

Estudio de Coordinación de Las Protecciones En Base a Herramientas Computacionales, Aplicable a La Subestación de Distribución Baba

Pincay Muñiz Adrián Steven, Ugarte Vega Luis Fernando
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral, Apartado 09-01-5863 Guayaquil-Ecuador
aspincay@espol.edu.ec, luis.ugarte.vega@hotmail.com
Juan Saavedra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ingeniero Eléctrico Especialidad Potencia,
jsaavedra@hidronacion.org

Resumen

En el presente documento se desarrolla el estudio de la coordinación de protecciones de la Subestación de Distribución de Energía Eléctrica Baba, con la ayuda de herramientas computacionales, análisis de flujos de carga, estudios de cortocircuito, criterios de coordinación de ingeniería y sus correspondientes expresiones matemáticas, que nos faciliten el estudio con una mayor precisión y fácil reajuste.

La utilización de estas herramientas nos permitió, concentrar nuestros esfuerzos en el proceso de la información bajo criterios de ingeniería, aplicables de manera general ante cualquier coordinación de protecciones en Subestaciones, escoger la mejor opción y ajuste de los distintos dispositivos de protección que se encuentran instalados, basados en sus características y normas de coordinación.

Palabras Claves: *Subestación Baba, Coordinación de Protecciones, Estudio de Flujo de Carga, Estudio de Cortocircuito*

Abstract

This paper develops the study of coordination of electrical protections of the Substation of Electricity Distribution Baba, with the help of computational tools, load flow analysis, short circuit study, coordination of engineering criteria and their corresponding mathematical expressions, to facilitate the study with a greater precision and easy adjustment.

The use of these tools allowed us, to concentrate our efforts in the process of information on engineering criteria generally applicable to any protection coordination in Substations, to choose the best option and setting of the different protection devices are installed based on their characteristics and standards coordination.

Key Words: *Substation Baba, Coordination of Protections, Load Flow Study, Short Circuit Study.*

1. Introducción

Uno de los principales factores de la evolución ha sido y es, la energía eléctrica, por esta razón la energía es el motor del desarrollo de la humanidad, debido a esto cualquier tipo de interrupción en el servicio de la energía eléctrica produce pérdidas económicas en el sector comercial e industrial y mucho malestar en los consumidores residenciales. Para evitar estos inconvenientes que se puedan dar, se utilizan diferentes elementos de protección en los sistemas de distribución

tales como fusibles, interruptores, reconectores, disyuntor.

No es suficiente tener instalados estos elementos de protección, para poder garantizar la calidad del servicio de la energía eléctrica, sino que se debe realizar la respectiva coordinación de estos elementos, con el fin de que si llegara a darse una falla en el sistema, ocurra un despeje rápido de esta, y la zona fallada sea mínima.

La coordinación de las protecciones eléctricas de la subestación de distribución Baba se la realizó con la ayuda de programas computacionales, tales como: Power World, CYMTCC 4.5.

El objetivo de este trabajo es realizar los ajustes, los cuales ya fueron implementados desde el día en que entró en operación esta subestación eléctrica, para así mejorar el sistema de protección de la subestación de ser necesario.

2. Descripción de las Instalaciones

La Subestación Baba tiene una capacidad de 10/12,5 MVA, a la fecha de construcción su costo ascendió a USD 1'106,373.34; está alimentada por la línea de subtransmisión a 69 KV Babahoyo-Baba que sale desde la subestación Nelson Mera, cuya inversión es de USD 987,929.00. El costo total de esta obra que fue financiada por el Gobierno Nacional es de USD 2'094,302.34.

La subestación Baba se encuentra ubicada en la parroquia Baba, el cantón Baba, provincia de Los Ríos. La subestación se encuentra limitada por los terrenos del Sr. Félix Salazar y los terrenos del Sr. Alberto Bajaña C. de la ciudadela el Paraíso. La subestación Baba tiene un perímetro de 218 m y un área de 2528.88 m².

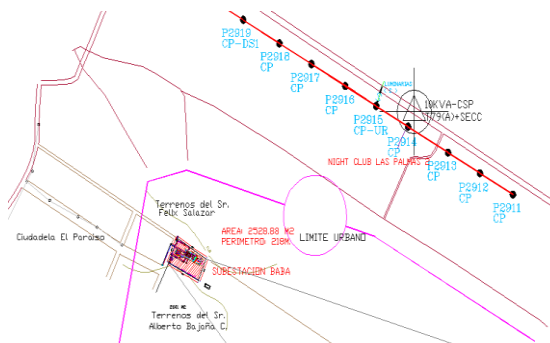


Figura 1: Ubicación geográfica de la Subestación Baba (Fuente CNEL LOS RÍOS)

En los exteriores de la garita de seguridad el suelo está cubierto con piedra chispa, y la subestación cuenta con un cerramiento de una pared armada con bloques de cemento.



Figura 2: Vista interior de la Subestación Baba



Figura 3: Vista exterior de la Subestación Baba

El transformador principal cuenta con una base de hormigón armado de 4,7 x 6,7 m. A los alrededores de la base de hormigón armado del transformador principal, del patio de 13,8 KV y del patio de 69 KV existe un electrocanal de 60 x 75 cm, que entra al cuarto de control y se ramifica otro electrocanal de 50 x 75 cm.

En la subestación existe una tubería subterránea de 4" rígida, que comunica a una caja de mampostería de 80 x 80 x 80 cm con una base de hormigón armado para un transformador padmounted trifásico de 50KVA.

Esta subestación cuenta con el servicio de agua potable, así como de la infraestructura para evacuar las lluvias y las aguas servidas.

Existen dos extintores en el cuarto de control, los cuales serán usados por el operador en caso de algún incendio.

La Subestación Baba está alimentada por la línea de subtransmisión a 69 KV Babahoyo-Baba que sale desde la subestación Nelson Mera. El punto de entrega de energía eléctrica que recibe la subestación Nelson Mera lo da Transelectric.

Los conductores de la línea Babahoyo-Baba es 300 ACAR cuya longitud es aproximadamente 15,7 kilómetros.

La S/E tiene 4 salidas instaladas, Alimentadoras: Tinoco, Baba, Progreso y Pimocha, las que actualmente

se encuentran operando. Sin embargo la estructura está construida para tener finalmente cinco salidas de ser necesario.

3. Estudios de Flujo de Carga

Para el estudio de flujo de carga de la subestación Baba, ha sido necesario hacer uso de la herramienta computacional Power World Simulator versión 18 licencia educacional.

El estudio de flujo de carga nos permite determinar los voltajes de las barras, la potencia consumida por la subestación y determinar si existe o no sobrecarga en la red de distribución.

3.1. Datos del Sistema

Es primordial establecer las características de cada uno de los equipos del sistema para el estudio de una Subestación de Distribución, tales como: transformador de fuerza, conductores, líneas y barras.

3.1.2 Datos del Transformador de Potencia

La subestación Baba dispone de un transformador de potencia de 69 / 13,8 KV, con una capacidad de 10/12,5 MVA, con una conexión delta – estrella sólidamente.

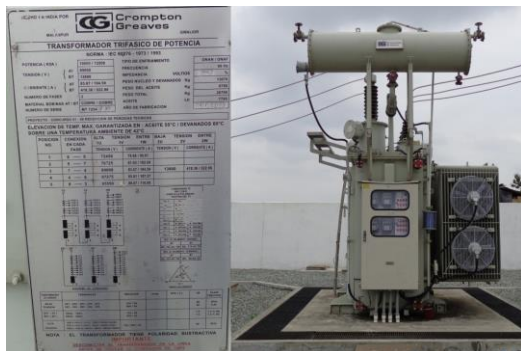


Figura 4: Transformador de Potencia de la S/E Baba con su respectiva placa de datos

Tabla 1: Características del Transformador de Potencia.

| Marca | (MVA) OA/FA | Z % | Peso total (Kg) | Tap en alta | Año de fabricación | Polaridad |
|------------------|-------------|------|-----------------|-------------|--------------------|-------------|
| Crompton Greaves | 10/12,5 | 9,43 | 26700 | 69 KV ± 5 % | 2009 | Sustractiva |

3.1.2 Datos de Líneas y Conductores

El conductor que utilizan en cada fase las alimentadoras Baba, Pimocha, Tinoco, Progreso es el ACAR 4/0, y en su neutro estas utilizan el ACAR 2/0.

Las características del conductor para las fases se muestran en la tabla:

Tabla 2: Impedancia del conductor ACAR 4/0

| ACAR 4/0 AWG Al/ Aleación de Al 4/3 | | | | | |
|-------------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Diámetro (mm) | Peso (kg/km) | Carga a la rotura (kg) | Resistencia eléctrica DC a 20 °C | Reactancia Inductiva (Ω/Km) | Reactancia capacitiva (MΩ-Km) |
| 13,25 | 295,1 | 2347 | 0,285 | 0,3128 | 0,1828 |

Las características del conductor para el neutro se muestran en la tabla:

Tabla 3: Impedancia del conductor 2/0

| ACAR 2/0 AWG Al/ Aleación de Al 4/3 | | | | | |
|-------------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Diámetro (mm) | Peso (kg/km) | Carga a la rotura (kg) | Resistencia eléctrica DC a 20 °C | Reactancia Inductiva (Ω/Km) | Reactancia capacitiva (MΩ-Km) |
| 10,51 | 185,6 | 1502 | 0,454 | 0,3303 | 0,1938 |

3.2. Criterios Adoptados para el Estudio

3.2.1 Flexibilidad Operacional

El sistema podrá funcionar mediante un suministro de energía proveniente de la línea de subtransmisión Nelson Mera a través de Transelectric sin ninguna restricción.

3.2.2 Niveles de Confiabilidad

El sistema debe proveer la continuidad del servicio y la alimentación a las instalaciones de las empresas y sectores que se alimenten a nivel de 13,8 KV en forma prioritaria, ante la existencia de falla de un elemento del sistema.

La subestación Baba presenta un nivel de confiabilidad bajo, debido a que posee una sola fuente de alimentación y al presentarse una falla en el sistema, este queda sin servicio. Para evitar esto se debe estudiar la posibilidad de instalar una segunda fuente de alimentación para aumentar el nivel de confiabilidad del sistema, aunque esto es costoso.

3.2.3 Niveles de Sobrecarga

No se aceptan sobrecarga en los elementos de distribución del sistema mayores a la cargabilidad establecida en las especificaciones técnicas.

Para el caso de los transformadores convencionales de fuerza, la carga no debe exceder su capacidad OA

(capacidad con enfriamiento por aceite y aire natural) o FA (capacidad con enfriamiento forzado).

3.2.4 Regulación de Voltaje

Los voltajes a nivel de barras del sistema, ante cualquier contingencia operativa, no deben exceder del 2,5 % del valor de la tensión nominal y tampoco pueden estar más de un 2,5 % por debajo de ella.

3.3. Análisis de Casos

En el presente análisis se consideran los siguientes casos para el estudio:

CASO 1: Estudios de flujo de carga – caso base carga máxima.

CASO 2: Estudios de flujo de carga – caso base carga mínima.

3.4. Resultados del Estudio de Flujo de Carga

Los resultados de flujo de carga serán presentados en forma gráfica por ser el método más conciso y usualmente más informativo. El flujo del sistema puede ser rápidamente analizado con la presentación gráfica y relacionar la configuración del sistema, condiciones operativas y resultados.

El análisis del flujo de carga muestra lo siguiente:

- Voltaje en barras.
- Consumo de las cargas
- Factor de Potencia.
- Requerimientos de potencia Reactiva.
- Carga sobre todos los conductores y transformadores, verificar que la carga este dentro de la capacidad de transmisión para condiciones normales y contingencias operativas.
- Ajustes de TAPS de los Transformadores.

3.4.1 Flujo de Carga – Demanda Máxima

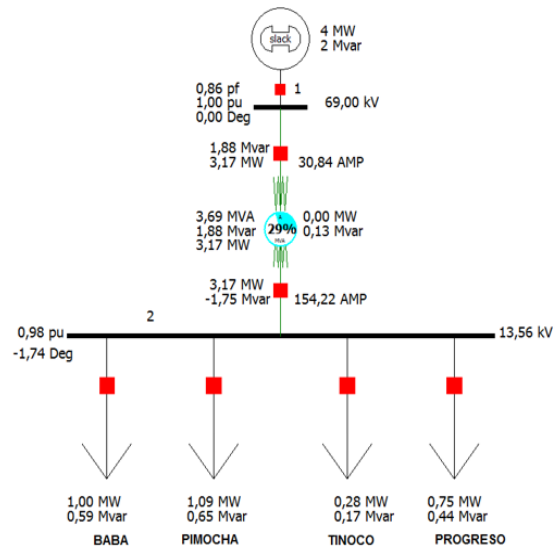


Figura 5: Flujo de Potencia de Carga Máxima

Tabla 4: Voltaje en las barras para Máxima Carga

| No | Nombre | Vnom (KV) | Voltaje (p.u.) | Fase | Voltaje (KV) |
|----|---------------|-----------|----------------|-------|--------------|
| 1 | Barra 69 KV | 69 | 1.00 | 0,00 | 69 |
| 2 | Barra 13,8 KV | 13,8 | 0.98 | -1,74 | 13,56 |

Tabla 5: Cargas Máximas y Factor de Potencia en cada alimentadora

| Nombre del alimentador | MW | MVAR | MVA | Factor de Potencia |
|------------------------|------|------|------|--------------------|
| BABA | 1,00 | 0,58 | 1,15 | 0,86 |
| MAPAN | 1,09 | 0,64 | 1,26 | 0,86 |
| TINOCO | 0,28 | 0,16 | 0,32 | 0,86 |
| PROGRESO | 0,75 | 0,44 | 0,87 | 0,86 |

El flujo de potencia para carga máxima no excede el 29% de la capacidad en FA (12,5 MVA) del transformador de potencia con sus cuatro Alimentadoras operando y la caída de voltaje como cargabilidad de los conductores están dentro de los rangos permitidos en las normas técnicas de distribución.

3.4.2 Flujo de Carga – Demanda Mínima

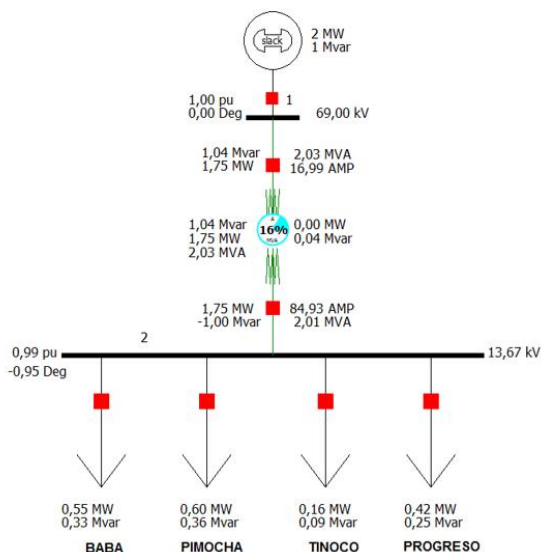


Figura 6: Flujo de Potencia de Carga Mínima

Tabla 6: Voltaje en las barras para Mínima Carga

| No | Nombre | V. Nom (KV) | Voltaje (p.u.) | Fase | Voltaje (KV) |
|----|---------------|-------------|----------------|-------|--------------|
| 1 | Barra 69 KV | 69 | 1,00 | 0,00 | 69 |
| 2 | Barra 13,8 KV | 13,8 | 0,99 | -0,95 | 13,67 |

Tabla 7: Cargas Mínimas y Factor de Potencia en cada alimentadora

| Nombre del alimentador | MW | MVAR | MVA | Factor de Potencia |
|------------------------|------|------|------|--------------------|
| BABA | 0,55 | 0,32 | 0,64 | 0,86 |
| MAPAN | 0,60 | 0,35 | 0,70 | 0,86 |
| TINOCO | 0,16 | 0,09 | 0,18 | 0,86 |
| PROGRESO | 0,42 | 0,24 | 0,48 | 0,86 |

El flujo de potencia para carga mínima no excede el 16% de la capacidad en FA (12,5 MVA) del transformador de potencia con sus cuatro Alimentadoras operando y la caída de voltaje como cargabilidad de los conductores están dentro de los rangos permitidos en las normas técnicas de distribución.

4. Estudios de Cortocircuito

En el análisis de cortocircuito, las fallas del sistema se manifiestan como condiciones anormales de operación que nos podrían conducir a uno de los siguientes fenómenos:

- Indeseables flujos de corriente.
- Presencia de corrientes de magnitudes exageradas que podrían dañar los equipos.
- Caída de voltajes en la vecindad de la falla que puede afectar adversamente la operación de las máquinas rotatorias.
- Creación de condiciones peligrosas para la seguridad del personal.

Se realiza el estudio de cortocircuito del sistema de la subestación eléctrica Baba con el fin de resolver las situaciones críticas señaladas, y obtener la información básica para la coordinación de las protecciones.

Los estudios de cortocircuito tienen los siguientes objetivos:

- Determinar el efecto de las corrientes de falla en los componentes del sistema tales como: cables, barras y transformadores durante el tiempo que persista la falla.
- Determinar las zonas del sistema en donde la falla puede resultar en depresión inaceptable de voltajes.
- Determinar el ajuste de los equipos de protección, los cuales son establecidos considerando el sistema bajo condiciones de falla.

4.1. Alcance de los Estudios de Cortocircuito

Considerando que el sistema de distribución de la subestación Baba se caracteriza por ser un sistema típicamente aterrizado, el estudio de cortocircuito considera los siguientes tipos de falla:

- Falla trifásica a tierra
- Falla de línea a tierra

La falla trifásica a tierra es a menudo, para este tipo de sistema, la más severa de todas, por esta razón es costumbre simular solamente la falla trifásica cuando se busca las magnitudes máximas de corriente de falla; sin embargo se analizará la corriente de falla en todos sus casos posibles, es decir, a parte de las fallas mencionadas también se analizará la falla de línea a línea y la falla de dos línea a tierra. Además se verificará que la corriente de falla a tierra no exceda la corriente trifásica.

4.2. Datos del sistema

4.2.1. Impedancia equivalente en el punto de entrega de CNEL

CNEL matriz nos ha entregado los MVA de cortocircuito y las impedancias de Thévenin en la barra de interconexión a 69 KV de la subestación de distribución Baba, tanto para máxima como para mínima generación. La información ha sido trasladada a la base de 100 MVA y 69 KV.

Tabla 8: Impedancias equivalentes de máxima generación para 69 KV

| Tipo de Impedancia | R(p.u.) | X(p.u.) | R + jX (Ω) | X/R |
|--------------------|---------|---------|-----------------|--------|
| Positiva | 0,0908 | 0,3934 | 4,3230+j18,7298 | 4,3326 |
| Negativa | 0,0908 | 0,3934 | 4,3230+j18,7299 | 4,3326 |
| Cero | 0,1840 | 0,7162 | 8,7602+j34,0983 | 3,8924 |

Tabla 9: Impedancias equivalentes de mínima generación para 69 KV

| Tipo de Impedancia | R(p.u.) | X(p.u.) | R + jX (Ω) | X/R |
|--------------------|---------|---------|-----------------|--------|
| Positiva | 0,0931 | 0,4159 | 4,4325+j19,8010 | 4,4672 |
| Negativa | 0,0931 | 0,4159 | 4,4325+j19,8011 | 4,4672 |
| Cero | 0,1761 | 0,7293 | 8,3841+j34,7220 | 4,1414 |

4.2.2. MVA de Cortocircuito

Los MVA de Cortocircuito son datos proporcionados por CNEL LOS RÍOS:

Tabla 10: MVA de cortocircuito para máxima generación

| Tipo de falla | MVA de Cortocircuito |
|---------------|----------------------|
| LLL | 436,85 |
| LG | 157,8 |

Tabla 11: MVA de cortocircuito para mínima generación

| Tipo de falla | MVA de Cortocircuito |
|---------------|----------------------|
| LLL | 364,56 |
| LG | 134,41 |

4.2.3. Datos de Conductores

Los conductores son elementos pasivos en el análisis de cortocircuito, además las características técnicas de estos son similares a las aplicadas en los estudios de flujo de carga.

4.2.4. Datos del Transformador de Potencia

Los Transformadores de Fuerza también son elementos pasivos en el análisis de cortocircuito, al igual que los conductores, además sus características

técnicas también son similares a las aplicadas en los estudios de flujo de carga.

4.3. Resultados del Estudio de Cortocircuito

Las corrientes de cortocircuito han sido calculadas considerando los criterios técnicos indicados en la sección 2.3. La falla trifásica a tierra, la línea a tierra, dos líneas a tierra, y la línea a línea se aplica a cada barra del sistema.

4.3.1. Corriente de Falla – Máxima Carga

Tabla 12: Corrientes de cortocircuitos de máxima carga para 69 KV

| Tipo de Falla | I _{cc} a 69 KV [A] | I _{cc} a 69 KV (p.u) | Ángulo (deg) | Capacidad de cortocircuito (MVA) |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------------|
| LLL | 2101,34 | 2,511 | -76,22 | 251,13 |
| LG | 1634,45 | 1,953 | -75,92 | 195,34 |
| LL | 1819,81 | 2,175 | -166,22 | 217,49 |
| LLG | 1337,29 | 1,598 | 104,27 | 159,82 |

Tabla 13: Corrientes de cortocircuitos de máxima carga para 13,8 KV

| Tipo de Falla | I _{cc} a 13,8 KV [A] | I _{cc} a 13,8 KV (p.u) | Ángulo (deg) | Capacidad de cortocircuito (MVA) |
|---------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------|----------------------------------|
| LLL | 3163,14 | 0,756 | -85,50 | 378,03 |
| LG | 3485,70 | 0,833 | -87,16 | 416,58 |
| LL | 2739,36 | 0,655 | -175,50 | 327,39 |
| LLG | 3877,18 | 0,927 | 90,80 | 463,37 |

4.3.2. Corriente de Falla – Mínima Carga

Tabla 14: Corrientes de cortocircuitos de mínima carga para 69 KV

| Tipo de Falla | I _{cc} a 69 KV [A] | I _{cc} a 69 KV (p.u) | Ángulo (deg) | Capacidad de cortocircuito (MVA) |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------------|
| LLL | 1975,18 | 2,361 | -77,03 | 236,06 |
| LG | 1571,35 | 1,878 | -76,75 | 187,79 |
| LL | 1710,55 | 2,044 | -167,03 | 204,43 |
| LLG | 1304,60 | 1,559 | 103,44 | 155,91 |

Tabla 15: Corrientes de cortocircuitos de mínima carga para 13,8 KV

| Tipo de Falla | I _{cc} a 13,8 KV [A] | I _{cc} a 13,8 KV (p.u) | Ángulo (deg) | Capacidad de cortocircuito (MVA) |
|---------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------|----------------------------------|
| LLL | 3090,99 | 0,739 | -85,74 | 369,41 |
| LG | 3432,75 | 0,821 | -87,09 | 410,25 |
| LL | 2676,88 | 0,640 | -175,74 | 319,92 |
| LLG | 3856,45 | 0,922 | 91,21 | 460,89 |

5. Protección de la Subestación de distribución

Los principales objetivos de un sistema de protección son:

- Proteger efectivamente a las personas u operadores, y los equipos que conforman el sistema de potencia.
- Reducir la influencia de las fallas eléctricas sobre las líneas y los equipos del sistema de potencia.
- Cubrir de manera ininterrumpida el Sistema de Potencia, estableciendo vigilancia ante la presencia de alguna anomalía el 100% del tiempo.
- Detectar condiciones de falla monitoreando continuamente las variables del sistema de potencia (corriente, voltaje, potencia, frecuencia, impedancias).

A continuación se muestra el proceso de protección del Sistema de Potencia de fallas o condiciones anormales que se presentan en el mismo:

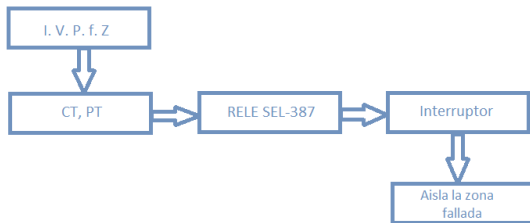


Figura 7: Proceso de protección del sistema de potencia

Por medio de los transformadores de medida (CT y PT), se detecta la falla, cuya señal pasa al relé SEL-387 de la subestación BABA que mandará una señal al interruptor para que aíse la zona afectada.

5.1. Esquema de Protección

El esquema de protecciones del transformador de potencia de la subestación Baba comprende el relé SEL-387 que sirve para su protección primaria y la protección secundaria de la red.

En el siguiente diagrama unifilar de la subestación BABA, se puede observar que las alimentadoras cuentan con su respectiva protección, en este caso reconectadores.

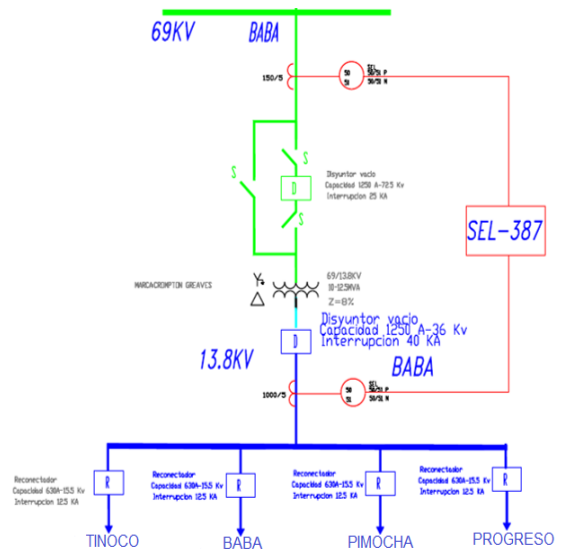


Figura 8: Diagrama Unifilar de la S/E Baba

La coordinación o ajuste de las protecciones eléctricas se debe realizar desde el punto de carga más lejana, es decir, partiendo de aguas abajo, hacia la subestación. Por lo que si los elementos eléctricos en estudio están correctamente coordinados o ajustados se garantiza reducir la salida de servicio de las cargas si existiera una falla eléctrica, en caso de que la falla no sea temporal o la protección no opere en el momento adecuado, el elemento consecutivo de protección debe proveer respaldo, así, se logra un sistema dominó o cascada de protección, donde el último elemento eléctrico a proteger es el transformador aquel que me suministra la energía total a las cuatro alimentadoras.

5.2. Protección del Transformador de Potencia

A continuación se muestra un resumen del ajuste de la protección diferencial 87.

Tabla 16: Resumen de Ajuste del Relé Diferencial 87

| Transformador 10/12,5 MVA | |
|-----------------------------|--------------|
| Alta Tensión | |
| Conexión en Alta | Delta |
| Corriente nominal en alta | 104,59 [A] |
| Relación de CT | 150:5 |
| Corriente en secundario CT | 3,49 [A] |
| Corriente pickup alta (TAP) | 3,5 [A] |
| Baja Tensión | |
| Conexión en Baja | Y aterrizado |

| | |
|------------------------------------|------------|
| Corriente nominal en baja | 522,96 [A] |
| Relación de CT | 1000:5 |
| Corriente en secundario CT | 2,61 [A] |
| Corriente pickup baja (TAP) | 4,6 [A] |
| Error | |
| Error por TAP | 10% |
| Error por CT | 5% |
| Mismatch | 1,48% |
| Error por Inrush | 5% |
| Ajuste | |
| Pickup mínimo 87T | 0,2[A] |
| Pendiente 87T | 30% |

6. Coordinación de las Protecciones

Con el fin de minimizar los problemas que producen las fallas, además de mejorar la continuidad de servicio, se debe proporcionar un sistema de protección bien diseñado y correctamente coordinado.

La coordinación debe partir desde aguas abajo, esto es, se debe coordinar desde la carga más lejana hacia la subestación, con el fin de minimizar la salida de las cargas ante la presencia de una falla. Si ocurriese una falla el sistema la protección debe ser capaz de detectarlo inmediatamente y aislar la zona afectada, permitiendo que el resto del sistema funcione sin ningún inconveniente, es decir el sistema de protección debe ser selectivo, en caso de que la falla persista y el elemento de protección no opere (protección primaria), el elemento que le sigue debe proveer respaldo.

La coordinación de las protecciones de la subestación Baba, se la realizará con la herramienta computacional CYMTCC 4.5 Rev. 13, la cual consta de diversos equipos de protección de diferentes fabricantes, esto nos permitirá hacer la coordinación de las protecciones de sobrecorriente sin ningún problema.

6.1 Esquema de Protecciones

El esquema de protecciones de la subestación Baba dispone del relé SEL-387 para protección primaria del transformador y secundaria de la red, la cual frente a una falla ordena la apertura a los contactos del interruptor.

Entre las barras principales y de transferencia se observa el reconectador SIEMENS, modelo 3AD3222-

2BA51-2AA3, con su respectivo controlador SIEMENS Reyrolle 7SR224

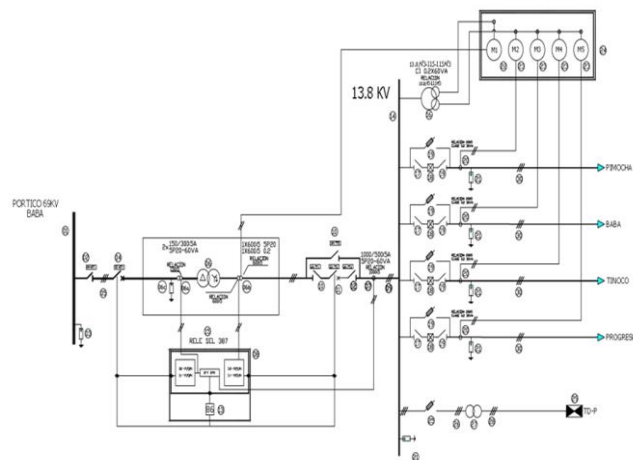


Figura 9: Diagrama de Protecciones de la S/E Baba

6.2. Ajuste de protección de sobrecorriente tiempo inverso de fase 51P

Tabla 17: Ajuste del 51P en el lado de baja tensión

| RELÉ SIEMENS | |
|-------------------------------|----------|
| I carga máxima | 522,96 A |
| I sobrecarga (10%) | 575,3 A |
| I pick up(primario) | 575,3 A |
| I pick up (secundario) | 2,88 A |
| TD | 1,21 |

Tabla 18: Ajuste del 51P en el lado de alta tensión

| RELÉ SIEMENS | |
|-------------------------------|----------|
| I carga máxima | 104,59 A |
| I sobrecarga (10%) | 115,1 A |
| I pick up(primario) | 115,1 A |
| I pick up (secundario) | 3,84 A |
| TD | 1,85 |

6.3 Ajuste de la protección de sobrecorriente instantáneo de fase (50P)

Para este ajuste se debe considerar una corriente de por lo menos 1 a 1,2 veces la corriente máxima de falla. Para que la protección de sobrecorriente instantáneo de fase actúe cuando se produce la corriente de falla consideraremos el valor de 1, entonces a nivel de 13,8 KV tenemos en el lado primario del CT una corriente de:

$$I_p = 1 * I_{falla\ maxima\ 13,8\ KV}$$

$$I_p = 1 * 3485,74$$

$$I_p = 3485,74 [A]$$

6.4 Ajuste de la protección de sobrecorriente tiempo de inverso de tierra 51G

El ajuste del tap del 51G se lo hace según la norma C37.91.2008, el cual nos indica que debe ser 10% de la corriente de plena carga.

Tabla 19: Ajustes del 51G en el lado de baja tensión

| RELÉ SIEMENS | |
|----------------------------|----------|
| I carga máxima | 522,96 A |
| I primaria de tierra (10%) | 52,3 A |
| I pick up(primario) | 52,3 A |
| I pick up (secundario) | 0,26 A |
| TD | 6,3 |

Tabla 20: Ajustes del 51G en el lado de alta tensión

| RELÉ SIEMENS | |
|------------------------|----------|
| I carga máxima | 104,59 A |
| I sobrecarga (10%) | 10,5 A |
| I pick up(primario) | 10,5 A |
| I pick up (secundario) | 0,35 A |
| TD | 10 |

6.5 Coordinación del Reconector

Debido a que el simulador no cuenta con el reconector siemens con controlador Reyrolle, se usó las curvas de un reconector de iguales características, que por normalización son iguales al del Siemens con

controlador Reyrolle, este es el reconector Siemens con controlador Centurion.

Para determinar la corriente de carga del circuito, se consideró la carga máxima posible ante la posibilidad de una transferencia de carga, lo cual se puede dar ante una falla o desconexión de una de las alimentadoras.

Tabla 21: Ajustes de la función de fase del reconector

| | |
|------------------------------------|------------|
| I carga máxima en la alimentadora | 52,71 [A] |
| Factor | 200% |
| I puesta en trabajo | 105,43 [A] |
| I mínima de despeje del reconector | 140 [A] |

Para cada alimentadora se seleccionó una curva rápida y una lenta con el objetivo de tener el menor tiempo posible sometido al transformador a una corriente de falla, fue seleccionada la curva rápida 101 y la curva lenta 117 debido a que el tiempo de coordinación entre los dispositivos de protección (relé y reconector) debe estar entre 0,20 y 0,25 segundos, aunque normalmente el margen de coordinación que típicamente se utiliza es 0,2 segundos.

Para garantizar la sensibilidad ante corrientes de falla a tierra se hace uso del elemento de tierra del reconector. Generalmente se emplea una corriente para la función de tierra del 40 al 50% de la corriente de ajuste.

Por lo tanto seleccionaremos una corriente de pickup del reconector para la función de tierra del 50% del ajuste de fase, lo cual nos da un valor de 70 [A], con este ajuste evitamos operaciones innecesarias por desbalances o por operaciones de elementos aguas abajo.

Tabla 22: Ajustes de la función de tierra del reconector

| | |
|---|-------------------------------------|
| I mínima de despeje del reconector del elemento de fase | 140[A] |
| Factor | 50% del ajuste del elemento de fase |
| I mínima de despeje del reconector | 70[A] |

Se elegirá la curva rápida 101 y la curva lenta 102.

6.6 Resultados de la Coordinación de la Subestación y la Red de Distribución

La coordinación de la protección de la subestación y la red de distribución consiste en coordinar el

reconector, el relé de sobrecorriente en el lado de baja, el de alta y la curva de daño del transformador de potencia. Se procederá a coordinar con la alimentadora que tiene la mayor carga, la cual es Pimocha, las otras alimentadoras tendrán la misma coordinación debido a que la carga de estas va a tender a crecer.

6.6.1. Coordinación de la alimentadora Pimocha

En la figura 10 se muestra los resultados de la coordinación de las protecciones de la alimentadora Pimocha.

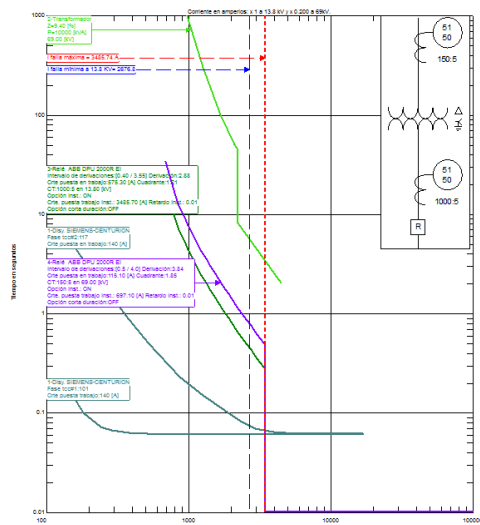


Figura 10: Curvas de equipos de protección de la alimentadora Pimocha.

6.6.2. Coordinación de la alimentadora Baba

En la figura 11 se muestra los resultados de la coordinación de las protecciones de la alimentadora Baba.

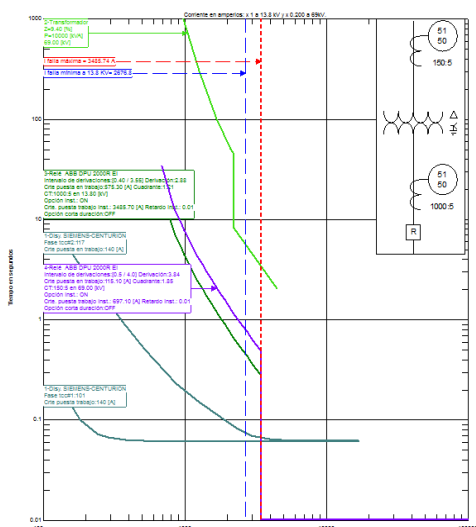


Figura 11: Curvas de equipos de protección de la alimentadora Baba.

6.6.3. Coordinación de la alimentadora Tinoco

En la figura 12 se muestra los resultados de la coordinación de las protecciones de la alimentadora Baba.

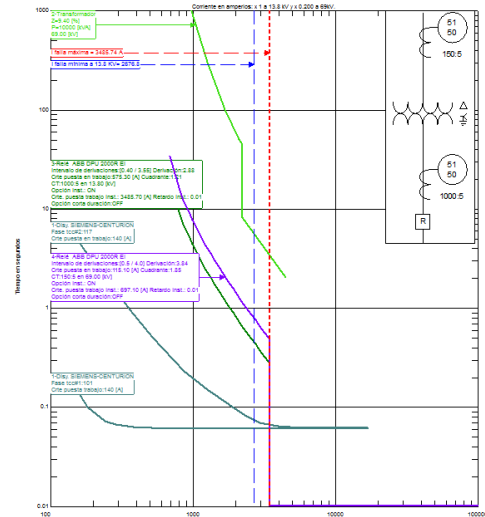


Figura 12: Curvas de equipos de protección de la alimentadora Tinoco.

6.6.4. Coordinación de la alimentadora Progreso

En la figura 13 se muestra los resultados de la coordinación de las protecciones de la alimentadora Baba.

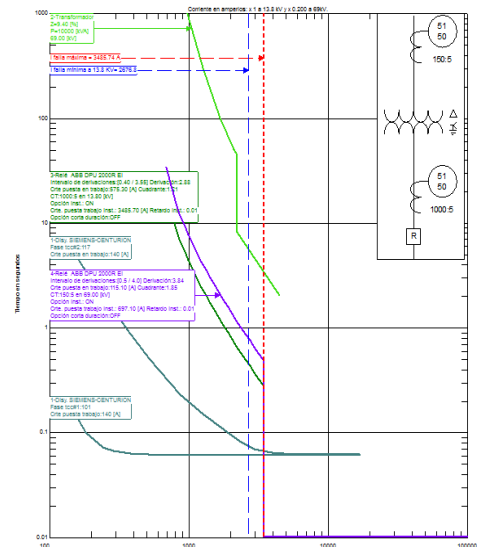


Figura 13: Curvas de equipos de protección de la alimentadora Progreso.

6.6.5. Coordinación de los relés de sobrecorriente para falla a tierra

En la figura 14 se muestra los resultados de la coordinación de los relés de sobrecorriente para falla a tierra, para ello se utilizó la función de tierra del reconectador, este ajuste se hace para cada una de las alimentadoras.

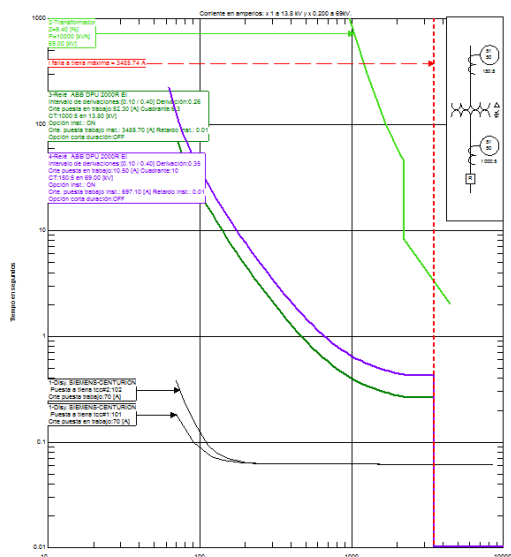


Figura 14: Curvas de los relés de sobrecorriente para falla a tierra.

6.6.6. Resumen de los Ajustes de la Coordinación

En la tabla 23 se muestra el resumen de los ajustes realizados de los equipos de protección de la Subestación Eléctrica Baba.

Tabla 23: Ajustes de los equipos de protección de la Subestación Eléctrica Baba

| Tipo | KV LL | Inom [A] | Relación del CT | I ajuste primario | I ajuste | Tipo de curva | TD |
|-----------------------------|-------|----------|-----------------|-------------------|----------|---------------|------|
| 51 P ALTA FASE | 69 | 104,59 | 150/5 | 115,1 | 3,84 | E.I | 1,85 |
| 51 P BAJA FASE | 13,8 | 522,96 | 1000/5 | 575,3 | 2,88 | E.I | 1,21 |
| 50 P ALTA | 69 | 697,15 | 150/5 | 697,15 | 23,24 | INST | - |
| 50 P BAJA | 13,8 | 3485,74 | 1000/5 | 3485,74 | 17,43 | INST | - |
| 51 G ALTA TIERRA | 69 | 104,59 | 150/5 | 10,5 | 0,35 | E.I | 10 |
| 51 G BAJA TIERRA | 13,8 | 522,96 | 1000/5 | 52,3 | 0,26 | E.I | 6,3 |
| RECONECTADOR FUNCIÓN FASE | 13,8 | 52,71 | 1000/5 | 140 | 0,7 | 101-117 | 1 |
| RECONECTADOR FUNCIÓN TIERRA | 13,8 | 52,71 | 1000/5 | 70 | 0,35 | 101-102 | 1 |

7. Conclusiones

- La potencia que consumen el conjunto de alimentadoras es de 3,17 MW y 1,75 MVAR para

carga máxima, mientras que para carga mínima los valores corresponden a 1,75 MW y 1,0 MVAR.

- El transformador de potencia de la Subestación, cuando opera en condiciones de carga máxima tiene un porcentaje de cargabilidad del 29% de la capacidad FA y cuando opera en condiciones de carga mínima el porcentaje de cargabilidad que presenta el transformador es del 16% de la capacidad FA .
- Los diferentes tipos de falla que fueron simuladas en cada barra del sistema, esto es en la barra de 69 KV y en la barra de 13,8 KV, nos permiten establecer lo siguiente:

En la barra de 13,8 KV la corriente de falla de dos líneas de tierra para máxima carga es 3877,18 [A], la cual es mayor que la corriente de falla de línea a tierra, la cual tiene un valor de 3485,74 [A], sin embargo al considerar la corriente que circula por cada fase se comprueba que la falla de línea a tierra es la mayor.

En el lado de alta tensión 69 KV, la corriente de falla máxima la produce la falla trifásica con un valor de 2101,34 [A] y la corriente de falla mínima es producida por la falla de línea a tierra con un valor de 1571,35 [A].

- En el lado de baja tensión 13,8 KV la corriente de falla máxima es producida por la falla de línea a tierra, la cual es 3485,70 [A] y la falla mínima es producida por la falla de línea a línea la cual es 2676,8 [A].
- El correcto ajuste de las protecciones eléctricas de una subestación en este caso es primordial, con el único fin de reducir la influencia de las fallas eléctricas sobre las líneas y los equipos del sistema de potencia, manteniendo una operación del sistema eléctrico dentro de sus parámetros establecidos.
- El empleo de una protección diferencial con una pendiente dual es fundamental, ya que si no se tomara en cuenta una segunda pendiente, al existir la presencia de una falla externa fuera de la zona de protección del relé diferencial, se produciría una falsa operación del relé.
- La protección diferencial y de secuencia negativa no se coordinan, solamente se realizan los ajustes

a estas protecciones eléctricas internamente en el relé.

- Para la coordinación de los elementos de protección se consideró un tiempo de coordinación de aproximadamente 0,20 segundos.
- Cada alimentadora presenta la misma coordinación debido a que estas van a tender a crecer, por esta razón solo fue necesaria la coordinación con la alimentadora Pimocha, esta es la que tiene mayor carga actualmente, además en la coordinación se consideró la posibilidad de una transferencia de carga entre alimentadoras.

8. Recomendaciones

- Para evitar que operen las protecciones de la subestación, debido a fallas de línea a tierra que se producen por el contacto de pájaros y de sus nidos en el barraje de 69 KV, se recomienda hacer limpieza de este con mayor frecuencia, y así evitar que operen las protecciones por este motivo, y de ser necesario poner un cerramiento un poco más alto a la subestación para evitar que otros animales ingresan y provoquen fallas.

9. Referencias

[1] Blackburn, J Lewis – Protective Relaying Principles and Applications. Editorial Marcel Dekker: New York 1987.

[2] Manual de instrucciones del Relé SEL-387. Schweitzer Engineering Laboratories Inc.

[3] McGraw-Edison Company, Manual Overcurrent Protection for Distribution System, Power System Division.

[4] IEEE Std 242.2001, IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems

[5] J. Lewis Blackburn, Protective Relaying: Principles and Applications, tercera edición.

[6] McGraw-Edison Company, Manual Overcurrent Protection for Distribution System, Power System Division.

[7] IEEE Std. C37.91-2008, IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformer.