

Reducción de Sistemas de Potencia Mallados para Estudios de Estado Estable – Casos Aplicados

Antonio Fonseca A.
CELEC EP – Transelectric

Resumen

Este documento plantea un procedimiento para la determinación de equivalentes de redes malladas de Sistemas Eléctricos de Potencia mediante el uso de fallas simultáneas. Los equivalentes establecidos son válidos para estudios de Estado Estable y son calculados mediante software de simulación eléctrica.

Adicionalmente, se plantea una validación del procedimiento propuesto, para los equivalentes en los puntos de entrega de la Empresa Eléctrica Quito, en este caso se observa también el manejo de equivalentes entre diferentes niveles de voltaje.

El análisis parte de una descripción general de la matriz Z_{Barra} y de la técnica de fallas simultáneas, establece el cálculo del equivalente de un sistema mallado y su modelamiento mediante software comercial.

Palabras Clave.- Reducción de redes, equivalentes Thevenin, redes malladas, cortocircuitos simultáneos, estudios de estado estable.

I. INTRODUCCIÓN

LOS estudios de Estado Estable de un sistema eléctrico de potencia (SEP), generalmente corresponden a análisis de flujos de potencia y análisis de fallas. Los análisis de flujos de potencia son utilizados para determinar un punto de operación del SEP en condiciones de abastecimiento normal de carga, mientras que los análisis de fallas determinan, los niveles de voltajes y corrientes que los elementos del SEP soportarán en condiciones de desbalance como cortocircuitos o conductores abiertos.

En cualquiera de estos análisis, el SEP es tratado mediante un modelo de red fasorial, que generalmente consiste en un circuito eléctrico formado por impedancias y fuentes ideales, en cantidad proporcional al número de barras existentes en el SEP.

Para análisis de estado estable, y bajo ciertas condiciones, resulta un inconveniente el modelamiento de todo el SEP, por lo es de gran utilidad la transformación del mismo hacia un sistema equivalente, de menor tamaño y fácil utilización.

Los sistemas equivalentes determinados, dependerán de los puntos en los que se requiere reducir el SEP original. Si el punto de reducción corresponde a un extremo radial del SEP, el

equivalente será un circuito Thevenin básico formado por una fuente ideal y una impedancia serie.

El escenario es diferente cuando entre los puntos de análisis se presenta una topología mallada, lo que implica la determinación de equivalentes mucho más detallados.

Este proceso de reducción de redes, presenta un grado de complejidad relativamente bajo si existe la información de la Matriz de Impedancias de Barra Z_{Barra} , en la cual se representan los comportamientos equivalentes del SEP para cada barra del mismo.

Sin embargo, esta información no suele ser reportada abiertamente en los programas de software comercial, lo que limita la posibilidad de realizar análisis adicionales a menos que se realice sobre la misma base original del SEP; este limitante se incrementa cuando estas bases originales, creadas en un software inicial, son reportadas en formatos propietarios que no son compatibles con los estándares establecidos internacionalmente.

Por otra parte, la técnica de fallas simultáneas basa su procedimiento mediante la superposición de las respuestas individuales de dos condiciones asimétricas, es decir que establece una respuesta equivalente entre dos puntos del SEP. Mediante este concepto es posible obtener la información complementaria para la determinación de sistemas equivalentes de redes malladas.

II. CONCEPTOS BASICOS

De manera general, los análisis de un SEP implican el cálculo de voltajes y corrientes bajo un cierto grupo de condiciones. En función del tipo de análisis planteado, las relaciones entre estas variables pueden corresponder a ecuaciones algebraicas o diferenciales.

Los análisis de estado estable, consideran que las variables del SEP pueden ser determinadas mediante el uso de ecuaciones algebraicas. La solución de estas ecuaciones permite establecer una “fotografía” del comportamiento del sistema en un momento específico, que puede corresponder a condiciones normales o de falla.

En el planteamiento de estas ecuaciones algebraicas, se establece que las variables serán determinadas en el dominio de la frecuencia, es decir que los diferentes elementos del SEP se modelan mediante impedancias calculadas a la frecuencia nominal del sistema.

Para el objetivo planteado, el SEP se modelará mediante impedancias relacionadas mediante ecuaciones algebraicas, correspondiendo de esta manera al modelo de Impedancia de Barra Z_{Barra} .

A. MODELO DE RED MEDIANTE Z_{Barra}

a. Matriz de Impedancia de Barra $Z_B [1,2]$

La matriz de impedancias de barra permite determinar los voltajes de barra de un sistema de potencia en función de las corrientes de inyección al sistema en cada barra.

$$V_B = Z_B \cdot I_B \quad (1)$$

Partiendo del sistema de 3 barras indicado en la Fig. 1, se tiene la relación matricial (2).

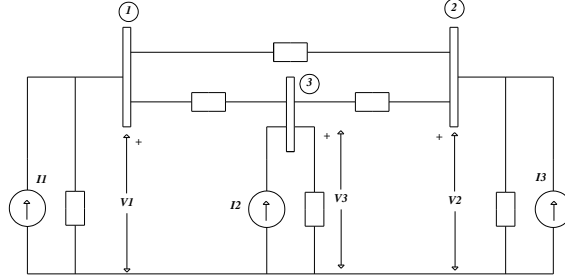


Fig. 1 Sistema eléctrico de 3 barras

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Considerando las barras 2 y 3 en circuito abierto, y en la barra 1 aplicada una fuente de corriente, se obtiene el circuito de la Fig. 2, con el sistema de ecuaciones indicado en (3).

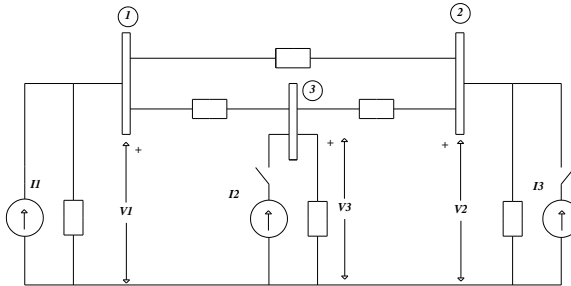


Fig. 2 Sistema eléctrico de 3 barras con inyección de corriente en barra 1

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{aligned} V_1 &= Z_{11} \cdot I_1 \\ V_2 &= Z_{21} \cdot I_1 \\ V_3 &= Z_{31} \cdot I_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Esta condición permite definir los elementos de la matriz de impedancias de barra Z_B relacionados con la barra 2. Además se observa que estos elementos determinan los valores de voltajes en todo el sistema al aplicarse una corriente en un punto del mismo.

Cuando las corrientes de barra cambian a nuevos valores, los voltajes que se presentan en el sistema se pueden determinar mediante (4).

$$V_B = Z_B \cdot (I_0 + \Delta I) = Z_B \cdot I_0 + Z_B \cdot \Delta I = V_0 + \Delta V \quad (4)$$

Para un sistema de "n" barras, considerando el término correspondiente al incremento de corriente ΔI se obtiene el incremento en los voltajes de barra de todo el SEP (5).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2k} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \vdots \\ \Delta I_k \\ \vdots \\ \Delta I_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Considerando la Fig. 3, es posible plantear la condición de una falla trifásica en el nodo k.

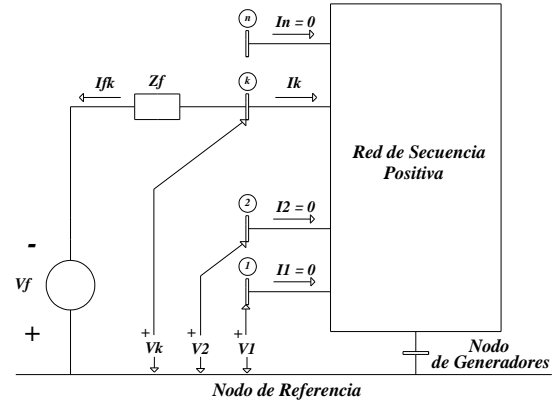


Fig. 3 Diagrama para la determinación de fallas trifásicas

En este diagrama la condición de falla se produce al aplicar una fuente de igual magnitud pero con la polaridad inversa a la existente en el punto de falla. En esta condición las corrientes en los restantes nodos son cero, situación que se cumple en la definición de la matriz de Impedancias de Barra Z_B . Por lo tanto los incrementos de voltaje que se producen en el sistema se determinan mediante (6).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ Z_f \cdot I_f - V_f \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2k} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Es decir que para el nodo k, se cumple la relación (7).

$$Z_f \cdot I_f - V_f = -Z_{kk} \cdot I_f \quad (7)$$

De donde se establece que la corriente de falla trifásica puede determinarse mediante la relación directa de (8).

$$I_f^k = \frac{V_f}{Z_{kk} + Z_f} \quad (8)$$

Se observa que la matriz Z_B contiene la información equivalente del SEP para cada barra del mismo. Esta propiedad, aplicada a la red de secuencia positiva, se hace extensiva para las redes eléctricas de secuencia negativa y cero por la característica lineal de las mismas.

b. Análisis de Desbalances y Equivalentes de Thevenin desde Z_B

Mediante la información de Z_B , es posible plantear circuitos equivalentes para condiciones de cortocircuito o de conductor abierto.

En la Fig.4 y Fig.5 se indican los diagramas de circuito trifásico y su equivalente de secuencia positiva, para la condición de desbalance por cortocircuito [2].

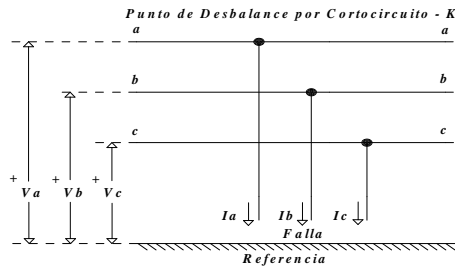


Fig. 4 Diagrama de Circuito para Cortocircuito

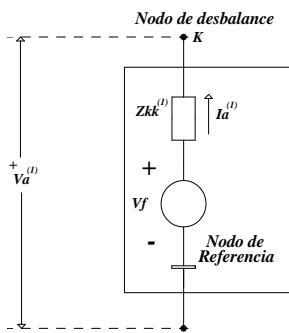


Fig. 5 Equivalente de Secuencia Positiva para Cortocircuito

Para la condición de desbalance por conductor abierto, se indican en la Fig.6 y Fig.7, el diagrama de circuito trifásico y su equivalente de secuencia positiva [2].

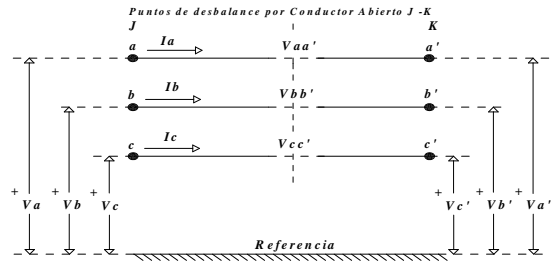


Fig. 6 Diagrama de Circuito para Conductor Abierto

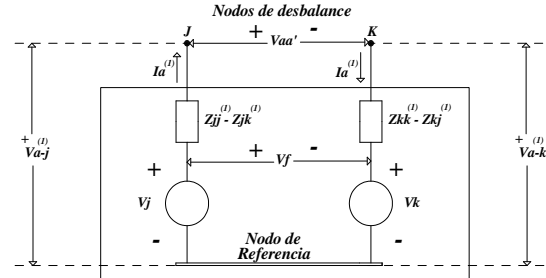


Fig. 6 Equivalente de Secuencia Positiva para Conductor Abierto

Todas las impedancias de las Fig.5 y Fig.6, corresponden a los elementos de las filas-columnas "j" y "k" de la matriz Z_B . De igual manera, estos equivalentes se determinan para las redes de secuencia negativa y cero, que por ser redes pasivas no contienen fuentes internas en su circuito equivalente.

Los equivalentes descritos hasta aquí, establecen el comportamiento del SEP entre dos puntos del mismo. Para el caso de cortocircuitos estos puntos corresponden a la barra fallada y la barra de referencia, Fig.7; en el caso de conductor abierto los puntos corresponden a dos barras del sistema donde se produce la apertura de fases, Fig.8.

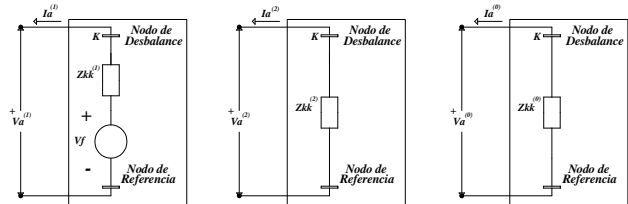


Fig. 7 Equivalentes de Cortocircuito - Redes de Secuencia 1,2 y 0

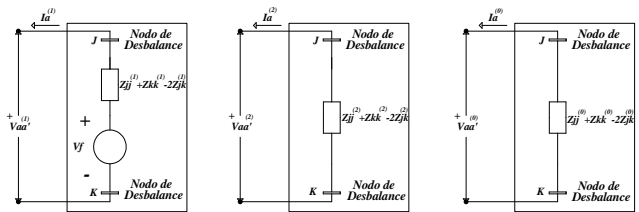


Fig. 8 Equivalentes de Conductor Abierto, Redes de Secuencia 1,2 y 0

Es decir que en cualquiera de los tipos de desbalance, el equivalente encontrado, por cada red de secuencia, puede ser considerado como un dipolo o una red de un puerto.

Las redes equivalentes determinadas se interconectan de diferentes maneras, permitiendo establecer las condiciones

de desbalance en función del tipo de cortocircuito o de conductor abierto como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1 Conexión de Redes de Secuencia en función del Tipo de Desbalance

| DESBALANCE | | REDES DE SECUENCIA QUE INTERVIENEN | | | CONEXIÓN DE REDES DE SECUENCIA |
|-------------------|-----------------|------------------------------------|----------|-----------|--------------------------------|
| TIPO | CONDICIÓN | Positiva | Negativa | Cero | |
| CORTOCIRCUITO | Monofásico | SI | SI | SI | Serie |
| | Bifásico | SI | SI | NO SI (*) | Paralelo |
| | Trifásico | SI | NO | NO | - |
| CONDUCTOR ABIERTO | Un conductor | SI | SI | SI | Paralelo |
| | Dos conductores | SI | SI | SI | Serie |

(*) Para la condición de Falla Bifásica a Tierra

Se debe recordar que en el proceso de solución de un desbalance, sea cortocircuito o conductor abierto, se plantean ciertas condiciones iniciales dependientes del tipo de desbalance. Estas condiciones preestablecidas permiten resolver el circuito equivalente considerando como referencia siempre a la fase “a”, es decir que las condiciones iniciales se establecen permitiendo siempre simetría hacia la fase “a” del sistema trifásico.

En la Tabla 2, se indican las condiciones de borde para cada tipo de desbalance, tomando como referencia las figuras 4 y 6.

Tabla 2 Condiciones de Frontera para los Tipos de Desbalance

| DESBALANCE | | CONDICIONES DE BORDE | |
|-------------------|-----------------|--|---|
| TIPO | CONDICIÓN | Corrientes | Tensiones (*) |
| CORTOCIRCUITO | Monofásico | $I_b = I_c = 0$ | $V_a = Z_f \cdot I_a$ |
| | Bifásico | $I_a = 0$ $I_b + I_c = 0$ $I_b + I_c = I_g$ (**) | $V_b - V_c = Z_f \cdot I_b$ $V_b - V_c = Z_f \cdot (I_b - I_c)$ (**) |
| | Trifásico | $I_a + I_b + I_c = 0$ | $V_a + V_b + V_c = 0$ |
| CONDUCTOR ABIERTO | Un conductor | $I_a = 0$ | $V_{bb'} = V_{cc'} = 0$ |
| | Dos conductores | $I_b = I_c = 0$ | $V_{aa'} = 0$ |

(*) Z_f : Impedancia de falla

(**) Para la condición de Falla Bifásica a Tierra, “ I_g ”: corriente de falla a tierra

B. FALLAS SIMULTÁNEAS

a. Condiciones Iniciales del Problema

Como punto de partida se debe señalar que el análisis de fallas simultáneas considera la ocurrencia de una condición de desbalance en solo dos puntos del SEP de manera coincidente.

La probabilidad de una tercera condición de desbalance de manera simultánea es muy pequeña, por lo que el análisis se limita a únicamente dos fallas simultáneas.

En la solución de fallas simultáneas se utiliza el Método de Componentes Simétricas y el Principio de Superposición, en consecuencia se debe determinar un dipolo equivalente para cada punto de desbalance, generando de esta manera un cuadripolo o red de dos puertos como circuito equivalente para una falla simultánea Fig.9. Se debe indicar que existirá un cuadripolo para cada red de secuencia.



Fig. 9 Diagrama de un Cuadripolo

Un cuadripolo es un modelo matemático que permite establecer las relaciones entre las variables de entrada y salida, de un sistema en particular. En función de la relación planteada entre estas variables, es posible establecer cuatro modelos matemáticos para un cuadripolo: Impedancia (Z), Admitancia (Y), Híbrido (H), Transmisión (A), como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3 Modelos matemáticos de un Cuadripolo

| MODELO | ECUACION |
|-----------------|--|
| Impedancia - Z | $\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$ |
| Admitancia - Y | $\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$ |
| Híbrido - H | $\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$ |
| Transmisión - A | $\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$ |

Adicionalmente se deben considerar tres nuevas condiciones que existen al presentarse un doble desbalance de manera simultánea en un SEP:

CONDICIÓN 1: Considerando el tipo de desbalance que se produzca en cada punto del SEP, pueden existir 4 condiciones de fallas simultáneas.

CONDICIÓN 2: Considerando el esquema de conexión de las redes de secuencia, indicadas en la Tabla 1; por cada tipo de desbalance, sea por cortocircuito o conductor abierto, pueden existir 2 formas de conexionado de las redes de secuencia: Serie o Paralelo.

CONDICIÓN 3: Considerando las fases involucradas, por cada condición de desbalance por cortocircuito, pueden existir 7 tipos de fallas. Por cada condición de desbalance por conductor abierto, pueden existir 6 tipos de fallas.

De la combinación de cada una de estas condiciones, existirán una gran cantidad de fallas simultáneas factibles de producirse. Por lo tanto, es necesario establecer un esquema de solución metódico que permita abarcar ordenadamente todas las condiciones de falla que se presenten.

b. *Técnica de Fallas Simultáneas*

De manera general, la técnica de fallas simultáneas plantea un esquema macro que integra las herramientas de solución particular para cada una de las tres condiciones indicadas en el punto anterior. Estas soluciones particulares son:

- a. PRIMERA CONDICION: solventada mediante la determinación del cuadripolo equivalente entre los puntos de desbalance, para las redes de secuencia positiva, negativa y cero. En este punto se puede aplicar cualquier procedimiento de formación de cuadripolos mediante los modelos de Impedancia, Admitancia, Híbrido o Transmisión, aunque se recomienda el siguiente procedimiento:
 - Formar la matriz de admitancia de barra (Y_B) de todo el SEP, considerando inclusive las barras que se adicionan por los puntos y tipo de desbalance.
 - Reducción de Y_B mediante eliminación Gaussiana. Con la Y_B reducida, se obtiene un modelo matricial de admitancia entre los puertos de desbalance: J y K.
- b. SEGUNDA CONDICION: resuelta por medio de la interconexión de los cuadripolos de redes

de secuencia. Existen cuatro tipos de conexión de cuadripolos: Serie, Paralelo, Paralelo - Serie y Cascada, de los cuales los tres primeros tiene aplicación en el análisis de fallas simultáneas, Fig.10.

Para cada esquema de interconexión, existe un modelo matemático del cuadripolo que facilita la solución del sistema interconectado [2].

- Para una interconexión Serie es necesario el modelo de Impedancias Z.
- Para una interconexión Paralelo se utiliza el modelo de Admitancias Y.
- Para una interconexión Paralelo - Serie se resuelve mediante el modelo Híbrido H.

Es decir, que en función del esquema de conexión de redes de secuencia se define el modelo matemático de cuadripolo a utilizarse, por lo que es necesario realizar una transformación de la matriz de admitancias reducida, determinada en el punto anterior, hacia los modelos finalmente requeridos.

En la Tabla 4 se establece los tipos de fallas simultáneas que pueden generarse considerando las 2 condiciones antes indicadas.

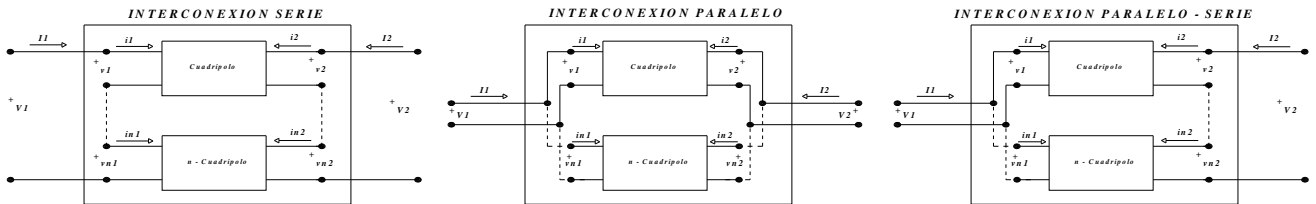


Fig. 10 Interconexión de Cuadripolos

Tabla 4 Tipos de Desbalance y Esquema de Conexión para Fallas Simultánea

| PUNTOS DE DESBALANCE | | Puerto K | | | | |
|----------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| | | CONDICION 1: TIPO DE DESBALANCE | | CONDICION 2: ESQUEMA DE CONEXIÓN DE REDES DE SECUENCIA | | |
| Puerto J | Cortocircuito | SERIE (Monofásico) | SERIE (Monofásico) | PARALELO (Bifásico) | PARALELO (Un conductor) | SERIE (Dos Conductores) |
| | | PARALELO (Bifásico) | HIBRIDO Modelo H | PARALELO Modelo Y | PARALELO Modelo Y | HIBRIDO Modelo H |
| | Conductor Abierto | PARALELO (Un conductor) | HIBRIDO Modelo H | PARALELO Modelo Y | PARALELO Modelo Y | HIBRIDO Modelo H |
| | | SERIE (Dos Conductores) | SERIE Modelo Z | HIBRIDO Modelo H | HIBRIDO Modelo H | SERIE Modelo Z |

- c. TERCERA CONDICION: solucionada mediante transformadores unitarios de cambio de fase, los cuales permiten resolver una falla en cualquiera

de las fases manteniendo una única referencia de fase en los cuadripolos interconectados. Al igual que para

el caso de fallas simples la referencia escogida es la fase "a".

La determinación de las relaciones de transformación de los transformadores unitarios, fue establecida mediante los diagramas generalizados para fallas desarrollados por Atabekov [3].

El análisis determina que con dos diagramas es posible analizar todas las fallas que se presenten en un sistema mediante la utilización de transformadores de cambio de fase, cuyas relaciones deben escogerse en función de las fases falladas. Esto depende únicamente de la fase escogida como referencia (fase simétrica).

De manera general, si la falla involucra únicamente a una fase, esta fase será la fase simétrica. Si la falla involucra dos fases, la restante será la fase simétrica, como se indica en la Tabla 5.

Tabla 5 Relaciones de Transformadores de Defasamiento

| Fases Involucradas en el Desbalance | Fase Simétrica | Relaciones de Transformación | | |
|-------------------------------------|----------------|------------------------------|-------|-------|
| | | n_0 | n_1 | n_2 |
| "a" o "b-c" | "a" | 1 | 1 | 1 |
| "b" o "c-a" | "b" | 1 | a^2 | a |
| "c" o "a-b" | "c" | 1 | a | a^2 |

Integrando todas estas condiciones es posible establecer un diagrama de circuito de una falla simultánea, Fig.11, en la que se observa que se establece un cuadripolo equivalente entre los puntos externos a los transformadores de defasamiento.

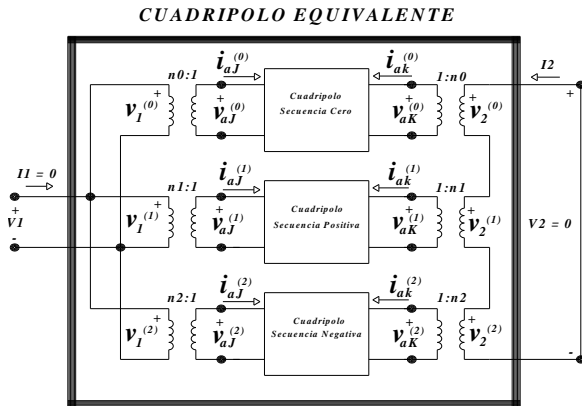


Fig. 11 Cuadripolo Equivalente para una Falla Simultánea con Conexión Híbrida

Integrando todas estas condiciones es posible establecer un flujo de solución de una falla simultánea, como se indica en la Fig.12. [4]

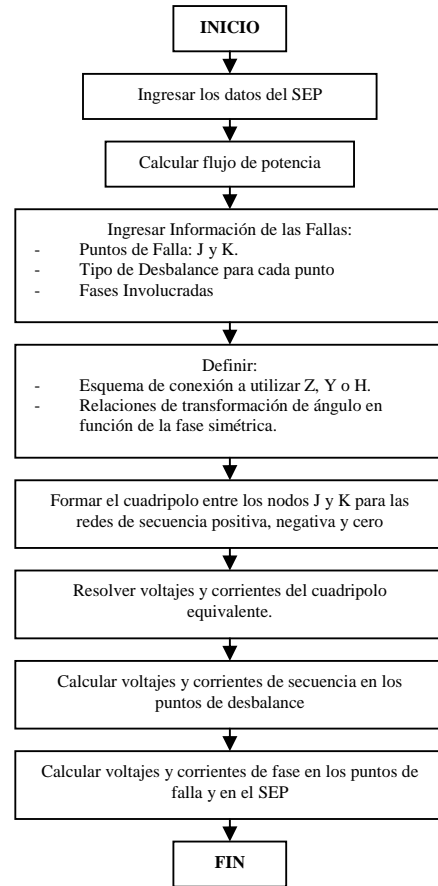


Fig. 12 Flujo de Solución de Fallas Simultáneas

III. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EQUIVALENTES DE SEP MALLADOS DESDE UNA FALLA SIMULTÁNEA

De la teoría de fallas simultáneas se observa que para proceder con la solución de estos desbalances, se requiere la información de los cuadripolos de secuencia positiva negativa y cero, entre los puntos de desbalance. Se debe recordar que estos cuadripolos incluyen la información equivalente del SEP entre estos puntos.

Utilizando este concepto, es posible reconstruir un modelo equivalente, entre dos barras de un SEP, partiendo de la información determinada ante la ocurrencia de cualquier falla simultánea que se genere entre estos mismos puntos.

Por otra parte, en la determinación de un circuito equivalente entre dos puntos de un SEP mallado, es necesario considerar que el modelo reducido debe incluir el efecto de los diferentes enlaces que presenta el SEP entre las barras de análisis. Por lo tanto es necesario establecer un modelo físico que permita considerar la transferencia de potencia por estos enlaces.

A continuación se desarrollan las ecuaciones correspondientes que permitirán definir un modelo equivalente "π" entre dos barras de un SEP a partir de una

falla monofásica simultánea en los puntos donde se requiere el equivalente.

A. FALLA MONOFÁSICA SIMULTÁNEA

Como se había indicado, en cualquier falla simultánea que se produzca entre dos nodos es necesario el modelamiento de los cuadripolos de secuencia en los cuales se encuentra implícita la información equivalente del SEP.

Considerando que se presenta un cortocircuito simultáneo entre dos barras J y K del SEP, es posible plantear el modelo de cuadripolo considerando parámetros de impedancia, como se expresa en (9).

$$\begin{bmatrix} V_j \\ V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{jj} & z_{jk} \\ z_{kj} & z_{kk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_j \\ I_k \end{bmatrix} \tag{9}$$

Las relaciones planteadas en (9), permiten establecer el circuito equivalente Thevenin de secuencia positiva entre dos barra de un SEP [1], como el indicado en la Fig.14.

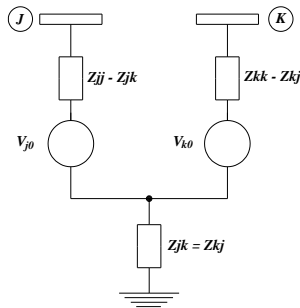


Fig. 13 Circuito Equivalente Thevenin entre barras J - K

V_{j0} y V_{k0} corresponden a fuentes internas equivalentes en los nodos J y K, para el presente caso se obtienen de una condición inicial de flujo de potencia.

Como el objetivo planteado es obtener un modelo equivalente “ π ” para las redes de secuencia positiva, negativa y cero, es necesario partir de una condición que implique presencia de desbalance hacia tierra.

Por otra parte el desarrollo de una falla monofásica requiere la definición de equivalentes con respecto a tierra. Por estas razones el planteamiento de ecuaciones de transformación desde el equivalente Thevenin, al modelo “ π ”, se realizará considerando una falla monofásica simultánea en dos barras J y K, en la fase “a”.

B. MODELO EQUIVALENTE DE RED “ π ” [5]

Un cuadripolo representa un modelo matemático que relaciona variables entre dos puntos del SEP, sin embargo, es de mayor utilidad y mejor comprensión, plantear un modelo físico entre las barras en que se requiere el equivalente. En el presente documento se

plantea un modelo físico “ π ”, como el indicado en la Fig.14.

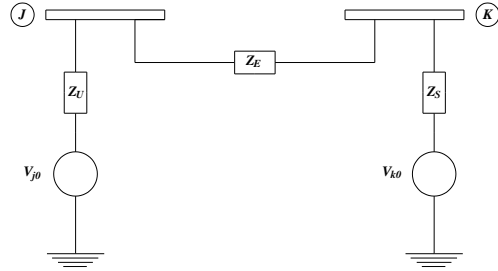


Fig. 14 Modelo Equivalente “ π ”

Se observa que este modelo se conforma por tres elementos:

- V_{j0} y V_{k0} : fuentes internas equivalentes en los nodos J y K.
- Z_U y Z_S : impedancias serie entre fuentes internas y barras J y K.
- Z_E : Impedancia de transferencia entre los nodos J y K.

C. ECUACIONES DE TRANSFORMACION

Considerando el circuito equivalente de Thevenin, Fig. 13, es posible plantear la ocurrencia de tres cortocircuitos entre las barras J y K, en función de la posición de los interruptores indicados en la Fig. 15.

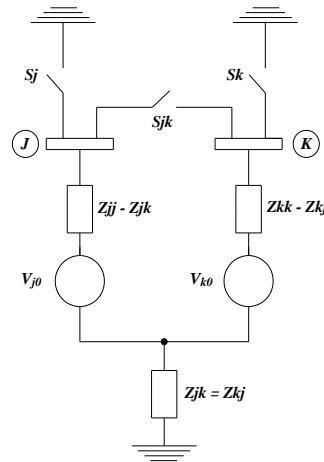


Fig. 15 Cortocircuitos aplicados al Equivalente Thevenin

Para cada una de estos cortocircuitos es posible definir una impedancia equivalente, como se detalla en la tabla 6.

Tabla 6 Condiciones de Cortocircuito para el equivalente de Thevenin

| CORTOCIRCUITO | ESTADO SECCIONADORE S | | | IMPEDANCIA EQUIVALENTE OBSERVADA |
|-------------------------|-----------------------|----|-----|---|
| | Sj | Sk | Sjk | |
| Simple - Barra J | X | O | O | Z_{jj} |
| Simple - Barra K | O | X | O | Z_{kk} |
| Simultáneo Barras J y K | X | X | X | $Z_F = Z_{jk} + (Z_{jj} - Z_{jk}) \cap (Z_{kk} - Z_{jk})$ |

X: Interruptor Cerrado
O: Interruptor Abierto

De la información determinada en estos tres cortocircuitos (Z_{jj} , Z_{kk} , Z_F), es posible despejar el valor de la impedancia equivalente entre los nodos J y K, como se indica en (10).

$$Z_{jk} = Z_F - \sqrt{(Z_F - Z_{jj})(Z_F - Z_{kk})} \quad (10)$$

Es decir que mediante este ejercicio matemático es posible determinar los elementos Z_{jj} , Z_{kk} y Z_{jk} de la matriz Z_B . Con esta información y considerando las ecuaciones de transformación detalladas en [5], se puede reconstruir cualquier modelo físico, como es el caso del modelo físico “ π ”, mediante las relaciones indicadas en (11).

$$Z_U = \frac{Z_{jj} \cdot Z_{kk} - Z_{jk}^2}{Z_{kk} - Z_{jk}} \quad (11)$$

$$Z_S = \frac{Z_{jj} \cdot Z_{kk} - Z_{jk}^2}{Z_{jj} - Z_{jk}}$$

$$Z_E = \frac{Z_{jj} \cdot Z_{kk} - Z_{jk}^2}{Z_{jk}}$$

En resumen, para determinar un equivalente “ π ”, entre dos puntos de un SEP mallado, mediante software comercial, se plantea el procedimiento indicado en la Fig.16.

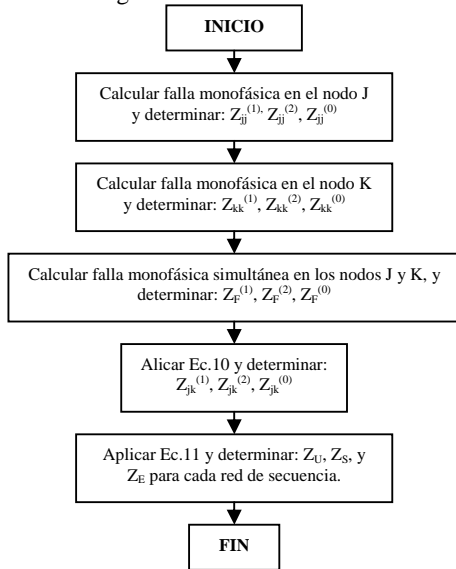


Fig. 16 Determinación de Modelo “ π ” mediante Fallas Simultáneas

IV. CASOS APLICADOS

A. MODELO REDUCIDO PARA LA EMPRESA ELECTRICA QUITO - EEQSA

a. Equivalente Propuesto

En la Fig.17 se indica un esquema unifilar del SNT, en el que se observan los puntos de conexión de la EEQSA. Las líneas de transmisión de color rojo

representan un nivel de tensión de 230 kV, mientras que las indicadas en azul corresponden a 138 kV.

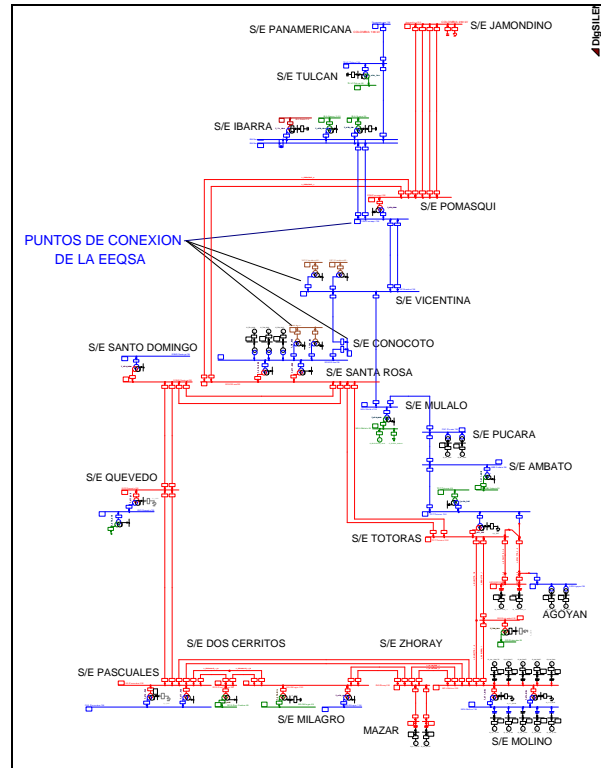


Fig. 17 Diagrama unifilar del sistema de transmisión y puntos de conexión de la EEQSA

Para análisis de estado estable, la EEQSA requiere de un modelo equivalente en las barras de Pomasqui 230kV, Pomasqui 138 kV, Santa Rosa 230 kV y Mulaló 138 kV.

Con respecto a Pomasqui 230 kV y Pomasqui 138 kV, al ser puntos radiales, los equivalentes no presentan dificultad en ser determinados y corresponden a un modelo Thevenin de fuente e impedancia serie para cada punto.

Para las barras de Santa Rosa 230 kV y Mulaló 138 kV, el sistema de transmisión presenta una topología mallada por medio de las S/E's Mulaló, Pucará, Ambato, Totoras y Santa Rosa. Se debe indicar que este enlace está definido entre diferentes niveles de tensión.

En la Fig.18. se detallan los circuitos equivalentes requeridos entre los puntos antes indicados.

Debido a la condición topológica entre Santa Rosa 230 kV y Mulaló 138 kV, se aplicará el procedimiento indicado en III para calcular un circuito equivalente “ π ” entre estas barras.

b. Cálculo de Fallas

A continuación se desarrolla el análisis para determinar el circuito equivalente “ π ” entre Santa Rosa 230 kV y Mulaló 138 kV, en Pomasqui 230 kV y Pomasqui 138 kV, se utilizará el modelamiento total del SEP.

En la aplicación del procedimiento de la Fig.16, es necesario indicar que se ha realizado las siguientes consideraciones:

- Los cortocircuitos se calculan aislando el sistema de la EEQSA en los puntos de definición del equivalente, es decir, que se abren los interruptores de los elementos que serán modelados completamente por la EEQSA.

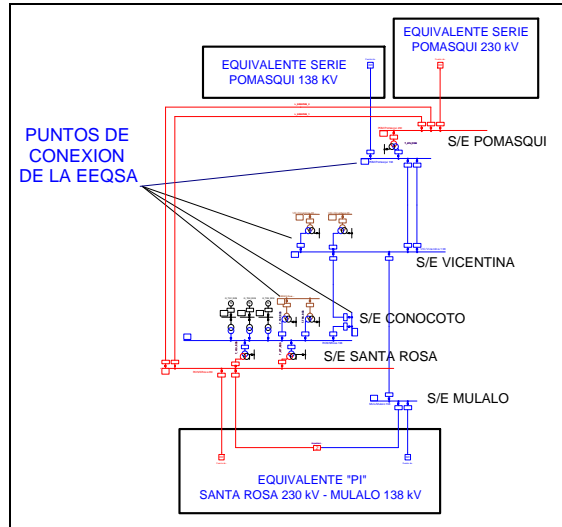


Fig. 18 Circuitos equivalentes en puntos de conexión de la EEQSA

- Debido a que en el proceso de cálculo de cortocircuitos, se aísla el sistema de la EEQSA, no es posible establecer una condición de flujo de carga inicial, en consecuencia se debe utilizar un método de cortocircuito que no considere esta condición inicial.
- Los cortocircuitos se realizan mediante el paquete computacional Power Factory de DigSilent 13.2, utilizando el método de cortocircuito IEC909, máximas corrientes, este método cumple con la condición antes indicada.

En la Tabla 7 se indican, los valores en ohmios, de las impedancias equivalentes del sistema que se observa ante cada condición de falla. Se indica también el cálculo de la impedancia de enlace Z_{jk} mediante la ecuación 10.

Tabla 7 Impedancias calculadas en las barras Pomasqui 230 kV y Mulaló 138 kV

| SECUENCIA A | Falla 1φ Sta. Rosa 230 kV $Z_{jj} (\Omega)$ | Falla 1φ Mulaló 138 kV $Z_{kk} (\Omega)$ | Falla 1φ Sta. Rosa 230 kV Mulaló 138 kV $Z_F (\Omega)$ | Ec. 10 $Z_{jk} (\Omega)$ |
|-------------|--|---|---|-----------------------------|
| Positiva | 3.135 + j 32.102 | 5.704 + j 35.694 | 2.163 + j 19.182 | 0.056 + j 4.486 |
| Negativa | 3.212 + j 32.312 | 5.716 + j 35.654 | 2.205 + j 19.250 | 0.083 + j 4.523 |
| Cero | 5.576 + j 42.187 | 2.995 + j 35.178 | 1.995 + j 19.567 | -0.092 + j 0.752 |

Aplicando la relación 11, se determinan los equivalentes "π" para cada red de secuencia. Los valores obtenidos se indican en la tabla 8.

Tabla 8 Impedancias del modelo π-Pomasqui 230 kV y Mulaló 138 kV

| SECUENCIA | Sta. Rosa 230 kV $Z_U (\Omega)$ | Mulaló 138 kV $Z_S (\Omega)$ | Enlace Sta. Rosa 230 kV - Mulaló 138 kV $Z_E (\Omega)$ |
|-----------|------------------------------------|---------------------------------|---|
| Positiva | 2.921 + j 36.011 | 6.114 + j 40.946 | 62.628 + j 248.683 |
| Negativa | 3.021 + j 36.291 | 6.150 + j 40.900 | 61.533 + j 248.153 |
| Cero | 5.507 + j 43.102 | 2.890 + j 35.800 | 657.676 + j 1868.992 |

c. Validación del Equivalente

Como criterios de validación del equivalente se realizan simulaciones de flujo de potencia y cortocircuitos en la barra de 138 kV la S/E Santa Rosa.

- Flujo de Potencia

En la Fig. 19 se detalla los resultados de flujo de potencia que circulan por las bahías conectadas en la S/E Santa Rosa, considerando todo el SEP de transmisión.

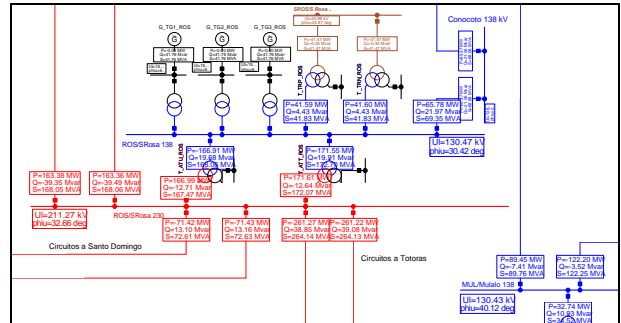


Fig. 19 Flujo de Potencia con todo el SEP de transmisión

En la Fig. 20 se observan los resultados de flujo de potencia que circulan por las bahías conectadas en la S/E Santa Rosa, considerando el equivalente "π" determinado.

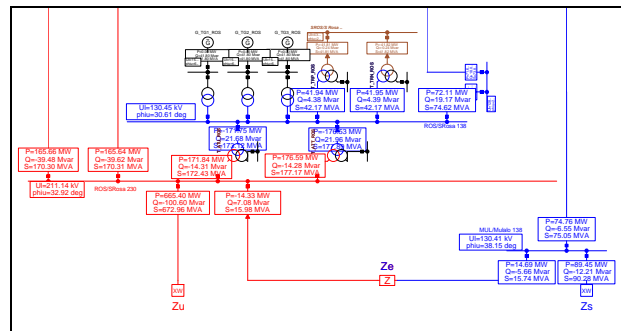


Fig. 20 Flujo de Potencia con equivalente "π"

Se observa que los flujos de potencia por cada uno de los elementos del SEP son similares. El flujo de potencia por la impedancia de transferencia está en el orden de los 15MVA.

- Cortocircuitos en la Barra de Santa Rosa 138 kV

En las Figs. 21 y 22, se detallan los resultados de un cortocircuito trifásico en la barra de 138 kV de la S/E Santa Rosa, considerando todo el SEP de transmisión y el modelo equivalente "π", respectivamente.

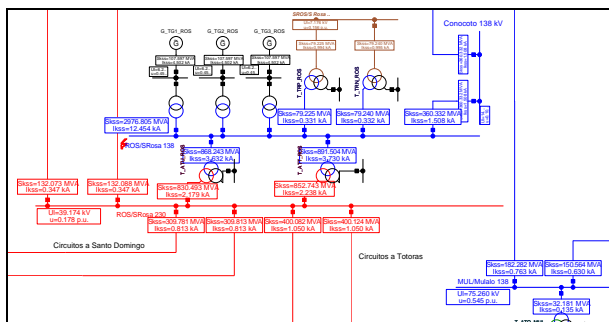


Fig. 21 Cortocircuito trifásico en Santa Rosa 138 kV con todo el SEP de transmisión

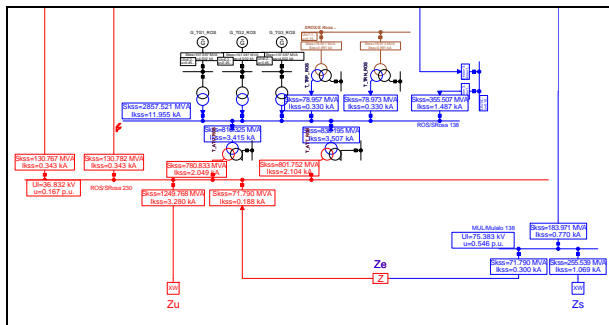


Fig. 22 Cortocircuito 3φ trifásico en Santa Rosa 138 kV con equivalente "π"

Se observa que la corriente de falla, así como, los aportes por cada uno de los elementos del SEP son similares. El aporte por la impedancia de transferencia es del orden de 188 Amperios.

En las Figs. 23 y 24, se detallan los resultados de un cortocircuito monofásico en la barra de 138 kV de la S/E Santa Rosa, considerando todo el SEP de transmisión y el modelo equivalente "π", respectivamente.

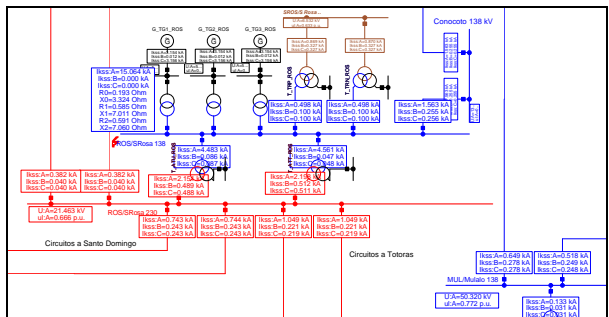


Fig. 23 Cortocircuito monofásico en Santa Rosa 138 kV con todo el SEP de transmisión

Se observa que las impedancias equivalentes en el punto de falla son prácticamente iguales, lo cual valida el modelo equivalente desarrollado.

V. CONCLUSIONES

La técnica de fallas simultáneas basa su procedimiento en la superposición de las respuestas individuales de dos condiciones asimétricas, por lo que contiene la información equivalente entre dos puntos de un SEP. Mediante este concepto es posible

obtener la información complementaria para la determinación de sistemas equivalentes de redes mallasadas como se demuestra en este documento.

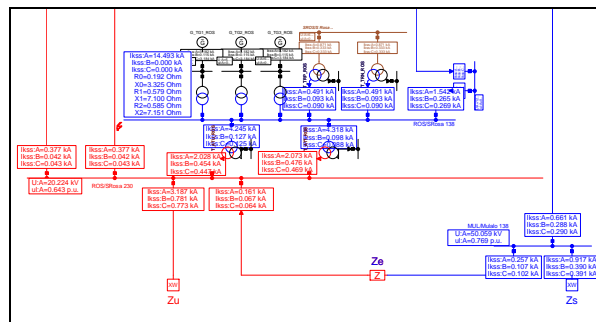


Fig. 24 Cortocircuito 1φ en Santa Rosa 138 kV con equivalente "π"

Los sistemas equivalentes determinados, dependen de los puntos en los que se requiere reducir el SEP original. En el caso que entre los puntos de análisis se presenta una topología mallasada, es adecuado el planteamiento de un modelo equivalente "π".

Debido a que en el proceso de cálculo de cortocircuitos, se aísla el sistema a ser reducido, no es posible establecer una condición de flujo de potencia inicial con el sistema aislado, por lo que se debe utilizar un método de cortocircuito que no considere esta condición inicial.

La impedancia de transferencia planteada en el modelo "π" representa el enlace equivalente entre las barras del equivalente; en el caso de diferentes niveles de tensión entre las barras, el modelamiento de Z_E debe considerar un adecuado manejo de los valores base o la utilización de transformadores de relación sin pérdidas.

Para estudios de estado estable, el proceso de reducción de redes, presenta un grado de complejidad relativamente bajo si existe la información de la Matriz de Impedancias de Barra Z_{Barra} , por lo que resulta importante tener acceso a la información de esta variable o de la Matriz de Admitancia de Barra Y_B .

REFERENCIAS

- [1] J. Grainger, W. Stevenson, "Análisis de Sistemas de Potencia", McGraw-Hill, Inc., USA, 1996.
- [2] P. M. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems", Primera Edición. The Iowa State University Press, Iowa, USA, 1978.
- [3] G.I. Atabekov, "The Relay Protection of High Voltage Networks", Pergamon Press. New York, USA, 1960.
- [4] Z. X. Han, "Generalized Method of Analysis Simultaneous Faults in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-101, No. 10 October 1982.
- [5] P. M. Anderson, "Power Systems Protection", IEEE Press, New York, USA, 1998.



Antonio Fonseca, nació en Quito, Ecuador en 1979. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico (marzo 2003) y Magister en Ingeniería Eléctrica (julio 2009) en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) Quito-Ecuador. Actualmente, forma parte del Departamento de Servicios Especializados de Subestaciones de CELEC EP - Unidad de Negocio TRANSELECTRIC. Adicionalmente se desempeña como profesor en la carrera de Ingeniería Eléctrica y en la Maestría en Ciencias de Ingeniería Eléctrica de la EPN.