

COORDINACIÓN DE RELÉS DE SOBRECORRIENTE EN SISTEMAS ENMALLADOS UTILIZANDO PROGRAMACIÓN LINEAL

RESUMEN

Este artículo presenta la aplicación de método de programación lineal en la coordinación de relés de sobrecorriente de tiempo inverso en sistemas enmallados. La metodología de Urdaneta, Nadira y Pérez es aplicada junto con una selección de las corrientes de carga y falla que simplifica el problema.

PALABRAS CLAVES: Protecciones eléctricas, relés de sobrecorriente direccionales, coordinación de protecciones.

ABSTRACT

This paper presents the application of the linear programming method for the coordination of inverse time overcurrent protective relays in meshed systems. The methodology of Urdaneta, Nadira and Pérez is applied along with a selection of load and fault currents that simplifies the problem.

KEYWORDS: Protective relaying, directional overcurrent relays, protective relaying coordination.

CARLOS J. ZAPATA

Profesor
Escuela de Tecnología Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
cjzapata@utp.edu.co

GERMAN E. MEJÍA

Ingeniero Electricista
Universidad Tecnológica de Pereira
gemejia@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

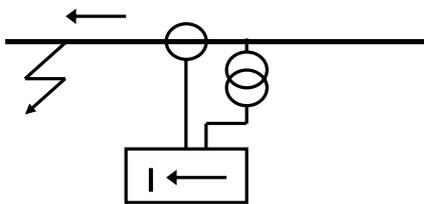


Figura 1. Relé de sobrecorriente direccional

En los sistemas enmallados la corriente de carga o de falla puede circular hacia fuera o hacia adentro de la zona de protección de un relé de sobrecorriente dependiendo de las condiciones operativas o la ubicación de la falla.

Por lo tanto, es necesario utilizar relés de sobrecorriente de tipo “direccional” los cuales operan cuando la corriente observada circulando en una dirección de referencia es mayor o igual al valor de ajuste.

La direccionalidad se logra por medio de una señal auxiliar que generalmente es un voltaje, como se muestra en la Figura 1, u otra corriente.

La coordinación de relés de sobrecorriente de tiempo inverso obtiene los valores de corriente de arranque y dial de cada relé que minimicen el tiempo de operación para fallas en su zona de protección y ofrezcan respaldo temporizado a los relés de las zonas adyacentes con un tiempo de margen pre-especificado.

Fecha de Recibo: 17 Octubre de 2003

Fecha de Aceptación: 25 Noviembre de 2003

Esto requiere que la máxima corriente de falla que es observada por el relé de tiempo inverso para fallas en su zona sea mayor a la que observa para fallas en las zonas adyacentes a las cuales ofrecerá respaldo temporizado.

Esta condición se cumple en los sistemas radiales, sistemas enmallados con una sola fuente de potencia y sistemas enmallados con dos fuentes ubicadas simétricamente en los extremos.

En sistemas enmallados multi-fuente no siempre se cumple esta condición para todas las configuraciones operativas posibles, las cuales pueden ser muy numerosas.

En este caso deben utilizarse protecciones cuyo principio de operación no esté basado únicamente en la corriente, como por ejemplo relés de impedancia, ya que el sistema no se puede dejar sin protección en ninguna de sus configuraciones operativas.

Este artículo presenta cómo el procedimiento de coordinación de relés de sobrecorriente direccionales de tiempo inverso se puede describir como un problema de optimización matemática mediante la técnica de programación lineal.

La metodología presentada por Urdaneta, Nadira y Pérez en 1988 es aplicada junto con una selección de las corrientes de carga y falla para el ajuste de los relés que simplifica el problema en cuanto al tamaño del sistema de ecuaciones.

2. CONFIGURACIONES OPERATIVAS

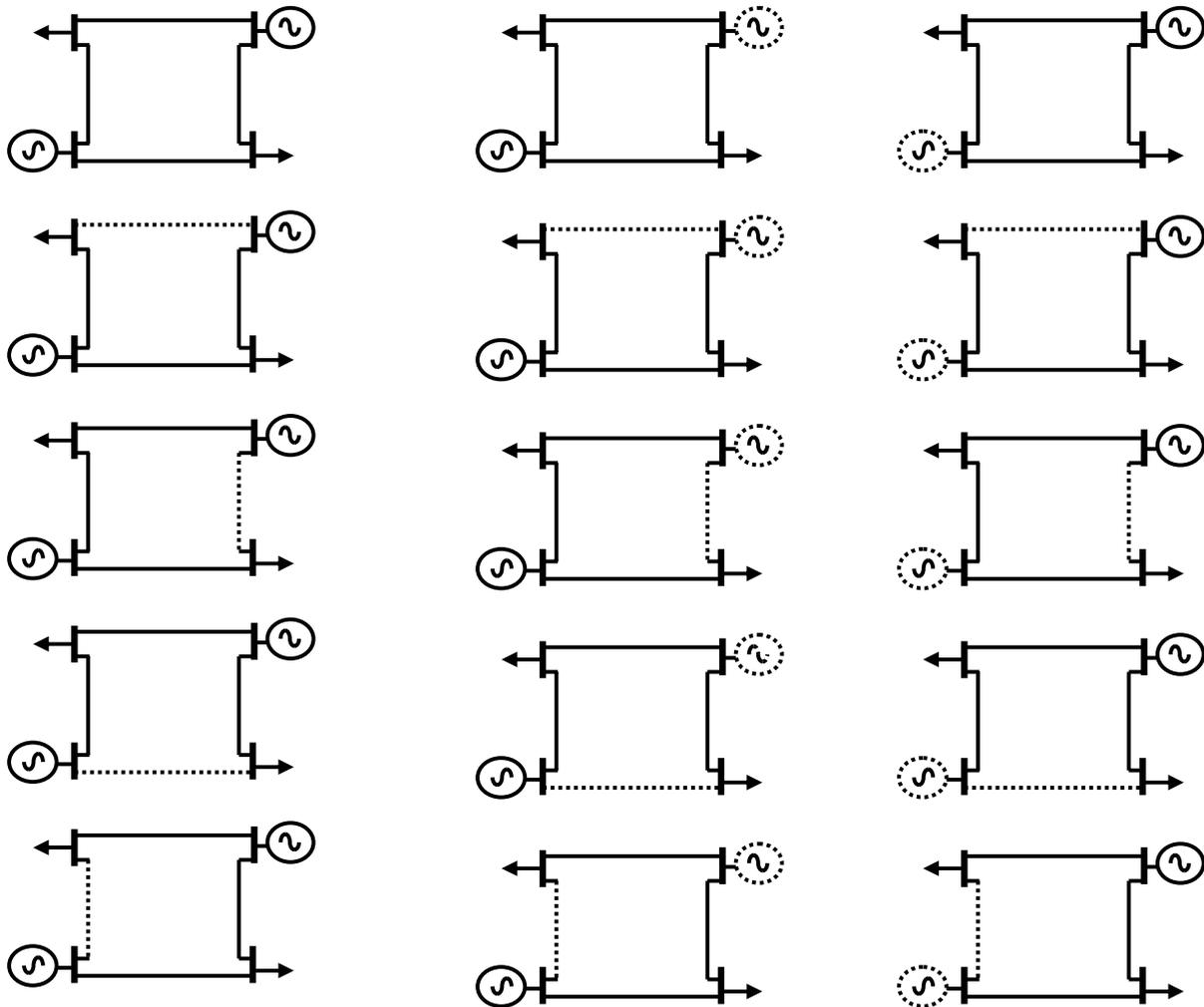


Figura 2. Ejemplo de Configuraciones Operativas de un Sistema

Las configuraciones operativas de un sistema pueden ser muy numerosas. En sentido estricto, si hay n componentes de dos estados (operativo, fallado) el sistema tendrá 2^n estados o configuraciones operativas a estudiar. Para el caso del sistema enmallado de cuatro líneas y dos fuentes de la Figura 2, se observa que existen 16 configuraciones operativas.

Dado que la probabilidad de pérdida simultánea de más de dos componentes es muy baja, generalmente, sólo se analizan el estado normal y las configuraciones correspondientes a los criterios de contingencia $n-1$ y $n-2$.

Sin embargo, por razones de seguridad debe ofrecerse protección para todas las configuraciones operativas del sistema. Es decir, se debe encontrar un ajuste para los relés que cumpla los criterios de coordinación en todas las configuraciones. Esta sería la solución "global".

Puesto que las magnitudes y direcciones de circulación de las corrientes de carga y de falla cambian de una configuración operativa a otra, conforme entran y salen fuentes de potencia y líneas de transmisión, no siempre se cumplirá que la corriente de falla en la zona propia de los relés sea mayor a la observada para fallas en las zonas adyacentes.

Por lo tanto, es posible que no pueda encontrarse una "solución global" de coordinación. En estos casos, debe recurrirse a protecciones con un principio de funcionamiento que no esté basado en la corriente, como por ejemplo, relés de impedancia.

Sin embargo, es de gran utilidad conocer el hecho de que no es posible hallar una solución global para el sistema utilizando relés de sobrecorriente o hallar soluciones para las configuraciones operativas más comunes o de interés.

3. MÉTODOS DE COORDINACIÓN

Tradicionalmente, la coordinación de protecciones en sistemas eléctricos ha consistido en la aplicación de procedimientos heurísticos mediante los cuales se busca empíricamente la optimización. Estos algoritmos se ejecutan en forma manual o con software comercial que asiste en forma gráfica el proceso manual.

Por lo tanto, no existe el planteamiento de un conjunto de ecuaciones que describa el problema de coordinación para buscar la solución óptima mediante técnicas analíticas o numéricas. Tampoco se conoce si la solución obtenida mediante dichos procedimientos es óptima, puesto que no se analiza todo el espacio solución posible del problema.

La coordinación de relés de sobrecorriente direccionales en sistemas enmallados con una sola fuente o con dos fuentes ubicadas simétricamente en los extremos se realiza abriendo la red en uno de los extremos adyacentes a una de las fuentes y coordinando los relés cuya “dirección” corresponda al sentido de circulación de la corriente como si pertenecieran a un sistema radial. Luego se repite el procedimiento abriendo la red en el otro extremo y coordinando los restantes relés. Los métodos de coordinación son los mismos aplicados a los sistemas radiales y pueden consultarse en las referencias [1] y [5].

Para los sistemas enmallados multifuente, los métodos heurísticos proponen abrir la red en un punto “adecuado” a juicio del analista e intentar coordinar los relés en un sentido del anillo y luego en el otro. La selección del punto adecuado para abrir la red es clave en el éxito de este procedimiento. Si no es posible coordinar los relés, se abre la red en otro punto y se repite hasta encontrar una solución. Este método se denomina “cortar e intentar” [4] e implica hacer muchos ensayos para encontrar una solución o tener diversas soluciones.

En 1988 Urdaneta, Nadira y Pérez [3] presentaron la aplicación de la técnica de programación lineal (PL) al procedimiento de coordinación de protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso en sistemas anillados multifuente en lo que constituyó en el primer planteamiento en forma analítica del problema de coordinación y abriendo la línea de investigación de aplicaciones de optimización en la coordinación de protecciones.

El presente documento aplica la metodología de Urdaneta-Nadira-Pérez pero varía la forma de seleccionar las corrientes de carga y falla con que se ajustan los relés para así reducir el tamaño del sistema de ecuaciones e intentar buscar el óptimo global del problema de coordinación considerando todas las configuraciones operativas posibles o de interés.

4. PARÁMETROS DE AJUSTE DE LOS RELÉS

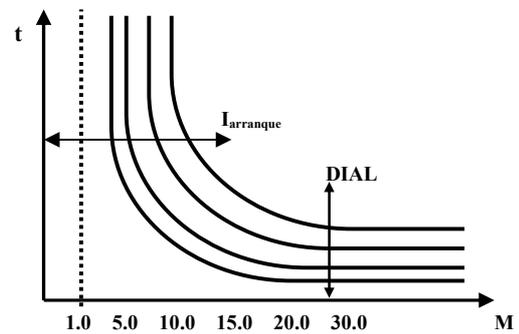


Figura 3. Curva de operación de un relé de tiempo inverso

La ecuación característica del relé es:

$$t_{operación} = a * DIAL / (M^n - 1) \quad \text{[segundos]} \quad (1)$$

| Tipo de curva | A | n |
|-------------------------|------|------|
| Tiempo inverso estándar | 0.14 | 0.02 |
| Muy inversa | 13.5 | 1 |
| Extremadamente inversa | 80 | 2 |
| Tiempo inverso largo | 120 | 1 |

Tabla 1. Constantes de forma para ecuación exponencial según normas IEC

- **I_{arranque}**

Es el valor a partir del cual comienza la operación temporizada del relé.

En relés modernos, los valores de ajuste se expresan como múltiplos y submúltiplos de la corriente nominal (1 ó 5A dependiendo del CT). Por ejemplo 0.4 a 4.0 veces I_{nom} en pasos de 0.01. En relés antiguos se utilizaba el concepto de “TAPS” o valores discretos de corriente (5, 6, 8, 10A).

Es común presentar el eje horizontal de las curvas de operación de los relés de tiempo inverso como múltiplos de la corriente de arranque (M).

- **Dial**

Permite obtener diferentes tiempos de operación para un mismo tipo de curva y una corriente dada. Ver la Figura 3.

En relés modernos los pasos de dial son muy cercanos entre sí. Por ejemplo, 0.1 a 1 en pasos de 0.05 que equivale a 18 curvas. Esto permite considerar el ajuste de dial como una función continua. En relés antiguos, los dial son números con los cuales se “bautiza” a cada curva de operación. Por ejemplo, ½, 1, 2 hasta 11, en pasos de 1. Estos números son nombres y no corresponden a factores de ecuación alguna.

5. COORDINACIÓN COMO UN PROBLEMA DE PL

Cada línea de transmisión del anillo se considera una zona de protección con dos relés, uno en cada extremo.

Paso 1: Obtener las corrientes de carga que son observadas por los relés para cada una de las configuraciones operativas del estudio.

La magnitud de las corrientes de carga observadas por los relés disminuyen al aumentar el número de fuentes de potencia que se encuentran operando.

Seleccionar de todas las configuraciones operativas el valor mínimo de corriente de carga que observa cada relé.

Paso 2: Obtener las corrientes que son observadas por los relés para fallas en las barras del sistema en cada una de las configuraciones operativas del estudio.

Las magnitudes de las corrientes de cortocircuito observadas por los relés aumentan si aumenta el número de fuentes de potencia que se encuentren operando y disminuyen si el anillo se encuentra cerrado.

La corriente de cortocircuito que observa cada relé en su zona es mayor conforme la falla es más cercana al barraje donde se ubica el relé. Es decir, la corriente de falla en la barra donde está ubicado el relé constituye el límite superior de la corriente de falla en la línea.

Seleccionar de todas las configuraciones operativas el valor máximo de corriente de falla que observa cada relé para falla en su zona propia. Esto se hace para ajustar el relé de tal forma que ofrezca el menor tiempo para la mayor corriente de falla.

Paso 3: Seleccionar las corrientes de arranque de los relés como $I_{arranque} = K I_{carga}$

K es un factor para cubrir las sobrecargas, el error de medida y las incertidumbres en el pronóstico de demanda. Un valor típico es $K=1.5$

Paso 4: Plantear las ecuaciones de tiempos de operación de los relés para fallas en su zona y en la zona de respaldo

$$t_{ijk} = a * dial_{ij} / (M_{ijk}^n - 1) \quad [\text{segundos}] \quad (1)$$

$$M_{ijk} = I_{falla_j} / x I_{ni} \quad (2)$$

t_{ijk} es el tiempo del relé i que se encuentra en la zona j para un fallo en la zona k. M_{ijk} es el múltiplo de corriente del relé i de la zona j para una falla en k.

Paso 5: Plantear las ecuaciones de desigualdad para los tiempos de margen entre los relés. Para una zona j dada:

$$t_{ijk} - t_{ij'k} \geq t_{margen} \quad (3)$$

Paso 6: Plantear las ecuaciones de desigualdad de los valores mínimos y máximos de dial disponibles en los relés.

El dial de cada relé se considera una función continua con los límites inferior y superior disponibles en el equipo. El límite inferior es la restricción dominante por lo cual se plantean N ecuaciones de desigualdad:

$$dial_{ij} \geq dial_{mínimo} \quad (4)$$

Paso 7: Plantear la función objetivo.

El tiempo de operación de cada relé para falla en su propia zona debe tener el menor tiempo de operación. Por lo tanto, se puede definir la siguiente función a ser minimizada:

$$t_{111} + t_{211} + \dots + t_{N1j} \quad (5)$$

Paso 8: Reescribir las ecuaciones del problema PL:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} & \quad [f] * [x] \\ \text{Sujeto a:} & \quad [A][x] \leq [b] \\ & \quad [A_{eq}][x] = [b_{eq}] \end{aligned}$$

Donde:

x: Vector columna con las incógnitas del problema. $x = [t_{propios}, t_{respaldo}, \text{diales}]^t$

f: Vector fila con los coeficientes de la función objetivo.

A: Matriz de términos ubicados al lado izquierdo de las restricciones de desigualdad.

b: Vector columna de términos ubicados al lado derecho de las restricciones de desigualdad.

A_{eq} : Matriz de términos ubicados al lado izquierdo de las restricciones de igualdad.

b_{eq} : Vector columna de términos ubicados al lado derecho de las restricciones de igualdad.

Existen otras alternativas para definir la función objetivo y las restricciones.

La solución se puede obtener numéricamente con la función "linprog" del toolbox de optimización del software Matlab.

$$b^t = \begin{bmatrix} -0.2 & -0.2 & -0.2 & -0.2 & -0.2 & -0.2 & -0.1 & -0.1 & -0.1 & -0.1 & -0.1 & -0.1 \end{bmatrix}$$

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.28 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.53 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.96 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.57 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -9.94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -4.51 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -13.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1.91 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.28 \end{bmatrix}$$

$$b_{eq}^t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x^* = \begin{bmatrix} t_{111} & t_{211} & t_{222} & t_{122} & t_{133} & t_{231} & t_{132} & t_{221} & t_{113} & t_{123} & t_{212} & t_{233} \\ 0.6197 & 0.8378 & 0.5 & 0.5548 & 0.4530 & 1.0378 & 0.757 & 0.994 & 0.6530 & 1.7006 & 0.7548 & 1.5006 \end{bmatrix}$$

| dial ₁₁ | dial ₂₁ | dial ₁₂ | dial ₂₂ | dial ₁₃ | dial ₂₃ |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0.1448 | 0.3952 | 0.1247 | 0.1000 | 0.1000 | 0.3506 |

Esta solución es un óptimo global.

7. CONCLUSIONES

La coordinación de relés de sobrecorriente de tiempo inverso en sistemas enmallados es un problema de optimización matemática que puede ser planteado como un problema de programación lineal.

Con el método presentado, se puede obtener una solución global óptima para todas las configuraciones operativas del sistema o conocerse que no es posible hallar tal óptimo global, lo que sugiere que debe utilizarse otro tipo de protección para el sistema como, por ejemplo, relés de impedancia.

Este método permite gran flexibilidad en los análisis dado que pueden evaluarse diversas alternativas de tipos de curvas de operación, corrientes de arranque, tipos de relés y adiciones al sistema, simplemente cambiando unos datos y ejecutando de nuevo el programa.

El método presentado está limitado a la utilización de relés modernos con pasos de dial muy cercanos entre sí como para considerar a dial una función continua.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Zapata Carlos J, "Protecciones Eléctricas", UTP, 2003.
- [2] Mejía Germán E, "Coordinación Óptima de Relevadores Direccionales de Sobrecorriente en Sistemas de Potencia", Proyecto de Grado, UTP, 2003.
- [3] Urdaneta A, Nadira R, Pérez L, "Optimal Coordination of Interconnected Power Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, 1988
- [4] Anderson "Protective systems", IEEE Press, 1996.
- [5] Zapata Carlos J. Mejía German E, "Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas radiales utilizando programación lineal", Scientia et Technica No. 22, páginas 31-36.
- [6] Alstom, "PS 431 Time Overcurrent Protection Device", Alstom Energietechnik GmbH, 1999.