación de respaldo comparada con relevadores convencionales. Se presenta el diagrama funcional del relevador propuesto, describiendo cada uno de sus bloques funcionales, y comparando su desempeño con los relevadores de sobrecorriente convencionales y los de secuencia negativa. Los resultados del análisis de sensibilidad y tiempo de operación tanto de simulaciones digitales como de pruebas de laboratorio comprueban que este relevador presenta mejor desempeño que los convencionales, sin requerir información ni inversión adicionales.

PALABRAS CLAVE

Relevador, sobrecorriente, adaptable, corriente, arranque.

ABSTRACT

A functional logic for an overcurrent inverse time relay, which offers more sensitivity and less back up operation time compared to conventional relays, is presented in this paper. A diagram of the proposed relay is shown, describing each one of their blocks, and comparing their performance to conventional overcurrent relays and those of negative sequence. The results of the sensitivity analysis and operation time for both, digital simulations and laboratory tests, demonstrate that this relay exhibits better performance than conventional ones, without additional information nor investment.

KEYWORDS

Relay, overcurrent, adaptable, triggering current.



Artículo basado en el proyecto galardonado con el Premio de Investigación UANL 2007, en la categoría de Ingeniería y Tecnología, otorgado en la Sesión Solemne del Consejo Universitario de la UANL, celebrada el 13 de septiembre de 2007.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso en redes eléctricas presenta serias limitaciones de sensibilidad y tiempos elevados de operación para corrientes de fallas mínimas. El incremento desproporcionado de la densidad de usuarios (carga) y la escasa construcción de nuevas líneas de sub-transmisión y distribución, provoca que los sistemas eléctricos sean sometidos a condiciones de carga más severas.

Una falla en condiciones de mínima demanda representa una aportación menor de corriente, y es precisamente en esta condición cuando se requiere mayor sensibilidad en la protección. Sin embargo, el ajuste de la corriente de arranque del relevador se efectúa usando los valores máximos de corriente de carga (pocos minutos por día) y en las configuraciones críticas de la red en donde el relevador puede disparar por carga, como en operaciones de transferencia de potencia (esquemas de emergencia). Entonces, el ajuste de la corriente de arranque se establece durante escenarios poco frecuentes o de corta duración, teniendo como resultado una insensibilización mayor de la protección.

El ajuste de un relevador de sobrecorriente está comprometido mayormente debido a que los valores mínimos de corriente de falla y ajuste del relevador son comparables, dificultando la correcta detección de la falla.

Otra limitación de la protección de sobrecorriente son los elevados tiempos de respaldo para fallas no máximas. El criterio de coordinación se determina para los valores máximos de corriente de falla (3–5% del total de fallas) y durante condiciones máximas de demanda (solo unos cuantos minutos al día), esto debido a la convergencia de las curvas de tiempo para valores mayores de corriente. Para las fallas restantes, que son las más frecuentes, el tiempo de operación del relevador es mayor. Este comportamiento es propio de los relevadores de sobrecorriente y se ha comprobado que es adecuado para la protección de sistemas eléctricos que con frecuencia operan de manera temporal sobre sus valores nominales. Esta situación no es tan conveniente cuando se presenta en la protección de respaldo; por la naturaleza misma del relevador de sobrecorriente resultan elevados tiempos de operación, sometiendo al sistema a tolerar corrientes que provocan esfuerzos térmicos y mecánicos que pudieran evitarse. La limitación de tiempo se acentúa cuando el dispositivo primario tiene una curva de tiempo con diferente grado de inversión que la del relevador de respaldo.

En las referencias ¹⁻³ se proponen diferentes métodos de coordinación; todos los métodos dependen de canales de comunicación para actualizar los ajustes. En redes aisladas (rurales) o en redes altamente interconectadas en donde no es viable implementar una estrategia mediante canales



de comunicación, es posible realizar el ajuste automático del relevador utilizando la corriente local e información fuera de línea del dispositivo de protección primario. El relevador propuesto aquí no requiere de algún medio físico de comunicación. El proceso de coordinación es automático e independiente de futuros cambios en el sistema (tales como cambios topológicos, de generación y carga).

En este trabajo se propone un relevador adaptable de sobrecorriente de tiempo inverso. Este criterio de protección de fase puede ser aplicado tanto en sistemas de potencia como en sistemas industriales. Los objetivos principales de este trabajo son: incrementar la sensibilidad del relevador para corrientes mínimas de falla durante condiciones de baja demanda y determinar una función de tiempo que asegure la operación de respaldo con un retardo fijo de tiempo relativa al dispositivo primario para cualquier valor de corriente de falla.

Los beneficios que ofrece el relevador propuesto son que: la corriente de arranque depende de la magnitud de la corriente de carga, resultando en mayor sensibilidad de la protección cuando más lo requiere; y que el tiempo de respaldo es independiente de la magnitud de la corriente de falla, resultando en menor tiempo de respaldo que en relevadores convencionales.

LIMITACIONES DEL RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE

La protección de sobrecorriente usa la corriente como único indicador de la ubicación de la falla, sin embargo, la corriente de falla depende del voltaje de pre-falla y la impedancia de Thevenin en el punto de falla. Esto provoca que el relevador de sobrecorriente tenga un alcance dinámico, dependiente de la

magnitud de la corriente de falla, presentando menor sensibilidad durante mínima demanda y en fallas bifásicas. Por otra parte, la corriente máxima de carga puede ser similar en magnitud a la corriente mínima de falla, lo que dificulta la correcta discriminación entre el estado normal de operación y la condición de falla.

Otro problema en la protección de sobrecorriente son los elevados tiempos de respaldo para corrientes mínimas de falla; esta limitación es originada por la corriente de carga (altos valores de arranque) y la divergencia natural de las características de operación de los relevadores. También cuando las protecciones primaria y de respaldo tienen diferentes tipos de curvas es difícil conseguir una coordinación adecuada.

Una solución a dichas limitaciones es usar criterios adaptables, proponiéndose en este artículo un relevador adaptable de sobrecorriente que considere dos parámetros de ajuste: corriente adaptable de arranque y tiempo adaptable de operación.

CORRIENTE ADAPTABLE DE ARRANQUE

Se propone un ajuste dinámico de la corriente de arranque I_a en función de la demanda de corriente:

$$I_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_k)_j + \Delta I \tag{1}$$

donde I_k es la corriente del sistema eléctrico, ΔI representa un margen de seguridad, con un valor propuesto de 15% del valor máximo de la corriente de carga, y N debe ser seleccionado de tal manera que el intervalo $N \times \Delta t$ (periodo de muestreo) tenga una duración de entre uno y varios minutos, similar a los integradores de demanda usados en medidores eléctricos.

La ecuación (1) asegura que el relevador tenga en todo momento la corriente de arranque mínima necesaria para evitar una operación incorrecta debido al efecto de la carga. Esto provee mayor sensibilidad, porque el valor de I_a es también pequeño durante condiciones mínimas de carga.

La lógica de control de la corriente de arranque tiene la tarea de mantener constante I_a durante una falla. Si la línea es desenergizada, la lógica de control asigna un valor máximo I_a^{\max} , el cual puede ser similar al ajuste de un relevador convencional

en la misma ubicación del adaptivo. Durante un intervalo completo de demanda, el valor I_a está dado en el relevador al final del intervalo previo de demanda. La acción de filtrado pasa-bajos inherente en el concepto de demanda simplifica la lógica del relevador propuesto.

Durante los incrementos súbitos de la corriente de carga (transferencia de potencia o conexión de carga), el relevador tiene una lógica de detección de falla en orden de supervisar I_a . Esta lógica incluye una verificación de la corriente de secuencia negativa y secuencia positiva, ambos combinados en una lógica OR.

El detector de secuencia negativa se propone para detectar fallas bifásicas.⁴ En redes de bajo voltaje, la corriente de secuencia negativa originada por fallas bifásicas es mayor que la corriente de secuencia negativa originada por desbalances, permitiendo un buen ajuste. El detector de secuencia positiva se propone para detectar fallas trifásicas, éste tiene el mismo ajuste que un relevador convencional de fase. Por tanto, esta lógica discrimina entre incrementos súbitos de carga y fallas (simétricas o asimétricas).

El desempeño de la lógica de detección de falla es analizado en la red eléctrica de la figura 1. La secuencia de operación simulada consiste

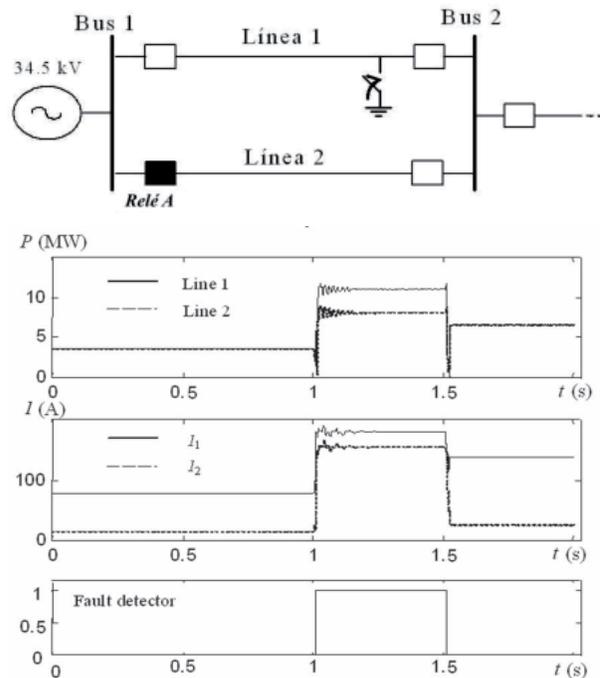


Fig. 1. Evaluación de la lógica de detección de falla propuesta.

en tres escenarios: desbalance en estado estable, cortocircuito bifásico en la línea adyacente al *Relé A* y disparo de la línea fallada (transferencia de potencia). El *Relé A* debe tolerar la condición de desbalance, respaldar la falla en la línea adyacente, y no debe disparar para transferencia de potencia. Durante el desbalance severo en estado estable (25% según la referencia ⁵) el algoritmo no emite salida, tolerando esta condición; aunque esta tolerancia no depende del valor del ajuste para esta simulación se ajustó al detector a 80A. La falla inicia a tiempo 1 segundo como se muestra en las gráficas de la figura 1. Durante la falla, se tiene un valor apreciable de corriente de secuencia negativa I_2 detectada por el *Relé A*, permitiendo un respaldo efectivo. Al final de la falla (1.5 segundos), el disparo de la línea 1 provocará una transferencia de potencia I_1 , también conocida como secuencia de positiva, en el mismo *Relé A*. Esta condición debe ser tolerada por el relevador permitiendo la alimentación a la carga. El ajuste del detector de fallas simétricas fue similar al de un relevador de sobrecorriente convencional.⁵ Durante esta condición, no hay salida del detector de falla propuesto, teniendo un desempeño satisfactorio.

Con el incremento de sensibilidad (reducción de la corriente de arranque), el tiempo de operación del relevador de sobrecorriente se reduce. Se ilustra en la figura 2.

Este comportamiento es benéfico especialmente en el tiempo de operación de la protección de respaldo, pero existe un riesgo de pérdida de coordinación, que se puede resolver mediante la adaptación del tiempo de operación.

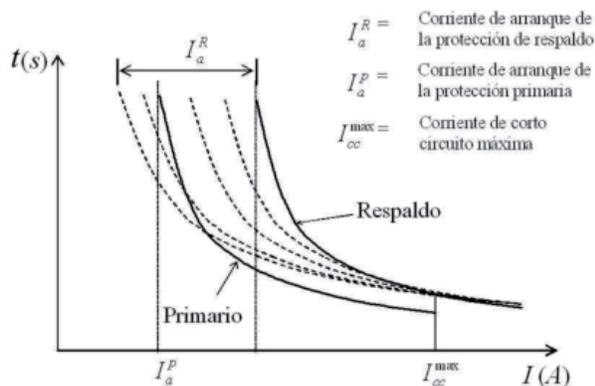


Fig. 2. Efecto de la corriente adaptiva de arranque en el tiempo de operación.

TIEMPO ADAPTABLE DE OPERACIÓN

La función básica de la adaptación de tiempo, para cualquier valor de corriente de falla, debe satisfacer:

$$T_R = T_P(I^P) + CTI \quad (2)$$

donde T_R es el tiempo de operación de la protección de respaldo, T_P es el tiempo de operación de la protección primaria, en función de la corriente de operación I^P , y CTI es el intervalo de coordinación.

El propósito del proceso de adaptación es determinar una función de tiempo adaptable, la cual defina el tiempo de operación del relevador de respaldo con un retardo de tiempo fijo, relativo a la protección primaria, para cualquier valor de corriente de falla.

Debido a la corriente de carga, el tiempo de respaldo se incrementa para valores mínimos de corriente de falla, aunque ambos relevadores tengan la misma curva. Para obtener el mismo retardo (CTI) para cualquier valor de corriente de falla, hay dos mecanismos: el primero, modificar la palanca de tiempo para cada valor de corriente de falla (curvas 1, 2 y 3 en figura 3). Segundo, en la figura 3 se observa que la curva 4 es similar a la curva de la protección primaria ($Relé_P$). Debido a la diferencia en el ajuste de la corriente de arranque entre $Relé_P$ y $Relé_R$, la curva de $Relé_R$ no puede ser obtenida por medio del ajuste de la palanca de tiempo de $Relé_P$; sin embargo, esta curva es asintótica a la corriente de arranque de $Relé_P$. Por tanto, si la función de tiempo T_R se determina en base a la expresión analítica de la curva de tiempo de la protección primaria evaluada con la corriente de arranque de la misma protección

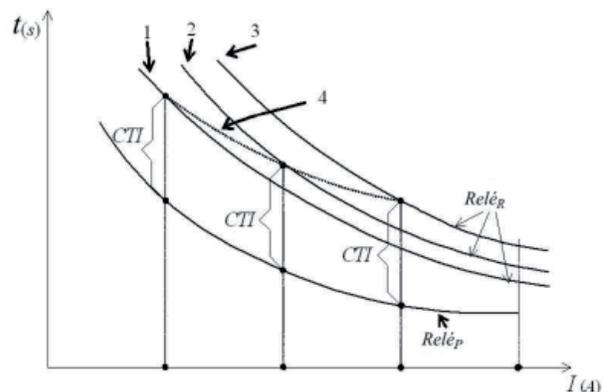


Fig. 3. Característica de operación adaptable.

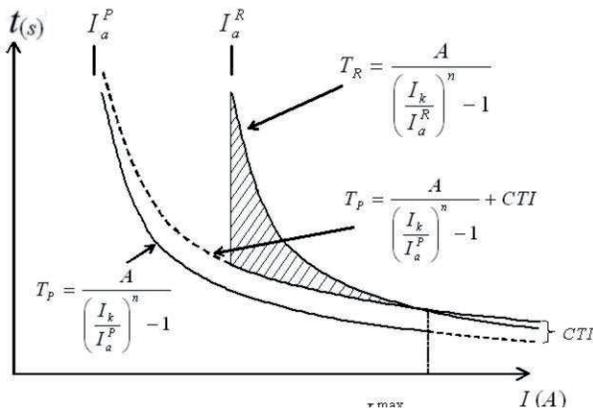


Fig. 4. Curva de tiempo propuesta.

más el intervalo de coordinación (figura 4), se tiene el cumplimiento de (2) para valores de falla constante y variable.

La expresión adaptable del relevador es obtenida de (2). La corriente de operación (I^p) es determinada con la corriente de arranque de la protección primaria ($I^p = I_k / I_a^p$). La función de tiempo adaptable es:

$$\frac{1}{T_p(I^p) + CTI} \tag{3}$$

Cuando la característica de la protección primaria es conocida, $T_p(I^p)$ puede ser sustituida directamente en (3). Cuando la ecuación de tiempo es desconocida, pero se tiene la gráfica, es posible obtener pares de valores (I, T) y usar un programa de ajuste de curvas fuera de línea para obtener $T_p(I^p)$.⁶⁻⁸ Si la protección primaria es un fusible, únicamente se necesita la curva de tiempo máximo de liberación; si la protección primaria es un restaurador, se necesitan la curva de tiempo y el ajuste de arranque.

La expresión analítica del relevador propuesto se obtiene de la sustitución de (3) en (2). La representación del estado dinámico del relevador de sobrecorriente utilizando la función adaptable de tiempo es:

$$\Delta t \sum_{k=1} H(I^p) = 1 \quad \text{donde:} \tag{4}$$

$$H(I^p) = \frac{1}{T_p(I^p) + CTI}$$

Para condiciones de protección de líneas multi-terminales (*Relé A* en la figura 1), la característica de operación del relevador es definida por la protección primaria más lenta.

ESTRUCTURA FUNCIONAL

El diagrama funcional del relevador adaptable de sobrecorriente propuesto se muestra en la figura 5. El cual está compuesto básicamente de dos elementos: corriente adaptable de arranque, para incrementar la sensibilidad del relevador; y tiempo adaptable de operación, para garantizar un retardo constante en la operación del relevador, independientemente de la magnitud de corriente de falla. La función principal del bloque de corriente adaptable de arranque es la detección de falla. La corriente de arranque se determina de (1) y está restringida por el ajuste de un relevador convencional I_a^{\max} . La señal (T/F) es formada en la salida; si la falla ha sido detectada ($I_k > I_a$) se emite la señal T y se declara la condición de arranque; se inicia entonces, el proceso de integración en el elemento de tiempo (4). La señal F es una condición de bloqueo para la operación del relevador.

El bloque de tiempo adaptable de operación calcula el valor de la función $I_k > I_a$ presentada en (4). La integración de T_p emula la dinámica de operación de la protección primaria. El intervalo de tiempo de coordinación CTI (0.3 s) es sumado para asegurar la coordinación entre el relevador adaptable y el dispositivo primario. Si el elemento de corriente emite la señal permisiva T ; la señal de salida del bloque de tiempo adaptable es integrada por el elemento de tiempo. Este proceso de integración establece la dinámica de operación del relevador en presencia de corrientes de falla variables. Finalmente la condición de disparo en el elemento de salida es verificada y la señal de salida es enviada al circuito de disparo del interruptor.

El tiempo de operación del relevador adaptable debe ser establecido como una función de la curva de tiempo del dispositivo primario. Existe entonces una independencia entre el tiempo de operación

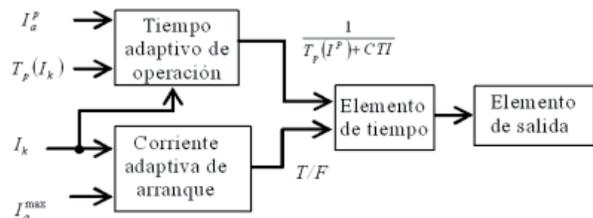


Fig. 5. Diagrama funcional del relevador adaptable de tiempo inverso.

del relevador adaptable, dependiente del tiempo de operación de la protección primaria, y la corriente de arranque, determinada según (1) y actuando únicamente como detector de falla. La corriente de arranque depende de la condición de carga, permitiendo un incremento en la sensibilidad. Mediante el proceso de adaptación del tiempo de operación se obtiene una coordinación automática del relevador adaptable con el dispositivo de protección primario; no es necesario realizar ningún procedimiento para su coordinación, aun cuando se presenten cambios en las condiciones de operación del sistema eléctrico, tales como: cambios topológicos, de generación y carga; que modifiquen la magnitud de la corriente de cortocircuito. Esto se observa en la figura 4 en donde al incrementarse el valor de corriente de cortocircuito el intervalo de coordinación según el criterio propuesto (4) se mantiene.

Durante una falla (trifásica o bifásica); la corriente de arranque del relevador adaptable vigente se determina en el periodo anterior del cálculo de demanda, por tanto se declara la condición de falla se activa y la función de tiempo (figura 5).

Se presentan dos alternativas de operación dependiendo de si la corriente de arranque del relevador adaptable es menor a la corriente de arranque del relevador primario. En la primera alternativa, la corriente de arranque del relevador adaptable tendrá un límite mínimo, la corriente de arranque del dispositivo primario; entonces, aun cuando el relevador adaptable detecte la falla, el múltiplo de la corriente de arranque será menor que 1.0 y la operación no se efectuará. En la segunda alternativa, la corriente de arranque del relevador adaptable no tendrá límite inferior, por tanto será factible la operación del relevador adaptable en condiciones en donde el dispositivo primario no tenga sensibilidad, esta condición no representa una pérdida de coordinación; entonces la falla, sería liberada por el relevador adaptable.

Para efectuar el proceso de coordinación, es necesario obtener la expresión analítica de la curva de tiempo de la protección primaria, ya sea fusible, relevador electromecánico o restaurador, incluyéndola en la expresión dinámica del relevador adaptable. No es necesario remover los dispositivos de protección existentes. La presencia del relevador

adaptable propuesto ofrece mayores posibilidades de solucionar problemas de sensibilidad y coordinación entre dispositivos de protección.

La coordinación entre una serie de relevadores de sobrecorriente (relevador adaptable entre relevadores convencionales) se presenta en la referencia ⁹. La coordinación entre una serie de relevadores adaptables se efectúa respetando el principio descrito, cada relevador tendrá la expresión analítica del relevador primario más *CTI*. Este proceso no implica tiempos elevados de operación para la serie de relevadores, porque el efecto de la corriente de carga es minimizado. La I_a^{\max} para cada relevador se determina en forma similar que en relevadores convencionales.

COMPARACIÓN ENTRE RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE

En esta sección se presenta un estudio comparativo de sensibilidad y tiempo de operación entre tres tipos de relevadores de sobrecorriente: convencional, secuencia negativa y adaptable.

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad fue realizado en el sistema radial mostrado en la figura 6. La corriente de falla mínima es simulada en el Bus 4. La variación de las impedancias Z_3 y Z_4 , simulan una configuración multi-terminal y una variación de la corriente de carga respectivamente. Para este análisis, los relevadores de sobrecorriente de fase fueron ubicados en el Bus 2 (*Relé B*). La Sensibilidad se pondera de acuerdo a la siguiente relación:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{I_{cc \min}}{I_a} \quad (5)$$

Los métodos para determinar los valores de sensibilidad para el relevador convencional y el de secuencia negativa están descritos en las referencias ^{4,5} respectivamente. Para el relevador adaptable, se asume que su corriente de arranque (1) no está limitada por el ajuste de arranque del dispositivo primario. Este es un estudio basado en un sistema en particular, las condiciones pueden cambiar debido a la dependencia topológica, estados operativos y esquemas de protección; pero es posible obtener un estudio cualitativo de sensibilidad de los tres tipos de relevadores de sobrecorriente.

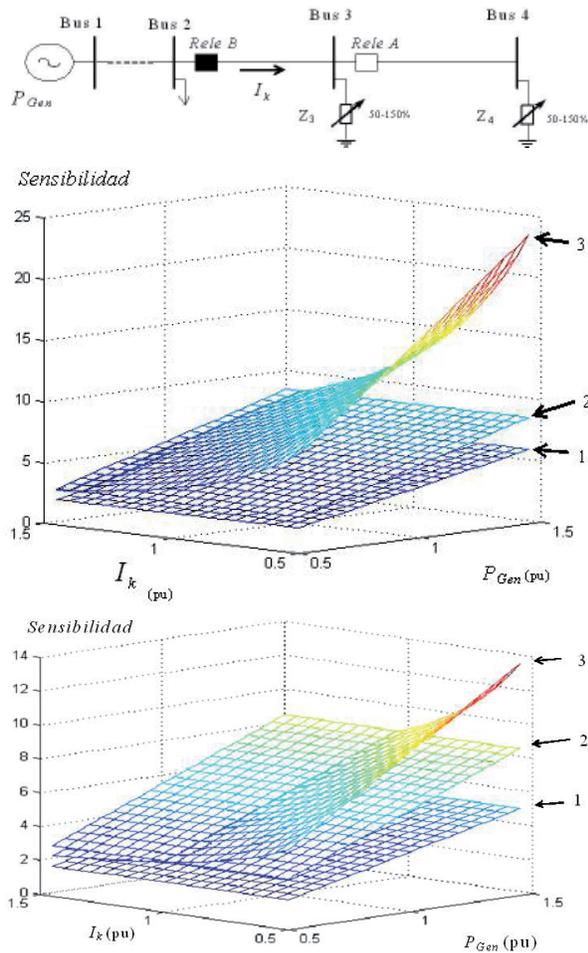


Fig. 6. Sensibilidad de relevadores de sobrecorriente de fase.

La corriente de falla mínima se determina como una falla bifásica en condiciones de generación mínima y ubicada en el Bus 4. El valor de sensibilidad aceptado⁵ es 1.5. En la gráfica superior de la figura 6 se muestran los valores de sensibilidad de los relevadores para diferentes valores de corriente de carga (I_k) y contribuciones de la fuente de generación (P_{Gen}). Se observa que los relevadores convencional (plano 1) y de secuencia negativa (plano 2) mantienen la misma sensibilidad ante el cambio de demanda, debido a que su corriente de arranque es independiente de la dinámica de la carga. En cambio el relevador adaptable tiene un ajuste que depende de la dinámica de la carga, esto resulta en un incremento de la sensibilidad del relevador durante condiciones de demanda mínima comparado con los otros relevadores, como se aprecia en el plano 3 de la gráfica superior de la figura 6.

Durante condiciones de mayor contribución de potencia (P_{Gen}) en la red, la sensibilidad de los tres tipos de relevadores analizados se incrementa (mayor corriente de falla). En el relevador adaptable se presenta un incremento mayor de sensibilidad comparada con los otros relevadores. Es posible concluir, que el relevador adaptable presenta mayor sensibilidad que los relevadores convencionales y de secuencia negativa, durante condiciones de demanda mínima y durante estados operativos de mayor contribución de potencia, debido a su mayor dependencia a la dinámica de la corriente de carga y a la variación del estado operativo (contribución de potencia). La sensibilidad del relevador de secuencia negativa es similar al del relevador adaptable únicamente en demanda máxima y solo para fallas bifásicas. La sensibilidad del relevador adaptable siempre es mayor que la del relevador convencional.

En líneas multi-terminales (gráfica inferior de la figura 6) el relevador de secuencia negativa tiene mayor sensibilidad que el relevador convencional, debido a que no está afectado por la corriente de carga, permitiendo definir su corriente de arranque un tanto mayor que la protección más lenta de los alimentadores de la configuración multi-terminal. Durante condiciones de máxima demanda, la sensibilidad de los relevadores de secuencia negativa es mayor que la de los relevadores restantes; sin embargo, bajo condiciones de demanda mínima, la sensibilidad del relevador adaptable es la mayor.

De los resultados obtenidos se puede concluir que el relevador convencional es el que presenta menor sensibilidad, el relevador de secuencia negativa es más sensible en líneas multi-terminales, pero sólo para fallas bifásicas. El relevador adaptable en cambio tiene una mayor sensibilidad en redes radiales, y en redes multi-terminal tiene mayor sensibilidad que el relevador de secuencia negativa en demanda mínima, cuando el relevador más lo necesita.

Análisis de tiempo de operación

El análisis de tiempo de operación fue efectuado en el sistema radial de la figura 6. La corriente de arranque fue determinada por Z_3 y Z_4 , ambos ajustados al 100%. La figura 7 muestra el resultado del análisis de tiempo de los relevadores de sobrecorriente de fase. Se observa que el tiempo de respaldo del

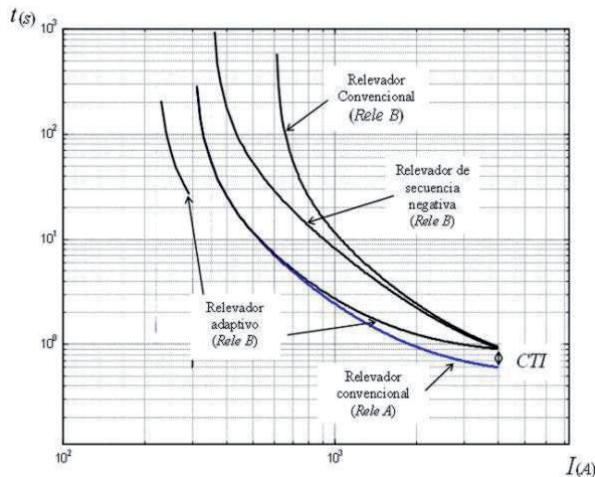


Fig. 7. Comparación de curvas de tiempo de relevadores de sobrecorriente.

relevador de secuencia negativa es menor que el del convencional. El relevador adaptable presenta un retardo constante (*CTI*) independientemente de la magnitud de la falla, esto resulta en tiempos menores de respaldo que los relevadores restantes.

Si la corriente de falla es menor que la corriente de arranque de la protección primaria, el relevador adaptable podrá detectar la falla, por lo tanto la corriente de arranque del relevador adaptable que realiza funciones únicamente de detección de falla puede ser activada y definir, como en los relevadores convencionales, el tiempo de operación. Este criterio puede ser opcional al usuario, la activación de este criterio ofrece una solución a la pérdida de sensibilidad de la protección primaria, sobre todo en condiciones de demanda mínima. La curva de tiempo del relevador adaptable será la misma que la de la protección primaria sin el *CTI*. Para la activación de esta lógica se tendrán que cumplir las condiciones de detección de falla (señal *T* en figura 5) y el cumplimiento de la condición $I_k < I_a^p$. Para el ejemplo mostrado en la figura 7, el relevador primario tiene 300A como ajuste de I_a^p , y el relevador adaptable tiene 220A como el mínimo ajuste para condiciones de demanda mínima. Para cualquier falla entre 220-300A, el relevador adaptable tendrá mayor sensibilidad que el relevador primario, por lo tanto la falla a través de la alta impedancia será detectada.

En la figura 8 se muestra, el efecto combinado del relevador propuesto. El relevador modifica su

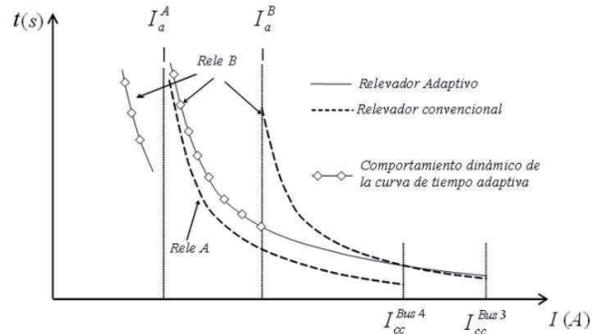


Fig. 8. Comportamiento resultante del relevador adaptable.

corriente de arranque según (1), este valor limita la longitud de la curva de tiempo; se tendrá entonces un comportamiento dinámico de la curva de tiempo dependiendo del valor vigente de la corriente de arranque. Durante la demanda máxima el relevador adaptable será aun más sensible que el relevador convencional debido a que su ajuste será 15% mayor que la corriente de carga comparado con el 1.5 ó 2.0 veces, en un relevador convencional. El tiempo de respaldo (4) será solo el *CTI* mayor que el tiempo de operación del primario para cualquier valor de corriente de falla. Por tanto, la sensibilidad y el tiempo de operación del relevador de sobrecorriente se mejoran mediante cambios dinámicos de ajuste.

PRUEBA

El desempeño de la lógica adaptable de la corriente de arranque fue evaluado mediante simulación digital utilizando señales reales provenientes de un simulador físico de sistemas de potencia. La evaluación fue realizada en base al sistema eléctrico presentado en la figura 6. No es necesario considerar una configuración del sistema eléctrico más compleja; ya que el uso de sistemas complejos no conduce a efectos inesperados. Muchos escenarios tienen el mismo efecto en la corriente de operación; además, el proceso de coordinación entre relevadores de sobrecorriente se efectúa con parejas de relevadores. La figura 9 muestra la operación típica de una red de sub transmisión y distribución. La lógica adaptiva se mantiene en condiciones de estado estable, variando en función de la corriente de carga, hasta que la corriente del sistema sea mayor que la corriente de arranque. Como el algoritmo usa la información de

demanda, el ajuste de la corriente de arranque (I_a) es constante en cada intervalo de demanda. Entonces, la lógica de operación es satisfactoria.

El valor acumulado del integrador (G_k es el valor de la integración en (4) o, análogamente, la posición del disco de inducción en un relevador electromecánico, depende de I_k . Durante la operación, la integración de la función $T(I_k)$ es positiva, incrementando el valor acumulado del integrador (distancia de viaje del disco hacia la posición de disparo). Por otro lado, en la zona de reposición, la integración es negativa y decrece el valor acumulado del integrador (retorno del disco hacia la posición inicial). La condición de operación está dada cuando $G_k=1$ (figura 9).

La evaluación del tiempo adaptable consiste en la comparación del tiempo de operación del relevador adaptable respaldando a un relevador digital para valores constantes de falla. En la referencia⁹ se presentan las pruebas de evaluación con un relevador electromecánico. El objetivo principal de la prueba es demostrar que el retardo de tiempo en la operación del relevador adaptable respecto a la operación del relevador convencional es constante para diferentes valores de corriente de falla, obteniendo así una coordinación automática entre ambos relevadores.

El relevador adaptable fue programado en una tarjeta de adquisición de señales. Se tomaron 10 pares de valores tiempo-corriente de la curva de tiempo del relevador digital publicada por el fabricante.

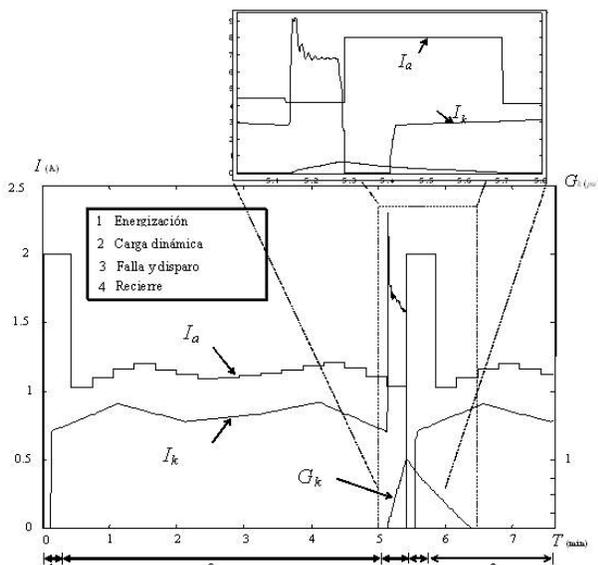


Fig. 9. Evaluación de la lógica de control de la corriente adaptiva de arranque.

Los valores de corriente fueron definidos con espaciamiento uniforme.¹⁰ Un intervalo constante fue establecido desde el múltiplo 2 hasta el múltiplo 20.

La expresión analítica del relevador digital es:

$$T = \frac{0.052}{I^{0.02} - 1} + 0.113$$

Esta expresión, fue introducida en el relevador adaptivo, definiendo así su característica de operación (4). En la tabla I y figura 10 se muestran los tiempos de operación obtenidos por el relevador digital y los tiempos de operación del relevador adaptable.

Tabla I. Tiempos promedio de operación.

I_{cc}	Tiempos de operación			
	Relevador adaptable	Relevador digital		Diferencia
		Medido	Analítico	
3.1	2.63	2.25	2.38	0.315
4.1	2.20	1.87	1.92	0.305
5.1	2.0	1.65	1.68	0.335
6.4	1.80	1.45	1.48	0.335
8.2	1.65	1.29	1.32	0.345
10.0	1.52	1.19	1.21	0.320
11.9	1.45	1.11	1.13	0.330
13.6	1.40	1.05	1.08	0.335
14.5	1.37	1.04	1.05	0.325
15.5	1.35	1.02	1.03	0.325

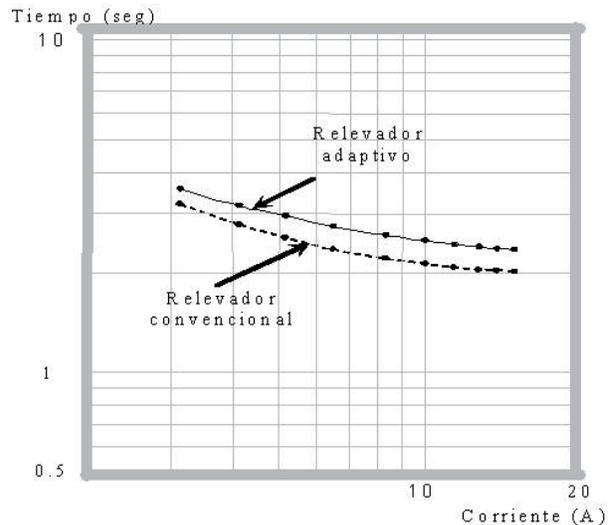


Fig. 10. Evaluación de coordinación entre un relevador convencional y un relevador adaptivo.

De los resultados obtenidos se observa que el intervalo entre los tiempos de operación del relevador digital y el relevador adaptable es muy cercano al intervalo de coordinación previamente definido (0.3 s). Las variaciones observadas se deben al ruido presente durante la prueba.

La coordinación entre el *Relé A* y *Relé B* del diagrama unifilar de la figura 6 también fue evaluado con corrientes de falla dinámicas. La señal de corriente de falla y el proceso de integración de los relevadores fueron obtenidos en pruebas de laboratorio y simulación digital respectivamente. En la figura 11 se muestra la corriente de falla dinámica (I_{cc}) y los valores de los integradores del *Relé A* (G_k^R), *Relé B* (G_k^R) y el relevador propuesto *Relé B** (G_k^{R*}). Se observa que el intervalo de tiempo entre el Relé A y el Relé B es de 0.61s, sin embargo la diferencia en el tiempo de operación del *Relé A* y el *Relé B** es de 0.3s (CTI). Esta reducción de 0.31s en el tiempo de respaldo se obtiene con la estructura adaptable propuesta.

CONCLUSIONES

Los criterios propuestos incrementan la sensibilidad y reducen los tiempos de respaldo en los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso, principalmente durante escenarios de poca demanda.

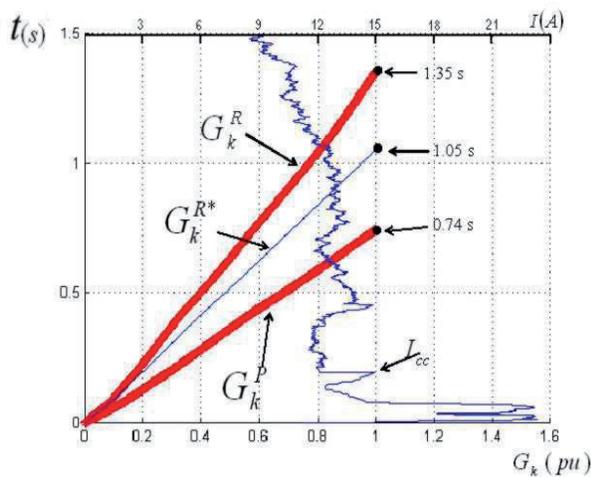


Fig. 11. Comparación de los valores acumulados de los integradores de relevadores de sobrecorriente ante corrientes de fallas dinámicas.

Los parámetros de corriente de arranque y tiempo de operación son independientes en el relevador adaptable. La corriente de arranque propuesta incrementa la sensibilidad del relevador de sobrecorriente al ser dependiente de la corriente de carga vigente; esta corriente de arranque adaptable funciona como un detector de falla, dando la señal permisiva para el inicio del proceso de integración de tiempo de operación del relevador adaptable. El tiempo de operación del relevador adaptable se determina emulando la dinámica de operación del dispositivo primario (corriente de arranque y curva de tiempo del dispositivo primario) y adicionando el intervalo de coordinación, garantizando una coordinación óptima.

Para incrementos apreciables de la corriente de carga, el relevador adaptable tiene una lógica de detección de fallas para supervisar la corriente de arranque, la cual incluye una verificación de secuencia negativa y secuencia positiva, y discrimina entre incrementos de carga y fallas (simétricas o asimétricas). Con la adaptación del tiempo de operación en el relevador de sobrecorriente, además de reducir los tiempos de respaldo, se obtiene una coordinación automática e independiente de cambios futuros en el sistema, tales como topología, generación y carga.

El relevador propuesto no requiere información de la red eléctrica adicional al de un relevador convencional, la rutina de adaptación se ejecuta únicamente con los fasores de corriente, lo que exime de un incremento en la capacidad de hardware al relevador ya que las funciones adaptables propuestas se implementan únicamente en su software.

La simplificación algorítmica se obtiene con el uso del concepto de demanda en la definición de la corriente de arranque, requiriendo actualización cada 5 minutos; también el proceso de ajuste de curvas se efectúa fuera de línea, sin carga computacional al relevador. Entonces, el proceso adicional para el relevador adaptables es mínimo.

De las observaciones anteriores es evidente que el relevador propuesto se implementa con sólo ligeros cambios en el “firmware” del relevador, lo que implica que no se requiere inversión económica adicional.

REFERENCIAS

1. H. Askarian, et al. "A new optimal approach for coordination of overcurrent relays in interconnected power systems," IEEE Transactions on power delivery, vol. 18, No. 2, April 2003.
2. A.J. Urdaneta, et al., "Optimal coordination for direccional overcurrent relays in interconnected power systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 903-911.
3. A. Y. Abdelaziz, H. E. A. Talaat, A. I. Nosseir and Ammar A. Hajjar, "An adaptive protection scheme for optimal coordination of overcurrent relays," Electric Power Systems Research, Vol. 61, Issue 1, 28 February 2002, pp. 1-9.
4. A.F. Elneweihi, E.O. Schweitzer, III, M.W. Feltis, "Negative-sequence overcurrent element application and coordination in distribution protection," IEEE Power engineering society, PES Summer Meeting, Seattle, WA, July 12-16, 1992.
5. ANSI/IEEE Std 141-1986, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
6. M.S. Sachdev, J. Singh, and R.J. Fleming, "Mathematical models representing time-current characteristics of overcurrent relays for computer application," IEEE Paper A78 131-5, January 1978.
7. J.E. Hieber, "Empirical equations of overcurrent relay curves for computer application," IEEE Winter Power Meeting, New York, N.Y., January/February 1965, Paper No. 31 CP 65-91, pp. 1-11.
8. IEEE Standard C37.112-1996, IEEE Standard Inverse-time Characteristic Equations for Overcurrent Relays.
9. A. Conde, E. Vázquez, H.J. Altuve, Time overcurrent adaptive relay, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 25(10) 2003, pp. 841-847.
10. IEEE Committee Report, "Computer representation of overcurrent relay characteristics," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1659-1667.



EL INSTITUTO MEXICANO DE ACÚSTICA

Invita al

XIV CONGRESO INTERNACIONAL MEXICANO DE ACÚSTICA

14 - 16 de noviembre de 2007

LEÓN, GUANAJUATO, MÉXICO

CONFERENCIAS, POSTERS, CURSOS, EXPOSICIÓN

TEMÁTICAS: Audio, Acústica Arquitectónica, Música, MIDI, Acústica Física, DSP, Ruido, Vibraciones Mecánicas, Bioacústica, Comunicaciones, Normas, Etc.

INSTITUCIONES PARTICIPANTES: Acoustical Society of America, Asociación Mexicana de Ingenieros y Técnicos en Radiodifusión, Cámara de la Industria de la Construcción, Del. Oaxaca, Cenidet, Centro Nacional de Metrología, CIIDIR Oaxaca, Colegio de Ingenieros en Comunicaciones y Electrónica, Instituto Politécnico Nacional, Tecnológico de Veracruz, Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad de Guadalajara, Universidad de Guanajuato, Universidad de las Américas en Puebla, Universidad Latina de América, Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales (Chile).

SEDE: Centro de Convenciones del Hotel Real de Minas
en León, Gto., México.

INFORMACIÓN

Coordinación General. M.Sc. Sergio Beristain: sberista@hotmail.com
TEL. (52-55) 5682-2830, 5682-5525, FAX (52-55) 5523-4742