

COORDINACIÓN DE RELÉS DE SOBRECORRIENTE USANDO EL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DE PUNTOS INTERIORES

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología matemática de optimización (puntos interiores) para solucionar el problema de coordinación de relés de sobrecorriente direccional de tiempo inverso en sistemas de potencia, cuando se usan como única protección y cuando hacen parte de un esquema de protección combinado con relés de distancia.

PALABRAS CLAVES: Programación Lineal, Protección de Sistemas de Potencia, Método de Puntos Interiores, Relés de Distancia, Relés de Sobrecorriente, Sistemas Eléctricos.

ABSTRACT

This paper presents a mathematical optimization methodology (interior-point) to solve the problem of coordination of inverse-time directional overcurrent relays in power system, when they are used as the unique protection and when they do part of a mixed protection scheme with distance relays.

KEYWORDS: Linear Programming, Power System Protection, Interior Points Method, Distance Relays, Overcurrent Relay, Electric Systems.

NESTOR JULIAN ESTRADA C.

Ingeniero Electricista, M.Sc (C)
Docente catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
nesju32@utp.edu.co

OSCAR GÓMEZ CARMONA

Ingeniero Electricista, M.Sc
Docente auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
jr@utp.edu.co

ALEJANDRO GARCÉS RUIZ

Ingeniero Electricista, M.Sc
Docente auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
alejandrog@ohm.utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La operación de los sistemas eléctricos de potencia debe tener como finalidad, la prestación de un servicio continuo, confiable y de buena calidad a todos los usuarios. Para lograrlo, se deben desarrollar metodologías computacionalmente eficientes que ayuden a garantizar el estado seguro de operación del sistema de potencia y a normalizarlo rápidamente ante un estado de irregularidad. Uno de los aspectos más importantes en la operación de los sistemas eléctricos, es el control eficaz de una falla en el servicio, el cual se logra mediante sistemas de protección que retiren cualquier tipo de fallo lo más rápido posible y sacando el menor número de elementos.

La corriente sufre un incremento en su valor cuando ocurre una falla, por tal razón, es la variable más utilizada en la detección de fallas de cortocircuito. Debido a esta característica, los relés de sobrecorriente son una alternativa técnica y económicamente viable para la protección de sistemas de subtransmisión, distribución o como una protección secundaria de los sistemas de transmisión.

Uno de los problemas asociados con esta clase de protección es la dificultad para realizar los cálculos de sus ajustes. Una gran cantidad de esfuerzos han sido dedicados a la automatización de la solución a este problema, mediante el desarrollo de procedimientos heurísticos que se ejecutan en forma manual o con software comercial, para optimizar la coordinación de las protecciones sin que exista un planteamiento matemático riguroso.

En este artículo, se expone una metodología de optimización que básicamente plantea el proceso de coordinación de relés, como un problema de optimización matemática linealizado y resuelto con programación lineal mediante el método de puntos interiores.

2. PROTECCIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA

El diseño de un sistema de protecciones consiste en seleccionar los ajustes más convenientes de los dispositivos de protección bajo los requerimientos básicos de sensibilidad, selectividad, confiabilidad, velocidad y economía.

Estos requerimientos deben tener en cuenta las diferentes variaciones y configuraciones del sistema bajo las siguientes condiciones:

- a. Diferentes tipos de fallo deben ser detectados por los relés apropiados.
- b. Los relés localizados mas cerca al fallo deben tener prioridad de operación.
- c. Si un relé de protección primaria falla, uno de respaldo debe operar.
- d. La operación del relé debe ser tan rápida como sea posible para prevenir daños en los equipos del sistema.

2.1 Coordinación de relés de sobrecorriente direccional usando programación lineal

La metodología tiene como finalidad encontrar los valores mínimos de DIAL para los relés de tiempo inverso, donde las corrientes de arranque y la relación de transformación son calculadas con anterioridad para encontrar las restricciones de coordinación [1], [2].

Para el caso mostrado en la figura 1, el problema se puede modelar matemáticamente así:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^r Dial_i \\ & S.A. \\ & t_j(F_1) - t_i(F_1) \geq CI \\ & t_j(F_2) - t_i(F_2) \geq CI \end{aligned} \tag{1}$$

donde:

- r : Número de relés.
- $Dial_i$: Dial del relé i .
- $t_j(F1)$: Tiempo de operación del relé j para un fallo en $F1$.
- $t_i(F1)$: Tiempo de operación del relé i para un fallo en $F1$.
- $t_j(F2)$: Tiempo de operación del relé j para un fallo en $F2$.
- $t_i(F2)$: Tiempo de operación del relé i para un fallo en $F2$.
- CI : Intervalo de coordinación.

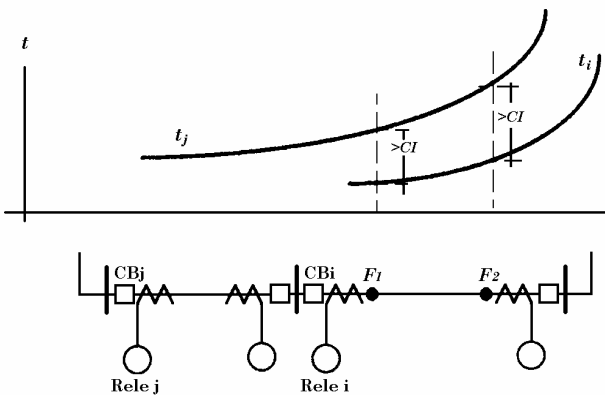


Figura 1. Coordinación de relés de sobrecorriente de tiempo inverso.

$F1$ y $F2$ representan las condiciones de falla cercana y remota y se calculan considerando fallos trifásicos para los relés de fase y fallos monofásicos para los relés de tierra.

La función objetivo es la suma de los DIAL de todos los relés, minimizando los tiempos propios de los relés que es equivalente a minimizar los DIAL. La relación de los tiempos de operación y el dial está dada (según norma IEC) por la siguiente ecuación:

$$t_{ijk} = \frac{a \times Dial_i}{(M_{ijk}^n - 1)} \tag{2}$$

$$M_{ijk} = \frac{Ifalla_{jk}}{Ipk_i} \tag{3}$$

donde :

- t_{ijk} : Tiempo de operación del relé i para un fallo en el punto k ubicado en la zona j .
- M_{ijk} : Múltiplo de la corriente de arranque del relé i para un fallo en el punto k ubicado en la zona j .
- $Ifalla_{jk}$: Corriente de falla en el punto k ubicado en la zona j .
- Ipk_i : Corriente de arranque del relé i .

Reescribiendo la ecuación (2) se obtienen ecuaciones lineales de igualdad para los tiempos de operación de cada relé en términos del Dial:

$$t_{ijk} = K_{ijk} \times Dial_i \tag{4}$$

$$K_{ijk} = \frac{a}{(M_{ijk}^n - 1)} \tag{5}$$

Otras restricciones como los valores permisibles máximos y mínimos para los DIAL pueden ser tratados de la misma manera, donde, el límite inferior es la restricción dominante, por lo tanto se plantean r ecuaciones de desigualdad:

$$Dial_i \geq Dial_{\minimo} \tag{6}$$

Reescribiendo las ecuaciones (1), (4) y (6) se obtiene el modelo de programación lineal (7) para este problema:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^r t_{ii} \\ & S.A. \\ & t_i(F_1) - t_j(F_1) \leq -CI \\ & t_i(F_2) - t_j(F_2) \leq -CI \\ & t_{ijk} - K_{ijk} \times Dial_i = 0 \\ & -Dial_i \leq -Dial_{\minimo} \end{aligned} \tag{7}$$

El problema es llevado a la forma canónica del modelo de programación lineal:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } [f]^* [x] \\ & S.A. \\ & [A][x] \leq [b] \\ & [A_{eq}][x] = [beq] \end{aligned} \tag{8}$$

donde:

X : Es el vector columna con las incógnitas del problema.

$$X = [t_{propios}, t_{respaldo}, Diales]^t$$

f : Es el vector fila con los coeficientes de la función objetivo, en el cual las primeras r posiciones son unos y los restantes son ceros.

A : Es la matriz de términos ubicados al lado izquierdo de las restricciones de desigualdad.

b : Es el vector columna de términos ubicados al lado derecho de las restricciones de desigualdad.

A_{eq} : Es la matriz de términos ubicados al lado izquierdo de las restricciones de igualdad.

beq : Es el vector columna de términos ubicados al lado derecho de las restricciones de igualdad descritas, todos sus términos son cero.

2.2 Coordinación de relés de sobrecorriente direccional en un esquema de protección combinado con relés de distancia usando programación lineal

Los esquemas combinados de protección se utilizan en muchos sistemas de transmisión y subtransmisión donde los relés de distancia son usados como protección principal y los de sobrecorriente direccional como protección de respaldo [3].

Para este tipo de esquema se deben tener en cuenta dos clases de restricciones que son importantes.

Una de las restricciones cita (Fig. 2) que el relé de sobrecorriente b debe ser mas lento que la segunda zona del relé de distancia asociado al interruptor de potencia principal m , es decir:

$$t_b(F_3) - t_{z2m} \geq CI' \tag{9}$$

Donde CI' es un intervalo de coordinación el cual no necesariamente debe ser igual al CI usado en las restricciones de selectividad entre los relés de sobrecorriente direccional. Se observa en la figura 2 que el tiempo de operación del relé de sobrecorriente tb es evaluado en el punto $F3$, donde la segunda zona del relé de distancia empieza.

La otra restricción cita que la segunda zona del relé de distancia asociado al interruptor de potencia de respaldo b debe ser más lento que el relé de sobrecorriente direccional del interruptor de potencia principal m , es decir:

$$t_{z2b} - t_m(F_4) \geq CI' \tag{10}$$

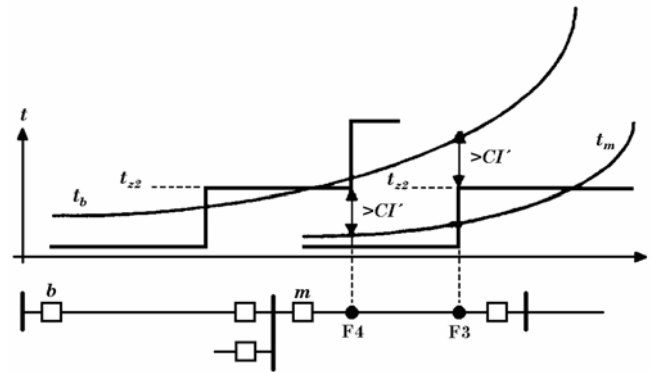


Figura 2. Coordinación entre relés de sobrecorriente direccional y de distancia.

Para esta última restricción, el tiempo de operación del relé de sobrecorriente direccional principal es evaluado en el punto $F4$, el cual corresponde al alcance de la segunda zona del relé de distancia asociado al interruptor de potencia de respaldo.

Si el ajuste de tiempo de la segunda zona t_{z2} es un valor conocido, las restricciones (9) y (10) toman la forma:

$$-t_b(F_3) \leq -CI' - t_{z2m} \tag{11}$$

$$t_m(F_4) \leq t_{z2b} - CI' \tag{12}$$

En otras palabras, t_{z2} contribuye a valores límites para restringir el Dial, además estas restricciones (11) y (12) podrían llevar a soluciones infactibles por lo que el valor de t_{z2} debe ser cambiado dentro de sus valores permisibles hasta que el problema de optimización sea factible.

3. MÉTODO DE PUNTOS INTERIORES

Durante décadas el método simplex ha sido el método de solución de los problemas de programación lineal. Sin embargo, desde el punto de vista teórico, el tiempo de cálculo requerido por este método crece exponencialmente con el tamaño del problema. Para la solución de problemas de gran tamaño, fue necesario desarrollar algoritmos cuyos tiempos de cálculo tuviesen un crecimiento polinomial con el tamaño del problema.

Esta necesidad, originó una nueva clase de algoritmos denominados de Puntos Interiores para programación lineal. Éstos ofrecen una alternativa drásticamente diferente al Algoritmo del Simplex.

Una de las diferencias más importantes entre estos algoritmos es que, dada la región factible definida por la intersección de todas las restricciones del problema de programación lineal, los algoritmos de Puntos Interiores, realiza la búsqueda de la solución óptima a través del interior de la región factible.

En 1984, Karmarkar propuso un algoritmo de Puntos Interiores cuya complejidad computacional es polinomial y que resultó altamente competitivo frente al método simplex, este algoritmo originó multitud de trabajos alrededor de su idea, la cual ha sido mejorada en muchos aspectos. Una de las más fructíferas variantes es el algoritmo de barrera logarítmica Primal-Dual [4].

3.1 Método de barrera logarítmica primal-dual

Este método resuelve el problema de PL primal estándar:

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x \\ \text{s.a} \quad & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{13}$$

donde x es el vector de variables primales y su problema dual estándar en función del vector de variables duales e incluyendo el vector de variables de holgura z es:

$$\begin{aligned} \min \quad & b^T y \\ \text{s.a} \quad & A^T y + z = c \\ & z \geq 0 \end{aligned} \tag{14}$$

Se utiliza la función de barrera logarítmica para penalizar las restricciones de desigualdad $z \geq 0$.

$$\begin{aligned} \max \quad & b^T y + \mu^k \sum_{i=1}^n \ln z_i \\ \text{s.a} \quad & A^T y + z = c \end{aligned} \tag{15}$$

donde μ^k es el parámetro de barrera en la iteración k y debe ser disminuido a cero durante el proceso iterativo.

El algoritmo general de solución es el siguiente: [5]

1. Calcular un punto inicial.

Vector primal:

$$x^o = \eta \hat{x} \tag{16}$$

donde:

$$\eta = \frac{\|b\|_2 + 1}{\|A\hat{x}\|_2 + 1} \quad \text{y} \quad \hat{x}_j = \frac{1}{\|A_j\|_2 + 1} \tag{17}$$

Vector dual.

$$z^o = \begin{cases} si \quad c_j < 1, & z_j^o = 1 \\ \text{caso contrario,} & z_j^o = c_j \end{cases}$$

2. Calcular el parámetro de barrera y hacer $k = 0$.

$$\mu^o = \frac{(x^o)^T z^o}{n} \tag{18}$$

donde n es el número de variables primales.

3. Verificar convergencia.

Factibilidad primal:

$$\frac{\|Ax^k - b\|}{1 + \|x^k\|} \leq \varepsilon_f \tag{19}$$

Factibilidad dual:

$$\frac{\|A^T y^k + z^k - c\|}{1 + \|y^k\| + \|z^k\|} \leq \varepsilon_f \tag{20}$$

Condición de optimalidad:

$$\frac{\|c^T x^k - b^T y^k\|}{1 + \|b^T y^k\|} \leq \varepsilon_o \tag{21}$$

donde ε_f es el error de factibilidad y ε_o es el error de optimalidad.

En caso de que los criterios de convergencia se cumplan pare.

4. Calcular los errores para el punto actual.

$$r_p^k = c - A^T y^k - z^k \tag{22}$$

$$r_d^k = b - Ax^k \tag{23}$$

$$r_c^k = \mu^k e - X^T Z^k e \tag{24}$$

donde:

$$X = \text{diag}[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$$

$$Z = \text{diag}[z_1 \ z_2 \ \dots \ z_n]$$

$$e = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$$

5. Obtener las direcciones de búsqueda.

$$\Delta x^k = \Delta x_{ctr}^k + \Delta x_{obj}^k + \Delta x_{fac}^k \tag{25}$$

$$\text{Central} \quad \Delta x_{ctr}^k = \mu^k D_k^{-1} P^k D_k^{-1} (X^k) e \tag{26}$$

$$\text{Objetivo} \quad \Delta x_{obj}^k = D_k^{-1} P^k D_k^{-1} c \tag{27}$$

$$\text{Factible} \quad \Delta x_{fac}^k = D_k^{-2} A^T (AD_k^{-2} A^T)^{-1} r_p^k \tag{28}$$

$$\Delta y^k = (AD_k^{-2} A^T)^{-1} [AD_k^{-2} r_d^k - A(Z^k)^{-1} r_c^k + r_p^k] \quad (29)$$

$$\Delta z^k = r_d^k - A^T \Delta y^k \quad (30)$$

donde:

$$P^k = I - D_k^{-1} A^T (AD_k^{-2} A^T)^{-1} AD_k^{-1} \quad (31)$$

$$D_k^{-2} = (z^k)^{-1} x^k \quad (32)$$

6. Calcular los tamaños de los pasos para las variables primal y dual.

$$\alpha_p^k = \min \left\{ 1, \min_{\Delta x_i^k < 0} \left\{ \frac{-x_i^k}{\Delta x_i^k} : i = 1, \dots, n \right\} \right\} \quad (33)$$

$$\alpha_d^k = \min \left\{ 1, \min_{\Delta z_i^k < 0} \left\{ \frac{-z_i^k}{\Delta z_i^k} : i = 1, \dots, n \right\} \right\} \quad (34)$$

7. Actualizar las variables Primal y Dual:

$$x^{k+1} = x^k + \gamma \alpha_p^k \Delta x^k \quad (35)$$

$$y^{k+1} = y^k + \gamma \alpha_d^k \Delta y^k \quad (36)$$

$$z^{k+1} = z^k + \gamma \alpha_d^k \Delta z^k \quad (37)$$

donde γ es un factor de seguridad que está entre 0.95 y 0.99995.

8. Reducir el parámetro de barrera:

$$\mu^{k+1} = \sigma^k \frac{(z^k)^T x^k}{n} \quad (38)$$

9. Volver al paso 3.

4. SISTEMA DE PRUEBA Y RESULTADOS

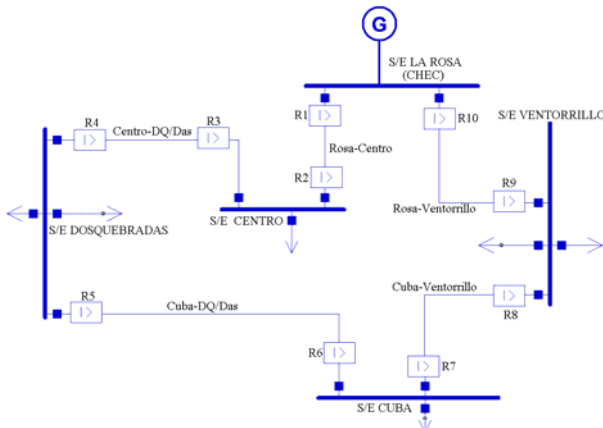


Figura 3. Diagrama unifilar anillo de 33 KV Pereira-Risaralda.

Para probar la metodología desarrollada en este trabajo, se realizó la coordinación de los relés de fase del anillo de 33 kV del sistema de subtransmisión de la ciudad de Pereira-Risaralda usando relés de sobrecorriente y un esquema combinado de protección con sobrecorriente-distancia. El sistema de Pereira cuenta con relés de sobrecorriente direccionales 7SJ5125 y relés de distancia 7SA5115 marca Siemens.

Los transformadores de corriente son de relación 600/5 y los transformadores de potencial son de relación 33000/115. En la tabla 1 se muestran los valores de corrientes obtenidos después de hacer los estudios de cortocircuito y contingencias.

| Relé | I _{cargamáxima} [A] | I _{cemáxima} local [A] | I _{cemáxima} remota [A] | I _{ceminima} [A] |
|-----------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| R ₁ | 419.01 | 15205.6 | 6254.1 | 1788.6 |
| R ₂ | 0 | 5477.8 | 2877.9 | 875 |
| R ₃ | 215.19 | 6254.1 | 3124.9 | 180.36 |
| R ₄ | 246.83 | 13036.4 | 5477.8 | 1952.4 |
| R ₅ | 391.7 | 11426.5 | 4350.7 | 1478.4 |
| R ₆ | 303.81 | 10111.3 | 4180.9 | 713 |
| R ₇ | 402.24 | 12387.2 | 3403.7 | 1103.9 |
| R ₈ | 195.89 | 6501.4 | 2226 | 406.8 |
| R ₉ | 0 | 3798.9 | 2177.5 | 318.2 |
| R ₁₀ | 573.14 | 15573 | 6109.1 | 2176.8 |

Tabla 1. Corrientes de ajuste para los relés de sobrecorriente

Para la coordinación, se utilizó un intervalo de coordinación entre relés de sobrecorriente (CI) y entre relés de sobrecorriente y distancia (CI') de 0.2 s. El factor de sobrecarga se fijó en 1.5. La corriente de arranque de los relés de sobrecorriente debe ser calculada previamente, así como el alcance ohmico de los relés de distancia.

Usando el método de puntos interiores (Método de Barrera Logarítmica Primal-Dual), con un error de factibilidad ϵ_f de 1×10^{-10} , un error de optimalidad ϵ_o de 1×10^{-10} y un factor de seguridad γ de 0.99995 se realizó la coordinación de sistema mostrado en la figura 3.

En la tabla 2 se muestra los resultados obtenidos al coordinar el sistema considerando solo relés de sobrecorriente direccionales, mientras en la tabla 3 se muestran los resultados para la coordinación de un esquema combinado con relés de distancia, las iteraciones realizadas fueron 5 y 8 respectivamente. El dial fue considerado como una variable continua por lo cual debe ser ajustado de acuerdo a los valores disponibles en los relés utilizados. Los relés de distancia fueron ajustados para proteger dos zonas, la zona 1 se ajustó para el 80% de la línea protegida y con un tiempo de operación de 0.01 s; la zonas 2 se ajustó al 100% de la línea protegida más el 50% de la siguiente línea y con un tiempo de operación de 0.5 s.

| Relé | I de arranque | | t de operación para fallo local | | Dial |
|------|---------------|---------------|---------------------------------|----------|--------|
| | XIn | [A] primarios | Propio | Respaldo | |
| R1 | 1.05 | 630 | 0.4856 | 0.6796 | 0.2280 |
| R2 | 0.3 | 180 | 0.5229 | 0.6486 | 0.2641 |
| R3 | 0.54 | 324 | 0.4796 | 0.6308 | 0.2089 |
| R4 | 0.62 | 372 | 0.5419 | 0.7229 | 0.2854 |
| R5 | 0.98 | 588 | 0.4308 | 0.6449 | 0.1881 |
| R6 | 0.76 | 456 | 0.5258 | 0.7419 | 0.2401 |
| R7 | 1.01 | 606 | 0.4449 | 0.7881 | 0.1977 |
| R8 | 0.49 | 294 | 0.4694 | 0.7258 | 0.2142 |
| R9 | 0.11 | 66 | 0.5881 | 0.6856 | 0.3547 |
| R10 | 1.44 | 864 | 0.4486 | 0.6694 | 0.1908 |

Tabla 2. Resultados para el caso de prueba

| Relé | I de arranque | | t de operación para fallo local | | Dial |
|------|---------------|---------------|---------------------------------|----------|--------|
| | XIn | [A] primarios | Propio | Respaldo | |
| R1 | 1.05 | 630 | 0.1621 | 0.4200 | 0.2778 |
| R2 | 0.3 | 180 | 0.1638 | 0.3217 | 0.3572 |
| R3 | 0.54 | 324 | 0.1431 | 0.3029 | 0.1940 |
| R4 | 0.62 | 372 | 0.1702 | 0.4221 | 0.4292 |
| R5 | 0.98 | 588 | 0.1029 | 0.2965 | 0.1406 |
| R6 | 0.76 | 456 | 0.1428 | 0.3702 | 0.2240 |
| R7 | 1.01 | 606 | 0.0965 | 0.4065 | 0.1390 |
| R8 | 0.49 | 294 | 0.1067 | 0.3428 | 0.1669 |
| R9 | 0.11 | 66 | 0.2048 | 0.3621 | 0.8580 |
| R10 | 1.44 | 864 | 0.1094 | 0.3067 | 0.1379 |

Tabla 3. Tiempos de operación de los relés

5. CONCLUSIONES

Los tiempos de operación de los relés en el sistema de prueba, cuando se coordina utilizando únicamente relés de sobrecorriente direccionales, son mejorados al implementar el esquema combinado con relés de distancia.

Cuando se coordinan relés de sobrecorriente en esquema combinado con distancia, las restricciones impuestas por éstos últimos contribuyen a valores límites para restringir el dial y éstas pueden llevar a soluciones infactibles. En trabajos futuros se propone incluir los tiempos de operación de la segunda zona de los relés de distancia como una de las variables del problema para encontrar su valor óptimo.

El método de puntos interiores muestra ser una herramienta computacionalmente eficiente para la coordinación de relés de sobrecorriente direccional de tiempo inverso en sistemas de potencia, cuando se usan como única protección y cuando hacen parte de un esquema de protección combinado con relés de distancia.

Dada la característica del problema (gran cantidad de

restricciones), el método de puntos interiores, se convierte en una técnica de solución apropiada debido a que el proceso de búsqueda no requiere la evaluación de un número excesivo de puntos extremos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] PEREZ, L.G.; URDANETA, A.J.. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Definite Time Backup Relaying. En: IEEE Power Engineering Review. Vol 14, No. 4 (Julio 1998); p.1276-1284.
- [2] URDANETA, A.J.; PEREZ, L.G and NADIRA,Ramon. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems. En: IEEE Transactions On Power Delivery. Vol 3, No. 3 (Jul. 1988); p.903-909.
- [3] URDANETA, A. J.; Pérez, L. G. y Restrepo, H. Optimal Computation of Distance Relays Second Zone Timing in a Mixed Protection Scheme with Directional Overcurrent Relays. En: IEEE Transactions On Power Delivery. Vol 16, No. 3 (Julio 2001); p.385-388
- [4] CASTILLO, Enrique; Conejo Antonio, Pedregal Pablo, García Ricardo, Alguacil Natalia. Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia. Febrero, 2002.
- [5] RIDER, Marcos J. Método de Puntos Interiores para Optimización en Sistemas de Potencia. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira 2004.
- [6] S.J. WRIGHT, Primal-Dual Interior Point Methods. SIAM, Philadelphia, PA, 1997.
- [7] S. MEHROTRA, "On the implementation of a primal-dual interior point method", SIAM Journal on optimization, 1992.
- [8] QUINTANA, V.H., Torres G.L. and Medina Palomo J., "Interior point methods and their applications to power systems: A classification of publications and software codes", IEEE transactions Power Systems, vol 15, No. 1, Febrero 2000.
- [9] ZAPATA, Carlos J. Mejía, German E, "Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas enmallados utilizando programación lineal", Scientia et Technica No. 23, Diciembre de 2003.
- [10] ESTRADA, Nestor Julian. Naranjo, Jorge Andres. "Coordinación Óptima de Relevadores de Sobrecorriente Direccionales y de Distancia en Sistemas de Potencia Anillados". Proyecto de Grado. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira 2005.