

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**ANÁLISIS DE LA CORRIENTE DE ARCO SECUNDARIO PARA RECIERRES
MONOFÁSICOS EN LÍNEAS DE EXTRA ALTA TENSIÓN**

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON
MENCIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA**

ELABORADO POR

MANUEL JACOB CHIRRE FLORES

ASESOR

M. Sc. JUSTO YANQUE MONTUFAR

LIMA – PERÚ

2014

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi esposa María Bazalar, a mi hija Giuliana Chirre, a mis padres y a mis hermanos.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial al asesor de mi tesis, M. Sc. Justo Yanque Montufar, por su valiosa orientación y motivación durante el desarrollo de la presente tesis. Agradezco a los revisores de tesis M. Sc. Juan Velásquez S. y M. Sc. Jorge Rodríguez R., quienes han contribuido con sus comentarios, observaciones y correcciones a este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA	2
1.1 Formulación del problema	2
1.2 Perspectiva histórica	3
1.3 Objetivo de la tesis	3
1.4 Organización de la tesis	3
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 Conceptos básicos de arco eléctrico [14]	5
2.2 Arco eléctrico en los interruptores [14]	5
2.3 Modelos del arco eléctrico primario [30]	9
2.3.1 Modelo de Cassie	11
2.3.2 Modelo de Mayr	13
2.4 Corriente de arco secundario [10]	15
2.5 Cálculo de la corriente de arco secundario	16
2.5.1 Cálculo de la corriente de arco secundario vía el acoplamiento electrostático	16
2.5.2 Cálculo de la corriente de arco secundario vía el acoplamiento electromagnético	18
2.6 Cálculo de la tensión de recuperación [3]	19
2.7 Métodos de extinción del arco secundario [3]	21
2.8 Cálculo de la reactancia neutro de banco de cuatro reactores de línea	25
2.9 Criterios de posibilidad de extinción de arco secundario [1]	26
CAPÍTULO III	28
METODOLOGÍA PARA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	28
3.1 Introducción	28
3.2 TACS en ATP-EMTP	28
3.3 Modelos de Cassie y Mayr implementados enTACS	30
3.3.1 Modelo de Cassie	30
3.3.2 Modelo de Mayr	33
3.4 Modelamiento del arco secundario [13]	36
3.4.1 Revisión de información	37
3.4.2 Selección del modelo	39
3.4.3 Estudios de arco secundario	41

3.4.4 Implementación computacional	43
3.5 Simulaciones en ATP-EMTP	47
3.5.1 Línea de una terna de 500kV	49
3.5.1.1 Conductor	49
3.5.1.2 Torre	49
3.5.1.3 Tiempo de recierre	50
3.5.1.4 Circuito de potencia	50
3.5.1.5 Datos generales ingresados en el programa ATP-EMTP	50
3.5.2 Línea de una terna de 500kV	52
3.5.2.1 Modelo de arco eléctrico en régimen permanente	52
3.5.2.2 Modelo de arco eléctrico Mayr-Portela	55
3.5.3 Línea de una terna de 500kV con reactancia de línea	57
3.5.3.1 Cálculo de la reactancia del neutro	57
3.5.3.2 Modelo de arco eléctrico en régimen permanente	58
3.5.3.3 Modelo de arco eléctrico Mayr-Portela	61
CAPÍTULO IV	63
ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXO 1	73
MODELO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	73
ANEXO 2	109
RECIERRES	109
ANEXO 3	124
DEFINICIONES	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de reignición del arco eléctrico	8
Tabla 2.2 Longitudes de líneas para recierre monofásico sin dispositivos de extinción de arco suplementario	21
Tabla 3.1 Corriente de arco secundario con resistencia de arco 0.1 Ohm.	54
Tabla 3.2 Criterio CESI para posibilidad de extinción de arco arco secundario.....	54
Tabla 3.3 Modelo de arco Mayr-Portela en las corrientes de arco secundario	57
Tabla 3.4 Corriente de arco secundario con resistencia de 0.1 Ohm. en línea de 500kV con reactores de línea	60
Tabla 3.5 Criterio CESI para posibilidad de extinción de arco arco secundario en línea de 500kV con reactancia de línea.....	60
Tabla 3.6 Modelo de arco Mayr-Portela en las corrientes de arco secundario, modelo Mayr-Portela.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Separación de contactos e interrupción del arco eléctrico en el interruptor	9
Figura 2.2 Columna de plasma, modelo Cassie	12
Figura 2.3 Columna de plasma, modelo Mayr	14
Figura 2.4 Diagrama de línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta	16
Figura 2.5 Diagrama del acoplamiento electrostático de una línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta	17
Figura 2.6 Diagrama equivalente Thevenin del acoplamiento electrostático, de una línea simétrica y completamente transpuesta	18
Figura 2.7 Diagrama del acoplamiento electromagnético de una línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta	19
Figura 2.8 Tensión de recuperación y corriente de arco secundario de las pruebas de falla 500kV de Montaña Malin-Round	20
Figura 2.9 Tensión de recuperación y corriente de arco secundario de las pruebas de falla 500kV de Montaña Malin-Round con compensación shunt.....	20
Figura 2.10 Línea de transmisión con banco de reactores conectados permanentemente	22
Figura 2.11 Banco de cuatro reactores permanentemente conectado, diagrama unifilar de equivalente Thevenin.....	22
Figura 2.12 Esquemas de interruptores en reactores.....	24
Figura 2.13 Curva de referencia para análisis de extinción de corriente de arco secundario, considerando el tiempo muerto de 500ms.	27
Figura 3.1 Diagrama de línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta	29
Figura 3.2 Diagrama de bloques de la ecuación de Cassie	30
Figura 3.3 Esquema unifilar de circuito para emplear el modelo de arco Cassie.....	31
Figura 3.4 Modelo de Cassie implementado en TACS.....	31
Figura 3.5 Interruptor ideal.....	32
Figura 3.6 Interruptor con el modelo de arco Cassie.....	32
Figura 3.7 Corriente de falla monofásica, fase A con y sin modelo de arco Cassie	33

Figura 3.8 Diagrama de bloques de Mayr	34
Figura 3.9 Diagrama eléctrico con cortocircuito	34
Figura 3.10 Modelo de Mayr implementado en TACS.....	34
Figura 3.11 Parámetros de interruptor CBS1	35
Figura 3.12 Tensión en el interruptor CBS1	35
Figura 3.13 Corriente en el interruptor CBS1	36
Figura 3.14 Resistencia de arco en el interruptor CBS1.....	36
Figura 3.15 Característica estacionaria de un arco	41
Figura 3.16 Control de las conductancias $g_1(t)$ y $g_2(t)$ en un arco con dos constantes de tiempo.....	44
Figura 3.17 Cálculo de las constantes de tiempo θ_1 y θ_2	44
Figura 3.18 Cálculo P_0 y J	44
Figura 3.19 Constantes.....	45
Figura 3.20 Circuito eléctrico	46
Figura 3.21 Conductancias $g_1(t)$ y $g_2(t)$ en ejemplo de simulación de arco eléctrico.....	47
Figura 3.22 Diagrama de flujo de simulación de recierre monofásico en líneas de transmisión	48
Figura 3.23 Torre de una terna para línea de transmisión de 500kV.....	49
Figura 3.24 Circuito eléctrico de sistemas de potencia	50
Figura 3.25 Datos ingresados de la línea de 500kV	51
Figura 3.26 Impedancia Thevenin.....	51
Figura 3.27 Circuito eléctrico de simulación con resistencia de arco de 0.1 Ohm.	52
Figura 3.28 Corriente de arco primario y corriente de arco secundario, fase B	53
Figura 3.29 Tensión de restablecimiento, fase B	53
Figura 3.30 Criterio ANEEL(Brasil) para posibilidad de extinción de arco secundario	55
Figura 3.31 Circuito eléctrico con modelo Mayr-Portela	56
Figura 3.32 Conductancia de los subarcos $g_1(t)$ y $g_2(t)$	57

Figura 3.33 Línea de transmisión 500kV con reactancia de línea	58
Figura 3.34 Corriente de arco secundario.....	59
Figura 3.35 Tensión de recuperación... ..	59
Figura 3.36 Criterio ANEEL (Brasil) para posibilidad de extinción de arco secundario en línea de 500kV con reactancia de línea.....	61
Figura 3.37 Línea de transmisión 500 kV con reactores de línea, modelo Mayr-Portela.....	61
Figura 3.38 Conductancia de los subarcos g1 y g2.....	62

RESUMEN

En un recierre monofásico en líneas de extra alta tensión, la fase fallada es aislada por la apertura de los interruptores en ambos extremos de la línea, el conductor de la fase fallada está aún energizado debido al acoplamiento electromagnético y electrostático a las fases energizadas en paralelo. Esto significa que una tensión persiste en el punto de falla que puede mantener la corriente de falla, aunque en menor nivel de corriente. Este hecho es conocido como “corriente de arco secundario” y es una corriente que usualmente sigue el camino de la energía del arco después de desconectar la fase fallada.

Uno de los inconvenientes que deberá ser resuelto en esta tesis consiste en escoger el modelo matemático para calcular las corrientes de arco secundario y tensión de recuperación en líneas de extra alta tensión de una terna, con la finalidad de que cuando se efectúe el recierre monofásico, la corriente de arco secundario se extinga en un tiempo dado y se pueda conseguir un recierre exitoso.

La presente tesis analiza la interacción transitoria de la corriente de arco secundario con el sistema de extra alta tensión, mediante simulación, para lo cual, se resuelven ecuaciones algebraicas, diferenciales y matrices, que se originan de la formulación y desarrollo de un modelo matemático. Para tal fin, se define un modelo matemático adecuado del arco eléctrico en las líneas de extra alta tensión como una de las contribuciones más resaltantes. Adicionalmente, se define las necesidades y características que debe tener el equipo de protección para efectuar recierres monofásicos y evaluar los efectos que causa la corriente de arco secundario. Se implementó un módulo de simulación para analizar el comportamiento de la corriente de arco secundario y tensión de restablecimiento en líneas de extra alta tensión de una terna con el programa de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP.

ABSTRACT

In a single-phase reclosing extra high voltage lines, the faulted phase is isolated by opening the switches at both ends of the line, the faulted phase conductor is still energized because electromagnetic and electrostatic coupling to the phases energized in parallel. This means that a persistent voltage at the point of failure that can keep the fault current to a lesser current level. This is known as secondary arc current is a current that usually follows the path of the arc energy after disconnecting the faulted phase.

One of the problems that must be solved in this thesis is to choose the mathematical model for calculating secondary arc current and recovery voltage in extra high voltage lines, in order that when the single-phase reclosing is performed, current secondary arc is extinguished at a time and it can lead to a successful reclosing.

This thesis analyzes the transient interaction of the secondary arc current to the system of extra high voltage by simulation, for which, algebraic, differential equations and matrices, which arise from the formulation and development of a mathematical model are solved. To this end, an appropriate mathematical model of the electric arc defined in the extra high voltage lines as one of the most outstanding contributions. Additionally, the needs and characteristics required protective equipment to perform single-phase reclosers and evaluate the effects that cause secondary arc current is defined. Simulation module was implemented to analyze the behavior of the secondary arc current and recovery voltage in extra high voltage lines with the ATP-EMTP electromagnetic transients program.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación proporciona información del comportamiento de la corriente de arco secundario en recierres monofásicos de líneas de extra alta tensión. El uso de recierres monofásicos para fallas monofásicas de carácter transitorio posibilita un intento de recierre exitoso y por consiguiente la continuidad del servicio, siempre y cuando la corriente de arco secundario sea pequeña.

El modelamiento del arco secundario es importante para determinar si el recierre monofásico para una falla monofásica transitoria en una línea de extra alta tensión será exitosa. A la fecha en nuestro medio no existen avances con relación a investigaciones sobre la corriente de arco secundario en líneas de extra alta tensión.

Las fallas monofásicas dependiendo de su severidad pueden dar lugar a problemas de estabilidad transitoria e incluso pueden llegar a provocar un colapso en el sistema, lo cual ocasionaría altas pérdidas económicas debido a que las líneas de extra alta tensión transportan grandes cantidades de energía.

Para la presente investigación, mediante el empleo de TACS del programa de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP, se implementó el modelo del arco secundario en régimen permanente utilizando una resistencia de 0.1 Ohm y el modelo de transitorios electromagnéticos en el dominio del tiempo Mayr-Portela.

El presente trabajo tiene la finalidad de demostrar que usando los modelos implementados de arco secundario nos permite determinar si el arco secundario se extingue o no. En caso que los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación sean altos, se emplean métodos para reducir la corriente de arco secundario.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA

1.1 Formulación del problema

En un sistema de potencia son las líneas de transmisión aéreas los elementos con mayor probabilidad de falla, y las fallas monofásicas, las de mayor frecuencia de aparición.

Las fallas monofásicas de carácter transitorio, que corresponden a una ruptura del espacio en aire o al contorneo de una cadena de aisladores, y a una corriente elevada conocida como corriente de arco primario, poseen la virtud de que suprimida la fuente de energía, se extinguen y el aislante se autorregenera muy rápidamente, lo que posibilita un intento de recierre exitoso y la continuidad del servicio [1].

Asimismo, las fallas monofásicas en líneas de transmisión, así como también las bifásicas y trifásicas, dependiendo de su severidad, pueden dar lugar a problemas de estabilidad transitoria e incluso pueden llegar a provocar un colapso total del sistema.

De otra parte, en una falla monofásica en una línea de extra alta tensión, la apertura monopolar de la fase fallada permite que las dos fases sanas permanezcan en servicio, con lo que se hace posible una transferencia de potencia significativa que continuará durante la detección de la falla y la operación de despeje. Esto siempre tendrá un efecto beneficioso, especialmente para la estabilidad del sistema.

Sin embargo, cuando la fase fallada es aislada por la apertura de los interruptores en ambos extremos de la línea, el conductor de la fase fallada está aún energizado debido al acoplamiento electromagnético y electrostático con las fases energizadas en paralelo. Ello significa que una tensión persiste en el punto de falla, y mantiene una corriente de baja intensidad conocida como “corriente de arco secundario”. Esta es una corriente que usualmente sigue el camino de la energía del arco primario después de desconectar la fase fallada.

Uno de los inconvenientes que deberá ser resuelto consiste en definir el modelo matemático para calcular las corrientes de arco secundario y tensión de recuperación en

líneas de extra alta tensión de una terna, con la finalidad de que cuando se efectuó el recierre monofásico la corriente de arco secundario sea cercana a cero luego de un intervalo de tiempo y se pueda conseguir un recierre exitoso.

1.2 Perspectiva histórica

A nivel internacional, el problema de la corriente de arco secundario se ha tratado desde la década de 1930. Dichos trabajos, aunque desde su publicación hayan pasado más de ochenta años, constituyen una base fundamental para el análisis de la corriente de arco secundario para recierre monofásico en líneas de transmisión. Hasta la fecha, se han publicado innumerables artículos; sin embargo, en nuestro medio no existen avances con relación al desarrollo de investigaciones sobre el mencionado tema.

Esta tesis tiene como punto de partida los artículos publicados en las revistas IEEE de Edward W. Kimbark (1976) [4], IEEE Committee Report (1992) [3] y N. Knudsen, Cigre 1962 [2], por ser adecuados para el desarrollo de la misma.

1.3 Objetivo de la tesis

El objetivo general de esta tesis es analizar los transitorios electromagnéticos que se traducen en la corriente de arco secundario durante el recierre monofásico.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Implementar los modelos del arco eléctrico desarrollados por Cassie, Mayr y Mayr-Portela, empleando el programa de simulación ATP-EMTP y su interfaz gráfica ATPDraw.
- Analizar el comportamiento de la corriente de arco secundario en función del sistema de transmisión durante el recierre monofásico en líneas de extra alta tensión.
- Implementar el modelo de arco secundario escogido, utilizando parámetros y características encontrados en ensayos de laboratorio.
- Realizar simulaciones de corriente de arco secundario en líneas de transmisión de extra alta tensión con el modelador de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP.

1.4 Organización de la tesis

El contenido de la tesis está organizado básicamente en cuatro capítulos, además de los anexos.

En el capítulo I, Planteamiento de ingeniería del problema, se presentan los aspectos introductorios de la tesis, formulación del problema y objetivo de la tesis.

En el capítulo II, Marco teórico, se presentan los conceptos básicos del arco eléctrico, modelos matemáticos del arco eléctrico primario, arco eléctrico secundario, métodos de extinción de arco secundario.

En el capítulo III, Metodología para la solución del problema, se presentan la implementación de los modelos de arco primario y arco secundario con el modelador de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP y su interfaz gráfica ATPDraw. Se realizan simulaciones de fallas monofásicas en línea de 500kV, de una terna con dos cables de guarda sin compensación reactiva y con compensación reactiva.

En el capítulo IV, Análisis y presentación de resultados, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en el capítulo III y los resultados de las simulaciones.

Se presentan las Conclusiones y Recomendaciones.

Los anexos son tres: en el primero, se incluye información del modelo de líneas de transmisión y se muestra la teoría de las impedancias de secuencia, positiva, negativa, cero, transposición de líneas y acoplamientos mutuos; en el segundo, se muestra la información de recierres: importancia, definición de recierres, desionización del arco, recierres tripolar y monopolar, así como las protecciones que tiene la función de recierres; finalmente, en el anexo tercero, se incluye un glosario de los principales términos utilizados en esta tesis.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos básicos de arco eléctrico [14]

Tanto en la naturaleza como en los sistemas de potencia podemos observar los más diversos tipos de arco eléctrico, tales como los llamados “arcos de carácter aleatorio” y “arcos asociados a aplicaciones específicas”:

- Arcos de carácter aleatorio son aquellos relacionados con fenómenos naturales y con algunos fenómenos que acontecen en el sistema eléctrico debido a una perturbación que genera sobretensiones o pérdida de aislamiento en algunas partes del sistema. Los más conocidos son las descargas atmosféricas, descargas de un conductor a tierra o entre fases
- Arcos asociados a aplicaciones específicas son los relacionados con maniobras o actuaciones de dispositivos, tales como interruptores, centelladores, pararrayos con centelladores, válvulas de mercurio, lámparas de descarga con gases, electrodos de hornos eléctricos, entre otros.

En este trabajo, los fenómenos relacionados con el arco eléctrico, son clasificados en:

- **Arco primario**, que surge durante alguna maniobra de algún dispositivo o una falla eléctrica en líneas de transmisión y que es del orden de miles de Amperios.
- **Arco secundario**, que es consecuencia del arco primario y de las maniobras realizadas para extinguir el arco primario, debido a sobretensiones causada por la apertura de una de las fases de una línea y la tensión inducida sobre la fase abierta de las otras dos, que aún están energizadas y que es del orden de decenas a centenas de Amperios.

2.2 Arco eléctrico en los interruptores [14]

La función de un interruptor de potencia es cerrar y abrir un circuito eléctrico, esto es, transportar y cortar la corriente en condiciones normales de operación o en cortocircuito, considerando que trabajan con altas corrientes. En interruptores de potencia, la intensidad

de la corriente que fluye a través de los conductores y el nivel de tensión que puede ser soportado por el material aislante son muy altos [15].

El estudio del proceso de operación de un interruptor de potencia se puede resumir en investigar la conducta del arco eléctrico que se crea dentro del mismo, en condiciones determinadas por varios factores, como pueden ser el tipo de maniobra que se está realizando, las características de la red asociada, el tipo de medio aislante, la magnitud de la corriente, entre otras. Es decir, la interrupción de corriente en un interruptor consiste en la transformación del arco eléctrico con altísimas temperaturas, en un medio aislante capaz de soportar la tensión impuesta por el circuito asociado, en el menor tiempo posible [16], [17].

El arco eléctrico es el principal elemento en el proceso de interrupción de corriente en los interruptores. A pesar de las intensas investigaciones en las últimas décadas, aún no se consigue un consenso en torno de un modelo aplicable a los diversos tipos de maniobra realizados por un interruptor y que simule exactamente su comportamiento en el instante de la interrupción.

La interrupción de una corriente alterna, y por lo tanto, la formación del arco eléctrico dentro de la cámara de interrupción del interruptor, puede ser descrita como sigue: cuando el interruptor se encuentra en la posición cerrada o de conducción, los polos del interruptor se tocan y se ejerce sobre ellos una presión determinada por un sistema mecánico, neumático o hidráulico asociado al mismo. Al llegar la señal de apertura, la presión ejercida sobre los contactos empieza a disminuir y, con ello, también lo hace la superficie de contacto, que a su vez es la del paso de corriente, lo que trae como consecuencia un notable crecimiento de la densidad de corriente en el punto de contacto. Esto produce un fuerte incremento de la temperatura en la zona, debido al efecto Joule. Como resultado, se inicia un proceso de ionización térmica del gas en contacto con dicha zona además de otra ionización provocada por los choques entre iones acelerados por el campo eléctrico entre los contactos, las moléculas y los átomos del gas aislante.

Cuando los contactos se han separado físicamente, una ligera capa de aislante (aire, SF₆, aceite) intenta interponerse entre estos y, a consecuencia de la elevada ionización de la región, se crea una columna cilíndrica de gas ionizado o plasma que llamamos "arco eléctrico". La descarga es producida por una parte de electrones que va desde el electrodo negativo al positivo y por otra parte de iones positivos que se mueven en el sentido opuesto.

El choque de los iones genera un calor intenso en los electrodos, calentándose más el electrodo positivo pues los electrones que golpean contra él tienen mayor energía total. En un arco abierto al aire, a presión normal, el electrodo positivo alcanza una temperatura de 3,500 grados Celsius. Durante la descarga, se produce una luminosidad muy intensa y un gran desprendimiento de calor. Ambos fenómenos, en caso de ser accidentales, pueden ser sumamente destructivos, como ocurre con la perforación de aisladores en las líneas de transmisión en alta tensión o de los aislantes de conductores y otros elementos eléctricos o electrónicos.

Si se mantienen las condiciones en las que fue establecido el arco, es decir, si el circuito aporta los electrones necesarios para sostener la corriente de arco y esos electrones pasan de un polo a otro más rápido que lo que el aislante se puede regenerar, entonces dicho arco se transformará en auto sostenido y permanecerá en equilibrio estable, ya que la ionización del medio está garantizada por su propio calor generado; además, el equilibrio es mantenido en la medida que el calor retenido en la columna central del arco, más el calor que es cedido al medio aislante, para este caso, actúa como medio refrigerante [18], [19].

Evidentemente, si la corriente que da origen al arco eléctrico es de naturaleza alterna, con su paso natural por cero, dicho arco cesará si los contactos están suficientemente distanciados como para soportar la tensión impuesta entre ellos por el circuito. En tanto, la inercia térmica hará que continúe un canal central caliente debido a restos de ionización y, por lo tanto, con cierta conductividad residual que permitirá el pase de una pequeña corriente llamada "postarco" que circulará dentro del canal donde la temperatura es mayor. Si el mecanismo de extinción del interruptor, en conjunto con el poder de desionización del medio aislante, es capaz de retirar el calor residual de tal zona en una proporción mayor que el calor generado por la citada corriente residual más el calor absorbido por el arco, entonces la conductancia se anulará y la corriente será totalmente interrumpida. En el caso contrario, se tendrá un restablecimiento del pase de la corriente y un consecuente un renacimiento del arco eléctrico [20].

Para que no ocurra el restablecimiento del arco y la apertura del interruptor sea exitosa, se deben satisfacer dos condiciones:

- El arco debe "enfriarse" a un estado de no conducción en el momento del cruce por cero.

- Después del cruce por cero, el interruptor debe ser capaz de soportar la tensión transitoria de restablecimiento (TTR) que aparece entre sus polos.

Entonces, la posibilidad de una apertura exitosa está relacionada con la tasa de disminución de la corriente a cero, di/dt , y con la tasa de incremento del voltaje de recuperación después del cruce por cero, dv/dt . En la Figura 2.1, se muestra lo que pasaría si el interruptor no alcanzara las condiciones para extinguir de manera eficiente el arco en el primer cruce por cero, posterior al inicio de la separación de los contactos, originándose un restablecimiento del arco.

La ocurrencia o no del restablecimiento del arco está dada por la combinación de un proceso de intercambio térmico y de la tensión impuesta entre los contactos por el circuito, como fue explicado anteriormente. El restablecimiento del arco eléctrico tendrá orígenes distintos y, según sea el caso, tendrá su nombre, tal como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2.1. Tipos de reignición del arco eléctrico [21]

TIPOS DE RESTABLECIMIENTO DEL ARCO ELÉCTRICO	
RESTABLECIMIENTO TÉRMICO	Cuando por efecto de la ionización residual del arco y la elevada temperatura de la zona, el medio aislante es incapaz de enfriar el arco, causando el resurgimiento de la corriente postarco.
RESTABLECIMIENTO DIELÉCTRICO	Cuando la tensión que soportan entre sí los contactos es superior a la que puede soportar la capa aislante, ocasionando una descarga eléctrica brusca y su posterior colapso.

Ambos tipos de reignición ocurren durante los primeros microsegundos luego del paso por cero de la corriente; si el renacimiento del arco ocurre luego de un tiempo superior al cuarto de ciclo, se lo llama “reencendido del arco”.

A partir del momento en que se apaga totalmente el arco, comienza una “carrera” entre la tensión transitoria de restablecimiento (TTR), que es la tensión que el circuito impone sobre los contactos del interruptor, y la rapidez por la cual el medio aislante trata de impedir el posterior restablecimiento del arco, lo cual tiene el nombre de “recuperación dieléctrica del medio”. La extinción total del arco será posible solamente si a partir de un paso natural

por cero de la corriente, la tensión que reaparece entre los contactos (TTR) es siempre menor que la tensión que soporta el aislante sin colapsarse.

Teniendo en cuenta la anterior explicación del funcionamiento y operación del interruptor, específicamente del comportamiento del arco del interruptor, y recordando que se ha demostrado que dicha teoría puede ser usada en la modelación del arco presente durante una falla de arco, es posible concluir sobre la complejidad de la modelación del fenómeno y la importancia de hacerlo correctamente; es decir, el arco, al no poseer propiedades físicas definidas (estas propiedades son vistas como luz, calor, sonido, ondas electromagnéticas), se hace difícil de modelar [18].

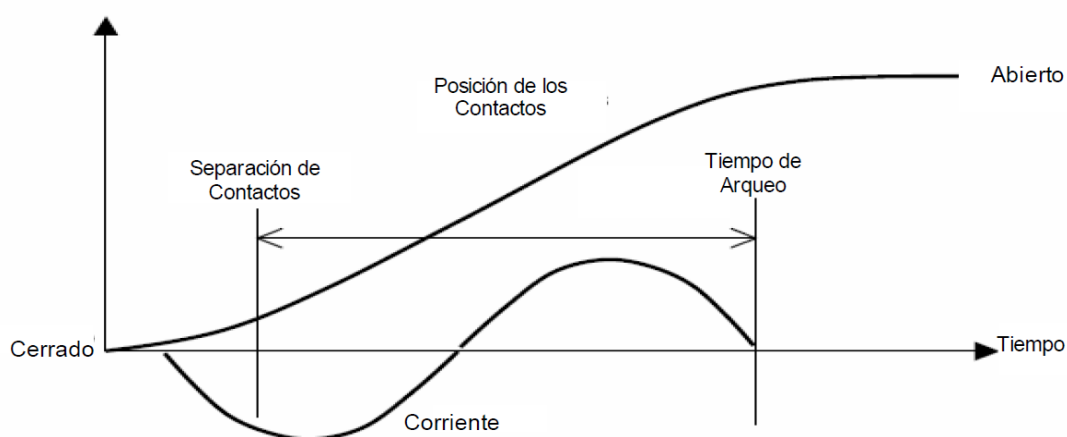


Figura 2.1. Separación de contactos e interrupción del arco eléctrico en el interruptor [21]

2.3 Modelos del arco eléctrico primario [30]

Los modelos de arco eléctrico pueden ser clasificados en tres categorías:

a) Modelos de caja negra: estos modelos describen el arco mediante ecuaciones diferenciales que relacionan la conductancia con la tensión y la corriente del arco.

Los modelos de conductancia cobraron interés para el estudio del comportamiento del arco, debido a que la conductancia (g) relaciona la intensidad y tensión de un arco eléctrico.

$$g = \frac{i_{arc}}{v_{arc}} \tag{2.1}$$

Y a su vez, la conductancia (g) ofrece una buena medida de la variación de la energía almacenada (Q) en un arco con el tiempo,

$$g = f(Q) = f(P_{entrada}, P_{perdida}, tiempo) \quad (2.2)$$

Para un arco de longitud fija, la potencia del arco depende de la potencia perdida (tanto por conducción térmica como por convección térmica) y de la variación de la energía almacenada en el plasma del arco. Esta potencia del arco se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$P_{entrada} = P = vi = P_{perdida} + \frac{dQ}{dt} \quad (2.3)$$

Como se ha comentado, la conductancia del arco, depende de la energía almacenada en el arco, y basándose en la expresión anterior, se obtiene una expresión para la conductancia instantánea en el arco:

$$g = \frac{i_{arc}}{v_{arc}} = f(Q) = f\left(\int_{t_0}^t (P - P_{perdida}) \cdot dt\right) \quad (2.4)$$

Derivando la conductancia respecto al tiempo y dividiéndola por g , se obtiene una expresión sobre la tasa de cambio de la conductancia del arco, que relaciona la conductancia con la potencia:

$$\left(\frac{dg}{dt}\right) \cdot \left(\frac{1}{g}\right) = \frac{d \ln g}{dt} = \left(\frac{dg}{dQ}\right) \cdot (P - P_{perdida}) \cdot dt \quad (2.5)$$

$$\frac{d \ln g}{dt} = \left(\frac{f'(Q)}{f(Q)}\right) \cdot (P - P_{perdida}) \quad (2.6)$$

La expresión anterior se conoce como la “ecuación general del arco”. Las soluciones de esta ecuación requieren establecer suposiciones. Los diferentes modelos dinámicos de “caja negra” son soluciones a esta ecuación sobre la base de diferentes suposiciones.

Los investigadores O. Mayr y A. M. Cassie establecieron los primeros y más importantes modelos de conductancia del arco, basándose en suposiciones radicalmente distintas sobre la columna del plasma de un arco:

- Cassie, asumió que la temperatura de la columna del plasma del arco se mantiene constante y lo que cambia es el radio de dicha columna, en función de los cambios en la corriente que atraviesa el arco.
- Mayr, en cambio, asumió que el diámetro de la columna del plasma de arco es el que se mantiene constante y lo que cambia es la temperatura con respecto al tiempo.

b) Modelos físicos: estos modelos se basan en ecuaciones de dinámica de fluidos y obedecen a las leyes de termodinámica en combinación con las ecuaciones de Maxwell. Ellos consisten en un gran número de ecuaciones diferenciales.

El arco-plasma es una reacción química y, además de la ecuación de conservación de la masa, describe las ecuaciones de velocidad de las diferentes reacciones químicas. Respecto a un equilibrio termodinámico local, las ecuaciones de velocidad se convierten en las leyes de acción de masas de equilibrio; en el caso simplificado de la reacción de un gas monoatómico, se convierten en la ecuación de Saha, que describe el grado de ionización en el gas.

c) Modelos de parámetros: en este modelo, pueden usarse expresiones analíticas y gráficas representan una correlación entre parámetros del circuito y diferentes magnitudes asociadas con el proceso de interrupción y la performance del interruptor. Estas expresiones y gráficas pueden ser obtenidas de las pruebas o de la aplicación de ambos modelos: físicos y de caja negra.

2.3.1 Modelo de Cassie

El modelo de conductancia que describe el comportamiento dinámico del arco para altas corrientes, presentado por Cassie en 1939, se sustenta en los siguientes supuestos:

- La columna de arco es de forma cilíndrica.
- El gas está altamente ionizado (alta corriente).
- La temperatura del arco se mantiene constante.
- El diámetro del plasma (d) es de valor variable.

Columna de plasma

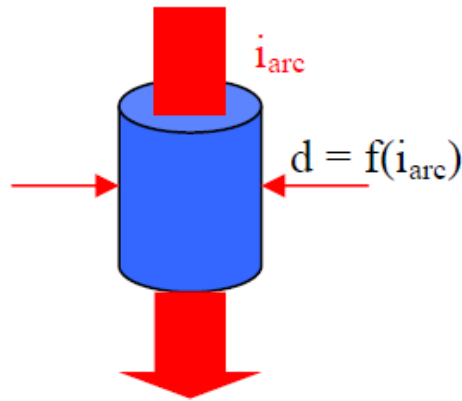


Figura 2.2. Columna de plasma, modelo Cassie [30]

Las consecuencias que fijan los anteriores supuestos son:

- El calor y la conductancia son constantes por unidad de volumen.
- Al ser un plasma alimentado por altas intensidades de corriente, está gobernado principalmente por las pérdidas de energía por convección.
- Las variaciones de corriente varían el diámetro del arco, siendo la conductancia del arco proporcional a la corriente que atraviesa el arco.

$$g \propto i_{arc} \quad (2.7)$$

$$g = f(Q) = d \cdot g_0 = \frac{Q}{Q_0} \cdot g_0$$

$$f'(Q) = \frac{g_0}{Q_0}$$

$$Q = d \cdot Q_0$$

$$P_{perdida} = d \cdot P_0 = \frac{Q}{Q_0} \cdot P_0 \quad (2.8)$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación general del arco (2.6), se obtiene la expresión del modelo de Cassie

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{P_0}{Q_0} \left(\frac{v_{arc}^2}{v_0^2} - 1 \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{v_{arc}^2}{v_0^2} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Como se sabe:

$$v_{arc} = \frac{i_{arc}}{g} \quad (2.11)$$

Reemplazando tenemos:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{i_{arc}^2}{g^2 v_0^2} - 1 \right) \quad (2.12)$$

Donde:

g , es la conductancia de arco.

g_0 , es la conductancia por unidad de volumen.

P_0 , es la potencia perdida por unidad de volumen.

Q_0 , es la energía perdida por unidad de volumen.

d , es el diámetro de la columna de plasma.

v_{arc} , es la tensión en el arco.

v_0 , es la tensión de arco en estado estacionario.

θ , es la constante de tiempo, que indica el porcentaje de energía instantánea almacenada por unidad de volumen, partido por el porcentaje de energía instantánea perdida por unidad de volumen. Mide el tiempo de cambio del diámetro de la columna de plasma.

El modelo de Cassie se utiliza para estudiar el comportamiento de la conductancia del arco en la zona de altas corrientes, a temperaturas por encima de 8000 °K.

2.3.2 Modelo de Mayr

El modelo de conductancia que propuso Mayr en 1943, se adapta muy bien para corrientes pequeñas (incluso para valores de corriente próximos a cero). Las hipótesis en las que basó su modelo son:

- El diámetro de la columna del arco, d , es constante, ya que cambios en la corriente y en la energía del arco solo cambian la temperatura del arco.
- El calor específico del gas ionizado es constante.
- El decaimiento de la temperatura depende de la conducción térmica, y la temperatura es tal que la potencia perdida es constante: $P_{perdida} = P_o = cte$.
- La conductividad eléctrica del aire ionizado depende de la temperatura exponencialmente: $\sigma = cte \cdot e^T$.
- La energía de campo magnético es despreciable, debido a las pequeñas corrientes del arco.

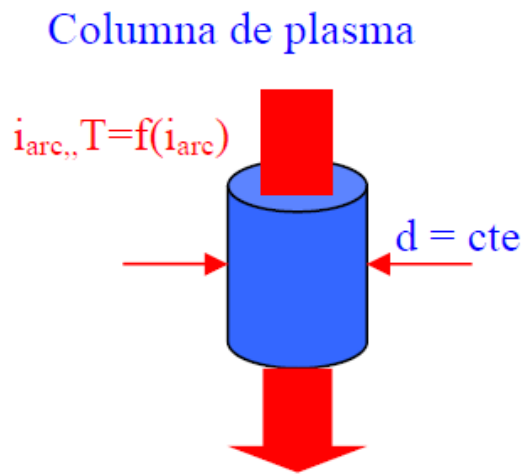


Figura 2.3. Columna de plasma, modelo de Mayr [30]

Aplicando estas suposiciones en la ecuación (2.6), se obtiene:

$$\frac{d \ln g}{dt} = \left(\frac{P_o}{Q_o} \right) \left(\frac{v_{arc} \cdot i_{arc}}{P_o} - 1 \right) \quad (2.13)$$

$$\frac{d \ln g}{dt} = \left(\frac{1}{\theta} \right) \left(\frac{P}{P_o} - 1 \right) \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{v_{arc} \cdot i_{arc}}{P_o} - 1 \right) \quad (2.15)$$

Donde:

g , es la conductancia de arco.

P_o , es la potencia perdida por unidad de volumen.

Q_o , es la energía perdida por unidad de volumen.

θ , es la constante de tiempo, definida igual que en el modelo Cassie, pero en este caso, mide el enfriamiento que se produce en el arco eléctrico, cuando no existe aporte térmico a la columna de plasma del arco.

2.4 Corriente de arco secundario [10]

En un recierre monofásico, la fase fallada es aislada por la apertura de los interruptores en ambos extremos de la línea con lo cual la corriente de falla debería de eliminarse; sin embargo, el conductor de la fase fallada continúa energizado debido al acoplamiento electromagnético y electrostático con las fases energizadas en paralelo. Ello significa que una tensión persiste en el punto de falla y que la misma puede hacer que se mantenga la corriente de falla, aunque en menor nivel de corriente. Tal hecho es conocido como “corriente de arco secundario”, y es una corriente que usualmente sigue el camino de la energía del arco primario después de desconectar la fase fallada. Cuando la energía almacenada en la línea se agota, la corriente rápidamente cae bajo condiciones normales de apertura y después la corriente se extingue, por lo que la rigidez dieléctrica del aire en el camino del arco es restablecida rápidamente. Cuando el recierre monofásico es usado, el acoplamiento entre la línea desenergizada y la línea energizada provee suficiente energía para sostener la corriente de arco secundario por un periodo prolongado.

La corriente de arco secundario es una corriente alterna y pasa a través de cero dos veces en cada ciclo del sistema de tensión aplicado. Esto proporciona la oportunidad de extinguir la corriente, siempre que el dieléctrico de la trayectoria del arco se puede restablecer con suficiente rapidez. El comportamiento de la trayectoria del arco depende de muchos factores, los meteorológicos. De todos los factores controlables, el ingeniero de diseño puede controlar la tensión de recuperación y puede influir o controlar el éxito de la extinción de la corriente de arco secundario.

La fase fallada se acopla tanto electromagnéticamente y electrostáticamente a las fases sanas; de estas formas de acoplamiento, el capacitivo es el más importante.

La capacitancia entre fases y fase a tierra puede ser efectivamente neutralizada por la adición de reactores shunt, tanto entre las fases y de fase a tierra. La configuración del reactor depende de la capacitancia que será neutralizada. Esta capacitancia es afectada por la transposición de las líneas, que si es completa, produce capacitancias iguales.

En los Anexos I y II, se desarrollan las teorías del modelo de líneas de transmisión y recierres en líneas de transmisión respectivamente.

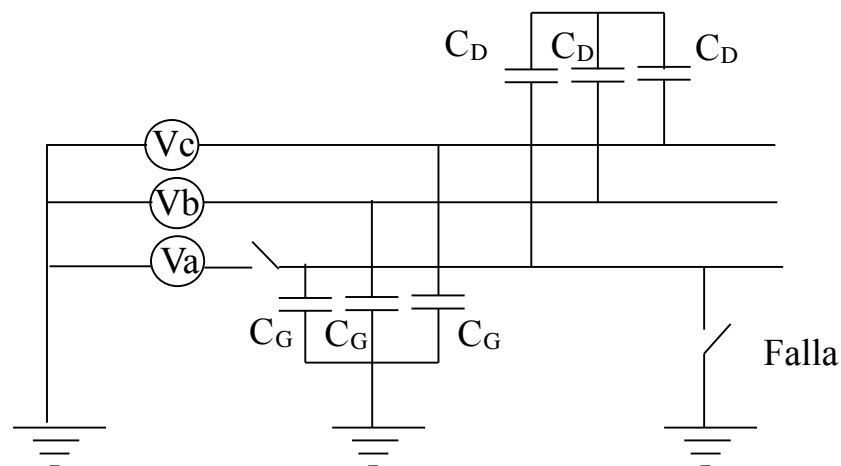
2.5 Cálculo de la corriente de arco secundario

La corriente de arco secundario (I_s) en una línea de transmisión transpuesta es básicamente el fasor suma de dos corrientes mantenidas por el acoplamiento electrostático (I_{sc}) y electromagnético (I_{sm}) de las dos fases energizadas:

$$I_s = I_{sc} + I_{sm} \quad (2.16)$$

2.5.1 Cálculo de la corriente de arco secundario vía el acoplamiento electrostático

Según Kimbark [29], la fuente que alimenta a una línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta, mostrado en la figura 3.1, puede ser dividida en dos grupos, un componente real y un componente imaginario.



$$V_a = E$$

$$V_b = -0.5 E - j 0.866 E$$

$$V_c = -0.5 E + j 0.866 E$$

Figura 2.4. Diagrama de línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta [29]

Primer grupo:

$$V_a^1 = E$$

$$V_b^1 = -0.5 E$$

$$V_c^1 = -0.5 E$$

Segundo grupo:

$$V_a^2 = 0$$

$$V_b^2 = -j 0.866 E$$

$$V_c^2 = +j 0.866 E$$

Debido a la simetría del segundo grupo con respecto a la fase a, esta fase esta exactamente a un potencial de tierra. Esto significa que con el segundo grupo de fuente no hay tensión a través de la ruta de falla cuando la fase a esta abierta y no hay corriente cuando la ruta de la falla esta cerrada. Así, este segundo grupo de fuente no contribuye en nada a la corriente de arco secundario y a la tensión de recuperación, por lo tanto esta fuente es ignorada.

La figura 2.5.a representa un esquema monofásico de una línea simétrica y completamente transpuesta. La línea tiene la fase A en condición abierta con una capacitancia C_D entre cada par de fases y una capacitancia C_G de cada fase a tierra. La fase A a tierra es representada por SW_F en el circuito de la figura 2.5.

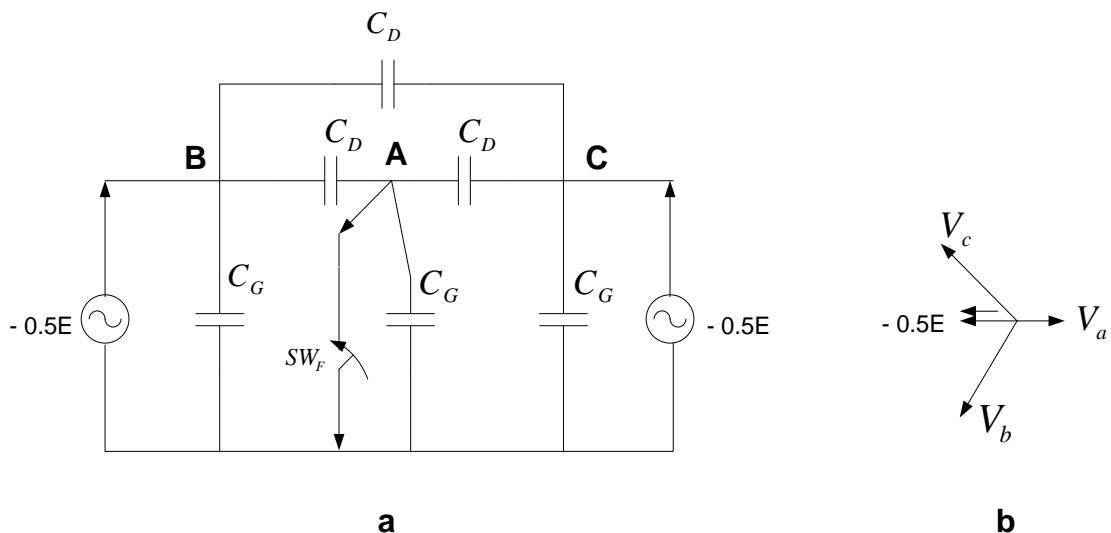


Figura 2.5. Diagrama del acoplamiento electrostático de una línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta [3]

El fasor de tensión efectiva es mostrado en la figura 2.5.b. El circuito thevenin equivalente derivado de la figura 2.5 es mostrado en la figura 2.6.a. Esto es llevado a cabo por el plegado de la fase C a la fase B.

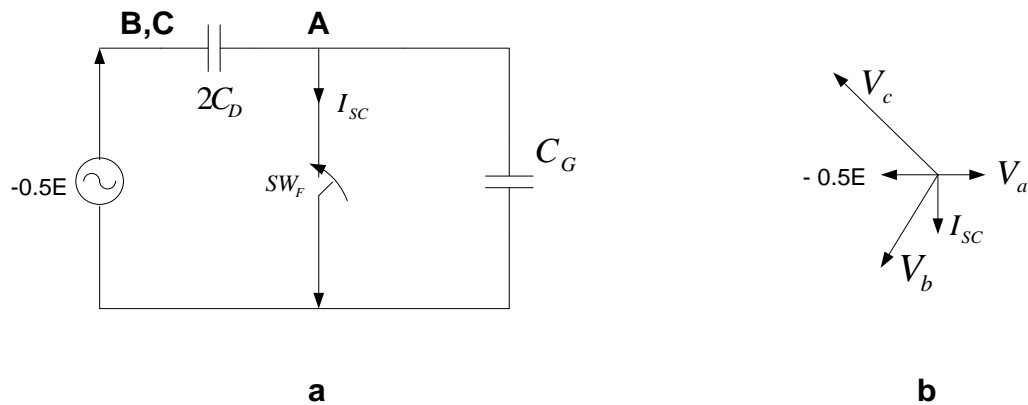


Figura 2.6. Diagrama equivalente Thevenin del acoplamiento electrostático de una línea simétrica y completamente transpuesta [3]

La magnitud de la corriente de arco secundario, debido al acoplamiento electrostático, está en directa proporción a la tensión de la línea y a la longitud de la línea. De la figura 2.6.a con SWF cerrado, se tiene:

$$I_{sc} = -0.5E \frac{1}{1/(-j\omega 2C_D)} = Ej\omega C_D \quad (2.17)$$

Un valor de corriente de arco secundario típico para líneas de 500 kV es 20A por 100 millas (13A por 100 km). La relación de fase entre la tensión de fase efectiva e I_{sc} se aprecia en la figura 2.6.b.

2.5.2 Cálculo de la corriente de arco secundario vía el acoplamiento electromagnético [3]

Cuando la línea de transmisión es equipada con reactores shunt, hay una componente de corriente de arco secundario inducido por el acoplamiento electromagnético de las fases no falladas.

El diagrama simplificado que representa la corriente de arco secundario (I_{sm}) debido al acoplamiento electromagnético a la fase A abierta, se muestra en la figura 2.7.

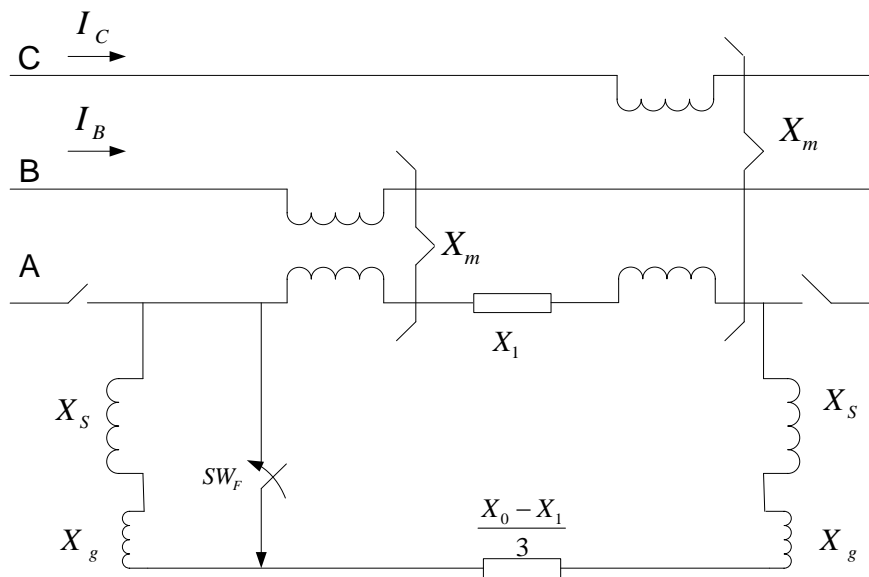


Figura 2.7. Diagrama del acoplamiento electromagnético de una línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta [3]

El cálculo preciso de I_{sm} requiere programas de transitorios electromagnéticos, tales como el EMTP o el PSCAD, debido al hecho de que la inducción mutua es la suma de muchas variables dinámicas que involucran las corrientes que fluyen por las fases sanas, la carga de línea adyacente, el método de extinción de arco secundario, etc.

2.6 Cálculo de la tensión de recuperación [3]

La magnitud de la tensión de recuperación (V_r) es directamente proporcional a la tensión de línea y los valores relativos, a C_D y C_G . Consecuentemente, V_r no varía con la longitud de la línea.

De la inspección de la figura 2.6.a, la tensión de recuperación en la fase A con SW_F abierto, se tiene:

$$V_r = -0.5E \frac{(1/-j\omega C_G)}{(1/-j\omega 2C_D) + (1/-j\omega C_G)} \quad (2.18)$$

$$V_r = -E \frac{C_G}{2C_D + C_G} \quad (2.19)$$

Valores típicos de V_r son 10-25% de la tensión de línea sin reactores shunt.

La oscilografía típica de la tensión de recuperación y la corriente de arco secundario en una línea sin compensación shunt se observa en la figura 2.8.

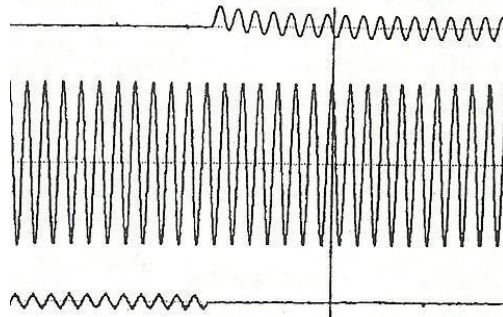


Figura 2.8. Tensión de recuperación (trazo superior) y corriente de arco secundario (trazo inferior) de las pruebas de falla 500kV de Montaña Malin-Round [3]

Si los reactores sólidamente puestos a tierra son aplicados a la línea para compensación shunt, ellos reducen el efecto capacitivo de C_G sin afectar C_D , lo que conduce a valores más altos de la tensión de recuperación. Para líneas con compensación shunt, donde C_G representa menos que la mitad del total de la carga MVAR de la línea, los reactores shunt pueden sobrecompensar C_G . En estos casos, la impedancia efectiva fase a tierra es inductiva y la tensión de recuperación puede exceder a la tensión normal línea a neutro, limitada por la saturación de los reactores shunt.

La oscilografía típica de la tensión de recuperación y corriente de arco secundario en una línea con compensación shunt es mostrada en la figura 2.9. La onda de tensión de baja frecuencia creada por la capacitancia de la fase abierta es atribuida a la frecuencia de la fuente de 60 Hz para el circuito de sintonía creada por la capacitancia de la fase abierta y los reactores de compensación shunt.

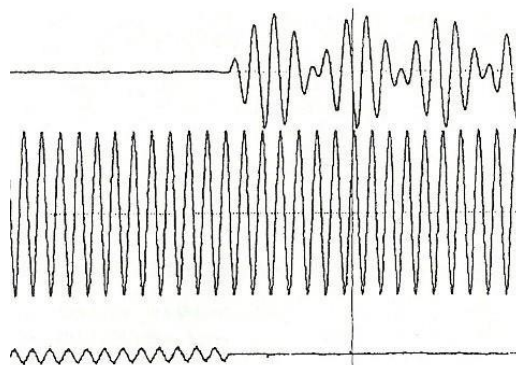


Figura 2.9 Tensión de recuperación (trazo superior) y corriente de arco secundario (trazo inferior) de las pruebas de falla 500kV de Montaña Malin-Round con compensación shunt [3]

2.7 Métodos de extinción del arco secundario [3]

La magnitud de la corriente de arco secundario y la tensión de recuperación son los factores más importantes que determinan si el arco secundario será autoextinguido.

Brevemente, la alta corriente, alta energía primaria de arco, calienta e ioniza la trayectoria del arco hasta que la fase fallada se dispara. Después, la trayectoria del arco calentado, ionizado, puede soportar la corriente de arco secundario inducida por el acoplamiento electrostático y electromagnético. Todos los métodos de extinción del arco secundario se dirigen hacia la reducción de la magnitud de la corriente de arco secundario. La tabla 2.2 indica el comportamiento probable basado en la tensión de línea para líneas sin medidas de extinción de arcos suplementarios.

Tabla 2.2. Longitudes de línea para recierre monofásico sin dispositivos de extinción de arco suplementario; por ejemplo, reactores shunt [3]

Tensión Línea a Línea (kV)	Longitud de Línea en Kilómetros (km)	
	Rango de éxito	Rango dudoso
765	0 – 80.5	80.5 – 128.7
500	0 – 96.5	96.5 – 160.9
345	0 – 225.3	225.3 – 418.4
230	0 – 482.8	482.8 – 804.7

Si la línea en la cual se emplea el disparo y recierre monofásico es más grande que las dadas en la tabla 2.2, deben tomarse medidas adicionales para reducir el arco secundario. Estas medidas se explican a continuación:

1) Líneas de transmisión con banco de cuatro reactores

La mayoría de las líneas largas de extra alta tensión requieren tres reactores monofásicos para proveer compensación reactiva shunt para el control de tensión. Un banco de cuatro reactores es creado mediante la adición de un cuarto reactor en el neutro de los tres reactores monofásicos. El cuarto reactor se utiliza para reducir las corrientes de arco secundario. El valor de la reactancia de reactor de neutro necesario para neutralizar la corriente de arco secundario se puede calcular utilizando las fórmulas dadas abajo.

La figura 2.10 representa una línea de transmisión con cuatro reactores. La falla de fase A a tierra es representada por el SW_F .

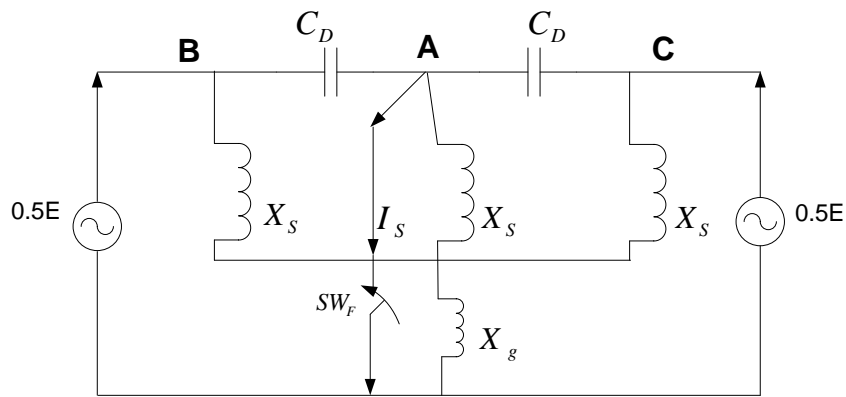


Figura 2.10. Línea de transmisión con banco de reactores conectados permanentemente [3]

El circuito de Thevenin equivalente, derivado de la figura 2.10, es mostrado en la figura 2.11.a. Esto se logra mediante el plegado de la fase C a la fase B.

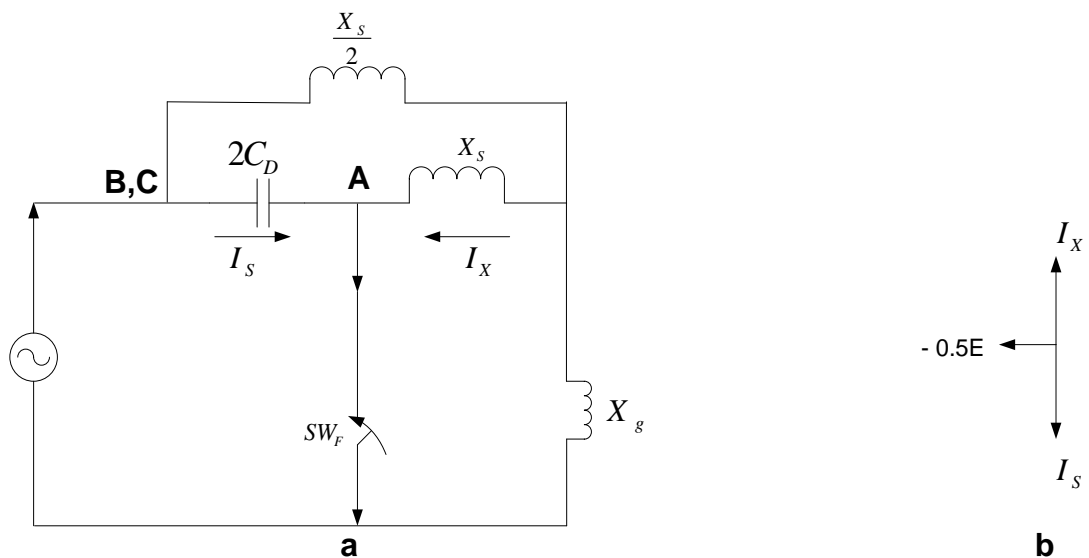


Figura 2.11. Banco de cuatro reactores permanentemente conectado, diagrama unifilar de equivalente Thevenin [3]

De la inspección de la figura 2.11.a con SW_F cerrado, si la magnitud de la corriente I_x a través del reactor shunt es igual, y opuesta a la magnitud del arco secundario I_s , la corriente efectiva a través de SW_F es cero.

El diagrama fasorial para la corriente I_s y I_x es mostrado en la figura 2.11.b.

El voltaje E_g necesario en el cuarto reactor para proveer I_x igual a I_s es calculado:

$$E_g = -I_x \cdot X_s \quad (2.20)$$

$$-I_x = I_s \quad (2.21)$$

X_s : Valor de la reactancia de fase del reactor shunt.

La corriente a través de los reactores ($X_s/2$) de las fases no falladas es:

$$I_T = \frac{0.5E - E_g}{X_s/2} = \frac{E - 2E_g}{X_s} \quad (2.22)$$

La corriente a través del reactor neutro es

$$I_g = I_T - I_x \quad (2.23)$$

$$X_g = \frac{E_g}{I_g} \quad (2.24)$$

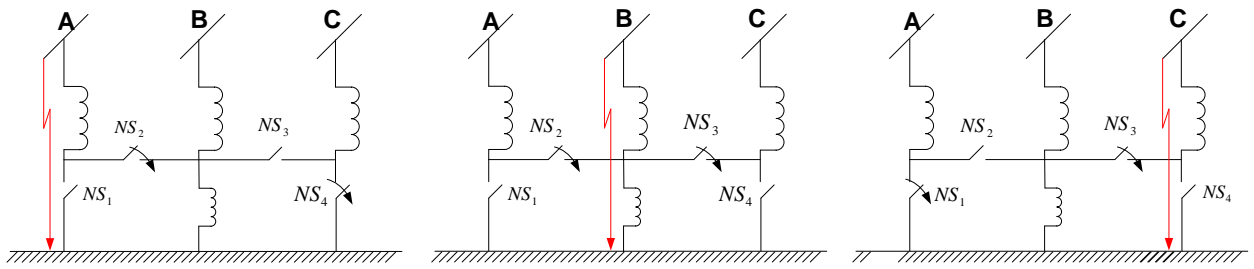
2) Modificación selectiva de interruptor para esquema de cuatro reactores

Este esquema es recomendado en líneas no transpuestas donde los bancos de cuatro reactores no son efectivos para extinguir el arco secundario.

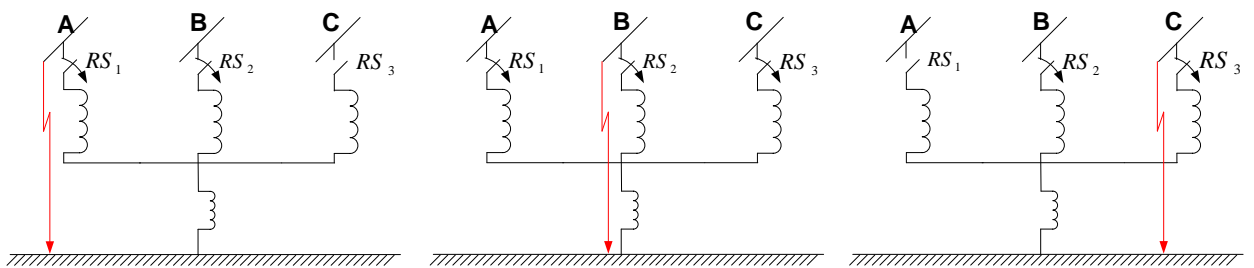
En líneas largas no transpuestas de 765kV construidas en una configuración horizontal, la proporción de la capacitancia de fase-exterior-a medio (C_{A-B} o C_{B-C}) a la capacitancia de fase-exterior-a exterior (C_{A-C}) varía desde 3.5 hasta 3.9. Para estas líneas, se puede especificar un banco de cuatro reactores con modificación selectiva de interruptor.

El banco de cuatro reactores en un extremo de la línea está diseñado para compensar la capacitancia entre las fases por un valor igual a C_{A-C} . El banco de cuatro reactores modificado en el otro extremo de la línea se desconecta para compensar la capacitancia desequilibrada ($C_{A-B}-C_{A-C}$ o $C_{B-C}-C_{A-C}$).

La figura 2.12.a muestra un banco de cuatro reactores modificado con un diseño de interruptores de neutro.



a. Esquema de interruptores de neutro



b. Esquema de Interruptores en reactores

Figura 2.12. Banco de cuatro reactores modificado con interruptores de neutro (NS) e interruptores lado de reactores (RS) y su posición para diferentes fallas fase a tierra [3]

Todos los interruptores están normalmente cerrados, pero un par de interruptores de neutro especificados opera cuando una fase fallada en particular es identificada abierta.

La figura 2.12.b muestra un banco de cuatro reactores con diferentes posiciones de los interruptores lado de alta de los reactores. Estos diseños pueden proveer la compensación necesaria para fallas en varias fases. El banco de cuatro reactores modificado para líneas no transpuestas de 765kV fue estudiado por un ancho rango de longitudes de línea y arreglos de reactores. Los resultados muestran que la corriente de arco secundario puede ser reducida a 25A rms para líneas de 765kV hasta 350km, teniendo niveles prácticos de compensación reactiva shunt [3].

3) Esquema de interruptor a tierra de alta velocidad

Este esquema involucra la aplicación de un interruptor a tierra de alta velocidad en cada fase y en cada extremo de la línea. El interruptor de tierra es cerrado en la fase fallada después que el polo del interruptor en esa fase abre, y viceversa para el recierre. En

principio, el interruptor de tierra elimina todas las tensiones de la fase abierta de la línea y, por lo tanto, quita la conducción de tensión detrás del arco secundario.

4) Esquema híbrido monofásico

El esquema de disparo primero dispara la fase fallada. Las dos fases sanas son disparadas con un tiempo de retardo de 50-60 ciclos. El ciclo de disparo es seguido por un rápido autorecierre trifásico (dentro de 10-15 ciclos). El esquema híbrido tiene un propósito dual:

- Mantiene las dos fases sanas cerradas para 50-60 ciclos después de que la falla es despejada, lo cual reduce significativamente la oscilación del sistema de potencia.
- El disparo trifásico y el autorecierre rápido eliminan la corriente de falla secundaria sin requerimiento adicional de hardware.

2.8 Cálculo de la reactancia neutro de banco de cuatro reactores de línea

El nivel de compensación reactiva en una línea de transmisión es definida como:

$$\% \text{ Compensación} = h = \frac{\text{Reactiva absorbida por los reactores}}{\text{Reactiva generada por la línea}} \quad (2.25)$$

Kimbark, en su artículo de supresión de arcos de falla a tierra en recierres monofásicos en líneas de extra alta tensión [29], muestra que el diseño de la reactancia del neutro del banco de reactores se halla de la siguiente manera:

$$K = \frac{C_0}{C_1} \quad (2.26)$$

$$X_n = \frac{X}{3} \left[\frac{1-K}{h-(1-K)} \right] \quad (2.27)$$

Donde:

C_0 : Capacitancia de secuencia cero

C_1 : Capacitancia de secuencia positiva

X : Reactancia de los reactores de línea

X_n : Reactancia del neutro

Para el modelado de las pérdidas de los reactores de línea, se utiliza el factor de calidad "Q", que se define como:

$$Q = \frac{X}{R} \quad (2.28)$$

El factor de calidad generalmente se encuentra entre 40 y 50.

2.9 Criterios de posibilidad de extinción de arco secundario [1]

Aun cuando la extinción del arco secundario también es función de una serie de variables aleatorias relacionadas con condiciones ambientales y con los niveles de polución, son dos los criterios de análisis para el análisis de la posibilidad de la extinción del arco secundario, mencionados por el Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP (CAUE), los que se resumen a continuación:

Criterio CESI (para Vn = 500kV)

El arco se extingue si:

Último pico de corriente $I_{AS(pico)} \leq 40 A_{cr}$ y

Primer pico de TRV $V_{pico} \leq 60 kV_{cr}$

Criterio ANEEL (Brasil) (para Vn = 500kV)

El arco se extingue si:

1. $I_{AS} \leq 20 A_{rms} \wedge V_{pico} \leq 180 kV_{cr}$

2. $20 A_{rms} \leq I_{AS} < 50 A_{rms} \wedge V_{pico} = -3 (I_{AS} - 20) + 180 kV_{cr}$

El criterio ANEEL (Agencia Nacional de Energía Eléctrica) de Brasil, corresponde a una curva mostrada en la figura 2.13, obtenido en laboratorio, en el cual se estima que existirá una extinción de arco secundario en hasta 500ms (tiempo muerto considerado en las pruebas para la elaboración de la curva) [32].

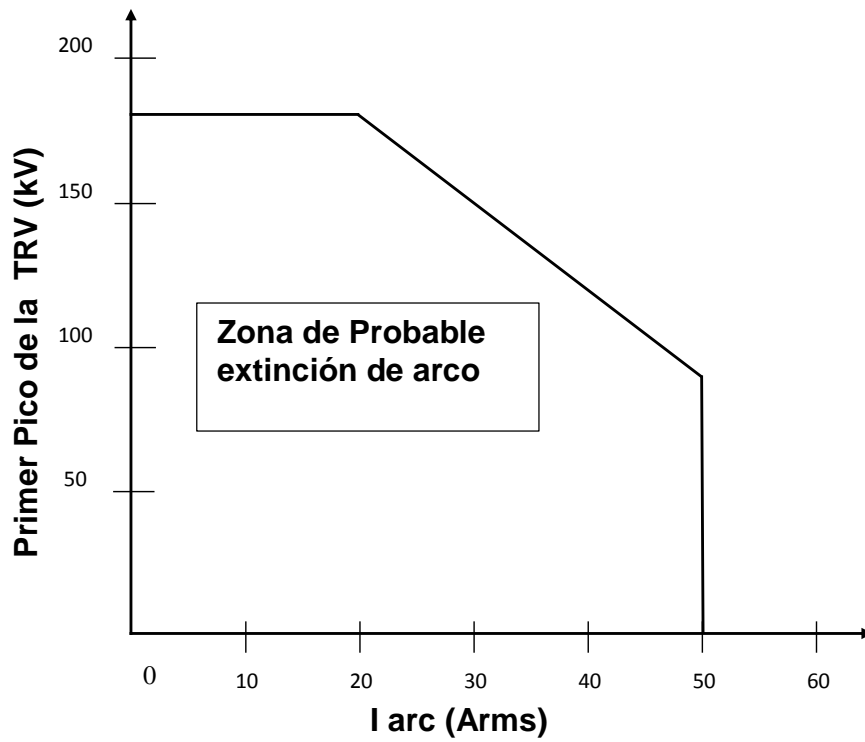


Figura 2.13. Curva de referencia para análisis de extinción de corriente de arco secundario, considerando el tiempo muerto de 500ms [32]

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA PARA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

3.1 Introducción

En este capítulo los modelos de Cassie y Mayr se implementan en el programa ATP-EMTP usando la interfaz gráfica ATP-EMTP, por medio de bloques de control conocidos como TACS (Transient Analysis Control Systems). Asimismo, se modela el comportamiento de la corriente de arco secundario.

Asimismo, se realiza simulaciones de la corriente de arco secundario en régimen permanente y utilizando el modelo de arco Mayr-Portela.

3.2 TACS en ATP-EMTP

Los TACS originalmente fueron desarrollados para representar controles de convertidores HVDC, los TACS en el programa EMTP se utiliza en la actualidad para modelar cualquier dispositivo o fenómenos que no pueden ser representados directamente por los componentes básicos de la red. Ejemplos de aplicación son controles de convertidor HVDC, sistemas de excitación de máquinas síncronas, arcos de los disyuntores, etc.[31].

Los sistemas de control, dispositivos y fenómenos modelados en TACS y la red eléctrica se resuelven por separado. Las magnitudes de salida de este último se utilizan como señales de entrada de los TACS en el mismo paso de tiempo, mientras que las cantidades de salida de TACS se convierten en señales de entrada a la solución de red durante el próximo paso de tiempo [31].

Como ilustrado en la figura 3.1, la solución de la red primero avanzó de $t-\Delta t$ sin la participación de TACS, hay por supuesto un vínculo indirecto entre ellos como la red usará las fuentes de tensión y corriente definido entre $t-\Delta t$ y t , derivado en la etapa anterior (es decir entre $t-2\Delta t$ a $t-\Delta t$). La red también recibe órdenes para la apertura y cierre de los interruptores en el tiempo t , el cual fueron calculados por TACS en la etapa anterior [31].

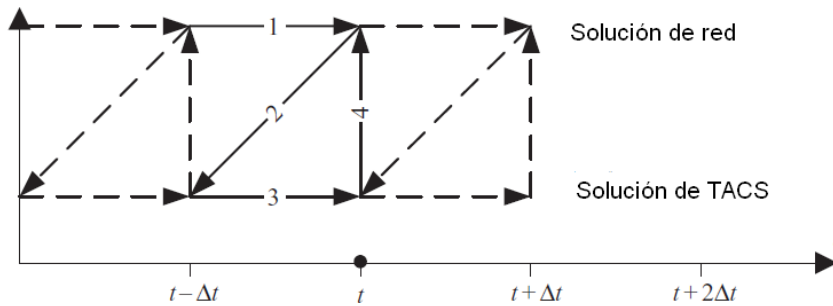
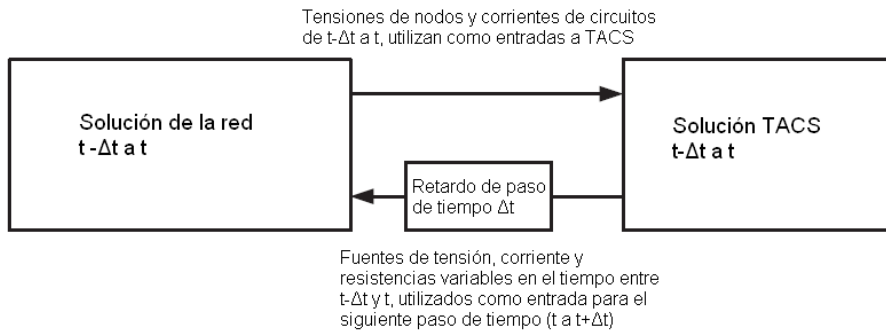


Figura 3.1 Interface entre red y solución TACS [31]

Durante la implementación de los modelos mencionados con TACS en el programa ATP-EMTP, se emplean los siguientes dispositivos [11]:



Fortran statement: mediante estos dispositivos se ingresan de forma algebraica las operaciones a realizar.



Transfer functions: se emplea para ingresar la función de transferencia.



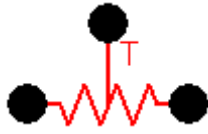
Sources DC-11: se utilizar para ingresar tensiones iniciales.



Probe TACS: se emplea para asignar variables de circuito como variables TACS.



Inicial Conditions: condiciones iniciales.



TACS Resistance: resistencia controlada por TACS. Mediante este dispositivo se integra al circuito la resistencia obtenida del modelo.

3.3 Modelos de Cassie y Mayr implementados en TACS

Los modelos de Cassie y Mayr se implementan en el programa ATP-EMTP usando su interfaz gráfica ATPDraw, por medio de bloques de control conocidos como TACS.

3.3.1 Modelo de Cassie

Partiendo de la ecuación (2.12), la cual se transforma al dominio de Laplace y se resuelve para la conductancia:

$$g^2 = \frac{i_{arc}^2}{v_0^2} \left(\frac{1}{1 + \theta s} \right) \quad (3.1)$$

La resistencia de arco, de acuerdo con la ecuación (3.1), puede representarse mediante el diagrama de bloques mostrado en la figura 3.2. A partir de este diagrama, se obtiene la implementación en TACS.

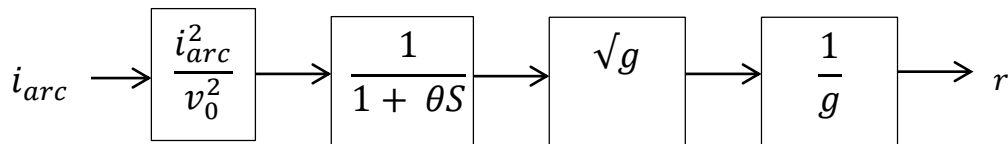


Figura 3.2. Diagrama de bloques de la ecuación de Cassie
(Fuente: elaboración propia)

Como ejemplo, una falla a tierra de la fase A, cerca de la máquina síncrona Type 59 y de un transformador de 18.525/310.3 kV, tal como se muestra en la figura 3.3:

Máquina síncrona Type 59/56:

800MVA, 19kV, 60Hz

$X_d=1.7$, $X'_d=0.42$, $X''_d=0.30$

Transformador de potencia:

18.5/310.33kV

$V_{cc} = 8\%$

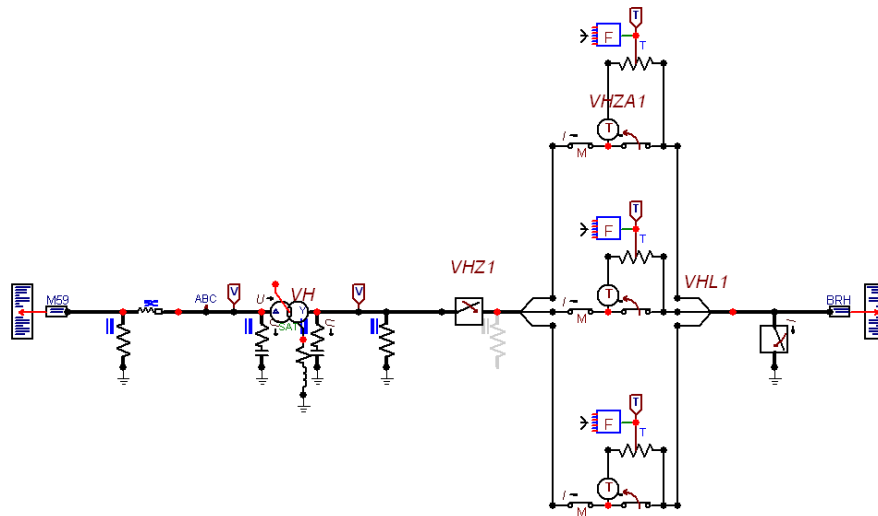


Figura 3.3. Esquema unifilar de circuito para emplear el modelo de arco Cassie (Fuente: elaboración propia)

En la figura 3.3, también se puede apreciar cómo, mediante el empleo de TACS, se simulan las características del arco eléctrico con el modelo de Cassie. En la Figura 3.4, se muestra el modelo de Cassie implementado en TACS, la constante de tiempo $\theta = 2\mu s$ y la tensión de arco estacionario $v_0 = 1000$ Voltios.

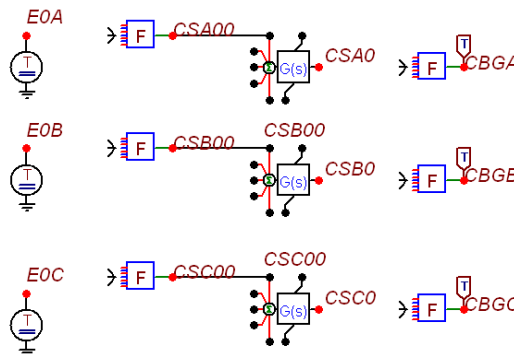


Figura 3.4. Modelo de Cassie implementado en TACS (Fuente: elaboración propia)

El interruptor ideal tiene los parámetros que se muestran en la figura 3.5 y el interruptor con el TAC se muestra en la figura 3.6.

El tiempo de operación del interruptor ideal es de 0.125 s y el tiempo de operación del interruptor con el modelo de arco Cassie es de 0.0455 s.

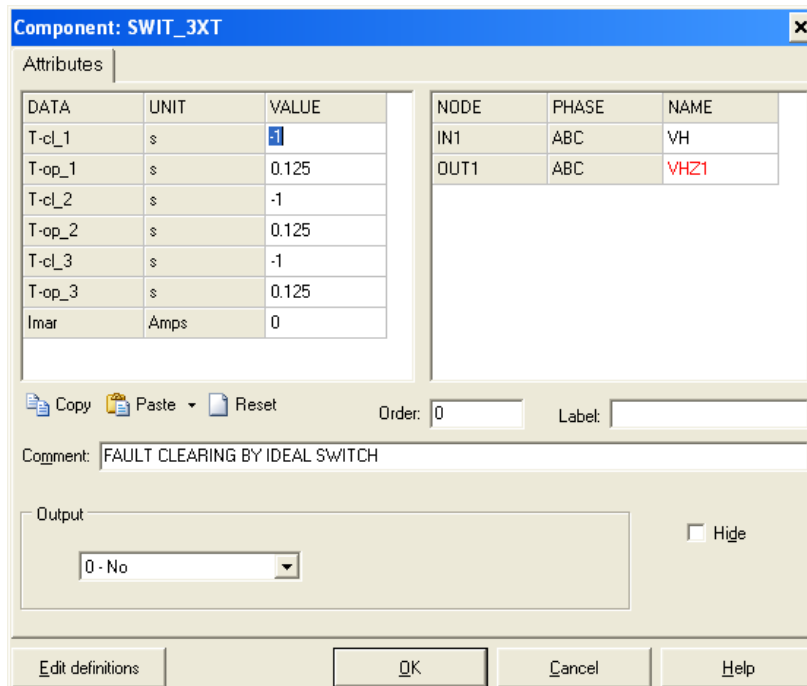


Figura 3.5. Interruptor ideal
(Fuente: elaboración propia)

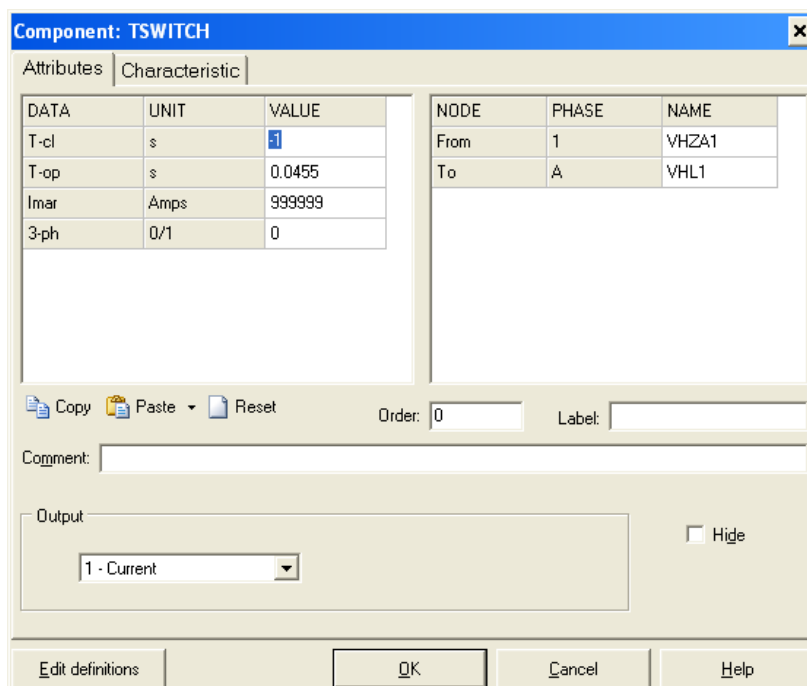


Figura 3.6. Interruptor con el modelo de arco Cassie
(Fuente: elaboración propia)

La simulación de la corriente de falla monofásica de la fase A, sin y con el modelo de arco, se muestra en las figura 3.7.

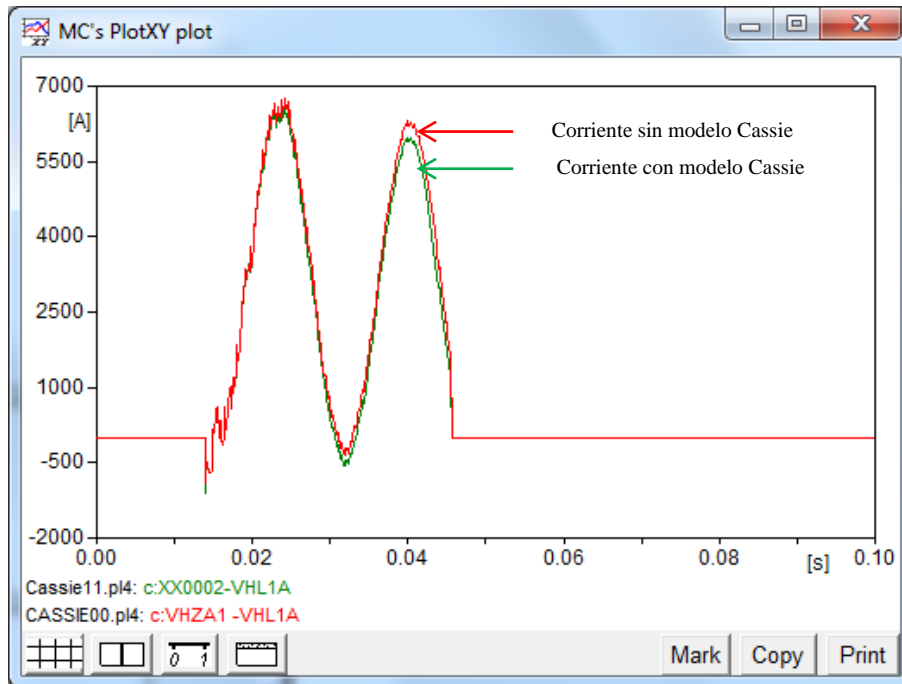


Figura 3.7. Corriente de falla monofásica, fase A con y sin modelo de arco Cassie (Fuente: elaboración propia)

En la figuras 3.7, se puede apreciar que la corriente de falla monofásica, fase A, sin y con modelo de arco Cassie, en el segundo pico de la onda de corrientes son de 6280A y 5952 A. respectivamente.

3.3.2 Modelo de Mayr

Partiendo de la ecuación (2.16) y reescribiendo la ecuación en función del arco eléctrico de acuerdo con la ecuación (2.1), se tiene:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{i_{arc}^2}{P_0} - g \right) \quad (3.2)$$

Transformando la ecuación al dominio de Laplace, se tiene:

$$g = \frac{i_{arc}^2}{P_0} \left[\frac{1}{1 + \theta S} \right] \quad (3.3)$$

A partir de (3.3), se puede presentar la resistencia del arco mediante el diagrama de bloques, mostrado en la figura 3.8. La implementación del modelo TACS de ATP se realiza siguiendo una lógica similar a la del modelo de Cassie:

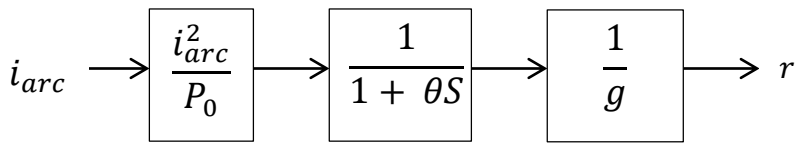


Figura 3.8. Diagrama de bloques de Mayr
(Fuente: elaboración propia)

Como ejemplo, una falla a tierra en el circuito de la figura 3.9: el circuito de 300kV, 60Hz, interruptor de 50kA, la falla se ubica a 90% de la línea de 450 Ohm.

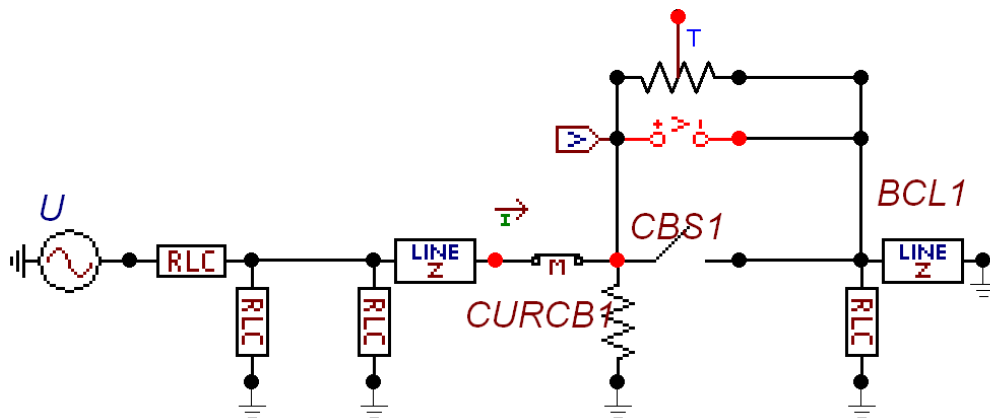


Figura 3.9. Diagrama eléctrico con cortocircuito
(Fuente: elaboración propia)

En la figura 3.9, se muestra que mediante el empleo de TACS se simula las características del arco con el modelo Mayr. En la figura 3.10, se observa el modelo de Mayr implementado con TACS, la constante de tiempo $\theta = 1\mu s$ y la potencia de pérdida $P_0 = 293kW$.

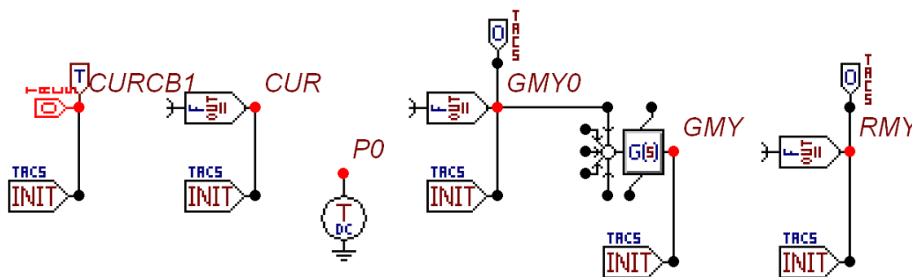


Figura 3.10. Modelo de Mayr implementado en TACS
(Fuente: elaboración propia)

Los parámetros del interruptor CBS1 se muestran en la figura 3.11 siguiente.

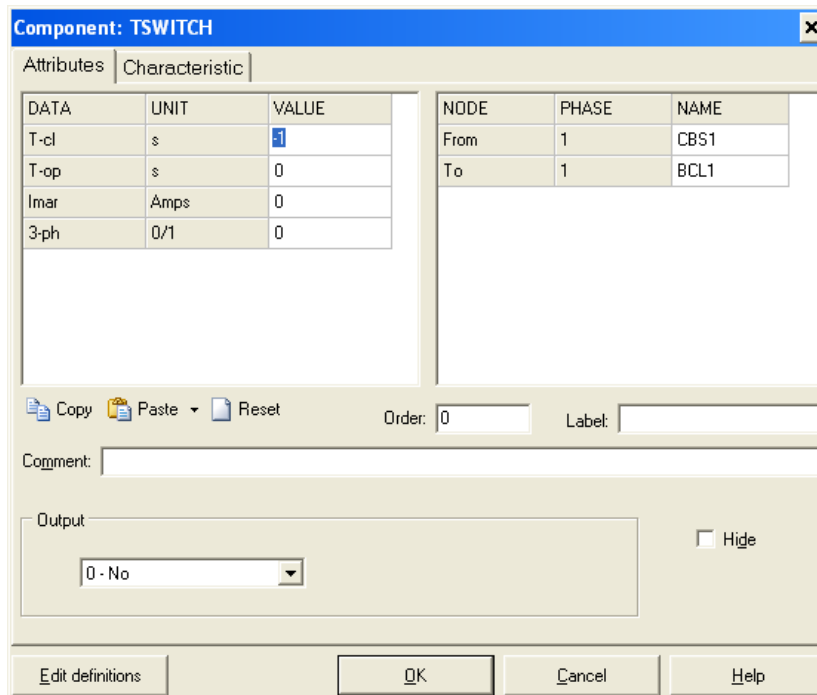


Figura 3.11. Parámetros de interruptor CBS1
(Fuente: elaboración propia)

En las figuras 3.12, 3.13 y 3.14, se muestran las tensiones, corrientes y resistencias de arco a través del interruptor CBS1.

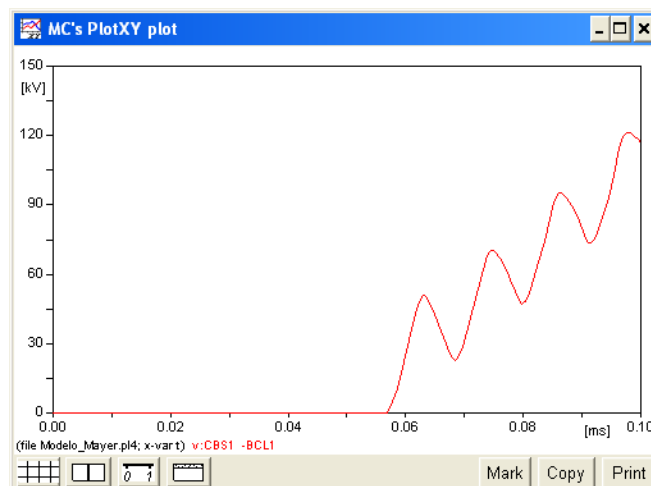


Figura 3.12. Tensión en el interruptor CBS1
(Fuente: elaboración propia)

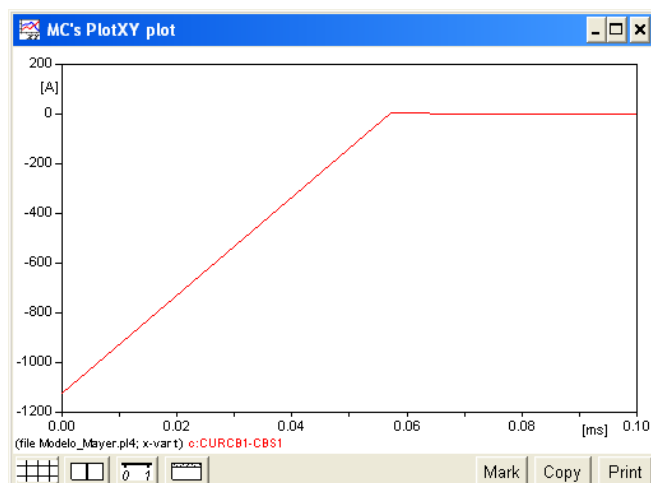


Figura 3.13. Corriente en el interruptor CBS1
(Fuente: elaboración propia)

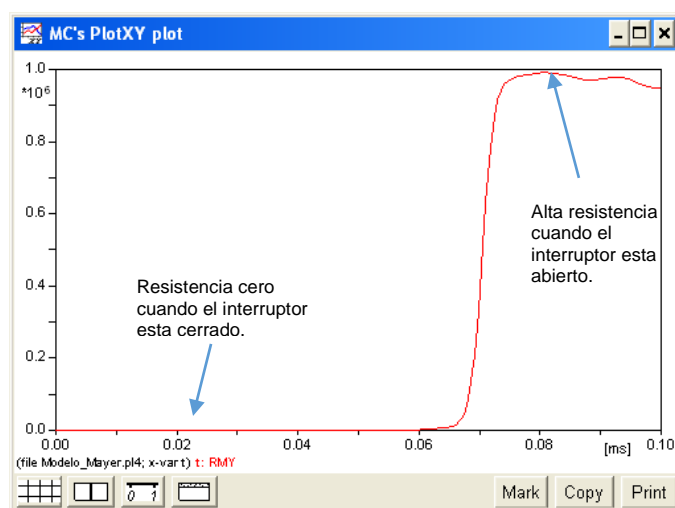


Figura 3.14. Resistencia de arco en el interruptor CBS1
(Fuente: elaboración propia)

La figura 3.12 muestra que la tensión entre los contactos del interruptor empieza a aumentar a los 0.041 segundos, en la figura 3.13 se observa que la corriente en el interruptor disminuye de 1125 A a 0 Amperios, la apertura es a los 0.042 segundos. En la figura 3.14 se muestra que existe baja resistencia entre los contactos del interruptor cuando esta cerrado y una alta resistencia cuando el interruptor apertura, llegando a una resistencia de 10^6 Ohm.

3.4 Modelamiento del arco secundario [13]

Elemento de naturaleza no lineal, el arco no puede ser modelado con una metodología aplicable a elementos de sistemas de potencia con un comportamiento lineal. De este

modo, aunque de una forma mucho más simple, en este capítulo se modela el arco y sus particularidades.

El arco eléctrico que surge en la ocurrencia de una falla monofásica en una línea de transmisión posee dos estados principales: mientras que el arco primario corresponde a la alta corriente observada durante la falla, el arco secundario surge después del aislamiento de los mismos por los terminales del interruptor de circuito, que corresponde a corrientes menores en el rango de decenas o cientos de amperios.

Como se mencionó anteriormente, la importancia del estudio del arco secundario está relacionada con la apertura y posterior recierre monofásico de las líneas de transmisión en la ocurrencia de fallas fase-tierra, que representan un porcentaje significativo de la cantidad total de fallas en una línea de transmisión a lo largo de su vida útil. La principal ventaja de la maniobra monofásica en relación con la trifásica es la continuidad de suministro de energía, incluso parcialmente, por las fases sanas, lo que contribuye positivamente tanto para la dinámica del sistema como para la estabilidad electromecánica y la tensión.

Sin embargo, el recierre monofásico solo tendrá éxito si el arco secundario formado después de la apertura de los dos terminales, y cuya corriente sustituye a la corriente de falla, se extingue antes del recierre, ya sea de forma automática por las condiciones favorables que impone el sistema, ya sea por la fuerza debida a la actuación de un equipo auxiliar.

Como el modelado del arco en el dominio del tiempo es una tarea menos laboriosa que en el dominio de la frecuencia, como consecuencia de no linealidades impuestas por sus ecuaciones básicas, la búsqueda para el desarrollo de un modelo en un simulador en el dominio del tiempo parece justificada.

3.4.1 Revisión de información

Aunque el arco ha sido tradicionalmente representado por una resistencia constante R , en el caso de los ingenieros de protección, por la expresión [54]:

$$R_{arco} = \frac{440 \cdot L_{arco}}{I_{arco}} \quad (3.4)$$

Donde L_{arco} y I_{arco} son, respectivamente, la longitud (en pies) y la corriente de arco.

Se han realizado estudios detallados del comportamiento del arco eléctrico desde el principio del siglo pasado. Dos de los más conocidos contribuyentes a la teoría de arco secundario fueron A.M. Cassie y O. Mayr, cuyos estudios durante las décadas de 1930 y 1940, se tradujeron en modelos de caja negra, utilizados en la actualidad en sistemas de potencia. Es importante señalar, sin embargo, que antes de ellos, en 1905, Theodor Simon ya había propuesto uno de los primeros modelos de caja negra de arco expresada por:

$$\frac{dq(t)}{dt} = u(t) \cdot i(t) - p(t) \quad (3.5)$$

Donde $q(t)$ es la energía acumulada por el medio en el cual el arco ocurre; $u(t)$ y $i(t)$ son respectivamente, la tensión y corriente de arco; y $p(t)$ es la potencia entregada al medio.

Los modelos de Cassie y de Mayr relacionan la tensión, la corriente y la conductancia del arco con dos constantes: una es la constante de tiempo del arco, que representa su inercia térmica. Físicamente, la formulación de Cassie, expresada en (3.6), supone que el arco está confinado en un canal con la temperatura, densidad de corriente y la intensidad de campo eléctrico constante; en tanto, la de Mayr, expresada en (3.7), supone que el arco se enfría solamente por el aire, sin tener en cuenta explícitamente la radiación.

$$\frac{1}{g(t)} \cdot \frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\theta} \cdot \left(\frac{u(t)}{u_0} - 1 \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{g(t)} \cdot \frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\theta} \cdot \left(\frac{u(t) \cdot i(t)}{P_0} - 1 \right) \quad (3.7)$$

En (3.6) y (3.7), $g(t)$ es la conductancia del arco, θ es la constante de tiempo térmica y u_0 y P_0 son constantes. En la década de 1970, se presentó una ecuación que representa un modelo generalizado del arco eléctrico, dado por [24]:

$$\frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\theta} \cdot (G - g(t)) \quad (3.8)$$

Donde G es la conductancia del arco en régimen permanente, algo similar a (3.6) y (3.7).

Fue en la década de 1990 que aparecieron nuevas y significativas contribuciones a la modelización del arco secundario, entre las que se distinguen dos líneas de investigación: una toma (3.8) como base y busca obtener expresiones para la conductancia G y la constante de tiempo θ [25], [26]; la otra conduce a cambios en (3.7), en particular con respecto a la consideración de dos subarcos distintos, con constantes de tiempo θ_1 y θ_2 diferentes [23], [27].

Esta segunda línea también será desarrollada en este trabajo, así como los subarcos expresados en el modelo de H. G. Thiel, que corresponde a una variación (3.7) en el que los parámetros θ y P_0 no son constantes, sino funciones de la conductancia $g(t)$ del arco dada por:

$$\begin{aligned}\theta &= \theta(t) = A \cdot g^\alpha(t) \\ P_0 &= P_0(t) = B \cdot g^\beta(t)\end{aligned}\tag{3.9}$$

Donde A , B , α y β son constantes.

3.4.2 Selección del modelo

Probablemente, una de las principales limitaciones para los modelos de caja negra del arco secundario, incluidos los modelos de Cassie y de Mayr, reside en el hecho de que suponen la existencia de una única constante de tiempo θ , a pesar de que los laboratorios de ensayo y análisis de las pruebas de interruptores indican tener por lo menos dos de ellos: θ_1 y θ_2 , con diferentes órdenes de magnitud.

En un intento de desarrollar un modelo, Portela consideró la combinación de dos subarcos en serie o en paralelo, cada uno con una constante de tiempo [27]. Cada subarco estaría representado por su modelo de caja negra convencional, y el modelado sería completo con la inclusión de un término que representa la interacción entre ellos.

La asociación de subarcos con diferentes constantes de tiempo, inclusive, cumple con diversos aspectos de la física de arco; especialmente, el hecho de que su trayectoria se puede dividir en dos regiones con características diferentes: mientras que el centro tiene una alta temperatura y baja inercia térmica, la externa tiene temperaturas más bajas y una mayor inercia térmica.

Por lo tanto, en este estudio, el arco secundario se puede modelar por el conjunto de expresiones [28]:

$$\begin{aligned} \frac{d[\ln(g_1(t))]}{dt} &= \frac{1}{\theta_1} \cdot \left[\frac{u_1(t).i_1(t) + J \cdot \left(\frac{\varepsilon \cdot g_2(t)}{g_1(t)} - 1 \right)}{\xi \cdot P_0} - 1 \right] \\ \frac{d[\ln(g_2(t))]}{dt} &= \frac{1}{\theta_2} \cdot \left[\frac{u_2(t).i_2(t) + J \cdot \left(\frac{g_1(t)}{\varepsilon g_2(t)} - 1 \right)}{\eta \cdot P_0} - 1 \right] \end{aligned} \quad (3.10)$$

Una variante del modelo de Thiel, anteriormente presentado: en (3.10), $g_1(t)$ y $g_2(t)$ son las conductancias de los arcos, $u_1(t)$, $u_2(t)$, $i_1(t)$ e $i_2(t)$ son los voltajes y corrientes, y ξ , ε y η son constantes.

$$P_0 = \begin{cases} B_1 \cdot g^{\beta_1}(t), & g(t) \leq g_{ind} \\ B_2 \cdot g^{\beta_2}(t), & g(t) > g_{ind} \end{cases}$$

$$J = j_r \cdot P_0$$

Donde $g(t)$ es la conductancia total del arco y B_1 , B_2 , β_1 , β_2 y j_r son también constantes. Las primeras cuatro constantes pueden ser definidas por la característica estacionaria de arco que une su campo eléctrico longitudinal y su corriente en un gráfico en formato log-log: tiene una forma similar a la de la figura 3.15; además, se observa en esta figura la indicación del valor de g_{ind} .

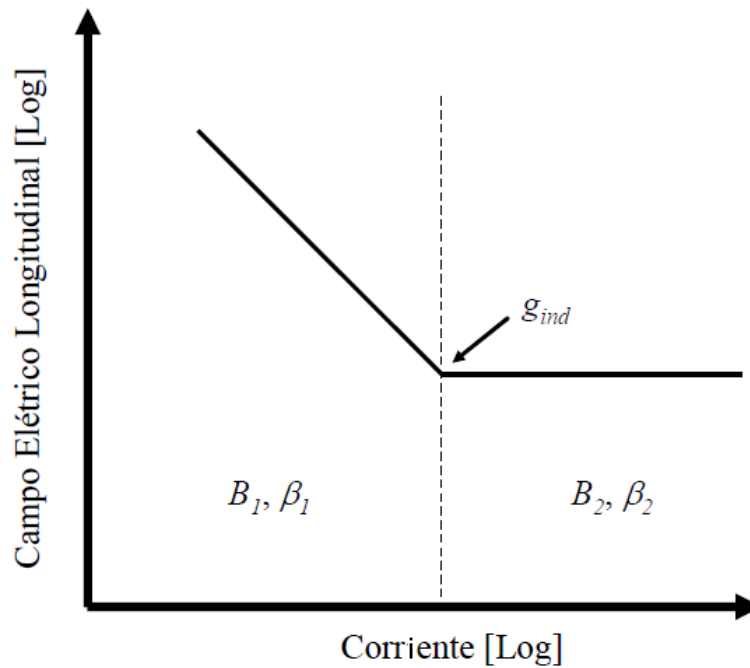


Figura 3.15. Característica estacionaria de un arco [13]

Una de las posibilidades para refinar aún más el modelo es considerar θ_1 y θ_2 funciones de la conductancia total de $g(t)$ de la forma:

$$\theta = \begin{cases} \theta_0 & g(t) \leq g_{ref} \\ \theta_0 \cdot \left[\frac{g(t)}{g_{ref}} \right]^\alpha & g(t) > g_{ref} \end{cases} \quad (3.11)$$

Siendo g_{ref} una constante.

3.4.3 Estudios de arco secundario

En el presente estudio, se refiere a la simulación del arco secundario en el dominio del tiempo. Es importante recordar que otros estudios pueden y deben ser conducidos conjuntamente o de forma previa al análisis de la dinámica del arco.

La metodología desarrollada en [22] relaciona tres estudios principales, ordenados de manera creciente según la dificultad: régimen permanente, estabilidad incremental y dinámica del arco secundario.

El estudio en régimen permanente facilita en gran medida la representación de la línea y de la red a los terminales; básicamente, trata de determinar las tensiones y corrientes del

arco secundario cuando su conductancia disminuye desde el infinito (corto Franco) a cero (arco extinguido). La corriente máxima es evidente en la primera situación, mientras que la máxima tensión de restablecimiento en la en la segunda.

Las corrientes encontradas pueden ser comparadas con los valores de referencia indicativos para los sistemas de alta tensión, lo que da una idea de la dificultad de la autoextinción de arco secundario: las corrientes continuas de hasta 20 A tienen una alta probabilidad de autoextinción, pero las corrientes de extinción por encima de 100 A [22] tienen menos probabilidad.

Los datos adicionales que pueden ser obtenidos aun en régimen permanente son la ubicación del punto de la LT, donde se producen las condiciones más severas para la extinción del arco (mayor corriente) y una indicación de la magnitud de algunos parámetros de los equipos necesarios para la extinción en el caso de altas corrientes. El estudio de la estabilidad incremental del arco, hecho en el dominio de la frecuencia, permite definir si hay o no extinción en un determinado punto de operación (por ejemplo, un par corriente-voltaje obtenido en el estudio en régimen permanente). La estabilidad se caracteriza cuando la ecuación:

$$Z_{eq}(s) + Z_{arco}(s) = 0 \quad (3.12)$$

tiene una raíz con parte real negativa. En (3.12), Z_{eq} es la impedancia equivalente de los terminales de arco y la impedancia incremental del arco. El criterio para la estabilidad se puede utilizar, por ejemplo, la frecuencia de Nyquist.

Cuanto mayor es la corriente del arco, más fácil es su estabilidad o, en otras palabras, no su extinción. Por lo tanto, este análisis es útil para identificar las condiciones en las que se necesitan equipos o cambios en la topología del sistema para promover la extinción del arco sostenido, sin implicar el dominio del tiempo.

Mientras que los dos estudios anteriores permiten identificar situaciones en las que el arco secundario se extingue o no sin necesidad de utilizar el dominio del tiempo, algunos datos referentes a la dinámica (por ejemplo, el tiempo muerto) no pueden ser extraídos de ellos.

Los estudios en el dominio del tiempo, enfoque mayor de este trabajo, pueden abarcar todo el proceso de maniobra, desde el comienzo de la falla monofásica hasta la extinción de arco secundario y posterior recierre. La siguiente lista proporciona un resumen de estos pasos:

- Operación normal del sistema.
- Ocurrencia de la falla monofásica.
- Apertura del interruptor en uno de los extremos de la línea, con representación o no de este arco.
- Apertura del interruptor en el otro extremo de la línea y ocurrencia de arco secundario en el aire, con representación o no del arco en el interruptor.

Es importante observar que las condiciones finales para cada etapa son las condiciones iniciales para el siguiente paso.

3.4.4 Implementación computacional

Como se puede ver a partir de (3.10), el arco secundario se puede representar por medio de resistencias no lineales, cuyos valores son los inversos de la conductancia calculada por esas expresiones.

Simuladores en el dominio del tiempo, como ATP o PSCAD / EMTDC, permiten una representación relativamente simple de tal elemento por medio de resistencias variables, cuyos valores instantáneos de resistencias son definidos por una señal de control. En el caso de ATP, pueden ser utilizadas las rutinas TACS o MODELS, mientras que en PSCAD / EMTDC, se utilizan bloques de control interno del programa o, alternativamente, los bloques programados por el usuario, usando el lenguaje C o FORTRAN.

En este trabajo, hemos adoptado el programa de la rutina TACS. Las figuras 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 muestran la implementación del modelo Mayr-Portela, de arco secundario con dos constantes de tiempo en ATP.

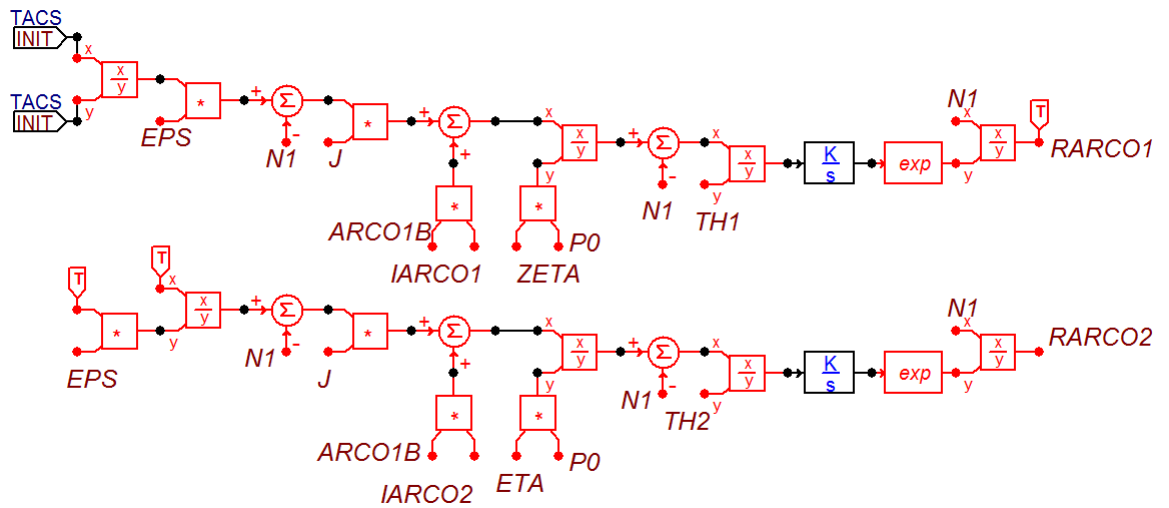


Figura 3.16. El control de las conductancias $g_1(t)$ y $g_2(t)$ en un arco con dos constantes de tiempo (Fuente: elaboración propia)

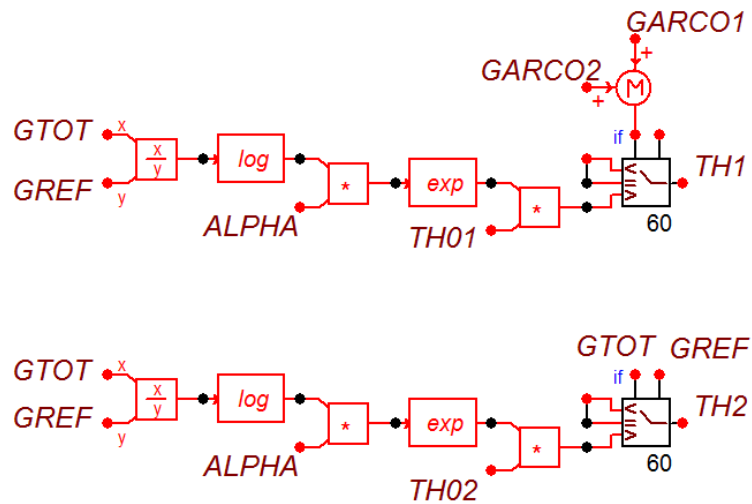


Figura 3.17. Cálculo de las constantes de tiempo θ_1 y θ_2 (Fuente: elaboración propia)

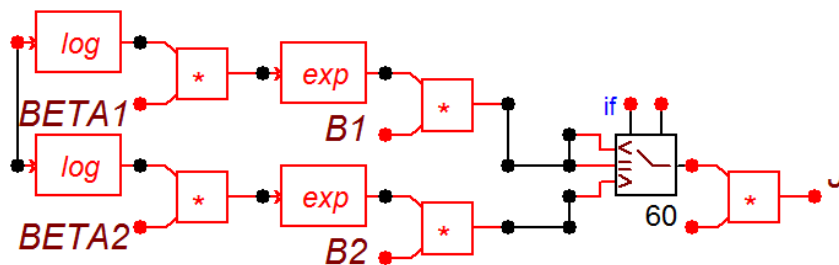


Figura 3.18. Cálculo de P_0 y J (Fuente: elaboración propia)

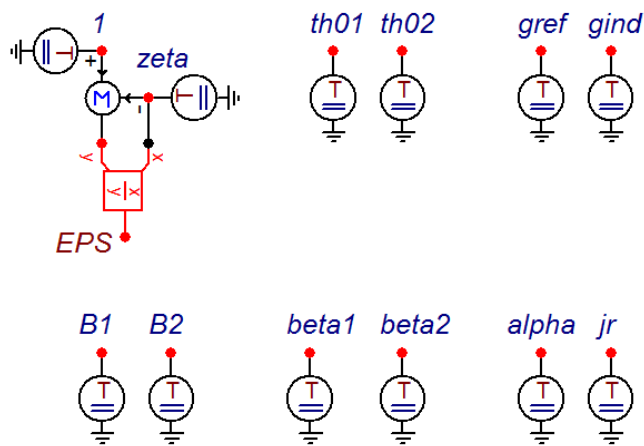


Figura 3.19. Constantes
(Fuente: elaboración propia)

Como se mencionó en la sección 4.3, la simulación de maniobra monofásica completa en el dominio del tiempo abarca los regímenes transitorios no solo del arco secundario en el aire, sino también del arco primario y la apertura de los interruptores de potencia en los terminales de línea (con o sin representación de estos arcos). Sin embargo, si hay interés solo en la extinción de arco secundario, el trabajo se puede reducir sustancialmente considerando únicamente la última etapa, que comienza con la apertura del segundo interruptor y la correspondiente aparición de arco secundario [13].

En este caso, es muy importante la determinación de las condiciones iniciales del problema, es decir, los valores de las conductancias del arco en el momento en el cual se inicia. Una de las maneras de establecer estas condiciones sin simular los pasos restantes es considerando el arco en equilibrio en el momento de su aparición; por lo tanto, el uso de la característica de la figura 3.15 y a partir del valor de la corriente de falla en el inicio arco $i_{arco}(0)$ para determinar su tensión inicial $v_{arco}(0)$, igual a la del campo eléctrico longitudinal multiplicada por su longitud inicial. Con estos valores y considerando subarcos en paralelo, se pueden encontrar las conductancias por medio de las expresiones [13]:

$$\begin{aligned}
 g(0) &= \frac{i_{arco}(0)}{v_{arco}(0)} \\
 g_1(0) &= \xi \cdot g(0) \\
 g_2(0) &= \eta \cdot g(0)
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Presentamos, a continuación, una simulación simple para validar el modelo desarrollado en las figuras 3.16 y 3.17. Portela [29] ilustra los comportamientos

experimentales de estos arcos secundarios en el aire, uno con las siguientes características:

- $\theta_{01} = 3.92 \mu s$; $\theta_{02} = 76.56 \mu s$; $g_{ref} = 2.5 \mu S$; $\alpha = 0.2$;
- $J_r = 0.03$; $\xi = 0.291667$; $\eta = 1 - \xi$; $\varepsilon = \frac{\xi}{\eta}$;
- $B_1(0) = 8.55929 \times 10^5$; $\beta_1 = 0.215798$; $B_2 = 26.5225 \times 10^6$; $\beta_2 = 1.0$;
 $g_{ind} = 12.5437 mS$;
- $g_1(0) = 10.75 mS$; $g_2(0) = 26.0 mS$.

Se utiliza el circuito de la figura 3.20, donde la fuente es de 500kV; la frecuencia, de 60Hz; y la línea de transmisión, de 360 km.

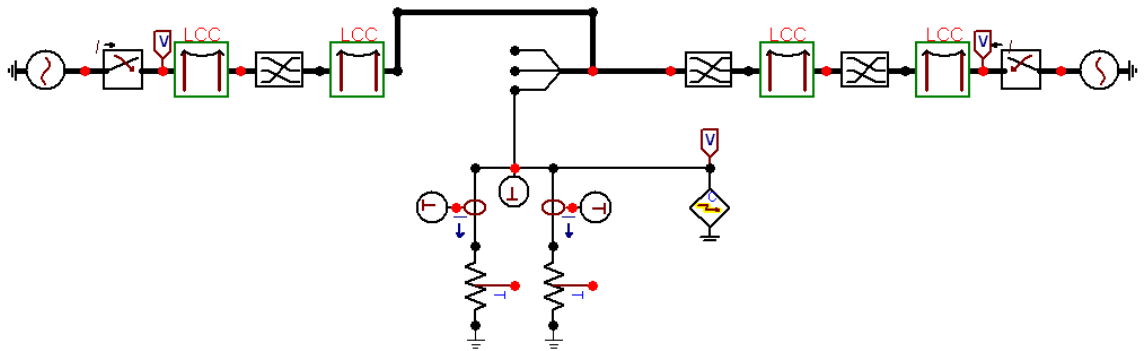


Figura 3.20. Circuito Eléctrico
(Fuente: elaboración propia)

Los gráficos generados por la simulación de este circuito en ATP para las conductancias g_1 y g_2 de los subarcos en función del tiempo son mostrados en la figura 3.21.

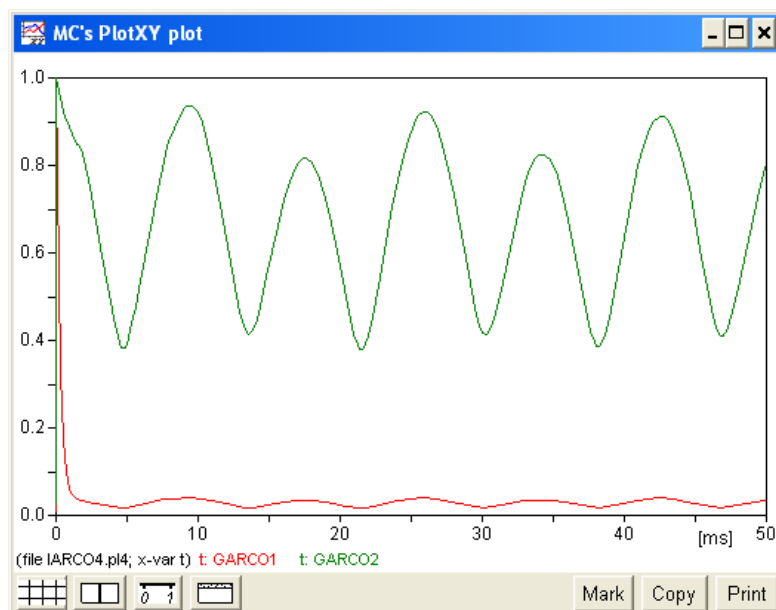


Figura 3.21. Conductancias $g_1(t)$ y $g_2(t)$ en ejemplo de simulación de un arco secundario (Fuente: elaboración propia)

En este caso, se observa que el arco secundario no se extingue automáticamente, ya que ambas conductancias no se reducen a cero: este es un caso típico para la aplicación de un equipamiento para forzar su extinción.

3.5 Simulaciones en ATP-EMTP

A continuación se realiza las simulaciones con el programa ATP-EMTP de un recierre monofásico a tierra en una línea de transmisión de 500kV, lo que genera la corriente primaria, luego la corriente de arco secundario y tensión de recuperación.

En primer lugar, el modelo del arco eléctrico adoptado, en régimen permanente, es el uso de una resistencia lineal de tiempo invariante, de valor muy pequeño e igual a 0.1 Ohm. Tal modelo es una simplificación del comportamiento real del arco eléctrico, el cual es asimilable a una resistencia no lineal variable en el tiempo; se trata en particular de una resistencia cuyo valor es muy elevado para corrientes pequeñas y se vuelve pequeño para corrientes crecientes; además, su valor aumenta en el tiempo. El hecho de utilizar un valor de resistencia de arco extremadamente pequeño que se mantiene constante en el tiempo, nos pone en una condición conservadora, y nos permite obtener valores de corriente de arco secundario más elevadas que aquellas reales [12].

Luego, se utilizará el modelo de arco Mayr-Portela, desarrollado en la sección 3.4. Este, basado en ecuaciones diferenciales que establecen la variación de la conductancia

en función del tiempo, con sus dos constantes de tiempo, permite modelar en ATP, por medio de TACS, el arco y sus particularidades.

La línea que se va utilizar para el cálculo de la corriente de arco secundario es una línea de 500kV SEA a SE B, 360 km. Se simulará el arco secundario con la resistencia de 0.1 Ohm y con el modelo Mayr-Portela sin y con reactancia de línea. En la figura 3.22 se muestra el diagrama de flujo de la simulación de una falla monofásica y el recierre monofásico.

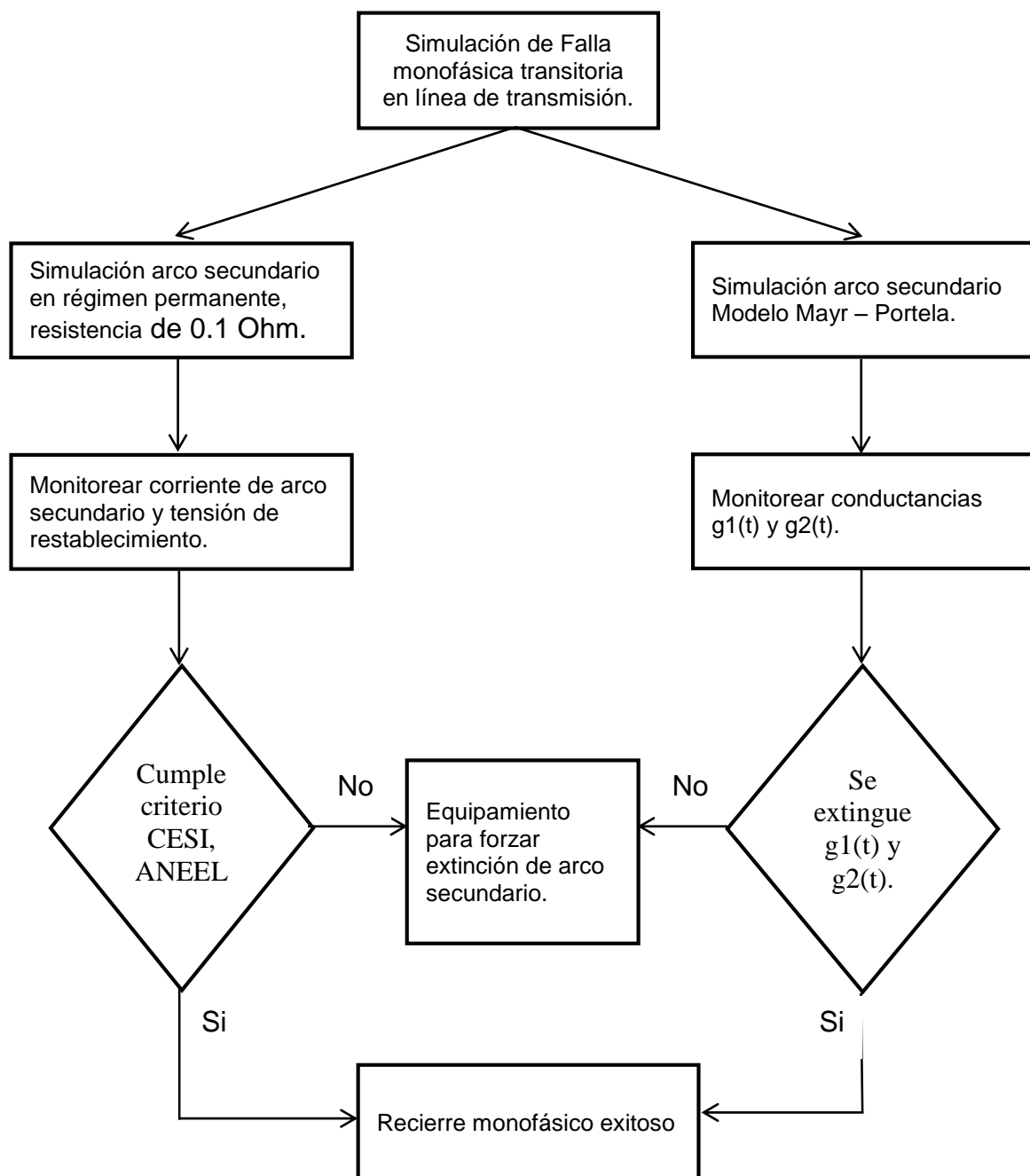


Figura 3.22 Diagrama de Flujo de simulación de recierre monofásico en líneas de transmisión (Fuente: elaboración propia).

3.5.1 Línea de una terna de 500kV

Para la simulación, se utilizó la línea de 500kV de la SE A a la SE B. A continuación, se detalla sus características técnicas.

3.5.1.1 Conductor

Los datos del conductor son los siguientes:

Descripción	Valores
Tensión nominal	500kV
Tensión máxima de operación	550kV
Tensión de sostenimiento de maniobra	1150kV
Tensión de sostenimiento a impulso atmosférico	1550kV
Longitud	360 km
Conductor	ACAR 4x750MCM
Potencia de transmisión	700 MVA
Potencia de diseño	1000 MVA
Potencia de emergencia	30 minutos 1300 MVA

3.5.1.2 Torre

La estructura autoportada utilizada es la siguiente:

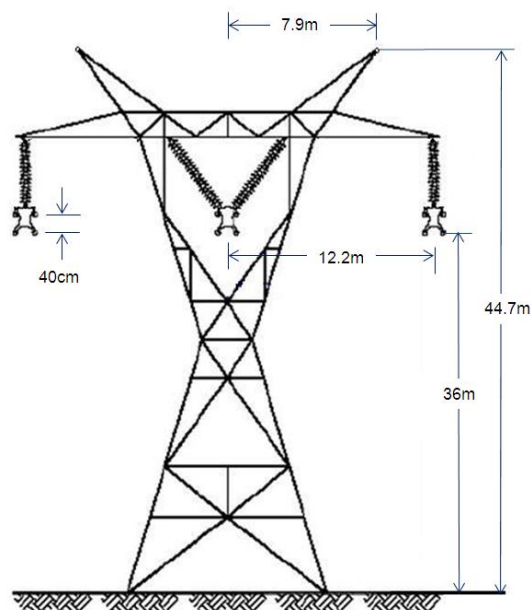


Figura 3.23. Torre de una terna para línea de transmisión de 500kV
(Fuente: elaboración propia)

3.5.1.3 Tiempo de recierre

El tiempo de recierre monofásico se ha considerado 0.6 segundos.

3.5.1.4 Circuito de potencia

El circuito donde se va realizar la simulación comprende dos generadores de 500kV en SE A y SE B, unidos por la línea de 500kV transpuesta, tal como se observa en la figura 3.24. Asimismo, las potencias de cortocircuito en las SE A y SE B son las siguientes:

Equivalente: SE A

Tensión = 500kV

Icc trifásica = 10.6 kA

Icc monofásica = 11.3 kA

Equivalente: SE B

Tensión = 500kV

Icc trifásica = 3.7 kA

Icc monofásica = 3.2 kA

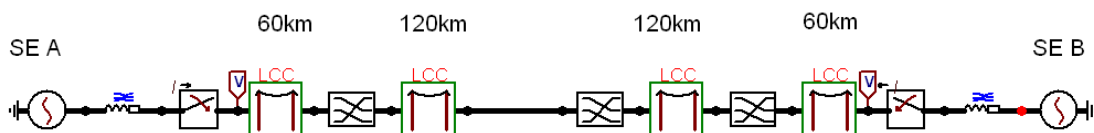


Figura 3.24. Circuito eléctrico de sistemas de potencia
(Fuente: elaboración propia)

3.5.1.5 Datos generales ingresados en el programa ATP-EMTP

La línea fue modelada con la rutina J-Marti, que asume la configuración geométrica, considerando una frecuencia inicial de 1Hz y una frecuencia máxima de 600Hz, correspondientes a seis décadas con diez puntos por década, frecuencia nominal de 60Hz y un cálculo de frecuencia modal de 5000Hz, tal como se puede observar en la figura 3.25, fueron simuladas tres transposiciones físicas dividiendo la línea en cuatro partes iguales, el valor de la resistencia del terreno se consideró 500 Ohm.

Se ingresan las impedancias Thevenin en las SE A y la SE B, tal como se muestra en la figura 3.26.

Line/Cable Data: LT161

Model | Data | Nodes

System type
 Name: LT161 Template
 Overhead Line #Ph: 3
 Transposed
 Auto bundling
 Skin effect
 Segmented ground
 Real transf. matrix
 Units: Metric English

Standard data
 R_{ho} [ohm/m]: 500
 Freq. int [Hz]: 1
 Length [km]: 60
 Set length in icon

Model
 Type: Bergeron El JMarti Seplyen Noda
 Data: Decades: 6 Points/Dec: 10
 Freq. matrix [Hz]: 5000 Freq. SS [Hz]: 60
 Use default fitting

Comment: Order: 0 Label: Hide

OK Cancel Import Export Run ΔTP View Verify Edit defin. Help

Line/Cable Data: LT161

Model | Data | Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
2	1	0.28	1.266	0.0769	-12	36.4	36.4
3	1	0.28	1.266	0.0769	-12.4	35.6	35.6
4	1	0.28	1.266	0.0769	-12	35.6	35.6
5	2	0.28	1.266	0.0769	-0.2	36.4	36.4
6	2	0.28	1.266	0.0769	0.2	36.4	36.4
7	2	0.28	1.266	0.0769	-0.2	35.6	35.6
8	2	0.28	1.266	0.0769	0.2	35.6	35.6
9	3	0.28	1.266	0.0769	12.4	36.4	36.4
10	3	0.28	1.266	0.0769	12	36.4	36.4
11	3	0.28	1.266	0.0769	12.4	35.6	35.6
12	3	0.28	1.266	0.0769	12	35.6	35.6
13	0	0	0.4565	3.51	-7.91	44.73	44.73
14	0	0	0.4565	3.51	7.91	44.73	44.73

Add row Delete last row Insert row copy Move

OK Cancel Import Export Run ΔTP View Verify Edit defin. Help

Figura 3.25. Datos ingresados de la línea de 500kV
(Fuente: elaboración propia)

Component: LINESY_3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R _o	Ohm/m	500	IN1	ABC	>X0007
L _o	mH/m	58.814	OUT1	ABC	>X0008
R ₊	Ohm/m	1			
L ₊	mH/m	72.239			

Copy Paste Reset Order: 0 Label: Hide

Comment:

Lines
 Length 1 [m]

Edit definitions OK Cancel Help

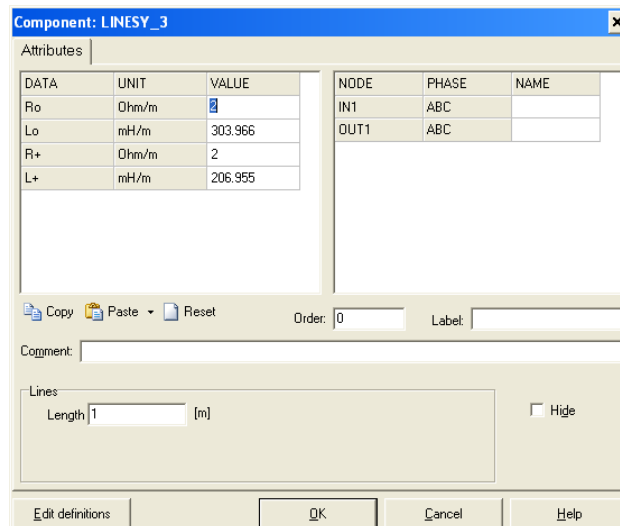


Figura 3.26. Impedancias Thevenin
(Fuente: elaboración propia)

3.5.2 Línea de una terna de 500kV

Se realiza la simulación del arco secundario: primero, en régimen permanente, utilizando como modelo de arco eléctrico una resistencia de 0.1 Ohm; y, segundo con el modelo de arco Mayr-Portela.

3.5.2.1 Modelo de arco eléctrico en régimen permanente

En el circuito eléctrico de simulación para una falla monofásica, en régimen permanente, el arco es una resistencia de 0.1 Ohm, tal como se muestra en la figura 3.27.

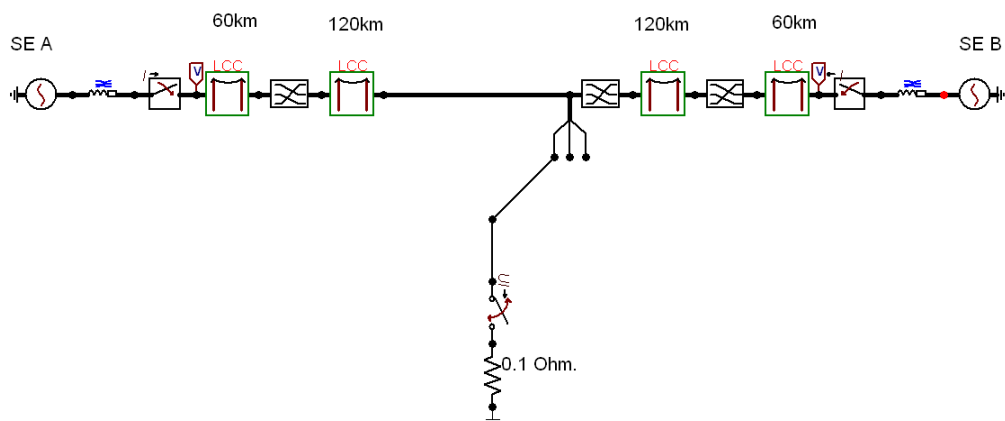


Figura 3.27. Circuito eléctrico de simulación con resistencia de arco de 0.1Ohm
(Fuente: elaboración propia)

Se simula una falla monofásica de la fase B en la mitad de la línea y el arco es una resistencia de 0.1 Ohmios. Los equipos de protección de la línea en ambos extremos de esta, detectan las corrientes de falla primaria y ordenan operar los interruptores de los generadores de fase B en 0.05 segundos. Seguidamente, aparece la corriente de arco secundario durante el tiempo muerto, que es de 0.6 segundos; luego, se hace el recierre monofásico y aparece la tensión de recuperación. Lo mencionado, podemos observarlo en las figuras 3.28 y 3.29; la corriente de arco primario y arco secundario son 8559 y 127.34 A pico respectivamente y la tensión de restablecimiento es de 152.65kV pico.

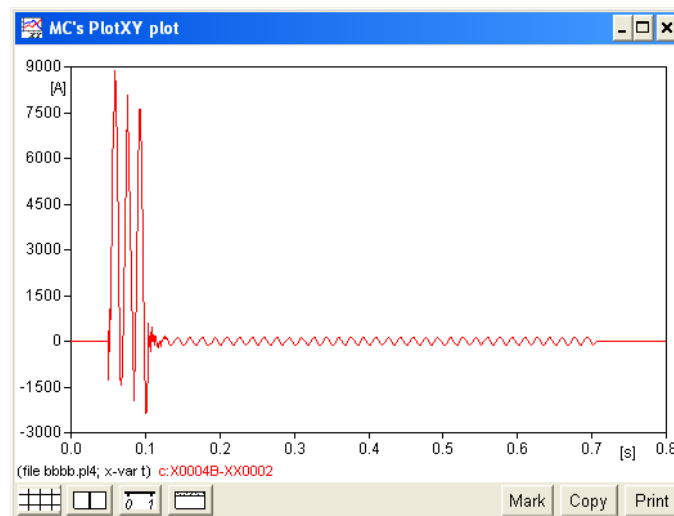


Figura 3.28. Corriente de arco primario y corriente de arco secundario, fase B
(Fuente: elaboración propia)

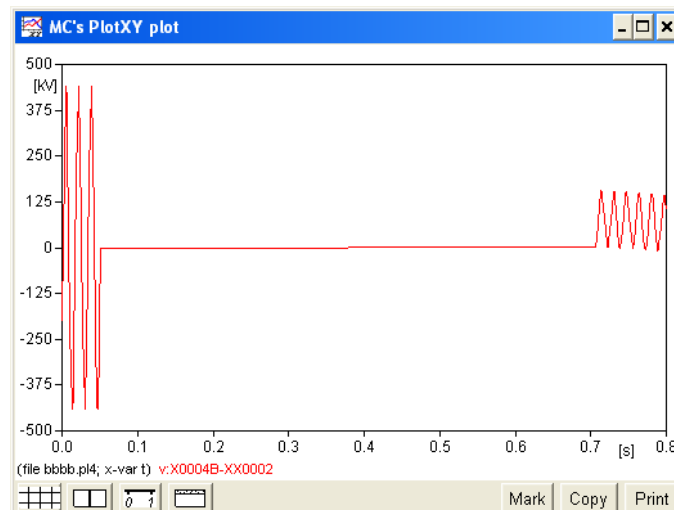


Figura 3.29. Tensión de restablecimiento, fase B
(Fuente: elaboración propia)

Después, se realizaron las simulaciones de falla monofásica, fase B, ubicado a 0, 16.66, 50, 83.33 y 100% de la línea de 500kV SE A a SE B, y se obtuvo los siguientes valores, los que se presentan en la tabla 3.1 siguiente.

Tabla 3.1. Corrientes de arco secundario con resistencia de arco 0.1 Ohm
(Fuente: elaboración propia)

Ubicación falla (% línea)	Corriente de arco primario (kA)	Corriente de arco secundario (A)	Tensión de recuperación (kV)
0	22.45	119.19	138.15
16.66	11.91	124.29	139.10
50	8.55	127.34	152.65
83.33	8.13	126.18	137.97
100	8.87	124.31	146.82

Según los datos de esta tabla, podemos determinar que las corrientes de arco secundario no cumplen con los criterios CESI y ANEEL (Brasil), tal como se muestra en la tabla 3.2 y figura 3.30, razón por la cual se tiene que reducir la corriente de arco secundario, utilizando reactores de línea.

Tabla 3.2. Criterio CESI para posibilidad de extinción de arco secundario
(Fuente: elaboración propia)

UBICACIÓN FALLA (% LINEA)	CRITERIO CESI		
	I_{AS} (A)	V_R (KV)	Cumple
0	$119.2 \leq 40$	$138.2 \leq 60$	No
16.66	$124.3 \leq 40$	$139.1 \leq 60$	No
50	$127.3 \leq 40$	$152.7 \leq 60$	No
83.33	$126.2 \leq 40$	$137.9 \leq 60$	No
100	$124.3 \leq 40$	$146.8 \leq 60$	No

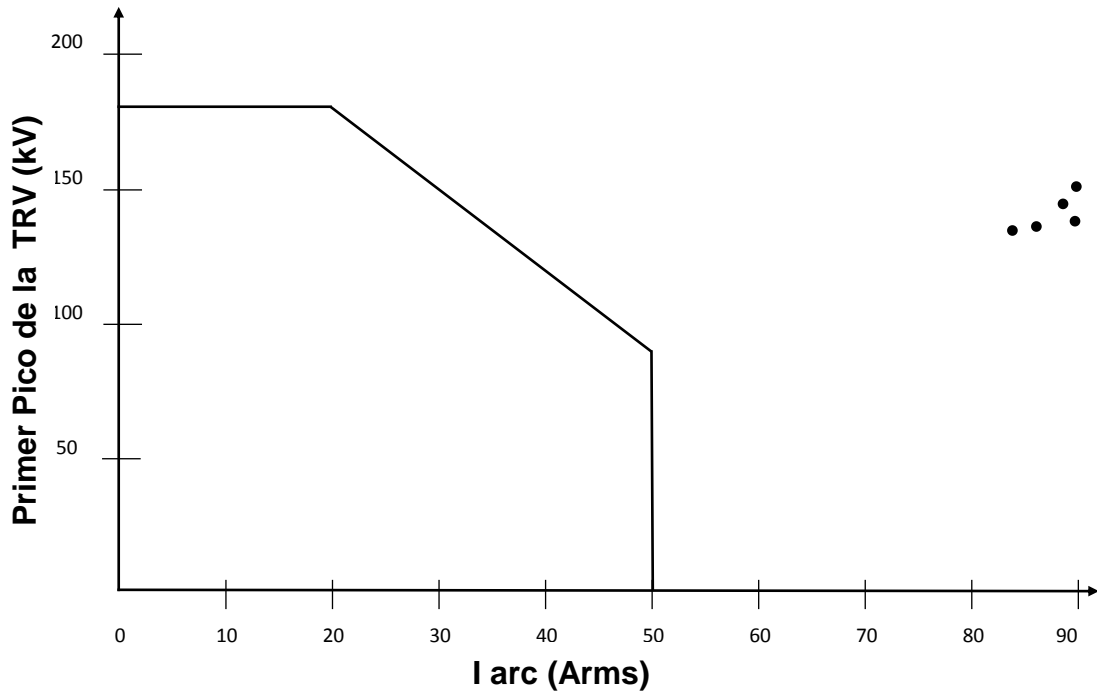


Figura 3.30. Criterio ANEEL (Brasil) para posibilidad de extinción de arco secundario (Fuente: elaboración propia)

3.5.2.2 Modelo de arco eléctrico Mayr-Portela

El modelo de arco Mayr-Portela en la corriente de arco secundario fue modelado en el ATP, modelo de arco con dos constantes de tiempo, cuyo comportamiento se ilustra en el dominio del tiempo. El modelo Mayr-Portela fue explicado en la sección 3.4. Se añadió una fuente de corriente para simular la transición inicial del arco primario, que se produce antes del arco secundario: el arco es excitado por una inyección de corriente tipo doble exponencial, siendo I_0 , a y b constantes:

$$i(t) = i_0 (e^{-at} + e^{-bt}) \quad (3.14)$$

El tiempo de frente de onda se consideró igual a 1.2 ms., el tiempo de media onda de $50 \mu\text{s}$ y la amplitud de 8550 A. Este último es el valor pico de la corriente de cortocircuito monofásico en el punto donde se produce el arco. La simulación comienza con la apertura de los interruptores de ambos extremos de la línea del interruptor automático y la inyección de la corriente que representa la transición del arco primario al arco secundario. El circuito simulado se muestra en la figura 3.31.

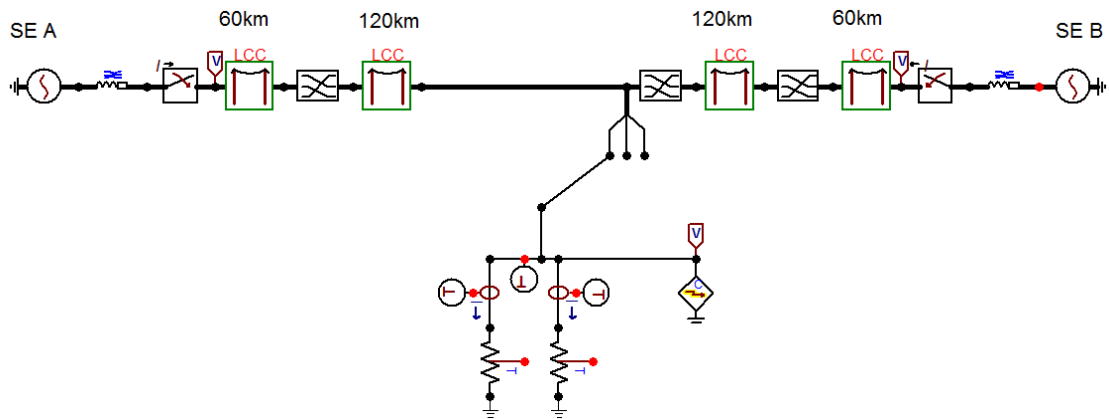


Figura 3.31. Circuito eléctrico con el modelo Mayr-Portela
(Fuente: elaboración propia)

Las secciones de transposición de la línea de transmisión fueron representadas por el modelo estándar JMarti de ATP. Se utiliza este modelo porque los parámetros de las líneas de transmisión con retorno a tierra son altamente dependientes de la frecuencia, y el modelado preciso de esta dependencia de la frecuencia en todo el rango de frecuencia de las señales es de importancia esencial para la simulación correcta de las condiciones de transitorios electromagnéticos.

Para ajustar las constantes de tiempos y las otras variables fueron utilizados datos de las pruebas de laboratorio de una típica línea de 500kV del sistema brasileño (FURNAS). Tales ensayos se refieren a un proyecto de Investigación y desarrollo donde participaron FURNAS, laboratorio CEPEL, la universidad UFRJ y UNICAMP [32].

Por lo tanto, para una falla monofásica a tierra fase B, en el punto medio de la línea de 500kV SE A a SE B, de longitud 360 km, se observa que el arco secundario no se autoextingue y las dos conductancias $g_1(t)$ y $g_2(t)$ no se anulan, tal como se ilustra en la figura 3.32.

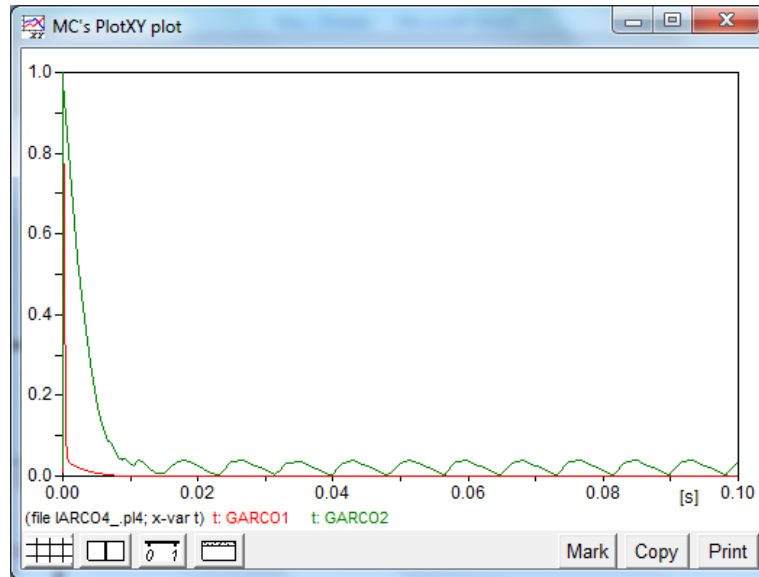


Figura 3.32. Conductancias de los subarcos $g_1(t)$ y $g_2(t)$
(Fuente: elaboración propia)

Como puede verse en la tabla 3.3, el arco no se autoextingue en los diferentes puntos de falla de la línea.

Tabla 3.3. Modelo de arco Mayr-Portela en las corrientes de arco secundario
(Fuente: elaboración propia)

Ubicación falla (% línea)	Arco secundario
0	No se autoextingue
16.66	No se autoextingue
50	No se autoextingue
83.33	No se autoextingue
100	No se autoextingue

3.5.3 Línea de una terna de 500kV con reactancia de línea

Con la finalidad de disminuir la corriente de arco secundario y de que este se pueda autoextinguir, se instala un banco de cuatro reactores: tres reactores de fase y un reactor de neutro. Se realizará la simulación del arco secundario, primero, en régimen permanente, utilizando como modelo de arco eléctrico una resistencia de 0.1 Ohm y, seguidamente, el modelo de arco Mayr-Portela.

3.5.3.1 Cálculo de la reactancia del neutro

La compensación reactiva para la línea de 500kV se calcula de la siguiente manera:

REACTORES DE FASE

Potencia: 200MVAR

Factor de calidad: 40

$X = 1250 \text{ Ohm}$.

Con la ecuación (2.28), se obtiene la resistencia:

$R = 31.25 \text{ Ohm}$

REACTOR DE NEUTRO

Las capacitancias de la línea 500kV de la SE A a SE B tienen las siguientes capacitancias:

Capacitancia de secuencia cero: $2.85 \times 10^{-6} \text{ F}$.

Capacitancia de secuencia positiva: $5.00 \times 10^{-6} \text{ F}$.

Con la ecuación (2.26) se obtiene:

$K = 0.57$

Utilizando la ecuación (2.25):

$h = 0.848$

La reactancia del neutro, la hallamos con la ecuación (2.27):

$X_n = 428.92 \text{ Ohm}$

3.5.3.2 Modelo de arco eléctrico en régimen permanente

En el circuito eléctrico de simulación para una falla monofásica, en régimen permanente, el arco es una resistencia de 0.1 Ohm, tal como se muestra en la figura 3.33.

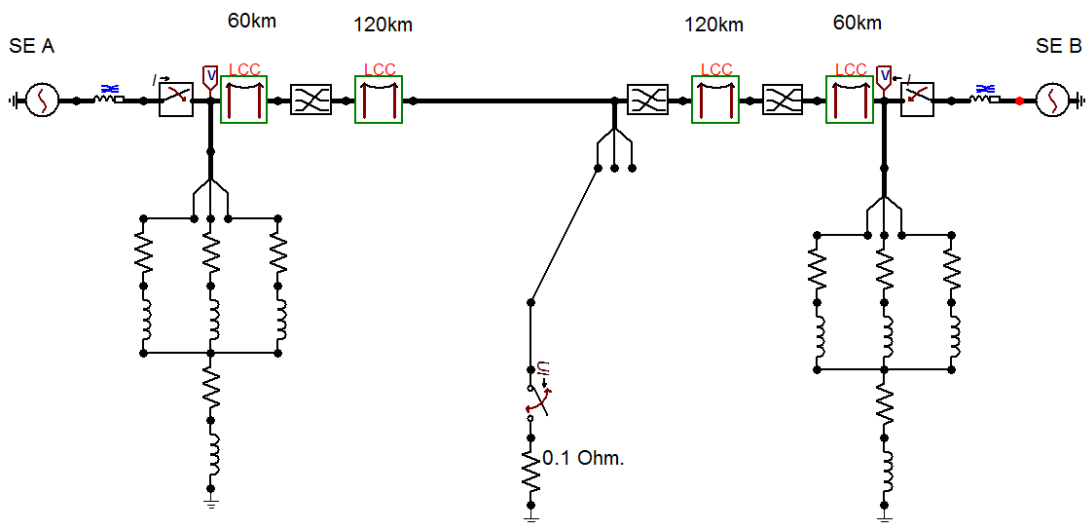


Figura 3.33. Línea de transmisión 500kV con reactores de línea
(Fuente: elaboración propia)

Para una falla monofásica a tierra en el punto medio de la línea, los interruptores de los generadores operan en 0.05 s; luego de un tiempo muerto de 0.6 s, se produce el recierre. La corriente de arco primario, corriente de arco secundario y tensión de recuperación son 8.34kA, 9.37A y 15.76kV respectivamente.

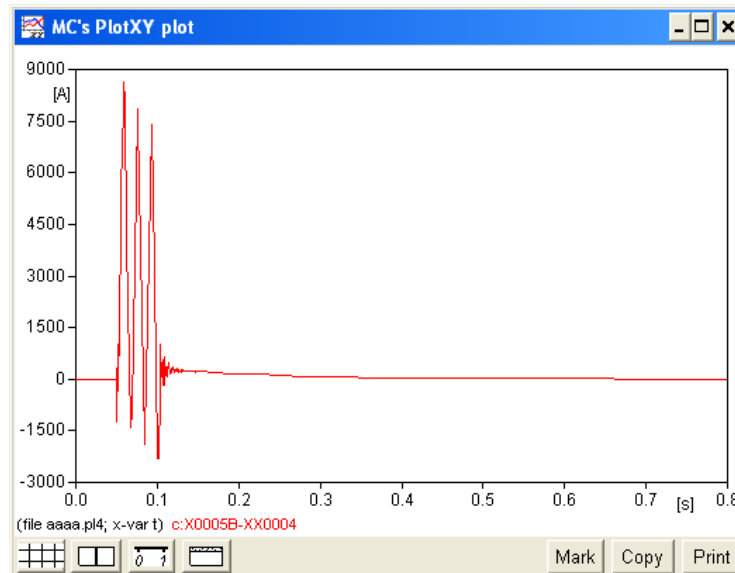


Figura 3.34. Corriente de arco secundario
(Fuente: elaboración propia)

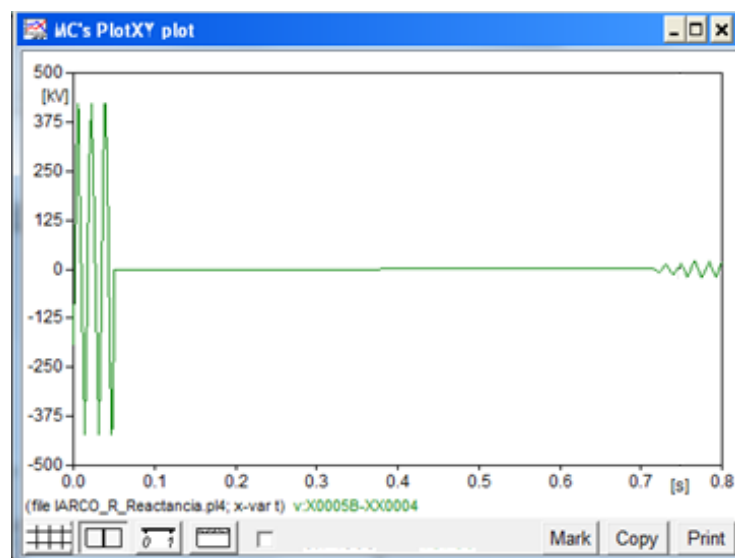


Figura 3.35 Tensión de recuperación
(Fuente: elaboración propia)

Después, se realizan las simulaciones de falla monofásica, fase B, ubicado a 0, 16.66, 50, 83.33 y 100% de la línea de 500kV SE A a SE B, y se obtiene los valores que se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Corrientes de arco secundario con resistencia de arco 0.1 Ohm en línea 500kV con reactores de línea (Fuente: elaboración propia)

Ubicación falla (% línea)	Corriente de arco primario (kA)	Corriente de arco secundario (A)	Tensión de recuperación (kV)
0	22.39	8.71	4.69
16.66	12.55	9.10	8.46
50	8.34	9.37	15.76
83.33	8.41	8.56	17.62
100	9.30	8.33	15.55

De acuerdo con los datos de la tabla 3.4, podemos determinar que las corrientes de arco secundario cumplen con los criterios CESI y ANEEL (Brasil), tal como se observa en la tabla 3.2 y figura 3.36.

Tabla 3.5. Criterio CESI para posibilidad de extinción de arco secundario en línea de 500kV con reactores de línea (Fuente: elaboración propia)

UBICACIÓN FALLA (% LINEA)	CRITERIO CESI		
	I_{AS} (A)	V_R (KV)	Cumple
0	$8.71 \leq 40$	$4.69 \leq 60$	Si
16.66	$9.10 \leq 40$	$8.46 \leq 60$	Si
50	$9.37 \leq 40$	$15.76 \leq 60$	Si
83.33	$8.56 \leq 40$	$17.62 \leq 60$	Si
100	$8.33 \leq 40$	$15.55 \leq 60$	Si

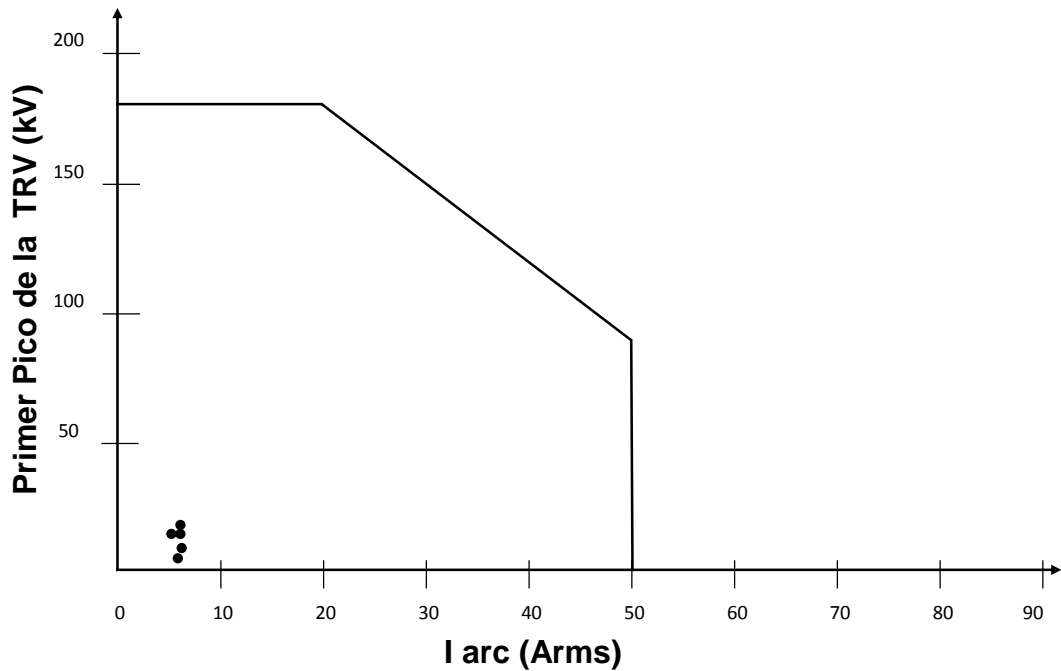


Figura 3.36. Criterio ANEEL (Brasil) para posibilidad de extinción de arco secundario en línea de 500kV con reactancia de línea (Fuente: elaboración propia)

3.5.3.3 Modelo de arco eléctrico Mayr-Portela

El modelo Mayr-Portela del arco secundario se simula en el ATP de la línea de 500kV con reactores de línea, tres reactores de fase y un reactor del neutro, como se muestra en la figura 3.37. Para una falla monofásica a tierra, fase B, en el punto medio de la línea de 500kV SE A a SE B, se observa que el arco secundario se autoextingue en 14 ms, las dos conductancias g_1 y g_2 se anulan, como se ilustra en la figura 3.38.

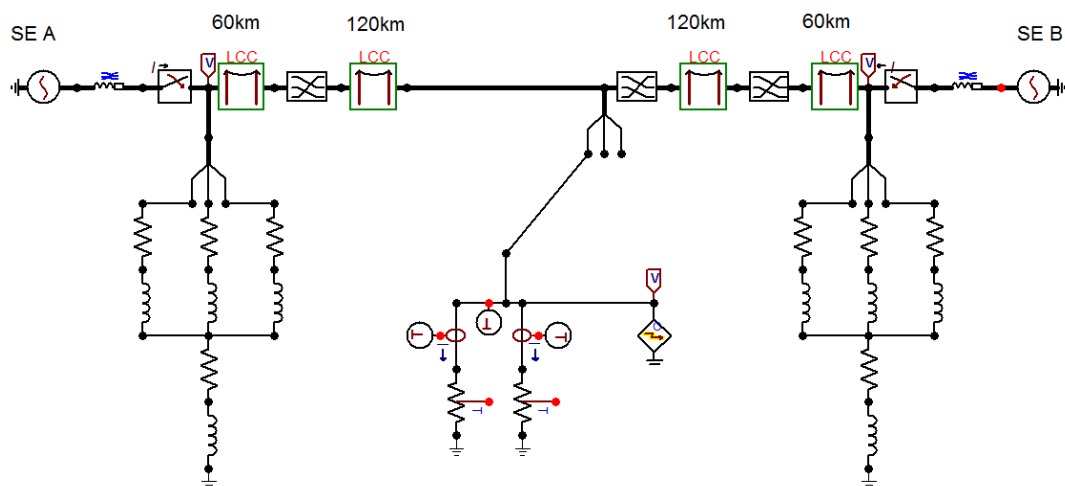


Figura 3.37. Línea de transmisión 500 kv con reactores de línea, modelo Mayr-Portela (Fuente: elaboración propia)

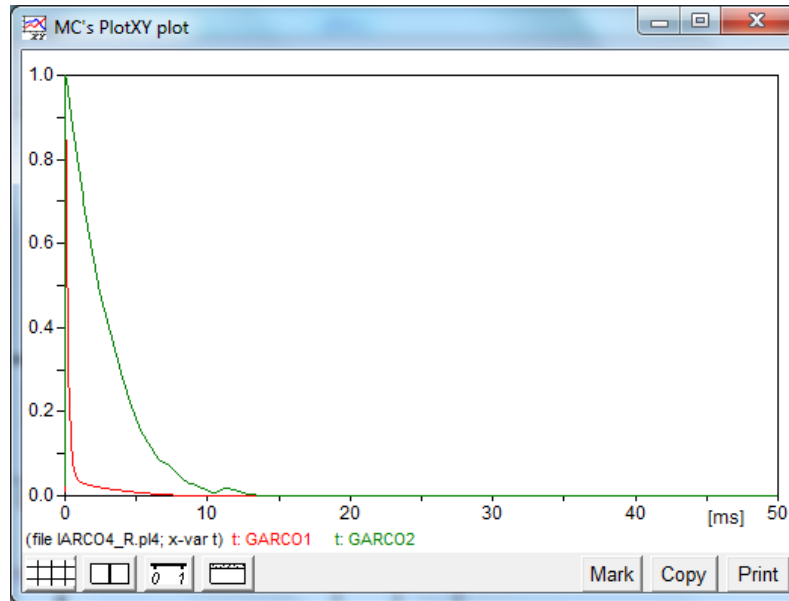


Figura 3.38. Conductancia de los subarcos g1 y g2
(Fuente: elaboración propia)

Como puede verse en la tabla 3.6, el arco se autoextingue en los diferentes puntos de falla de la línea.

Tabla 3.6. Modelo de Arco Mayr-Portela en las corrientes de arco secundario con reactores de línea (Fuente: elaboración propia)

Ubicación falla (% línea)	Arco secundario
0	Se extingue
16.66	Se extingue
50	Se extingue
83.33	Se extingue
100	Se extingue

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Introducción

El sistema considerado en este trabajo está compuesto por una línea de transmisión de 500kV, 360km de longitud que une la SE A a SE B. Se simuló el arco secundario en régimen permanente, utilizando una resistencia de 0.1 Ohm y el modelo de Mayr-Portela que estudia el comportamiento de las conductancias $g_1(t)$ y $g_2(t)$.

En las simulaciones se utilizó el programa de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP. Las simulaciones se realizaron a 0km, 60km, 180km, 300km y 360km de la longitud de la línea.

4.2 Análisis en régimen permanente

La simulación en régimen permanente nos permite obtener valores, que nos indican si es necesario equipos para forzar la extinción de arco secundario y obtener un recierre monofásico exitoso.

De las simulaciones realizadas, se obtiene las corrientes de arco secundario y tensión de restablecimiento, estos valores son comparados con los criterios CESI y ANEEL (Brasil), lo que nos permite determinar si se requiere un método de extinción de arco secundario.

En la figura 3.24 se muestra el sistema simplificado del análisis en régimen permanente de una falla monofásica en el punto medio de la línea de 500kV, donde se obtiene una corriente de arco primario, arco secundario y una tensión de restablecimiento de 8559A, 127.34 A y 15265kV respectivamente. Luego se realizó las simulaciones para fallas monofásicas a diferentes longitudes de la línea obteniendo los valores mostrados en la tabla 3.1. Asimismo, en la tabla 3.2 y figura 3.30 se muestra que no se cumple con los criterios CESI y ANEEL (Brasil), razón por la cual se necesitó un método de extinción de arco secundario.

El método de extinción de arco secundario utilizado fue un banco de 4 reactores, 3 reactores de fase y un reactor de neutro, en cada extremo de la línea, tal como se muestra

en la figura 3.33, los reactores de fase son de 200MVAR con un factor de calidad de 40 y el reactor de neutro de 428.92 Ohm. La simulación de una falla monofásica en el punto medio de la línea de 500kV con reactores de línea, da como resultado una corriente de arco primario, corriente de arco secundario y una tensión de restablecimiento de 8340 A, 9.37 A, y 15.76 kV respectivamente. En la tabla 3.4 y figura 3.36 se observa que el arco secundario cumple con los criterios CESI y ANEEL (Brasil), por lo tanto ante una falla monofásica transitoria el recierre monofásico será exitoso.

4.3 Análisis en el dominio del tiempo, modelo Mayr-Portela

El modelo de arco Mayr-Portela para el arco secundario de una falla monofásica en el punto medio de la línea de 500kV, tiene dos constantes de tiempo, cuyo comportamiento de las conductancias se ilustran en el dominio del tiempo. El modelo Mayr-Portela fue explicado en la sección 3.4. Se añadió una fuente de corriente para simular la transición inicial del arco primario, que se produce antes del arco secundario: el arco es excitado por una inyección de corriente tipo doble exponencial, siendo I_0 , a y b constantes:

$$i(t) = i_0 (e^{-at} + e^{-bt})$$

El tiempo de frente de onda se consideró igual a 1.2 ms., el tiempo de media onda de 50 μ s y la amplitud de 8550 A. Este último es el valor pico de la corriente de cortocircuito monofásico en el punto donde se produce el arco. La simulación comienza con la apertura de los interruptores de ambos extremos de la línea del interruptor automático y la inyección de la corriente que representa la transición del arco primario al arco secundario. El circuito simulado se muestra en la figura 3.31.

Las secciones de transposición de la línea de transmisión fueron representadas por el modelo estándar JMarti de ATP. Se utilizó este modelo porque los parámetros de las líneas de transmisión con retorno a tierra son altamente dependientes de la frecuencia, y el modelado preciso de esta dependencia de la frecuencia en todo el rango de frecuencia de las señales es de importancia esencial para la simulación correcta de las condiciones de transitorios electromagnéticos.

En la simulación de una falla monofásica a tierra fase B, en el punto medio de la línea de 500kV SE A a SE B, de longitud 360 km, se observa que el arco secundario no se autoextingue y las dos conductancias $g_1(t)$ y $g_2(t)$ no se anulan, tal como se ilustra en la figura 3.32. En las simulaciones de falla monofásica en diferentes puntos de la línea de

500kV, tabla 3.3, se observa que el arco secundario no se autoextingue, por consiguiente fue necesario un método de extinción de arco secundario.

Se utilizó el mismo banco de 4 reactores empleados en el modelo de régimen permanente, en ambos extremos de la línea, figura 3.37, como método de extinción de arco secundario. Se simuló una falla monofásica en el punto medio de la línea de 500kV, figura 3.38, se determinó que las conductancias $g_1(t)$ y $g_2(t)$ se anulan, por lo tanto el arco secundario se extingue.

La tabla 3.6 muestra que para fallas monofásicas en diferentes puntos de la línea de transmisión de 500kV con banco de 4 reactores en ambos extremos de la línea, el arco secundario se extingue y si la falla monofásica es transitoria, el recierre monofásico será exitoso.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del estudio realizado mediante investigación bibliográfica del fenómeno del arco eléctrico cuya naturaleza involucra parámetros aleatorios en tiempos muy breves, y en base al examen del recierre monofásico en líneas eléctricas de AT y EAT, mediante simulaciones efectuadas con ayuda del programa de modelado ATP-EMTP, se han llegado a las siguientes conclusiones:

1. De la implementación de los modelos analíticos de arco eléctrico primario, desarrollados por Cassie y Mayr para interruptores de potencia; se confirma que el modelo analítico de Cassie es adecuado para el estudio del comportamiento de la conductancia del arco de altas corrientes, mientras que el modelo analítico de Mayr se adapta muy bien para el examen de corrientes pequeñas, pero ninguno de ellos asegura eficacia al modelar el arco secundario.
2. Se observó que la limitación de los modelos analíticos de Cassie y Mayr para su aplicación directa en el modelado del arco secundario, se debe a que manejan una única constante de tiempo, mientras que una mayor aproximación a la realidad se logra considerando el arco eléctrico como una combinación de dos subarcos, cada uno con una constante de tiempo, como lo permite el modelo analítico Mayr-Portela que hemos adoptado en esta tesis para modelar el arco secundario.
3. Se han desarrollado los modelos analíticos para el examen del comportamiento del arco secundario, inicialmente, en régimen permanente, utilizando una resistencia de 0.1 Ohm, seguidamente, con las rutinas TACS; en tales casos el modelo de Mayr-Portela que permite simular transitorios electromagnéticos en el dominio del tiempo, por medio de resistencias variables, con valores instantáneos definidos por una señal de control, permitió constatar que ambos modelados son complementarios.
4. Se ha verificado que a mayor longitud de una línea de transmisión, mayor es el valor de la corriente de arco secundario, ello obedece a la mayor longitud de acoplamiento electrostático y electromagnético; en la simulación de una línea de simple terna de 500kV y 360km con dos cables de guarda, en régimen permanente se determina que

la corriente de arco secundario en mitad de ruta es de 127A, mientras que para longitudes de 400km, 450km y 500km, dichas corrientes alcanzan 147A, 173A y 189A, respectivamente, lo que dificulta en mayor medida el recierre exitoso.

5. Los casos más desfavorables para la ocurrencia de un arco secundario de máxima corriente persistente en Líneas de Transmisión se presentan en niveles de Extra Alta Tensión, cuando la falla ocurre en la mitad de su longitud; por ejemplo ello se comprueba en una línea de 500kV con la simulación de recierre realizada en régimen permanente con el modelo Mayr-Portela, el cual indica que el arco secundario no se autoextingue; en el caso de Líneas eléctricas de Alta Tensión y de menores tensiones dicho fenómeno no representa cuidado ya que casi siempre se autoextingue.
6. Se ha constatado que en una línea larga de 500kV, la elevada corriente de arco secundario y la tensión de restablecimiento pueden ser disminuidas en forma considerable si se emplea bancos de reactores inductivos en ambos extremos de la línea: tres de fase y uno de neutro; su diseño obedece a que esta corriente y tensión de restablecimiento deben cumplir con los criterios (Subtítulo 3.6.) de CESI (Italia) y ANEEL (Brasil), siendo validada con el modelo Mayr-Portela, que señala si el arco secundario se extinguirá o no. Bajo esa condición, en la simulación de la línea de 500KV que daba una corriente de arco secundario de 127A con una tensión de restablecimiento de 152kV, se disminuye hasta 9.37A y 16kV respectivamente, y el modelo de Mayr-Portela confirma la extinción del arco secundario.
7. En la simulación de la línea de 500kV que cuenta con bancos de cuatro reactores en ambos extremos de la línea, dichas unidades de fase son de 200 MVAR con un factor de calidad de 40, asimismo el reactor del neutro es de 428.92 Ohm; los reactores de fase son utilizados para la compensación reactiva de la línea mientras que el reactor del neutro permite disminuir la corriente de arco secundario.

Se recomienda realizar trabajos futuros en:

1. Recierres monofásicos en líneas de transmisión de extra alta tensión de doble terna: en líneas de transmisión de extra alta tensión protegidos, los rayos caen sobre la torre o los cables de guarda, pasando la corriente por la Impedancia de la torre y de la Puesta a Tierra, reflejándose, con una mayor tensión de cresta. En estos casos, las tensiones de operación de los conductores son suficientemente grandes como

para incrementar la probabilidad de contorno inverso. Por lo tanto en una torre de doble terna, es probable que dos conductores de fase puedan tener contorno simultáneamente, lo cual conduce a la desconexión.

2. Impacto de las condiciones de operación y parámetros de línea en la extinción del arco secundario de recierres monofásicos en líneas de transmisión: el éxito de recierres monofásicos en líneas de transmisión tiene un importante efecto en la calidad de la energía; se recomienda analizar los impactos en la corriente de arco secundario, de las variables de operación de la red como corriente de carga, tensión de operación, corrientes de armónicos y el estado de los circuitos de simple terna, doble terna, geometría de las torres y transposición de las líneas.
3. Recierre monofásico adaptativo basado en armónicos de tensión del arco secundario: mediante pruebas de simulación de arco secundario y pruebas de campo, analizar el contenido de armónicos de la tensión de arco secundario con la transformada rápida de Fourier; elaborar un algoritmo para determinar la extinción del arco secundario y que de la orden de cierre al interruptor. Un control bien diseñado puede ser responsable de tomar la decisión según falla permanente o transitoria.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Di Salvo, J. H., & Villar R. R.** (1999). Estudio de arco secundario en líneas de extra alta tensión de gran longitud. Buenos Aires. [Fecha de acceso 14 de enero de 2013]. URL disponible en: https://sites.google.com/site/atpcaue/reviberoamericana/anio1999/vol1_num1
- [2] **Knudsen, N.** (1962). Single Phase Switching of Transmission Lines using Reactors for extinction of the secondary arc. CIGRE Paper 310.
- [3] **Eztergaloy, J., Andrichack, J., Colwell, D.H., & Dawson, D.C.** (1992). Single Phase Tripping and Autoreclosing of Transmission Lines. IEEE Committee Report. Transactions on Power Delivery, Vol. 7, nº. 1.
- [4] **Kimbark, E. W.** (1976). Selective-Pole Switching of Long Double-Circuit EHV Line. Bonneville Power Administration. Portland, Oregon, IEEE.
- [5] **Anderson, P. M.** (1976). Analysis of Faulted Power Systems. U. S. A. The Iowa State University Press.
- [6] **Ravindranath, B., & Chander, M.** (1977). Power System Protection & Switchgear. New Delhi, India.
- [7] **IEEE Standard definition for Power Switchgear.** (1992). IEEEStd. C37.100-1992.
- [8] **Westinghouse Electric Corporation.** (1976). Westinghouse Relay-Instrument Division, Applied Protective Relaying. Newark, New Jersey, U. S. A.
- [9] **IEEE Power System Relaying Committee.** (1984). Automatic Reclosing of transmission Lines. En IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.: PAS-103, Issue. 2.

- [10] **Anderson, P. M.** (1999). Power System Protection. IEEE Press Power Engineering Series. Piscataway, New Jersey, EE. UU. Mc Graw-Hill. PP 1307.
- [11] **Prikler, L., & Hoidalén, H. K.** (2002). ATPDRAW, User's Manual, version 3.5. for Windows 9x/NT/2000/XP.
- [12] **Transener S. A., CESI, COES.** (2004). Estudio de coordinación de las protecciones del SEIN. Estudio de arco secundario.
- [13] **Ferreira dos Santos Jr., G.** (2009). Metodologia para Análise de Linhas de Transmissão Incluindo Modelos Do Arco Secundário. Río de Janeiro.
- [14] **Ganvini Asencios, O. W.** (2009). Identificación dos parámetros do arco eléctrico através de estimación de estados e parámetros. Río de Janeiro.
- [15] **Garzon, R. D.** (2002). High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications. Marcel Dekker-Technology & Industrial Arts.
- [16] **Siegert, C., & Luis, A.** (1988). Alta tensión y sistemas de transmisión. México. Ed. Limusa. PP 1009.
- [17] **Van Der Sluis, L.** (2001). Transients in Power Systems, Jhon Wiley and Sons – LTD. Chichester, UK.
- [18] **Idárraga, G.** (Mayo 2007). An approach to frequency characterization of Switching Operations, Lightning Strokes and Arc faults. Ph.D. Thesis IEE-UNSJ. Argentina.
- [19] **Thomas, D. W. P.** (1995). Simulation of Circuit Breaker Switching Using a Composite Cassie-Modified Mayr Model, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 10, n.º 4.
- [20] **Flurscheim, C. H.** (1982). Power Circuit Breakers, Theory and Design, Peter peregrinus Ltd, Second Edition. U. S. A.
- [21] **Giménez Gutiérrez, W.** (1999). Modelización de Interruptores Eléctricos de Potencia, Ph.D. Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña. España.

- [22] **Câmara, A. S. B.** (2003). Extincao do Arco Secundario com Manobras Monofásicas. Conceitos Fundamentais e Critérios de Análise. Dissertacao de Mestrado, COPPE/UFRJ, Ríó de Janeiro, RJ, Brasil.
- [23] **Portela, C. M., Santiago, N. H. C., Oliveira Filho, O. B., et al.** (1992). Modeling of Arc Extinction in Air Insulation. En IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, n.º 3.
- [24] **Grutz, A., Hocchrainer, A.** (1971). Rechnerische Untersuchung von Leistungsschaltern mit Hilfe einer verallgemeinerten Lichtbogen Theorie. ETZ-A Elektrotech. Z., Vol. 92, nº4, PP 185-191.
- [25] **Johns, A. T., Aggarwal, R. K., & Song, Y. H.** (1994). Improved Techniques for Modelling Fault Arcs on Faulted EHV Transmission Systems. Proceeding of the IEE General Transmisi3n and Distribution, v. 141, n. 2, PP 148-154.
- [26] **Portela, C. M., Dupont, C., & Meireles, M .P.** (1994). Deterministic and Statistic Arc Modelling. CIGRE, 13-107.
- [27] **Portela, C. M.** (1996). Modelagem de Arco El3trico em Disjuntores. Aplicacoes de Modelos em Estudos de Manobra. COPPE/UFRJ, Brasil.
- [28] **Portela, C. M.** (2003). Análise del Alguns Aspectos da Modelagem de Arcos no Ar. COPPE/UFRJ, Brasil.
- [29] **Kimbark, E. W.** (1964). Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole-Switched EHV Lines by Shunt Reactors.
- [30] **Idárraga, G.** (2007). An approach to frequency characterization of Switching Operations, Lightning Strokes and Arc Faults. Ph D. Thesis. IEE-UNSJ. Argentina.
- [31] **Watson, N., & Arrillaga, J.** (2003). Power Systems Electromagnetic Transient Simulation. London, UK.
- [32] **Câmara, A. S. B.** (2010). Modelagem de Arco El3trico No Ar. Aplicacoes em Sistemas de Potencia: UFRJ, Brasil.

[33] **SEL.** (1998). SEL321-2 Relay, Phase and Ground Distance Relay, Instruction Manual. [Fecha de acceso 18 de marzo de 2013]. URL disponible en: <https://www.selinc.com/SEL-321/>

[34] **Digital Energy Multilin.** (2009). Protection & Control Reference Guide, Vol. 22. [Fecha de acceso 22 de marzo de 2013]. URL disponible en: https://www.gedigitalenergy.com/multilin/Publications/Ref_Guide.htm

ANEXO 1

MODELO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

A1.1.1 Secuencia de impedancias de líneas de transmisión [5]

A1.1.1.1 Impedancias de secuencia positiva y negativas de líneas

Una línea de transmisión es un elemento pasivo, y si es transpuesta, presenta idéntica impedancia al flujo de corrientes en cada uno de los conductores de fases.

Las impedancias de secuencia positiva y negativa son idénticas:

$$Z_1 = Z_2 = R_l + jX_l \quad \Omega / \text{fase} \quad (1.1)$$

Usualmente, se emplea la impedancia por unidad de longitud

$$Z_1 = (r_1 + jx_1)s \quad \Omega / \text{fase} \quad (1.2)$$

Donde:

r_1 = resistencia Ohm/unidad de longitud

x_1 = reactancia Ohm/unidad de longitud

s = longitud de la línea

La resistencia r_1 es simplemente la resistencia del conductor de una fase o paquete de conductores por fase por unidad de longitud. Esto es usualmente tabulado por el tamaño de los conductores como una función de temperatura y por varias frecuencias de interés.

Se asume que esta resistencia es la misma en las tres fases y que la reactancia x_1 tiene dos componentes: una debido a todo el flujo enlazado interna y externamente fuera del radio de una unidad de longitud (un pie, por ejemplo) y el otro debido al flujo externo de otros conductores.

$$l_1 = 0.3219 \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ mH / mi}$$

o

$$\begin{aligned} x_1 &= 4.657 \times 10^{-3} f \log_{10} \frac{D_m}{D_s} \Omega / \text{mi} \\ x_1 &= 2.020 \times 10^{-3} f \ln \frac{D_m}{D_s} \Omega / \text{mi} \end{aligned} \quad (1.3)$$

D_m = distancia media geométrica mutua (GMD)

D_s = distancia media geométrica propia o radio medio geométrico (GMR)

Para sistemas trifásicos separados por distancias D_{ab} , D_{bc} , D_{ca} , centro a centro, se tiene:

$$D_m = (D_{ab} D_{bc} D_{ca})^{1/3} \triangleq D_{eq} \quad (1.4)$$

También el radio medio geométrico es

$$D_s = (D_{s1} D_{s2} D_{s3})^{1/3} \quad (1.5)$$

Donde:

D_{si} = distancia propia media geométrica de la fase a en posición i de una transposición, y D_s y D_m deben estar en las mismas unidades.

A1.1.1.2 Acoplamiento mutuo

Se presenta un problema para representar las líneas de transmisión cuando líneas paralelas no llevan corriente cero. En tales casos, algunos conductores en paralelo que llevan corriente inducirán tensión por cada unidad de longitud por los enlaces de flujo.

En términos de conceptos de campo, se describe el enlace de flujo λ_{21} , el flujo en el circuito 2 debido a la corriente en el circuito 1, como:

$$\lambda_{21} = \oint_{c_2} A \cdot ds_2 > 0 \text{ Wb vuelta} \quad (1.6)$$

$$A = \text{vector de potencial magnético} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{c_1} \frac{1}{r} ds_1 \text{ Wb/m} \quad (1.7)$$

Donde:

ds_2 = elemento de longitud a lo largo del circuito 2

ds_1 = elemento de longitud a lo largo del circuito 1

Obviamente, un acoplamiento mutuo existe cuando el vector potencial A magnético es mayor que cero. Cuando el circuito1 (el de inducción) es un circuito balanceado trifásico y I_1 es considerada como la superposición de las tres corrientes de fase, A es cero y ninguna inducción mutua toma lugar. Sin embargo, en el caso de las corrientes de secuencia cero, $I_1 = 3 I_{a0}$ y la tensión mutua inducida puede ser grande.

Este acoplamiento mutuo se representa como una inductancia mutua M donde:

$$M = \lambda_{21}/I_1 \text{ H} \quad (1.8)$$

Y este problema se trata en la misma forma en que se analiza un transformador.

Supongamos que dos circuitos paralelos son designados a y b (como se muestra en la figura A1.1.1) tienen impedancias propias Z_{aa} y Z_{bb} respectivamente y la impedancia mutua Z_{ab} . Para permitir que las corrientes I_a y I_b entren en los extremos de cada circuito, asumimos que la representación de circuito de tierra implica una perfecta conducción plana.

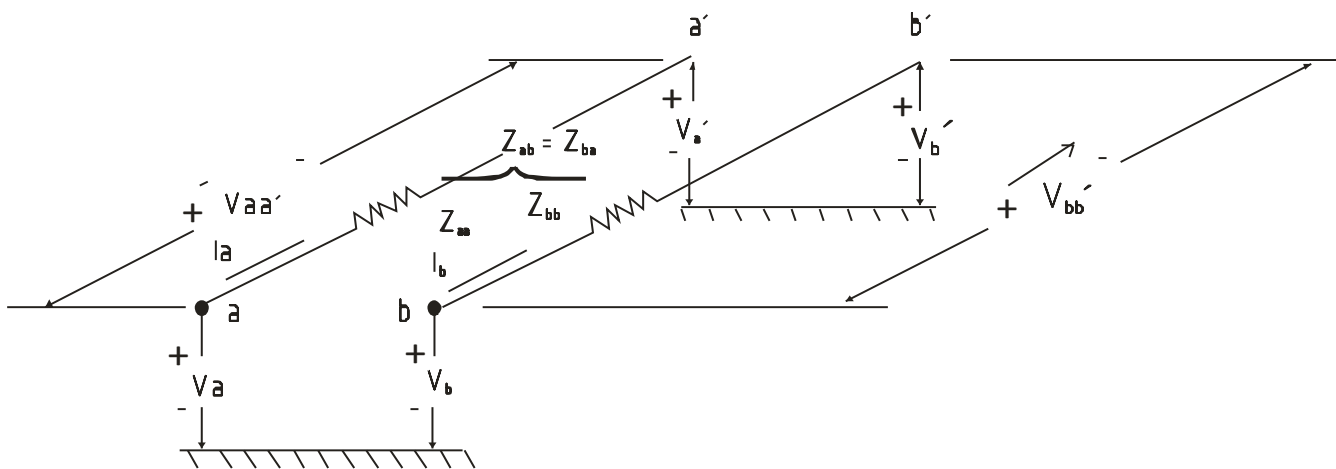


Figura A1.1.1. Dos circuitos a y b con acoplamiento mutuo [5]

También, como se nota en la figura A1.1.1, se designa la caída de tensión a tierra en cada extremo de los dos circuitos e identificamos la caída de tensión en la dirección de la corriente. La ecuación para estas caídas de tensiones a lo largo de los conductores es:

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & -Z_{ab} \\ Z_{ab} & Z_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Donde nosotros reconocemos que $Z_{ab} = Z_{ba}$ en una red líneal y pasiva. La ecuación (1.9) puede ser justificada y ser vista como un transformador equivalente de una vuelta, el cual se observa en la figura 1.2. Los conductores a-a' y b-b' son vistos como transformador de una vuelta (núcleo de aire), el núcleo del cual es mostrado. Si nosotros aplicamos una tensión $V_{aa'}$ con polaridad mostrada y esto causa una corriente I_a en la dirección señalada, un flujo ϕ_{ba} (flujo en b debido a la corriente I_a) existe en la dirección indicada. Entonces, por la ley de Lenz, un flujo ϕ_{ab} se establecerá opuesto a ϕ_{ba} . Esto requiere que la terminal b sea positivo con respecto a b', o una corriente inducida I'_b , que fluye en el circuito b-b', sea cerrada a través de una carga. Esto es una caída de tensión en la dirección b-b', y sumada a la caída por la impedancia propia $I_b Z_{bb}$ de ese circuito como en la ecuación V_b (1.9). Siguiendo el usual punto convencional, ponemos los puntos en los terminales a y b de las dos líneas para indicar la polaridad de la tensión inducida. La convención de punto es particularmente conveniente en situaciones en que la polaridad no es obvia. Las figuras 1.1 y 1.2, y la ecuación (1.9) son todo lo que se necesita para establecer la correcta relación entre la tensión y corriente en circuitos acoplados mutuamente.

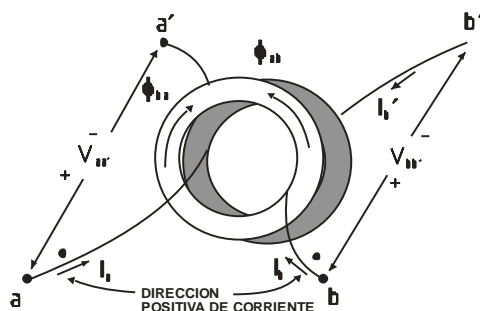


Figura A1.1.2. Equivalente de transformador de una vuelta [5]

1.1.3 Autoinductancia e inductancia mutua de conductores cilíndricos paralelos

La Inductancia es usualmente definida como la división del flujo por la corriente. Para la autoinductancia, el flujo de un circuito es dividido por la corriente en ese circuito. Por ejemplo:

$$l = \lambda_{11}/I_1 \quad \text{H} \quad (1.10)$$

Donde λ_{11} es el flujo en Weber vueltas del circuito l, debido a la corriente I_1 en Amperes. La inductancia mutua es similarmente definida, según la ecuación (1.8).

El cálculo de la autoinductancia de un conductor finito cilíndrico es usualmente dividido en dos componentes:

$$L = L_i + L_e \quad \text{H} \quad (1.11)$$

Donde L_i es la autoinductancia parcial del conductor debido al flujo interno y L_e es la autoinductancia parcial debido a los flujos fuera del conductor. Entonces esto puede ser mostrado que para la densidad de corriente uniforme

$$L_i = \mu_w s / 8\pi \quad \text{H} \quad (1.12)$$

μ_w = permeabilidad del conductor H/m

= $4\pi \times 10^{-7}$ H/m para materiales no ferrosos

s = longitud de conductor en metros

Los flujos parciales externos son:

$$\lambda_e = \frac{\mu_m I_1}{2\pi} \left(s \ln \frac{s + \sqrt{s^2 + r^2}}{r} - \sqrt{s^2 + r^2} + r \right) \text{Wb vueltas} \quad (1.13)$$

Donde:

μ_w = permeabilidad del medio circundante al conductor

= $4\pi \times 10^{-7}$ H/m para aire

r = radio del conductor en metros

Si $r \ll s$, como siempre es el caso para líneas de transmisión (1.13) puede ser simplificado a:

$$L_e = \frac{\mu_m s}{2\pi} \left(\ln \frac{2s}{r} - 1 \right) H \quad (1.14)$$

Combinando (1.12) y (1.14), se tiene la inductancia para un conductor cilíndrico de s metros de longitud:

$$L = \frac{\mu_w s}{8\pi} + \frac{\mu_m s}{2\pi} \left(\ln \frac{2s}{r} - 1 \right) H \quad (1.15)$$

En muchos casos se trabaja con conductores no ferrosos en un medio de aire, tal que μ_w y μ_m son iguales a $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Esto supone, para los conductores de compuestos como ACSR, que el material ferroso es insignificante. Con esta aproximación, nosotros escribimos la inductancia como

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \times 10^{-7} s + 2 \times 10^{-7} s \left(\ln \frac{2s}{r} - 1 \right) \\ &= 2 \times 10^{-7} s \left[\frac{1}{4} + \left(\ln \frac{2s}{r} - 1 \right) \right] H \end{aligned} \quad (1.16)$$

Pero:

$$\frac{1}{4} = \ln \frac{1}{e^{-1/4}} = \ln \frac{1}{0.779} \quad (1.17)$$

Nosotros reconocemos para conductores cilíndricos que $0.779r = D_s$. Usando esta relación, la formula de inductancia es:

$$l = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{2s}{D_s} - 1 \right) H / m \quad (1.18)$$

Donde ambos, D_s y s , están en metros.

También:

$$l = k \left(\ln \frac{2s}{D_s} - 1 \right) H / \text{unidad longitud} \quad (1.19)$$

Siguiendo una lógica similar, se define la inductancia mutua como:

$$m = k \left(\ln \frac{2s}{D_m} - 1 \right) H / \text{unidad longitud}$$

A1.1.1.4 Línea de Carson

Carson consideró un conductor a una unidad de longitud y paralelo a la tierra como se muestra en la figura A1.1.3. El conductor lleva una corriente I_a con un circuito de retorno d-d' bajo de la superficie de la tierra (esta es considerada por tener una resistividad uniforme y de extensión infinita). La corriente I_a se dispersa en una gran área, buscando la ruta de resistencia más baja y satisfaciendo la ley de Kirchhoff para garantizar una caída de tensión en todas las rutas:

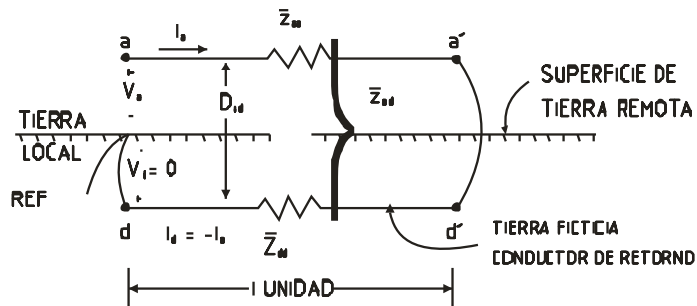


Figura A1.1.3. Línea con retorno por tierra de Carson [5]

Las ecuaciones de Carson son:

$$\begin{bmatrix} V_{aa} \\ V_{dd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_d - V_{d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ad} \\ \bar{Z}_{ad} & \bar{Z}_{dd} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ -I_a \end{bmatrix} \quad V / \text{unidad longitud} \quad (1.20)$$

Donde V_a , $V_{a'}$, V_d y $V_{d'}$ están medidos con respecto a la misma referencia. A partir de $V_d = 0$ y $V_a - V_{d'} = 0$, resolvemos para V_a , por substracción, las dos ecuaciones que se van encontrar:

$$V_a = (\bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{dd} - 2\bar{Z}_{ad}) I_a = Z_{aa} I_a \quad (1.21)$$

Por definición, claramente distinguimos entre \bar{z} y z . Así:

$$Z_{aa} \triangleq \bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{dd} - 2\bar{Z}_{ad} \quad \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.22)$$

Usando la ecuación (1.19) e ignorando el efecto Skin, escribimos las impedancias propias y mutuas de la ecuación (1.20). La impedancia propia de la línea a es:

$$\bar{Z}_{aa} = r_a + j\omega l_a = r_a + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sa}} - 1 \right) \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.23)$$

Similarmente:

$$\bar{Z}_{dd} = r_d + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sd}} - 1 \right) \Omega / \text{unit length} \quad (1.24)$$

Donde arbitrariamente ajustamos $D_{sd} = 1$, unidad de longitud. Carson encontró que la resistencia de la tierra r_d es una función de la frecuencia y derivó la formula empírica:

$$\begin{aligned} r_d &= 1.588 \times 10^{-3} f \quad \Omega / \text{mi} \\ &= 9.869 \times 10^{-4} f \quad \Omega / \text{km} \end{aligned} \quad (1.25)$$

El cual tiene un valor de 0.09528 ohm/milla en 60Hz. Finalmente, la impedancia mutua es:

$$\bar{Z}_{ad} = j\omega m_{ad} = j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{ad}} - 1 \right) \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.26)$$

Como especificado por la formula (1.21), se calcula la impedancia de un conductor a con retorno a tierra como:

$$Z_{aa} = \bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{dd} - 2\bar{Z}_{ad} = (r_a + r_d) + j\omega k \ln \frac{D_{ad}^2}{D_{sa}} \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.27)$$

Como señalamos en (1.24), es común permitir $D_{sd} = 1$, unidad de longitud (en la misma unidad como D_{ad} y D_{sa}):

$$\ln \frac{D_{ad}^2}{D_{sa} D_{sd}^2} = \ln \frac{D_{ad}^2}{(D_{sa})(1)}$$

Hacemos:

$$D_e = D_{ad}^2 / D_{sd} \text{ (unidad longitud)}^2 / \text{unidad longitud} \quad (1.28)$$

Luego, escribimos (1.27) como:

$$Z_{aa} = (r_a + r_d) + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_{sa}} \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.29)$$

La cantidad de D_e es una función de ambos: resistividad de tierra p y la frecuencia f , y es definida por la relación:

$$D_e = 2160 \sqrt{p/f} \text{ ft} \quad (1.30)$$

A1.1.1.5 Impedancia de líneas trifásicas

La configuración de los circuitos es mostrado en la figura 2.4, en la que las impedancias, tensiones y corrientes son identificadas.

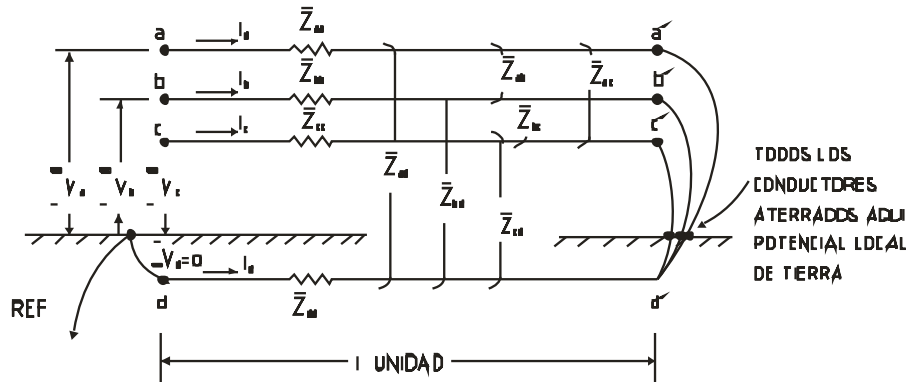


Figura A1.1.4. Línea trifásica con retorno por tierra [5]

Desde que todos los conductores son aterrados en el punto remoto a'-b'-c', se reconoce que:

$$I_d = -(I_a + I_b + I_c) \quad (1.31)$$

Entonces, se escriben las ecuaciones de caída de tensión en la dirección del flujo de corriente como sigue:

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \\ V_{dd'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_b - V_{b'} \\ V_c - V_{c'} \\ V_d - V_{d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{ad} \\ \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{bd} \\ \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{cc} & \bar{Z}_{cd} \\ \bar{Z}_{ad} & \bar{Z}_{bd} & \bar{Z}_{cd} & \bar{Z}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \end{bmatrix} \quad V / \text{unidad longitud} \quad (1.32)$$

Estas ecuaciones son conocidas como “ecuaciones primitivas de tensión”. La impedancia de la línea es usualmente pensada cómo la relación de la tensión a la corriente vista en el extremo de la línea. Se selecciona una tensión de referencia en el extremo izquierdo de la línea y se resuelve (1.32) para las tensiones V_a , V_b , y V_c . La corriente I_d es conocida y se puede escribir:

$$V_{a'} - V_{d'} = 0, \quad V_{b'} - V_{d'} = 0, \quad V_{c'} - V_{d'} = 0 \quad (1.33)$$

Para la condición de conexión en el extremo de recepción de la línea, desde que $V_d = 0$, se sustrae la cuarta ecuación (1.32) del primero, con el resultado:

$$V_a - (V_{a'} - V_{d'}) = (\bar{z}_{aa} - 2\bar{z}_{ad} + \bar{z}_{dd})I_a + (\bar{z}_{ab} - \bar{z}_{ad} - \bar{z}_{bd} + \bar{z}_{dd})I_b + (\bar{z}_{ac} - \bar{z}_{ad} - \bar{z}_{cd} + \bar{z}_{dd})I_c$$

Por conveniencia, se escribe este resultado como $V_a = Z_{aa}I_a + Z_{ab}I_b + Z_{ac}I_c$, donde tenemos definidas las nuevas impedancias Z_{aa} , Z_{ab} y Z_{ac} . Nótese que cuando $I_b = I_c = 0$, Z_{aa} es exactamente la impedancia para la línea con retorno por tierra (1.26). Si repetimos la operación anterior para las fases b y c, nosotros tenemos el resultado siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad V / \text{unidad longitud} \quad (1.34)$$

Donde se reconoce la reciprocidad de inductancias mutuas en una lineal, pasiva red bilateral ($Z_{ab} = Z_{ba}$, etc.). Los elementos de impedancia de (1.34) son fácilmente encontrados:

Impedancias propias

$$\begin{aligned}
Z_{aa} &= \bar{Z}_{aa} - 2\bar{Z}_{ad} + \bar{Z}_{dd} \quad \Omega / \text{unidad longituditud} \\
Z_{bb} &= \bar{Z}_{bb} - 2\bar{Z}_{bd} + \bar{Z}_{dd} \quad \Omega / \text{unidad longituditud} \\
Z_{cc} &= \bar{Z}_{cc} - 2\bar{Z}_{cd} + \bar{Z}_{dd} \quad \Omega / \text{unidad longituditud}
\end{aligned} \tag{1.35}$$

Impedancias mutuas

$$\begin{aligned}
Z_{ab} &= \bar{Z}_{ad} - 2\bar{Z}_{ad} + \bar{Z}_{bd} + \bar{Z}_{dd} \quad \Omega / \text{unidad longituditud} \\
Z_{bc} &= \bar{Z}_{bc} - 2\bar{Z}_{bd} + \bar{Z}_{cd} + \bar{Z}_{dd} \quad \Omega / \text{unidad longituditud} \\
Z_{ac} &= \bar{Z}_{ac} - 2\bar{Z}_{ad} + \bar{Z}_{cd} + \bar{Z}_{dd} \quad \Omega / \text{unidad longituditud}
\end{aligned} \tag{1.36}$$

Para examinar más estas impedancias, usamos (1.22), (1.23) y (1.25) con el fin de identificar elementos similares a \bar{z}_{aa} , \bar{z}_{dd} y \bar{z}_{ad} respectivamente. Nosotros llamamos a estas “impedancias primitivas”, las cuales son mostradas a continuación en términos de distancias físicas involucradas.

Impedancias propias primitivas:

$$\begin{aligned}
\bar{Z}_{aa} &= r_a + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sa}} - 1 \right) \quad \Omega / \text{unidad longituditud} \\
\bar{Z}_{bb} &= r_b + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sd}} - 1 \right) \quad \Omega / \text{unidad longituditud} \\
\bar{Z}_{cc} &= r_c + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sc}} - 1 \right) \quad \Omega / \text{unidad longituditud} \\
\bar{Z}_{dd} &= r_d + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sd}} - 1 \right) \quad \Omega / \text{unidad longituditud}
\end{aligned} \tag{1.37}$$

Impedancias mutuas línea a línea primitivas:

$$\begin{aligned}
\bar{Z}_{ab} &= j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{ab}} - 1 \right) \quad \Omega / \text{unidad longituditud} \\
\bar{Z}_{bc} &= j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{bc}} - 1 \right) \quad \Omega / \text{unidad longituditud} \\
\bar{Z}_{ca} &= j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{cd}} - 1 \right) \quad \Omega / \text{unidad longituditud}
\end{aligned} \tag{1.38}$$

Impedancias mutuas línea a tierra primitiva:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{ad} &= j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{ad}} - 1 \right) \Omega / \text{unidad longitud} \\ \bar{Z}_{bd} &= j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{bd}} - 1 \right) \Omega / \text{unidad longitud} \\ \bar{Z}_{cd} &= j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{cd}} - 1 \right) \Omega / \text{unidad longitud}\end{aligned}\tag{1.39}$$

De estas impedancias primitivas, propias y mutuas, se calcula las impedancias mutuas y propias del circuito, usando las ecuaciones (1.35) y (1.36). Por simplicidad, se utiliza las aproximaciones:

$$\sqrt{D_e} = D_{ad} = D_{bd} = D_{cd}, D_s = D_{sa} = D_{sb} = D_{sc}\tag{1.40}$$

Y se usa la definición $D_{sd} = 1$; entonces, se calcula:

$$\begin{aligned}z_{aa} &= (r_a + r_d) + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_s} \Omega / \text{unidad longitud} \\ z_{bb} &= (r_b + r_d) + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_s} \Omega / \text{unidad longitud} \\ z_{cc} &= (r_c + r_d) + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_s} \Omega / \text{unidad longitud}\end{aligned}\tag{1.41}$$

$$\begin{aligned}z_{ab} &= r_d + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_{ab}} \Omega / \text{unidad longitud} \\ z_{bc} &= r_d + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_{bc}} \Omega / \text{unidad longitud} \\ z_{ca} &= r_d + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_{ca}} \Omega / \text{unidad longitud}\end{aligned}\tag{1.42}$$

El resultado es interesante desde que los términos de la impedancia mutua tienen una componente de resistencia, y ello se debe al retorno común de tierra.

A1.1.1.6 Transposiciones y giros de conductores de línea

Teniendo en cuenta la ecuación (1.34), es aparente que los conductores de fase de un circuito están mutuamente acoplados y que las corrientes en cualquier conductor producirán una caída de tensión en los conductores adyacentes. Además, estas caídas de tensión inducidas talvez sean desiguales aun para corrientes balanceadas desde que las impedancias mutuas dependen enteramente en el arreglo físico de los conductores. En la ecuación (1.41), notamos que las impedancias mutuas son iguales solo si $D_{ab} = D_{bc} = D_{ca}$, es decir, un espaciamiento de triángulo equilátero. En la práctica, tal arreglo de conductor es frecuentemente usado.

Uno de los medios para compensar las inductancias mutuas es realizar transposiciones o rotaciones de los conductores de líneas aéreas. Una transposición es una rotación física de los conductores, arreglada de forma que cada conductor es movido para ocupar la siguiente posición física en una secuencia regular como a-b-c, b-c-a, c-a-b, etc. Tal transposición es mostrada en la figura A1.1.5.

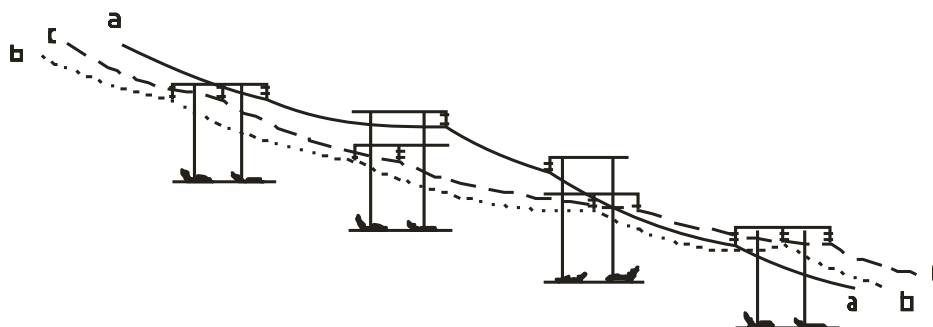


Figura A1.1.5. Transposición o rotación de una línea aérea [5]

Si una sección de líneas es dividida en tres segmentos de igual longitud, separados por rotaciones, afirmamos que la línea está completamente transpuesta.

Bajo este arreglo, la corriente en el conductor vería las impedancias en la primera columna de la matriz de impedancia de (1.34) para la tercera parte de la longitud total de la línea; pero, entonces, vería las impedancias de la segunda columna y, finalmente, de la tercera columna, todas en iguales cantidades.

La usual terminología para esta rotación de conductores refiere a cada rotación, lo que se muestra en la figura A1.1.5, como una transposición y a una serie de conexión de tres secciones, separadas por dos sucesivas rotaciones, como un ciclo de transposición o una

línea completamente transpuesta. Esto es conveniente para referir a la rodadura de tres conductores como en la figura A1.1.5, por el nombre de rotación para distinguirla de una situación en la que solamente dos conductores son transpuestos. Este arreglo es llamado “giro”.

Rotación de conductores de línea usando R_ϕ

Matemáticamente, podemos introducir una rotación por medio de una simple operación de matriz. Nosotros definimos para este propósito una “matriz de rotación hacia adelante (u horario)” R_ϕ , donde:

$$R_\phi = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 3 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1.43)$$

Premultiplicando una matriz de impedancia por esta rotación, se tiene el efecto de rotación de los elementos mostrados como en la figura 1.6. Por ejemplo, las impedancias propias y mutuas para el conductor en posición 1 son movidas en la matriz hacia las posiciones inicialmente ocupadas por las impedancias propias y mutuas del conductor 2, etc. En aplicación de la matriz de rotación, se considera solamente el caso en el que todos los conductores de fases son idénticos. Entonces:

$$r_a = r_b = r_c = r, \quad D_{sa} = D_{sb} = D_s \quad (1.44)$$

Bajo estas condiciones, las impedancias dependen no de la designación de fase, a-b-c, pero sí de la posición de ocupación de los conductores en la torre. Se diseñan estas posiciones 1-2-3 como en la figura A1.1.6 siguiente.

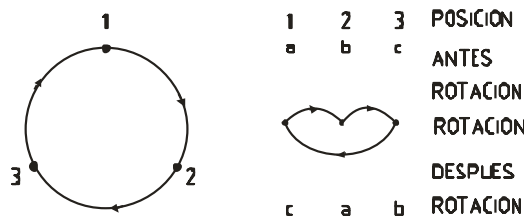


Figura A1.1.6. Rotación debida a la premultiplicación R_ϕ [5]

Esto ayuda a reconocer que la inversa de la matriz R_ϕ existe y es igual a:

$$R_{\phi}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = R_{\phi}^t \quad (1.45)$$

Basados en la figura A1.1.6, se reconoce esto a ser una inversa o rotación antihoraria desde que tal hecho arregla los elementos de la matriz en exactamente la inversa del reordenamiento producido por R_{ϕ} . También se calcula las cantidades:

$$R_{\phi}^2 = R_{\phi}^{-1}, R_{\phi}^{-1})^2 = R_{\phi} \quad (1.46)$$

Así, dos rotaciones producen el mismo efecto como una rotación en la dirección opuesta. Este hecho tal vez sea verificado intuitivamente al examinar la figura A1.1.6.

Matemáticamente, una rotación es el resultado de una transformación lineal. Si la ecuación (1.33) es reescrita con subíndices numéricos para referir las cantidades a una posición física antes que a una conexión de terminal (a-b-c), tenemos:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1.47)$$

O en forma de matriz:

$$V_{123} = Z_{123} I_{123} \quad (1.48)$$

Esta ecuación tal vez sea transformada por una transformación lineal a calcular:

$$R_{\phi} V_{123} = R_{\phi} Z_{123} I_{123} \quad (1.49)$$

o

$$\begin{bmatrix} V_3 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{31} & z_{32} & z_{33} \\ z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

El resultado de esta operación es el lugar de la fila de abajo Z_{123} en la parte superior y el movimiento de las otras dos filas hacia abajo. Sin embargo, de (1.48) se calcula:

$$R_\phi V_{123} = (R_\phi Z_{123} R_\phi^{-1}) R_\phi I_{123} \quad (1.50)$$

Llevando a cabo la operación indicada, se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_3 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{33} & z_{31} & z_{32} \\ z_{13} & z_{11} & z_{12} \\ z_{23} & z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_3 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.51)$$

o

$$V_{312} = Z_{312} I_{312} \quad (1.52)$$

El resultado después de multiplicar una matriz por $R\phi^{-1}$ se emplea para mover la tercera columna a la primera posición. Estas operaciones son anotadas en forma compacta por (1.52).

De similar forma, podemos mostrar que la transformación $R\phi^{-1}$ produce el siguiente resultado:





$$R_\phi^{-1} V_{123} = (R_\phi^{-1} Z_{123} R_\phi) R_\phi^{-1} I_{123}$$

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{22} & z_{23} & z_{21} \\ z_{32} & z_{33} & z_{31} \\ z_{12} & z_{13} & z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1.53)$$

$$V_{231} = Z_{231} I_{231} \quad (1.54)$$

El efecto de estas manipulaciones diferentes de matrices es mostrado en la tabla A1.1.3.

Tabla A1.1.3. Efecto de Operaciones de la Matriz Transposición [5]

Premultiplicación por R_0	Mover 3ra fila a posición 1	
Postmultiplicación por R_0^T	Mover 3ra columna a posición 1	
Premultiplicación por $R_0^{-1} = R_0^T$	Mover 1ra fila a posición 3	
Postmultiplicación por R_0	Mover 1ra columna a posición 3	

Ahora, aplicamos la matriz de rotación al problema de cálculo de la impedancia de una línea, la cual incluye transposiciones o rotaciones. Consideramos la línea mostrada en la figura A1.1.7, en la que cada corriente ve la impedancia de cada posición del conductor para una porción de la longitud de la línea.

En la **Sección 1**, observamos que la posición 1-2-3 corresponde a la fase a-b-c, de manera que la ecuación de tensión (1.55) se aplica para la sección.

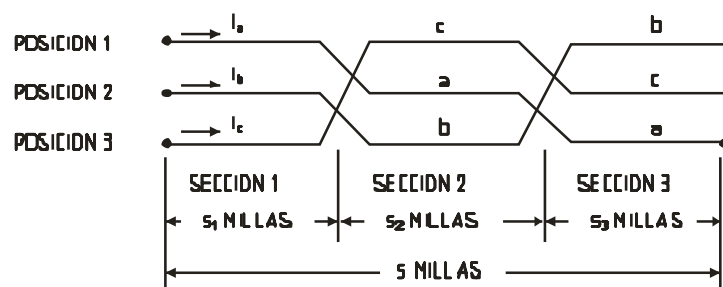


Figura A1.1.7. Ciclo de rotación o transposición completa [5]

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{11-1} & z_{12-1} & z_{13-1} \\ z_{21-1} & z_{22-1} & z_{23-1} \\ z_{31-1} & z_{32-1} & z_{33-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 = I_a \\ I_2 = I_b \\ I_3 = I_c \end{bmatrix} \quad (1.55)$$

o

$$V_{abc} = V_{123} = Z_{123} I_{123} = Z_{123} I_{abc} \quad (1.56)$$

Donde las impedancias obtenidas son las impedancias totales para la sección 1 de la línea, se usa la notación:

$$Z_{ij-k} = f_k Z_{ij} \quad (1.57)$$

Donde

$$f_k = s_k / s$$

i,j = 1,2,3 = indicador de posición

k = 1,2 o 3 = identificador de sección de línea

s_k = longitud de sección de línea k

s = longitud total de la línea

Aquí, Z_{if} es la impedancia total de la línea correspondiente a las posiciones i y j, y f_k es la fracción de la longitud total de la línea en sección k.

Para la **sección 2**, fases c-a-b, correspondientes a las posiciones 1-2-3, tal que la ecuación de la tensión puede ser escrita como:

$$V_{cab} = V_{123} = Z_{123} I_{123} = Z_{123} I_{cab} \quad (1.58)$$

Aplicando la transformación $R_{\phi^{-1}}$, esta ecuación llega a ser:

$$V_{abc} = Z_{231} I_{abc} \quad (1.59)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{22-2} & z_{23-2} & z_{21-2} \\ z_{32-2} & z_{33-2} & z_{31-2} \\ z_{12-2} & z_{13-2} & z_{11-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

Esta ecuación talvez sea verificada por una inspección de la figura A1.1.7.

Para la **sección 3**, se tiene la correspondencia b-c-a a 1-2-3 o:

$$V_{bca} = V_{123} = Z_{123} I_{123} = Z_{123} I_{bca} \quad V \quad (1.61)$$

Transformando por $R_\phi = (R_\phi^{-1})^2$, se calcula:

$$V_{abc} = Z_{312} I_{abc} \quad V \quad (1.62)$$

o

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{33-3} & z_{31-3} & z_{32-3} \\ z_{13-3} & z_{11-3} & z_{12-3} \\ z_{23-3} & z_{21-3} & z_{22-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad V \quad (1.63)$$

Para hallar la caída de tensión total a lo largo de la línea, se adiciona la caída en cada sección dada por las ecuaciones (1.55), (1.60) y (1.63), con el resultado:

$$\begin{bmatrix} \Sigma V_a \\ \Sigma V_b \\ \Sigma V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (z_{11-1} + z_{22-2} + z_{33-3})(z_{12-1} + z_{23-2} + z_{31-3})(z_{13-1} + z_{21-2} + z_{32-3}) \\ (z_{21-1} + z_{32-2} + z_{13-3})(z_{22-1} + z_{33-2} + z_{11-3})(z_{23-1} + z_{31-2} + z_{12-3}) \\ (z_{31-1} + z_{12-2} + z_{23-3})(z_{32-1} + z_{13-2} + z_{21-3})(z_{33-1} + z_{11-2} + z_{22-3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad V \quad (1.64)$$

Talvez sea conveniente escribir (1.64) en términos de la impedancia total de la línea en cada posición multiplicada por la fracción apropiada f_k , definida en la ecuación (1.57). El resultado es:

$$\begin{bmatrix} \Sigma V_a \\ \Sigma V_b \\ \Sigma V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f_1 z_{11} + f_2 z_{22} + f_3 z_{33})(f_1 z_{12} + f_2 z_{23} + f_3 z_{31})(f_1 z_{13} + f_2 z_{21} + f_3 z_{32}) \\ (f_1 z_{21} + f_2 z_{32} + f_3 z_{13})(f_1 z_{22} + f_2 z_{33} + f_3 z_{11})(f_1 z_{23} + f_2 z_{31} + f_3 z_{12}) \\ (f_1 z_{31} + f_2 z_{12} + f_3 z_{23})(f_1 z_{32} + f_2 z_{13} + f_3 z_{21})(f_1 z_{33} + f_2 z_{11} + f_3 z_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad V \quad (1.65)$$

De (1.40) y (1.41):

$$\begin{aligned}
z_{ij} &= (r_a + r_d) \cdot s + j\omega k s \ln \frac{D_e}{D_s} \Omega, i = j \\
&= r_d s + j\omega k s \ln \frac{D_e}{D_{ij}} \Omega, i \neq j
\end{aligned} \tag{1.66}$$

Para conductores idénticos:

$$z_{11} = z_{22} = z_{33} = z_s \Omega \tag{1.67}$$

En una red lineal, pasiva, bilateral $Z_{if} = Z_{ji}$, usando este hecho, nosotros podemos definir tres clases de impedancias mutuas como sigue:

$$\begin{aligned}
z_{k1} &= f_1 z_{12} + f_2 z_{23} + f_3 z_{13} \Omega \\
z_{k2} &= f_1 z_{13} + f_2 z_{12} + f_3 z_{23} \Omega \\
z_{k3} &= f_1 z_{23} + f_2 z_{13} + f_3 z_{12} \Omega
\end{aligned} \tag{1.68}$$

Entonces, (1.64) llega a ser:

$$\begin{bmatrix} \Sigma V_a \\ \Sigma V_b \\ \Sigma V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_s & z_{k1} & z_{k2} \\ z_{k1} & z_s & z_{k3} \\ z_{k2} & z_{k3} & z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} V \tag{1.69}$$

En términos de la geometría de la línea, las impedancias (1.68) pueden ser inscritas como:

$$\begin{aligned}
z_{k1} &= r_d s + j\omega k s \left(f_1 \ln \frac{D_e}{D_{12}} + f_2 \ln \frac{D_e}{D_{23}} + f_3 \ln \frac{D_e}{D_{13}} \right) \Omega \\
z_{k2} &= r_d s + j\omega k s \left(f_1 \ln \frac{D_e}{D_{13}} + f_2 \ln \frac{D_e}{D_{12}} + f_3 \ln \frac{D_e}{D_{23}} \right) \Omega \\
z_{k3} &= r_d s + j\omega k s \left(f_1 \ln \frac{D_e}{D_{23}} + f_2 \ln \frac{D_e}{D_{13}} + f_3 \ln \frac{D_e}{D_{12}} \right) \Omega
\end{aligned} \tag{1.70}$$

La ecuación (1.69) es la ecuación deseada para una línea que ha sufrido una completa transposición o ciclo de rotación. Se nota que la impedancia de la línea incluye el efecto de alguna corriente de retorno a través de tierra. En el caso de corrientes balanceadas, como en los casos de secuencia positiva y negativa, la impedancia de tierra desaparece cuando

la corriente no fluye por tierra. Cuando la corriente de secuencia cero fluye, sin embargo, las tres corrientes retornan a través de la tierra, y la impedancia de tierra es muy importante.

Para calcular las impedancias de secuencia, recurrimos a las definiciones de las ecuaciones (1.32)-(1.34):

$$\begin{aligned}
 Z_{S0} = Z_{S2} &= (r_a + r_d)s + jwks \ln \frac{D_e}{D_s} \Omega \\
 Z_{S1} = Z_{S2} &= 0 \text{ (phase wires identical)} \\
 Z_{M0} &= r_d s + jwks \ln \frac{D_e}{D_{eq}} \Omega \\
 Z_{M1} &= jwks \left[\frac{(f_3 + af_2 + a^2 f_1)}{3} \ln \frac{D_e}{D_{12}} + \frac{(f_1 + af_3 + a^2 f_2)}{3} \ln \frac{D_e}{D_{23}} + \frac{(f_2 + af_1 + a^2 f_3)}{3} \ln \frac{D_e}{D_{13}} \right] \Omega \\
 Z_{M2} &= jwks \left[\frac{(f_3 + a^2 f_2 + af_1)}{3} \ln \frac{D_e}{D_{12}} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(f_1 + a^2 f_3 + af_2)}{3} \ln \frac{D_e}{D_{23}} + \frac{(f_2 + a^2 f_1 + af_3)}{3} \ln \frac{D_e}{D_{13}} \right] \Omega \tag{1.71}
 \end{aligned}$$

Donde, en Z_{M0} , usamos la cantidad D_{eq} , el “espacio equivalente” de tres conductores definidos como GMD de las tres distancias o:

$$D_{eq} = (D_{12} D_{23} D_{13})^{1/3} \tag{1.72}$$

Donde las distancias están en las mismas unidades.

Aplicando la ecuación (1.46), se escribe la secuencia de impedancias como:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (z_1 + 2Z_{M0}) & -Z_{M2} & -Z_{M1} \\ -Z_{M1} & (Z_8 - Z_{M0}) & 2Z_{M2} \\ -Z_{M2} & 2Z_{M1} & (Z_3 - Z_{M0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} V \tag{1.73}$$

Desde que Z_{M1} y Z_{M2} no son cero, hay un acoplamiento entre las redes de secuencia en el caso general de una línea transpuesta. La impedancia propia al flujo de la corriente I_{a0} y I_{a1} son iguales respectivamente a:

$$Z_0 = Z_3 + 2Z_{M0} = s \left[(r_a + 3r_d) + j\omega k \ln \frac{D_e^3}{D_s D_{eq}^2} \right] \Omega$$

$$Z_1 = Z_2 = Z_s - Z_{M0} = s \left(r_a + j\omega k \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \right) \Omega \quad (1.74)$$

Donde se nota que la resistencia de tierra se ha desvanecido en Z1 según lo previsto. Más adelante, se muestra que (1.73) es simplificado en el caso especial donde $f_1 = f_2 = f_3$.

A1.1.1.7 Líneas completamente transpuestas

En algunos problemas, las líneas son completamente transpuestas o se puede asumir esto por simplicidad en los cálculos. En tales casos, el cálculo de la impedancia es un caso especial de la ecuación (1.64), donde:

$$f_1 = f_2 = f_3 = 1/3 \quad (1.75)$$

Entonces, de $Z_{k1} = Z_{k2} = Z_{k3} = (1/3)(Z_{12} + Z_{23} + Z_{13}) = Z_k$ por definición, se calcula de (1.70):

$$Z_k = r_d s + j\omega k s \ln \frac{D_e}{D_{eq}} \quad (1.76)$$

Y se escribe:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_k & Z_k \\ Z_k & Z_s & Z_k \\ Z_k & Z_k & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1.77)$$

Esto simplifica las secuencias de impedancias desde $Z_{M1} = Z_{M2} = 0$, y se escribe:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1.78)$$

Donde una unidad de longitud de línea:

$$z_0 = (r_a + 3r_d) + j\omega k \ln \frac{D_e^3}{D_s^3 D_{eq}^2} \quad (1.79)$$

$$z_1 = r_a + j\omega k \ln \frac{D_{eq}}{D_s} = z_2 \quad \Omega/\text{unidad longitud}$$

Se observa que cuando la línea es completamente transpuesta, la matriz de impedancias (1.78) es diagonal y no hay acoplamiento entre las redes de secuencia. Nota también que las impedancias de secuencia positiva y negativa son igual, un hecho que es intuitivamente obvio.

La impedancia de secuencia cero es vista, algunas veces, en la literatura correspondiente de forma diferente de (1.79), como:

$$z_0 = (r_a + 3r_d) + j3\omega k \ln \frac{D_e}{D_s^{1/3} D_{eq}^{2/3}} \quad \Omega/\text{unidad longitud} \quad (1.80)$$

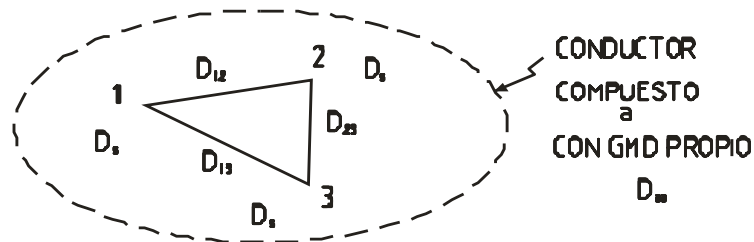


Figura A1.1.8. Composición ficticia del conductor a [5]

Se escribe el denominador del logaritmo en la forma:

$$D_s^{1/3} D_{eq}^{2/3} = D_s^{1/3} (D_{12} D_{23} D_{13})^{2/9} = [D_s^3 (D_{12} D_{23} D_{13})^2]^{1/9} \quad (1.81)$$

Esta cantidad es la GMD propia del conductor compuesto, el cual se llama “a”, que comprende tres conductores de GMR, igual a D_s y separado por distancias D_{12} , D_{23} y D_{13} , como se muestra en la figura 1.8. Entonces, la cantidad (1.81) es claramente el GMD propio del conductor compuesto o:

$$D_{aa} = D_s^{1/3} D_{eq}^{2/3} \quad (1.82)$$

La impedancia de secuencia cero puede ser escrita como:

$$z_0 = (r_a + 3r_d) + j3wk \ln \frac{D_e}{D_{aa}} \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.83)$$

Este punto de vista del comportamiento de una línea transpuesta como un conductor compuesto es un útil concepto. La secuencia cero, talvez es calculada directamente de esta idea. Se supone que las corrientes de secuencia cero fluyen en los conductores trifásicos y retornan en la tierra como se muestra en la figura A1.1.9. Para calcular la inductancia del conductor a compuesto de la línea, bajo estas condiciones, se reconoce dos componentes de inductancia debido a I_a y I_e , como en la figura 1.9. La inductancia ocasionada por I_a es:

$$L_a = k \ln \frac{D_m}{D_s} = k \ln \frac{D_{ae}}{D_{aa}} h / \text{unidad longitud} \quad (1.84)$$

Desde que $I_e = I_a$ y $D_{se}=1.0$, la inductancia generada por I_e es:

$$L_e = k \ln \frac{D_{ae}}{1.0} H / \text{unidad longitud} \quad (1.85)$$

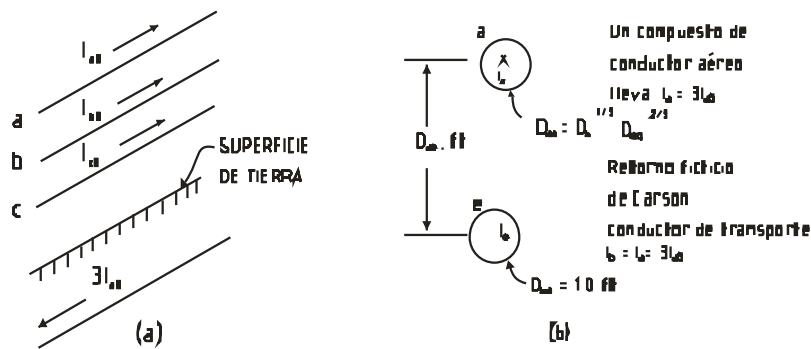


Figura A1.1.9. Circuito para el cual la impedancia de secuencia cero es deseado: (a) pictórica vista (B) arreglo equivalente para cálculo de impedancia [5]

Adicionando, nosotros tenemos la total impedancia para la fase a, a la cual, nosotros llamamos:

$$L_a = L_a + L_e = k \ln \frac{D_{ae}^2}{D_{aa}} = k \ln \frac{D_e}{D_{aa}} \text{ H / unidad longitud} \quad (1.86)$$

Entonces, la impedancia propia total de la línea a y retorno a tierra es:

$$z_{aa} = r_{aa} + jx_{aa} = (r + r_d) + jwk \ln \frac{D_e}{D_{aa}} \Omega / mi \quad (1.87)$$

Si $f = 60$ Hz y la longitud está en millas:

$$z_{aa} = r_{aa} + jx_{aa} = (r + 0.09528) + j0.1213 \ln \frac{D_e}{D_{aa}} \Omega / mi$$

Esta es la impedancia de secuencia cero de una línea con retorno por tierra. En este problema, la línea compuesta a consiste en tres conductores arreglados, como se muestra en la figura A1.1.12; entonces D_{aa} , para la ecuación (1.86) está dado por la ecuación (1.82). Si nosotros permitimos a r_a ser la resistencia en Ohm por milla de un conductor a, b, o c de un conductor a, compuesto, entonces $r = r_a/3$ y la impedancia vista por la corriente $3I_{a0}$ es:

$$z_{aa} = \left(\frac{r_a}{3} + r_d \right) + jwk \ln \frac{D_e}{D_{aa}} \Omega / unit \text{ length} \quad (1.88)$$

Sobre una base por fase, desde que cada fase está en paralelo con las otras dos, la impedancia vista por I_{a0} es:

$$z_0 = 3z_{aa} = (r_a + 3r_d) + j3wk \ln \frac{D_e}{D_{aa}} \Omega \text{unidad longitud} \quad (1.89)$$

Por ejemplo, con $f=60$ Hz y la longitud en millas:

$$z_0 = 3z_{aa} = (r_a + 0.286) + j0.364 \ln \frac{D_e}{D_{aa}} \Omega \text{unidad longitud}$$

La ecuación 1.89 es exactamente la misma que (1.83), la cual fue derivada por un diferente método: el método de la distancia media geométrica GMD, que es mucho más

simple y usualmente recomendado para líneas completamente transpuestas. Las impedancias de secuencia positiva (o negativa) son calculadas usando también el método GMD para líneas transpuestas; este tema es discutido en muchas referencias, por ejemplo, en los libros de Stevenson, Westinghouse y Woodruff.

W.A. Lewis introdujo una notación útil, en la que define las siguientes cantidades:

$$r = \text{resistencia de una fase, } \Omega / \text{unidad longitud}$$

$$r_e = 3r_d = 0.004764f \Omega / \text{mi} \quad (1.90)$$

$$x_e = 3wk \ln D_e, \quad x_a = wk \ln \frac{1}{D_s}, \quad x_d = wk \ln D_{eq} \quad \Omega / \text{unidad longitud}$$

$$z_0 = (r + r_e) + j(x_e + x_a - 2x_d) \quad \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.91)$$

A1.1.1.8 Secuencia de impedancias de líneas con paquetes de conductores

Consideremos la línea de transmisión mostrada en la figura A1.1.10, que consiste de cuatro conductores aéreos con un retorno de tierra común. Este sistema es similar a la línea trifásica de la línea de la figura A1.1.4, y las varias impedancias propias son calculadas de relaciones similares a (1.36)-(1.38), lo que puede ser escrito por inspección. También como en el caso previo, dejamos:

$$I_a + I_b + I_c + I_x = -I_d A \quad (1.92)$$

Entonces, podemos escribir la ecuación primitiva:

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \\ V_{xx'} \\ V_{dd'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_b - V_{b'} \\ V_c - V_{c'} \\ V_x - V_{x'} \\ 0 - V_{d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{aa} & \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{ac} & \bar{z}_{ax} & \bar{z}_{ad} \\ \bar{z}_{ba} & \bar{z}_{bb} & \bar{z}_{bc} & \bar{z}_{bx} & \bar{z}_{bd} \\ \bar{z}_{ca} & \bar{z}_{cb} & \bar{z}_{cc} & \bar{z}_{cx} & \bar{z}_{cd} \\ \bar{z}_{xa} & \bar{z}_{xb} & \bar{z}_{xv} & \bar{z}_{xx} & \bar{z}_{xd} \\ \bar{z}_{da} & \bar{z}_{db} & \bar{z}_{dv} & \bar{z}_{dx} & \bar{z}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_x \\ I_d \end{bmatrix} \quad V / \text{unidad longitud} \quad (1.93)$$

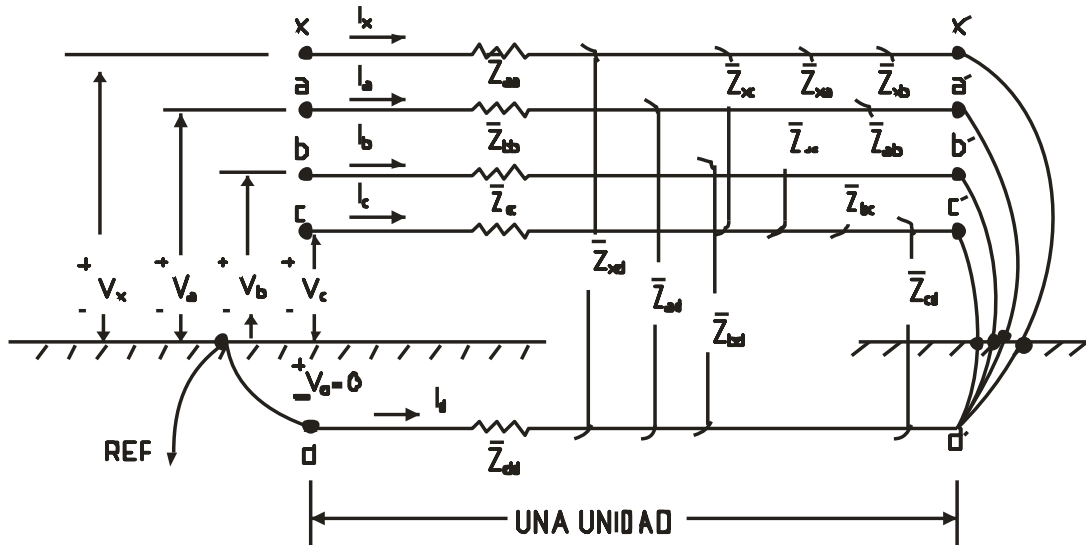


Figura A1.2.10. Cuatro conductores con retorno por tierra [5]

Donde los elementos de la matriz de impedancia primitiva son todos definidos por:

$$\bar{z}_{pp} = r_p + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sp} - 1} \right) \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.94)$$

$$p = a, b, c, x, d$$

Y

$$\bar{z}_{pq} = j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{pq}} - 1 \right) \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.95)$$

$$p, q = a, b, c, x, d$$

$$p \neq q$$

Desde que la suma de corrientes de línea a la negativa de I_d , la última ecuación puede ser sustraída de las otras cuatro a escribir las ecuaciones de la línea.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{ax} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bx} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cx} \\ z_{xa} & z_{xb} & z_{xc} & z_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_x \end{bmatrix} \text{ V / unidad longitud} \quad (1.96)$$

Donde los elementos de la matriz son definidos en términos de la impedancia primitiva:

$$z_{pq} = \bar{z}_{pq} - \bar{z}_{pd} - \bar{z}_{dq} + \bar{z}_{dd} \quad \Omega/\text{unidad longitud} \quad (1.97)$$

$p, q = a, b, c, x$

Ahora, suponemos que el conductor x es conectado en paralelo con el conductor a, tal que sus caídas de tensión son idénticas o $V_{xx} = V_{aa}$, del cual, se desprende:

$$V_x - V_a = 0 \quad (1.98)$$

Para hacer uso de esta propiedad, se reemplaza la ecuación V_x en (1.96) por una nueva ecuación calculado de (1.98). Entonces, (1.96) llega a ser:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{ax} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bx} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cx} \\ (z_{xa} - z_{aa}) & (z_{xb} - z_{ab}) & (z_{xc} - z_{ac}) & (z_{xx} - z_{ax}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_x \end{bmatrix} \quad (1.99)$$

Ya que los conductores x y a están en paralelo, forman una nueva fase a de conductores compuestos o empaquetados, como se indica en la figura A1.1.11, en la cual se define la nueva corriente de fase a:

$$I_a = I_a + I_x \quad A \quad (1.100)$$

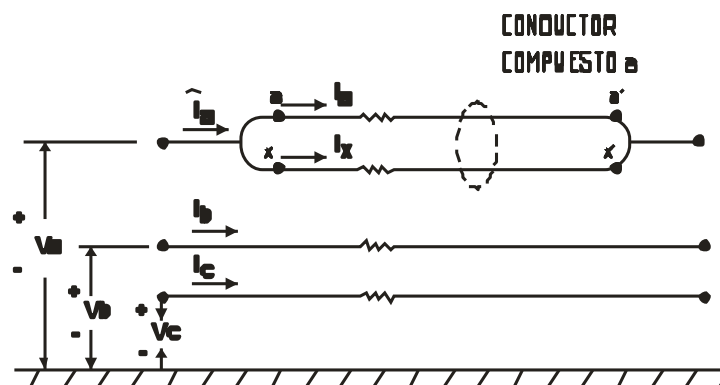


Figura A1.1.11. Empaquetado de a y x para formar la nueva fase a de conductor compuesto [5]

Ahora un producto z_{lx} en cada una de las ecuaciones a-b-c puede ser adicionado y sustraído, dejando las ecuaciones invariables. Estas cantidades a reemplazar I_a en (1.97) por (1.100) y reemplazando la cuarta columna de la matriz de impedancias por la diferencia entre la columna 4 y 1. El resultado es:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & (z_{ax} - z_{aa}) \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & (z_{bx} - z_{ba}) \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & (z_{cx} - z_{ca}) \\ (z_{xa} - z_{aa}) & (z_{xb} - z_{ab}) & (z_{xc} - z_{ac}) & z_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a + I_x \\ I_b \\ I_c \\ I_x \end{bmatrix} \quad (1.101)$$

Escribiendo (1.101) en la forma de matriz particionada tenemos

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 \\ z_3 & z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_x \end{bmatrix} \quad (1.102)$$

Entonces nosotros calculamos por la matriz de reducción

$$V_{abc} = (z_1 - z_2 z_4^{-1} z_3) I_{abc} \quad (1.103)$$

El efecto de adicionar un conductor x a la fase a es para aumentar en gran medida el GMR de la fase a. Esto reduce la impedancia de la fase a pero también reduce todas las otras impedancias propias y mutuas. El monto de la reducción está dado por la matriz $z_2 z_4^{-1} z_3$ cada termino de los cuales, para este simple caso, puede ser calculado de la formula

$$(z_2 z_4^{-1} z_3)_{pq} = \frac{(z_{px} - z_{pa})(z_{xq} - z_{aq})}{z_{xx} - z_{ax} - z_{xq} + z_{aa}}$$

p, q = a, b, c (1.104)

Esta misma idea puede ser extendida a cualquier número de conductores los cuales pueden estar en paralelo con algunas fases. Estas adiciones puede ser hecho una a la vez o simultáneamente. De particular interés es el caso donde tres conductores son adicionados a la configuración a-b-c con un conductor adicionado a cada fase. El circuito es mostrado en la figura A1.1.12 donde los conductores r,s y t son agrupados con los conductores a,b y c respectivamente. Antes del empaquetamiento o agrupamiento,

nosotros tenemos la ecuación de tensión general, similar a (1.96) pero se expandió para incluir los seis conductores.

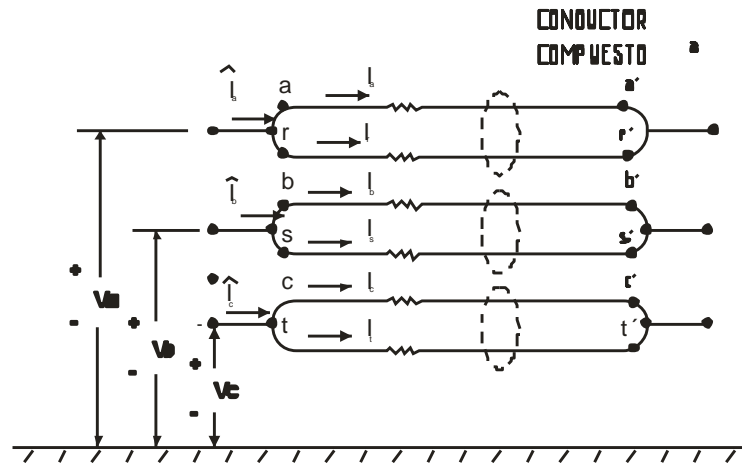


Figura A1.1.12. Empaquetamiento o agrupamiento de los conductores en las tres fases [5]

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_r \\ V_s \\ V_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{ar} & z_{ax} & z_{at} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{br} & z_{bs} & z_{bt} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cr} & z_{cs} & z_{ct} \\ z_{ra} & z_{rb} & z_{rc} & z_{rr} & z_{rs} & z_{rt} \\ z_{sa} & z_{sb} & z_{sc} & z_{sr} & z_{ss} & z_{st} \\ z_{ta} & z_{tb} & z_{tc} & z_{tr} & z_{ts} & z_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_s \\ I_t \end{bmatrix} \quad V / \text{unidad longitud} \quad (1.105)$$

Después del agrupamiento, las ecuaciones de restricción pueden ser escritos:

$$V_r - V_a = 0, V_s - V_b = 0, V_t - V_c = 0 \quad V \quad (1.106)$$

Y definimos:

$$I_a = I_a + I_r, I_b = I_b + I_s, I_c = I_c + I_t \quad A \quad (1.107)$$

Entonces, por las técnicas usadas antes, se altera (1.105) a:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & a_{ac} & (z_{ar} - z_{aa})(z_{as} - z_{ab})(z_{at} - a_{ac}) \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & (z_{br} - z_{ba})(z_{bs} - z_{bb})(z_{bt} - a_{bc}) \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & (z_{cr} - z_{ca})(z_{cs} - z_{cb})(z_{ct} - a_{cc}) \\ (z_{ra} - z_{aa})(z_{rb} - z_{ab})(z_{rc} - a_{ac}) & z_{rr} & z_{rs} & z_{rt} \\ (z_{sa} - z_{ba})(z_{sb} - z_{bb})(z_{sc} - a_{bc}) & z_{sr} & z_{ss} & z_{st} \\ (z_{ta} - z_{ca})(z_{tb} - z_{cb})(z_{tc} - a_{cc}) & z_{tr} & z_{ts} & z_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_s \\ I_t \end{bmatrix} \quad V / \text{unidad longitud}$$

(1.108)

Donde todos los elementos en la posición derecha inferior, llamados z , pueden ser escritos en la fórmula:

$$\begin{aligned}
z_{pq} &= z_{pq} - z_{iq} - z_{ph} + z_{lh} \\
i, h &= a, b, c \\
p, q &= r, s, t
\end{aligned}$$

(1.109)

Entonces, siguiendo la partición de (1.108), se aplica (1.102) para encontrar la nueva matriz de impedancia de (1.103) o:

$$z_{new} = z_1 - z_2 z_4^{-1} z_3 \quad (1.110)$$

Aquí, se debe invertir a la matriz z_4 de 3x3, mientras esta partición fue un escalar en el caso previo.

La técnica anterior permitirá el cálculo de la matriz de impedancia de un empaquetamiento o agrupamiento de conductor de línea, donde cada fase consiste de agrupamiento de dos conductores. Este mismo resultado podría ser obtenido aplicando (1.102) con apropiados subíndices y adicionando el segundo conductor a cada fase uno a la vez. El monto del trabajo involucrado es el mismo en cada caso.

Una vez que la matriz de impedancia para el empaquetamiento de los conductores de la línea es conocida, la secuencia de impedancias son calculadas por semejanza de transformación:

$$z_{012} = A^{-1} z_{new} A \quad \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.111)$$

A1.1.1.9 Secuencia de impedancias de líneas con un conductor a tierra

En muchas líneas de transmisión físicas, los conductores a tierra son adicionados encima de los conductores de fase como escudo contra descargas directas de rayos. Determinar la localización de tales conductores no es el tema. Estudiamos el efecto que tales conductores de tierra tienen en la impedancia de la línea.

Consideremos el arreglo de la línea mostrado en la figura A1.1.13, en la que un conductor a tierra llamado w, es mostrado con cada extremo conectado sólidamente al punto local de tierra.

Claramente, la ecuación de tensión de este arreglo es exactamente el mismo de la figura A1.1.10, dada por la ecuación (1.91), excepto que en este caso $V_x = V_w = 0$. Así:

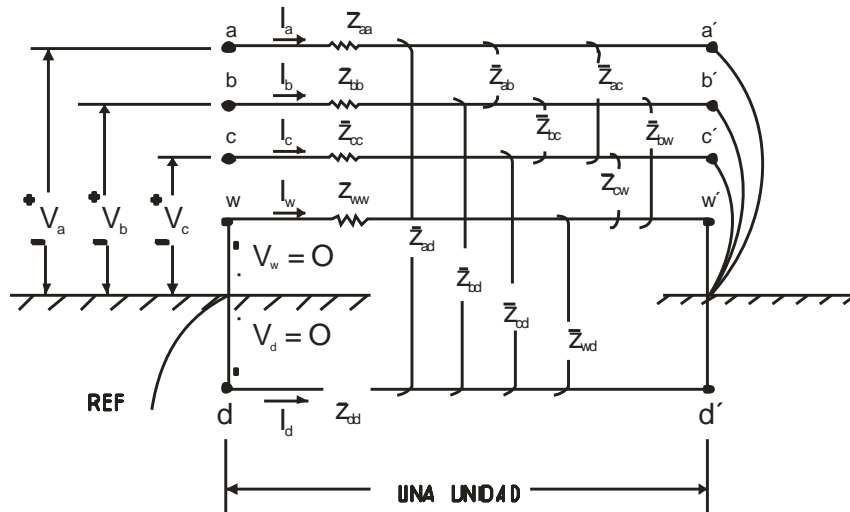


Figura A1.1.13. Línea trifásica con un conductor de tierra [5]

Se escribe la ecuación primitiva:

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \\ V_{ww'} \\ V_{dd'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_b - V_{b'} \\ V_c - V_{c'} \\ 0 - V_{w'} \\ 0 - V_{d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{aw} & \bar{Z}_{ad} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{bw} & \bar{Z}_{bd} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} & \bar{Z}_{cw} & \bar{Z}_{cd} \\ \bar{Z}_{wa} & \bar{Z}_{wb} & \bar{Z}_{wc} & \bar{Z}_{ww} & \bar{Z}_{wd} \\ \bar{Z}_{da} & \bar{Z}_{db} & \bar{Z}_{dc} & \bar{Z}_{dw} & \bar{Z}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_w \\ I_d \end{bmatrix} \quad V / \text{unidad longitud} \quad (1.112)$$

Con el conductor a tierra w en paralelo al conductor de tierra d, la corriente de retorno será dividida entre las dos rutas o $I_a + I_b + I_c = -(I_d + I_w)$. Reordenando, escribimos:

$$I_d = -(I_a + I_b + I_c + I_w) \quad (1.113)$$

Usando este resultado para I_d en (1.112), obtenemos la ecuación V_{dd} de cada una de las otras para calcular:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_w = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{aw} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bw} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cw} \\ z_{wa} & z_{wb} & z_{wc} & z_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_w \end{bmatrix} \quad V / \text{unidad longitud} \quad (1.114)$$

Donde, como antes:

$$z_{pq} = \bar{z}_{pq} - \bar{z}_{pd} - \bar{z}_{dq} + \bar{z}_{dd} \quad (1.115)$$

$p, q = a, b, c, w$

Nótese que Z_{pq} es definida para incluir r_a o r_w cuando $p = q$, pero es puramente imaginaria cuando $p \neq q$. De (1.31)-(1.38), se calcula:

$$z_{pq} = (r_a + r_d) + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_{pq}}, \quad p = q$$

$$= r_d + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_{pq}}, \quad p \neq q \quad \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.116)$$

Y $V_w = 0$, (1.114) puede ser reducida inmediatamente a la forma:

$$V_{abc} = (z_1 - z_2 z_4^{-1} z_3) I_{abc} = z_{abc} \cdot I_{abc} \quad (1.117)$$

Donde las particiones Z son definidas en (1.102). Efectuando la operación indicada en (1.117) tenemos:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{aw} \\ z_{bw} \\ z_{cw} \end{bmatrix} \cdot \left[\frac{1}{z_{ww}} \right] \begin{bmatrix} z_{wa} & z_{wb} & z_{wc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} \left[\begin{array}{ccc} \left(z_{aa} - \frac{z_{aw} z_{wa}}{z_{ww}} \right) & \left(z_{ab} - \frac{z_{aw} z_{wb}}{z_{ww}} \right) & \left(z_{ac} - \frac{z_{aw} z_{wc}}{z_{ww}} \right) \\ \left(z_{ba} - \frac{z_{bw} z_{wa}}{z_{ww}} \right) & \left(z_{bb} - \frac{z_{bw} z_{wb}}{z_{ww}} \right) & \left(z_{bc} - \frac{z_{bw} z_{wc}}{z_{ww}} \right) \\ \left(z_{ca} - \frac{z_{cw} z_{wa}}{z_{ww}} \right) & \left(z_{cb} - \frac{z_{cw} z_{wb}}{z_{ww}} \right) & \left(z_{cc} - \frac{z_{cw} z_{wc}}{z_{ww}} \right) \end{array} \right] \Omega / \text{unidad longitud} \quad (1.118)$$

O cada elemento de la matriz reducida es de la forma:

$$z_{pq} = z_{pq} - \frac{z_{pw} z_{wq}}{z_{ww}} \quad (1.119)$$

Cada elemento de la matriz es más pequeño por un factor de corrección involucrando las impedancias mutuas al conductor de tierra w.

Se asume que los tres conductores de fase tienen igual impedancia propia o $Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}$. Esto hace a los términos principales de las diagonales iguales, pero las correcciones de substracción son aún desiguales dado que las mutuas de w a a, b y c son usualmente desiguales.

A1.1.1.10 Secuencia de impedancias de líneas con dos conductores de tierra

Un sistema de tres conductores de fase y dos conductores de tierra es analizado exactamente en la misma forma que en el caso de un conductor de tierra. Consideremos el sistema mostrado en la figura A1.1.14, en el que los conductores de tierra u y w en paralelo a los conductores de fase son sólidamente aterrados en ambos extremos de la línea al punto local de tierra.

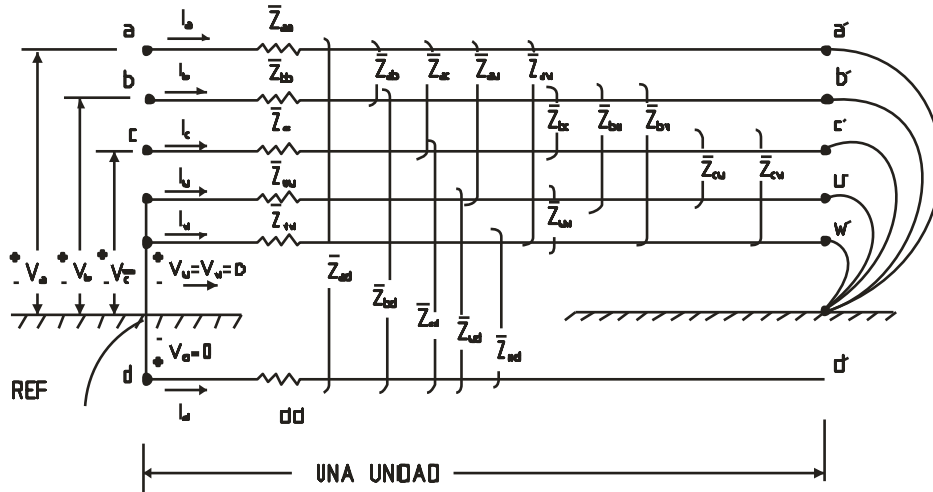


Figura A1.1.14. Línea trifásica con dos conductores a tierra [5]

Escribimos las ecuaciones de tensión primitiva como sigue:

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \\ V_{uu'} \\ V_{ww'} \\ V_{dd'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_b - V_{b'} \\ V_c - V_{c'} \\ 0 - V_{u'} \\ 0 - V_{w'} \\ 0 - V_{d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{au} & \bar{Z}_{aw} & \bar{Z}_{ad} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{bu} & \bar{Z}_{bw} & \bar{Z}_{bd} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} & \bar{Z}_{cu} & \bar{Z}_{cw} & \bar{Z}_{cd} \\ \bar{Z}_{ua} & \bar{Z}_{ub} & \bar{Z}_{uc} & \bar{Z}_{uu} & \bar{Z}_{uw} & \bar{Z}_{ud} \\ \bar{Z}_{wa} & \bar{Z}_{wb} & \bar{Z}_{wc} & \bar{Z}_{wu} & \bar{Z}_{ww} & \bar{Z}_{wd} \\ \bar{Z}_{da} & \bar{Z}_{db} & \bar{Z}_{dc} & \bar{Z}_{du} & \bar{Z}_{dw} & \bar{Z}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_u \\ I_w \\ I_d \end{bmatrix} \quad V / \text{unidad longitud} \quad (1.120)$$

Dado que la corriente de retorno se divide entre las rutas d,u y w, tenemos:

$$I_a + I_b + I_c = -(I_d + I_u + I_w)$$

o

$$I_d = -(I_a + I_b + I_c + I_u + I_w) \quad (1.121)$$

Realizando esta sustitución en (2.120) y sustrayendo $V_{dd'}$ de cada una de las otras tensiones, se calcula:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_u = 0 \\ V_w = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{au} & z_{aw} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bu} & z_{bw} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cu} & z_{cw} \\ z_{ua} & z_{ub} & z_{uc} & z_{uu} & z_{uw} \\ z_{wa} & z_{wb} & z_{wc} & z_{wu} & z_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_u \\ I_w \end{bmatrix} \quad (1.122)$$

Exactamente como en (1.115), inmediatamente se reconoce que la ecuación matriz puede ser reducida a un sistema de tercer orden en variables con subíndice a, b y c. Tomando el resultado de las matrices de impedancia, tenemos:

$$\bar{Z}_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{au} & z_{aw} \\ z_{bu} & z_{bw} \\ z_{cu} & z_{cw} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_{uu} & y_{uw} \\ y_{wu} & y_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{ua} & z_{ub} & z_{uc} \\ z_{wa} & z_{wb} & z_{wc} \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{unidad longitud} \quad (1.123)$$

Donde se ha definido:

$$\begin{bmatrix} y_{uu} & y_{uw} \\ y_{wu} & y_{ww} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{uu} & z_{uw} \\ z_{wu} & z_{ww} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det z_{uw}} \begin{bmatrix} z_{ww} & -z_{uw} \\ -z_{wu} & z_{uu} \end{bmatrix} \quad (1.124)$$

Fácilmente, se ha mostrado que algún elemento de (1.123) puede ser escrito como:

$$\bar{z}_{pq} = z_{pq} - \frac{z_{pu}z_{ww}z_{uq} - z_{pu}z_{uw}z_{wq} - z_{pw}z_{wu}z_{uq} + z_{pw}z_{uu}z_{wq}}{z_{uu}z_{ww} - z_{uw}^2}$$

$$p, q (\text{fila, columna}) = a, b, c$$

$$p, q = a, b, c \quad (1.125)$$

Este resultado es similar a (1.118): el resultado para un conductor de tierra.

ANEXO 2 RECIERRES

A2.2.1 Introducción

El presente anexo trata de los recierres: características, definiciones, efectos, factores que intervienen en su comportamiento. También se realiza un análisis de recierres tanto tripolares como monopolares. Todos los conocimientos y criterios acerca de este tema son el pilar fundamental para la determinación de los esquemas de recierres, cuando se realicen las respectivas simulaciones en el programa de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP.

En este anexo, también se exponen las protecciones usadas en líneas de transmisión, requerimientos, características y funcionalidades que las mismas cumplen dentro de sistema de potencia, detallándose fundamentalmente la protección de distancia.

La mayoría de las fallas en los sistemas eléctricos de potencia se presentan en líneas de transmisión aéreas; además, una gran parte de estas fallas son transitorias, es decir, desaparecen cuando la línea se desenergiza al abrir los interruptores en todas las terminales de la línea. Esto permite un rápido restablecimiento del servicio efectuando el recierre en los interruptores. Desde luego, no es aplicable a cables de potencia subterráneos aislados, debido a que si existe una falla dieléctrica en los aislamientos, por lo general, es permanente, mientras que en una línea de transmisión aérea, las características dieléctricas del aire se restablecen (puesto a que es un medio de aislamiento autorrecuperable) tan pronto como la corriente de falla se suspende y el arco eléctrico desaparece.

En líneas de extra alta tensión, el espaciamento entre los conductores de fase son mayores que en líneas de alta tensión; por lo tanto, el porcentaje de fallas entre fases es pequeño [3]. Algunas estadísticas representativas para el número relativo de diferentes tipos de fallas en líneas de transmisión de 500kV son mostradas en la tabla A2.2.1.

Tabla A2.2.1. Tipos de fallas en líneas de transmisión de 500kV [3]

Tipo de Falla	Porcentaje (%)
Fallas monofásicas	93
Fallas fase a fase	4
Fallas de doble fase a tierra	2
Fallas trifásicas	1
Total	100

^[3] Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines IEEE Committee Report – Transactions on Power delivery, vol. 7 No.1, January 1992.

A2.2.2 Importancia de los recierres

Se sabe que en la operación de un sistema eléctrico de potencia se debe tener criterios de seguridad, confiabilidad y economía; por ello, los recierres deben asegurar el suministro confiable de energía sin generar conflictos en los equipos o desestabilizar el sistema. Las razones para implementar los recierres automáticos tanto en transmisión como en distribución son las siguientes:

- Brinda una mayor continuidad de servicio que cuando se prescinde de él.
- Mantiene la estabilidad del sistema.
- Incrementa el índice de confiabilidad del sistema.
- Eliminación de las fallas por completo, gracias al recierre con tiempo de retraso.
- Restauración del servicio en interconexiones.
- Reducción de los efectos a causa de fallas permanentes.

A2.2.3 Consideraciones, aplicación y características de los recierres automáticos [10]

La salida de servicio de algunas líneas de transmisión, sea por falla o maniobras, no causa inestabilidad en el sistema; por ende, el autorrecierre en dichas líneas será simplemente justificado para restaurar el sistema a normal, seguido de fallas transitorias; pero el recierre no es necesario para la estabilidad del sistema.

Importantes líneas, especialmente las que conectan grandes centrales de generación, frecuentemente requieren autorrecierre con la finalidad de mantener la estabilidad del sistema para realizar una determinada operación. Esto significa que uno o más generadores serán inestables a menos que el sistema sea restaurado a su estado normal en corto tiempo: generalmente, unos pocos ciclos. Como el mayor tipo de fallas en las líneas son monofásicas transitorias, el autorrecierre usualmente será exitoso. Este mecanismo es utilizado generalmente en las líneas de alta y extra alta tensión.

A nivel de transmisión de extra alta tensión, el recierre automático se utiliza a menudo. En este nivel de tensión, casi todos los relés de las principales líneas de transmisión son de esquema piloto, en el que todas las fallas de línea se disparan en unos pocos ciclos. En este caso, una reconexión temporizada funciona muy bien y tiene un alto porcentaje de éxito.

Los criterios de diseño utilizados para los sistemas de potencia se basan en el juicio y en la probabilidad de las perturbaciones del sistema. Los sistemas de energía que cubren grandes áreas geográficas son, a menudo y desde hace mucho tiempo, líneas de transmisión que conectan los centros de carga a las instalaciones de generación. Estos sistemas tienden a la estabilidad limitada. Si las líneas son restringidas a pequeñas potencias de transferencia, la estabilidad puede ser garantizada; pero si se requieren mayores transferencias, la estabilidad después de una perturbación, tal como una falla, puede estar en riesgo.

Ingenieros de pruebas del sistema para la estabilidad usan computadoras para realizar las simulaciones de estabilidad ante fallas en el sistema. La falla trifásica con una pequeña impedancia de falla es la más severa perturbación, ya que ninguna potencia puede ser transmitida a través de una impedancia de cero de una falla trifásica. Tal ocurrencia es una prueba severa para el sistema. Si el sistema puede sobrevivir a una falla trifásica, aplicada al sistema por un período determinado, como tres a cinco ciclos, esto proporciona la confianza de que el sistema sobrevivirá a la mayoría de las perturbaciones de origen natural, que probablemente sean de menor gravedad. A veces, una falla línea a tierra, con el despeje temporizado, es también comprobada.

Algunos ingenieros sostienen que los criterios de diseño del sistema no deben suponer el recierre de la línea después de la falla. Esto es común para los sistemas de estabilidad transitoria limitada. La lógica de este argumento es que la capacidad nominal de la línea

tendría que ser reducida hasta el punto en el cual el sistema podría sobrevivir con reconexión en una falla permanente. Una habilitación de la línea puede frecuentemente ser utilizada si la reconexión después de la falla no se emplea.

Los criterios de diseño utilizados por una empresa, está en función de la robustez de su sistema interconectado, que puede implicar muchas empresas diferentes, y la dependencia del sistema de seguridad en las líneas de transmisión.

En América del Norte, los consejos regionales de confiabilidad recomendaron criterios de diseño que son adecuados para las condiciones de la mayoría del sistema. En cada empresa, sin embargo, puede manejarse criterios diferentes para tener en cuenta las condiciones especiales únicas a la topología del sistema, condiciones de operación y los requerimientos de protección.

Los tipos de falla encontrados en el sistema también entran en la aplicación del recierre automático. Una forma de clasificar las fallas se presenta a continuación:

- **Fallas transitorias** son como las descargas disruptivas sobre el aislante, que son despejadas rápidamente al abrir la línea para que no se repita si la línea es rápidamente cerrada. La causa más común de este tipo de falla es un relámpago, pero las fallas transitorias pueden ocurrir debido a los vaivenes de los conductores o si entran en contacto temporal con objetos extraños: árboles o soplo de residuos.
- **Fallas semipermanentes** son las que se pueden despejar por sí mismas si el elemento que la produjo se deja quemar por un tiempo corto. Ejemplos de esta son los contactos con ramas de árboles que a veces se producen durante una tormenta: si la rama que hace contacto se quema, la falla se puede despejar.
- **Fallas permanentes** son las que no se despejan por sí mismas y deben ser reparadas, como un conductor roto. Fallas de cable subterráneos son fallas casi siempre permanentes. Por ejemplo, daños en el cable, debido a la intrusión de una línea de arrastre o de la maquinaria de excavación que crea la falla.

Existen varias consideraciones para la operación del recierre, pero, principalmente son estos:

- **Número de recierres.** En el nivel de extra alta tensión, el primer recierre es casi siempre exitoso y los recierres monofásicos son fácilmente justificados. Múltiples

recierres, sin embargo, no son garantizados en estas tensiones y son raramente usados.

- **Recierre exitoso.** El éxito depende en gran medida de la velocidad del disparo. Un rápido despeje de la falla produce un menor daño a las líneas y equipos, y también limita la ionización de la ruta de la falla. Un rápido despeje de la falla también mejora la estabilidad del sistema. Por lo tanto, la velocidad del interruptor es un factor muy importante en el éxito de la estabilidad. Circuitos con muy alta velocidad de los relés e interruptores tendrán una alta probabilidad de recierre exitoso.

A2.2.4 Definiciones asociadas al recierre automático [6]

A continuación, se dan algunas definiciones fundamentales para la aplicación de recierres:

- **Tiempo de recierre.** Es el tiempo que toma el interruptor para abrir y cerrar la línea, es decir, es el tiempo medido entre el instante en el que el relé energiza el circuito de disparo hasta el instante en que los contactos, a través de la energización de la bobina de cierre del interruptor, reacondicionan la línea. Este periodo es la suma del tiempo utilizado por el interruptor y el tiempo del relé incluyendo además el tiempo muerto.
- **Tiempo de operación del relé de protección.** Es el tiempo que transcurre desde que se presenta la falla hasta el cierre de los contactos de disparo del relé de protección.
- **Tiempo de operación del interruptor.** Es el tiempo que transcurre desde la energización de la bobina de disparo hasta que se extingue el arco de la falla.
- **Tiempo muerto del interruptor.** Es el tiempo transcurrido entre la extinción del arco de la falla y el primer restablecimiento de los contactos del interruptor. El tiempo muerto de la falla es el intervalo durante el cual la línea fallada es desenergizada en todos los terminales.
- **Tiempo muerto del relé de cierre automático.** Es el tiempo que transcurre entre la energización del esquema de recierre automático y el cierre del circuito hasta el contacto de cierre del interruptor. En todos los esquemas de recierre que no son instantáneos o de muy alta velocidad, este tiempo, que por lo común es ajustable, es prácticamente igual al tiempo muerto del interruptor. En los esquemas de disparo múltiple, los tiempos muertos individuales pueden ser iguales o ajustarse por separado.

- **Tiempo de impulso de cierre del relé de recierre automático.** Es el tiempo en el que se cierran los contactos del relé de recierre automático.
- **Tiempo de disturbio.** Es el tiempo entre el inicio de la falla y el cierre exitoso de los contactos del interruptor, de manera que el recierre será exitoso.
- **Tiempo de desionización del arco.** Es la extinción del arco de falla de la línea, necesario para asegurar la dispersión de la ionización del aire, de manera que cuando se reenergice la línea, no exista este arco de falla.
- **Tiempo de recuperación del relé de recierre automático.** Es el tiempo que transcurre desde el momento que se cierran los contactos del relé de cierre automático hasta el cierre completo de otro circuito dentro del esquema de recierre automático que restablece el esquema o deja fuera el esquema o al interruptor, según se requiera. Este tiempo puede ser fijo o variable, o bien, dependiente del ajuste del tiempo muerto. En el esquema de varios disparos, el tiempo individual de recuperación puede ser el mismo o ajustable en forma independiente.
- **Tiempo de recierre.** Este es el tiempo que requiere el interruptor para abrir y volver a cerrar la línea. Se mide desde el instante de energización del circuito de disparo hasta el instante en el que los contactos del interruptor rehacen el circuito. Este periodo comprende el tiempo del interruptor más el tiempo muerto del sistema eléctrico.
- **Salida definitiva de operación de los interruptores.** Es una característica integrada al esquema de recierre automático, que impide la operación ulterior de cierre del interruptor cuando no ha sido efectiva la secuencia de cierres escogida. En esta situación, el interruptor tiene que cerrarse manualmente.
- **Salida definitiva de operación del relé de cierre automático.** Es una característica integrada al esquema de cierre automático, que impide la ulterior operación automática del cierre después de la secuencia escogida, ya sea que el recierre haya sido efectivo o no.
- **Autobombeo.** Es una característica incorporada al cortocircuito o al esquema de cierre, por medio de la cual, al presentarse una falla permanente, se impide que haya repetición de la operación del interruptor cuando el impulso de cierre es más prolongado que la suma de los tiempos de operación del relé de protección y del interruptor.
- **Número de intentos.** Es el número de intentos de recierre que efectúa un esquema de recierre automático antes de quedar fuera de operación por una falla permanente. El número de intentos puede ser fijo o ajustable.

- **Tiempo de carga del resorte.** En los interruptores de cierre por resorte cargado, es el tiempo que se requiere para que el motor cargue completamente el resorte después de una operación de recierre.
- **Contador de operaciones.** Por lo general, es un contador operado electromagnéticamente, que avanza un dígito cada vez que se energiza la bobina. Con frecuencia, estos dispositivos se incorporan a los esquemas de recierre automático para registrar el número de operaciones del interruptor. Es necesario tenerlos para fines de mantenimiento en las subestaciones que no tienen personal encargado, porque en estas, las operaciones podrían no registrarse en forma normal.
- **Relé contador.** Es un relé electromagnético que lleva un mecanismo de trinquete que avanza un paso en cada ocasión en la que se energiza la bobina. Después de un determinado número de pasos, opera un contacto y el mecanismo puede restablecerse manual o eléctricamente.
- **Recierre temporizado.** Es empleado en recierres monopolares y consiste en realizar un segundo recierre si el primero no es exitoso. Cuando se realiza el cierre, la línea es sincronizada por un extremo y energizada por otro: este proceso es lento y pone en riesgo la estabilidad del sistema en situaciones transitorias.

En la figura 3.1, se ilustra el ciclo de recierre automático para un interruptor dotado con un esquema de recierre automático de un solo intento.

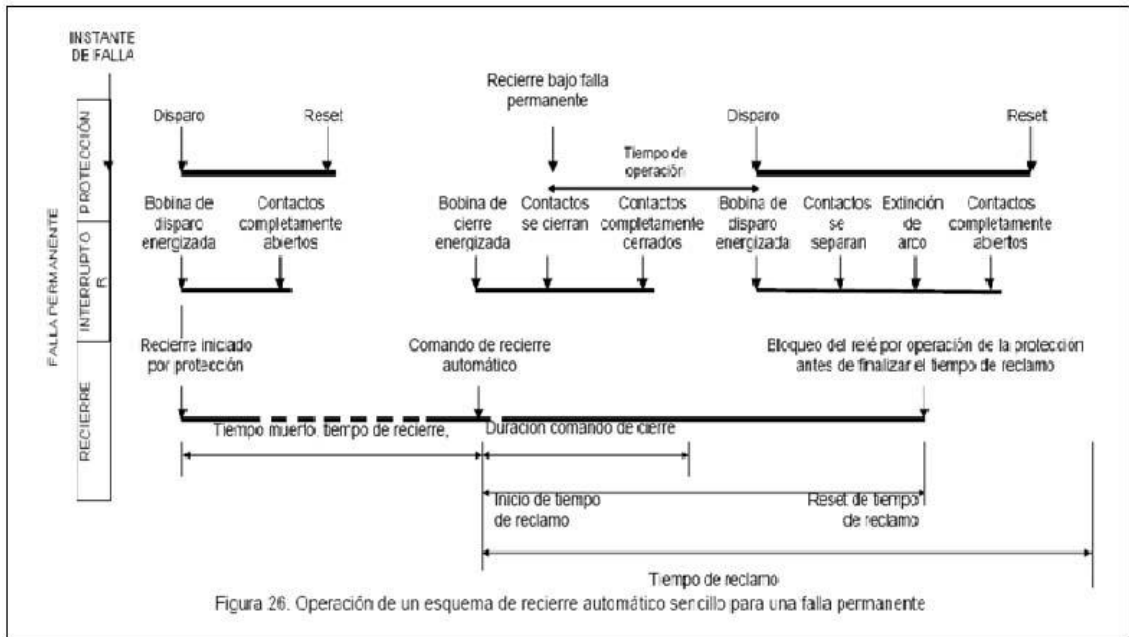


Fig A2.2.3. Operación de un esquema de recierre automático sencillo para una falla permanente [7]

A2.2.5 Desionización del Arco [10]

Un importante aspecto del recierre es la desionización del arco eléctrico y el tiempo requerido para un recierre seguro del interruptor. La desionización del arco no es una constante, pero varía con la tensión y otros factores. Para determinar el mínimo tiempo muerto de un interruptor, el cual es el más óptimo para intentar un recierre, este tiempo debe permitir extinguir el arco y desionizar la ruta del arco para que el recierre sea exitoso.

El tiempo mínimo muerto lo podemos obtener de la siguiente ecuación lineal [8]:

$$t = 10.5 + \frac{VL}{34.5} \text{ [ciclos]} \quad (2.1)$$

Donde VL es la tensión de línea en kV.

El tiempo de desionización del arco depende de una serie de factores, entre otros:

- Tensión del circuito.
- Separación de los conductores.
- Corriente de falla.
- Duración de la falla.
- Velocidad del viento.

De todos estos factores, la tensión de línea es el más importante, pues su influencia en el tiempo de desionización de arco es determinante. A continuación, se muestran los valores típicos de los tiempos de desionización para un arco al aire libre. En la tabla A2.3.1, se muestra cómo varían los tiempos de desionización del arco en función de la tensión del sistema. Mientras la tensión de la red se incrementa, los tiempos de desionización de arco también aumentan.

Tabla A2.3.1. Tiempos típicos de desionización del arco según el nivel de tensión del sistema [8]

Tensión de línea (kV)	Tiempo mínimo de desionización (Segundos).
66	0,100
110	0,150
132	0,170
220	0,280
275	0,300
500	0,417

A2.2.6 Recierre tripolar y monopolar [9]

Los recierres pueden ser tripolares o monopolares. El recierre automático tripolar es aquel en el cual se abren simultáneamente los tres polos de sus respectivas fases de la línea de transmisión después de la aparición de una falla, independientemente del tipo u origen de esta, y en el que las fases se cierran luego de un tiempo determinado, luego de la apertura del interruptor. Cuando se tiene una sola línea de transmisión que une dos sistemas de generación, al producirse una falla, las tres fases actúan en el proceso de apertura y cierre del interruptor donde los generadores de cada grupo empiezan a apartarse, en cuanto a fase, uno con respecto al otro, en vista de que no puede haber ningún intercambio en la potencia de sincronización. En este tipo de recierre, el interruptor abre sus tres polos simultáneamente y cierra en un tiempo suficientemente corto para mantener el sincronismo con el sistema.

El recierre monopolar es aquel en el que se abre y se cierra solo la fase en la cual se presenta una falla monofásica, teniendo en cuenta que la mayor cantidad de fallas que se dan en un sistema eléctrico son las de una fase a tierra. Al abrirse el circuito, se da un periodo de tiempo de atraso controlado, cerrándose el interruptor y normalizando el

servicio. Cuando se presentan fallas en diferentes fases, trifásicas o bifásicas, se abren las tres fases, pero no se intenta el recierre. En el caso de las fallas monofásicas a tierra, que son más numerosas, la potencia puede transferirse aún por las fases sanas.

En el caso de recierres monopulares, cada fase tiene que proveerse y segregarse de su propio mecanismo de disparo y cierre. También es necesaria la adaptación de relés de fase para detectar y seleccionar la fase que falla. En consecuencia, implementar un sistema de recierre monopolar resulta más costoso y más complejo que el recierre tripolar, pero sus ventajas en lo que tiene que ver la estabilidad son notorias. Pero una desventaja que tiene este tipo de recierre es que necesita un mayor tiempo de desionización del arco eléctrico.

Ventajas de la aplicación del recierre monopolar

- Estabilidad del sistema. Se sabe que si la impedancia de transferencia entre dos sistemas de generación es mantenida con valores bajos, la estabilidad sincrónica de los mismos mejora. Esto se logra cuando al producirse una falla de una sola fase a tierra, con un sistema de recierre monopolar, las dos fases sanas mantienen la transmisión de potencia durante el tiempo muerto del recierre. Esta es la principal ventaja que dio origen a la aplicación de este tipo de esquema de recierre en líneas de transmisión.
- Estabilidad de carga. La aplicación de estos esquemas de recierres monopulares logra y contribuye a mejorar este aspecto importante dentro de la operación del sistema. Cuando existen cargas alimentadas por motores síncronos, se mantiene la estabilidad al permanecer la impedancia de transferencia con bajos valores. Sucede lo mismo cuando se habla de generadores síncronos; sin embargo, los motores síncronos tienden a presentar problemas de estabilidad mayor en comparación a los generadores.
- El comportamiento de los motores de inducción con respecto a la estabilidad de carga, es mejorado con la aplicación del esquema de recierre monopolar. Al mantenerse la tensión de secuencia positiva en las terminales del motor con valores aceptables, el torque en los motores de inducción es proporcional al cuadrado de la tensión de secuencia positiva aplicado a sus terminales. Existe torque de reserva, causado por las tensiones de secuencia negativa pero es despreciable. La aplicación correcta del recierre monopolar puede asegurar que la tensión de secuencia positiva será mantenida al máximo durante el tiempo muerto de recierre, y así mantener el torque del motor.

Desventajas de la aplicación del disparo y recierre monopolar

- Costos y esquemas más complejos. En el caso de recierres automáticos monopolares, cada fase tiene que proveerse de su propio mecanismo de disparo y cierre. También es necesaria la adaptación de relés de fase para detectar y seleccionar la fase que falla, las mismas que deben contener salidas de disparo por fase, los relés necesitan de algunas compuertas que lo bloquean en el evento de fallas evolutivas. El costo de los relés utilizados se incrementa en algunas ocasiones en un 20% comparado con los esquemas de recierre convencional tripolar.
- Interruptores de potencia. Es indispensable tener un esquema de recierre monopolar en los interruptores en cada extremo de la línea protegida. Este debe tener la posibilidad de disparar el circuito de manera monopolar, teniendo los esquemas para ello y bobinas de disparo independientes para cada polo.
- Corrientes de secuencia negativa y cero. Cuando se tiene un circuito trifásico y se da la apertura de una fase, trae como resultado el incremento de las corrientes de secuencia cero y de secuencia negativa durante el tiempo muerto de recierre. Las corrientes de secuencia negativa pueden causar el calentamiento adicional en las máquinas rotativas. Las componentes de secuencia cero producidas en el recierre monopolar pueden causar interferencia en líneas telefónicas. Esta componente es mayor cuando se alimenta la falla; además, las corrientes de secuencia cero disminuyen considerablemente durante el tiempo muerto del recierre.

A2.2.7 Requerimientos de los sistemas de protección

Las líneas de transmisión generalmente se protegen con relés de protección, las cuales tienen funciones de recierre monofásico y trifásico, entre otras funciones de protección. Estos relés son generalmente el relé de distancia y el relé diferencial de línea.

Relé de distancia. Es el relé de protección más utilizado para la protección de líneas de transmisión. Su funcionamiento se basa en la comparación de la corriente de falla vista por el relé, con la tensión en el punto de instalación del mismo, determinando la impedancia desde el punto en que se mide hasta el lugar de la falla. Esta protección puede discriminar entre fallas que ocurren en diferentes partes de una línea de transmisión, ya que la impedancia está repartida a lo largo de longitud de la misma. La ventaja de la utilización del relé de distancia es que sus zonas de protección se determinan en función de la impedancia, siendo virtualmente independiente de la corriente y tensión. Por esta razón, este dispositivo de protección tiene un alcance fijo a diferencia de los relés de

sobrecorriente cuyo alcance varía dependiendo de las condiciones del sistema. Se muestra a continuación el principio de funcionamiento de este relé.

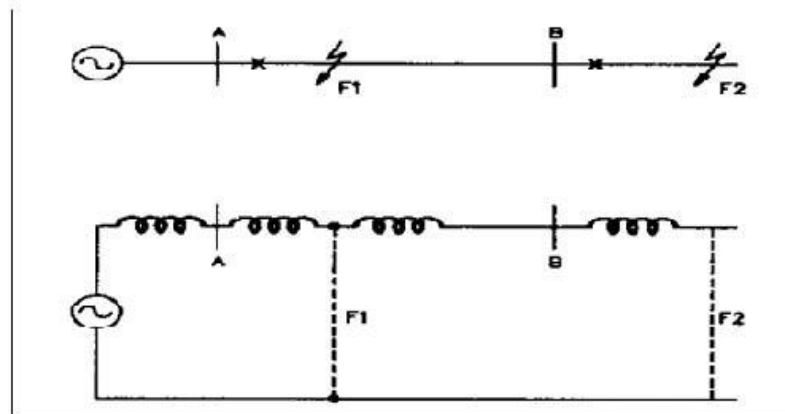


Figura A2.2.4. Impedancia hasta el punto de falla
(Fuente: elaboración propia)

Según la figura A2.2.4, dadas las fallas en los puntos F1 y F2, el relé utiliza la tensión y corriente de línea para determinar la impedancia. $Z = V/I$, que es el valor de la impedancia hasta el punto de falla F1, el cual es Z_{AF1} . Por ende, el valor de la impedancia hasta el punto de falla F2 sería $(Z_{AB} + Z_{F2})$.

La detección de falla, lo hacen a través de sus características mho y/o cuadrilateral, se muestra en la figura A2.2.5.

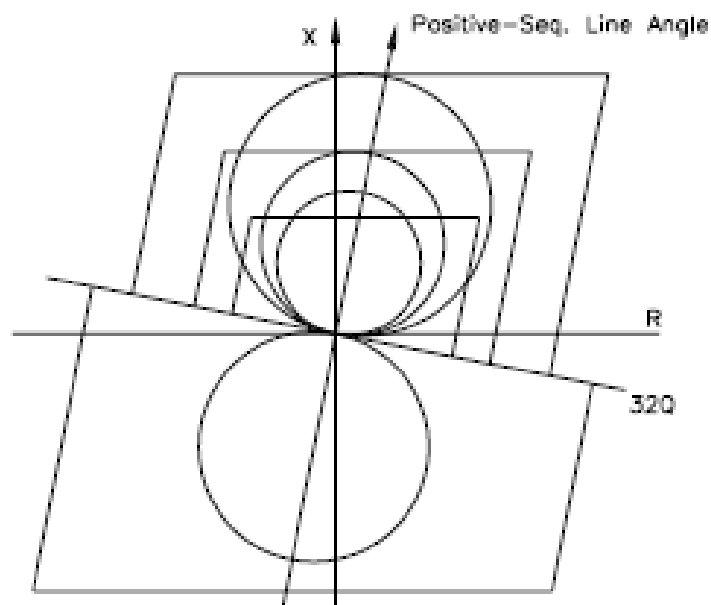
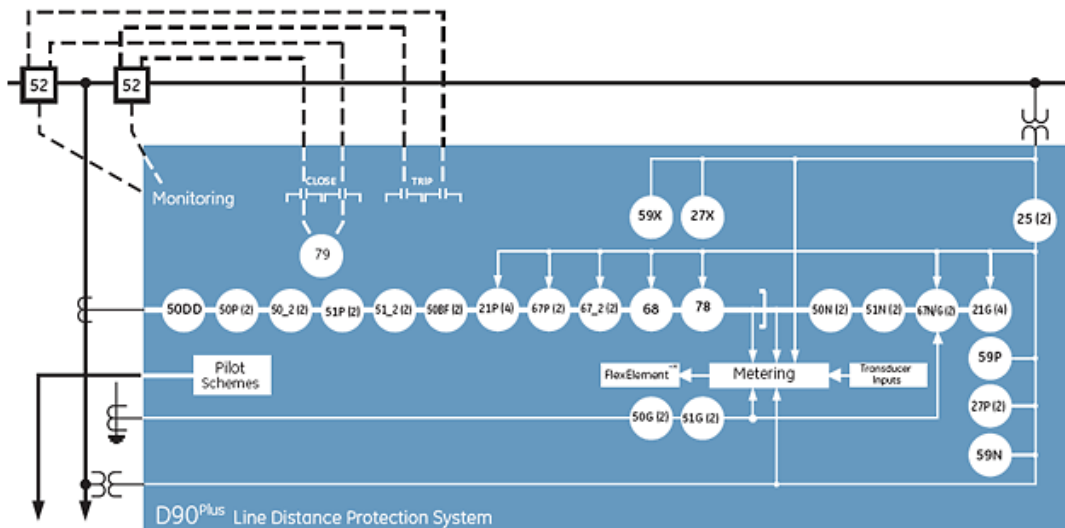


Figura A2.2.5. Característica mho y cuadrilateral del relé de distancia [33]

Las funciones que tienen generalmente los relés de distancia son las siguientes:



- | | | | |
|------|---|------|---|
| 21G | Ground Distance | 51_2 | Negative Sequence Time Overcurrent |
| 21P | Phase Distance | 52 | AC Circuit Breaker |
| 25 | Synchronism Check | 59N | Neutral Overvoltage |
| 27P | Phase Undervoltage | 59P | Phase Overvoltage |
| 27X | Auxiliary Undervoltage | 59X | Auxiliary Overvoltage |
| 50BF | Breaker Failure | 59_2 | Negative Sequence Overvoltage |
| 50DD | Current Disturbance Detector | 67N | Neutral Directional Overcurrent |
| 50G | Ground Instantaneous Overcurrent | 67P | Phase Directional Overcurrent |
| 50N | Neutral Instantaneous Overcurrent | 67_2 | Negative Sequence Directional Overcurrent |
| 50P | Phase Instantaneous Overcurrent | 68 | Power Swing Blocking |
| 50_2 | Negative Sequence Instantaneous Overcurrent | 78 | Out-of-Step Tripping |
| 51G | Ground Time Overcurrent | 79 | Automatic Recloser |
| 51N | Neutral Time Overcurrent | 81 | U/O Under and over frequency |
| 51P | Phase Time Overcurrent | | |

Figura A2.2.6. Relé de distancia y sus funciones de protección [34]

Relé diferencial de línea. Estos relés de protección comparan la corriente de fases de ambos extremos de la línea. Los relés de ambos extremos de la línea utilizan un medio de comunicación que generalmente es fibra óptica. Una ventaja de estos relés es que son inmunes a los disparos por oscilación de potencia y a la pérdida de potencial. La desventaja es que son dependientes del medio de comunicación, pero cuando se pierde el medio de comunicación, el relé emite una alarma.

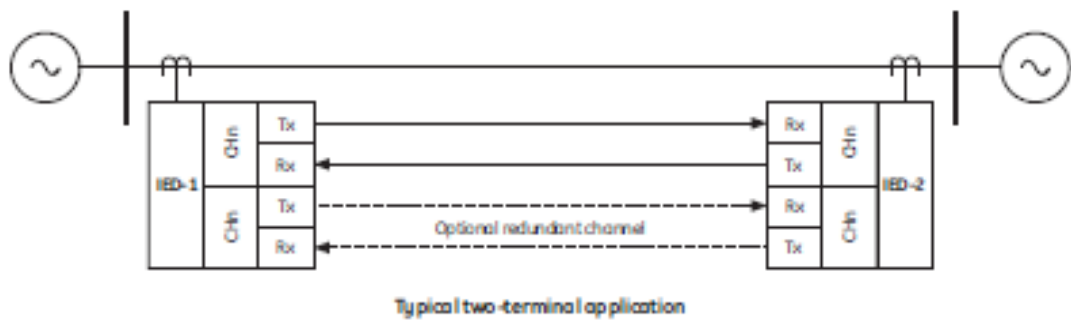
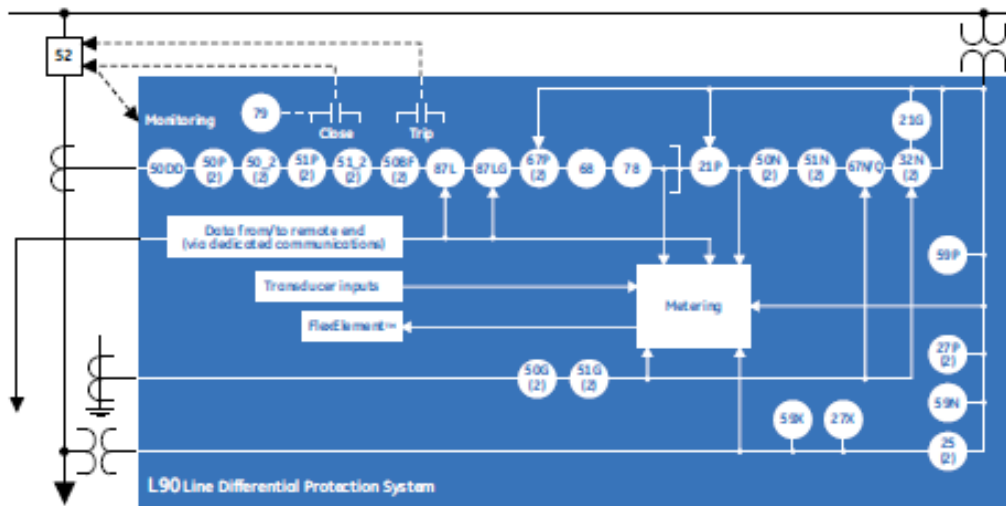


Figura A2.2.7. Relé diferencial en ambos extremos de una línea de transmisión [34]

Las funciones que tienen generalmente los relés diferenciales de línea son los siguientes:



DEVICE NUMBER	FUNCTION	DEVICE NUMBER	FUNCTION
21G	Ground distance	51_2	Negative-sequence time overcurrent
21P	Phase distance	52	AC circuit breaker
25	Synchrocheck	59N	Neutral overvoltage
27P	Phase undervoltage	59P	Phase overvoltage
27X	Auxiliary undervoltage	59X	Auxiliary overvoltage
32N	Wattmetric zero-sequence directional	67N	Neutral directional overcurrent
50BF	Breaker failure	67P	Phase directional overcurrent
50DD	Adaptive fault detector (sensitive current disturbance detector)	67_2	Negative-sequence directional overcurrent
50G	Ground instantaneous overcurrent	68	Power swing blocking
50N	Neutral instantaneous overcurrent	78	Out-of-step tripping
50P	Phase instantaneous overcurrent	79	Automatic recloser
50_2	Negative-sequence instantaneous overcurrent	81O	Overfrequency
51G	Ground time overcurrent	81ROCOF	Rate of change of frequency
51N	Neutral time overcurrent	81U	Underfrequency
51P	Phase time overcurrent	87L	Segregated line current differential
		87LG	Ground differential

Figura A2.2.8. Relé diferencial y sus funciones de protección [34]

ANEXO 3

DEFINICIONES

Disparo monofásico: apertura de la fase fallada durante una falla monofásica.

Autorecierre monofásico: recierre de la fase fallada después de un disparo monofásico.

Corriente de arco primario: corriente con arco en la falla fase a tierra antes al disparo monofásico.

Corriente de arco secundario (Is): corriente que fluye en el arco después de que el disparo monofásico es completado. (Is) es la suma de dos corrientes derivadas del acoplamiento electrostático (Isc) y electromagnético (Ism) de las dos fases energizadas y líneas adyacentes después de la corriente de arco primario es despejado via los interruptores de la línea. Si se mantiene el arco secundario, puede impedir un recierre exitoso.

Tensión de recuperación (Vr): tensión que aparece a través de la ruta del arco secundario tan pronto como este es extinguido.

Falla Cross Country: ocurrencia de fallas simultaneas en las mismas o diferentes fases en líneas de doble circuito.

Reactor neutro: reactor usado en combinación con el reactor shunt trifásico conectado a la línea para crear una alta impedancia contra el flujo de la corriente de arco secundario.