

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROCESO ADAPTATIVO DE LAS
FUNCIONES DE OPERACIÓN DE LOS
RELEVADORES DE PROTECCION

POR

JADE MELISSA VALDEZ GÓMEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

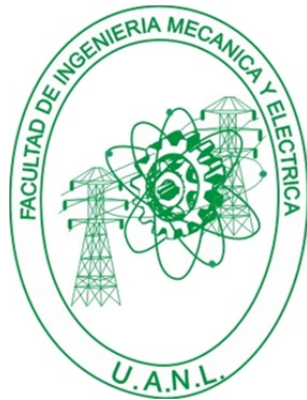
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

DICIEMBRE 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROCESO ADAPTATIVO DE LAS
FUNCIONES DE OPERACIÓN DE LOS
RELEVADORES DE PROTECCION

POR

JADE MELISSA VALDEZ GÓMEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

DICIEMBRE 2012

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Proceso adaptativo de las funciones de operación de los relevadores de protección de sistemas electricos de potencia», realizada por el alumno Jade Melissa Valdez Gómez, con número de matrícula 1209563, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

Dr. Óscar L. Chacón Mondragón

Asesor

Dr. Ernesto Vázquez Martínez

Revisor

Dr. Igor S. Litvinchev

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, diciembre 2012

A mis padres.

A Jaden.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Agradecimientos | XI |
| Resumen | XIII |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Justificación del problema | 2 |
| 1.2. Objetivo | 2 |
| 1.3. Hipótesis | 3 |
| 1.4. Estructura de la tesis | 3 |
| 2. Antecedentes | 4 |
| 2.1. Protección de sistemas eléctricos de potencia | 4 |
| 2.1.1. Protección por relevadores | 5 |
| 2.1.2. Principio de operación del relevador de sobrecorriente | 5 |
| 2.1.3. Análisis de la operación del relevador | 6 |
| 2.1.4. Protección primaria y de respaldo | 8 |
| 2.2. Coordinación de protecciones de sobrecorriente | 8 |
| 2.2.1. Discriminación por tiempo | 8 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.2. Discriminación por corriente | 9 |
| 2.2.3. Discriminación por tiempo y corriente | 9 |
| 3. Análisis de las funciones de operación de los relevadores | 11 |
| 3.1. Introducción | 11 |
| 3.2. Función de operación de los relevadores | 11 |
| 3.3. Diferencia de tiempos de operación $T_2 - T_1$ | 14 |
| 3.4. Condiciones restrictivas en la diferencia de tiempos de operación . . . | 15 |
| 3.5. Ajuste del parámetro A_2 en función de la corriente de corto circuito I_{cc} | 18 |
| 4. Planteamiento y formulación del problema | 20 |
| 4.1. Consideraciones del modelo | 21 |
| 4.2. Formulación matemática | 22 |
| 4.2.1. Notación | 23 |
| 5. Metodología de solución | 32 |
| 5.1. Procedimiento de evaluación | 33 |
| 5.2. Ejemplo | 35 |
| 6. Estudio computacional | 40 |
| 6.1. Tamaño de instancia | 40 |
| 6.1.1. Asignación de valores a los parámetros | 42 |
| 6.2. Resultados obtenidos | 43 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.3. Comparación de resultados obtenidos con el programa de simulación skm | 45 |
| 7. Conclusiones y trabajo futuro | 48 |
| 7.1. Conclusiones | 48 |
| 7.2. Trabajo futuro | 49 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Discriminación por tiempo | 8 |
| 2.2. Curvas características de protecciones de sobrecorriente. | 10 |
| 3.1. Función de operación | 13 |
| 3.2. Estado 1 en la ecuación (3.3). | 15 |
| 3.3. Estado 2 de la ecuación (3.13). | 17 |
| 4.1. Diagrama general de un sistema radial de potencia eléctrica | 22 |
| 4.2. Función de tiempo de operación de un relevador. | 23 |
| 4.3. Función de tiempo de operación del relevador i | 24 |
| 4.4. Tiempo de operación de la coordinación de protección de relevadores. | 25 |
| 4.5. Cordinación de respaldo por R2 | 26 |
| 4.6. Coordinación de respaldo por R3 | 28 |
| 4.7. Generalización de las funciones de tiempo de operación de relevadores para coordinación. | 30 |
| 5.1. Productora de papel | 35 |
| 6.1. Diagrama unifilar | 41 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2. Funciones de operación determinadas con código GAMS. | 45 |
| 6.3. Funciones de operación determinadas con solver SKM. | 45 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Constantes y exponentes para las características de operación de acuerdo a la norma IEEE Std. C37.112-1996 | 7 |
| 4.1. Corrientes de arranque y falla asociadas a las protecciones primarias y de respaldo. | 25 |
| 5.1. Resultados de las variables | 39 |
| 6.1. Resultados de las variables | 43 |
| 6.2. Resultados obtenidos. | 44 |
| 6.3. Datos comparativos entre GAMS y el programa de simulación SKM. . | 47 |

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis:

A mis padres Amelia Gómez Flores y Simón Valdez Mondragón, por ayudarme incondicionalmente en cada momento de mi vida.

Agradezco especialmente al Dr. Oscar Leonel Chacón Mondragón, tutor de este trabajo, el cual me guió en cada etapa de este proyecto. Gracias por su gran paciencia, por sus valiosos consejos y por todo el tiempo invertido en cada corrección.

A todos mis compañeros de PISIS (Leonardo, Oliver, Minerva, Alondra, Cristian, Tania, Bruno, Yajaira, Vanesa, Omar y Lucero) por haberme ayudado con sus conocimientos, aportando ideas y soluciones.

Al Dr. Arturo Conde Enríquez por todos los conocimientos que me brindó en el campo eléctrico.

Al Dr. Ernesto Vazquez Martínez y al Dr. Igor S. Litvinchev, miembros del comité de tesis, por aportar ideas y contribuir con la revisión de este trabajo.

A todos los profesores de Posgrado de Ingeniería en Sistemas que me formaron a lo largo de la maestría.

A Guillermo Mier Escurra y Domingo Zuñiga por disiparme todas mis dudas en el área de las protecciones eléctricas y ayudarme en la realización experimental de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme una beca para la realización de la maestría

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo financiero otorgado para la realización de mis estudios.

RESUMEN

Jade Melissa Valdez Gómez.

Candidato para el grado de Maestría en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

PROCESO ADAPTATIVO DE LAS FUNCIONES DE OPERACIÓN DE LOS RELEVADORES DE PROTECCION

Número de páginas: 51.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo de esta tesis consiste en estudiar un problema sobre el diseño óptimo de las funciones de operación de los relevadores de protección en sistemas eléctricos de potencia. Se deben determinar los valores de los parámetros de las funciones de operación, proponiendo un método de solución basado en optimización.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La contribución de este trabajo se centra en el estudio realizado sobre el diseño óptimo de las funciones de operación de los relevadores de protección en sistemas eléctricos radiales de potencia, dado que la revisión de la literatura mostró que no existen trabajos que aborden problemas con características similares a las que se plantean en este trabajo.

El problema se modela como un problema de programación no lineal (NLP). Se formuló un modelo matemático en correspondencia con la alternativa de solución propuesta.

La implementación y desarrollo computacional del método de solución se realizó mediante GAMS. Los experimentos computacionales mostraron una buena solución al compararlos con SKM (software comercial utilizado para realizar los estudios de coordinación de las protecciones eléctricas).

Firma del asesor: _____

Dr. Óscar L. Chacón Mondragón

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La electricidad se utiliza en todos los aspectos de nuestra vida: hogar, comunicaciones, transporte, comercio y la industria, por mencionar algunos. Es por eso que es de vital importancia mantener la continuidad del sistema eléctrico.

La pérdida de energía, caídas de tensión y sobretensiones se producirán porque es imposible evitar las consecuencias de los fenómenos naturales, accidentes físicos o mal funcionamiento debido a un error humano. Por lo tanto el objetivo fundamental del sistema de protección es reducir al mínimo las posibilidades de daño, el tiempo de interrupción y los problemas relacionados que puedan resultar al presentarse una falla en el sistema eléctrico de potencia.

La protección por relevadores es una parte vital del sistema eléctrico de potencia. El IEEE define a un relevador como “un dispositivo cuya función es detectar fallas u otras condiciones del sistema de potencia de naturaleza anormal o peligrosa e iniciar la acción de control apropiada” [7, p.439]

La correcta aplicación de protección inicia con la desconexión de la zona en problemas, mientras que la operación y servicio en el resto del sistema continúa.

En este trabajo nos centraremos en el diseño de las funciones de operación de los relevadores de sobrecorriente en sistemas de potencia radiales.

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El sistema eléctrico de potencia debe estar diseñado y operado para generar y suministrar la energía eléctrica a los consumidores, evitando cortes de energía frecuentes o prolongados, que no afecten la rutina normal de la sociedad.[9]

Los altos costos que genera el remplazar o reparar un equipo dañado debido a una protección insuficiente o inadecuada, así como los accidentes que se pueden ser ocasionados afectando la vida de seres humanos, hacen que el sistema de protección sea un compromiso.

La provisión de una protección adecuada para detectar y desconectar elementos del sistema de potencia en los eventos de una falla, es por lo tanto una parte integral en el diseño del sistema de potencia.

En esta tesis nos enfocaremos en el diseño de las funciones de operación de los relevadores de sobrecorriente en sistemas radiales minimizando el tiempo de operación con el propósito de reducir el daño a los equipos debido a una falla.

1.2 OBJETIVO

El objetivo principal de esta tesis consiste en estudiar un problema sobre el diseño óptimo de la coordinación de operación de relés de sobrecorriente encontrando los valores de los parámetros de las funciones de operación, así como los tiempos de operación y proponer un método de solución basado en optimización.

1.3 HIPÓTESIS

Es posible desarrollar un código en lenguaje de programación GAMS que permita obtener las características de operación de los relevadores para realizar su coordinación en sistemas eléctricos radiales, considerando su respuesta dinámica.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el primer capítulo se presenta una descripción del proyecto de tesis. En el segundo capítulo se describe el funcionamiento de los relevadores de sobre-corriente y los métodos empleados para la coordinación de estos. En el tercer capítulo se realiza un análisis de las funciones de operación de los relevadores. En el cuarto capítulo se mencionan las consideraciones del modelo, la formulación matemática y un análisis del modelo matemático. En el quinto capítulo se describe la metodología de solución del problema. En el sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos y se describe la comparación contra un programa de simulación utilizado para la coordinación de relevadores. Finalmente el capítulo siete contiene las conclusiones y el trabajo futuro.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Mantener la continuidad en el sistema eléctrico es de vital importancia ya que una falla en el sistema ocasiona pérdidas económicas al detener la producción, daños a los equipos y en el peor de los casos pérdidas humanas; es por eso que éste debe contar con un sistema de protección que reduzca al mínimo los daños, ya que no se puede estar exento a las consecuencias de destrucción de los fenómenos naturales, accidentes físicos o mal funcionamiento debido a un error humano.

2.1 PROTECCIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) “es un sistema interconectado mediante el cual nos es posible generar la energía, transportarla y distribuirla a todos los usuarios en forma eficaz, segura y con calidad” [5, p.3].

Al producirse una falla se alcanzan valores inadecuados en el SEP, los cuales pueden producir daños materiales y físicos, por eso es de gran importancia tener un sistema de protección adecuado que afecte al mínimo la integridad del sistema.

2.1.1 PROTECCIÓN POR RELEVADORES

El IEEE define a un relevador como “un dispositivo cuya función es detectar fallas u otras condiciones del sistema de potencia de naturaleza anormal o peligrosa e iniciar la acción de control apropiada” [7, p.439]

Los componentes del sistema de protección tienen los siguientes criterios de diseño [7]

- **Confiabilidad:** operan en forma adecuada cuando ocurren las condiciones de falla, aun después de permanecer inactivos durante meses o años. Si esto no fuera así, se producirían daños costosos.
- **Selectividad:** evitan los disparos falsos, innecesarios.
- **Velocidad:** operan con rapidez para reducir la duración de la falla y el daño del equipo. Cualquier retraso intencional debe ser preciso.
- **Economía:** proveen la máxima protección al menor costo.
- **Simplicidad:** reducen el equipo de protección y la cantidad de circuitos.

2.1.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE

El relevador de sobrecorriente de tiempo opera en base a corriente, generando una curva inversa de tiempo-corriente por medio de la integración de una función de corriente $F(I)$ con respecto al tiempo. Cuando la función $F(I)$ es positiva se encuentra por encima de un determinado punto de corriente de entrada llamada corriente de arranque y cuando es negativa se encuentra debajo de ese punto. La corriente de arranque es el valor en el cual comienza la operación temporizada del relé [1]

Para el relevador de inducción la función de corriente $F(I)$ es la velocidad del disco que produce la característica de tiempo inverso. La velocidad es positiva por encima de la corriente de arranque y negativa por debajo de este punto. El predefinido conjunto de valores positivos de la integral representan el desplazamiento del disco necesario para producir el disparo.

La norma IEEE Std c37.112-1996 define una ecuación para la región de disparo con las características tiempo-corriente y una región de reposición, derivadas de una ecuación diferencial de entrada dependiente del retraso del tiempo tal como se aplica en los relevadores de inducción.

2.1.3 ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DEL RELEVADOR

Las ecuaciones (2.1) y (2.2) definen las características de operación del tiempo de reposición y del tiempo de operación de los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso. Al variar las constantes de las ecuaciones se pueden definir distintos tipos de curvas con precisión [1].

Para $0 < M < 1$

$$t(I) = \left[\frac{t_r}{M^n - 1} \right] Dial \quad (2.1)$$

Para $M > 1$

$$t(I) = \left[\frac{A}{M^n - 1} + B \right] Dial \quad (2.2)$$

donde :

$t(I)$ Tiempo de reposición en la ecuación (2.1).

M Es la relación entre la corriente de falla y corriente de arranque
($I_{falla}/I_{arranque}$).

A, B, n Son constantes para definir el tipo de curva. A y n representan el grado de inversión y B es la componente de la saturación del núcleo en los relevadores de inducción.

$t(t_r)$ Tiempo de reposición para $M = 0$.

dial Parámetro que indica la escala de tiempo-corriente de la función de operación.

El dial es el control que determina la escala de tiempo de la curva tiempo-corriente que es producida por el relé. En los relevadores de inducción es la distancia del desplazamiento que realiza el disco, la cual es la integral de la velocidad con respecto al tiempo. El dial generalmente tiene un rango de ajuste de 0.5 a 15, en las ecuaciones (2.1) y (2.2) las constantes varían proporcionalmente con el dial.

Las constantes y exponentes de la tabla (2.1) definen el tipo de la curva, la cual puede ser moderadamente inversa, muy inversa y extremadamente inversa. La constante t_r define la curva de reposición.

| Curva | A | B | n | t_r |
|------------------------|--------|--------|-------|-------|
| Moderadamente inversa | 0.0515 | 0.1140 | 0.020 | 4.85 |
| Muy inversa | 19.61 | 0.491 | 2.0 | 21.6 |
| Extremadamente inversa | 28.2 | 0.1217 | 2.0 | 29.1 |

Tabla 2.1: Constantes y exponentes para las características de operación de acuerdo a la norma IEEE Std. C37.112-1996

2.1.4 PROTECCIÓN PRIMARIA Y DE RESPALDO

Para que un sistema sea confiable es necesario emplear más de un sistema operando en paralelo.

Considerando solo relés de protección contra cortocircuitos existen dos grupos: la protección primaria y la de respaldo[6].

Las protecciones primarias son aquellas que tienen la función de liberar la falla en primer instancia con el mínimo número de elementos[8].

Las protecciones de respaldo deben operar solamente en caso de que la protección primaria no funcione.

Las protecciones primarias y de respaldo deben estar bien coordinadas de tal manera que las de respaldo cuenten con un tiempo de operación mas largo, para dar lugar a que las protecciones primarias operen primero.

2.2 COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE

Existen varios métodos para lograr una buena coordinación; se emplea la corriente, el tiempo o la combinación de ambos, todos con la finalidad de brindarle una protección al sistema, aislando solamente las secciones que sean necesarias.

2.2.1 DISCRIMINACIÓN POR TIEMPO

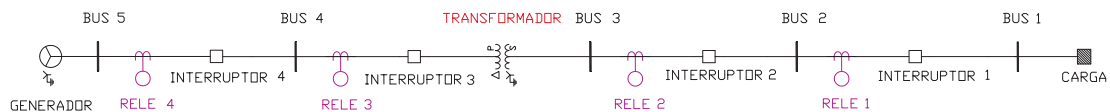


Figura 2.1: Discriminación por tiempo

En este método, se le asigna a cada rele un ajuste de tiempo, asegurándose de que el interruptor mas cercano a la falla opere en primer lugar [3, p.9-2].

Se debe satisfacer la restricción de que el tiempo de operación del primer interruptor sea menor que el tiempo de operación del segundo interruptor y así sucesivamente ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$) contemplando que la diferencia entre un tiempo y otro sea suficiente para asegurar que el rele posterior no opere antes que el interruptor haya disparado, aislado la zona en donde ocurrió la falla.

La principal desventaja de este método es que el tiempo de disparo es mayor para las fallas que se encuentran cerca de la fuente en donde el nivel de corto es más alto.

2.2.2 DISCRIMINACIÓN POR CORRIENTE

Para este método los relevadores se ajustan para operar a una corriente determinada, en la que solamente el relé inmediato a la falla accione su interruptor dejando protegido el sistema.

La corriente varia con la posición de la falla debido a los valores de impedancia entre la fuente y la falla. Cuando la distancia entre un bus y otro es de pocos metros el cambio de la corriente de falla es mínima, lo que dificulta distinguir la zona de la falla [3, p.9-2].

Es útil emplear la discriminación por corriente solo cuando se tiene impedancias considerables entre la ubicación de un relé y otro.

2.2.3 DISCRIMINACIÓN POR TIEMPO Y CORRIENTE

Debido a la desventaja que presentaban los métodos anteriores surgió la combinación de ambos en el cual la característica de operación del relé esta en función del tiempo y de la corriente como se muestra en la figura 2.2 [3, p.9-3].

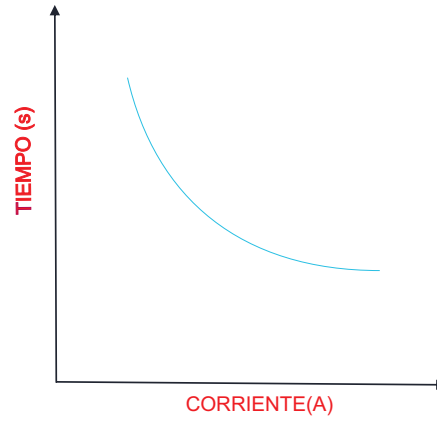


Figura 2.2: Curvas características de protecciones de sobrecorriente.

La característica de tiempo de operación del relé es inversamente proporcional al nivel de la corriente.

Entre más cerca se está de la fuente, los niveles de corriente de falla serán más elevados y el tiempo de operación del relevador será menor.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LAS FUNCIONES DE OPERACIÓN DE LOS RELEVADORES

3.1 INTRODUCCIÓN

En la coordinación de protecciones para sistemas radiales, es importante establecer el análisis de la operación de los relevadores dentro de las condiciones pre-establecidas de los tiempos de respuesta, dictadas por las funciones de operación de los mismos, en su tiempo de operación como protección primaria y el tiempo de retardo como protección de respaldo.

3.2 FUNCIÓN DE OPERACIÓN DE LOS RELEVADORES

Se considera en el estudio de la coordinación de protecciones en sistemas de potencia radiales, las funciones de operación de tiempo inverso deben ser analizadas como funciones de protección primaria y protección de respaldo para el mismo relevador.

La función de operación de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso se describe como:

$$T = \left[\frac{A}{\left(\frac{I_{cc}}{I_a}\right)^n - 1} + B \right] dial \quad (3.1)$$

donde :

T : Tiempo de operación del relevador.

I_{cc} : Corriente de falla ó cortocircuito, Amp.

I_a : Corriente de arranque, Amp.

A, B, n : Constantes que definen el tipo de curva.

$dial$: Parámetro que indica la escala de tiempo-corriente de la función de operación.

Considerando la corriente de corto circuito I_{cc} como una fracción $(1 + kp)$ de la corriente máxima I_m ; esto es

$$I_{cc} = (1 + kp)I_m; \quad k = 1, \dots, K; \quad p \in (0, 1]; \quad I_m = \text{máx}\{I_{a1}, I_{a2}\} \quad (3.2)$$

entonces, la protección primaria está especificada por la función

$$T_1 = \left[\frac{A_1}{(1 + kp)^{n_1} \left(\frac{I_m}{I_{a1}}\right)^{n_1} - 1} + B_1 \right] dial_1 \quad (3.3)$$

y de igual manera para la función de operación de respaldo se tiene que

$$T_2 = \left[\frac{A_2}{(1 + kp)^{n_2} \left(\frac{I_m}{I_{a2}}\right)^{n_2} - 1} + B_2 \right] dial_2 \quad (3.4)$$

El compartimiento de la ecuación (3.1) es:

$$T \rightarrow +\infty \quad \text{cuando} \quad I_{cc} \rightarrow I_a^{\leftarrow} \quad (\text{por el lado derecho})$$

$$T \rightarrow -\infty \quad \text{cuando} \quad I_{cc} \rightarrow I_a^{\rightarrow} \quad (\text{por el lado izquierdo})$$

Así la función de operación (3.1) se puede representar con dos funciones inversas asintotas al valor de la corriente de arranque (I_a) como se muestra en la Fig. 3.1. De esta forma, el tiempo de operación de cualquier relevador T_i para la condición $I_{cc} \rightarrow \infty$ es :

$$T_i \rightarrow \tilde{T}_i = B_i \text{dial}_i$$

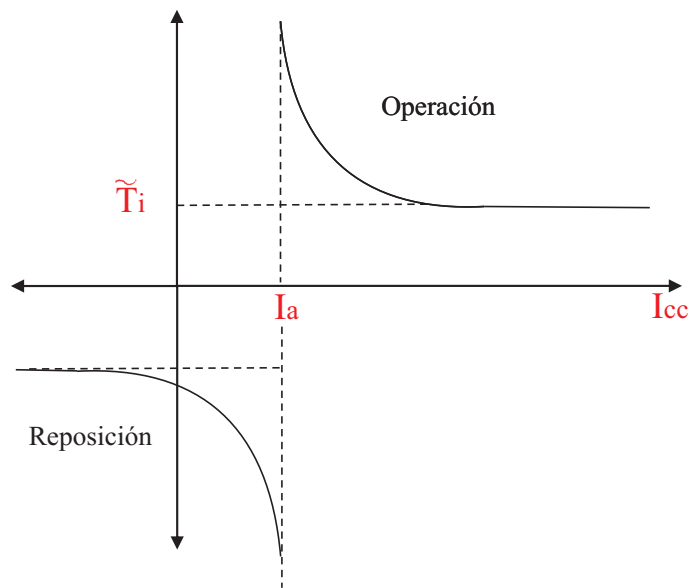


Figura 3.1: Función de operación

3.3 DIFERENCIA DE TIEMPOS DE OPERACIÓN $T_2 - T_1$

Al condicionar que $T_2 \geq T_1 + \theta$, donde θ en la práctica toma valores iguales o superiores a 0.2 segundos, se tiene que para valores de corriente de falla muy grandes $\tilde{T}_2 = \tilde{T}_1 + \theta$.

$$B_2 dial_2 = B_1 dial_1 + \theta \quad (3.5)$$

por consiguiente

$$dial_2 = \frac{B_1}{B_2} dial_1 + \frac{\theta}{B_2} \quad (3.6)$$

o bien

$$dial_2 = \left(\frac{B_1}{B_2} + \frac{\theta}{B_2 dial_1} \right) dial_1 \quad (3.7)$$

Si hacemos

$$R = \frac{B_1}{B_2} + \frac{\theta}{B_2 dial_1} \quad (3.8)$$

entonces

$$dial_2 = R dial_1 \quad (3.9)$$

Como I_{cc} está definido en (3.3) por el contador k , los tiempos de operación de las protecciones primarias y de respaldo también lo están. La diferencia de tiempos se expresa ahora como:

$$T_2^k - T_1^k = \left[\frac{A_2}{(1 + kp)^{n_2} \left(\frac{I_m}{I_{a2}} \right)^{n_2} - 1} + B_2 \right] dial_2 - \left[\frac{A_1}{(1 + kp)^{n_1} \left(\frac{I_m}{I_{a1}} \right)^{n_1} - 1} + B_1 \right] dial_1 \quad (3.10)$$

Sustituyendo $dial_2$ de (3.9) en (3.10) y reorganizando se tiene que

$$T_2^k - T_1^k = \left[\frac{RA_2}{(1 + kp)^{n_2} \left(\frac{I_m}{I_{a2}} \right)^{n_2} - 1} - \frac{A_1}{(1 + kp)^{n_1} \left(\frac{I_m}{I_{a1}} \right)^{n_1} - 1} + (RB_2 - B_1) \right] dial_1 \quad (3.11)$$

Dada la expresión (3.8) para R , se tiene que el término $(RB_2 - B_1)dial_1$ de (3.11) toma el valor de θ . Además, si consideramos que $s = \frac{A_2}{A_1}$, entonces la diferencia de tiempos de la ecuación (3.11) queda como:

$$T_2^k - T_1^k = \left[\frac{Rs}{(1 + kp)^{n_2} \left(\frac{I_m}{I_{a2}}\right)^{n_2} - 1} - \frac{1}{(1 + kp)^{n_1} \left(\frac{I_m}{I_{a1}}\right)^{n_1} - 1} \right] A_1 dial_1 + \theta \quad (3.12)$$

3.4 CONDICIONES RESTRICTIVAS EN LA DIFERENCIA DE TIEMPOS DE OPERACIÓN

Analicemos ahora los requerimientos necesarios para que se cumpla con la condición de que $T_2^k - T_1^k \geq \theta$, tomando como referencia la ecuación (3.12):

En una primera instancia, el término diferente a θ (en paréntesis rectangular) debe ser mayor o igual a cero, y como $A_1 dial_1 > 0$, entonces

$$\frac{Rs}{(1 + kp)^{n_2} \left(\frac{I_m}{I_{a2}}\right)^{n_2} - 1} - \frac{1}{(1 + kp)^{n_1} \left(\frac{I_m}{I_{a1}}\right)^{n_1} - 1} \geq 0 \quad (3.13)$$

Dos situaciones se presentan para la corriente de arranque máxima I_m de acuerdo a su definición en (3.3):

ESTADO 1: $I_m = I_{a2}$, $I_{a2} = qI_{a1}$ donde $q > 1$, se tiene la situación que se observa en la figura 3.2.

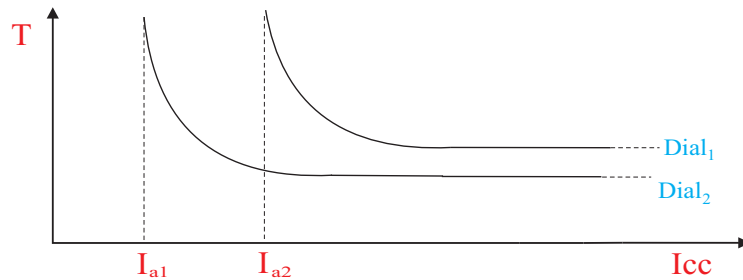


Figura 3.2: Estado 1 en la ecuación (3.3).

Tomando en consideración la ecuación (3.13) con $n_2 = n_1 = n$, tenemos que

$$\frac{Rs}{(1+kp)^n - 1} \geq \frac{1}{(1+kp)^n q^n - 1} \quad (3.14)$$

Los denominadores cumplen con la relación establecida, siendo necesario que se cumpla además, el que $Rs \geq 1$. En esta situación, con la definición de $s = \frac{A_2}{A_1}$ y la definición de R en la ecuación (3.8), tenemos que

$$\begin{aligned} Rs &\geq 1 \\ \left(\frac{B_1 dial_1}{B_2 dial_1} + \frac{\tilde{T}_2 - \tilde{T}_1}{B_2 dial_1} \right) \frac{A_2}{A_1} &\geq 1 \\ \left(\frac{\tilde{T}_1}{B_2 dial_1} + \frac{\tilde{T}_2 - \tilde{T}_1}{B_2 dial_1} \right) \frac{A_2}{A_1} &\geq 1 \\ \left(\frac{\tilde{T}_2}{B_2 dial_1} \right) \frac{A_2}{A_1} &\geq 1 \\ \left(\frac{B_1}{B_2} \right) \left(\frac{\tilde{T}_2}{B_1 dial_1} \right) \frac{A_2}{A_1} &\geq 1 \\ A_2 &\geq \left(\frac{B_2}{B_1} \right) \left(\frac{\tilde{T}_1}{\tilde{T}_2} \right) A_1 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Podemos concluir para el ESTADO 1, donde $I_m = I_2$, que para mantener una relación de $T_2^k - T_1^k \geq \theta$ para una corriente de corto circuito $I_{cc}^k = (1+kp)I_m$, es necesario que se mantenga la relación dada en (3.15):

$$A_2 \geq \left(\frac{B_2}{B_1} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right) A_1$$

o bien

$$A_2 \geq \left(\frac{dial_1}{dial_2} \right) A_1$$

ESTADO 2: $I_m = I_{a1}$, $I_{a2} = qI_{a1}$ donde $q < 1$, se puede observar en la figura 3.3

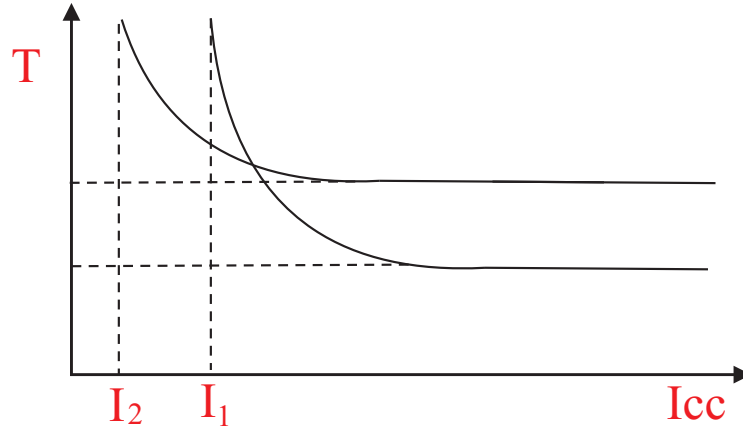


Figura 3.3: Estado 2 de la ecuación (3.13).

Tomando en consideración la ecuación (3.13), tenemos que:

$$\begin{aligned} \frac{Rs}{(1+kp)^{n_2} \left(\frac{1}{q}\right)^{n_2} - 1} &\geq \frac{1}{(1+kp)^{n_1} - 1} \\ Rs [(1+kp)^{n_1} - 1] &\geq \frac{(1+kp)^{n_2} - q^{n_2}}{q^{n_2}} \\ q^{n_2} Rs [(1+kp)^{n_1} - 1] &\geq (1+kp)^{n_2} - q^{n_2} \end{aligned}$$

tratando de simplificar la relación, consideremos que el exponente en ambas funciones es el mismo; esto es, $n_2 = n_1 = n$. En consecuencia, la relación anterior se presenta como:

$$\begin{aligned} q^n Rs [(1+kp)^n - 1] &\geq (1+kp)^n - q^n \\ (1+kp)^n (q^n Rs - 1) &\geq (Rs - 1) q^n \\ (1+kp)^n &\geq \left(\frac{Rs - 1}{Rs - \frac{1}{q^n}} \right) \\ (1+kp) &\geq \left(\frac{Rs - 1}{Rs - \frac{1}{q^n}} \right)^{\frac{1}{n}} \\ k &\geq \frac{1}{p} \left[\left(\frac{Rs - 1}{Rs - \frac{1}{q^n}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \end{aligned}$$

o bien,

$$k \geq \frac{1}{p} \left[q \left(\frac{Rs - 1}{q^n Rs - 1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \quad (3.16)$$

Siendo k el parámetro que garantiza que la diferencia de los tiempos de operación de protección de respaldo y protección primaria sea mayor o igual a θ .

Podemos concluir para el ESTADO 1, donde $I_m = I_1$, que para mantener una relación de $T_2^k - T_1^k \geq \theta$ para una corriente de corto circuito $I_{cc}^k = (1 + kp)I_m$, es necesario que tal diferencia se inicie con un contador k especificado como:

$$k = \left\lceil \frac{1}{p} \left(q \left(\frac{Rs - 1}{q^n Rs - 1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \right\rceil \quad (3.17)$$

3.5 AJUSTE DEL PARÁMETRO A_2 EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO I_{cc}

De las condiciones establecidas en la sección 3.4, podemos desarrollar las condiciones que debe preservar $A_2(I_{cc})$ en función de la corriente de corto circuito. En la relación (3.3) dispusimos a I_{cc} como múltiplo de I_m , la corriente de arranque máxima.

Analicemos ahora los requerimientos necesarios para que se cumpla con la condición de que $T_2^k - T_1^k = \theta$ tomando como referencia la ecuación (3.12); la conclusión es que el término diferente a θ (en paréntesis rectangular) debe ser igual a cero, por lo tanto

$$\frac{Rs}{(1 + kp)^{n_2} \left(\frac{I_m}{I_{a2}} \right)^{n_2} - 1} - \frac{1}{(1 + kp)^{n_1} \left(\frac{I_m}{I_{a1}} \right)^{n_1} - 1} = 0 \quad (3.18)$$

Sustituyendo s por su equivalencia $\frac{A_2^{(k)}}{A_1}$ y despejando $A_2^{(k)}$ tenemos:

$$A_2^{(k)} = \left(\frac{A_1}{R} \right) \left[\frac{(1 + kp)^{n_2} \left(\frac{I_m}{I_{a2}} \right)^{n_2} - 1}{(1 + kp)^{n_1} \left(\frac{I_m}{I_{a1}} \right)^{n_1} - 1} \right] \quad (3.19)$$

Así mismo, se presentan dos situaciones para la corriente de arranque máxima I_m de acuerdo a su definición en (3.3):

ESTADO 1: $I_m = I_{a2}$, $I_{a2} = qI_{a1}$ **donde** $q > 1$

En este estado, la relación de $A^{(k)}$ queda como

$$A_2^{(k)} = \left(\frac{A_1}{R} \right) \left[\frac{(1 + kp)^{n_2} - 1}{(1 + kp)^{n_1} q^{n_1} - 1} \right] \quad (3.20)$$

ESTADO 2: $I_m = I_{a1}$, $I_{a2} = qI_{a1}$ **donde** $q < 1$

En este estado, la relación de $A^{(k)}$ queda como

$$A_2^{(k)} = \left(\frac{A_1}{R} \right) \left[\frac{[(1 + kp)q]^{n_2} - 1}{(1 + kp)^{n_1} - 1} \right] \quad (3.21)$$

o bien

$$A_2^{(k)} = \left(\frac{A_1}{R} \right) \left[\frac{[(1 + kp)q]^{n_2} - 1}{(1 + kp)^{n_1} - 1} \right] \quad (3.22)$$

Este ESTADO 2 es el crítico ya que la función de operación del relevador de respaldo no se satisface para valores de corriente en el intervalo, entre el punto en donde se cruzan ambas curvas (Fig. 3.3).

CAPÍTULO 4

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema que se aborda en este trabajo se basa en el diseño óptimo de forma adaptiva de las funciones de operación de los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso para su coordinación en los sistemas radiales.

Una configuración radial “es aquella que cuenta con una trayectoria entre la fuente y la carga proporcionando el servicio de energía eléctrica” [4, p.6]

Las curvas de operación de los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso, según la norma IEEE se modelan mediante la función exponencial[1]

$$T_{op} = \left[\frac{A}{\left[\frac{I_{falla}}{I_{arranque}} \right]^n - 1} + B \right] Dial \quad (4.1)$$

La corriente de arranque del relevador ($I_{arranque}$), es un parámetro fijo el cual define el umbral de la corriente de operación del relevador. La corriente de falla (I_{falla}), es un parámetro variable el cual representa el valor de corriente medido en el sistema a través de los transformadores de corriente. La salida T_{op} es el tiempo de operación del relevador al presentarse una falla. Las constantes A , B y n definen el tipo de curva; B define la componente de saturación del núcleo. El *dial* es el control que determina la escala de tiempo de la curva tiempo-corriente.

Dependiendo de los valores de las constantes A , B , n y $dial$ se obtienen distintos tipos de curvas: moderadamente inversa, muy inversa y extremadamente inversa.

Los ingenieros de protecciones, al momento de coordinar los relevadores seleccionan el tipo de curva de acuerdo al sistema que deseen coordinar.

Deben decidirse los valores óptimos para las variables A , B , n y $dial$ que permiten definir la curva característica de operación del relé, así como la variable $dial$ que define los tiempos de operación según su curva característica, obteniendo así el tiempo de operación del relevador a coordinar.

4.1 CONSIDERACIONES DEL MODELO

Para establecer el modelo de coordinación de protecciones de sobrecorriente, en un sistema radial de potencia eléctrica, se tomarán en consideración los siguientes elementos:

- El tiempo de operación debe ser $\geq \theta$ seg. para tomar en cuenta los posibles errores que se pueden tener en las tensiones, corrientes e impedancias, así como permitir que la falla sea detectada por los equipos de protección.
- El valor de la $I_{arranque}$ se establece de acuerdo a la capacidad y el comportamiento de los equipos e instalaciones del sistema eléctrico.
- El intervalo de la I_{falla} se establece teniendo en cuenta las posibles sobrecargas de los equipos e instalaciones en base a sus capacidades de diseño.
- La cantidad de relevadores a coordinar.
- Los relevadores a coordinar tendrán un tiempo de operación de protección primaria y un tiempo de operación de protección de respaldo.

4.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Consideremos un diagrama general de ubicación de los relevadores en un sistema radial de transmisión de potencia eléctrica de alto voltaje.

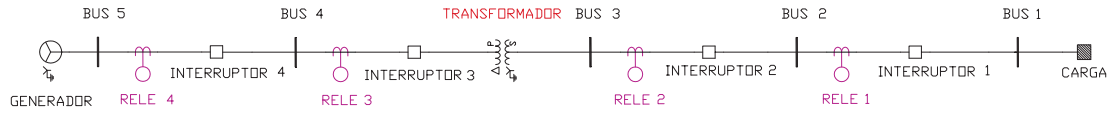


Figura 4.1: Diagrama general de un sistema radial de potencia eléctrica

La figura 4.1 muestra un sistema radial de transmisión de potencia eléctrica de 5 nodos (subestaciones) y sus correspondientes relevadores R_i en el orden correspondiente a la máxima corriente de carga de la línea de transmisión a cubrir para situaciones de corto circuito.

Las corrientes de carga máxima I_{max_i} mantienen la relación $I_{max_1} < I_{max_2} < I_{max_3} < I_{max_4} < I_{max_5}$

Consideremos a su vez que las funciones de operación de estos relevadores de sobrecorriente son de tiempo inverso, con la forma general:

$$T_i^{(k)} = \left[\frac{A_i}{\left[\frac{I_{falla_i}^{(k)}}{I_{arranque_i}} \right]^n + B_i} \right] Dial_i$$

Cuyo gráfico se muestra en la figura 4.2

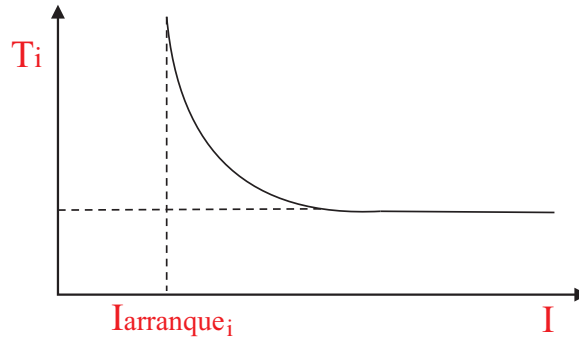


Figura 4.2: Función de tiempo de operación de un relevador.

4.2.1 NOTACIÓN

Parámetros.

I_{falla_i} Corriente de falla para la coordinación de los relevadores.

$I_{arranque_i}$ Corriente de arranque dependiente de las características del sistema.

Variables de decisión.

A_i Grado de inversión de la curva.

B_i Tiempo a la cual la curva será asintótica para un valor de corriente elevada, el cual emula la saturación del núcleo.

$dial_i$ Palanca de ajuste del relevador de protección primaria que permite definir los tiempos de operación según su curva [0.5,15].

Salidas

T_i Tiempo de operación del i -ésimo relevador de protección.

En todos los casos la corriente de arranque $I_{arranque_i}$ del i -ésimo relevador, se establece de manera práctica como:

$$I_{arranque_i} = \delta I_{max_i}$$

esto es, un múltiplo δ de la corriente máxima de carga de la i -ésima línea a la cual supervisa. En la práctica δ toma valores de 1.5 o 1.2 dependiendo el modelo de relevador.

Cada relevador R_i realiza dos funciones:

La protección primaria de la i -ésima línea de transmisión y la protección de respaldo del relevador anterior R_{i-1} ; estas funciones se realizan excepto en el primer relevador R_1 que solamente realiza la protección primaria en la ultima sección L_1 del sistema de transmisión radial (ver figura (4.1), Bus 1).

En la fig 4.3 mostramos para un relevador R_i ($i \neq 1$) el grafico de la función i del tiempo de operación.

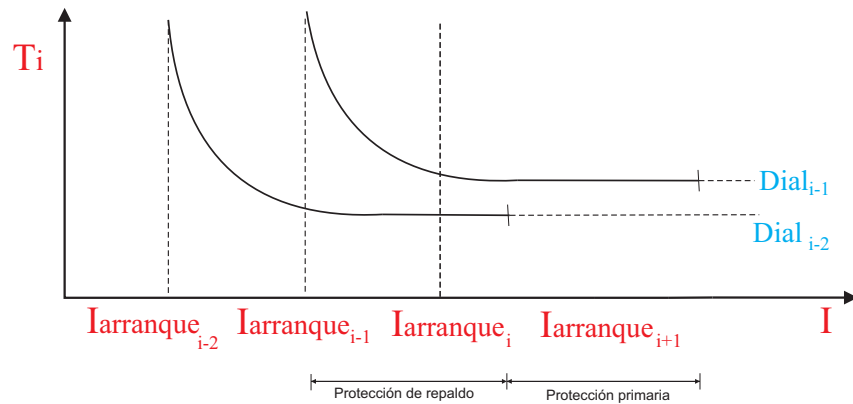


Figura 4.3: Función de tiempo de operación del relevador i .

Observe que la función de respaldo debe realizarse para corrientes mayores que la corriente de arranque del relevador anterior, excepto para R_1 .

Un elemento más que se debe considerar es la corriente de falla máxima I_{falla_i} que el relevador R_i es capaz de detectar, el cual consideraremos en forma generalizada que es superior a la corriente de arranque $I_{falla_{i-1}}$ del anterior relevador R_{i-1} .

Bajo estas condiciones, la forma de las funciones de tiempos de operación de los relevadores se presentan en la figura siguiente:

En la fig 4.4 podemos observar que $I_{arranque_{i+1}} < I_{falla_i} < I_{arranque_{i+2}}$ y además $I_{arranque_5} < I_{falla_4} < I_{falla_5}$

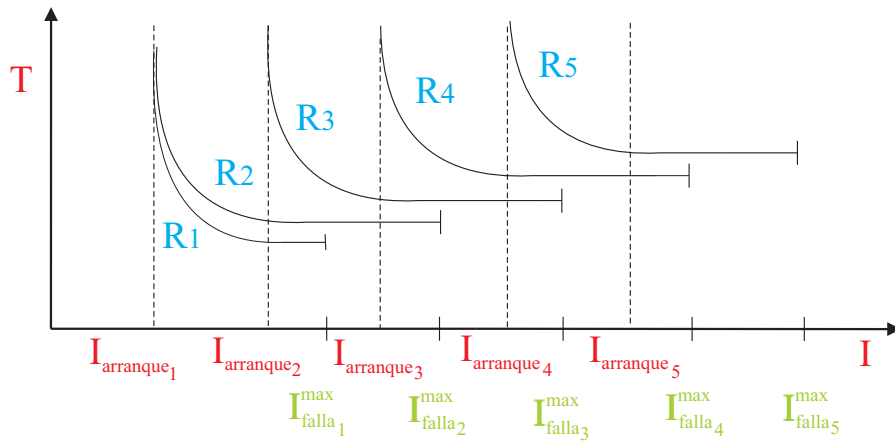


Figura 4.4: Tiempo de operación de la coordinación de protección de relevadores.

La tabla 4.1 muestra los rangos de corrientes para los cuales cada relevador debe actuar como protección primaria o protección de respaldo.

| Relevador | Protección primaria | Protección de respaldo |
|-----------|------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | $(I_{arranque_1}, I_{falla_1}^{max}]$ | |
| 2 | $(I_{falla_1}^{max}, I_{falla_2}^{max}]$ | $(I_{arranque_1}, I_{falla_1}^{max}]$ |
| 3 | $(I_{falla_2}^{max}, I_{falla_3}^{max}]$ | $(I_{arranque_2}, I_{falla_2}^{max}]$ |
| 4 | $(I_{falla_3}^{max}, I_{falla_4}^{max}]$ | $(I_{arranque_3}, I_{falla_3}^{max}]$ |
| 5 | $(I_{falla_4}^{max}, I_{falla_5}^{max}]$ | $(I_{arranque_4}, I_{falla_4}^{max}]$ |

Tabla 4.1: Corrientes de arranque y falla asociadas a las protecciones primarias y de respaldo.

Podemos generalizar el rango de corriente i en el que actúa el relevador R_i de la forma siguiente:

$$\text{Protección primaria: } I_{falla_{i-1}} < I < I_{falla_i} \quad \forall, i = 2, \dots, N$$

$$\text{Protección de respaldo: } I_{arranque_{i-1}} < I < I_{falla_{i-1}} \quad \forall, i = 2, \dots, N$$

Podemos observar en estas condiciones que existen pequeños intervalos de corriente en las cuales existe el respaldo; esto es, en el intervalo de $(I_{arranque_2}, I_{falla_1})$

R_3 actúa como respaldo de R_2 y a su vez este intervalo R_2 actúa como respaldo de R_1 .

En este sistema se pueden localizar 3 casos que involucran: R_1, R_2 y R_3 , además R_4, R_5 y R_2 y finalmente R_5, R_4 y R_3 .

RELEVADOR R_1 : COORDINACIÓN DE RESPALDO POR R_2

En este caso la gráfica de los tiempos de operación de los relevadores R_1 y R_2 se presentan en la figura 4.5.

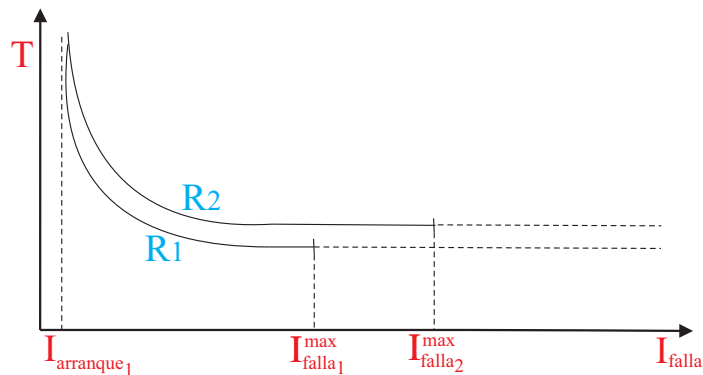


Figura 4.5: Cordinación de respaldo por R2

El intervalo $(I_{arranque_1}, I_{falla_1}^{max}]$ de corriente de falla para protección primaria del relevador R_1 , se seccionará en N_1 intervalos de magnitud $p_1 = \frac{(I_{falla_1}^{max}) - q}{N_1}$ de tal forma que el estudio de los tiempos de operación para tiempos de respuesta será para corrientes de falla definidos como:

$$I_{falla}^{(k)} = I_{arranque_1}(q + kp_1); \quad k = 0, \dots, N_1; \quad I_{falla}^{(k)} \in (I_{arranque_1}, I_{falla_1}^{max}], \forall k$$

$q = 1.5$ (margen de seguridad de respuesta del relevador)

Para el relevador R_1 , la función de tiempo de operación está dada como:

$$T_1^{(k)} = \left[\frac{A_1}{\left[\frac{I_{falla}^{(k)}}{I_{arranque_1}} \right]^n - 1} + B_1 \right] Dial_1 \quad (4.2)$$

en donde A_1, B_1 y $Dial_1$ se fijan a un valor específico. Para este tipo de función inversa de tiempo de operación (mayor corriente de falla menor tiempo de operación) se considerará el exponente n igual a 2. Para el resto de los relevadores A_i, B_i y $Dial_i$, se consideran variables de decisión.

Para el relevador R_2 , que realiza la función de respaldo del relevador R_1 en el rango de su protección primaria ($I_{arranque_1}, I_{falla_1}$] la función de tiempo de operación está dada como:

$$T_2^{(k)} = \left[\frac{A_2}{\left[\frac{I_{falla}^{(k)}}{I_{arranque_1}} \right]^n - 1} + B_2 \right] Dial_2 \quad (4.3)$$

en donde

$$I_{falla}^{(k)} = I_{arranque_1}(q + kp_1); \quad k = 0, \dots, N_1; \quad I_{falla}^{(k)} \in (I_{arranque_1}, I_{falla_1}^{max}], \forall k$$

y como respaldo, el tiempo de operación deberá cumplir con la condición

$$T_2^{(k)} - T_1^{(k)} \geq \theta \quad (4.4)$$

en donde θ toma valores iguales o superiores a 0.2 segundos; la selección de dependerá de la decisión del analista de la coordinación de protecciones.

El modelo matemático para la coordinación de protecciones de los relevadores R_1 y R_2 , es el siguiente:

$$\min_{A_2, B_2, Dial_2} \sum_{k=1}^{N_1} T_2^{(k)} \quad (4.5)$$

sujeto a:

$$T_2^{(k)} - T_1^{(k)} \geq \theta; \quad k = 1, \dots, N_1$$

$$T_2^{(k)} \text{ evaluada con (4.3)}$$

$$T_1^{(k)} \text{ evaluada con (4.4)}$$

Observe en la figura 4.5 que la protección primaria del relevador R_2 cubrirá el intervalo $[I_{falla_1}, I_{falla_2}]$.

RELEVADOR R_2 : COORDINACIÓN DE RESPALDO POR R_3

De la figura 4.4 podemos aislar este caso y se presenta en la figura 4.6.

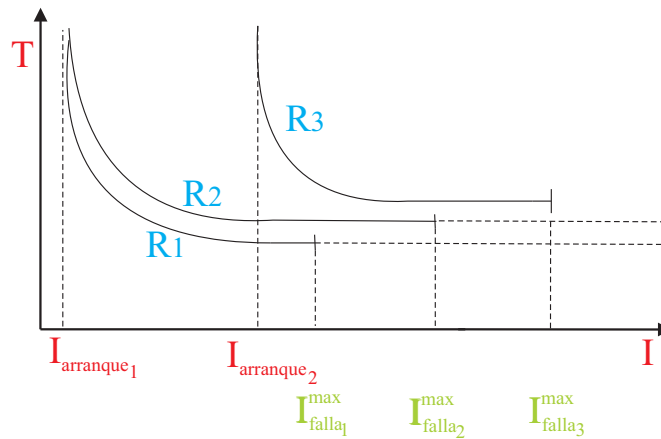


Figura 4.6: Coordinación de respaldo por R_3

Para su análisis, el intervalo de la corriente de falla en la cual se realiza la protección primaria por el relevador R_2 , se seccionará en N_2 intervalos con magnitud $p_2 = \frac{(I_{falla_2}^{max})^{-q}}{N_2}$ y en esta ocasión las corrientes de falla $I_{falla_2}^{(k)}$ estarán definidas de la manera siguiente:

$$I_{falla}^{(k)} = I_{arranque1}^{max}(q + kp_2); \quad k = 0, \dots, N_2; \quad I_{falla}^{(k)} \in [I_{falla1}, I_{falla2}] \forall k \quad (4.6)$$

$q = 1.5$ (margen de seguridad de respuesta del relevador)

Para el relevador R_2 , la función de tiempo de operación está dada por (Eq.3) y para R_3 la función de tiempo de operación por

$$T_3^{(k)} = \left[\frac{A_3}{\left[\frac{I_{falla}^{(k)}}{I_{arranque2}} \right]^2} + B_3 \right] Dial_3 \quad (4.7)$$

Como respaldo del relevador R_2 , la operación del relevador R_3 deberá cumplir con la condición

$$T_3^{(k)} - T_2^{(k)} \geq \theta \quad (4.8)$$

El modelo matemático para la coordinación de protección de los relevadores R_3 y R_2 , es el siguiente:

$$\min_{A_3, B_3, Dial_3}; \quad \min \sum_{k=1}^{N_2} T_3^{(k)} \quad (4.9)$$

sujeto a:

$$T_3^{(k)} - T_2^{(k)} \geq \theta T; \quad k = 0, \dots, N_2$$

$$T_2^{(k)} \text{ evaluada con (4.3) y (4.6)}$$

$$T_3^{(k)} \text{ evaluada con (4.7) y 4.6}$$

Es importante hacer notar en la figura que en el intervalo $(I_{arranque2}, I_{falla1}^{max})$ la corriente de falla es detectada por los 3 relevadores, generando por consecuencia una operación de respaldo del relevador R_3 a la operación de respaldo del relevador R_2 sobre la operación de protección primaria del relevador R_1 .

Observe que, además, la protección primaria del relevador R_3 será sobre el intervalo $[I_{falla2}^{max}, I_{falla3}^{max}]$.

RELEVADOR $R_i, i \notin 1, 2$: PROTECCIÓN DE RESPALDO POR R_{i+1}

En la figura 4.7 se presenta la generalización de este caso:

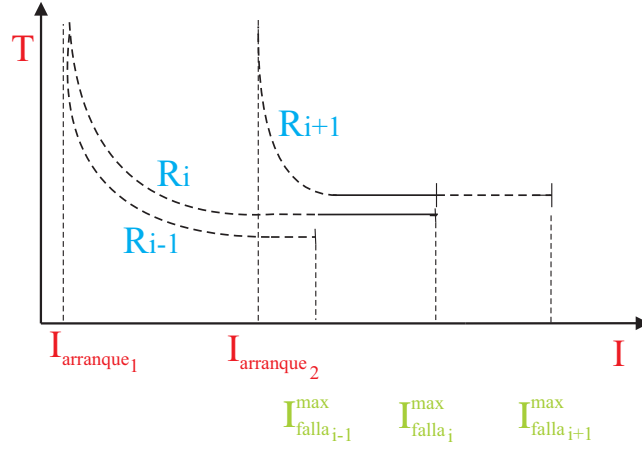


Figura 4.7: Generalización de las funciones de tiempo de operación de relevadores para coordinación.

El intervalo de corriente de falla $[I_{falla_{i-1}}^{max}, I_{falla_i}^{max}]$ en el cual se realiza la protección primaria del relevador R_i se seccionará en N_i intervalos con magnitud $p_i = \frac{(\frac{I_{falla_i}^{max}}{I_{arranque_{i-1}}^{max}})^{-q}}{N_i}$

Para el análisis, las corrientes de falla se definen de la manera siguiente:

$$I_{falla}^{(k)} = I_{falla_{i-1}}^{max} (1 + kp_i); \quad k = 0, \dots, N_i; \quad I_{falla}^{(k)} \in [I_{falla_{i-1}}^{max}, I_{falla_i}^{max}] \forall k \quad (4.10)$$

Para el relevador R_i la función de tiempo de operación está dada por

$$T_i^{(k)} = \left[\frac{A_i}{\left[\frac{I_{falla}^{(k)}}{I_{arranque_{i-1}}^{max}} \right]^2 - 1} + B_i \right] Dial_i \quad (4.11)$$

El relevador R_{i+1} , como respaldo del relevador R_i deberá cumplir con la condición:

$$T_{i+1}^{(k)} - T_i^{(k)} \geq \theta$$

El modelo matemático para la coordinación de protecciones de los relevadores R_{i+1} , R_i es el siguiente:

$$\min_{A_{i+1}, B_{i+1}, Dial_{i+1}} \sum_{k=1}^{N_i} T_{i+1}^{(k)} \quad (4.9)$$

sujeto a:

$$T_{i+1}^{(k)} - T_i^{(k)} \geq \Delta T; \quad k = 1, \dots, N_i)$$

$T_i^{(k)}$ y $T_{i+1}^{(k)}$, ambas se evalúan con las ecuaciones (4.10) y (4.11)

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Con base a la formulación matemática empleada en el capítulo anterior, se conoce que el problema es no lineal (NLP) con multisecciones. Se desarrolló un código en el lenguaje de modelación GAMS, el cual resuelve el problema iterativamente en secciones correspondientes a la cantidad de relevadores empleados en el sistema.

Para calcular los tiempos de operación de protección primaria (T_1) correspondientes al rango de corriente de falla (I_{falla1}) del primer relevador (R1) se fijan los valores de A , B y $Dial$, obteniendo así los (T_1); para obtener los tiempos de operación del relevador de protección de respaldo (R2) se le asigna una cota superior e inferior a las variables A , B y $Dial$ y se minimizan los (T_2); de esta manera se encuentran los mejores valores de las variables y de los (T_2) cumpliendo con la restricción de que los (T_2) deben ser $\geq \theta$ que los (T_1).

En el tercer relevador (R3) se le asigna una cota superior e inferior a las variables A , B y $Dial$ y se minimizan los (T_3), cumpliendo con la restricción de que los (T_3) deben ser $\geq \theta$ que los (T_2).

Este proceso se realiza iterativamente de acuerdo a la cantidad de relevadores que se utilicen en el sistema.

5.1 PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

1.-Establecer el orden jerárquico de los n relevadores a coordinar. Para cada uno de ellos establecer el valor de la corriente de arranque dependiendo del tipo de relevador y el elemento del sistema eléctrico a proteger. Debe de considerarse el rango de actuación de cada relevador con respecto a la corriente de falla: mínima corriente de falla y máxima corriente de falla, ambos en amperes.

2.-Para cada rango de corriente de los relevadores considerados en la coordinación, dividir el rango del i -ésimo relevador $[I_{falla,i}^{max} - I_{falla,i}^{min}]$ en N_i intervalos y obtener N_{i+1} mediciones de corriente de falla I_{falla_i} . Se considera un margen de seguridad $q = 1.5$ veces la corriente de arranque $I_{arranque_i}$. El conjunto de corrientes de falla se obtienen de las siguientes relaciones.

$$I_{falla,i} = I_{arranque,i}(q + kp_i) : k_i = 0, 1, \dots, N_i$$

donde:

$$p_i = \frac{(I_{falla_i}^{max}) - q}{N_i} \quad i = 1, 2, \dots, n_{rel}$$

N_{rel} =número de relevadores a coordinar.

$$q = 1.5$$

3.-Se selecciona la función de operación del primer relevador ($i=1$; el de más baja corriente de falla) de acuerdo a la norma IEEE C37.112.1996 [1] se establecieron los valores de los parámetros A_i , B_i y $dial_i$.

4.-Para el resto de los relevadores se asignan cotas a los parámetros A_i , B_i y $dial_i$, para $i=2, \dots, n_{rel}$

5.-Resolver el problema:

$$\min_{A_{i+1}, B_{i+1}, Dial_{i+1}} \sum_{i=1}^{N_{rel}-1} \sum_{k=1}^{N_{i+1}} T_{i+1}^{(k)}$$

sujeto a:

$$T_{i+1}^{(k)} - T_i^{(k)} \geq \theta; \quad k = 0, \dots, N_i \quad i = 1, \dots, N - 1_{rel}$$

$$T_i^{(k)} = \left[\frac{A_i}{\left[\frac{I_{falla,i}}{I_{arranque,i}} \right]^2 - 1} + B_i \right] Dial_i$$

$$I_{falla,i}^{(k)} = I_{arranque,i}(1+kp_i); \quad k=0,1,\dots,N_i; \quad i=1,\dots,n_{rel}$$

$$I_{falla,i}^{(k)} \in [I_{falla,i}^{max}, qI_{falla,i}^{min}] \forall k$$

5.2 EJEMPLO

En la siguiente figura se muestra un sistema eléctrico industrial de una productora de papel, en el cual se indican los tres relevadores que se desean coordinar.

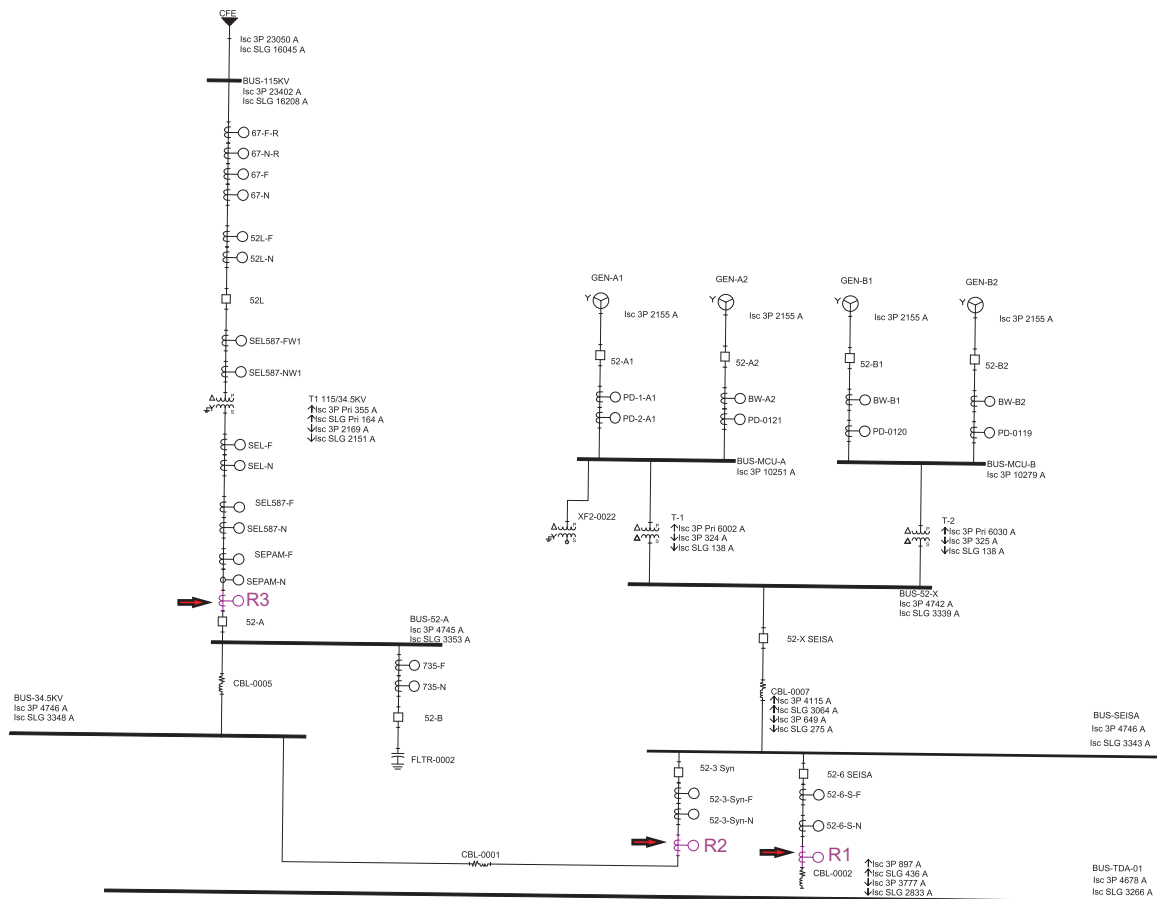


Figura 5.1: Productora de papel

Se tienen 3 relevadores de sobrecorriente (R1, R2 y R3) marca SEL modelo 551 los cuales se desean coordinar.

1.- Se fijan los valores del primer relevador (R1) de acuerdo a las características del sistema. El valor de corriente de arranque se establece de acuerdo a la capacidad del transformador a proteger según la NOM 001 SEDE 2005 TOMO 1 [2, p.439]. El transformador que se desea proteger es de 115/34.5 kV, 15,000 MVA y su corriente nominal del lado de baja es de 250 A, por lo cual se establece una $I_{arranque} = 300A$.

Rango de corriente de falla = [450A a 1767]

$$I_{minfalla} = 450A$$

$$I_{maxfala} = 1767A$$

Dial= 0.9 se establece de acuerdo a las protecciones aguas arriba.

En donde:

$$I_{falla} = I_{arranque}(q + kp); k = 0, \dots, N$$

$q=1.5$ (margen de seguridad de respuesta del relevador)

$k=0,1,2,3,\dots,N$

$N=29$ (Intervalos en los que se dividirá el rango de corriente de falla)

$$p_1 = \frac{\left(\frac{I_{falla}^{max}}{I_{arranque}}\right) - q}{N_1} \quad p_1 = \frac{\left(\frac{1767.47}{300} - 1.5\right)}{29} = 0.15143333$$

Analicemos:

$$I_{falla}^{(k)} = I_{arranque}(q + kp); k = 0, \dots, N$$

Para $k=0$

$$I_{falla}^{(0)} = 300[(1.5) + (0)(0.15143333)] = 450A$$

Para $k=1$

$$I_{falla}^{(1)} = 300[(1.5) + (1)(0.15143333)] = 495.43A$$

Para $k=29$

$$I_{falla}^{(1)} = 300[(1.5) + (29)(0.15143333)] = 1767A$$

Y así sucesivamente se van calculando los valores de corriente de falla.

2.- Se selecciona la curva U4(Extremadamente inverso) para el primer relevador ya que esta coordina bien de acuerdo a las características del sistema. La norma IEEE C37.112.1996 define los valores de $A=5.67$, $B=0.0352$ y $n=2$ correspondiente al tipo de curva U4 en la siguiente ecuación.

$$T_1^{(k)} = \left[\frac{A_1}{\left[\frac{I_{falla}^{(k)}}{I_{arranque1}} \right]^n} + B_1 \right] Dial_1$$

Se sustituyen todos los parámetros en la ecuación y de esta manera se obtienen los tiempos de operación correspondientes al primer relevador.

3.- Se desarrolló un código en lenguaje GAMS para establecer los tiempos de operación de los otros relevadores (R2 y R3).

- Se fijaron los parámetros para calcular los tiempos de operación del primer relevador (R1) como se indico arriba.

$$A = 5.67$$

$$B = 0.0352$$

$$n = 2$$

$$I_{falla} = 300A$$

$$Rangodecorrientede\falla = [450Aa1767A]$$

$$Dial = 0.9$$

- Se establecieron las cotas de las variables y los rangos de corriente de falla que se utilizarán para calcular los tiempos de operación de los relevadores (R2 y R3).

$$A.up = 28.2$$

$$A.lo = 0.00086$$

B.up= 1.3

B.lo= 0

dial.up=15

dial.lo=0.5

Rango de corriente de falla (R2)= [450 A a 2334 A]

Rango de corriente de falla (R1)= [450 A a 3107 A]

- Se establecieron las ecuaciones en el lenguaje GAMS

time1.. TT1=e=sum(k,T1(k));

time2.. TT2=e=sum(k,T2(k));

time2c.. TT2c=e=sum(k,T2c(k));

time3.. TT3=e=sum(k,T3(k));

time3c.. TT3c=e=sum(k,T3c(k));

diferencia(k).. T2(k) - T1(k) =g= 0.2;

diferencia1(k).. T3(k) - T2(k) =g= 0.2;

diferencia2(k).. T3(k) - T2c(k) =g= 0.2;

sec1(k).. T1(k)=e= (A/(power(Icc(k)/Ia1,n)-1)+B)*dial1;

sec2(k).. T2(k)=e= (A2/(power(Icc(k)/Ia1,n)-1)+B2)*dial2;

sec2c(k).. T2c(k)=e= (A2/(power(Icc2(k)/Ia1,n)-1)+B2)*dial2;

sec3(k).. T3(k)=e= (A3/(power(Icc3(k)/Ia1,n)-1)+B3)*dial3;

sec3c(k).. T3c(k)=e= (A3/(power(Icc4(k)/Ia1,n)-1)+B3)*dial3;

- Se formuló la función objetivo.

$$\min_{A_{i+1}, B_{i+1}, Dial_{i+1}} \sum_{k=1}^{N_i} T_{i+1}^{(k)}$$

sujeto a:

$$T_{i+1}^{(k)} - T_i^{(k)} \geq \Delta T; \quad k = 0, \dots, N_i)$$

$T_i^{(k)}$ y $T_{i+1}^{(k)}$, ambas se evalúan con las siguientes ecuaciones:

$$I_{falla}^{(k)} = I_{falla_{i-1}}^{max} (1 + kp_i); \quad k = 0, \dots, N_i; \quad I_{falla}^{(k)} \in [I_{falla_{i-1}}^{max}, I_{falla_i}^{max}] \forall k$$

$$T_i^{(k)} = \left[\frac{A_i}{\left[\frac{I_{falla}}{I_{arranque_{i-1}}} \right]^2 - 1} + B_i \right] Dial_i$$

- Se compila el programa obteniendo las variables que definirán las características de operación de los relevadores (R2 y R3), así como sus tiempos de operación.

| Relevador | A | B | Dial |
|-----------|--------|--------|------|
| 1 | 5.67 | 0.0352 | 0.9 |
| 2 | 10.206 | 0.463 | 0.5 |
| 3 | 13.061 | 1.089 | 0.5 |

Tabla 5.1: Resultados de las variables

CAPÍTULO 6

ESTUDIO COMPUTACIONAL

El código desarrollado para este trabajo fue escrito en el lenguaje de modelación GAMS y solucionado en una terminal con Procesador Sun Fire v440, conectado a 4 Procesadores de 1602 Mhz Ultra SPARC III con 1MB de cache y 8GB de Memoria RAM.

6.1 TAMAÑO DE INSTANCIA

Para este problema se van a considerar la coordinación de 3 relevadores a los cuales les corresponde proteger una sección a cada uno, por lo tanto nuestro sistema contará de tres secciones y cada sección tendrá su corriente de arranque correspondiente, así como su rango de corriente de falla.

La figura 6.1 muestra el diagrama unifilar de una industria papelera en donde se pueden observar los 3 relevadores que se desean coordinar.

PRODUCTORA DE PAPEL

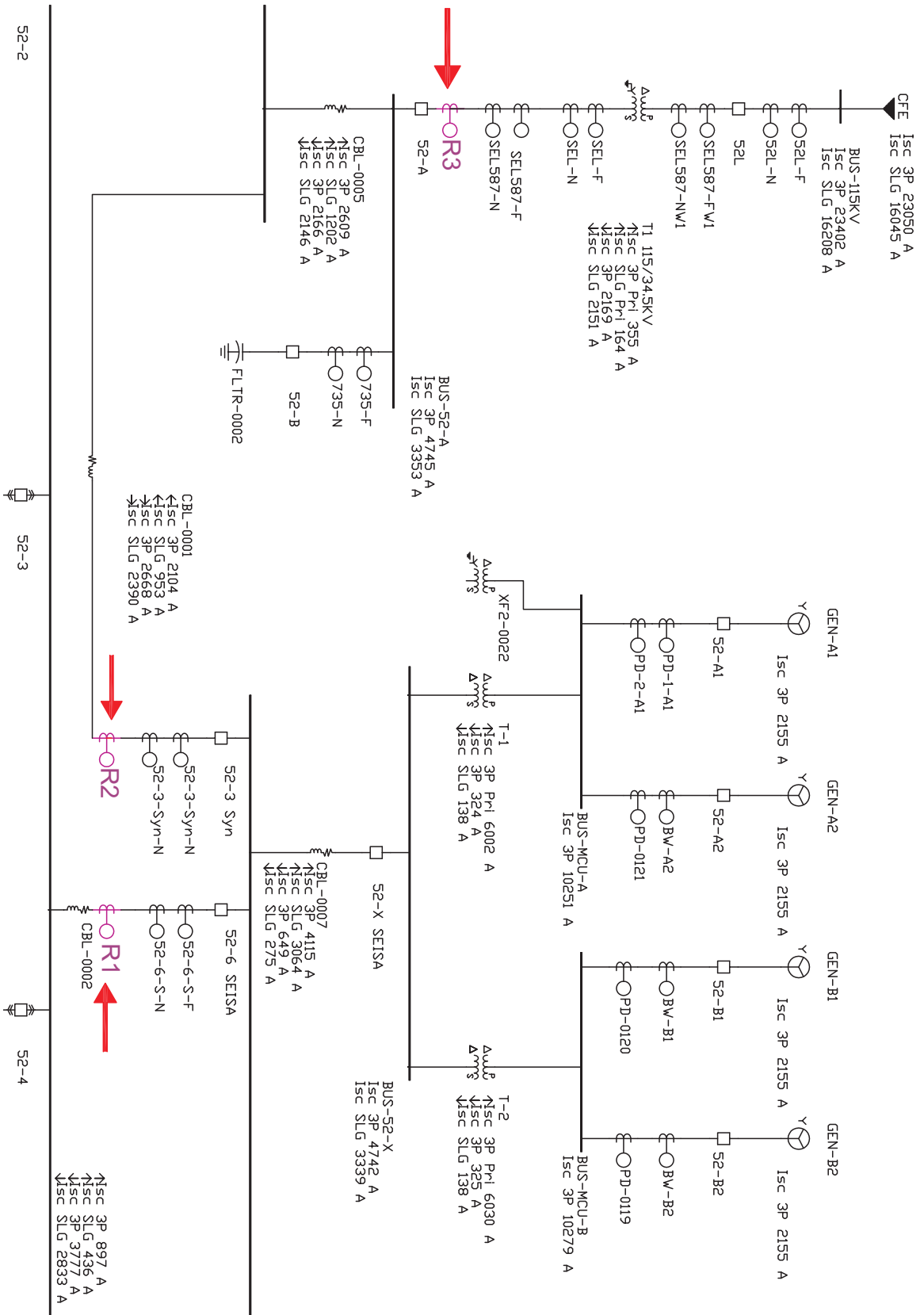


Figura 6.1: Diagrama unifilar

6.1.1 ASIGNACIÓN DE VALORES A LOS PARÁMETROS

Para el relevador R_1 , la función de tiempo de operación está dada como:

$$T_1^{(k)} = \left[\frac{A_1}{\left[\frac{I_{falla}^{(k)}}{I_{arranque_1}} \right]^n - 1} + B_1 \right] Dial_1 \quad (Eq.2)$$

Los parámetros de entrada de las constantes A_1 , B_1 y $Dial_1$ fueron 5.67, 0.0352 y 0.9 respectivamente de acuerdo a la norma IEE Std C37.112-1996. Para este tipo de función inversa de tiempo de operación (mayor corriente de falla menor tiempo de operación) se considerará el exponente n igual a 2. Para el resto de los relevadores A_i , B_i y $Dial_i$, se consideraron variables de decisión.

El valor de $I_{arranque_1}$, así como el rango de I_{falla_1} fue establecido conforme a la carga del sistema, a los cuales se les asignaron los valores de 300 A y un rango de [450,1767.7] dividido en 30 secciones.

Para el relevador R_2 , que realiza la función de respaldo del relevador R_1 se le asignaron 300 A como $I_{arranque_2}$ y un rango de [450, 2334] como I_{falla_1} y para el relevador R_3 300 A y un rango de [450,3107] respectivamente, siendo este la protección de respaldo del relevador R_2 .

6.2 RESULTADOS OBTENIDOS

En la tablas 6.1 y 6.2 se muestran los valores de las funciones de operación de los relevadores con sus correspondientes variables de decisión, los cuales se calcularon resolviendo el problema no lineal (NLP), tal y como se explicó en el capítulo 4.

| Relevador | A | B | Dial |
|-----------|--------|--------|------|
| 1 | 5.67 | 0.0352 | 0.9 |
| 2 | 10.206 | 0.463 | 0.5 |
| 3 | 13.061 | 1.089 | 0.5 |

Tabla 6.1: Resultados de las variables

La tabla 6.2 indica los tiempos de operación de cada relevador en el rango de corriente de falla.

| RELEVADOR 1 | | RELEVADOR 2 | | RELEVADOR 3 | |
|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| Ifalla | T ₁ | Ifalla | T ₂ | Ifalla | T ₃ |
| 450 | 4.11408 | 450 | 4.31408 | 450 | 5.76867 |
| 495.43 | 2.98612 | 495.43 | 3.18612 | 515 | 3.89852 |
| 540.86 | 2.29935 | 540.86 | 2.49935 | 580 | 2.92962 |
| 586.29 | 1.84171 | 586.29 | 2.04171 | 645 | 2.34706 |
| 631.72 | 1.51765 | 631.72 | 1.71765 | 710 | 1.96363 |
| 677.15 | 1.27789 | 677.15 | 1.47789 | 775 | 1.69534 |
| 722.58 | 1.09451 | 722.58 | 1.29451 | 840 | 1.49906 |
| 768.01 | 0.95052 | 768.01 | 1.15052 | 905 | 1.35052 |
| 813.44 | 0.83504 | 813.44 | 1.03504 | 970 | 1.23504 |
| 858.87 | 0.7408 | 858.87 | 0.9408 | 1035 | 1.1433 |
| 904.3 | 0.66275 | 904.3 | 0.86275 | 1100 | 1.06908 |
| 949.73 | 0.59729 | 949.73 | 0.79729 | 1165 | 1.00812 |
| 995.16 | 0.54179 | 995.16 | 0.74179 | 1230 | 0.95737 |
| 1040.59 | 0.49427 | 1040.59 | 0.69427 | 1295 | 0.91466 |
| 1086.02 | 0.45325 | 1086.02 | 0.65325 | 1360 | 0.87833 |
| 1131.45 | 0.41756 | 1131.45 | 0.61756 | 1425 | 0.84718 |
| 1176.88 | 0.38632 | 1176.88 | 0.58632 | 1490 | 0.82024 |
| 1222.31 | 0.35879 | 1222.31 | 0.55879 | 1555 | 0.79678 |
| 1267.74 | 0.3344 | 1267.74 | 0.5344 | 1620 | 0.77622 |
| 1313.17 | 0.31268 | 1313.17 | 0.51268 | 1685 | 0.7581 |
| 1358.6 | 0.29325 | 1358.6 | 0.49325 | 1750 | 0.74204 |
| 1404.03 | 0.2758 | 1404.03 | 0.4758 | 1815 | 0.72774 |
| 1449.46 | 0.26007 | 1449.46 | 0.46007 | 1880 | 0.71495 |
| 1494.89 | 0.24582 | 1494.89 | 0.44582 | 1945 | 0.70346 |
| 1540.32 | 0.23289 | 1540.32 | 0.43289 | 2010 | 0.69311 |
| 1585.75 | 0.2211 | 1585.75 | 0.4211 | 2075 | 0.68373 |
| 1631.18 | 0.21033 | 1631.18 | 0.41033 | 2140 | 0.67523 |
| 1676.61 | 0.20047 | 1676.61 | 0.40047 | 2205 | 0.66748 |
| 1722.04 | 0.1914 | 1722.04 | 0.3914 | 2270 | 0.6604 |
| 1767.47 | 0.18306 | 1767.47 | 0.38306 | 2335 | 0.65392 |
| | | 1767 | 0.38314 | 2334 | 0.64797 |
| | | 1786.56 | 0.37975 | 2360.66 | 0.64567 |
| | | 1806.12 | 0.37647 | 2387.32 | 0.64345 |
| | | 1825.68 | 0.37329 | 2413.98 | 0.6413 |
| | | 1845.24 | 0.37023 | 2440.64 | 0.63921 |
| | | 1864.8 | 0.36726 | 2467.3 | 0.6372 |
| | | 1884.36 | 0.36439 | 2493.96 | 0.63525 |
| | | 1903.92 | 0.3616 | 2520.62 | 0.63336 |
| | | 1923.48 | 0.35891 | 2547.28 | 0.63153 |
| | | 1943.04 | 0.3563 | 2573.94 | 0.62975 |
| | | 1962.6 | 0.35377 | 2600.6 | 0.62803 |
| | | 1982.16 | 0.35131 | 2627.26 | 0.62636 |
| | | 2001.72 | 0.34893 | 2653.92 | 0.62474 |
| | | 2021.28 | 0.34662 | 2680.58 | 0.62317 |
| | | 2040.84 | 0.34438 | 2707.24 | 0.62164 |
| | | 2060.4 | 0.34221 | 2733.9 | 0.62016 |
| | | 2079.96 | 0.34009 | 2760.56 | 0.61872 |
| | | 2099.52 | 0.33804 | 2787.22 | 0.61732 |
| | | 2119.08 | 0.33605 | 2813.88 | 0.61596 |
| | | 2138.64 | 0.33411 | 2840.54 | 0.61464 |
| | | 2158.2 | 0.33222 | 2867.2 | 0.61335 |
| | | 2177.76 | 0.33039 | 2893.86 | 0.6121 |
| | | 2197.32 | 0.32861 | 2920.52 | 0.61088 |
| | | 2216.88 | 0.32687 | 2947.18 | 0.6097 |
| | | 2236.44 | 0.32519 | 2973.84 | 0.60854 |
| | | 2256 | 0.32354 | 3000.5 | 0.60742 |
| | | 2275.56 | 0.32194 | 3027.16 | 0.60633 |
| | | 2295.12 | 0.32038 | 3053.82 | 0.60526 |
| | | 2314.68 | 0.31887 | 3080.48 | 0.60422 |
| | | 2334.24 | 0.31739 | 3107.14 | 0.60321 |

Tabla 6.2: Resultados obtenidos.

6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN SKM

Se comparan los resultados obtenidos en GAMS con los datos obtenidos con el solver SKM (se utiliza en la práctica industrial para realizar la coordinación de relevadores), mostrándose en las figuras 6.2 y 6.3 respectivamente.

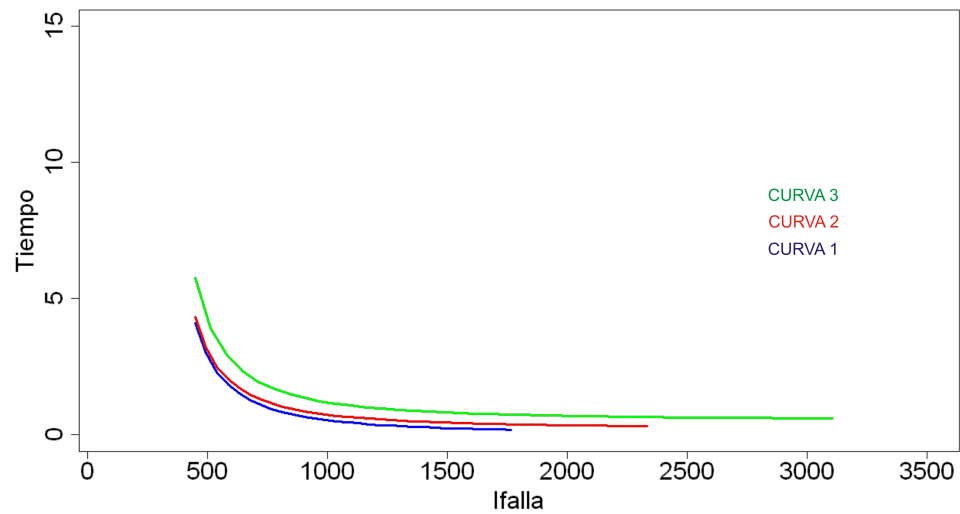


Figura 6.2: Funciones de operación determinadas con código GAMS.

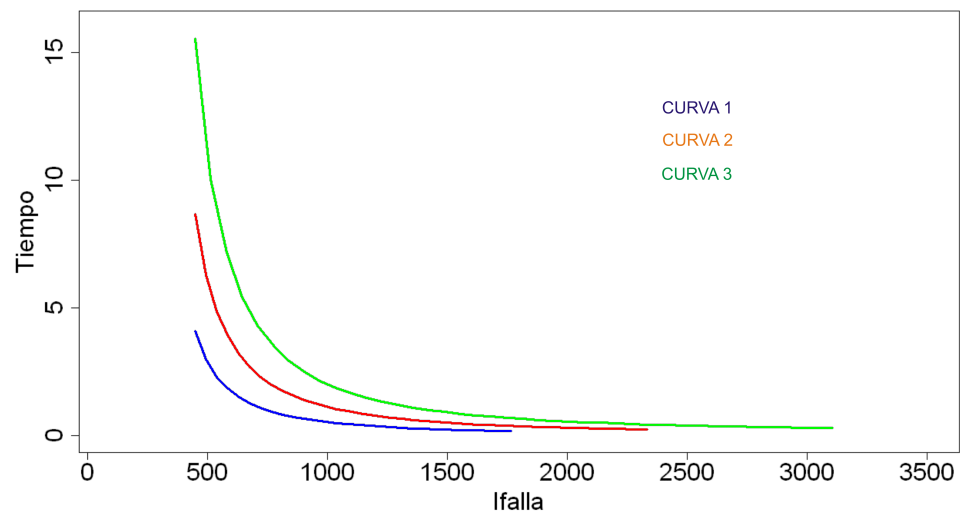


Figura 6.3: Funciones de operación determinadas con solver SKM.

Se puede observar que en las funciones de operación que obtuvimos se respeta la separación ≥ 0.2 entre cada curva y presentan un comportamiento mas uniforme en toda la curva.

En las curvas del solver podemos ver una separación muy grande al principio cuando las corrientes de falla tienen un valor inferior, sin embargo tienen un mejor comportamiento en corrientes de falla elevadas.

En la Tabla 6.3 se muestran los datos obtenidos del solver SKM y de GAMS.

Curva 2

Para una $I_{falla} = 450$ con GAMS se obtiene un tiempo de respuesta de 4.3 seg y con el solver 8.68 seg; sin embargo para una $I_{falla} = 2256$ obtuvimos un tiempo de respuesta con GAMS de 0.32 seg y con el solver 0.26 seg. A partir de la $I_{falla} = 1767$ el tiempo de operación del solver es mejor que el de GAMS pero la diferencia de 0.062 no es significativa.

Curva 3

Para una $I_{falla} = 450$ con GAMS se obtiene un tiempo de respuesta de 5.7 seg y con el solver 15.54 seg. Sin embargo para una $I_{falla} = 2760$ obtuvimos un tiempo de respuesta con GAMS de 0.54 seg y con el solver 0.35 seg. A partir $I_{falla} = 1685$ el tiempo de operación del solver es mejor que el de GAMS teniendo una diferencia de 0.19, que es mayor que la que se presentó en la curva 2 pero se puede considerar aceptable para la coordinación.

| CURVA 2 | | | CURVA 3 | | |
|---------|---------|------------|---------|---------|------------|
| ICC | T2 GAMS | T2 SOLVER | ICC | T3 GAMS | T3 SOLVER |
| 450 | 4.31408 | 8.68528 | 450 | 5.76867 | 15.54208 |
| 495.43 | 3.18612 | 6.30402687 | 515 | 3.89852 | 10.0213493 |
| 540.86 | 2.49935 | 4.85418165 | 580 | 2.92962 | 7.16115727 |
| 586.29 | 2.04171 | 3.88805688 | 645 | 2.34706 | 5.44141913 |
| 631.72 | 1.71765 | 3.20393472 | 710 | 1.96363 | 4.30953752 |
| 677.15 | 1.47789 | 2.69777685 | 775 | 1.69534 | 3.51751599 |
| 722.58 | 1.29451 | 2.3106221 | 840 | 1.49906 | 2.93810105 |
| 768.01 | 1.15052 | 2.00664321 | 905 | 1.35052 | 2.49959838 |
| 813.44 | 1.03504 | 1.76286751 | 970 | 1.23504 | 2.15872102 |
| 858.87 | 0.9408 | 1.56392085 | 1035 | 1.1433 | 1.8878983 |
| 904.3 | 0.86275 | 1.3991489 | 1100 | 1.06908 | 1.668805 |
| 949.73 | 0.79729 | 1.26095073 | 1165 | 1.00812 | 1.48882913 |
| 995.16 | 0.74179 | 1.14376908 | 1230 | 0.95737 | 1.33903484 |
| 1040.59 | 0.69427 | 1.04345443 | 1295 | 0.91466 | 1.2129331 |
| 1086.02 | 0.65325 | 0.95685145 | 1360 | 0.87833 | 1.10571092 |
| 1131.45 | 0.61756 | 0.8815221 | 1425 | 0.84718 | 1.01373217 |
| 1176.88 | 0.58632 | 0.8155558 | 1490 | 0.82024 | 0.93420514 |
| 1222.31 | 0.55879 | 0.7574364 | 1555 | 0.79678 | 0.8649555 |
| 1267.74 | 0.5344 | 0.70594707 | 1620 | 0.77622 | 0.80426807 |
| 1313.17 | 0.51268 | 0.66010126 | 1685 | 0.7581 | 0.75077422 |
| 1358.6 | 0.49325 | 0.61909172 | 1750 | 0.74204 | 0.7033705 |
| 1404.03 | 0.4758 | 0.58225228 | 1815 | 0.72774 | 0.66115883 |
| 1449.46 | 0.46007 | 0.54902902 | 1880 | 0.71495 | 0.62340198 |
| 1494.89 | 0.44582 | 0.51895803 | 1945 | 0.70346 | 0.58948998 |
| 1540.32 | 0.43289 | 0.49164828 | 2010 | 0.69311 | 0.55891445 |
| 1585.75 | 0.4211 | 0.46676814 | 2075 | 0.68373 | 0.53124887 |
| 1631.18 | 0.41033 | 0.44403479 | 2140 | 0.67523 | 0.50613314 |
| 1676.61 | 0.40047 | 0.42320579 | 2205 | 0.66748 | 0.4832615 |
| 1722.04 | 0.3914 | 0.40407227 | 2270 | 0.6604 | 0.46237292 |
| 1767.47 | 0.38306 | 0.38645347 | 2334 | 0.65392 | 0.44324345 |
| 1767 | 0.38314 | 0.38662855 | 2335 | 0.64744 | 0.44352543 |
| 1786.56 | 0.37975 | 0.37946336 | 2360.66 | 0.64096 | 0.43613267 |
| 1806.12 | 0.37647 | 0.3725385 | 2387.32 | 0.63448 | 0.4289915 |
| 1825.68 | 0.37329 | 0.36584327 | 2413.98 | 0.628 | 0.42209057 |
| 1845.24 | 0.37023 | 0.35936752 | 2440.64 | 0.62152 | 0.41541917 |
| 1864.8 | 0.36726 | 0.3531017 | 2467.3 | 0.61504 | 0.4089672 |
| 1884.36 | 0.36439 | 0.34703675 | 2493.96 | 0.60856 | 0.40272507 |
| 1903.92 | 0.3616 | 0.3411641 | 2520.62 | 0.60208 | 0.39668376 |
| 1923.48 | 0.35891 | 0.33547567 | 2547.28 | 0.5956 | 0.39083469 |
| 1943.04 | 0.3563 | 0.32996374 | 2573.94 | 0.58912 | 0.38516977 |
| 1962.6 | 0.35377 | 0.32462106 | 2600.6 | 0.58264 | 0.3796813 |
| 1982.16 | 0.35131 | 0.3194407 | 2627.26 | 0.57616 | 0.37436202 |
| 2001.72 | 0.34893 | 0.31441612 | 2653.92 | 0.56968 | 0.369205 |
| 2021.28 | 0.34662 | 0.30954107 | 2680.58 | 0.5632 | 0.36420368 |
| 2040.84 | 0.34438 | 0.30480966 | 2707.24 | 0.55672 | 0.35935184 |
| 2060.4 | 0.34221 | 0.30021624 | 2733.9 | 0.55024 | 0.35464355 |
| 2079.96 | 0.34009 | 0.29575548 | 2760.56 | 0.54376 | 0.35007318 |
| 2099.52 | 0.33804 | 0.29142227 | | | |
| 2119.08 | 0.33605 | 0.28721178 | | | |
| 2138.64 | 0.33411 | 0.28311937 | | | |
| 2158.2 | 0.33222 | 0.27914065 | | | |
| 2177.76 | 0.33039 | 0.27527143 | | | |
| 2197.32 | 0.32861 | 0.27150768 | | | |
| 2216.88 | 0.32687 | 0.2678456 | | | |
| 2236.44 | 0.32519 | 0.26428154 | | | |
| 2256 | 0.32354 | 0.260812 | | | |

Tabla 6.3: Datos comparativos entre GAMS y el programa de simulación SKM.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1 CONCLUSIONES

En esta tesis nos enfocamos en el diseño de las funciones de operación de los relevadores de sobrecorriente en sistemas radiales, minimizando el tiempo de operación de estos para poder brindar una protección adecuada al sistema eléctrico, reduciendo daños y costos.

Se tomaron los siguientes criterios para la realización del modelo: el tiempo de operación entre los relevadores debe ser ≥ 0.2 seg., el valor de la $I_{arranque}$ se establece de acuerdo a la capacidad y el comportamiento de los equipos e instalaciones del sistema eléctrico, el intervalo de la I_{falla} se establece teniendo en cuenta las posibles sobrecargas de los equipos e instalaciones en base a sus capacidades de diseño y la cantidad de relevadores a coordinar.

Se desarrolló un código en lenguaje de programación GAMS tomando como referencia la norma IEEE Std C37.112-1996 para definir la característica de operación de los relevadores. Se tomó como instancia una empresa papelera, se compararon los resultados obtenidos con un solver comercial (SKM) utilizado para realizar coordinaciones de protecciones. Con el código desarrollado se obtuvieron buenos resultados; sin embargo se podría agregar una variable más para definir curvas más precisas.

7.2 TRABAJO FUTURO

- Mejorar la formulación matemática para agregar el parámetro n como variable de decisión para obtener funciones de operación más precisas.
- Realizar pruebas con distintos valores de corriente de arranque ($I_{arranque}$) para cada relevador a coordinar.
- Implementarlo en redes eléctricas con configuraciones complejas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays», , págs. 1–19, 1996.
- [2] «Norma oficial mexicana NOM-001-SEDE-2005», , 2005.
- [3] *Network Protection and automation guide*, tercera edición, Alstom Grid, 2011.
- [4] CFE, «Norma CFE-BMT-DP», recurso libre, disponible en <http://es.scrib.com/doc/4279095/Norma-Dist-Construccion-subterraneeas-Ap2>.
- [5] GUTIÉRREZ, V. C., «Equipo eléctrico», recurso libre, disponible en <http://gama.fime.uanl.mx/omeza/pro/EquipoElectrico.pdf>.
- [6] HÉCTOR MENDIVELSO D, P. A. G., «Protecciones “Relés”», recurso libre, disponible en <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gipud/documentos/relés.pdf>.
- [7] J. DUNCAN GLOVER, M. S. S., *Sistemas de potencia*, tercera edición, Ciencias e ingenierías, 100.
- [8] MARGIL S. RAMÍREZ ALANIS, M. S., «Protección de sistemas eléctricos de potencia», recurso libre, disponible en <http://gama.fime.uanl.mx/omeza/pro/Proteccion.pdf>, 2005.
- [9] MARTÍNEZ, J. A. L., *Evaluación de los métodos de coordinación de relevadores direccionales de sobrecorriente en redes complejas*, UANL, México, N.L, 2008.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Jade Melissa Valdez Gómez

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias
en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

PROCESO ADAPTATIVO DE LAS FUNCIONES DE OPERACIÓN DE LOS RELEVADORES DE PROTECCION

Nací en el Distrito Federal el 17 de agosto de 1983. Asistí al Conalep “Raul Rangel Frías” en donde curse la carrera de Técnico Automotriz. Graduada en 2007 de la Universidad Autónoma de Nuevo León como Ingeniera Mecánica Electricista. Posteriormente ingrese al Posgrado en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Autónoma de Nuevo León en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Bajo la asesoría y dirección de el Dr. Óscar L. Chacón Mondragón, en colaboración con el Dr. Arturo Conde Enríquez he desarrollado el proyecto de tesis que se presenta en este escrito.