

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE CONTROL QUE INCIDEN EN LA APLICACIÓN DE MANIOBRAS EN PARALELO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA REGIÓN CAPITAL

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Marcano M., Immer E.
para optar al Título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE CONTROL QUE INCIDEN EN LA APLICACIÓN DE MANIOBRAS EN PARALELO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA REGIÓN CAPITAL

Prof. Guía: Ing. José Romero

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Marcano M., Immer E.
para optar al Título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2014

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 30 de julio de 2014

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Immer E., Marcano M.:

“DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE CONTROL QUE INCIDEN EN LA APLICACIÓN DE MANIOBRAS EN PARALELO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA REGIÓN CAPITAL”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Electrónica y Control, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Ebert Brea
Jurado


Prof. Dan El Montoya
Jurado


Prof. José Romero
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Ti que me has enseñado desde mi nacimiento para mi propio beneficio; quien me hace pisar en el camino por el que debo andar. Tú eres el que da la sabiduría; y porque Tú, cuyo magnífico nombre es JEHOVÁ, Tú solo eres digno de recibir la gloria y la honra, es por eso que, te dedico esta investigación, así como todas las demás cosas que realizo. También esta investigación está dedicada a mi gran maestro quien es tu fiel imagen, JESUS, el Cristo.

(Isaías 48:17, Proverbios 2:6, Salmos 83:18, Revelación 4:11, Colosenses 1:15)

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es el fruto del esfuerzo y el apoyo incondicional de muchas personas muy apreciadas por mi persona; pero es menester mencionar algunas en particular ya que me tendieron la mano cuando más lo necesité.

Por supuesto principalmente le doy las gracias al padre supremo JEHOVÁ, ya que Él es el que permite que sucedan todas las cosas y por supuesto a su hijo amado y mi gran maestro Jesús, el Cristo.

También muchísimas gracias a mi papá Immer Marcano, y mi mamá Iraima de Marcano, quienes siempre me han llevado de la mano y estoy seguro que nunca dejarán de hacerlo. A mi pareja Eva Pulido, quien se trasnochó incontables noches conmigo para llevar a buen término esta investigación; a mi tutor académico Ing. José Romero, a los ingenieros Adrián Castillo, Omar dueñas, Carlos Noriega, Wilmer Jaspe, Jonás González, Mario Izquier y Jesús Pérez.

Un agradecimiento especial a los operadores del Centro de Operaciones y Distribución de CORPOELEC Santa Rosa, ya que su apoyo y paciencia me fueron de gran ayuda. También un especial agradecimiento por su apoyo incondicional a los profesores: Vanessa Carlson, Leonardo García y Antonio Clemente.

También me es necesario mencionar a quienes me ayudaron indirectamente de alguna manera u otra, ellas son: Los profesores Pedro Pinto, Simón Morales, Ebert Brea, Carmen Pahmer, William La Cruz, Servando Álvarez, Rafael Rivero, Christian Murati, Mercedes Arocha, Juan Lavado, Freddy Pérez; Lic. Belkys Vásquez, Lino Selles, María Auxiliadora Rojas, Tania Zambrano; mis tíos Mirtha Muro y David Marcano; Sra. Frandina Gómez; y por último pero no menos importantes a mis amigos y compañeros: Sandy Rodríguez, Carlos Báez, Vicente López, Edgar Uzcátegui, Dennys González, Douglas Peña, Frenzell Muñiz, Rodolfo Román, Alberto Álvarez, Reinaldo Colina, Víctor Urbina, Juan Aponte, Juan Quintero, Daniel González, David Mendiola y Yader Yépez.

A Todos muchísimas gracias, y que JEHOVÁ los bendiga.

Marcano M., Immer E.

**DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE CONTROL QUE INCIDEN
EN LA APLICACIÓN DE MANIOBRAS EN PARALELO EN LA RED
DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA REGIÓN
CAPITAL**

**Profesor Guía: Ing. José Romero. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Electrónica.
Institución: CORPOELEC. 2014. 121 hojas + anexos.**

Palabras Claves: Maniobras de paralelos; Componentes Simétricas; Redes de Secuencia; Y_{barra} ; Z_{barra} ; Fallas Asimétricas de conductor abierto; Software *DIgSILENT Power Factory 14.1*.

Resumen. En el presente trabajo, se plantea la realización de un análisis de las tensiones y corrientes que se presentan en el sistema de distribución de energía eléctrica de la región capital, como consecuencia de la aplicación de las maniobras en paralelo cuando se presentan situaciones de contingencia o para la realización del mantenimiento del sistema. Se ha detectado durante las maniobras en paralelo sobrecorrientes por los neutros, lo cual activa las protecciones de los circuitos involucrados en el acople. Para determinar las causas se realizó un modelo circuital genérico que representa el sistema de distribución y mediante un análisis teórico de fallas asimétricas de conductor abierto, se determinaron los voltajes de barra y las corrientes de las líneas de transmisión. Adicionalmente se realizaron diversas simulaciones que contemplan la apertura y cierre de seccionadores, como fallas asimétricas de conductor abierto, durante la aplicación de las maniobras en paralelo utilizando el software *DIgSILENT Power Factory 14.1*. Los resultados obtenidos con esta investigación permitirán una mejora en la aplicación de las maniobras en paralelo ya que indica las precauciones que se deben tomar para evitar las sobrecorrientes por los neutros y así evitar la activación de las protecciones.

ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ABREVIATURAS	xvi
ACRÓNIMOS	xvii
INTRODUCCIÓN	18
CAPÍTULO I	21
1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS	21
1.1- Planteamiento del problema.....	21
1.2- Formulación del problema	23
1.3- Objetivo General	24
1.4- Objetivos Específicos.....	24
1.5- Justificación	25
CAPÍTULO II	26
2. MARCO TEORICO	26
2.1- Maniobras de paralelos	26
2.2- Matriz de admitancias de barra (Y_{barra})	27
2.3- Matriz de impedancias de barra (Z_{barra})	28
2.4- Componentes simétricas	29
2.5- Redes de secuencia.....	33
2.6- Fallas Asimétricas	37
2.6.1- Fallas de conductor abierto.....	37
2.6.1.1- Un conductor abierto	44
2.6.1.2- Dos conductores abiertos.....	46
2.7- Ambiente SCADA	48

2.7.1-	Funciones Principales de un Sistema SCADA	49
2.7.2-	Elementos del Sistema SCADA	50
2.8-	Especificaciones técnicas generales del sistema SCADA CORPOELEC-EDC:	53
2.8.1-	Hardware de la red SCADA	53
2.8.1.1-	Nodos (computadoras) principales	53
2.8.1.2-	Nodos (computadoras) secundarios	54
2.8.2-	Software de la red SCADA.....	54
2.8.3-	Adquisición de la data	54
2.8.3.1-	Adquisición de la data (supervisión)	55
2.8.3.2-	Control (obtención de la información de campo)	56
2.8.4-	Interfaz Gráfica.....	57
2.9-	Niveles en media tensión de la red de distribución de energía eléctrica de la región capital.....	61
2.10-	Tipos de Software de Simulación	62
2.11-	<i>DIgSILENT Power Factory</i>	62
2.11.1-	Funciones Principales	62
2.11.2-	Métodos de Cálculo que ofrece el <i>DIgSILENT Power Factory</i>	63
2.11.3-	Tipos de Fallas que simula el <i>DIgSILENT Power Factory</i>	64
2.11.4-	Espacio de trabajo.....	66
CAPÍTULO III		67
3.-	MARCO METODOLÓGICO	67
3.1-	Tipo de investigación.....	67
3.2-	Método de investigación.....	68
3.3-	Fases de la investigación	69
3.3.1-	Fase 1. Familiarización con el sistema SCADA y la aplicación de las maniobras de paralelos.....	69
3.3.2-	Fase 2. Casos de circuitos radiales que se presentan en la aplicación de maniobras en paralelo y modelo bajo estudio.	70
3.3.2.1-	Casos que se presentan en la aplicación de maniobras en paralelo.	70
3.3.2.2-	Modelo circuital bajo estudio.	71
3.3.3-	Fase 3. Análisis del estado estacionario y transitorio.	73

3.3.3.1- Análisis del estado estacionario.....	73
3.3.3.2- Análisis del estado transitorio.....	76
3.3.4- Fase 4. Validación de las variables eléctricas con el software computacional DIgSILENT Power Factory 14.1.	79
CAPÍTULO IV	80
4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	80
4.1- Resultados del estado estable.....	80
4.2- Análisis de resultados del estado transitorio.....	90
4.3- Simulaciones con el software DIgSILENT Power Factory 14.1	95
4.3.1- Validación de los parámetros voltaje y corriente por simulaciones.	95
CONCLUSIONES	114
RECOMENDACIONES	116
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
BIBLIOGRAFÍA	118
GLOSARIO	120
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama circuital para la obtención de Y_{barra} .	27
Figura 2. Componentes de secuencia para voltajes.	30
Figura 3. Suma de componentes simétricas para obtener el sistema desbalanceado.	31
Figura 4. Trayectorias de corriente de secuencia positiva para un generador.	34
Figura 5. Red de secuencia positiva para un generador.	34
Figura 6. Trayectorias de corriente de secuencia negativa para un generador.	34
Figura 7. Red de secuencia negativa para un generador.	35
Figura 8. Trayectorias de corriente de secuencia cero para un generador.	35
Figura 9. Red de secuencia cero para un generador.	35
Figura 10. Diagrama unifilar de un transformador Δ -Y aterrizado con impedancia de dispersión Z .	36
Figura 11. Red de secuencia positiva de un transformador Δ -Y.	36
Figura 12. Red de secuencia cero de un transformador Δ -Y.	36
Figura 13. Sección de línea trifásica con la fase A abierta.	38
Figura 14. Sección de línea trifásica con las fases B y C abiertas.	38
Figura 15. Equivalente de Thévenin de secuencia positiva entre las barras “m-n”.	39
Figura 16. Equivalente de Thévenin de secuencia positiva entre las barras “m-n” con fuente de corriente equivalente.	39
Figura 17. Equivalente de Thévenin de secuencia positiva para la simulación de la apertura de la línea “m-n”.	40
Figura 18. Equivalente de Thévenin de secuencia negativa para la simulación de la apertura de la línea “m-n”.	40
Figura 19. Equivalente de Thévenin de secuencia cero para la simulación de la apertura de la línea “m-n”.	41
Figura 20. Red equivalente de Thévenin de secuencia positiva vista desde p-p’.	43
Figura 21. Red equivalente de Thévenin de secuencia negativa vista desde p-p’.	44
Figura 22. Red equivalente de Thévenin de secuencia cero vista desde p-p’.	44
Figura 23. Conexión paralelo de las redes de secuencia del sistema para simular la apertura de la fase A entre los puntos p-p’.	45
Figura 24. Conexión serie de las redes de secuencia del sistema para simular la apertura de las fases B y C entre los puntos p-p’.	47
Figura 25. Elementos básicos de un sistema SCADA.	52
Figura 26. Obtención de información remota del sistema SCADA.	53
Figura 27. Adquisición de la data del sistema SCADA.	55
Figura 28. Adquisición de la data del sistema SCADA (supervisión).	56
Figura 29. Control del sistema SCADA.	56
Figura 30. Aplicación de maniobra de paralelo (tramo de línea visible).	58

Figura 31. Aplicación de maniobra de paralelo (tramo de línea no visible).	59
Figura 32. Diagrama unifilar de la subestación Altamira A2.	60
Figura 33. Diagrama unifilar de la subestación Altamira A2.	61
Figura 34. Normas que considera el software <i>Power Factory</i> en los cálculos.	64
Figura 35. Tipos de Fallas que calcula el <i>Power Factory</i> .	65
Figura 36. Establecimiento de los eventos de conmutación en el <i>Power Factory</i> .	65
Figura 37. Espacio de trabajo del <i>Power Factory</i> .	66
Figura 38. Evolución de la investigación en diagrama de bloques.	69
Figura 39. Alimentadores asociados a una misma barra.	70
Figura 40. Alimentadores asociados a barras distintas.	71
Figura 41. Alimentadores asociados a subestaciones distintas.	71
Figura 42. Modelo circuital genérico del sistema bajo estudio.	72
Figura 43. Red de secuencia positiva del modelo circuital genérico.	74
Figura 44. Acople donador-receptor usando las barras B6 y B10.	75
Figura 45. Apertura entre las barras B5-B6 del circuito donador.	75
Figura 46. Red de secuencia negativa del modelo circuital genérico.	76
Figura 47. Red de secuencia cero del modelo circuital genérico.	76
Figura 48. Cierre de una fase en el acople donador-receptor.	77
Figura 49. Cierre de dos fases en el acople donador-receptor.	77
Figura 50. Cierre de las tres fases en el acople donador-receptor.	78
Figura 51. Red de distribución bajo estudio con el <i>Power Factory</i> .	79
Figura 52. Acople donador-receptor con las barras B8-B3.	81
Figura 53. Acople donador-receptor con las barras B8-B4.	82
Figura 54. Acople donador-receptor con las barras B8-B5.	82
Figura 55. Acople donador-receptor con las barras B8-B6.	82
Figura 56. Acople donador-receptor con las barras B10-B3.	83
Figura 57. Acople donador-receptor con las barras B10-B4.	84
Figura 58. Acople donador-receptor con las barras B10-B5.	84
Figura 59. Acople donador-receptor con las barras B10-B6.	84
Figura 60. Corriente de neutro (T1). Cierre de una fase (acople B8-B6).	96
Figura 61. Corriente de neutro (T2). Cierre de una fase (acople B8-B6).	96
Figura 62. Corriente de neutro (T1). Cierre de dos fases (acople B8-B6).	98
Figura 63. Corriente de neutro (T2). Cierre de dos fases (acople B8-B6).	98
Figura 64. Corriente de neutro de T1. Cierre consecutivo de las tres fases (acople B8-B6).	100
Figura 65. Corriente de neutro de T2. Cierre consecutivo de las tres fases (acople B8-B6).	100
Figura 66. Corriente de neutro (T1). Apertura de una fase (B2-B3).	101
Figura 67. Corriente de neutro (T2). Apertura de una fase (B2-B3).	101
Figura 68. Corriente de neutro (T1). Apertura de dos fases (B2-B3).	103

Figura 69. Corriente de neutro (T1). Apertura de dos fases (B2-B3).	103
Figura 70. Corriente de neutro (T1). Cierre de una fase (B2-B3).	105
Figura 71. Corriente de neutro (T2). Cierre de una fase (B2-B3).	105
Figura 72. Corriente de neutro (T1). Cierre de dos fases (B2-B3).	107
Figura 73. Corriente de neutro (T2). Cierre de una fase (B2-B3).	107
Figura 74. Corriente de neutro de T1. Apertura de una fase (B8-B6).	109
Figura 75. Corriente de neutro de T2. Apertura de una fase (B8-B6).	109
Figura 76. Corriente de neutro de T1. Apertura de dos fases (B8-B6).	110
Figura 77. Corriente de neutro de T2. Apertura de dos fases (B8-B6).	111
Figura 78. Corrientes de las tres fases en el troncal del circuito donador. Acople con B8-B3 y conexión de una fase entre B2-B3.	112
Figura 79. Corrientes de las tres fases en el troncal del circuito receptor. Acople con B8-B3 y conexión de dos fases entre B2-B3.	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inyecciones de corrientes de las tres secuencias a las barras genéricas “m” y “n” respectivamente.	41
Tabla 2. Corrientes que circulan por una sola fase en el acople donador-receptor....	80
Tabla 3. Corrientes que circulan por las fases B y C en el acople donador-receptor.	81
Tabla 4. Corrientes estables entre barras (usando B8 y B10).	83
Tabla 5. Corrientes en los troncales. Usando B8 y B10 en el acople donador-receptor.	85
Tabla 6. Voltajes y Corrientes estables de apertura (usando la B8 y B10).	86
Tabla 7. Corrientes circulantes por una fase. Cierre en el circuito donador.	87
Tabla 8. Corrientes por las fases B y C. Cierre en el circuito donador.	88
Tabla 9. Diferencia de voltaje entre B1-B6 y B1-B10. (usando B8 y B10 en el acople donador-receptor respectivamente).	89
Tabla 10. Diferencia de voltaje entre B1-B6 y B1-B10. (usando B8 y B10 en el acople donador-receptor y abriendo entre B2-B3 y B3-B4 respectivamente).	90
Tabla 11. Corriente circulante por los neutros (cierre de una fase en el acople donador-receptor).	91
Tabla 12. Corriente circulante por los neutros de T1 y T2 (cierre de dos fases en el acople donador-receptor).	92
Tabla 13. Corriente circulante por los neutros de T1 y T2 (apertura de una fase)....	94
Tabla 14. Corriente circulante por los neutros de T1 y T2 (apertura de dos fases). ..	95
Tabla 15. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores en el acople donador-receptor (una fase).	97
Tabla 16. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores en el acople donador-receptor (dos fases).	99
Tabla 17. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores (apertura de una fase en el circuito donador).	102
Tabla 18. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores (apertura de dos fases en el circuito donador).	104
Tabla 19. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores (cierre de una fase en el circuito donador).	106
Tabla 20. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores (cierre de dos fases en el circuito donador).	108
Tabla 21. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores en el desacople donador-receptor (una fase).....	110
Tabla 22. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores en el desacople donador-receptor (dos fases).	111

SIGLAS

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
ANSI	<i>American National Standard Institute</i>
APP	<i>Application</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CADAFE	Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico
CALEY	Compañía Anónima Luz eléctrica del Yaracuy
CALIFE	Compañía Anónima Luz y Fuerzas Eléctricas
COD	Centro de operaciones de distribución
SENECA	Sistema Eléctrico Del Estado Nueva Esparta
CORPOELEC-EDC	Corporación Eléctrica Nacional-Electricidad de Caracas
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
EDC	Electricidad de Caracas
GUI	<i>Graphical user interface</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
pH	Potencial Hidrógeno
PSCAD	<i>Power System Computer-Aided Design</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
VDE	<i>Verband Deutscher Elektrotechniker</i>

ABREVIATURAS

A	Ampere
Ec.	Ecuación
etc.	Etcétera
Fig.	Figura
kA	Kiloamperes
km	Kilómetros
Ind.	Inductivo
kV	Kilovoltio
kVA	Kilovoltio-Ampere
kW	Kilovatios
ms	Milisegundos
MVA	Mega voltio-Ampere
MW	Megavatios
P.	Página
Pu	Por Unidad
SYS	System
V	Voltio, Voltaje
vol.	Volumen

ACRÓNIMOS

DIgSILENT	DIGital SIMuLation and Electrical NeTwork
DNP3.0	Distributed Network Protocol, versión 3
EDELCA	Electrificación del Caroní
ELEBOL	Electricidad de Ciudad Bolívar
ELEGUA	Electricidad de Guarenas- Guatire
ELEVAL	Electricidad de Valencia
ENAGEN	Empresa Nacional de Generación
ENELBAR	Energía Eléctrica de Barquisimeto
ENELCO	Energía Eléctrica de la Costa Oriental
ENELVEN	Energía Eléctrica de Venezuela
GENEVAPCA	Generación de Vapor Compañía Anónima
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>

INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de resolver la crisis del sector eléctrico en Venezuela se crea el 31 de julio del 2007, la Corporación Nacional Eléctrica (CORPOELEC) [1] como una empresa operadora estatal encargada de la realización de las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica.

La misión de la corporación es desarrollar, proporcionar y garantizar un servicio eléctrico de calidad, eficiente, confiable y sostenible en todo el territorio nacional, a través de la utilización de tecnología de vanguardia en la ejecución de los procesos de generación, transmisión y distribución en el sistema eléctrico nacional; pero para que esto sea posible al ciento por ciento es necesario mejorar la operación del sistema de distribución de energía eléctrica.

El sistema de distribución de energía eléctrica, en particular el de la región capital, posee interruptores, seccionadores y seccionalizadores monofásicos que se pueden cerrar o abrir con el propósito de acoplar o desacoplar respectivamente una carga de un circuito denominado donador hacía otro denominado receptor.

Siempre se presentan eventos que interrumpen el normal funcionamiento del sistema de distribución de energía eléctrica de la región capital; esto es debido a fallas que ocurren por condiciones atmosféricas o naturales, o simplemente se interrumpe el funcionamiento de manera intencional con el fin de realizar labores de mantenimiento al sistema. Cualquiera que sea la causa es indispensable realizar las maniobras en paralelo con el objetivo de no dejar ninguna carga del sistema sin energía eléctrica; básicamente dichas maniobras consisten en realizar el acople donador-receptor mencionado anteriormente con el fin de prestar un servicio de energía eléctrica eficiente.

Al momento de realizar el acople donador-receptor entre determinados circuitos del sistema de distribución se presenta algunas veces sobrecorrientes en el neutro del circuito donador o el neutro del circuito receptor, fenómeno que es indeseable y que perturba el servicio eléctrico para las demás cargas que se encuentran conectadas a dicho sistema.

Esta investigación denominada “Definición de las variables de control que inciden en la aplicación de maniobras en paralelo en la red de distribución de energía eléctrica de la región capital”, está dirigida especialmente al estudio y análisis de las variables de corriente y voltaje que aparecen como consecuencia de aplicar las maniobras en paralelo entre determinados circuitos pertenecientes a la red de distribución de la región capital, con el fin de abrir una ventana que pueda facilitar una solución para poder aplicar dichas maniobras con un 100% de éxito en todos los casos de aplicación.

El estudio está conformado por cuatro capítulos, a saber: Capítulo I; donde se plantea la problemática a investigar; se presenta también los objetivos tanto el general como los específicos y la justificación del trabajo a realizar.

En el Capítulo II se presenta las bases teóricas que sustentan la investigación en cuanto a: (a) Matriz de Admitancias, (b) Matriz de Impedancias, (c) Componentes Simétricas, (d) Redes de Secuencia, (e) Fallas Asimétricas (de conductor abierto) y también se describen las características del hardware y el software del sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) que es la herramienta utilizada por los operadores de mesa en el COD para realizar las maniobras en paralelo, y por último se mencionan las características básicas del software *DIGSILENT Power Factory 14.1*.

En el Capítulo III se define el tipo de la presente investigación, se mencionan las fases de evolución de la misma, se presenta el modelo circuital genérico utilizado para realizar el estudio del estado estable y se presenta un modelo simulado con el software computacional *DIgSILENT Power Factory 14.1* para considerar el comportamiento transitorio al momento de aplicar las maniobras en paralelo en el sistema de distribución, se presenta el procedimiento llevado a cabo para realizar los estudios antes mencionados del sistema de distribución de energía eléctrica de la región capital y se muestran los resultados obtenidos, y finalmente se menciona el procedimiento seguido para validar las variables de tensión y corriente en la aplicación de las maniobras en paralelo con la ayuda del software computacional *DIgSILENT Power Factory 14.1*.

En el Capítulo IV se presentan y analizan todos los resultados obtenidos en el estudio tanto del estado estable como el transitorio; se muestran las conexiones realizadas con las tres redes de secuencia en el caso del estado transitorio para analizar las fallas asimétricas de conductor abierto, ya que así se modela la apertura y cierre entre los seccionadores monofásicos para realizar el acople o desacople donador-receptor, y se muestran las gráficas obtenidas con el software computacional *DIgSILENT Power Factory* para la validación de las variables de voltaje y corriente.

Finalmente se presentan las conclusiones como producto de los argumentos expresados en los análisis de resultados y se dan algunas recomendaciones que pueden ser de gran utilidad para los operadores de mesa del Centro de Operaciones de Distribución de la región capital.

CAPÍTULO I

1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

1.1- Planteamiento del problema

Venezuela, en lo concerniente a la energía eléctrica, posee una capacidad total instalada de 21215 MW, de los cuales el 65% (13865 MW) son hidroeléctricos y 35% (7350 MW) son térmicos. La represa del Guri está ubicada en el río Caroní y cuenta con dos casas de máquinas; cada casa tiene 10 unidades generadoras. La primera casa de máquinas (culminada en 1978) tiene una capacidad total de 2065 MW, y la segunda casa (culminada en 1986) tiene una capacidad total de 9000 MW de potencia. El Guri provee la mayor cantidad de energía eléctrica que se consume en el país, y está encargada de cubrir la zona central y costera- central de Venezuela, que es la que cuenta con una mayor proporción demográfica.

Esta central hidroeléctrica aprovecha la energía potencial gravitatoria que posee la masa de agua del río Caroní haciendo girar turbinas hidráulicas que transmiten la energía a un grupo de generadores donde se transforma en energía eléctrica; el nivel de tensión de la energía es elevado por transformadores con el fin de evitar pérdidas de potencia en las líneas de transmisión que son las que se encargan de llevar dicha energía largas distancias, hasta las subestaciones de distribución, en donde finalmente la energía vuelve a pasar por transformadores pero esta vez con el objetivo de reducir los niveles de tensión para que se pueda distribuir a los consumidores.

La red de transmisión de energía eléctrica de la región capital está básicamente constituida por dos anillos en donde se encuentran las líneas de

conductores que transmiten la energía eléctrica a niveles de tensiones de 69 KV y 230 KV, y cuenta con más de 100 subestaciones en donde se bajan estos niveles de tensión para que la energía se pueda distribuir a los centros de consumo como se mencionó anteriormente. En estas subestaciones de distribución se encuentran los circuitos alimentadores que se encargan de suplir de energía a las respectivas áreas servidas de la gran Caracas.

CORPOELEC, Adscripta al Ministerio del Poder Popular de Energía Eléctrica, es una institución que nace con la visión de reorganizar y unificar el sector eléctrico venezolano a fin de garantizar la prestación de un servicio eléctrico confiable. Está conformada por: CADAFE, ENELBAR, ENELVEN, CALIFE, EDC, EDELCA, GENEVAPCA, ENELCO, SENECA, ELEBOL, TURBOVEN, ELEVALL, ENAGEN Y CALEY.

CORPOELEC se crea mediante decreto presidencial Nro. 5330, en Julio del 2007; en el artículo 2 del documento se define a CORPOELEC como una empresa operadora estatal encargada en la realización de las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica. La Electricidad de Caracas (EDC) como parte de CORPOELEC, tiene como objetivo (entre otros) redistribuir las cargas en el sistema de distribución de energía eléctrica de la gran Caracas con la finalidad de ofrecer un servicio de calidad y confiable.

En el sistema de distribución de energía eléctrica de la EDC se encuentran conectadas cargas trifásicas y monofásicas a dos hilos; los circuitos alimentadores y sus respectivas áreas servidas tienen la posibilidad de interconectarse entre ellos, con la finalidad de que cuando cierta área servida se vea desprovista de energía por su respectivo circuito principal de alimentación, otro circuito pueda alimentar esa carga y se mantenga el servicio eléctrico de manera continua y no se vean perjudicados los usuarios.

A lo largo y ancho de la red del sistema de distribución de energía eléctrica, se encuentran interruptores o equipos de seccionamiento, que realizan dos funciones: la primera función es la de aislar un cierto tramo del circuito en caso de cualquier falla o trabajo sin tensión y se pueda realizar la respectiva reparación de la avería, o que simplemente se necesite desenergizar para realizar labores de mantenimiento; y su segunda función es la de restituir la energía en el caso de que la falla haya sido reparada o se hayan terminado de realizar las labores de mantenimiento, según sea el caso; entre las acciones de apertura y cierre de los interruptores, como se mencionó anteriormente, entran en juego las llamadas maniobras en paralelo.

Cuando se abre cualquiera de los interruptores o seccionadores monofásicos pertenecientes a las respectivas fases en el sistema de distribución para aislar una cierta carga o área servida, ocurre una redistribución de la energía eléctrica que afecta a las otras cargas conectadas a otras fases en el sistema, fenómeno que es indeseable ya que produce un desbalance en cada una de las tres fases de las líneas del sistema de distribución de energía eléctrica, trayendo como consecuencia altas corrientes por los neutros de los transformadores asociados a las subestaciones y a su vez la activación de las protecciones en dichos neutros.

1.2- Formulación del problema

En base a lo anteriormente planteado y con el fin de obtener toda la información posible para poder determinar las variables de voltaje y corriente que aparecen como consecuencia del fenómeno antes mencionado, se hacen las siguientes preguntas: ¿Cuáles son las condiciones en las que se pueden aplicar las maniobras en paralelo?, ¿Cuáles son los efectos que se derivan como consecuencia de aplicar las maniobras en paralelo?, ¿Qué variables intervienen al aplicar las maniobras en paralelo?, ¿Existen corrientes altas y/o en desequilibrio entre fases que influyan

directamente en la aparición del fenómeno señalado?, ¿Influye cómo se encuentra distribuida la carga en cada una de las fases del sistema de distribución de energía eléctrica en las variables a determinar?.”

1.3- Objetivo General

Definir las variables de control que inciden en la aplicación de maniobras en paralelo en la red de distribución de energía eléctrica de la región capital.

1.4- Objetivos Específicos

1.4-1. Plantear un modelo que reproduzca los fenómenos de las corrientes transitorias al aplicar las maniobras en paralelo.

1.4-2. Establecer las condiciones en las que se pueden aplicar las maniobras en paralelo.

1.4-3. Analizar los efectos que se derivan al aplicar las maniobras en paralelo.

1.4-4. Determinar si existen corrientes altas y/o en desequilibrio entre fases que puedan producir la activación de las protecciones.

1.4-5. Diagnosticar si existe alguna falla en el funcionamiento de los sistemas de protección de corrientes.

1.4-6. Diagnosticar si existe un exceso de carga con respecto a la carga nominal que pueden soportar los interruptores que se encuentran en las fases de la red de distribución de energía eléctrica.

1.4-7. Validar las variables que intervienen al aplicar las maniobras en paralelo mediante una simulación realizada con el software *Power Factory*.

1.5- Justificación

El Centro de Operaciones y Distribución (COD – Santa Rosa) cuenta con los recursos necesarios para la realización de esta investigación; la meta principal siempre ha sido la de prestar en lo posible el mejor servicio eléctrico a todos los usuarios, y con la detección de las variables que aparecen en el fenómeno antes mencionado, se abren las puertas que facilitarían la solución del presente problema, lográndose así un ahorro de tiempo y dinero para la compañía, ya que se reducirían costos en las reparaciones de averías causadas por dicho evento, obteniéndose una optimización de la operación del sistema de distribución de energía eléctrica de la región capital, lo que se traduce en una mejora en la prestación del servicio eléctrico para todos los usuarios, ya que se les otorga una mejor calidad de vida y como consecuencia se logra una mejora social para toda la nación.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO

A continuación se presenta el marco teórico, que según Tito González [2], en su libro Orientaciones metodológicas para la elaboración de trabajos científicos y proyectos, el mismo, constituye un elemento de fundamental importancia por cuanto en él se registran los hallazgos, discusiones y experiencias anteriores sobre el tema que se estudia. En otras palabras, es el deber ser de la investigación.

En este capítulo se presentan todas las bases teóricas que sustentan la investigación en cuanto a: (a) Maniobras en paralelo, (b) Matriz de Admitancias, (c) Matriz de Impedancias, (d) Componentes Simétricas, (e) Redes de Secuencia, (f) Fallas Asimétricas (de conductor abierto), (g) se describen las características del hardware y el software del SCADA (herramienta utilizada por los operadores de mesa en el COD para realizar las maniobras en paralelo), y (h) se menciona las características básicas del software *DIgSILENT Power Factory 14.1*.

2.1- Maniobras de paralelos

Las maniobras de paralelos consisten en conectar y desconectar a dos circuitos de distribución pertenecientes o no a una misma subestación en puntos geográficos y eléctricamente distintos por un tiempo relativamente corto, con la finalidad de descargar a uno de los dos circuitos involucrados, ya sea por razones de contingencia o por razones de mantenimiento, sin que haya interrupciones del servicio eléctrico para los usuarios.

2.2- Matriz de admitancias de barra (Y_{barra})

Es una matriz de admitancias de nodo que da el comportamiento del estado estable de todas las componentes que actúan juntas para formar el sistema y se basa en el análisis nodal de las ecuaciones de la red.

La matriz de admitancias de nodo de un sistema típico de potencia generalmente es grande y esparcida pero puede obtenerse en una forma sistemática de construcción de bloques. Por ejemplo, en la Fig. 1 se muestra un pequeño sistema de potencia del cual se obtiene la Y_{barra} como se muestra en la Ec. (1).

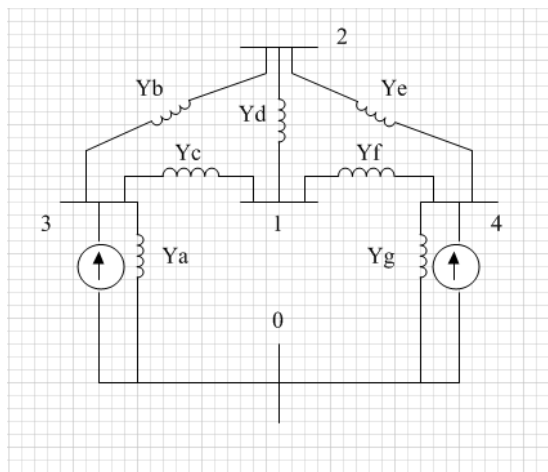


Figura 1. Diagrama circuitual para la obtención de Y_{barra} .

$$\begin{matrix}
 & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\
 \textcircled{1} & (Yc + Yd + Yf) & -Yd & -Yc & -Yf \\
 \textcircled{2} & -Yd & (Yb + Yd + Yc) & -Yb & -Yc \\
 \textcircled{3} & -Yc & -Yb & (Ya + Yb + Yc) & 0 \\
 \textcircled{4} & -Yf & -Yc & 0 & (Yc + Yf + Yg)
 \end{matrix} \quad (1)$$

Las admitancias de la diagonal de la Ec. (1) se llaman admitancias propias de los nodos, y las que están fuera de la diagonal son las admitancias mutuas de los nodos. Las admitancias propias y mutuas de los nodos, también son conocidas como admitancias del punto de operación y de transferencia de los nodos, respectivamente.

2.3- Matriz de impedancias de barra (Z_{barra})

Esta matriz brinda información importante relacionada con la red de un determinado sistema de potencia y puede ser usada para obtener ventaja en los cálculos de redes, en especial para los cálculos de fallas. La información de la matriz de impedancias de barra es, por mucho, mayor al de Y_{barra} ; igualmente el trabajo vinculado en la construcción de Z_{barra} es mucho mayor que el requerido para construir Y_{barra} . Como es mucho más fácil hallar Y_{barra} , es recomendable hallar primero esta última y luego se invierte la matriz para obtener Z_{barra} , sabiendo de la Ec. (2) que:

$$\mathbf{Z}_{\text{barra}} = \mathbf{Y}_{\text{barra}}^{-1} \quad (2)$$

Por ejemplo para un sistema de tres nodos, se haya primero la matriz de Y_{barra} y luego dicha matriz se invierte, obteniéndose la Ec. (3):

$$\mathbf{Z}_{\text{barra}} = \begin{matrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} \\ \textcircled{1} & \left[\begin{array}{ccc} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{array} \right] & & \\ \textcircled{2} & & & \\ \textcircled{3} & & & \end{matrix} \quad (3)$$

En la Ec. (3) los elementos de impedancia en la matriz Z_{barra} que están en la diagonal principal se conocen como impedancias de punto de operación de las barras (o impedancias de Thévenin), y a los elementos fuera de la diagonal se les llama impedancias de transferencia de las barras.

2.4- Componentes simétricas

Una de las herramientas más poderosas para tratar con circuitos polifásicos desbalanceados es el método de las componentes simétricas desarrollado por Fortescue. El trabajo de Fortescue [3] prueba que un sistema desbalanceado de “n” fasores relacionados, se puede resolver con “n” sistemas de fasores balanceados llamados componentes simétricas de los fasores originales. Los “n” fasores de cada conjunto de componentes son iguales en longitud, y los ángulos entre fasores adyacentes de un conjunto son iguales. Aunque el método se aplica a cualquier sistema polifásico desbalanceado, el estudio se limita a los sistemas trifásicos de distribución.

En un sistema trifásico que está normalmente balanceado, las condiciones desbalanceadas de una falla ocasionan, por lo general, que haya corrientes y voltajes desbalanceados en cada una de las tres fases. Si las corrientes y voltajes están relacionados por impedancias constantes, se dice que el sistema es lineal y se puede aplicar el principio de superposición. La respuesta en voltaje del sistema lineal a las corrientes desbalanceadas se puede determinar al considerar las respuestas separadas de los elementos individuales a las componentes simétricas de las corrientes. Los elementos de interés del sistema son las máquinas, transformadores, líneas de transmisión y cargas conectadas a configuraciones Δ o Y.

De acuerdo con el teorema de Fortescue, tres fasores desbalanceados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas balanceados de fasores. Los conjuntos balanceados de componentes son:

1- **Componentes de secuencia positiva**, que consisten en tres fasores de igual magnitud desplazados uno de otro por una fase de 120° y que tienen la misma secuencia de fase que los fasores originales,

- 2- **Componentes de secuencia negativa**, que consisten en tres fasores iguales en magnitud desplazados en fase uno de otro en 120° , y que tienen una secuencia de fases opuesta a la de los fasores originales y
- 3- **Componentes de secuencia cero**, que consisten en tres fasores iguales en magnitud y con un desplazamiento de fase cero uno de otro.

Los tres conjuntos de componentes simétricas se designan por el superíndice adicional 1 para las componentes de secuencia positiva, el superíndice 2 para las de secuencia negativa y 0 para las componentes de secuencia cero. En la Fig. 2 se muestran estos tres conjuntos de componentes simétricas. Los fasores que representen las corrientes se designarán con una I con superíndices como los de los voltajes.

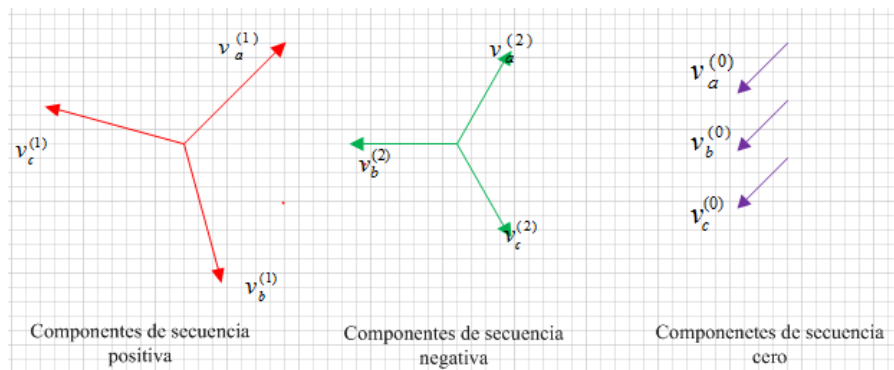


Figura 2. Componentes de secuencia para voltajes.

Como cada uno de los fasores desbalanceados originales es la suma de sus componentes, los fasores originales expresados en términos de sus componentes son:

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (4a)$$

$$V_b = V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \quad (4b)$$

$$V_c = V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)} \quad (4c)$$

La síntesis de un conjunto de tres fasores desbalanceados, a partir de los tres conjuntos de componentes simétricas de la Fig. 2 se muestra en la Fig. 3.

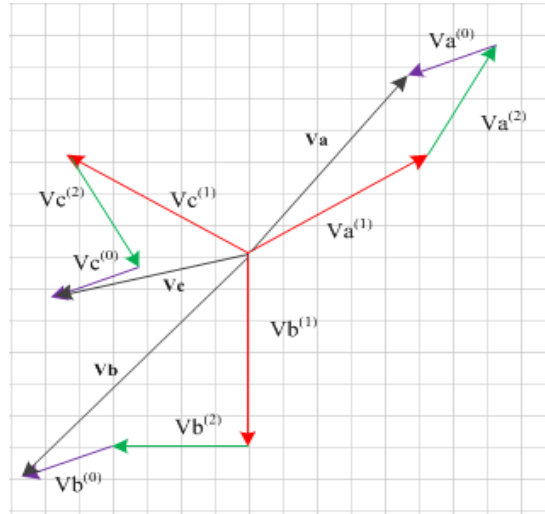


Figura 3. Suma de componentes simétricas para obtener el sistema desbalanceado.

De la Fig. 2 se obtienen las ecuaciones (5a), (5b) y (5c):

$$V_b^{(0)} = V_a^{(0)} \quad V_c^{(0)} = V_a^{(0)} \quad (5a)$$

$$V_b^{(1)} = a^2 V_a^{(1)} \quad V_c^{(1)} = a V_a^{(1)} \quad (5b)$$

$$V_b^{(2)} = a V_a^{(2)} \quad V_c^{(2)} = a^2 V_a^{(2)}$$

(5c)

En donde $a = 1 \angle 120^\circ$. Sustituyendo las ecuaciones (5a), (5b) y (5c) en las ecuaciones (4a), (4b) y (4c) respectivamente, se tiene que:

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (6a)$$

$$V_b = V_a^{(0)} + a^2 V_a^{(1)} + a V_a^{(2)} \quad (6b)$$

$$V_c = V_a^{(0)} + a V_a^{(1)} + a^2 V_a^{(2)} \quad (6c)$$

Las ecuaciones (6a), (6b) y (6c) se puede representar en forma matricial de la manera siguiente:

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

donde se tiene que:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

y que:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \quad (9)$$

Premultiplicando ambos lados de la Ec. (7) por la Ec. (9) se llega a:

$$\begin{pmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (10)$$

Expandiendo la Ec. (10) se tiene que:

$$V_a^{(0)} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (11a)$$

$$V_a^{(1)} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (11b)$$

$$V_a^{(2)} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (11c)$$

Para la corriente se procede de manera igual a como se hizo con el voltaje, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$I_a = I_a^{(0)} + I_a^{(1)} + I_a^{(2)} \quad (12a)$$

$$I_b = I_a^{(0)} + a^2 I_a^{(1)} + a I_a^{(2)} \quad (12b)$$

$$I_c = I_a^{(0)} + a I_a^{(1)} + a^2 I_a^{(2)} \quad (12c)$$

y para las componentes simétricas de las corrientes se tiene:

$$I_a^{(0)} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (13a)$$

$$I_a^{(1)} = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (13b)$$

$$I_a^{(2)} = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (13c)$$

2.5- Redes de secuencia

Son circuitos equivalentes que sirven para tomar en cuenta las respuestas por separado de los elementos a cada componente de la corriente. Hay tres circuitos equivalentes para cada elemento de un sistema trifásico. Al organizar los circuitos equivalentes individuales en redes de acuerdo con las interconexiones de los elementos, se llega al concepto de tres redes de secuencia. Al resolver las redes de secuencia para las condiciones de falla, se obtienen la corriente simétrica y las componentes de voltaje que se pueden combinar para tomar en cuenta, en todo el sistema, los efectos de las corrientes de falla desbalanceadas originales.

En la Fig. 4 se muestran las trayectorias de corrientes de secuencia positiva para un generador, y en la Fig. 5 se muestra su respectiva red de secuencia positiva.

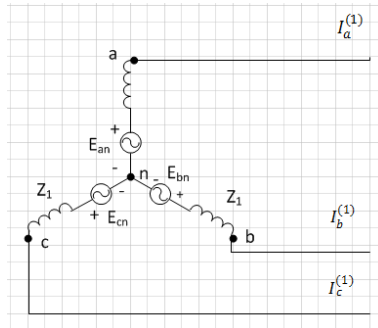


Figura 4. Trayectorias de corriente de secuencia positiva para un generador.

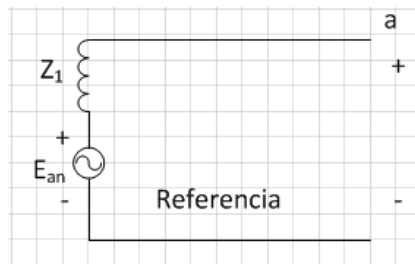


Figura 5. Red de secuencia positiva para un generador.

En la Fig. 6 se muestran las trayectorias de corrientes de secuencia negativa para un generador, y en la fig. 7 se muestra su respectiva red de secuencia negativa.

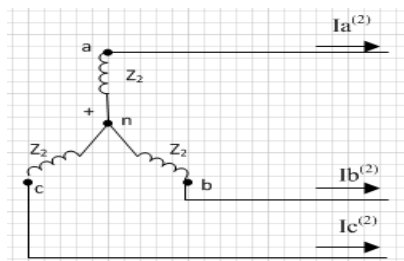


Figura 6. Trayectorias de corriente de secuencia negativa para un generador.

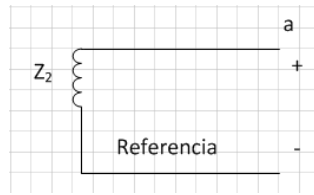


Figura 7. Red de secuencia negativa para un generador.

En la Fig. 8 se muestran las trayectorias de corrientes de secuencia cero para un generador, y en la Fig. 9 se muestra su respectiva red de secuencia cero.

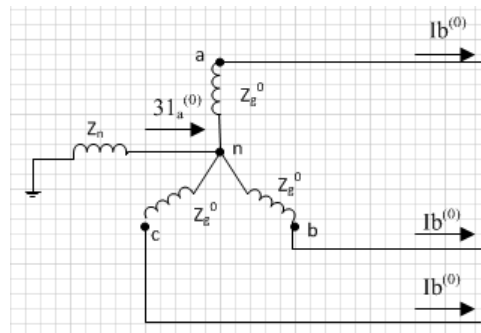


Figura 8. Trayectorias de corriente de secuencia cero para un generador.

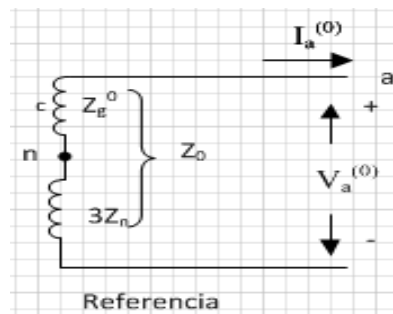


Figura 9. Red de secuencia cero para un generador.

En la Fig. 10 se muestra el diagrama unifilar de un transformador Δ -Y aterrizado con impedancia de dispersión Z , y también se muestran los respectivos circuitos de secuencia positiva (Fig. 11) y de secuencia cero (Fig. 12). Es importante resaltar que el circuito de secuencia negativa es igual al de secuencia positiva.

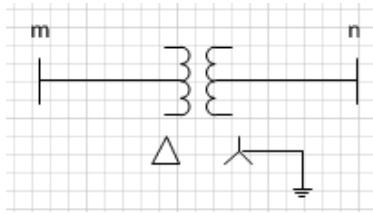


Figura 10. Diagrama unifilar de un transformador Δ -Y aterrizado con impedancia de dispersión Z .

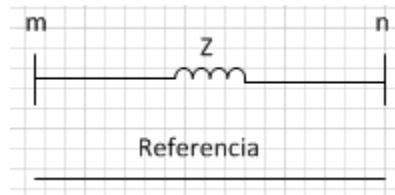


Figura 11. Red de secuencia positiva de un transformador Δ -Y.



Figura 12. Red de secuencia cero de un transformador Δ -Y.

Con las redes de secuencia de las figuras 5, 7, 9, 11 y 12 correspondientes a generadores y transformadores se realiza el estudio completo de las fallas asimétricas (de conductor abierto) que se presentan en la aplicación de maniobras de paralelos en la red de distribución de energía eléctrica de la región capital; más adelante se define lo que son las fallas asimétricas, ya que la aplicación de las maniobras de paralelos, más específicamente la apertura y cierre de seccionadores, se modela con este tipo de fallas.

2.6- Fallas Asimétricas

Se dice que una falla es asimétrica si el sistema de potencia no se mantiene simétrico luego de que ocurren. La mayoría de las fallas que ocurren en los sistemas de potencia, son fallas asimétricas que consisten en cortocircuitos asimétricos, fallas asimétricas a través de impedancias o conductores abiertos. Las fallas asimétricas que pueden ocurrir son: (a) fallas monofásicas a tierra o línea a tierra, (b) fallas línea a línea, (c) fallas línea a línea y a tierra o doble línea a tierra, y (d) fallas de uno o dos conductores abiertos como resultado de la ruptura de uno o dos conductores respectivamente, o bien de la acción de fusibles u otros mecanismos que no puedan abrir las tres fases simultáneamente. Este último caso es el que se considera en esta investigación como consecuencia de la aplicación de maniobras en paralelo. El método de las componentes simétricas es útil en el análisis para determinar las corrientes y voltajes en todas las partes del sistema después de que ha ocurrido la falla, porque cualquier falla asimétrica da origen a que fluyan corrientes desbalanceadas en el sistema. Se considerarán las fallas mediante la aplicación del teorema de Thévenin que permite encontrar la corriente en la falla al reemplazar el sistema por un generador y una impedancia en serie. También, se mostrará cómo se aplica la matriz de impedancias de barra al análisis de las fallas asimétricas.

2.6.1- Fallas de conductor abierto

Cuando se abre una fase de un circuito trifásico balanceado se crea un desbalance y fluyen corrientes asimétricas que se ven reflejadas en el neutro; un tipo similar de desbalance ocurre cuando cualquier par de las tres fases se abre mientras la tercera fase permanece cerrada. Estas condiciones de desbalance tienen su origen cuando, por ejemplo, uno o dos conductores de fase de una línea de transmisión se rompen físicamente a causa de un accidente, una tormenta, o la aplicación de maniobras. Debido a las corrientes de sobrecarga pueden operar, en otros circuitos,

los fusibles u otros mecanismos de interrupción en uno o dos conductores. Estas fallas de apertura de conductores se pueden analizar por medio de las matrices de impedancias de barra de las redes de secuencia.

En la Fig. 13 se ilustra una sección de un circuito trifásico en el que las corrientes de línea en las fases respectivas son I_a , I_b e I_c con las direcciones positivas desde la barra “m” a la “n”. En la misma figura la fase “a” está abierta entre los puntos p y p’ mientras que en la Fig. 14 son las fases “b” y “c” las que están abiertas en los mismos puntos.

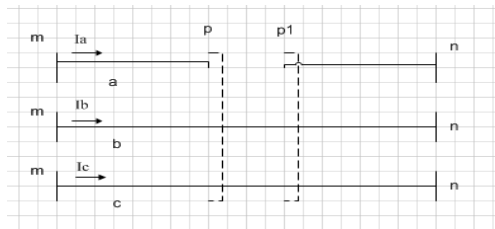


Figura 13. Sección de línea trifásica con la fase A abierta.

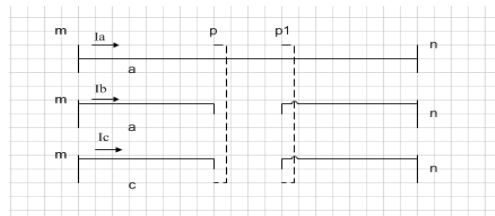


Figura 14. Sección de línea trifásica con las fases B y C abiertas.

Si la línea “m-n” tiene las impedancias de secuencia Z_0 , Z_1 y Z_2 se puede simular la apertura de las tres fases al añadir entre las barras “m-n”, las impedancias negativas $-Z_0$, $-Z_1$ y $-Z_2$ en los equivalentes de Thévenin correspondientes de las tres redes de secuencia del sistema original.

Esto se puede observar en la Fig. 15, en donde se muestra la conexión de Z_1 al equivalente de Thévenin de secuencia positiva entre las barras “m-n”.

Los voltajes V_m y V_n son los normales (de secuencia positiva) de la fase “a” en las barras “m-n” antes de que ocurra la falla de conductor abierto. Se añaden las impedancias de secuencia positiva kZ_1 y $(1-k)Z_1$, donde $0 \leq k \leq 1$, para representar las fracciones de la línea rota “m-n”, desde la barra “m” al punto “p” y desde la barra “n” al punto p', respectivamente.

Se puede reemplazar por medio de la transformación de fuentes la caída de voltaje $V_a^{(1)}$ en serie con la impedancia $[kZ_1 + (1-k)Z_1]$, de la Fig. 15, por la corriente $V_a^{(1)}/Z_1$ en paralelo con la impedancia Z_1 , como se muestra en la Fig. 16. En esta última figura se cancela la combinación en paralelo de $-Z_1$ y Z_1 , como se muestra en la Fig. 17.

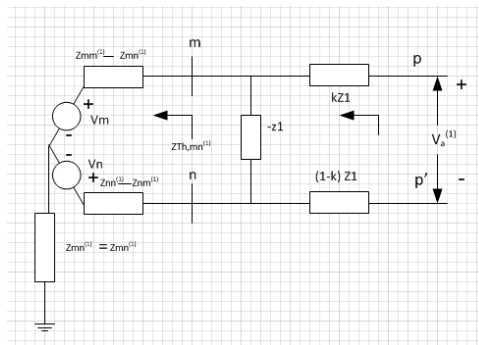


Figura 15. Equivalente de Thévenin de secuencia positiva entre las barras “m-n”.

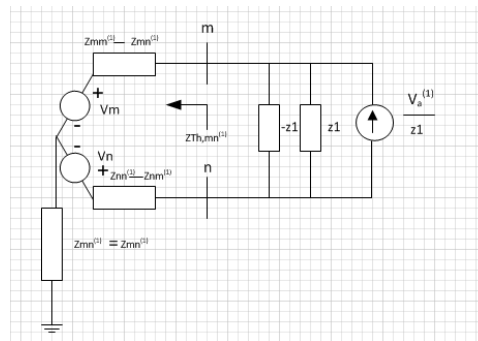


Figura 16. Equivalente de Thévenin de secuencia positiva entre las barras “m-n” con fuente de corriente equivalente.

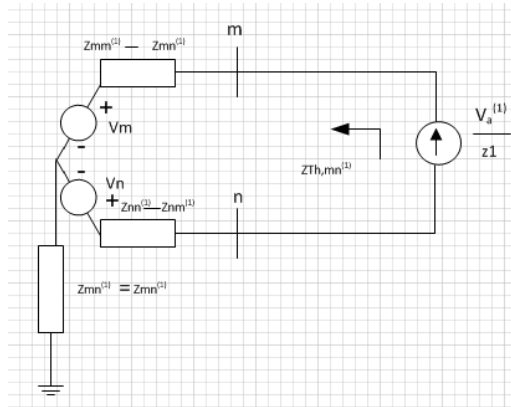


Figura 17. Equivalente de Thévenin de secuencia positiva para la simulación de la apertura de la línea “m-n”.

Las consideraciones anteriores para la red de secuencia positiva se aplican directamente a las redes de secuencia negativa y cero, pero se debe recordar que estas últimas no contienen fuentes internas propias, se sobreentiende que el origen de las fuentes de corriente $V_a^{(2)}/Z_2$ y $V_a^{(0)}/Z_0$ es la falla de conductor abierto en el sistema entre los puntos p y p'. Las figuras 18 y 19 muestran los circuitos equivalentes resultantes para la secuencia negativa y la secuencia cero.

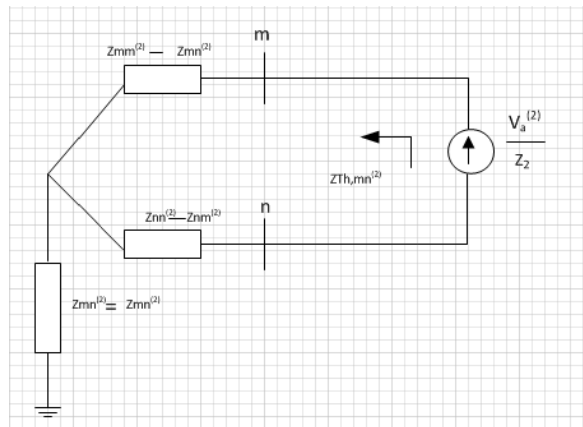


Figura 18. Equivalente de Thévenin de secuencia negativa para la simulación de la apertura de la línea “m-n”.

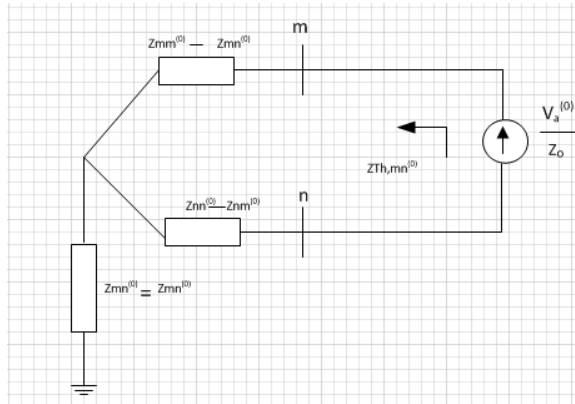


Figura 19. Equivalente de Thévenin de secuencia cero para la simulación de la apertura de la línea “m-n”.

Se pueden usar las matrices de impedancia de barra $Z_{barra}^{(0)}$, $Z_{barra}^{(1)}$ y $Z_{barra}^{(2)}$ de la configuración normal del sistema para determinar los cambios de voltaje debidos a las fallas de conductor abierto. Pero en primer lugar se deben encontrar las expresiones para las componentes simétricas $V_a^{(0)}$, $V_a^{(1)}$ y $V_a^{(2)}$ de las caídas de voltaje a través de los puntos de falla p y p' para cada uno de los tipos de fallas mostrados en las figuras 13 y 14. Se puede considerar que estas caídas de voltaje originan, como se muestran en las figuras 17, 18 y 19, los siguientes conjuntos de inyecciones de corriente en las redes de secuencia de la configuración normal del sistema (tabla 1):

Tabla 1. Inyecciones de corrientes de las tres secuencias a las barras genéricas “m” y “n” respectivamente.

Barra	Secuencia (1)	Secuencia (2)	Secuencia (0)
m	$V_a^{(1)}/Z_1$	$V_a^{(2)}/Z_2$	$V_a^{(0)}/Z_0$
n	$-V_a^{(1)}/Z_1$	$-V_a^{(2)}/Z_2$	$-V_a^{(0)}/Z_0$

Al multiplicar las matrices de impedancias de barra $Z_{barra}^{(0)}$, $Z_{barra}^{(1)}$ y $Z_{barra}^{(2)}$ por los vectores de corriente que contienen solamente estas inyecciones de corriente

(Tabla 1), se obtienen los siguientes cambios en las componentes simétricas del voltaje de la fase “a” de cada barra “i”:

$$\text{Secuencia cero:} \quad \Delta V_i^{(0)} = \frac{Z_{im}^{(0)} - Z_{in}^{(0)}}{Z_0} V_a^{(0)} \quad (14a)$$

$$\text{Secuencia positiva:} \quad \Delta V_i^{(1)} = \frac{Z_{im}^{(1)} - Z_{in}^{(1)}}{Z_1} V_a^{(1)} \quad (14b)$$

$$\text{Secuencia negativa:} \quad \Delta V_i^{(2)} = \frac{Z_{im}^{(2)} - Z_{in}^{(2)}}{Z_2} V_a^{(2)} \quad (14c)$$

Antes del desarrollo de las ecuaciones para $V_a^{(0)}$, $V_a^{(1)}$ y $V_a^{(2)}$ en cada tipo de falla de conductor abierto, se desarrollan las expresiones para las impedancias equivalentes de Thévenin de las redes de secuencia vistas desde los puntos de falla p y p’.

Entre los puntos p y p’ de la Fig. 15 se encuentra la impedancia $Z_{pp'}^{(1)}$, dada por:

$$Z_{pp'}^{(1)} = \frac{-Z_1^2}{Z_{th,mm}^{(1)} - Z_1} \quad (15)$$

Entonces, el voltaje de circuito abierto de p a p’, que se obtiene por división de voltajes, es:

$$V_{pp'} = \frac{Z_{pp'}^{(1)}}{Z_1} (V_m - V_n) \quad (16)$$

Antes de que se abra cualquiera de los conductores, la corriente I_{mn} en la fase “a” de la línea “m-n” es de secuencia positiva y está dada por:

$$I_{mn} = \frac{V_m - V_n}{Z_1} \quad (17)$$

Al sustituir esta expresión de I_{mn} en la Ec. (16), se obtiene el voltaje de circuito abierto de p a p':

$$V_{pp'} = I_{mn} Z_{pp'}^{(1)} \quad (18)$$

En la Fig. 20 se muestra el circuito equivalente de secuencia positiva que se obtiene entre los puntos p y p'. Análogamente a la Ec. (15), se obtiene:

$$Z_{pp'}^{(2)} = \frac{-Z_2^2}{Z_{th,mn}^{(2)} - Z_2} \quad (19)$$

$$Z_{pp'}^{(0)} = \frac{-Z_0^2}{Z_{th,mn}^{(0)} - Z_0} \quad (20)$$

Que son las impedancias de secuencias negativa y cero respectivamente. En las figuras 21 y 22 se muestran los respectivos circuitos equivalentes de secuencia negativa y secuencia cero.

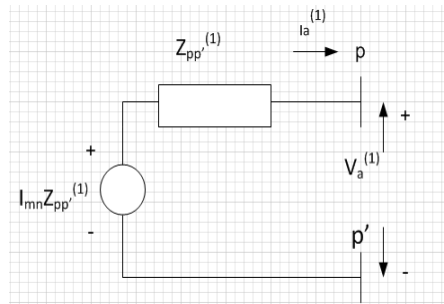


Figura 20. Red equivalente de Thévenin de secuencia positiva vista desde p-p'.

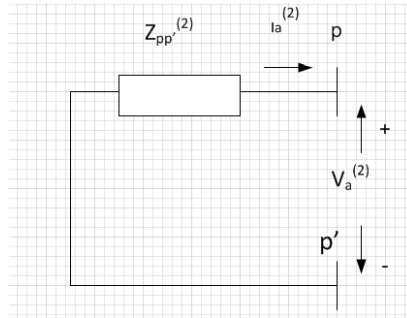


Figura 21. Red equivalente de Thévenin de secuencia negativa vista desde p-p'.

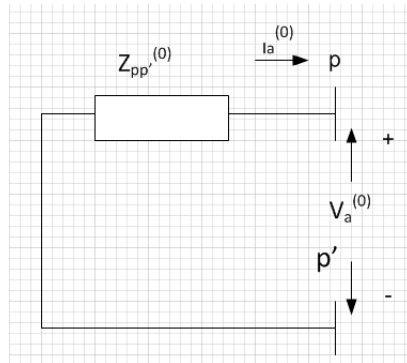


Figura 22. Red equivalente de Thévenin de secuencia cero vista desde p-p'.

Ahora se procede a desarrollar las expresiones para las caídas de voltaje de secuencia $V_a^{(0)}$, $V_a^{(1)}$ y $V_a^{(2)}$ tanto para un conductor abierto como para dos conductores abiertos.

2.6.1.1- Un conductor abierto

Un conductor abierto como el de la Fig. 13 implica que $I_a = 0$, entonces:

$$I_a^{(0)} + I_a^{(1)} + I_a^{(2)} = 0 \quad (21)$$

Debido a que las fases “b” y “c” están cerradas, también se tienen las caídas de voltaje:

$$V_{pp',b} = 0 \quad (22)$$

$$V_{pp',c} = 0 \quad (23)$$

Al descomponer, las caídas de voltaje a través del punto de falla en sus componentes simétricas usando la Ec. (10), se obtiene:

$$\begin{pmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{pp',a} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} V_{pp',a} \\ V_{pp',a} \\ V_{pp',a} \end{pmatrix} \quad (24)$$

Esto es:

$$V_a^{(0)} = V_a^{(1)} = V_a^{(2)} = \frac{V_{pp',a}}{3} \quad (25)$$

Esta ecuación establece que el conductor abierto en la fase “a”, origina una caída de voltaje igual a la que se presenta desde p a p’ en cada una de las redes de secuencia. Se puede satisfacer este requisito y el de la Ec. (21) si se conectan en paralelo los equivalentes de Thévenin de las redes de secuencia en los puntos p y p’ de la manera que se muestra en la fig. 23.

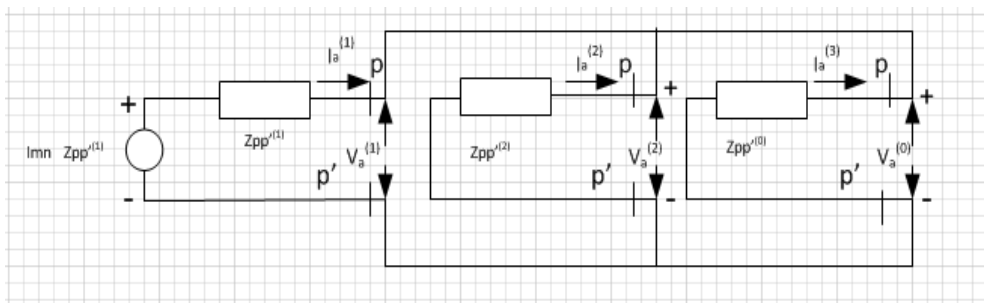


Figura 23. Conexión paralelo de las redes de secuencia del sistema para simular la apertura de la fase A entre los puntos p-p’.

De esta figura se encuentra que la expresión para la corriente de secuencia positiva $I_a^{(1)}$ es:

$$I_a^{(1)} = I_{mn} \frac{Z_{pp'}^{(1)}(Z_{pp'}^{(2)} - Z_{pp'}^{(0)})}{Z_{pp'}^{(0)}Z_{pp'}^{(1)} + Z_{pp'}^{(1)}Z_{pp'}^{(2)} + Z_{pp'}^{(2)}Z_{pp'}^{(0)}} \quad (26)$$

Las caídas de voltajes de secuencia $V_a^{(0)}$, $V_a^{(1)}$ y $V_a^{(2)}$ están dadas, de la figura 10, por:

$$V_a^{(0)} = V_a^{(2)} = V_a^{(1)} = I_{mn} \frac{Z_{pp'}^{(0)}Z_{pp'}^{(1)}Z_{pp'}^{(2)}}{Z_{pp'}^{(0)}Z_{pp'}^{(1)} + Z_{pp'}^{(1)}Z_{pp'}^{(2)} + Z_{pp'}^{(2)}Z_{pp'}^{(0)}} \quad (27)$$

Las cantidades en el lado derecho de esta ecuación se conocen a partir de los parámetros de impedancia de las redes de secuencia, y la corriente pre-falla en la fase “a” de la línea “m-n”.

2.6.1.2- Dos conductores abiertos

Cuando dos conductores están abiertos como se puede observar en la Fig. 14, se tienen las siguientes condiciones de falla:

$$V_{pp',a} = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} = 0 \quad (28)$$

$$I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad (29)$$

Al descomponer las corrientes de línea en sus componentes simétricas da:

$$I_{a(0)} = I_a^{(1)} = I_a^{(2)} = \frac{I_a}{3} \quad (30)$$

Las ecuaciones (28) y (30) se satisfacen al conectar en serie los tres equivalentes de Thévenin de las redes de secuencia (figuras 20, 21 y 22), entre los puntos p y p' de la manera que se muestra en la Fig. 24.

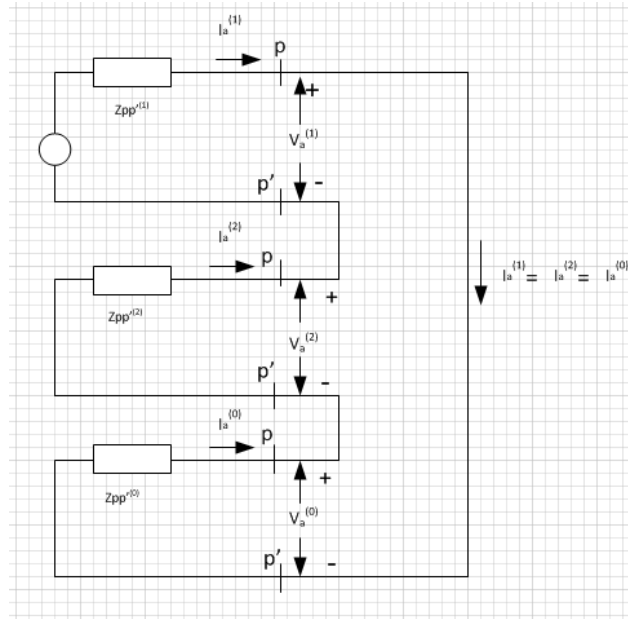


Figura 24. Conexión serie de las redes de secuencia del sistema para simular la apertura de las fases B y C entre los puntos p-p'.

Las caídas de voltaje de secuencia se expresan ahora por:

$$V_a^{(1)} = I_{mn} \frac{Z_{pp'}^{(1)}(Z_{pp'}^{(2)} + Z_{pp'}^{(0)})}{Z_{pp'}^{(1)} + Z_{pp'}^{(2)} + Z_{pp'}^{(0)}} \quad (31a)$$

$$V_a^{(2)} = I_{mn} \frac{-Z_{pp'}^{(1)}Z_{pp'}^{(2)}}{Z_{pp'}^{(1)} + Z_{pp'}^{(2)} + Z_{pp'}^{(0)}} \quad (31b)$$

$$V_a^{(0)} = I_{mn} \frac{-Z_{pp'}^{(1)}Z_{pp'}^{(0)}}{Z_{pp'}^{(1)} + Z_{pp'}^{(2)} + Z_{pp'}^{(0)}} \quad (31c)$$

2.7- Ambiente SCADA

Es una aplicación de software diseñado con la finalidad de controlar y supervisar a distancia, adquiriéndose datos de determinados procesos remotos.

Los sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) utilizan equipos de computación y tecnologías de comunicación para automatizar el monitoreo y el control de procesos industriales. Estos sistemas son partes integrales de la mayoría de los ambientes industriales complejos o geográficamente dispersos, ya que pueden obtener la información de una gran cantidad de fuentes rápidamente, y la presentan a un operador en una forma amigable. Los sistemas SCADA mejoran la eficacia del proceso de monitoreo y control proporcionando la información oportuna para poder tomar decisiones operacionales apropiadas.

El flujo de la información de los sistemas SCADA es el siguiente:

a) El fenómeno físico lo constituye la variable que se desea medir. Dependiendo del proceso, la naturaleza del fenómeno es muy diversa: presión, temperatura, flujo, potencia, intensidad de corriente, voltaje, pH, densidad, etc. Este fenómeno debe ser claro para el sistema SCADA, es decir, una variable eléctrica y para ello se utilizan los sensores o transductores.

b) Los sensores o transductores convierten las variaciones del fenómeno físico en variaciones proporcionales de una variable eléctrica. Las variables eléctricas más utilizadas son: voltaje, corriente, carga, resistencia o capacitancia. Sin embargo, esta variedad de tipos de señales eléctricas debe ser procesada para ser entendida por el computador digital para lo cual se utilizan los acondicionadores de señal.

c) La función de los acondicionadores de señal es la de referenciar estos cambios eléctricos a una misma escala de corriente o voltaje. Además, provee aislamiento eléctrico y filtraje de la señal con el objeto de proteger al sistema de ruidos originados en campo.

d) Una vez acondicionada la señal, la misma se convierte en un valor digital equivalente en el bloque de conversión de datos. Generalmente, esta función es llevada a cabo por un circuito de conversión analógica/digital (ADC).

e) El computador almacena esta información, la cual es utilizada para su análisis y para la toma de decisiones por parte del usuario del sistema. Simultáneamente, se muestra la información al usuario del sistema en tiempo real. Basado en la información, el operador puede tomar la decisión de realizar una acción de control sobre el proceso.

f) El operador comanda al computador para realizar una acción sobre algún proceso y se convierte la información digital a una señal eléctrica. Esta señal eléctrica es procesada por una Salida de Control, el cual funciona como un acondicionador de señal, al cual escala para manejar un dispositivo dado: válvulas, bobinas, controladores, etc.

2.7.1- Funciones Principales de un Sistema SCADA

Dentro de las funciones básicas realizadas por un sistema SCADA están las siguientes:

a) *Supervisión remota de instalaciones y equipos:* Permite al operador conocer el estado de desempeño de las instalaciones y los equipos alojados en la planta, lo que permite dirigir las tareas de mantenimiento y estadística de fallas.

b) *Control remoto de instalaciones y equipos:* Mediante el sistema se puede activar o desactivar los equipos remotamente (por ejemplo abrir válvulas, activar interruptores, prender motores, etc.), de manera automática y también manual. Además es posible ajustar parámetros, valores de referencia, algoritmos de control, etc.

c) **Procesamiento de datos:** El conjunto de datos adquiridos conforman la información que alimenta al sistema; esta información es procesada, analizada, y comparada con datos anteriores, y con datos de otros puntos de referencia, dando como resultado una información confiable y veraz.

d) **Visualización gráfica dinámica:** El sistema es capaz de brindar imágenes en movimiento que representen el comportamiento del proceso, dándole al operador la impresión de estar presente dentro de una planta real. Estos gráficos también pueden corresponder a curvas de las señales analizadas en el tiempo.

e) **Generación de reportes:** El sistema permite generar informes con datos estadísticos del proceso en un tiempo determinado por el operador.

f) **Representación de señales de alarma:** A través de las señales de alarma se logra alertar al operador frente a una falla o la presencia de una condición perjudicial o fuera de lo aceptable. Estas señales pueden ser tanto visuales como sonoras.

g) **Almacenamiento de información histórica:** Se cuenta con la opción de almacenar los datos adquiridos, esta información puede analizarse posteriormente, el tiempo de almacenamiento dependerá del operador o del autor del programa.

h) **Programación de eventos:** Está referido a la posibilidad de programar subprogramas que brinden automáticamente reportes, estadísticas, gráficas de curvas, activación de tareas automáticas, etc.

2.7.2- Elementos del Sistema SCADA

Un sistema SCADA está conformado por:

a) **Interfaz Operador – Máquinas:** Un sistema de SCADA incluye una interfaz utilizador, generalmente llamado el Human Machine Interface (HMI). El

HMI de un sistema SCADA es el entorno visual que brinda el sistema para que el operador se adapte al proceso desarrollado por la planta. Permite la interacción del ser humano con los medios tecnológicos implementados. Esta interfaz incluye generalmente los controles donde el operador se puede interconectar con el sistema de SCADA.

b) *Unidad Terminal Maestra (MTU):* Cuando se habla de la Unidad Terminal Maestra se hace referencia a los servidores (computadores) y el software responsable para comunicarse con el equipo del campo tales como: las RTU (Unidades Terminales remotas), los PLC (controladores lógicos programables), etc. En estos se encuentra el software HMI corriendo para las estaciones de trabajo en el cuarto de control o en cualquier otro lado. En un sistema SCADA pequeño, la Unidad Terminal Maestra puede estar en un solo servidor, pero en un sistema SCADA a gran escala, la Unidad Terminal Maestra puede incluir muchos servidores, aplicaciones de software distribuido y sitios de recuperación de desastres.

c) *Unidad Terminal Remota (RTU):* Es un dispositivo instalado en una posición remota que obtiene datos, los descifra en un formato, y transmite los datos de nuevo a una unidad terminal maestra (MTU). La RTU también recoge la información del dispositivo principal y pone los procesos en ejecución que son dirigidos por la MTU. La RTU se conecta al equipo físicamente y lee los datos de estado como abierto/cerrado desde una válvula o un intercambiador, lee las medidas como presión, flujo, voltaje o corriente y así la RTU puede enviar señales que pueden controlar los dispositivos para abrirlos, cerrarlos, intercambiar la válvulas, configurar la velocidad de una bomba, etc.

d) *Sistema de Comunicaciones:* Se encarga de la transferencia de información del punto donde se realizan las operaciones, hasta el punto donde se supervisa y controla el proceso. Lo conforman los transmisores, receptores y medios de comunicación.

e) **Transductores:** Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente de salida. El nombre del transductor ya nos indica cual es la transformación que realiza, aunque no necesariamente la dirección de la misma. Es un dispositivo usado para obtener la información de entornos físicos y conseguir (a partir de esta información) señales o impulsos eléctricos o viceversa. En este caso permitirá la conversión de una señal física en una señal eléctrica (y viceversa). Su calibración es muy importante para que no haya confusión de valores de los datos.

En la Fig. 25 se puede observar un esquema de los elementos básicos que conforman un sistema SCADA:

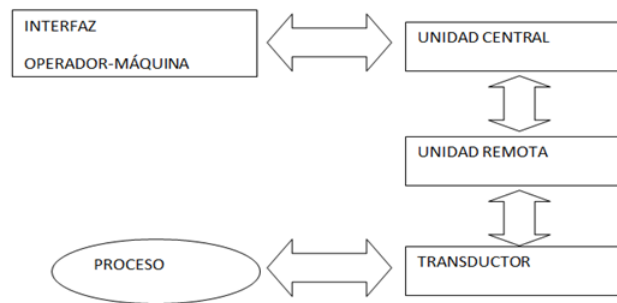


Figura 25. Elementos básicos de un sistema SCADA.

En la Fig. 26 se muestra cómo el SCADA obtiene la información de manera remota:

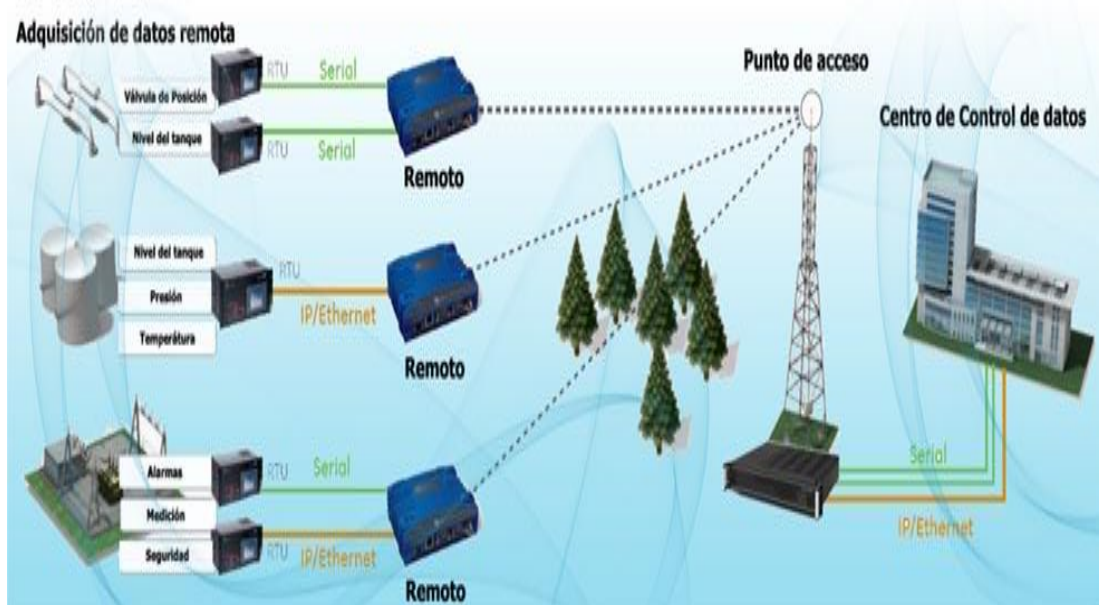


Figura 26. Obtención de información remota del sistema SCADA.

2.8- Especificaciones técnicas generales del sistema SCADA CORPOELEC-EDC:

2.8.1- Hardware de la red SCADA

2.8.1.1- Nodos (computadoras) principales

El sistema SCADA cuenta con los siguientes nodos: Los nodos de adquisición de datos (DAC), los nodos de base de datos (SYS) y los nodos de aplicaciones eléctricas (APP).

Nodos de adquisición de datos (DAC): Son los que se encargan de recolectar la información proveniente de la unidad terminal remota (RTU) y controlan los eventos o alarmas activas (avisos de alerta para el operador en tiempo real).

Nodos de base de datos (SYS): Estos manejan la información de los elementos: PD (protector de distribución), ID (interruptor de distribución), CV (conectores vivos), etc., en los planos digitales, y también los interruptores de los circuitos (interruptores principales). Es importante resaltar que en este nodo se guardan los eventos históricos (información de alarmas activas que se almacenan para consultas futuras), información de suma importancia para los operadores.

Nodos de aplicaciones eléctricas (APP): Se encargan de mantener la conectividad o refrescamiento de la conmutación de los interruptores de distribución y elementos asociados a los planos digitales.

2.8.1.2- Nodos (computadoras) secundarios

Dentro de los nodos secundarios se encuentran los nodos de operaciones que adquieren la información de los nodos principales, nodos de desarrollo, nodos de distribución de software.

2.8.2- Software de la red SCADA

El SCADA trabaja con el sistema operativo UNIX y su software es el CAE, y maneja el protocolo de comunicación DNP3.0; es un protocolo industrial para comunicaciones entre equipos inteligentes y estaciones controladoras, componentes de sistemas SCADA. Es un protocolo ampliamente utilizado en el sector eléctrico, de gran difusión en Estados Unidos y Canadá. También se puede encontrar en otros campos: agua, gas, entre otros tipos de empresas de servicio.

2.8.3- Adquisición de la data

La unidad terminal remota (RTU) se alimenta con voltaje DC y recolecta toda la información concerniente a voltaje de línea, voltaje de barra, corriente de

interruptor principal, corriente de los circuitos, demanda (parte analógica), también la condición actual de abierto o cerrado del equipo en campo, lockout de los transformadores (por temperatura, o por sobrecarga), lockout de la barra, alarma de batería, alarma general de subestación.

La forma general en que se adquiere la data se realiza de la siguiente manera: La unidad terminal remota (RTU) obtiene la información en una determinada subestación; lo mencionado anteriormente se refiere a la parte de campo. Esta información llega al SCADA a través de un enlace de comunicación que puede ser de fibra óptica, par telefónico, radio o satélite; llega primero a los nodos de adquisición de datos (DAC) y de aquí pasa a los nodos de bases de datos. Ver Fig. 27.

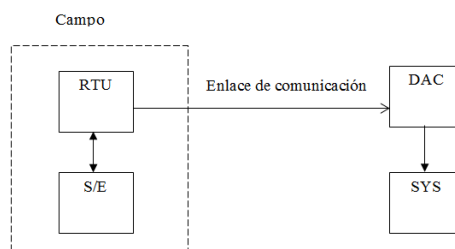


Figura 27. Adquisición de la data del sistema SCADA.

2.8.3.1- Adquisición de la data (supervisión)

La adquisición de data se realiza de la siguiente manera: La información llega a la unidad de procesamiento analógico (UPA) desde la celda a través de un cableado de data (uno para cada celda); desde la UPA llega a la RTU a través de fibra óptica; en la RTU la información pasa por un filtro, para eliminar la existencia de ruido, se realiza una conversión y seguidamente se lleva la información a los nodos de adquisición de datos. Ver Fig. 28.

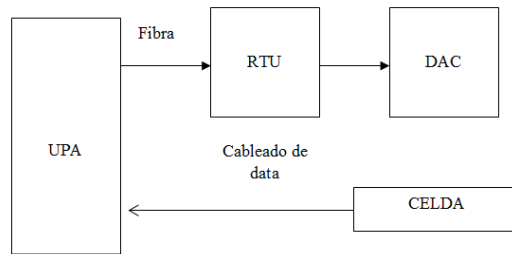


Figura 28. Adquisición de la data del sistema SCADA (supervisión).

2.8.3.2- Control (obtención de la información de campo)

El SCADA actúa en la apertura o cierre de un interruptor, esta acción es captada por la RTU pasando por un procesamiento dentro de la misma para decidir cuál es el control correspondiente sobre un determinado elemento; el control se realiza a través de una matriz de relés, seguidamente se actúa sobre un relé de mayor capacidad en manejo de corriente que los de la matriz antes mencionada, y este último acciona un interruptor que se interpreta en la RTU de forma digital. Ver Fig. 29.

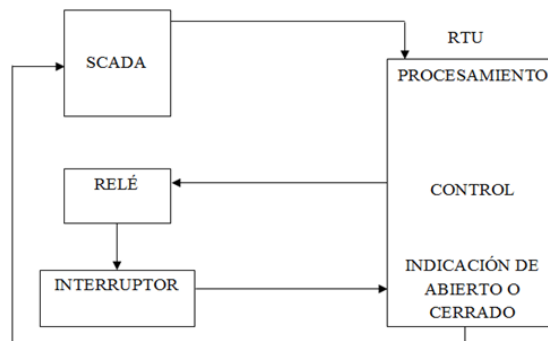


Figura 29. Control del sistema SCADA.

2.8.4- Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica de usuario, conocida también como GUI es un programa informático que actúa de interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz. Su principal uso consiste en proporcionar un entorno visual sencillo para permitir la comunicación con el sistema operativo de una máquina o computador.

Para el caso particular de la interfaz gráfica del SCADA, se puede decir que es una herramienta en la cual se pueden visualizar los modelos de la red de distribución de la región capital (plano digital); en las figuras 30 y 31 se muestran, en respectivos planos digitales, la aplicación de una maniobra de paralelos en las que se incluyen las subestaciones Altamira A2 y palos grandes A4 como ejemplo particular; el operador puede ver en el monitor como dicho tramo al cual se le aplicó la maniobra se encuentra parpadeando (las líneas punteadas desaparecen, Fig. 31).

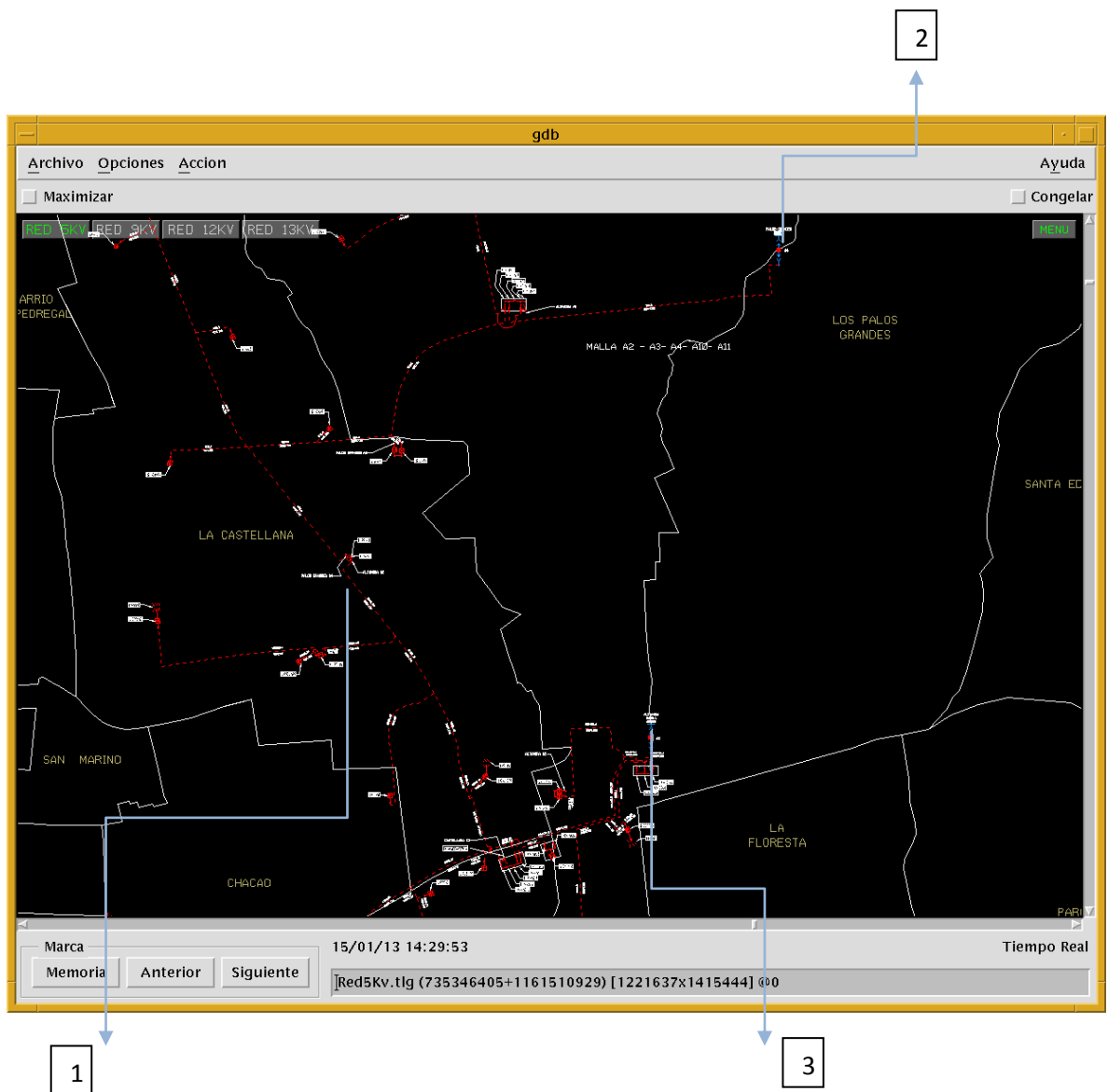


Figura 30. Aplicación de maniobra de paralelo (tramo de línea visible).

- 1.- Interruptor para aplicar la maniobra de paralelo.
- 2.- Subestación Palos Grandes A4.
- 3.- Subestación Altamira A2.

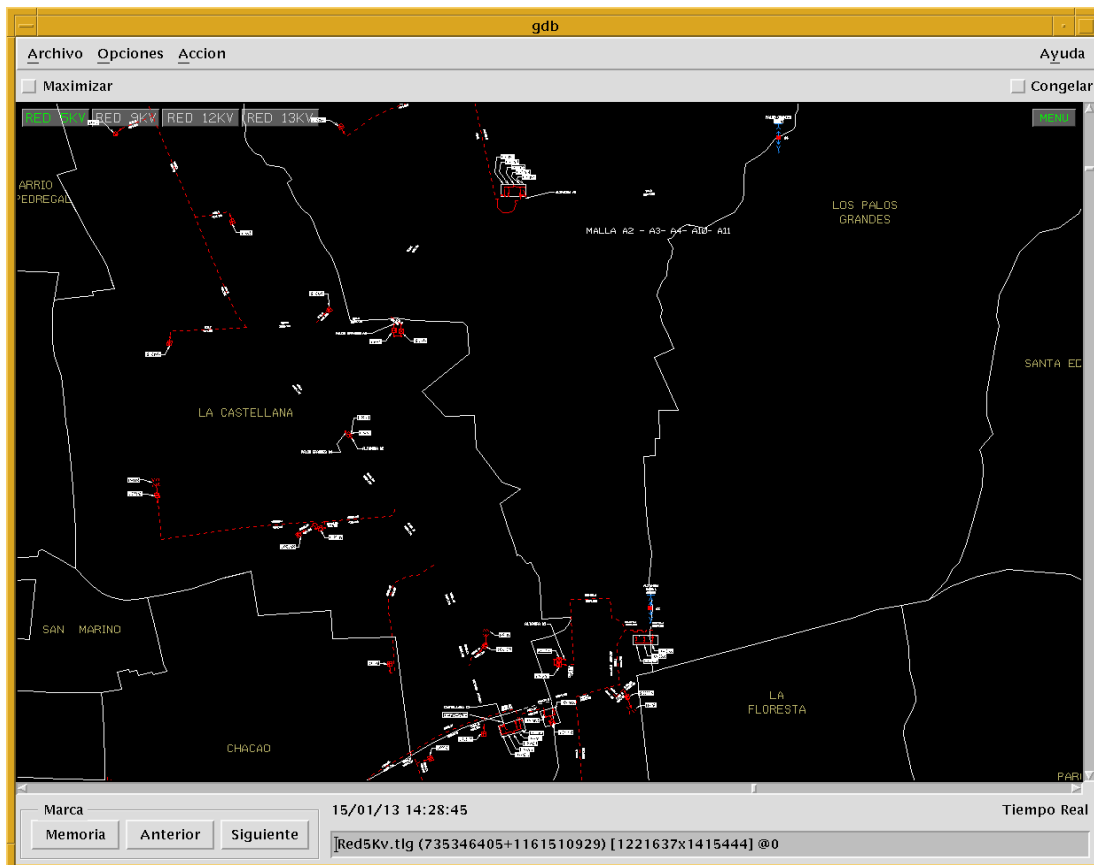


Figura 31. Aplicación de maniobra de paralelo (tramo de línea no visible).

En los planos digitales se pueden observar los siguientes elementos: protectores de distribución (PD), interruptores de distribución (ID), conectores vivos (CV), indicadores de fallas (IF), conectores modulares (CM), líneas de distribución (LD), cables de distribución (CD), entre otros. Esta herramienta es de gran utilidad e importancia para simular las maniobras de paralelos; en el SCADA es muy fácil distinguir cuándo se aplica la maniobra ya que se puede ver un parpadeo de la correspondiente línea.

Además de los planos digitales se pueden manejar los diagramas unifilares correspondientes a cada subestación; éstos son la representación gráfica de los transformadores, interruptores de los circuitos principales, interruptores de circuito,

interruptores de barra; en las figuras 32 y 33 se pueden apreciar dichos diagramas de las subestaciones Altamira A2 y Palos Grandes A4, respectivamente.

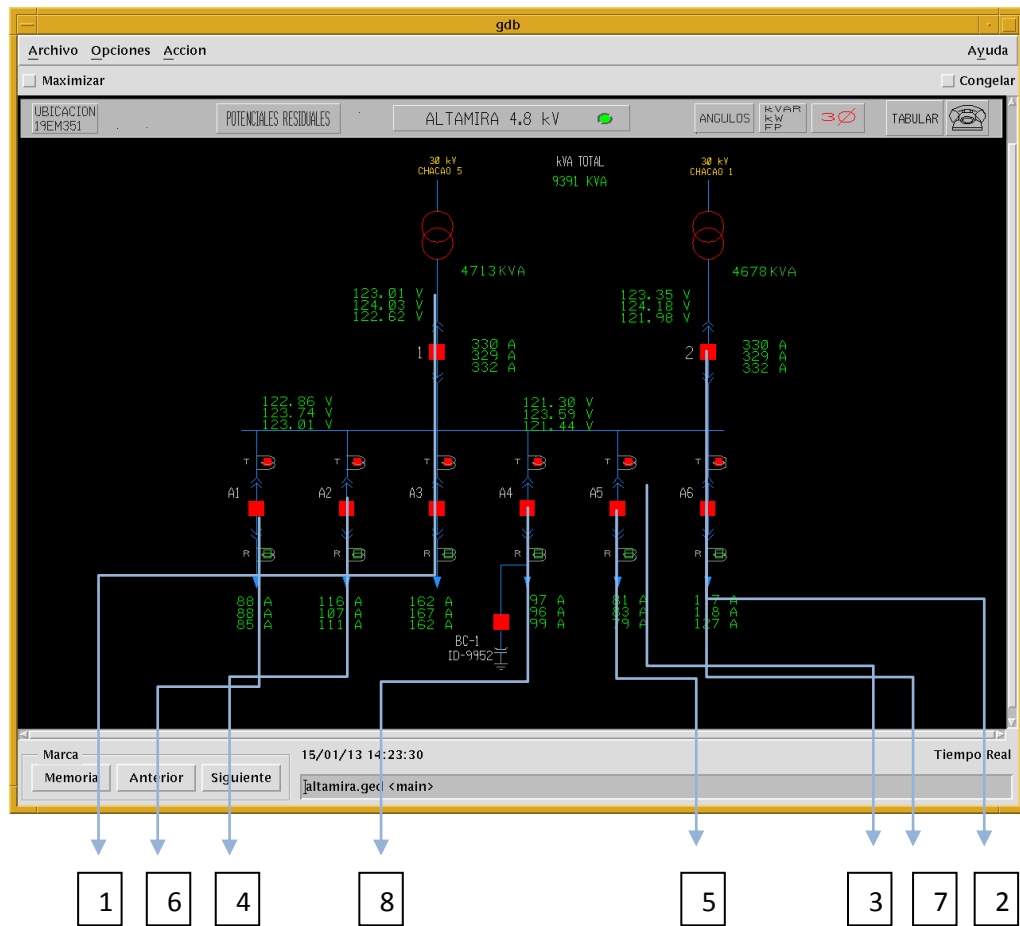


Figura 32. Diagrama unifilar de la subestación Altamira A2.

- 1.- Transformador.
- 2.- Interruptor o circuito principal.
- 3.- Nivel de voltaje en cada una de las fases.
- 4.- Barra sólida.
- 5.- Relé a tierra.
- 6.- Interruptor o circuito.
- 7.- Relé de reenganche.
- 8.- Niveles de corriente en cada una de las fases.

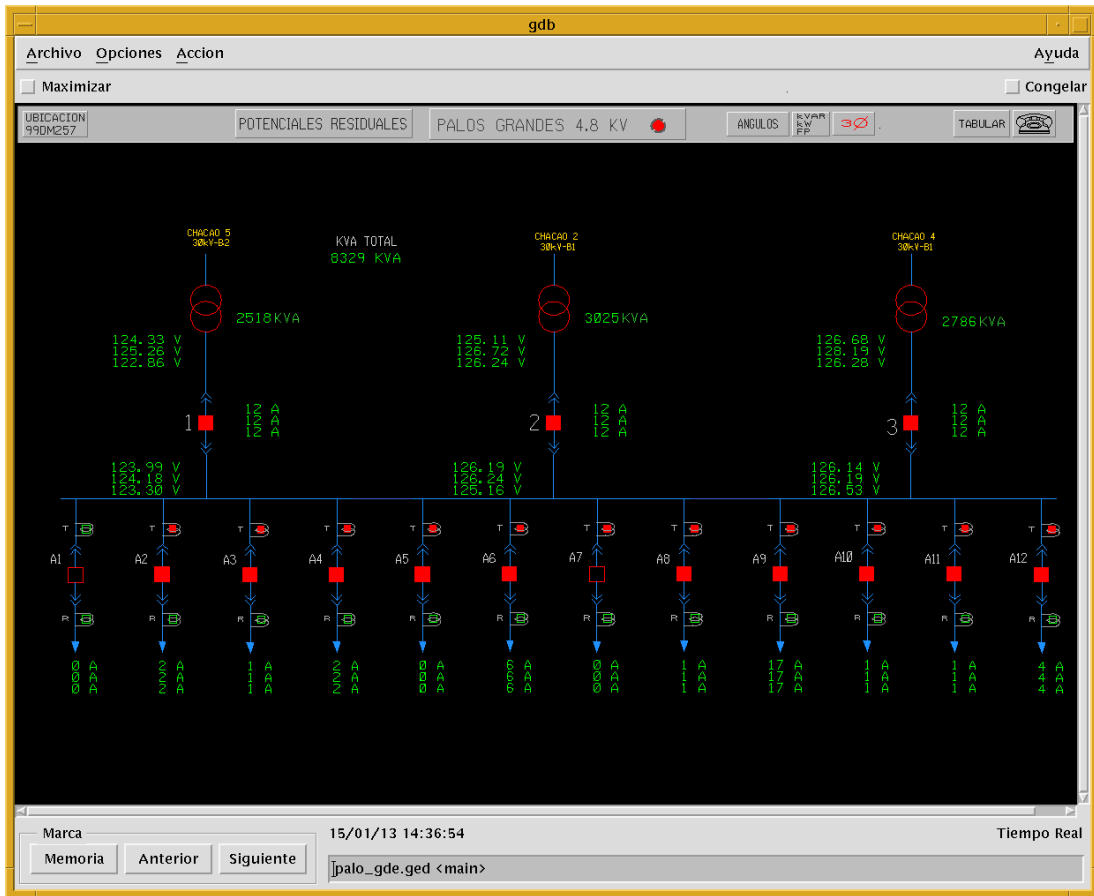


Figura 33. Diagrama unifilar de la subestación Altamira A2.

2.9- Niveles en media tensión de la red de distribución de energía eléctrica de la región capital.

Los niveles en media tensión de la red de distribución de energía eléctrica de la región capital son los siguientes:

- Red de 4,8KV (5KV), alimentado por la red de transmisión de 30KV.
- Red de 8,3KV (9KV), alimentado por la red de transmisión de 69KV.
- Red de 12,47KV (12KV), alimentado por la red de transmisión de 69KV.
- Red de 13,8KV (13KV), alimentado por la red de transmisión de 115KV.

2.10- Tipos de Software de Simulación

Existen diversos tipos de software de cálculo especializados en los sistemas de potencia como por ejemplo: (a) ATP, (b) PSCAD, (c) MATLAB, (d) *DIgSILENT Power Factory*, entre otros. En esta investigación se utilizó el software *DIgSILENT Power Factory 14.1* por ser el software de cálculo utilizado en CORPOELEC-EDC.

2.11- DIgSILENT Power Factory

El software *DIgSILENT Power Factory* es una poderosa herramienta de diseño asistido por computadora (CAD) en el análisis de sistemas eléctricos de potencia. Este programa permite analizar sistemas eléctricos en diversas aplicaciones como: generación, transmisión, distribución e industrial. Este programa posee una característica de integración de funciones de cálculo y bases de datos, que agiliza los cálculos, y combina capacidad de modelado flexible y altamente confiable con algoritmo de solución altamente eficiente.

2.11.1- Funciones Principales

- Interfaces SCADA/GIS.
- Lenguajes Flujo de potencia AC/DC.
- Análisis de corto circuito VDE/ICE.
- Fallas generales/Análisis de eventos.
- Simulación dinámica (RMS).
- Simulación de transitorios electromagnéticos EMT.
- Análisis de autovalores.
- Reducción de redes.
- Coordinación de relés de protección.
- Chequeo de la respuesta de unidades de protección.

- Análisis armónico.
- Calculo de confiabilidad.
- Despacho económico.
- DSL ++ y DPL.
- Diagramas unifilares del sistema modelado.
- Diagrama de configuración de subestaciones.
- Instrumentos virtuales para visualizar resultados.
- Interface A/D Medinas 2000 A/D.

2.11.2- Métodos de Cálculo que ofrece el *DIgSILENT Power Factory*

- Norma alemana VDE
- Norma Internacional IEC
- Norma ANSI IEEE
- Método completo
- Norma IEC61363 (Diseño para radares de aviones, barcos y submarinos)

En esta investigación, para estudiar el modelo creado con el objetivo de observar el comportamiento del sistema de distribución tanto para el estado estable como el estado transitorio bajo la aplicación de maniobras de paralelos, se utilizó la norma ANSI IEEE, ya que por esta norma se rigen en CORPOELEC-EDC. Pero se debe aclarar que las normas VDE, IEC o el método completo también se hubiesen podido utilizar, ya que lo importante es tener una panorámica general del comportamiento del sistema bajo dichas maniobras y no la exactitud de los parámetros eléctricos en un sistema en particular. La norma IEC61363 no es posible utilizarla ya que ésta es de especial uso para el diseño de radares para aviones y submarinos. En la Fig. 34 se muestran las normas mencionadas anteriormente.

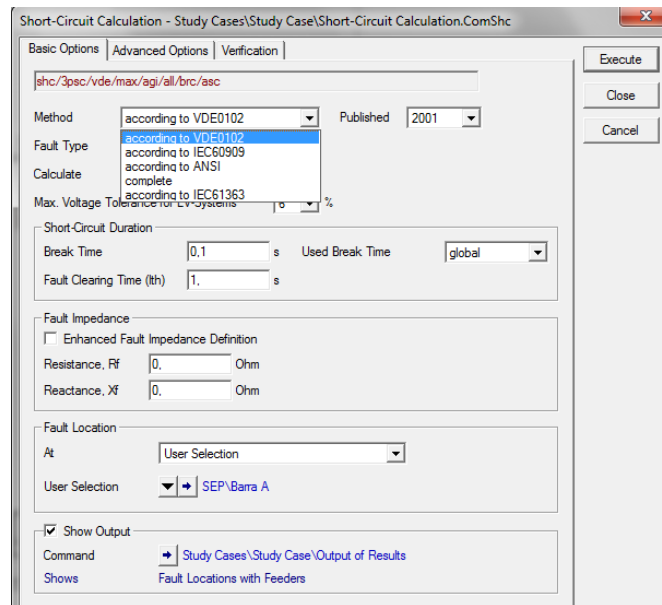


Figura 34. Normas que considera el software *Power Factory* en los cálculos.

2.11.3- Tipos de Fallas que simula el DIGSILENT Power Factory

- Corto circuito trifásico.
- Corto circuito bifásico.
- Corto circuito monofásico – tierra.
- Corto circuito bifásico a tierra.
- Corto circuito monofásico a neutro.
- Corto circuito monofásico a neutro – tierra.
- Corto circuito bifásico a neutro.
- Corto circuito bifásico a neutro – tierra.
- Corto circuito trifásico a neutro.
- Corto circuito trifásico a neutro - tierra.
- Corto circuito trifásico desbalanceado.

La Fig. 35 muestra el menú de todas las fallas antes mencionada. Aunque el *DigSILENT Power Factory* 14.1 no contempla las fallas de conductor abierto (primordial para el trabajo de investigación), el software posee una función llamada eventos de conmutación tal como se muestra en la Fig. 36. Con esta función fue posible realizar la simulación de apertura de cada una de las fases de las líneas entre barras del modelo del sistema de distribución.

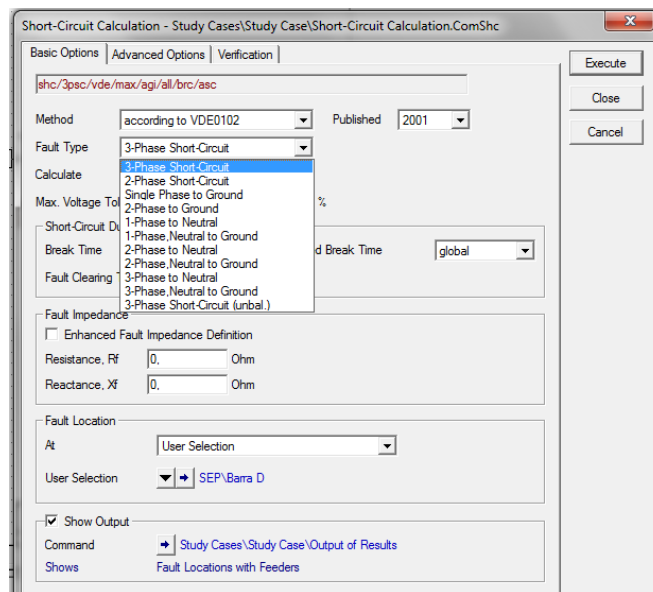


Figura 35. Tipos de Fallas que calcula el *Power Factory*.

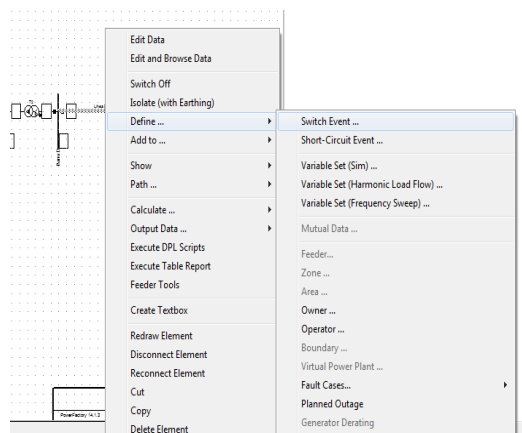


Figura 36. Establecimiento de los eventos de conmutación en el *Power Factory*.

2.11.4- Espacio de trabajo

El programa utiliza un ambiente de trabajo muy similar al que se utiliza en Windows. En la Fig. 37 se puede observar la ventana principal (1), la ventana de administrador de datos (Data Manager) (2), ventana gráfica (3) y la ventana de salida (4).

También se puede observar la barra de título y la barra del menú principal en la parte superior de la Fig. 37, y la barra de estado en la parte inferior.

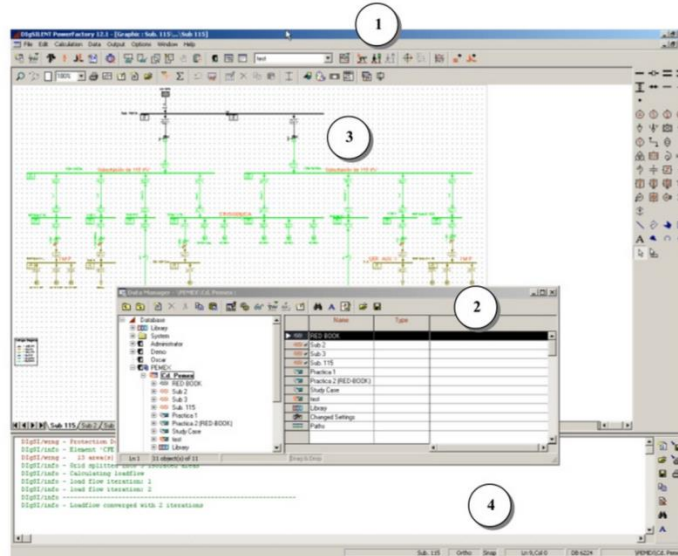


Figura 37. Espacio de trabajo del *Power Factory*.

CAPÍTULO III

3.- MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se habla acerca de: El tipo de la presente investigación; se muestra un diagrama de bloques que describe cada una de las fases de evolución de la investigación; en la fase uno de dicho diagrama se ofrece información concerniente al sistema SCADA; en la fase dos se presenta el modelo circuital genérico utilizado para realizar el estudio en el estado estable y el transitorio; en la fase tres se muestran los procedimientos llevados a cabo para realizar el estudio del sistema de distribución de energía eléctrica de la región capital; y en la fase cuatro se menciona el procedimiento seguido para validar las variables de tensión y corriente que resultan de la aplicación de las maniobras en paralelo con la ayuda del software computacional *DIgSILENT Power Factory*.

3.1- Tipo de investigación

De acuerdo con el alcance del trabajo y a los objetivos planteados, se puede considerar que la presente investigación se enmarca en la conocida como investigación tipo descriptiva. Según Babbie [1]:

“los estudios descriptivos buscan desarrollar una imagen o fiel representación (descripción) del fenómeno estudiado a partir de sus características. Describir en este caso es sinónimo de medir. Miden variables o conceptos con el fin de especificar las propiedades importantes de comunidades, personas, grupos o fenómeno bajo análisis. El énfasis está en el estudio independiente de cada característica, es posible que de alguna manera se

integren las mediciones de dos o más características con el fin de determinar cómo es o cómo se manifiesta el fenómeno. Pero en ningún momento se pretende establecer la forma de relación entre estas características. En algunos casos los resultados pueden ser usados para predecir.”

Según esta clasificación se puede considerar al “*fenómeno*” como la activación de la protección de los neutros como consecuencia de la aplicación de la maniobra en paralelo.

3.2- Método de investigación

La metodología empleada en la presente investigación se desarrolló gradualmente en cuatro fases con la finalidad de lograr cada uno de los objetivos específicos planteados; en la Fig. 38 se muestra la evolución de cada una de las etapas:

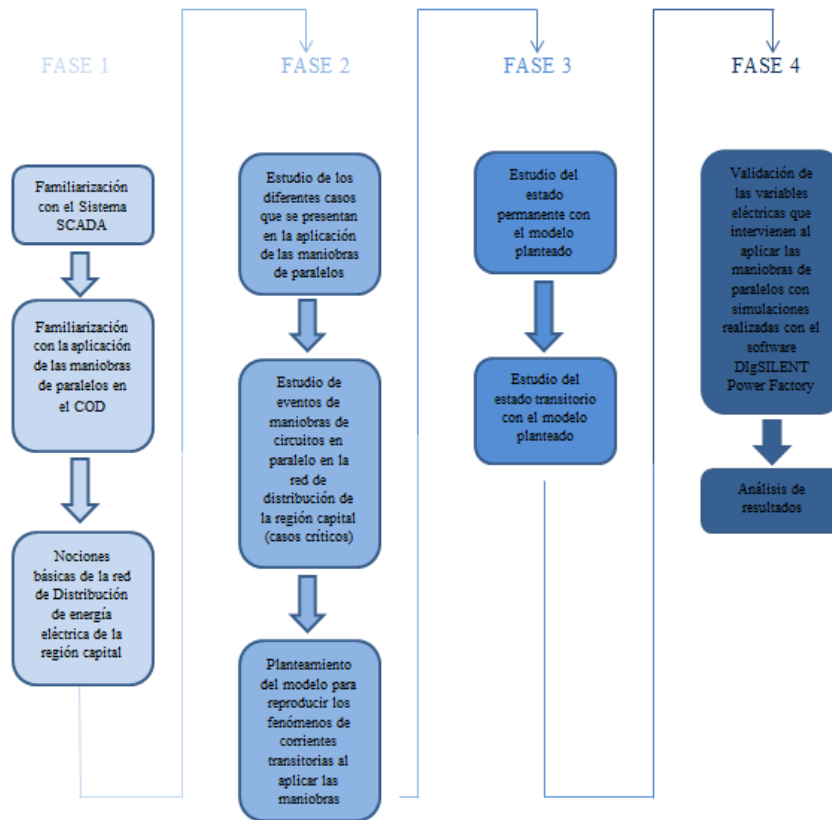


Figura 38. Evolución de la investigación en diagrama de bloques.

3.3- Fases de la investigación

3.3.1- Fase 1. Familiarización con el sistema SCADA y la aplicación de las maniobras de paralelos.

En esta primera fase se obtuvo información concerniente a las especificaciones técnicas generales del sistema SCADA en cuanto a: (a) la configuración funcional tanto del hardware como del software del sistema, (b) cómo se realiza el proceso de supervisión y control, y (c) cómo se hace la adquisición de la data. También en esta fase se adquirió conocimiento en cuanto a la interfaz gráfica

del sistema, ya que con ésta se pueden visualizar de manera expedita los planos digitales de la red de distribución y también los diagramas unifilares correspondientes a cada subestación de la red de distribución. Todo esto hace del sistema SCADA una herramienta de suma importancia en la aplicación de las maniobras en paralelo.

También en esta fase se adquirió información en cuanto al tipo de la red de distribución y los niveles de tensión de la misma.

3.3.2- Fase 2. Casos de circuitos radiales que se presentan en la aplicación de maniobras en paralelo y modelo bajo estudio.

3.3.2.1- Casos que se presentan en la aplicación de maniobras en paralelo.

Cuando se realizan las maniobras en paralelo se presentan tres diferentes casos de conexión, los cuales son: (a) acoplamiento de alimentadores pertenecientes a una misma barra (Fig. 39), (b) acoplamiento de alimentadores pertenecientes a barras distintas, pero de la misma subestación (Fig. 40) y (c) acoplamiento de barras pertenecientes a diferentes subestaciones (Fig. 41).

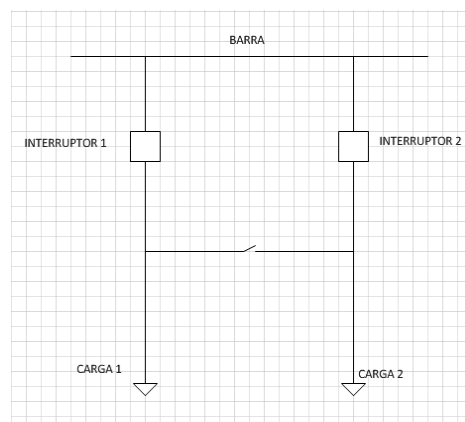


Figura 39. Alimentadores asociados a una misma barra.

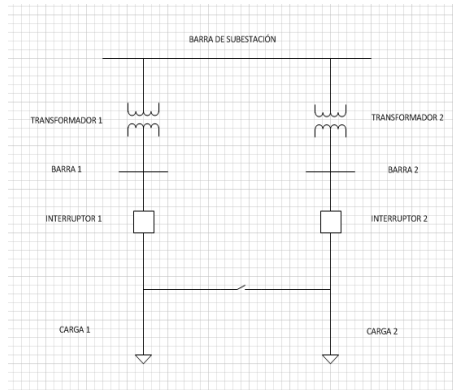


Figura 40. Alimentadores asociados a barras distintas.

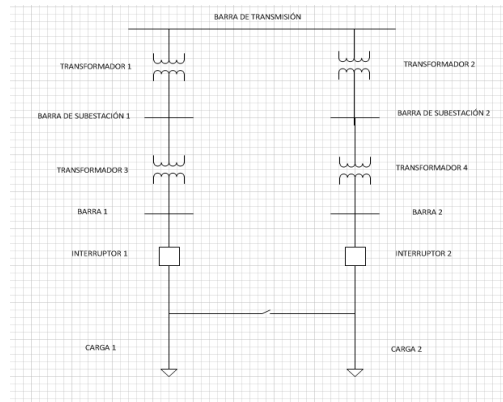


Figura 41. Alimentadores asociados a subestaciones distintas.

3.3.2.2- Modelo circuital bajo estudio.

El modelo circuital genérico utilizado para estudiar el comportamiento de la red de distribución se puede observar en la Fig. 42; fue basado en el tercer caso antes mencionado (Fig. 41) por ser el caso más general de los tres; pero se debe dejar claro que el análisis se puede realizar de manera similar para cualquiera de los otros dos casos (figuras 39 y 40), ver el [anexo B](#) para ver cómo se obtuvo el modelo.

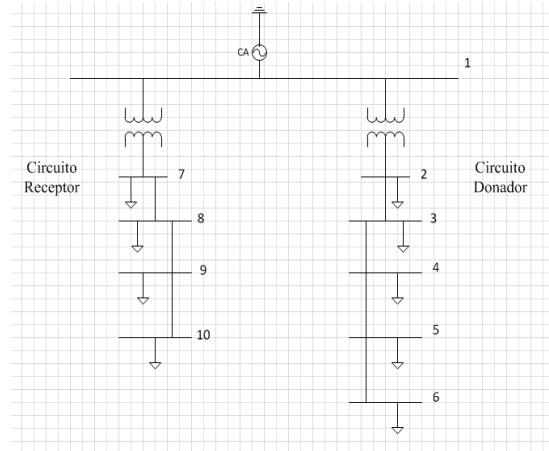


Figura 42. Modelo circuital genérico del sistema bajo estudio.

Se puede ver que el modelo está compuesto por diez barras respectivamente enumeradas en donde la barra uno representa la unión (zona de transmisión) de las dos subestaciones consideradas como circuito receptor y circuito donador (barras B7 y B2 respectivamente); se debe aclarar que el circuito donador es el circuito que se descarga, y el receptor es el circuito que recibe dicha carga. La alimentación de estas dos subestaciones se consideró como un generador de 69 kV y las barras B2 y B7 tienen sendos transformadores de 69/12,47 kV para este caso de análisis.

En el modelo se tomó en cuenta ciertas consideraciones necesarias y suficientes para el análisis tanto estable como transitorio, estas son:

- La diferencia de voltaje entre las barras B1-B6 y las barras B1-B10 no supera una diferencia de voltaje de 5%.
- La corriente que fluye por los troncales (secundarios de los transformadores en el modelo) están en el intervalo de 50% a 60% (esto depende de la cantidad de carga en cada circuito) de la corriente base. Las bases tomadas para el modelo son: 5 MVA, 12,47 kV y 231,5 A.
- El circuito se asumió balanceado para simplicidad del análisis.
- Las cargas se consideraron pasivas y todas iguales.

- La impedancia de las líneas de transmisión entre barras se consideraron puramente reactivas con la finalidad de simplificar los cálculos sin pérdida de generalidad.

3.3.3- Fase 3. Análisis del estado estacionario y transitorio.

Con el modelo circuital genérico se realizó un estudio del estado estable y del estado transitorio del sistema de distribución para observar el comportamiento del mismo cuando se realizan las maniobras en paralelo.

3.3.3.1- Análisis del estado estacionario.

Para el estudio de las variables de tensión y corriente en el estado estable o estacionario se utilizó sólo la red de secuencia positiva (Fig. 43) (ver [anexo C](#)) del modelo circuital genérico (Fig. 42); pero en el análisis de conexiones monofásicas se usaron las tres redes de secuencia. En este circuito se realizaron algunas conexiones trifásicas entre barras del circuito donador y el receptor para observar cómo varían tanto la tensión en cada una de las barras como la corriente de las líneas entre barras. Estas conexiones se realizaron de tal manera de que se traspasara un porcentaje de carga no menor del 60% desde el circuito donador al receptor, con la finalidad de estudiar los casos más críticos del sistema.

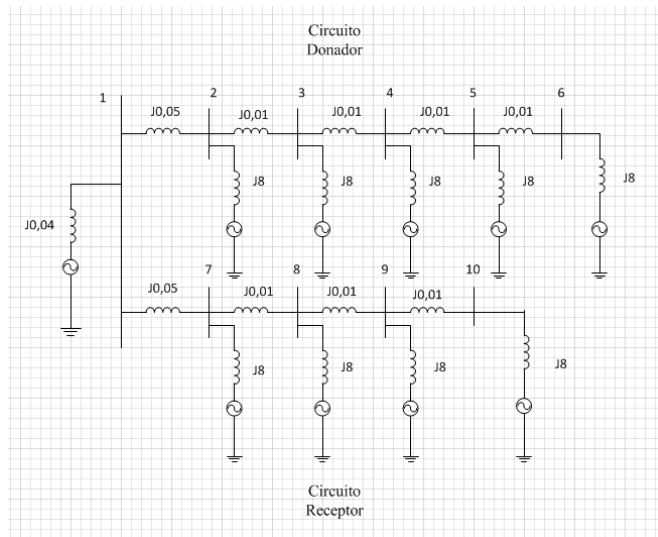


Figura 43. Red de secuencia positiva del modelo circuital genérico.

La estrategia utilizada en el estudio del modelo circuital genérico en el estado estable se hizo en cuatro pasos. El primer paso fue realizar el acople donador-receptor a través de sus respectivas barras B6-B10 como se puede ver en el caso particular mostrado en la Fig. 44; el segundo paso realizado fue la apertura entre las barras B5-B6 del circuito donador (Fig. 45) con el fin de terminar de realizar el traspase de carga del circuito donador al receptor. Como se mencionó anteriormente una vez terminada la reparación o el mantenimiento en la zona fallada del circuito donador, se procede a realizar el tercer paso que consiste en cerrar las barras en el circuito donador, quedando el sistema de nuevo como se muestra en la Fig. 44. Posteriormente el cuarto paso es la desconexión del acople donador-receptor entre las barras B6-B10, quedando el sistema en su estado original o normal de funcionamiento como se muestra en la Fig. 42.

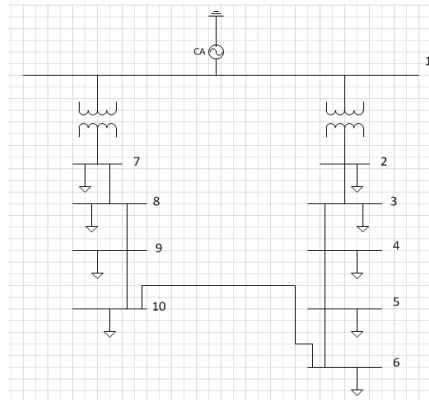


Figura 44. Acople donador-receptor usando las barras B6 y B10.

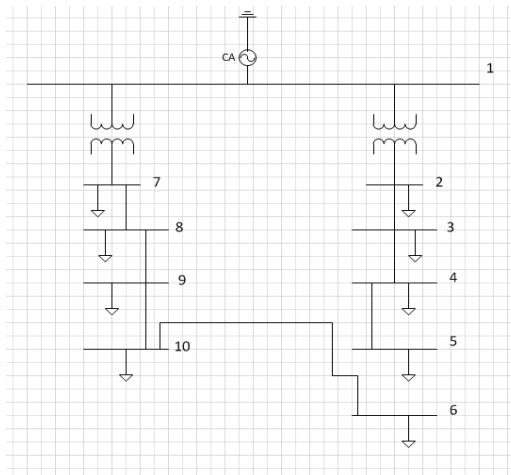


Figura 45. Apertura entre las barras B5-B6 del circuito donador.

De la manera en que se procedió con el modelo circuital genérico, igualmente se realizó con la red de secuencia positiva (ya que sólo esta red es necesaria y suficiente para el estudio del estado estable) del modelo (Fig. 43), con la finalidad de tabular los valores de tensiones en las barras, y corrientes de las líneas entre barras respectivamente. El análisis realizado para el estado estable se hizo con las conexiones de la barra B8 (perteneciente al circuito receptor) con cada una de las barras B3, B4, B5 y B6 (pertenecientes al circuito donador); después se realizaron las

mismas conexiones usando la barra B10 del circuito receptor; esto se hizo con el objetivo de visualizar los casos más críticos de conexiones.

3.3.3.2- Análisis del estado transitorio.

Para realizar el análisis del estado transitorio se requirió utilizar las tres redes de secuencia del modelo circuital genérico (las tres redes son necesarias para el análisis del estado transitorio) y sus respectivas Z_{barra} ; las redes de secuencia negativa y cero se muestran en las figuras 46 y 47 respectivamente.

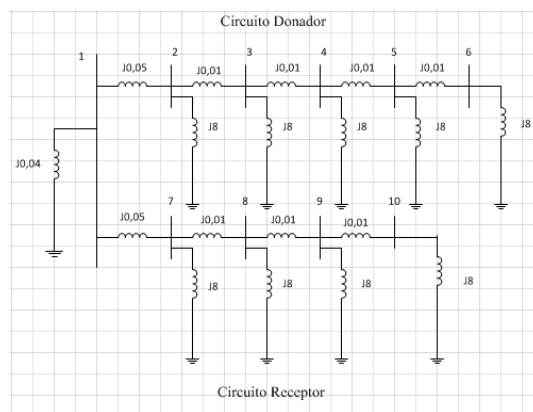


Figura 46. Red de secuencia negativa del modelo circuital genérico.

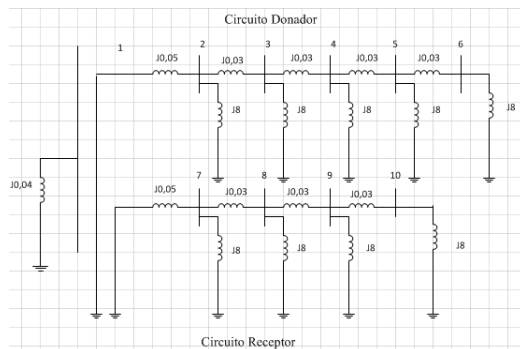


Figura 47. Red de secuencia cero del modelo circuital genérico.

De manera similar al estado estable, la estrategia utilizada en esta parte correspondiente al estudio del estado transitorio, se hizo principalmente el acople donador-receptor pero de manera monofásica, es decir, se realizó el cierre de una sola fase primero (Fig. 48) y se consideraron las corrientes que pasan por los neutros de los transformadores de los circuitos donador y receptor, ya que son estas corrientes las que activan las protecciones de dichos neutros. A continuación se realizó el cierre de la segunda fase (Fig. 49) y se consideraron las mismas corrientes. Seguidamente se cerró la tercera fase (Fig. 50) quedando finalmente el sistema como se muestra en el modelo circuital mostrado en la Fig. 44.

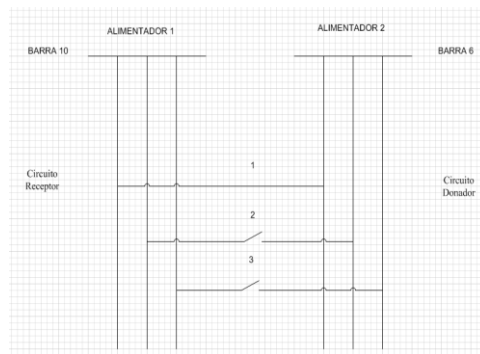


Figura 48. Cierre de una fase en el acople donador-receptor.

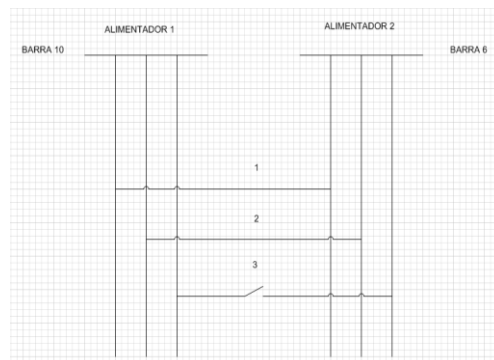


Figura 49. Cierre de dos fases en el acople donador-receptor.

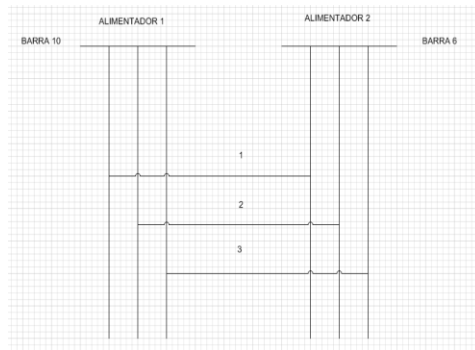


Figura 50. Cierre de las tres fases en el acople donador-receptor.

Una vez que el sistema se encuentra como el mostrado en la Fig. 44, se debe terminar de traspasar la carga al circuito receptor; esto se realizó abriendo una a una las fases de la línea entre las barras B5-B6 quedando el sistema como se muestra en la Fig. 45, considerando las corrientes que fluyen por los neutros de los circuitos donador y receptor.

Todo el procedimiento antes descrito se realizó de manera inversa para regresar el sistema a su estado de funcionamiento normal u original como se muestra en la Fig. 42, siempre tomando en cuenta las corrientes que fluyen por los neutros de los circuitos donador y receptor.

Para el análisis del estado transitorio se hizo necesario el estudio del acople donador-receptor utilizando primero la barra B8 del circuito receptor con cada una de las barras B3, B4, B5 y B6 del circuito donador, y realizando la apertura entre las barras B2-B3 o B3-B4 según lo permita el caso de acople, con el fin de estudiar los casos más críticos de conexión. Luego se hizo el acople donador-receptor de manera similar utilizando la barra B10 del circuito receptor con las mismas barras mencionadas del circuito donador, y se hicieron las mismas aperturas en el circuito donador al hacer el traspase de carga al circuito receptor. Lo anteriormente realizado se hizo con el objetivo de observar siempre el comportamiento de las corrientes que fluyen por los neutros de los circuitos donador y receptor.

3.3.4- Fase 4. Validación de las variables eléctricas con el software computacional DIgSILENT Power Factory 14.1.

Con el software computacional *DIgSILENT Power Factory* 14.1 se realizaron simulaciones con el circuito mostrado en la Fig. 51, donde la rama de circuito conectado al transformador 1 representa al circuito donador, y el circuito conectado al transformador 2 representa al circuito receptor. Se conectó las barras B10 y B6 de manera monofásica para poder observar en el tiempo el comportamiento de las corrientes de los neutros de los transformadores de los circuitos donador y receptor, además de las tensiones y corrientes en cada una de las fases de la línea que se apertura (barras B2-B3) del circuito donador.

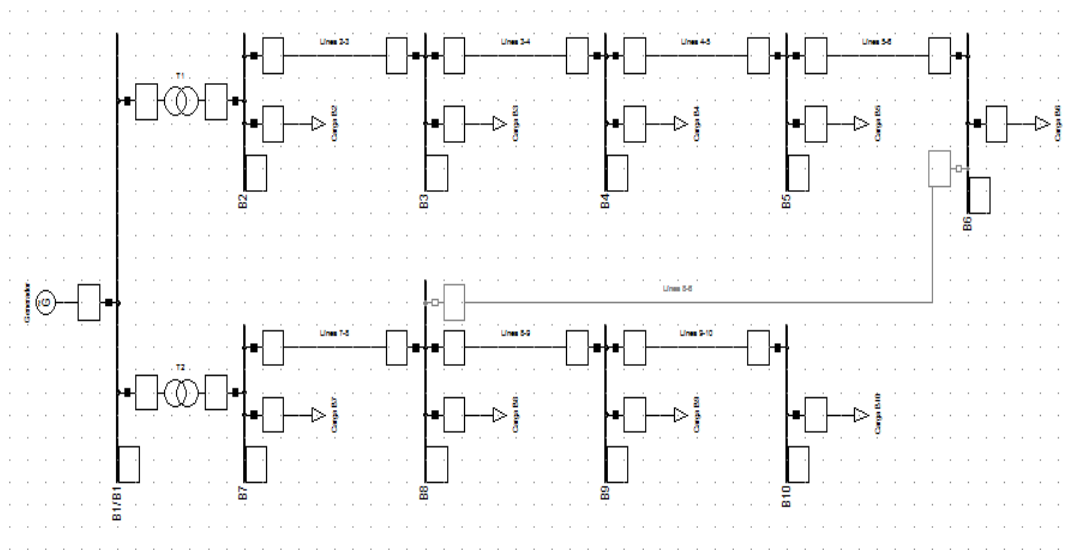


Figura 51. Red de distribución bajo estudio con el *Power Factory*.

En el [anexo A](#) se pueden observar los valores de los transformadores, cargas, líneas, barras y generador, considerados en los cálculos del circuito de la Fig. 51 con el *Power Factory*.

CAPÍTULO IV

4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan todos los resultados obtenidos en el estudio del estado estable y el transitorio; se muestran las conexiones realizadas con las tres redes de secuencia para analizar las fallas asimétricas de conductor abierto y se muestran las gráficas obtenidas con el software computacional *Power Factory* para la validación de las variables de voltaje y corriente.

4.1- Resultados del estado estable.

Cuando se va a realizar el acople donador- receptor se conecta primero una sola fase; en la [tabla 2](#) se observan las magnitudes de corrientes que circulan por dicha fase en el acople donador-receptor.

Tabla 2. Corrientes que circulan por una sola fase en el acople donador-receptor.

Conexión	Corriente de fase (pu)	Corriente de fase (A)
B8-B3	0,043235294	10,00878456
B8-B4	0,06723127	15,56374982
B8-B5	0,073369565	16,98473866
B8-B6	0,079631115	18,43426042
B10-B3	0,016264535	3,765169845
B10-B4	0,040273312	9,323098422
B10-B5	0,047146574	10,91422906
B10-B6	0,054327375	12,57655364

En la [tabla 3](#) se muestran las corrientes que circulan por las fases B y C cuando se está realizando el acople donador-receptor usando las barras B8 y B10 respectivamente.

Tabla 3. Corrientes que circulan por las fases B y C en el acople donador-receptor.

Conexión	Corriente de fase B		Corriente de fase C	
	(pu)	(A)	(pu)	(A)
B8-B3	0,025057782	5,8007687	0,03444003	7,9727199
B8-B4	0,04008371	9,2792064	0,05385634	12,46751
B8-B5	0,045084899	10,43696	0,05923431	13,712488
B8-B6	0,050087209	11,594973	0,06475557	14,990635
B10-B3	0,010018712	2,3192887	0,0131403	3,0419233
B10-B4	0,025045298	5,7978787	0,03263089	7,5539103
B10-B5	0,030050072	6,9564623	0,03851369	8,9157544
B10-B6	0,035056093	8,1153346	0,0622793	14,417391

Cuando se conectan las tres fases, el sistema vuelve a su estado balanceado, y las corrientes que fluyen por cada una de las tres fases entre las barras del acople donador-receptor, se muestran en la [tabla 4](#). En las figuras 52, 53, 54 y 55 se muestran las conexiones de la barra B8 con cada una de las barras del circuito donador, mientras que en las figuras 56, 57, 58 y 59 se muestran las conexiones usando la barra B10.

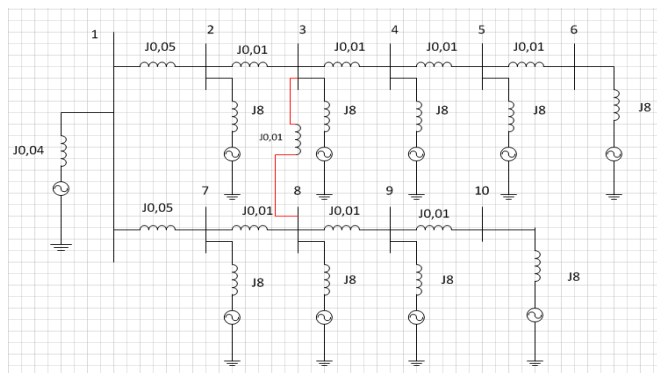


Figura 52. Acople donador-receptor con las barras B8-B3.

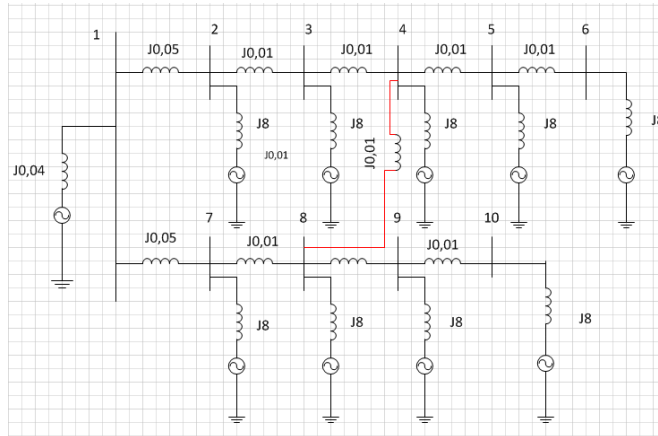


Figura 53. Acople donador-receptor con las barras B8-B4.

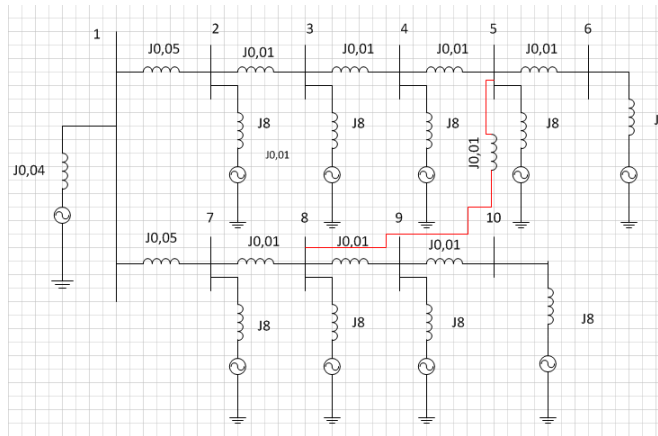


Figura 54. Acople donador-receptor con las barras B8-B5.

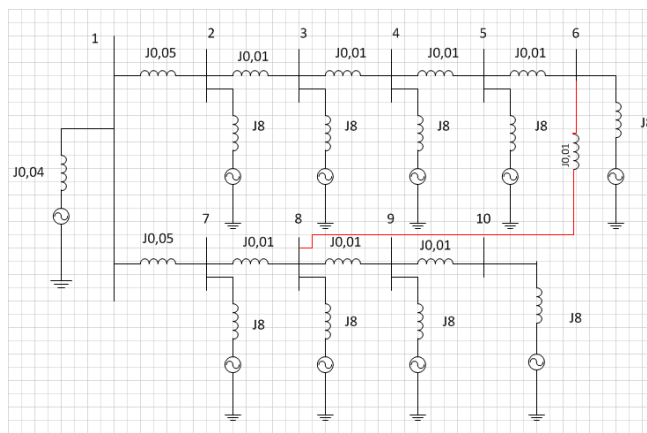


Figura 55. Acople donador-receptor con las barras B8-B6.

Tabla 4. Corrientes estables entre barras (usando B8 y B10).

Conexión	Barra	Voltaje (pu)	Barra	Voltaje (pu)	Corriente (pu)	Corriente (A)
B8-B3	B8	1,0212	B3	1,0207	0,05	11,574785
B8-B4	B8	1,0198	B4	1,019	0,08	18,519656
B8-B5	B8	1,0191	B5	1,0182	0,09	20,834613
B8-B6	B8	1,019	B6	1,018	0,1	23,14957
B10-B3	B10	1,0189	B3	1,0187	0,02	4,6299139
B10-B4	B10	1,0172	B4	1,0167	0,05	11,574785
B10-B5	B10	1,0162	B5	1,0156	0,06	13,889742
B10-B6	B10	1,0159	B6	1,0152	0,07	16,204699

La protección de cada una de las fases se ajusta a $1,5 \cdot I_{nominal}$ del conductor 4/0 de aluminio, conductor que generalmente se usa para la red con nivel de tensión de 12,47 kV; como la corriente nominal es de 360 A para dicho conductor, la protección se ajusta a 540 A. Según las tablas 2, 3 y 4 no hay activación de protecciones de las fases para estos casos de interconexiones

Se puede notar que en cada una de las conexiones, a medida que la barra correspondiente al circuito donador (barras B3, B4, B5 y B6) se aleja de la barra 1 (barra principal o de subestación) su voltaje disminuye, y la diferencia de voltaje entre la barra B8 con cada barra correspondiente al circuito donador aumenta porque la barra B8 está más cerca de la barra B1 (teniendo un voltaje mayor al de las barras B9 y B10) y como consecuencia las corrientes también aumentan.

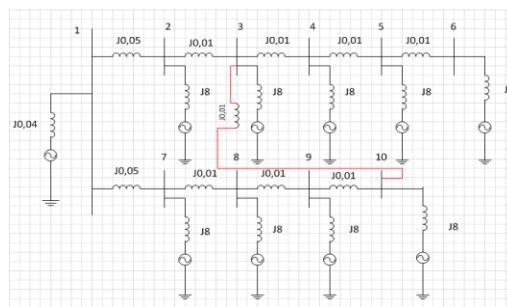


Figura 56. Acople donador-receptor con las barras B10-B3.

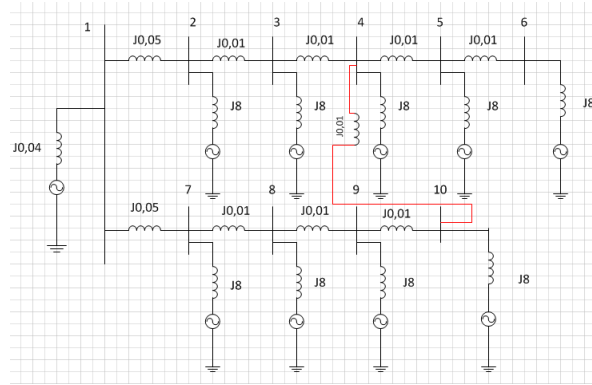


Figura 57. Acople donador-receptor con las barras B10-B4.

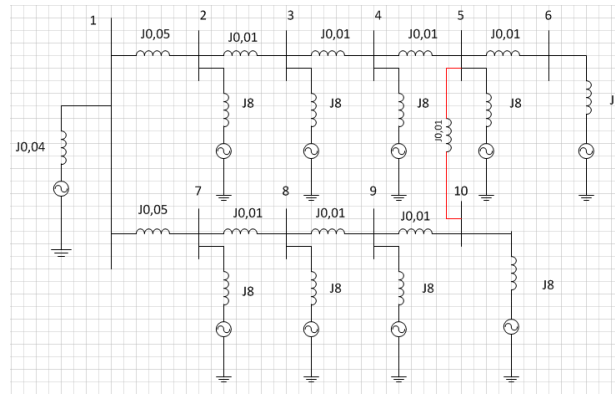


Figura 58. Acople donador-receptor con las barras B10-B5.

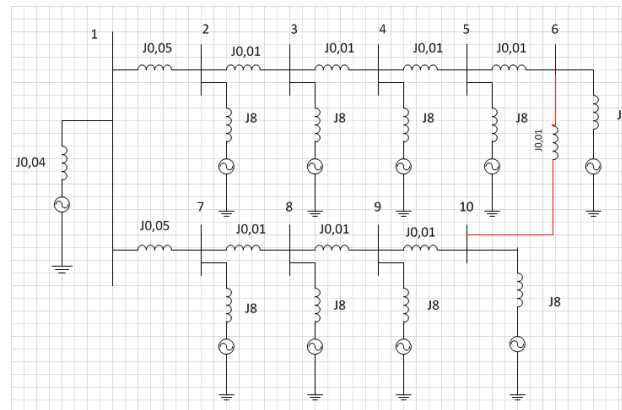


Figura 59. Acople donador-receptor con las barras B10-B6.

En la tabla 5 se puede ver las corrientes que fluyen por cada una de las tres fases en los troncales para las distintas conexiones usando las barras B8 y B10 respectivamente en el acople donador-receptor.

Tabla 5. Corrientes en los troncales. Usando B8 y B10 en el acople donador-receptor.

Conexión	Troncal B1-B2		Troncal B1-B7	
	(pu)	(A)	(pu)	(A)
B8-B3	0,578	133,804513	0,568	131,489556
B8-B4	0,556	128,711608	0,592	137,045453
B8-B5	0,544	125,933659	0,602	139,36041
B8-B6	0,542	125,470668	0,606	140,286393
B10-B3	0,612	141,675367	0,536	124,081694
B10-B4	0,59	136,582461	0,558	129,174599
B10-B5	0,578	133,804513	0,57	131,952547
B10-B6	0,574	132,87853	0,574	132,87853

De la tabla 5 se puede notar que no ocurre la activación de las protecciones de las fases en ambos troncales para estos casos de interconexión.

Una vez realizado el acople donador-receptor a través de la barra B8 o la B10, es importante conocer las diferencias de voltajes que existen entre las barras B2-B3 o B3-B4 y las corrientes circulantes entre dichas barras del circuito donador al momento de realizar la apertura para traspasar la carga al circuito receptor. En la tabla 6 se muestran los valores de corrientes circulantes y voltajes en las barras del circuito donador un momento antes de realizar la apertura entre las barras B2-B3 o B3-B4 según sea el caso; se realizó entre estas barras en particular para traspasar 60% u 80% de la carga al circuito receptor con el objetivo de que el sistema funcione en los estados más críticos.

Tabla 6. Voltajes y Corrientes estables de apertura (usando la B8 y B10).

Conexión	Barra	Voltaje (pu)	Barra	Voltaje (pu)	Corriente (pu)	Corriente (A)
B8-B3	B2	1,0252	B3	1,0207	0,45	104,17306
B8-B4	B2	1,0263	B3	1,022	0,43	99,54315
B8-B4	B3	1,022	B4	1,019	0,3	69,448709
B8-B5	B2	1,0268	B3	1,0227	0,41	94,913236
B8-B5	B3	1,0227	B4	1,0198	0,29	67,133752
B8-B6	B2	1,0269	B3	1,0228	0,41	94,913236
B8-B6	B3	1,0228	B4	1,0199	0,29	67,133752
B10-B3	B2	1,0235	B3	1,0187	0,48	111,11793
B10-B4	B2	1,0246	B3	1,02	0,46	106,48802
B10-B4	B3	1,02	B4	1,0167	0,33	76,39358
B10-B5	B2	1,0252	B3	1,0207	0,45	104,17306
B10-B5	B3	1,0207	B4	1,0175	0,32	74,078623
B10-B6	B2	1,0254	B3	1,0209	0,45	104,17306
B10-B6	B3	1,0209	B4	1,0178	0,31	71,763666

En la tabla 6 se puede observar que estos voltajes y corrientes de ruptura son menores mientras la apertura se realice lo más cerca al punto de acople entre los circuitos donador y receptor; esto es lógico porque representa menos carga traspasada al circuito receptor.

Una vez terminado el mantenimiento o la reparación en la línea fallada del circuito donador, se debe proceder a devolver el sistema a su estado de operación normal u original, o simplemente devolver la maniobra en paralelo. En las tablas 7 y 8 se observan las magnitudes de las corrientes que circulan por las fases cuando se hace el cierre de una o dos fases respectivamente en el circuito donador para regresar el sistema a su estado normal de funcionamiento.

Tabla 7. Corrientes circulantes por una fase. Cierre en el circuito donador.

Conexión	Cierre	Corriente (pu)	Corriente (A)
B8-B3	B2-B3	0,38874346	89,9924373
B8-B4	B2-B3	0,36238816	83,8912993
B8-B4	B3-B4	0,25355482	58,6968492
B8-B5	B2-B3	0,33946559	78,5848242
B8-B5	B3-B4	0,23896171	55,3186073
B8-B5	B4-B5	0,13256125	30,6873584
B8-B6	B2-B3	0,33251196	76,9750885
B8-B6	B3-B4	0,23358521	54,0739708
B8-B6	B4-B5	0,12759007	29,5365527
B8-B6	B5-B6	0,02392314	5,53810363
B10-B3	B2-B3	0,39738265	91,9923727
B10-B4	B2-B3	0,37606635	87,0577421
B10-B4	B3-B4	0,26799363	62,0393724
B10-B5	B2-B3	0,35634518	82,4923754
B10-B5	B3-B4	0,25302326	58,5737951
B10-B5	B4-B5	0,14976664	34,6703323
B10-B6	B2-B3	0,35351277	81,8366861
B10-B6	B3-B4	0,24107934	55,808829
B10-B6	B4-B5	0,14699443	34,028579
B10-B6	B5-B6	0,05432738	12,5765536

Tabla 8. Corrientes por las fases B y C. Cierre en el circuito donador.

Conexión	Cierre	Corriente Fase B		Corriente Fase C	
		(pu)	(A)	(pu)	(A)
B8-B3	B2-B3	0,22551828	52,2065112	0,3097122	71,697041
B8-B4	B2-B3	0,21545434	49,8767522	0,29011186	67,159648
B8-B4	B3-B4	0,15032014	34,7984648	0,2028579	46,960732
B8-B5	B2-B3	0,20540766	47,5509893	0,27291315	63,17822
B8-B5	B3-B4	0,14528368	33,6325464	0,19235366	44,529044
B8-B5	B4-B5	0,08015944	18,5565661	0,10655467	24,666947
B8-B6	B2-B3	0,20538008	47,5446039	0,26885585	62,238972
B8-B6	B3-B4	0,14526273	33,6276963	0,18925915	43,81268
B8-B6	B4-B5	0,08014019	18,5521095	0,10370744	24,007826
B8-B6	B5-B6	0,01502629	3,47852052	0,01944514	4,5014673
B10-B3	B2-B3	0,24047709	55,6694125	0,31948388	73,959143
B10-B4	B2-B3	0,23043811	53,3454311	0,30336974	70,22879
B10-B4	B3-B4	0,16530731	38,2679307	0,21660263	50,142576
B10-B5	B2-B3	0,22538525	52,1757148	0,29031863	67,207514
B10-B5	B3-B4	0,1602726	37,1024184	0,20624568	47,744988
B10-B5	B4-B5	0,09516021	22,0291787	0,12220917	28,290897
B10-B6	B2-B3	0,22537523	52,1733971	0,28880693	66,857562
B10-B6	B3-B4	0,15525006	35,93972	0,19767423	45,760733
B10-B6	B4-B5	0,09515069	22,0269751	0,12076277	27,956061
B10-B6	B5-B6	0,03505609	8,11533461	0,0622793	14,417391

De las tablas 7 y 8 se puede notar que no ocurre la activación de las protecciones de las fases para estos casos de interconexión.

Cuando el sistema está operando normalmente, las barras finales son las barras B6 (para el circuito donador) y la barra B10 (para el circuito receptor); cuando se realiza el acople donador-receptor el voltaje de éstas no deben salirse de un intervalo de tolerancia de 5% de 12.47 kV, es decir 623.5 V entre las barras B1-B6 o entre B1-B10, porque las cargas conectadas a estas barras no reciben el suministro de

energía eléctrica correctamente. En la tabla 9 se puede observar los valores de tensión de estas barras finales cuando se usan las barras B8 y B10 en el acople donador-receptor respectivamente; se puede ver que todos los valores de tensión se encuentran dentro del intervalo permitido, pudiéndose concluir que el sistema funciona correctamente para estos casos de interconexión.

Tabla 9. Diferencia de voltaje entre B1-B6 y B1-B10. (usando B8 y B10 en el acople donador-receptor respectivamente).

Conexión	Voltaje (pu)			ΔV (pu)		ΔV (V)	
	B1	B6	B10	B1-B6	B1-B10	B1-B6	B1-B10
B8-B3	1,0541	1,0131	1,0175	0,041	0,0366	511,27	456,402
B8-B4	1,0541	1,0153	1,0161	0,0388	0,038	483,836	473,86
B8-B5	1,0541	1,017	1,0154	0,0371	0,0387	462,637	482,589
B8-B6	1,0541	1,0181	1,0152	0,036	0,0389	448,92	485,083
B10-B3	1,0541	1,0112	1,019	0,0429	0,0351	534,963	437,697
B10-B4	1,0541	1,0129	1,0172	0,0412	0,0369	513,764	460,143
B10-B5	1,0541	1,0144	1,0162	0,0397	0,0379	495,059	472,613
B10-B6	1,0541	1,0153	1,0159	0,0388	0,0382	483,836	476,354

Una vez que se realizó el acople donador-receptor se procede a realizar la apertura en el circuito donador. La tabla 10 muestra los valores de tensión de las barras finales cuando se hace la apertura entre las barras B2-B3 o B3-B4. Se puede ver que en el acople donador-receptor ya sea usando la barra B8 o la barra B10 todos los valores de tensión de las barras finales B6 y B10 se salen del intervalo de tensión permitido, situación que no es deseable porque las cargas alimentadas por estas barras finales no perciben el suministro de energía eléctrica correctamente. Estrictamente hablando de barras finales, una vez realizada la apertura en el circuito donador, la barra 10 ya no sigue siendo la barra final del circuito receptor, sino la barra B3 o la B4 dependiendo de dónde se realizó la apertura (ver [anexo C](#)). Pero como la barra B6 o la B10 se salen del intervalo de tensión permitido, más rápido lo hacen las barras aguas abajo de éstas.

Tabla 10. Diferencia de voltaje entre B1-B6 y B1-B10. (usando B8 y B10 en el acople donador-receptor y abriendo entre B2-B3 y B3-B4 respectivamente).

Conexión	Apertura	Voltaje (pu)			$\Delta V(V)$		Carga %
		B1	B6	B10	B1-B6	B1-B10	
B8-B3	B2-B3	1,0551	0,9844	0,993	881,629	774,387	80
B8-B4	B2-B3	1,055	0,988	0,9929	835,49	774,387	80
B8-B4	B3-B4	1,0546	0,9958	0,9995	733,236	687,097	60
B8-B5	B2-B3	1,055	0,9905	0,9929	804,315	774,387	80
B8-B5	B3-B4	1,0545	0,9982	0,9995	702,061	685,85	60
B8-B6	B2-B3	1,0551	0,9918	0,993	789,351	774,387	80
B8-B6	B3-B4	1,0546	0,9995	0,9995	687,097	687,097	60
B10-B3	B2-B3	1,0554	0,9719	0,9841	1041,25	889,111	80
B10-B4	B2-B3	1,0553	0,9754	0,984	996,353	889,111	80
B10-B4	B3-B4	1,0547	0,9853	0,9926	865,418	774,387	60
B10-B5	B2-B3	1,0553	0,9779	0,984	965,178	889,111	80
B10-B5	B3-B4	1,0547	0,9877	0,9926	835,49	774,387	60
B10-B6	B2-B3	1,0554	0,9792	0,9841	950,214	889,111	80
B10-B6	B3-B4	1,0548	0,9889	0,9926	821,773	775,634	60

Se concluye entonces que es de suma importancia tener en cuenta la cantidad de carga que se está traspasando al circuito receptor, ya que como se muestra en la tabla 10 si esta carga es igual o mayor a 60% de la carga del circuito donador, en las barras finales de la nueva configuración del sistema no se recibe el suministro eléctrico correctamente.

4.2- Análisis de resultados del estado transitorio.

Cuando se va a realizar el acople donador-receptor, se conecta primero una fase, luego la segunda y finalmente la tercera. Cuando se realizó la conexión de la

primera fase en el modelo circuital del sistema bajo estudio (Fig. 42) se calculó el valor de las corrientes que fluyen por los neutros de los transformadores pertenecientes al circuito donador y el receptor utilizando las barras B8, B9 y B10 del circuito receptor, y las barras B3, B4, B5 y B6 del circuito donador en las interconexiones, y haciendo uso de la Z_{barra} de cada una de las tres redes de secuencia del sistema (figuras 43, 46 y 47).

En la tabla 11 se puede apreciar estos valores de corriente (después de transcurrido el tiempo transitorio). Cabe destacar que las protecciones de ambos neutros (circuito donador y receptor) se activan cuando circula una corriente del 30% de la corriente nominal que puede fluir por los conductores de los troncales de los circuitos donador y receptor respectivamente (troncal entre barras B1-B2, troncal 2 entre barras B1-B7 del modelo genérico); ya se mencionó que la corriente nominal de los conductores es de 360 A, por lo que la corriente de activación o de umbral es de 108 A (ver [anexo E](#)). La tabla 11 muestra que cuando se realiza el cierre de una fase en cada una de las interconexiones no debería ocurrir la activación de las protecciones de ambos neutros porque ninguna de las corrientes supera dicha corriente de umbral.

Tabla 11. Corriente circulante por los neutros (cierre de una fase en el acople donador-receptor).

Conexión	Ineutro T2			Ineutro T1		
	(pu)	(grados)	(A)	(pu)	(grados)	(A)
B8-B3	0,04166	-90	9,6452	0,04124	90	9,54715
B8-B4	0,06398	-90	14,8109	0,06276	90	14,52858
B8-B5	0,07067	-90	16,3597	0,06879	90	15,92489
B8-B6	0,07766	-90	17,97758	0,0752	90	17,40952
B10-B3	0,01549	-90	3,58549	0,01551	90	3,59155
B10-B4	0,03842	-90	8,89323	0,03805	90	8,80949
B10-B5	0,04477	-90	10,3649	0,04421	90	10,2348
B10-B6	0,0518	-90	11,99117	0,05085	90	11,77165

En la tabla 12 se muestran los valores de las corrientes que fluyen por los neutros de ambos transformadores cuando se cierran dos fases. Se puede notar también que para este caso las protecciones de neutro de ambos transformadores tampoco deberían activarse porque no superan el umbral de corriente correspondiente para cada caso. Es importante aclarar, que en este caso de cierre de dos fases, teóricamente lo que ocurre es que las dos fases se conectan al mismo tiempo; en la realidad se cierra una primero y después la otra fase, este efecto se ve mucho más claro en la siguiente sección con las simulaciones realizadas con el *software Power Factory*. Comparando los datos obtenidos en las tablas 11 y 12 se puede observar que el esfuerzo soportado por los seccionadores de las fases es mayor cuando se cierra una fase en vez de dos.

Cuando se cierra la tercera fase, el acople donador-receptor está completo y no debería fluir corriente por el neutro, teóricamente, porque el sistema se equilibra nuevamente cuando desaparece la condición de asimetría debido a los conductores abiertos; esto se puede ver más adelante en la Fig. 66 de las simulaciones realizadas con el software *Power Factory*.

Tabla 12. Corriente circulante por los neutros de T1 y T2 (cierre de dos fases en el acople donador-receptor).

Conexión	Ineutro T2			Ineutro T1		
	(pu)	(grados)	(A)	(pu)	(grados)	(A)
B8-B3	0,0367	90	8,49577	0,03633	-90	8,40941
B8-B4	0,05517	90	12,77232	0,05412	-90	12,52886
B8-B5	0,05965	90	13,80819	0,05806	-90	13,44119
B8-B6	0,06452	90	14,93541	0,06248	-90	14,46347
B10-B3	0,01305	90	3,02121	0,01307	-90	3,02631
B10-B4	0,03216	90	7,44494	0,03186	-90	7,37484
B10-B5	0,03687	90	8,53624	0,03641	-90	8,42909
B10-B6	0,04232	90	9,79755	0,04155	-90	9,61819

Una vez se ha realizado completamente el acople donador-receptor, se procede a realizar la apertura en el circuito donador para traspasar la carga al circuito receptor; la tabla 13 muestra los valores de corriente que fluyen por los neutros de los transformadores T1 y T2 cuando se realiza la apertura de una sola fase en diferentes puntos del sistema. En la columna más a la derecha se puede ver el porcentaje de carga traspasado al circuito receptor y según los datos de esta tabla se podría concluir que no ocurre la activación de las protecciones de neutro para estas interconexiones, pero se debe recordar que para este análisis teórico no se tomaron en cuenta los parámetros: resistencia, capacitancia y conductancia, además de que se asumió el sistema perfectamente balanceado. Más adelante, con las simulaciones hechas con el software computacional *Power Factory* se toman en cuenta estos parámetros y se muestra qué sucede con las corrientes de neutro cuando se realizan estas interconexiones. La tabla 13 muestra un resultado importante, y es que cuando se realiza la apertura lo más cerca posible del punto de acople las corrientes por los neutros son menores, hecho que se debería tomar en cuenta al momento de realizar las maniobras en paralelo.

Tabla 13. Corriente circulante por los neutros de T1 y T2 (apertura de una fase).

Conexión / Apertura	Ineutro T2		Ineutro T1		Carga (%)
	(pu)	(A)	(pu)	(A)	
B8-B3/B2-B3	0,31396	72,68111	0,34051	79	80
B8-B4/B2-B3	0,28601	66,21119	0,3111	72	80
B8-B4/B3-B4	0,20382	47,18356	0,21594	50	60
B8-B5/B2-B3	0,26229	60,71839	0,28764	67	80
B8-B5/B3-B4	0,18762	43,43306	0,20004	46	60
B8-B5/B4-B5	0,1064	24,63185	0,10969	25	40
B8-B6/B2-B3	0,25036	57,95628	0,27768	64	80
B8-B6/B3-B4	0,1795	41,55426	0,19285	45	60
B8-B6/B4-B5	0,09932	22,99298	0,10297	24	40
B8-B6/B5-B6	0,01895	4,38609	0,01898	4,4	20
B10-B3/B2-B3	0,29857	69,11832	0,33606	78	80
B10-B4/B2-B3	0,27915	64,62265	0,31582	73	80
B10-B4/B3-B4	0,20304	47,00356	0,22215	51	60
B10-B5/B2-B3	0,25724	59,54935	0,29326	68	80
B10-B5/B3-B4	0,1879	43,49745	0,20677	48	60
B10-B5/B4-B5	0,11343	26,25875	0,12002	28	40
B10-B6/B2-B3	0,25103	58,11307	0,28846	67	80
B10-B6/B3-B4	0,17519	40,55595	0,19414	45	60
B10-B6/B4-B5	0,10917	25,27261	0,11616	27	40
B10-B6/B5-B6	0,04155	9,61819	0,04232	9,8	20

Similarmente en la tabla 14 se muestra el comportamiento de las corrientes que circulan por los neutros de los transformadores T1 y T2 cuando se realiza la apertura de dos fases en circuito donador para traspasar la carga al receptor; se puede ver que para estos casos de interconexiones, la magnitud de las corrientes son mayores que las magnitudes de la tabla 13. Es importante tomar en cuenta también el desbalance que existe en la realidad en el sistema para concluir si en la realidad se activan o no las protecciones de neutro.

Tabla 14. Corriente circulante por los neutros de T1 y T2 (apertura de dos fases).

Conexión/ Apertura	Ineutro T2		Ineutro T1		Carga (%)
	(A)	(A)	(pu)	(A)	
B8-B3/B2-B3	0,3567	82,57488	0,38686	90	80
B8-B4/B2-B3	0,33099	76,62203	0,36001	83	80
B8-B4/B3-B4	0,23538	54,4884	0,24937	58	60
B8-B5/B2-B3	0,30741	71,16408	0,33712	78	80
B8-B5/B3-B4	0,22064	51,07702	0,23525	54	60
B8-B5/B4-B5	0,12465	28,85602	0,1285	30	40
B8-B6/B2-B3	0,29767	68,90973	0,33016	76	80
B8-B6/B3-B4	0,21442	49,63796	0,23037	53	60
B8-B6/B4-B5	0,11944	27,65048	0,12382	29	40
B8-B6/B5-B6	0,02278	5,27454	0,02283	5	20
B10-B3/B2-B3	0,34996	81,01493	0,3939	91	80
B10-B4/B2-B3	0,33009	76,41399	0,37345	86	80
B10-B4/B3-B4	0,24119	55,83544	0,26389	61	60
B10-B5/B2-B3	0,31077	71,94287	0,35429	82	80
B10-B5/B3-B4	0,22722	52,60156	0,25005	58	60
B10-B5/B4-B5	0,13745	31,81915	0,14543	34	40
B10-B6/B2-B3	0,30486	70,57345	0,35031	81	80
B10-B6/B3-B4	0,21414	49,57254	0,2373	55	60
B10-B6/B4-B5	0,13388	30,99294	0,14245	33	40
B10-B6/B5-B6	0,05085	11,77165	0,0518	12	20

4.3- Simulaciones con el software DIgSILENT Power Factory 14.1

4.3.1- Validación de los parámetros voltaje y corriente por simulaciones.

En esta sección se muestra el comportamiento de las corrientes de los neutros de ambos transformadores para un caso crítico en la aplicación de maniobras

en paralelo y se tabulan los valores de los demás casos de interconexiones en el modelo circuital genérico.

Utilizando el sistema de la Fig. 52 se realiza el acople donador-receptor usando las barras B8-B6 y se hace la apertura entre las barras B2-B3 para mostrar el caso crítico de aplicación de la maniobra en paralelo. Cuando se cierra la primera fase del acople donador-receptor, el comportamiento de la corriente por los neutros de ambos transformadores se puede apreciar en las figuras 60 y 61. Para ambas señales se puede ver que el estado transitorio se extingue en 19 ms aproximadamente, y queda fluyendo una corriente de 23 A para ambos casos. Como la corriente de activación de los neutros es de 108 A, se concluye que para este caso de conexión de una fase no hay activación de las protecciones.

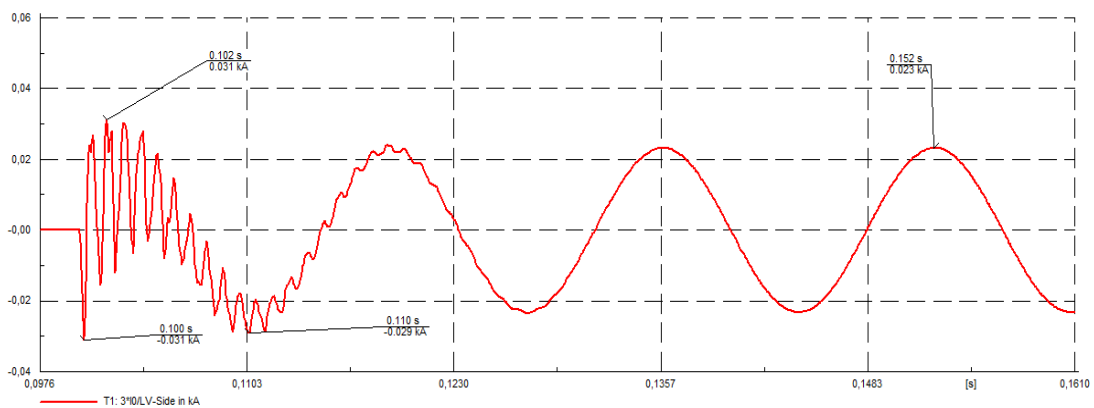


Figura 60. Corriente de neutro (T1). Cierre de una fase (acople B8-B6).

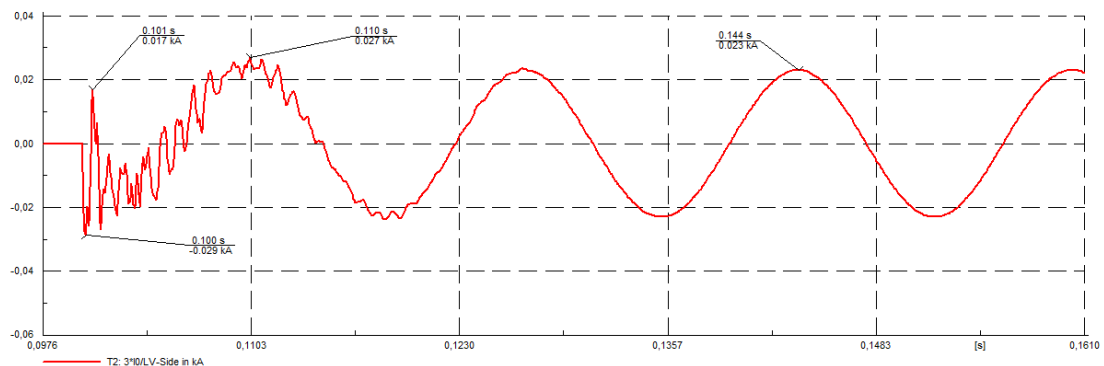


Figura 61. Corriente de neutro (T2). Cierre de una fase (acople B8-B6).

En la tabla 15 se muestran las corrientes picos y de estado estable de los neutros de ambos transformadores cuando se hace la conexión de una sola fase de cualquiera de las conexiones posibles del modelo circuital genérico.

Tabla 15. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores en el acople donador-receptor (una fase).

Conexión	Ineutro T1		Ineutro T2	
	Pico (kA)	Estable (kA)	Pico (kA)	Estable (kA)
B8-B3	0,024	0,016	-0,023	0,017
B8-B4	0,032	0,021	-0,025	0,021
B8-B5	0,036	0,023	-0,028	0,023
B8-B6	0,031	0,023	-0,029	0,023
B9-B3	0,025	0,011	-0,029	0,012
B9-B4	0,029	0,015	-0,031	0,015
B9-B5	0,032	0,017	-0,033	0,017
B9-B6	-0,034	0,017	-0,036	0,017
B10-B3	-0,027	0,008	-0,039	0,011
B10-B4	0,033	0,011	-0,03	0,012
B10-B5	-0,034	0,014	-0,034	0,014
B10-B6	-0,037	0,014	-0,035	0,014

Se observa de la tabla 15 que los valores de corriente por los neutros de ambos transformadores no superan el umbral de corriente de activación, por lo que al conectar una fase en el acople donador-receptor no se deberían activar las protecciones.

En las figuras 62 y 63 se puede ver lo que ocurre con las corrientes de los neutros de T1 y T2 respectivamente cuando se cierran dos fases del acople donador-receptor usando las barras B8-B6. Se observa que ambas corrientes tienen un pico de 20 A; una vez que se extingue el estado transitorio queda fluyendo por el neutro una corriente de 18 A en ambos neutros para este caso. Comparando las figuras 60 y 61

con las figuras 62 y 63, se puede notar que fluye una mayor corriente por el neutro cuando se realiza el cierre de una sola fase en vez de dos.

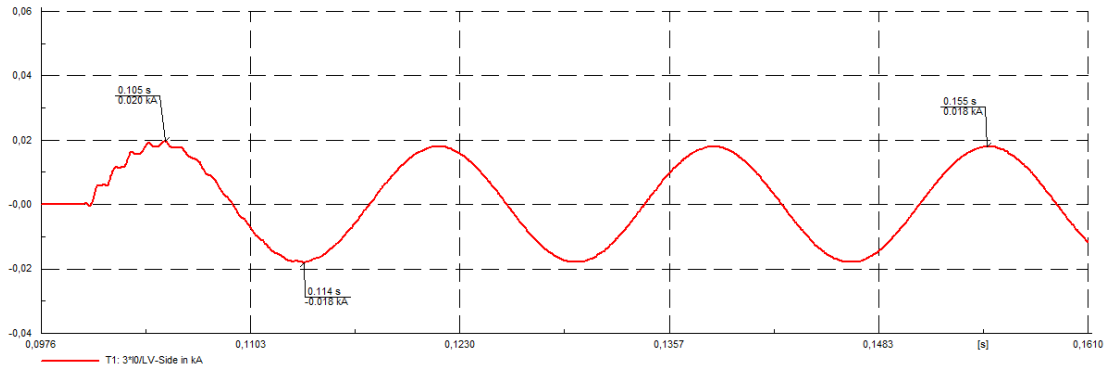


Figura 62. Corriente de neutro (T1). Cierre de dos fases (acople B8-B6).

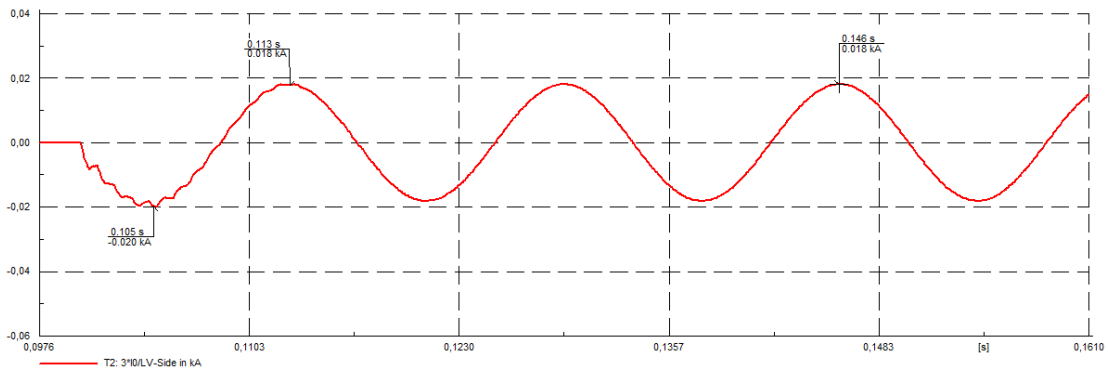


Figura 63. Corriente de neutro (T2). Cierre de dos fases (acople B8-B6).

En la tabla 16 se muestran las corrientes picos y de estado estable de los neutros de ambos transformadores cuando se hace la conexión de dos fases de cualquiera de las conexiones posibles del modelo circuital genérico.

Tabla 16. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores en el acople donador-receptor (dos fases).

Conexión	Ineutro T1		Ineutro T2	
	Pico (kA)	Estable (kA)	Pico (kA)	Estable (kA)
B8-B3	0,013	0,014	-0,015	0,014
B8-B4	0,019	0,017	-0,018	0,017
B8-B5	0,02	0,019	-0,02	0,019
B8-B6	0,02	0,018	-0,02	0,018
B9-B3	0,008	0,008	-0,011	0,01
B9-B4	0,012	0,012	-0,012	0,012
B9-B5	0,014	0,013	-0,015	0,014
B9-B6	0,014	0,013	-0,014	0,014
B10-B3	0,005	0,006	-0,006	0,009
B10-B4	0,009	0,009	-0,009	0,01
B10-B5	0,011	0,01	-0,011	0,011
B10-B6	0,012	0,011	-0,011	0,011

Se observa de la tabla 16 que los valores de corriente por los neutros de ambos transformadores no superan el umbral de corriente de activación, por lo que al conectar dos fases en el acople donador-receptor no se deberían activar las protecciones de neutro.

Es importante aclarar que el cierre de las dos fases para este caso se hace de manera simultánea; en la realidad el cierre se hace cerrando una fase primero luego se cierra la segunda; se puede ver el comportamiento real de la corriente de los neutros de ambos transformadores cuando se hace el cierre consecutivo de las tres fases en las figuras 64 y 65. Se puede ver que cuando las tres fases se encuentran conectadas, la corriente por el neutro es cero, ésto es debido a que el sistema sale del estado de asimetría causado por los conductores abiertos.

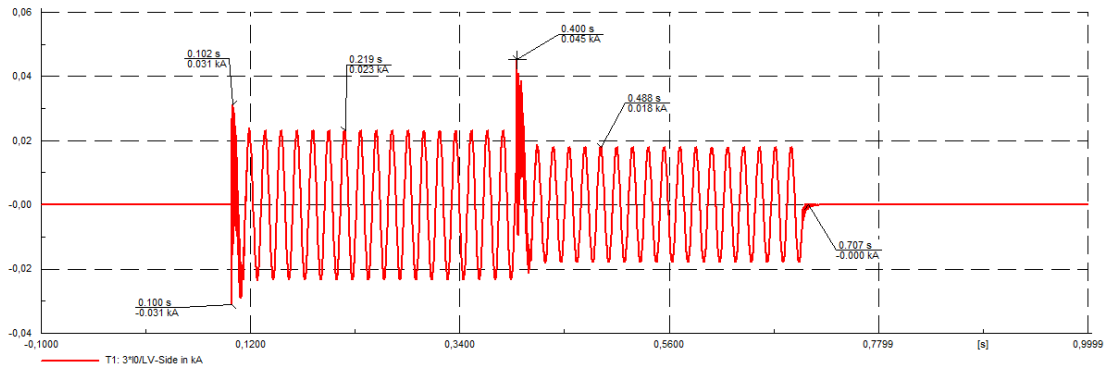


Figura 64. Corriente de neutro de T1. Cierre consecutivo de las tres fases (acople B8-B6).

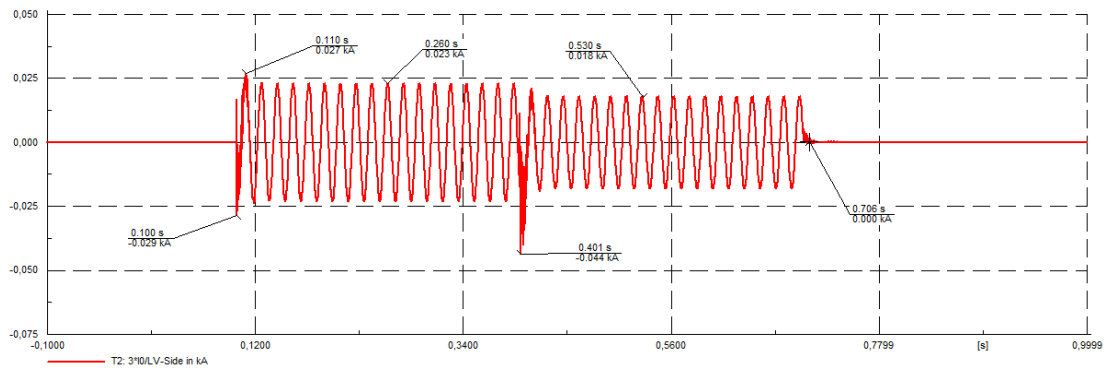


Figura 65. Corriente de neutro de T2. Cierre consecutivo de las tres fases (acople B8-B6).

La señal de la Fig. 64 es la suma de las señales de las figuras 60 y 62; y la señal de la Fig. 65 es la suma de las señales de las figuras 61 y 63.

Cuando las tres fases de la línea entre las barras B8-B6 están conectadas se procede a realizar la apertura en el circuito donador para traspasar la carga al circuito receptor. En las figuras 66 y 67 se puede ver el comportamiento en el tiempo de las corrientes por los respectivos neutros de T1 y T2 cuando se apertura una fase entre las barras B2-B3 del circuito donador.

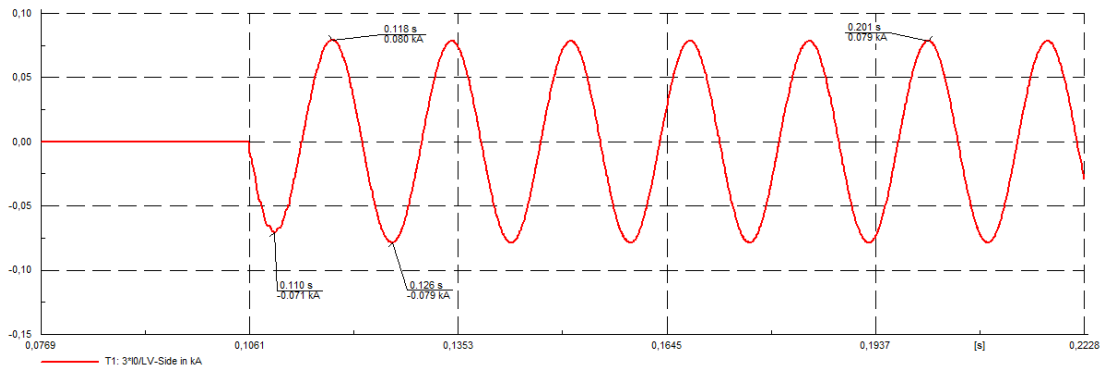


Figura 66. Corriente de neutro (T1). Apertura de una fase (B2-B3).

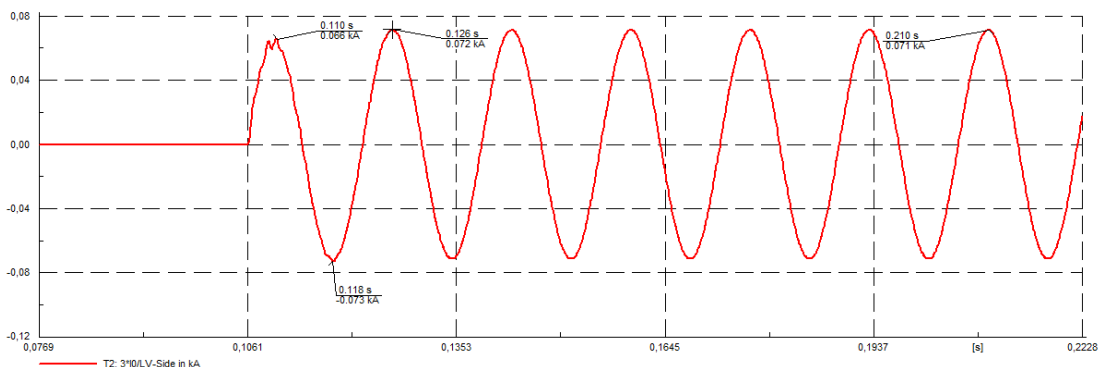


Figura 67. Corriente de neutro (T2). Apertura de una fase (B2-B3).

En la tabla 17 se muestran los valores de corriente que fluyen por los neutros de ambos transformadores para los demás casos de conexión posibles cuando se abre una fase en el circuito donador en el sistema bajo estudio. En esta tabla se asumió el sistema perfectamente balanceado, pero si existiese en la realidad un desbalance de por lo menos 11% de corriente (40 A) entre las tres fases, ocurre la activación de las protecciones de los neutros de ambos transformadores cuando se traspasa 80% de la carga total del circuito donador al receptor para este caso de apertura.

Tabla 17. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores (apertura de una fase en el circuito donador).

Conexión	Apertura	Ineutro T1		Ineutro T2		Carga
		Pico (kA)	Estable (kA)	Pico (kA)	Estable (kA)	%
B8-B3	B2-B3	0,108	0,105	-0,102	0,099	80
B8-B4	B2-B3	0,094	0,092	-0,087	0,086	80
B8-B4	B3-B4	0,066	0,064	-0,062	0,061	60
B8-B5	B2-B3	0,085	0,084	-0,079	0,077	80
B8-B5	B3-B4	0,058	0,057	0,054	0,053	60
B8-B5	B4-B5	0,033	0,032	0,028	0,031	40
B8-B6	B2-B3	0,08	0,079	-0,072	0,071	80
B8-B6	B3-B4	-0,049	0,054	0,046	0,05	60
B8-B6	B4-B5	0,033	0,032	0,029	0,031	40
B8-B6	B5-B6	0,009	0,008	0,007	0,006	20
B9-B3	B2-B3	0,104	0,102	-0,094	0,093	80
B9-B4	B2-B3	0,091	0,09	-0,083	0,083	80
B9-B4	B3-B4	0,065	0,063	-0,06	0,059	60
B9-B5	B2-B3	-0,073	0,083	0,067	0,075	80
B9-B5	B3-B4	-0,05	0,058	0,048	0,054	60
B9-B5	B4-B5	-0,03	0,034	0,028	0,032	40
B9-B6	B2-B3	0,08	0,078	0,066	0,07	80
B9-B6	B3-B4	-0,048	0,052	0,045	0,049	60
B9-B6	B4-B5	-0,028	0,031	0,028	0,028	40
B9-B6	B5-B6	-0,009	0,01	0,008	0,009	20
B10-B3	B2-B3	0,099	0,098	0,08	0,088	80
B10-B4	B2-B3	0,089	0,088	-0,079	0,078	80
B10-B4	B3-B4	0,062	0,063	-0,058	0,057	60
B10-B5	B2-B3	-0,073	0,082	0,067	0,072	80
B10-B5	B3-B4	-0,051	0,058	0,048	0,052	60
B10-B5	B4-B5	-0,029	0,034	-0,033	0,032	40
B10-B6	B2-B3	0,079	0,078	0,063	0,068	80
B10-B6	B3-B4	-0,048	0,055	0,045	0,049	60
B10-B6	B4-B5	-0,028	0,032	0,028	0,03	40
B10-B6	B5-B6	-0,009	0,011	0,01	0,01	20

En las figuras 68 y 69 se puede ver el comportamiento en el tiempo de las corrientes por los respectivos neutros de T1 y T2 cuando se apertura dos fases entre las barras B2-B3 del circuito donador.

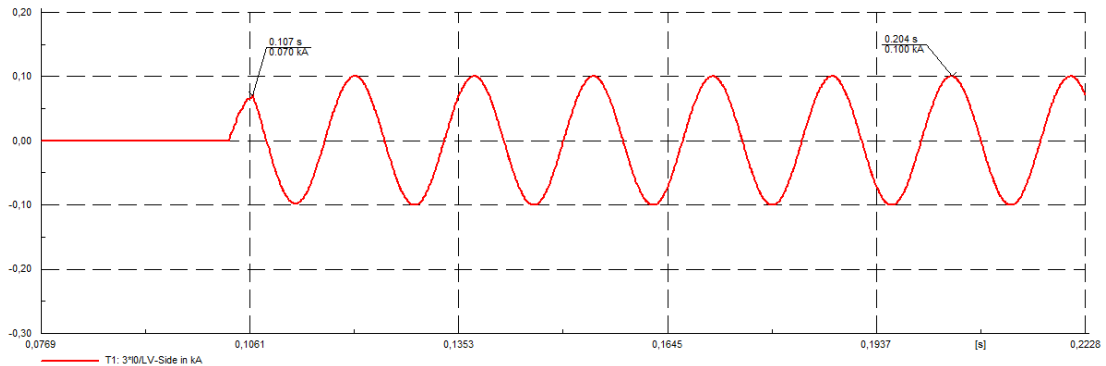


Figura 68. Corriente de neutro (T1). Apertura de dos fases (B2-B3).

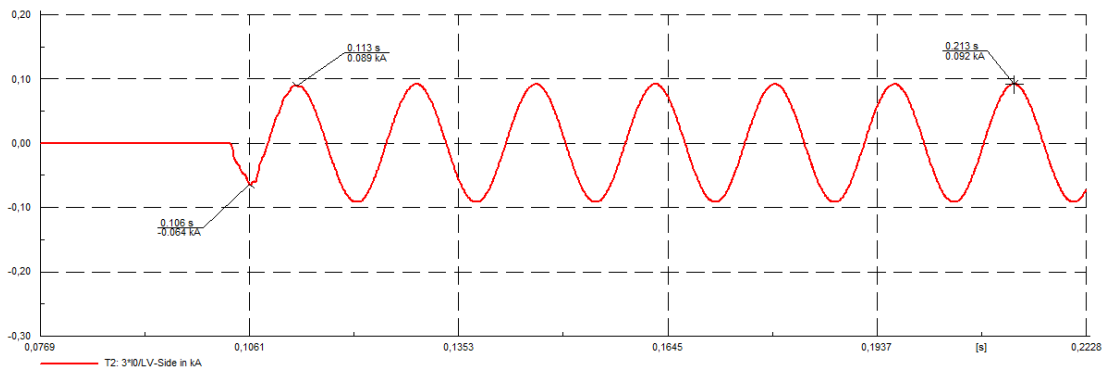


Figura 69. Corriente de neutro (T2). Apertura de dos fases (B2-B3).

En la tabla 18 se muestran los valores de corriente que fluyen por los neutros de ambos transformadores para los demás casos de interconexión posibles cuando se abren dos fases en el circuito donador en el sistema bajo estudio. En esta tabla se asumió el sistema perfectamente balanceado, y se puede observar de las primeras cuatro filas de la tabla que para la conexión B8-B3 hasta B8-B5 habría activación de las protecciones de los neutros, pero si existiese por lo menos un 5% de corriente de desbalance entre las tres fases (18 A), en todos los casos de interconexión en donde se traspasa 80% de la carga total del circuito donador, se activarían las protecciones de neutro para ambos transformadores para este caso de apertura.

Tabla 18. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores (apertura de dos fases en el circuito donador).

Conexión	Apertura	Ineutro T1		Ineutro T2		Carga
		Pico (kA)	Estable (kA)	Pico (kA)	Estable (kA)	%
B8-B3	B2-B3	0,124	0,123	-0,117	0,116	80
B8-B4	B2-B3	0,113	0,112	-0,075	0,105	80
B8-B4	B3-B4	0,079	0,078	-0,076	0,075	60
B8-B5	B2-B3	0,071	0,105	-0,067	0,097	80
B8-B5	B3-B4	0,073	0,072	-0,046	0,069	60
B8-B5	B4-B5	0,027	0,041	-0,026	0,039	40
B8-B6	B2-B3	0,101	0,1	-0,064	0,092	80
B8-B6	B3-B4	0,048	0,069	-0,045	0,065	60
B8-B6	B4-B5	0,027	0,038	-0,026	0,037	40
B8-B6	B5-B6	0,007	0,01	-0,007	0,008	20
B9-B3	B2-B3	0,084	0,124	-0,081	0,114	80
B9-B4	B2-B3	0,077	0,113	-0,072	0,103	80
B9-B4	B3-B4	0,081	0,08	-0,051	0,075	60
B9-B5	B2-B3	0,071	0,106	-0,066	0,096	80
B9-B5	B3-B4	0,051	0,074	-0,07	0,069	60
B9-B5	B4-B5	0,044	0,043	-0,042	0,041	40
B9-B6	B2-B3	0,071	0,102	-0,064	0,091	80
B9-B6	B3-B4	0,072	0,071	-0,045	0,066	60
B9-B6	B4-B5	0,03	0,041	-0,026	0,039	40
B9-B6	B5-B6	0,009	0,012	-0,008	0,012	20
B10-B3	B2-B3	0,082	0,122	-0,076	0,11	80
B10-B4	B2-B3	0,076	0,112	-0,069	0,1	80
B10-B4	B3-B4	0,081	0,08	-0,051	0,074	60
B10-B5	B2-B3	0,071	0,106	-0,065	0,094	80
B10-B5	B3-B4	0,075	0,074	-0,046	0,068	60
B10-B5	B4-B5	0,031	0,045	-0,029	0,042	40
B10-B6	B2-B3	0,071	0,103	-0,063	0,09	80
B10-B6	B3-B4	0,073	0,072	-0,066	0,065	60
B10-B6	B4-B5	0,031	0,043	-0,027	0,04	40
B10-B6	B5-B6	0,01	0,014	-0,009	0,014	20

Una vez terminadas las labores de reparación o de mantenimiento en el sistema, se debe devolver la maniobra en paralelo para que el sistema vuelva a su funcionamiento normal.

En las figuras 70 y 71 se puede ver el comportamiento en el tiempo de las corrientes por los respectivos neutros de T1 y T2 cuando se cierra una fase entre las barras B2-B3 del circuito donador.

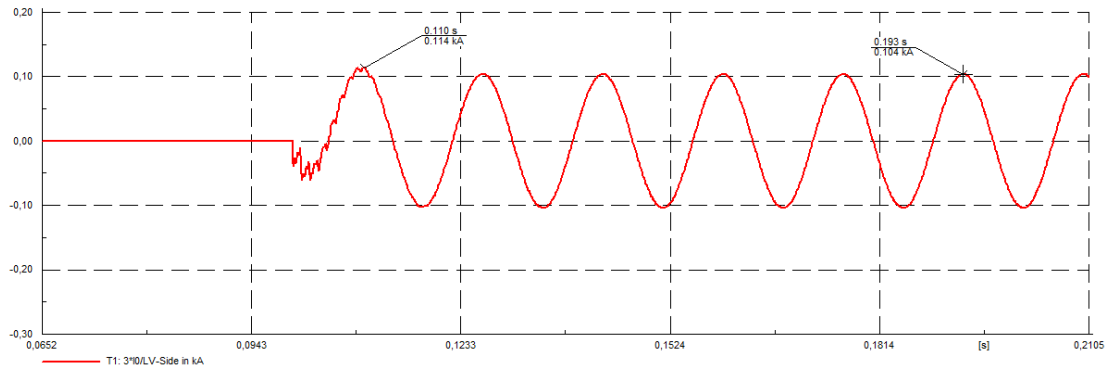


Figura 70. Corriente de neutro (T1). Cierre de una fase (B2-B3).

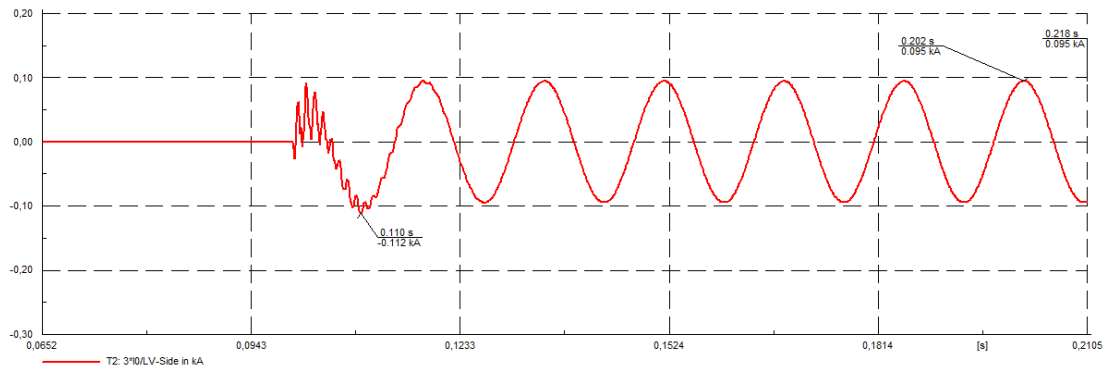


Figura 71. Corriente de neutro (T2). Cierre de una fase (B2-B3).

En la [tabla 19](#) se muestran los valores de corriente que fluyen por los neutros de ambos transformadores para los demás casos de conexión posibles cuando se cierra una fase en el circuito donador en el sistema bajo estudio. El análisis es el mismo que el realizado a la tabla 18, y debe ser así ya que el análisis para la apertura de dos fases es mismo al cierre de una fase.

Tabla 19. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores (cierre de una fase en el circuito donador).

Cierre	Conexión	Ineutro T1		Ineutro T2		Carga
		Pico (kA)	Estable (kA)	Pico (kA)	Estable (kA)	%
B2-B3	B8-B3	0,151	0,127	-0,149	0,12	80
B2-B3	B8-B4	0,134	0,115	-0,131	0,108	80
B2-B3	B8-B5	0,122	0,108	-0,12	0,1	80
B2-B3	B8-B6	0,114	0,104	-0,11	0,095	80
B2-B3	B9-B3	0,145	0,129	-0,141	0,118	80
B2-B3	B9-B4	0,13	0,118	-0,128	0,107	80
B2-B3	B9-B5	0,12	0,111	-0,117	0,099	80
B2-B3	B9-B6	0,116	0,107	-0,109	0,094	80
B2-B3	B10-B3	0,142	0,129	-0,132	0,115	80
B2-B3	B10-B4	0,129	0,118	-0,122	0,105	80
B2-B3	B10-B5	0,122	0,111	-0,112	0,098	80
B2-B3	B10-B6	0,117	0,108	-0,11	0,094	80
B3-B4	B8-B4	0,095	0,08	-0,095	0,077	60
B3-B4	B8-B5	0,084	0,074	-0,086	0,07	60
B3-B4	B8-B6	0,086	0,071	-0,081	0,066	60
B3-B4	B9-B4	0,094	0,083	-0,091	0,078	60
B3-B4	B9-B5	0,083	0,077	-0,088	0,071	60
B3-B4	B9-B6	0,086	0,074	-0,084	0,068	60
B3-B4	B10-B4	0,094	0,084	-0,09	0,077	60
B3-B4	B10-B5	0,087	0,078	-0,084	0,071	60
B3-B4	B10-B6	0,089	0,075	-0,077	0,068	60
B4-B5	B8-B5	0,051	0,041	-0,05	0,04	40
B4-B5	B8-B6	0,05	0,039	-0,047	0,038	40
B4-B5	B9-B5	0,052	0,045	0,053	0,043	40
B4-B5	B9-B6	0,049	0,042	0,052	0,04	40
B4-B5	B10-B5	0,053	0,046	0,055	0,044	40
B4-B5	B10-B6	0,051	0,044	0,054	0,041	40
B5-B6	B8-B6	-0,032	0,01	0,035	0,008	20
B5-B6	B9-B6	-0,033	0,013	-0,034	0,012	20
B5-B6	B10-B6	-0,035	0,014	-0,037	0,014	20

En las figuras 72 y 73 se puede ver el comportamiento en el tiempo de las corrientes por los respectivos neutros de T1 y T2 cuando se cierran dos fases entre las barras B2-B3 del circuito donador.

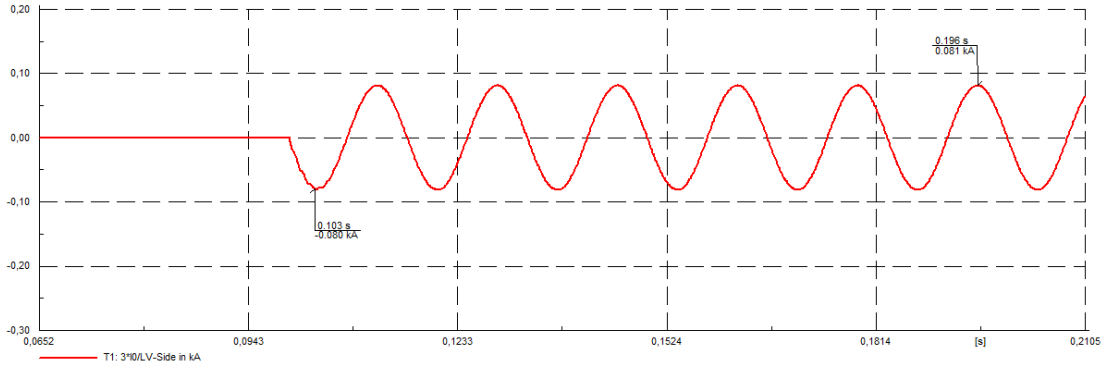


Figura 72. Corriente de neutro (T1). Cierre de dos fases (B2-B3).

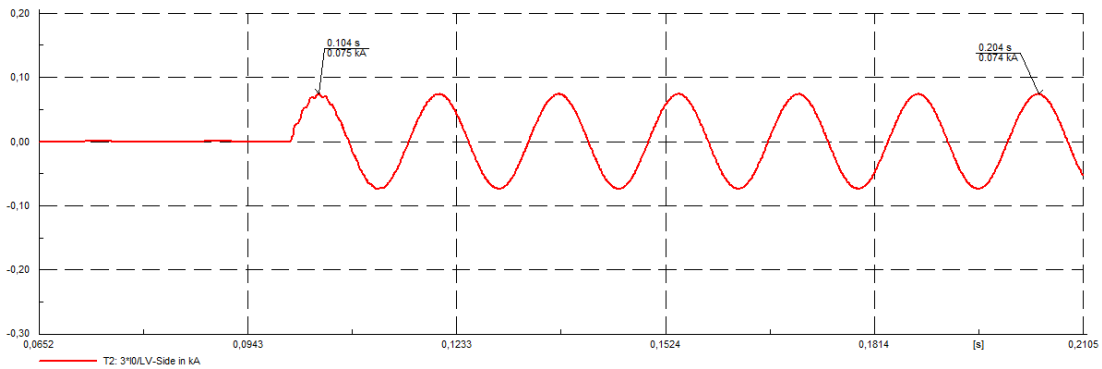


Figura 73. Corriente de neutro (T2). Cierre de una fase (B2-B3).

En la tabla 20 se muestran los valores de corriente que fluyen por los neutros de ambos transformadores para los demás casos de conexión posibles cuando se cierran dos fases en el circuito donador en el sistema bajo estudio. El análisis es el mismo que el realizado a la tabla 17, y debe ser así ya que el análisis para la apertura de una fase es el mismo al cierre de dos fases.

Tabla 20. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores (cierre de dos fases en el circuito donador).

Cierre	Conexión	Ineutro T1		Ineutro T2		Carga
		Pico (kA)	Estable (kA)	Pico (kA)	Estable (kA)	%
B2-B3	B8-B3	-0,109	0,108	0,105	0,101	80
B2-B3	B8-B4	-0,094	0,095	0,087	0,088	80
B2-B3	B8-B5	-0,085	0,086	0,079	0,079	80
B2-B3	B8-B6	-0,08	0,081	0,074	0,074	80
B2-B3	B9-B3	-0,107	0,106	0,098	0,097	80
B2-B3	B9-B4	-0,094	0,094	0,087	0,085	80
B2-B3	B9-B5	-0,086	0,087	0,079	0,077	80
B2-B3	B9-B6	-0,083	0,082	0,075	0,073	80
B2-B3	B10-B3	-0,107	0,103	0,096	0,092	80
B2-B3	B10-B4	-0,094	0,093	0,085	0,082	80
B2-B3	B10-B5	-0,088	0,086	0,078	0,075	80
B2-B3	B10-B6	-0,085	0,083	0,073	0,071	80
B3-B4	B8-B4	-0,064	0,066	0,062	0,062	60
B3-B4	B8-B5	-0,057	0,059	0,055	0,056	60
B3-B4	B8-B6	-0,054	0,055	0,051	0,051	60
B3-B4	B9-B4	-0,066	0,066	0,062	0,061	60
B3-B4	B9-B5	-0,06	0,06	0,056	0,055	60
B3-B4	B9-B6	-0,057	0,057	0,052	0,052	60
B3-B4	B10-B4	-0,067	0,066	0,061	0,06	60
B3-B4	B10-B5	-0,06	0,06	0,055	0,054	60
B3-B4	B10-B6	-0,056	0,057	0,053	0,051	60
B4-B5	B8-B5	-0,031	0,033	0,031	0,031	40
B4-B5	B8-B6	-0,029	0,031	0,029	0,029	40
B4-B5	B9-B5	-0,035	0,035	0,033	0,033	40
B4-B5	B9-B6	-0,033	0,033	0,031	0,031	40
B4-B5	B10-B5	-0,036	0,036	0,034	0,033	40
B4-B5	B10-B6	-0,034	0,033	0,032	0,031	40
B5-B6	B8-B6	0,009	0,008	0,006	0,006	20
B5-B6	B9-B6	-0,1	0,01	0,01	0,009	20
B5-B6	B10-B6	-0,012	0,011	0,012	0,011	20

En las figuras 74 y 75 se puede ver el comportamiento en el tiempo de las corrientes por los respectivos neutros de T1 y T2 cuando se abre una fase entre las barras B8-B6 para desacoplar ambos circuitos.

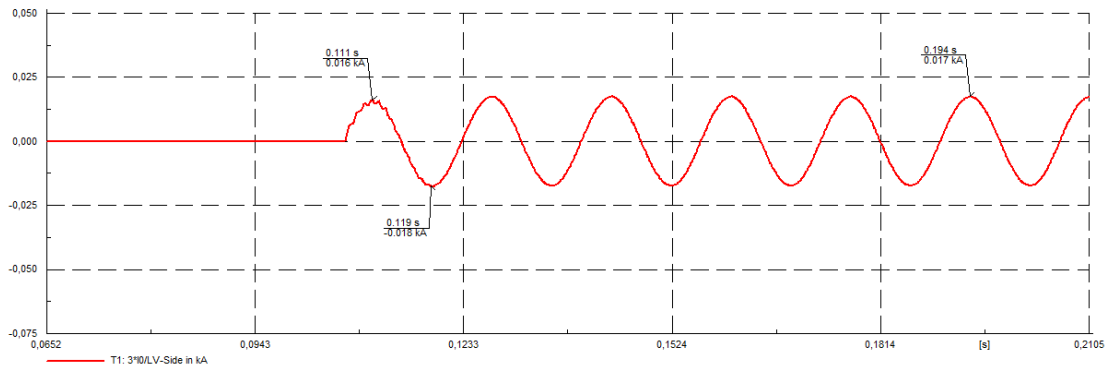


Figura 74. Corriente de neutro de T1. Apertura de una fase (B8-B6).

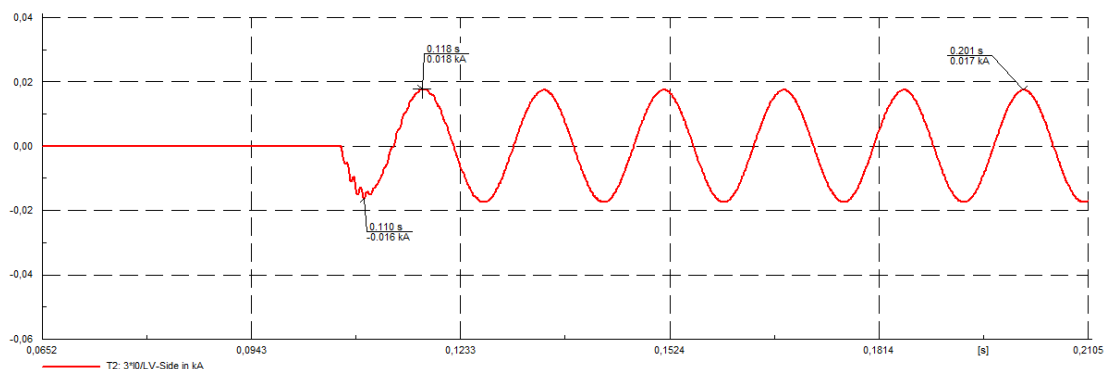


Figura 75. Corriente de neutro de T2. Apertura de una fase (B8-B6).

En la tabla 21 se muestran los valores de corriente que fluyen por los neutros de ambos transformadores para los demás casos de desconexión posibles cuando se abre una fase para desacoplar ambos circuitos del sistema bajo estudio. Se observa que en ninguna desconexión no se supera la corriente umbral de activación de las protecciones en ambos neutros.

Tabla 21. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores en el desacople donador-receptor (una fase).

Desacople	Ineutro T1		Ineutro T2	
	Pico (kA)	Estable (kA)	Pico (kA)	Estable (kA)
B8-B3	-0,012	0,014	-0,012	0,014
B8-B4	0,015	0,017	-0,015	0,017
B8-B5	0,017	0,018	-0,016	0,018
B8-B6	-0,018	0,017	-0,016	0,017
B9-B3	0,009	0,008	0,011	0,01
B9-B4	-0,012	0,011	-0,01	0,012
B9-B5	0,011	0,013	-0,011	0,013
B9-B6	0,012	0,013	-0,011	0,013
B10-B3	0,008	0,006	-0,008	0,009
B10-B4	0,008	0,009	-0,008	0,01
B10-B5	0,009	0,01	-0,009	0,011
B10-B6	0,009	0,01	-0,01	0,011

En las figuras 76 y 77 se puede ver el comportamiento en el tiempo de las corrientes por los respectivos neutros de T1 y T2 cuando se abren dos fases entre las barras B8-B6 para desacoplar ambos circuitos.

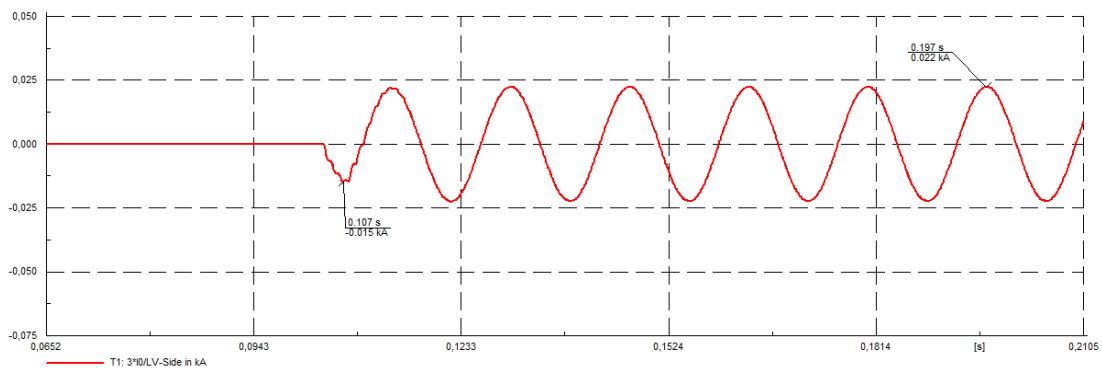


Figura 76. Corriente de neutro de T1. Apertura de dos fases (B8-B6).

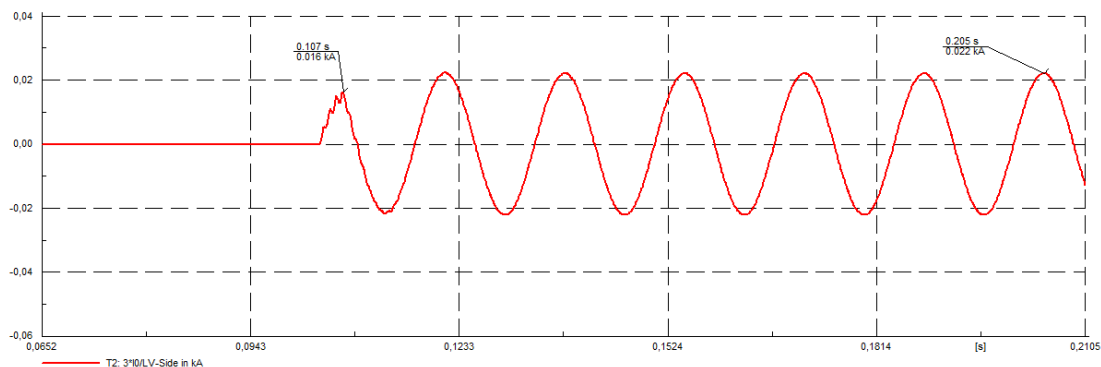


Figura 77. Corriente de neutro de T2. Apertura de dos fases (B8-B6).

En la tabla 22 se muestran los valores de corriente que fluyen por los neutros de ambos transformadores para los demás casos de desconexión posibles cuando se abren dos fases para desacoplar ambos circuitos del sistema bajo estudio. Se observa que en ninguna desconexión no se supera la corriente umbral de activación de las protecciones en ambos neutros.

Tabla 22. Corriente circulante por los neutros de ambos transformadores en el desacople donador-receptor (dos fases).

Desacople	Ineutro T1		Ineutro T2	
	Pico (kA)	Estable (kA)	Pico (kA)	Estable (kA)
B8-B3	-0,011	0,016	0,012	0,016
B8-B4	-0,014	0,021	0,014	0,02
B8-B5	-0,015	0,023	0,016	0,022
B8-B6	-0,014	0,022	0,016	0,022
B9-B3	-0,009	0,011	0,009	0,012
B9-B4	-0,01	0,015	0,011	0,015
B9-B5	-0,011	0,017	0,012	0,017
B9-B6	-0,011	0,017	0,012	0,017
B10-B3	-0,007	0,008	0,007	0,011
B10-B4	-0,008	0,011	0,009	0,012
B10-B5	-0,009	0,013	0,009	0,014
B10-B6	-0,009	0,014	0,009	0,014

Además del comportamiento de las corrientes que circulan por los neutros de los circuitos donador y receptor respectivamente, también se tomó en cuenta el comportamiento de las corrientes que fluyen por cada una de las tres fases de los troncales, ya que también existen protecciones que pueden activarse al momento de aplicar las maniobras en paralelo. En las figuras 78 y 79 se puede apreciar el comportamiento de las corrientes en cada una de las tres fases de los troncales al momento de aplicar las maniobras en paralelo. Se tomó el caso de conexión B8-B3 realizando el cierre de una fase y de dos fases en el circuito donador entre B2-B3 que es uno de los casos más críticos al momento de aplicar la maniobra en paralelo según las [tablas 19](#) y [20](#).

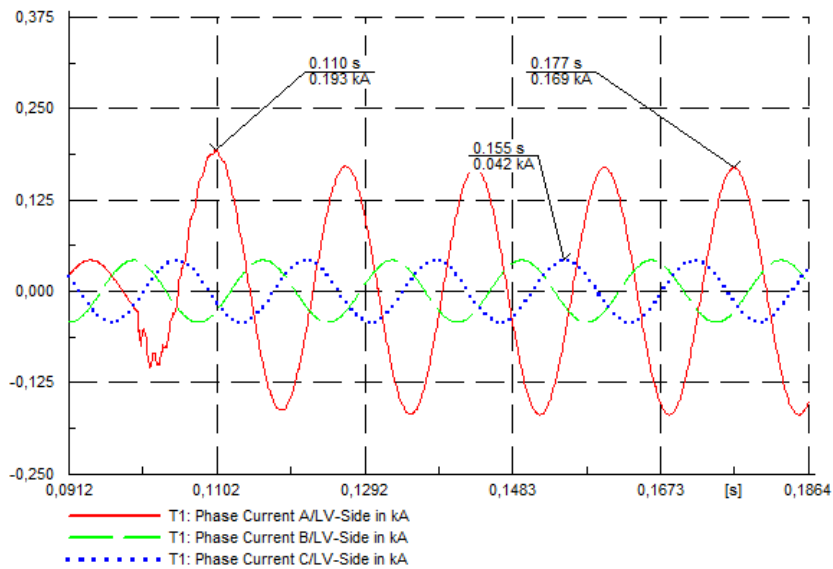


Figura 78. Corrientes de las tres fases en el troncal del circuito donador. Acople con B8-B3 y conexión de una fase entre B2-B3.

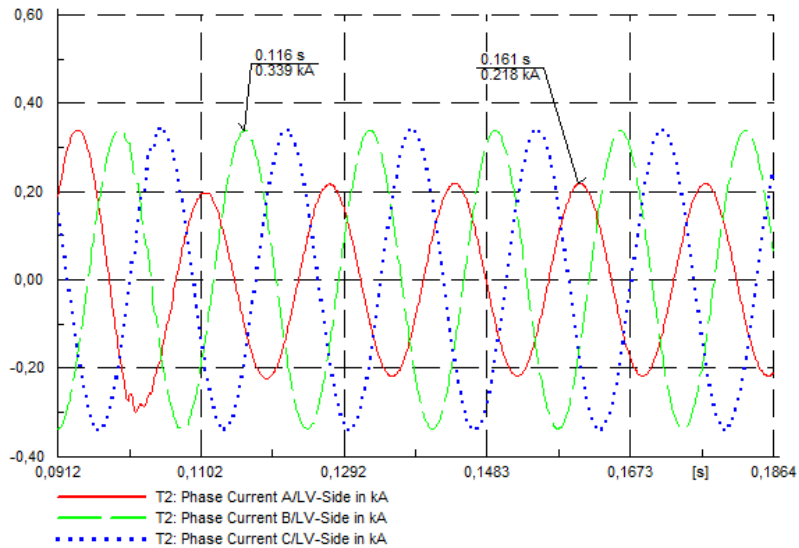


Figura 79. Corrientes de las tres fases en el troncal del circuito receptor.
Acople con B8-B3 y conexión de dos fases entre B2-B3.

Las protecciones de las fases se calibran a 50% por encima de la corriente nominal de los conductores utilizados; el conductor utilizado por ser 4/0 de aluminio, la corriente nominal es de 360 A, por lo que las protecciones de las fases se calibran a 540 A. Según las figuras 78 y 79, no existe un exceso de carga en las fases al momento de aplicar las maniobras en paralelo para ningún caso de conexión entre barras.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la presente investigación se pueden concluir los siguientes aspectos:

Las protecciones de los neutros de los circuitos donador y receptor están calibrados con el objetivo de contemplar un desbalance entre las fases de los circuitos troncales de hasta el 30% de la corriente nominal del conductor 4/0 de aluminio (108 A), por lo que más del 90% de las aplicaciones de las maniobras en paralelo en la red de distribución de energía eléctrica de la región capital son exitosas. El porcentaje restante de estas maniobras no lo son, debido a que se produce la activación de las protecciones de los neutros de los circuitos donador y receptor.

Para conocer la causa de lo antes mencionado se planteó un modelo circuital genérico, con el cual se reprodujeron las corrientes transitorias y estables que fluyen por los neutros de los circuitos donador y receptor y los voltajes en cada una de las barras en el sistema de distribución cuando se realizan las maniobras en paralelo. Con dicho modelo se llegó a la conclusión de que la causa de la activación de las protecciones de los neutros de ambos transformadores es que se traspasa un porcentaje de carga igual o mayor al 80% de la carga total del circuito donador al receptor, sin tomar en cuenta el desbalance que existe entre las fases de los circuitos troncales antes de aplicar las maniobras en paralelo, concluyéndose también que aunque las protecciones funcionan correctamente, en la calibración de las mismas no se tomó en cuenta la excesiva cantidad de carga que se traspasa para algunos casos de interconexión en la red.

Además de las condiciones que los operadores del COD – Santa Rosa toman en cuenta para la aplicación de las maniobras en paralelo, se debe observar que se debería traspasar un porcentaje de carga menor al 80% de la carga total del circuito

donador al receptor, dependiendo del desbalance que exista entre las corrientes de las fases de los circuitos troncales.

Con las interconexiones realizadas en el modelo circuital genérico se pudo diagnosticar también que no existe un exceso de carga en las fases de los circuitos troncales al momento de la aplicación de las maniobras en paralelo, lo cual explica en parte porque no se disparan las mismas en el sistema.

Todo el análisis realizado en la presente investigación fue validado haciendo simulaciones con el software computacional *DIgSILENT Power Factory*; los resultados obtenidos en las simulaciones concuerdan con el análisis teórico realizado tanto al estado estable como al transitorio.

RECOMENDACIONES

Es recomendable traspasar un porcentaje de carga menor al 60% de la carga total del circuito donador al receptor; ya que así se evitaría la activación de las protecciones de los neutros de ambos transformadores y también que las barras finales, una vez se ha realizado el acople donador-receptor, salgan del intervalo del 5%.

Si en la aplicación de la maniobra en paralelo es necesario traspasar un porcentaje mayor o igual al 80% de la carga total del circuito donador al receptor, el operador de mesa debería tener otra alternativa para la aplicación de dicha maniobra, como por ejemplo realizarla en dos o más pasos, es decir, utilizar dos o más circuitos que puedan alimentar dicha carga a traspasar para evitar la alta diferencia de voltaje en el circuito donador a la hora de regresar el sistema a su estado normal de funcionamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Babbie, Earl. *Fundamentos de la investigación social*, (libro).--México: Ed. Thomson Paraninfo, S.A., Consulta realizada: Mayo, 3, 2013, p. 98.

[2] González, Tito. (2003). *La responsabilidad social de la empresa, Un buen Negocio*. Disponible en: www.monografias.com. Consulta realizada: Mayo, 3, 2013, p. 45.

[3] C.L. Fortescue, *Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks (Método de las coordenadas simétricas aplicado a la solución de redes polifásicas)*, Trans. AIEE, vol. 37, 1918, p. 1027-1140.

BIBLIOGRAFÍA

Internet.

HERNÁNDEZ, Nelson. *La situación del sector eléctrico en Venezuela*. 2008 [fecha de consulta: Abril 2013].

Disponible en: <http://www.soberania.org/Articulos/articulo_4550.htm>.

QUINTINI, César. *El suministro eléctrico en Venezuela: situación y perspectivas*. 2005 [fecha de consulta: Abril del 2013].

Disponible en:

<http://www.acading.org.ve/info/comunicacion/pubdocs/suministro_electrico_vzla.pdf>.

PALMIRA. *La energía eléctrica como industria básica de Venezuela energía termoeléctrica*. 2005 [fecha de consulta: Abril 2013].

Disponible en: <<http://riie.com.ve/?a=32409>>.

RODRÍGUEZ, Mery. *Tipos de energía*. 2005 [fecha de consulta: mayo 2013].

Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos84/tipos-energia/tipos-energia.shtml>>.

CORPOELEC. *Quiénes Somos*. 2007 [fecha de consulta: febrero 2013].

Disponible en: <<http://www.corpoelec.gob.ve/qui%C3%A9nes-somos>>.

CORPOELEC. *Generadores eléctricos*. 2009 [fecha de consulta: abril 2013].

Disponible en: <<http://www.consumid.org/quien/corpoelec>>.

WIKIPEDIA. *Protecciones de sistemas de potencia*. 2005 [fecha de consulta: mayo 2013].

Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Protecciones_de_sistemas_de_potencia>.

FING. *Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia*. 2007 [fecha de consulta: mayo 2013].

Disponible en:

<<http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/eseq/material/Curso%20estabilidad,%20Protecciones.pdf>>.

Tesis

Solórzano, E. (2006). *Documentación de los procedimientos para la atención de circuitos de distribución de 4.8KV*. Memoria para optar al Título de Técnico Superior en Potencia, Departamento de Potencia, Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacios, Caracas, Venezuela.

Marcano, R.; Yáñez, L (2007). *Establecimiento de las condiciones de trabajo bajo emergencia de la subestación Maury y análisis de los circuitos para obtener mejoras potenciales*. Memoria para optar al Título de Técnico Superior en Potencia, Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacios, Caracas, Venezuela.

Libros

Grainger J., Stevenson W (1996). *Análisis de sistemas de potencia*, México: MCGRAW –HILL Interamericana de México, S.A.

Greenwood, Allan (1971). *Electrical transients in Power Systems*, (2^{da} Ed). NY: Wiley Interscienc.

Weedy, B.M. (1982). *Sistemas eléctricos de gran potencia*, (2^{da} Ed). Barcelona: Reverté.

Siegert, Luis A (1997). *Alta tensión y sistemas de transmisión*, (3^{ra} Reimpresión). México.

Westinghouse Electrical Corporation (1950). *Electrical Transmission and Distribution reference book*, (4^{ta} Ed).USA: Autor.

Norma.

Norma de diseño (IID) 4-2006. *Protección de alimentadores primarios de distribución*. La electricidad de caracas. Normas de Ingeniería.--13 p.

GLOSARIO

Aguas Arriba: Término que se utiliza para hacer referencia a un punto que está más cerca al sistema de transmisión teniendo como referencia cualquier punto de la red de distribución, ya sea una subestación, un transformador, un interruptor, etc.

Aguas Abajo: Término que se utiliza para hacer referencia a un punto que está más cerca al sistema de transmisión teniendo como referencia cualquier punto de la red de distribución, ya sea una subestación, un transformador, un interruptor, etc.

CAE: Software computacional para simular desempeño y así poder hacer mejoras a los diseños de productos o bien apoyar a la resolución de problemas de ingeniería para una amplia gama de industrias. Esto incluye la simulación, validación y optimización de productos, procesos y herramientas de manufactura.

Circuito Donador: Circuito que necesita ser descargado, por razones de falla o mantenimiento, traspasándose la carga al circuito receptor.

Circuito Receptor: Circuito que asume la carga del circuito donador.

Convertidor Analógico-Digital (ADC): Es un dispositivo electrónico capaz de convertir una señal analógica de voltaje en una señal digital con un valor binario.

Convertidor Digital-Analógico (DAC): Es un dispositivo electrónico capaz de convertir señales digitales con datos binarios en señales de corriente o de tensión analógica.

Hardware: Se refiere a todas las partes tangibles de un sistema informático; sus componentes son: eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos. Son cables, gabinetes o cajas, periféricos de todo tipo y cualquier otro elemento físico involucrado.

Lockout: Término empleado para referirse a la acción de poner fuera de servicio ya sean transformadores, líneas de transmisión, barras, etc.

Maniobras en paralelo: Son maniobras que consisten en conectar y desconectar en puntos geográficos y eléctricamente distintos, dos circuitos de distribución pertenecientes o no a una misma subestación de distribución, por un tiempo relativamente corto, con la finalidad de descargar uno de los dos circuitos involucrados, ya sea por razones de emergencia o de mantenimiento, sin que haya interrupciones del servicio eléctrico para los usuarios.

Ph: Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.

Seccionador Eléctrico: Es un dispositivo mecánico capaz de mantener aislada una instalación eléctrica de su red de alimentación según una norma. Es un dispositivo de ruptura lenta, puesto que depende de la manipulación de un operario. Este dispositivo por sus características, debe ser utilizado siempre sin carga o en vacío.

Seccionalizador Eléctrico: Es un elemento que distingue entre faltas permanentes de la red y faltas momentáneas (pasajeras), que desaparecen espontáneamente. El 90% de las faltas en redes de distribución pertenecen al segundo tipo y, sin embargo, conducen a la actuación de fusibles que abren innecesariamente el circuito, interrumpiendo el servicio. El seccionalizador sólo abre el circuito e interrumpe el servicio en una rama cuando esta acción es absolutamente inevitable. A diferencia del seccionador, el seccionalizador puede ser utilizado bajo carga.

Sensores: Dispositivo que capta magnitudes físicas (variaciones de luz, temperatura, sonido, etc.) u otras alteraciones de su entorno.

Software: Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.

ANEXOS

Anexo A

Valores de todos los elementos del circuito utilizado con el software DIgSILENT Power Factory 14.1 (Fig. 51)

Valores nominales de los transformadores

En la Fig. 80 se muestran las características de los transformadores utilizadas en la simulación con el software DIgSILENT Power Factory para validar las variables eléctricas de corriente y voltaje.

Name	Transf. 69-12.47KV(1)
Technology	Three Phase Transformer
Rated Power	5. MVA
Nominal Frequency	60. Hz
Rated Voltage	
HV-Side	69. kV
LV-Side	12.47 kV
Vector Group	
HV-Side	D
LV-Side	YN
Phase Shift	
	1 *30deg
Name	
	Dyn1
Positive Sequence Impedance	
Short-Circuit Voltage uk	9.12 %
Copper Losses	0. kW
Zero Sequ. Impedance, Short-Circuit Voltage	
Absolute uk0	9.12 %
Resistive Part ukr0	0. %

Figura 1. Valores nominales utilizados en los transformadores.

Valores nominales de las cargas

En la Fig. 81 se muestran las características de las cargas utilizadas en la simulación con el software DIgSILENT Power Factory para validar las variables eléctricas de corriente y voltaje.

Input Mode	I, cos(phi)	
Balanced/Unbalanced	Balanced	
Operating Point Actual Values		
Current	0,03 kA	0,03 kA
Power Factor	0,9499999 ind.	0,9499999
Voltage	1. p.u.	
Scaling Factor	1.	1.
<input checked="" type="checkbox"/> Adjusted by Load Scaling	Zone Scaling Factor: 1.	

Figura 2. Valores nominales utilizados en las cargas.

Valores nominales de las líneas

En las figuras 82 y 83 se pueden observar los parámetros usados en el DIgSILENT Power Factory 14.1 para todas las líneas pertenecientes al circuito donador y el receptor.

Name	NAHKBA 3x240sm 8.7/15kV		
Rated Voltage	15. kV		
Rated Current	0,36 kA (in ground)	Rated Current (in air)	0,335 kA
Nominal Frequency	50. Hz		
Cable / OHL	Cable		
System Type	AC	Phases	3
		No. of Neutrals	0
Parameters per Length 1,2-Sequence		Parameters per Length Zero Sequence	
Resistance R' (20°C)	0,1267 Ohm/km	Resistance R0'	0,5067 Ohm/km
Reactance X'	0,08168141 Ohm/km	Reactance X0'	0,3267256 Ohm/km

Figura 3. Valores nominales utilizados en las líneas de distribución.

Number of parallel Lines		1
Parameters		
Thermal Rating	▼ → ...	
Length of Line	2.	km
Derating Factor	1.	
Laying	Ground	▼
Type of Line		Cable
Line Model		
<input checked="" type="radio"/> Lumped Parameter (PI) <input type="radio"/> Distributed Parameter		
Sections/Line Loads		
Resulting Values		
Rated Current		0,36 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1		0,3014946 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle		32,80921 deg
Pos. Seq. Resistance, R1		0,2534 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1		0,1633628 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0		1,0134 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0		0,6534512 Ohm
Earth-Fault Current, Ice		11,58038 A
Earth Factor, Magnitude		0,9998141
Earth Factor, Angle		0,00686401 deg

Figura 4. Impedancias de las redes de secuencia de la línea de distribución.

Anexo B

Obtención del modelo circuital del sistema bajo estudio

Para la obtención del modelo circuital genérico del sistema bajo estudio se tomó como base un sector de la red de distribución de energía eléctrica de la región capital. Dicho sector está compuesto por dos subestaciones que son: Colonia Tovar y Junko. En la Fig. 84 se muestran las características de dichas subestaciones.

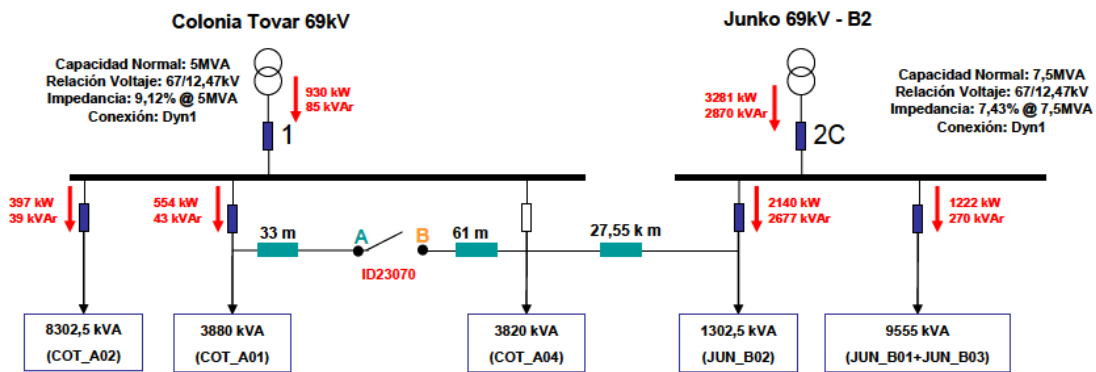


Figura 5. Diagrama circuital unifilar de la interconexión de las subestaciones Colonia Tovar y Junko.

Las subestaciones Colonia Tovar y Junko se interconectan aguas arriba en la parte de transmisión tal como se muestra en modelo circuital genérico de la Fig. 42. Para la obtención de la red de secuencia positiva de la Fig. 43, se fijó en principio los valores de impedancia de los transformadores (circuitos donador y receptor) y de las líneas de transmisión a 0,05j y 0,01j p.u. con la finalidad de realizar los cálculos de una manera expedita.

La zona de transmisión se modeló como un generador con su respectiva impedancia como se puede ver en la Fig. 43; el valor de esta impedancia y los valores de las cargas asociadas tanto al circuito donador y al receptor se hallaron con una calculadora gráfica teniendo presente que se requería una corriente circulante entre

$$Z_{\text{barra}} = \begin{vmatrix} j0,03833 & j0,03718 & j0,03700 & j0,03686 & j0,03677 & j0,03672 & j0,03740 & j0,03726 & j0,03717 & j0,03712 \\ j0,03318 & j0,08456 & j0,08414 & j0,08382 & j0,08362 & j0,08351 & j0,03628 & j0,03614 & j0,03605 & j0,03601 \\ j0,03700 & j0,08414 & j0,09367 & j0,09332 & j0,09309 & j0,09297 & j0,03610 & j0,03596 & j0,03587 & j0,03583 \\ j0,03686 & j0,08382 & j0,09332 & j0,10294 & j0,10268 & j0,10255 & j0,03596 & j0,03583 & j0,03574 & j0,03569 \\ j0,03677 & j0,08363 & j0,09309 & j0,10268 & j0,11240 & j0,11226 & j0,03587 & j0,03574 & j0,03565 & 0,03561 \\ j0,03672 & j0,08351 & j0,09297 & j0,10255 & j0,11226 & j0,12211 & j0,03583 & j0,03569 & j0,03561 & j0,03556 \\ j0,03740 & j0,03628 & j0,03610 & j0,03596 & j0,03587 & j0,03583 & j0,08528 & j0,08496 & j0,08475 & j0,08464 \\ j0,03726 & j0,03614 & j0,03596 & j0,03583 & j0,03574 & j0,03569 & j0,08496 & j0,09461 & j0,09437 & j0,09425 \\ j0,03717 & j0,03605 & j0,03587 & j0,03574 & j0,03565 & j0,03561 & j0,08475 & j0,09437 & j0,10411 & j0,10398 \\ j0,03712 & j0,03601 & j0,03583 & j0,03569 & j0,03561 & j0,03556 & j0,08464 & j0,09425 & j0,10398 & j0,11384 \end{vmatrix}$$

$$I = \begin{vmatrix} -j27,5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Multiplicando la Z_{barra} por el vector de corriente se obtienen los siguientes valores de voltajes para cada una de las barras:

Barra	Voltaje (p.u.)
B1	1,0541
B2	1,0224
B3	1,0173
B4	1,0135
B5	1,011
B6	1,0097
B7	1,0285
B8	1,0247
B9	1,0221
B10	1,0208

Se puede observar de la tabla de voltajes que la diferencia de voltajes de la barra B1-B6 o la B1-10 no se salen del intervalo requerido del 5% de diferencia.

Para modelar la zona de transmisión se utilizó un generador con una fuente de tensión de 1,1 p.u. (esto es así para evitar que la barra más alejada de la subestación salga del intervalo del 5%) acompañada por una impedancia en serie de 0,04j p.u.; se dividió el valor de la tensión entre el valor de la impedancia serie, para obtener un valor de corriente de 27,5 p.u., inyectado por la barra B1 del modelo circuital genérico. Los demás valores en dicho vector son cero porque en las demás barras no existe inyección de corriente para el modelo dado.

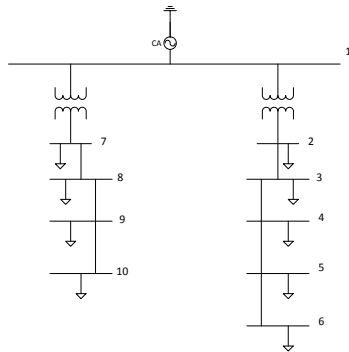
Anexo C

Estudio del estado estable

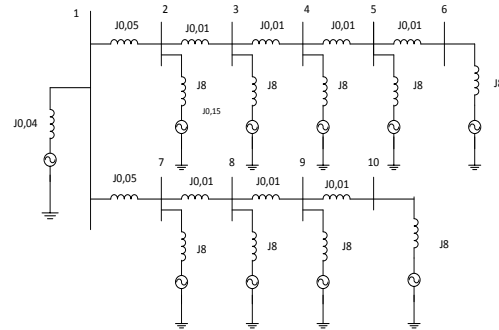
Para realizar el estudio del estado estable o estacionario se utilizó sólo la red de secuencia positiva. Con ésta se procedió a realizar varias conexiones entre las barras correspondientes de los circuitos donador y receptor y ver cómo varían los voltajes en cada una de las barras y determinar las corrientes que circularían entre dichas barras al momento de la interconexión entre ellas.

A continuación se presentan todos los casos considerados en esta investigación para el análisis del estado estable o estacionario; se muestra el diagrama unifilar, la red de secuencia positiva correspondiente, la Y_{barra} respectiva y los valores de las tensiones en cada una de las barras para cada caso:

Caso # 0 Diagrama Unifilar de los circuitos Radiales



Caso # 0 Red de secuencia positiva del Diagrama Unifilar Radial



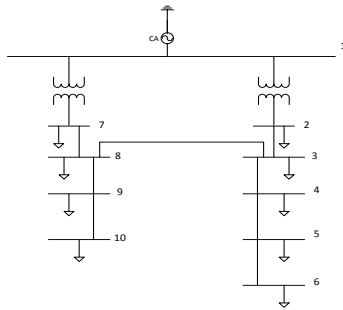
Caso # 0 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

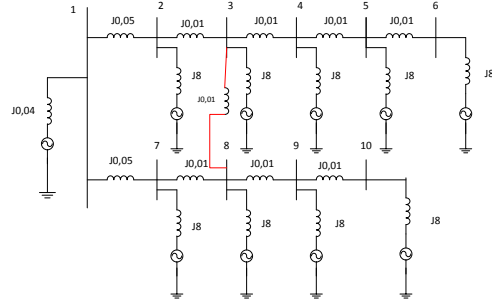
Caso #0 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0541
B2	1,0224
B3	1,0173
B4	1,0135
B5	1,011
B6	1,0097
B7	1,0285
B8	1,0247
B9	1,0221
B10	1,0208

**Caso # 1 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B3.**



Caso # 1 Red de secuencia positiva



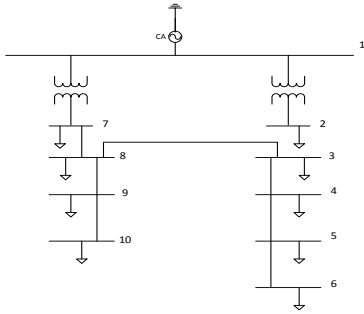
Caso # 1 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J300,125	J100	0	0	0	J100	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	J100	0	0	0	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

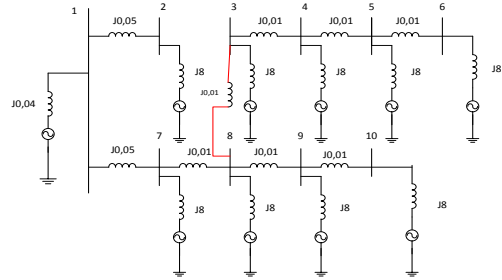
Caso # 1 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0541
B2	1,0252
B3	1,0207
B4	1,0169
B5	1,0143
B6	1,0131
B7	1,0257
B8	1,0212
B9	1,0187
B10	1,0174

**Caso # 1.1 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B3, apertura B2-B3**



Caso # 1.1 Red de secuencia positiva



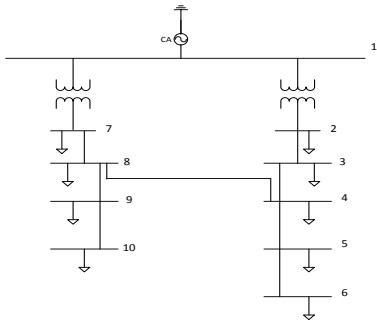
Caso # 1.1 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J20,125	0	0	0	0	0	0	0	0
③	0	0	-J200,125	J100	0	0	0	J100	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	J100	0	0	0	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

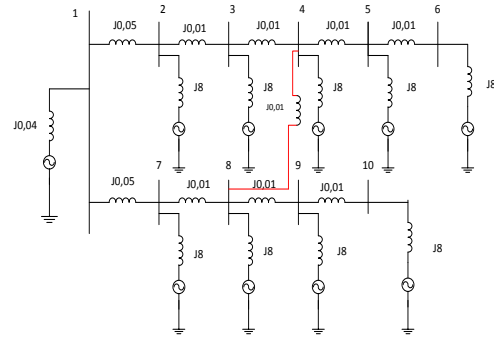
Caso # 1.1 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0551
B2	1,0485
B3	0,9918
B4	0,9881
B5	0,9857
B6	0,9844
B7	1,0054
B8	0,9968
B9	0,9943
B10	0,993

**Caso # 2 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B4.**



Caso # 2 Red de secuencia positiva



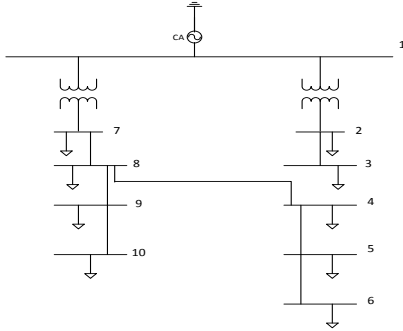
Caso # 2 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J300,125	J100	0	0	J100	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	J100	0	0	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

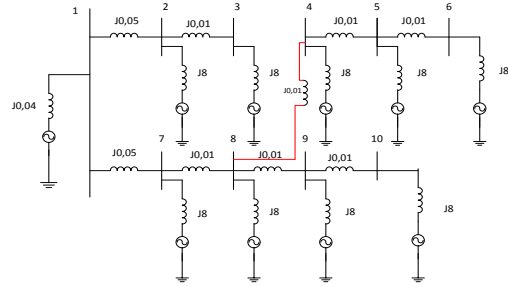
Caso # 2 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0541
B2	1,0263
B3	1,022
B4	1,019
B5	1,0165
B6	1,0152
B7	1,0245
B8	1,0198
B9	1,0173
B10	1,016

**Caso # 2.1 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B4, apertura B3-B4**



Caso # 2.1 Red de secuencia positiva



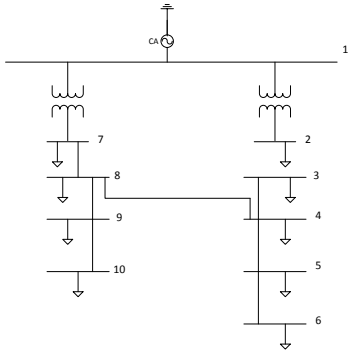
Caso # 2.1 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J100,125	0	0	0	0	0	0	0
④	0	0	0	-J200,125	J100	0	0	J100	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	J100	0	0	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

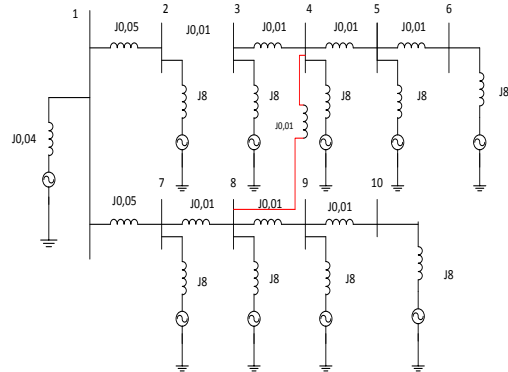
Caso # 2.1 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0546
B2	1,0415
B3	1,0402
B4	0,9995
B5	0,997
B6	0,9958
B7	1,0108
B8	1,0033
B9	1,0008
B10	0,9995

**Caso # 2.2 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B4, apertura B2-B3**



Caso # 2.2 Red de secuencia positiva



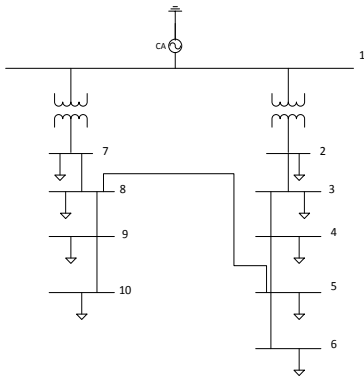
Caso # 2.2 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J20,125	0	0	0	0	0	0	0	0
③	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J300,125	J100	0	0	J100	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	J100	0	0	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

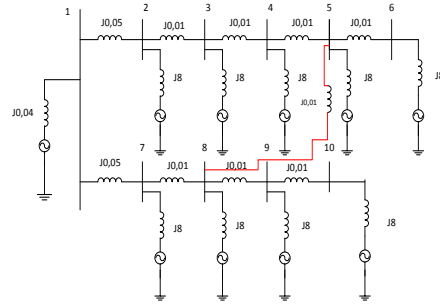
Caso # 2.2 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,055
B2	1,0485
B3	0,9905
B4	0,9917
B5	0,9892
B6	0,988
B7	1,0053
B8	0,9967
B9	0,9942
B10	0,9929

**Caso # 3 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B5.**



Caso # 3 Red de secuencia positiva



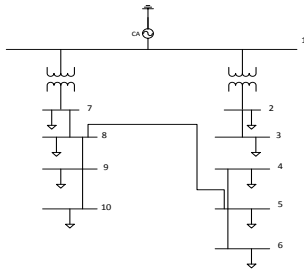
Caso # 3 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J300,125	J100	0	J100	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	J100	0	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

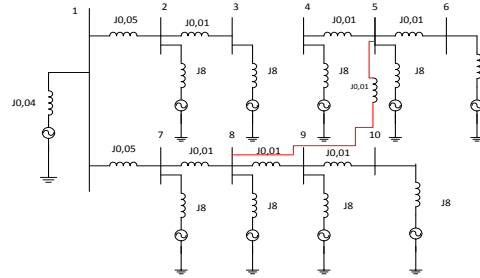
Caso # 3 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,054
B2	1,0268
B3	1,0227
B4	1,0198
B5	1,0182
B6	1,0169
B7	1,0239
B8	1,0191
B9	1,0166
B10	1,0153

**Caso # 3.1 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B5, apertura B3-B4.**



Caso # 3.1 Red de secuencia positiva



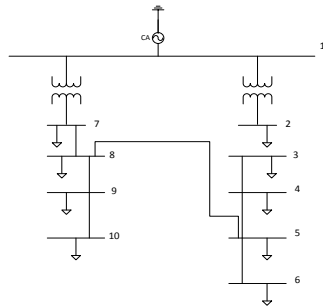
Caso # 3.1 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J100,125	0	0	0	0	0	0	0
④	0	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J300,125	J100	0	J100	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	J100	0	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

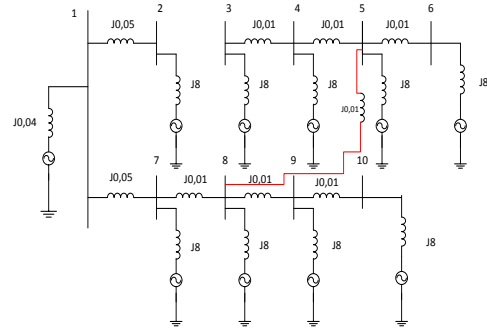
Caso # 3.1 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0545
B2	1,0415
B3	1,0402
B4	0,9982
B5	0,9995
B6	0,9982
B7	1,0107
B8	1,0032
B9	1,0007
B10	0,9995

**Caso # 3.2 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B5, apertura B2-B3.**



Caso # 3.2 Red de secuencia positiva



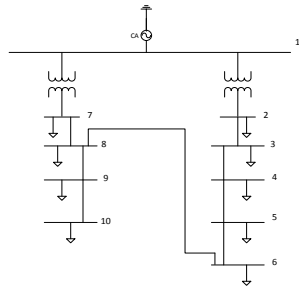
Caso # 3.2 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J20,125	0	0	0	0	0	0	0	0
③	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J300,125	J100	0	J100	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	J100	0	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

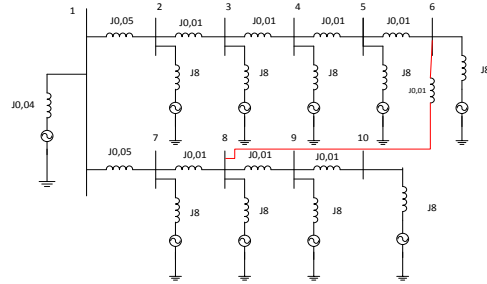
Caso # 3.2 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,055
B2	1,0485
B3	0,988
B4	0,9892
B5	0,9917
B6	0,9905
B7	1,0053
B8	0,9967
B9	0,9942
B10	0,9929

**Caso # 4 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B6.**



Caso # 4 Red de secuencia positiva



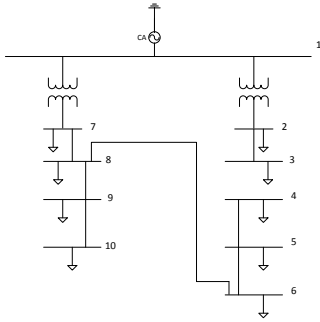
Caso # 4 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J200,125	0	J100	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	J100	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

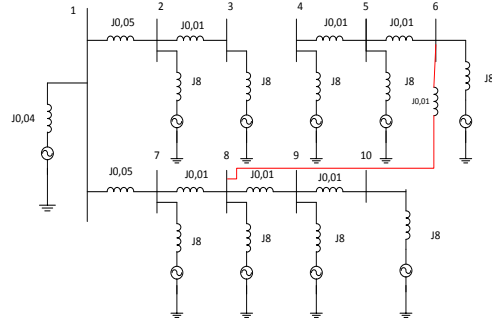
Caso # 4 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,054
B2	1,0269
B3	1,0228
B4	1,0199
B5	1,0183
B6	1,018
B7	1,0237
B8	1,019
B9	1,0165
B10	1,0152

**Caso # 4.1 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B6, apertura B3-B4.**



Caso # 4.1 Red de secuencia positiva



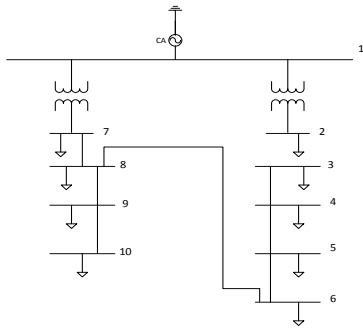
Caso # 4.1 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J100,125	0	0	0	0	0	0	0
④	0	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J200,125	0	J100	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	J100	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

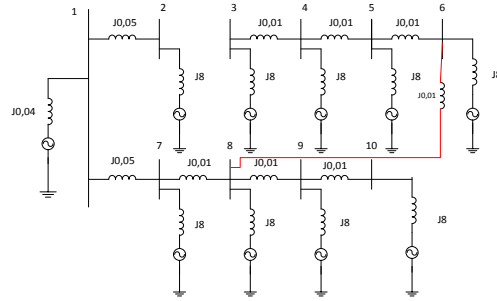
Caso # 4.1 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0546
B2	1,0415
B3	1,0402
B4	0,9958
B5	0,997
B6	0,9995
B7	1,0108
B8	1,0033
B9	1,0008
B10	0,9995

**Caso # 4.2 Diagrama Unifilar.
Conexión B8-B6, apertura B2-B3.**



Caso # 4.2 Red de secuencia positiva



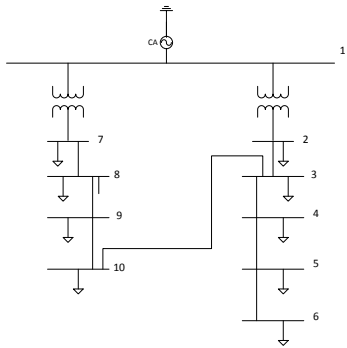
Caso # 4.2 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J20,125	0	0	0	0	0	0	0	0
③	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J200,125	0	J100	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	J100	J100	-J300,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J100,125

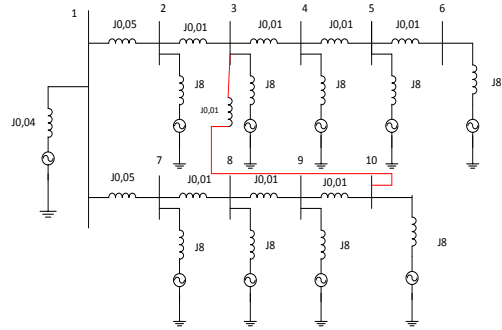
Caso # 4.2 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0551
B2	1,0485
B3	0,9844
B4	0,9857
B5	0,9881
B6	0,9918
B7	1,0054
B8	0,9968
B9	0,9943
B10	0,993

**Caso # 5 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B3.**



Caso # 5 Red de secuencia positiva



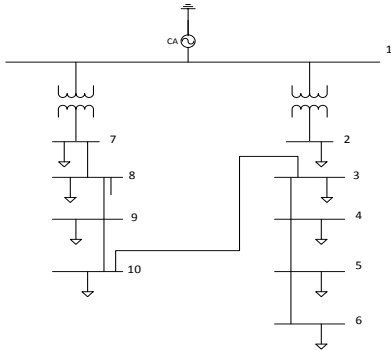
Caso # 5 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J300,125	J100	0	0	0	0	0	J100
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	J100	0	0	0	0	0	J100	-J200,125

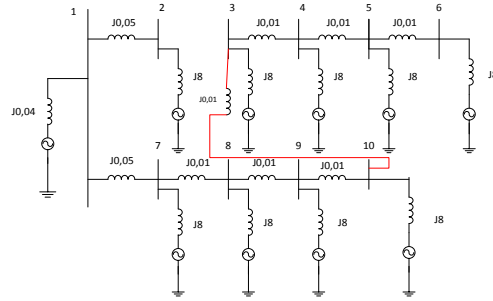
Caso # 5 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0541
B2	1,0235
B3	1,0187
B4	1,0149
B5	1,0124
B6	1,0111
B7	1,0273
B8	1,0233
B9	1,0205
B10	1,0189

**Caso # 5.1 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B3, apertura B2-B3.**



Caso # 5.1 Red de secuencia positiva



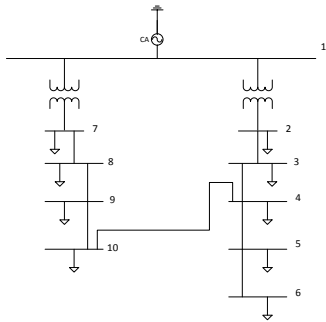
Caso # 5.1 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J20,125	0	0	0	0	0	0	0	0
③	0	0	-J200,125	J100	0	0	0	0	0	J100
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	J100	0	0	0	0	0	J100	-J200,125

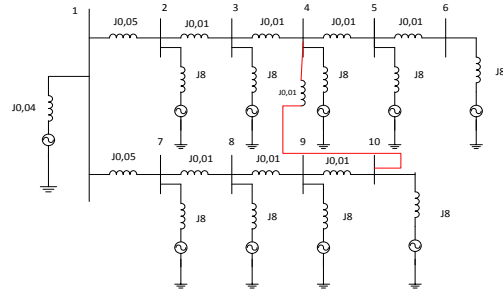
Caso # 5.1 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0554
B2	1,0488
B3	0,9792
B4	0,9756
B5	0,9731
B6	0,9719
B7	1,0061
B8	0,9975
B9	0,9902
B10	0,9841

**Caso # 6 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B4.**



Caso # 6 Red de secuencia positiva



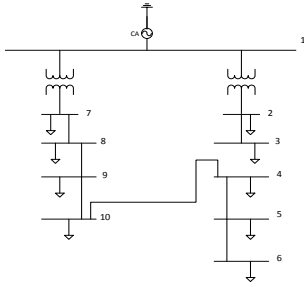
Caso # 6 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J300,125	J100	0	0	0	0	J100
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	J100	0	0	0	0	J100	-J200,125

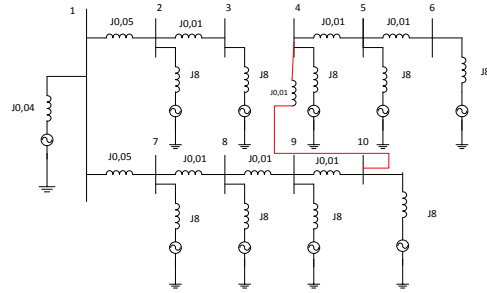
Caso # 6 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0541
B2	1,0246
B3	1,02
B4	1,0167
B5	1,0141
B6	1,0129
B7	1,0262
B8	1,0219
B9	1,0189
B10	1,0172

**Caso # 6.1 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B4, apertura B3-B4.**



Caso # 6.1 Red de secuencia positiva



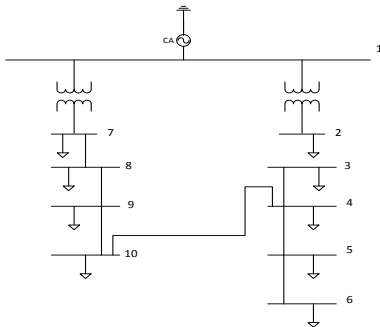
Caso # 6.1 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J100,125	0	0	0	0	0	0	0
④	0	0	0	-J200,125	J100	0	0	0	0	J100
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	J100	0	0	0	0	J100	-J200,125

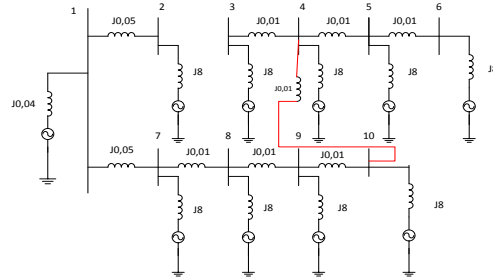
Caso # 6.1 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0547
B2	1,0417
B3	1,0404
B4	0,9889
B5	0,9865
B6	0,9853
B7	1,0112
B8	1,0038
B9	0,9976
B10	0,9926

**Caso # 6.2 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B4, apertura B2-B3.**



Caso # 6.2 Red de secuencia positiva



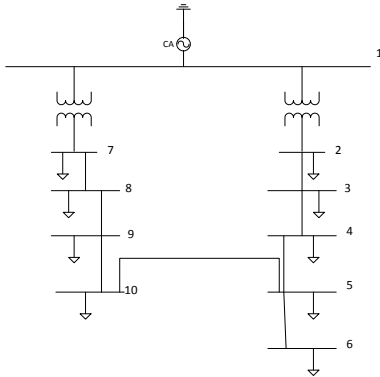
Caso # 6.2 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J20,125	0	0	0	0	0	0	0	0
③	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J300,125	J100	0	0	0	0	J100
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	J100	0	0	0	0	J100	-J200,125

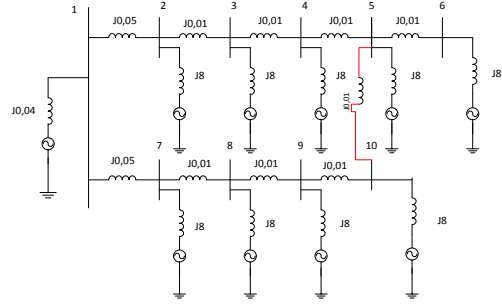
Caso # 6.2 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0553
B2	1,0488
B3	0,9779
B4	0,9791
B5	0,9766
B6	0,9754
B7	1,006
B8	0,9974
B9	0,9901
B10	0,984

**Caso # 7 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B5.**



Caso # 7 Red de secuencia positiva



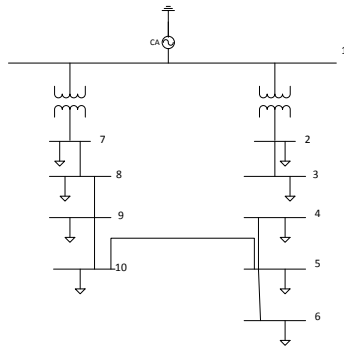
Caso # 7 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J300,125	J100	0	0	0	J100
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	J100	0	0	0	J100	-J200,125

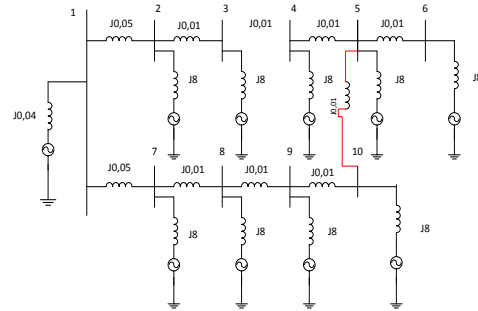
Caso # 7 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0541
B2	1,0252
B3	1,0207
B4	1,0175
B5	1,0156
B6	1,0143
B7	1,0256
B8	1,0212
B9	1,018
B10	1,0162

**Caso # 7.1 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B5, apertura B3-B4.**



Caso # 7.1 Red de secuencia positiva



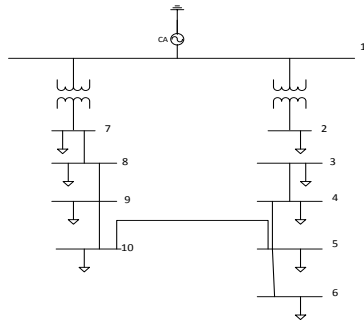
Caso # 7.1 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J100,125	0	0	0	0	0	0	0
④	0	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J300,125	J100	0	0	0	J100
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	J100	0	0	0	J100	-J200,125

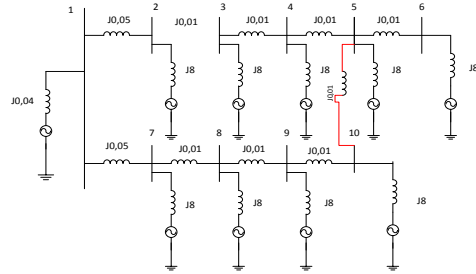
Caso # 7.1 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0547
B2	1,0417
B3	1,0404
B4	0,9877
B5	0,9889
B6	0,9877
B7	1,0112
B8	1,0037
B9	0,9975
B10	0,9926

**Caso # 7.2 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B5, apertura B2-B3.**



Caso # 7.2 Red de secuencia positiva



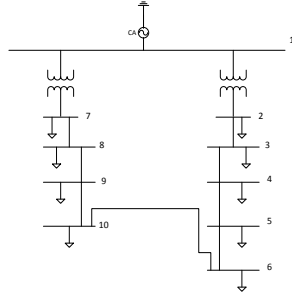
Caso # 7.2 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J20,125	0	0	0	0	0	0	0	0
③	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J300,125	J100	0	0	0	J100
⑥	0	0	0	0	J100	-J100,125	0	0	0	0
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	J100	0	0	0	J100	-J200,125

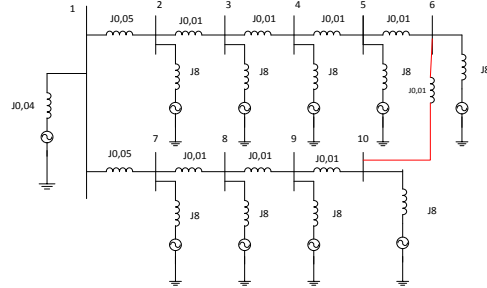
Caso # 7.2 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0553
B2	1,0488
B3	0,9754
B4	0,9766
B5	0,9791
B6	0,9779
B7	1,006
B8	0,9974
B9	0,9901
B10	0,984

**Caso # 8 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B6.**



Caso # 8 Red de secuencia positiva



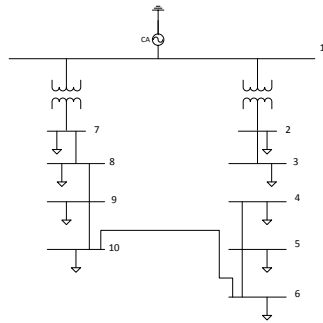
Caso # 8 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J200,125	0	0	0	J100
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	J100	0	0	J100	-J200,125

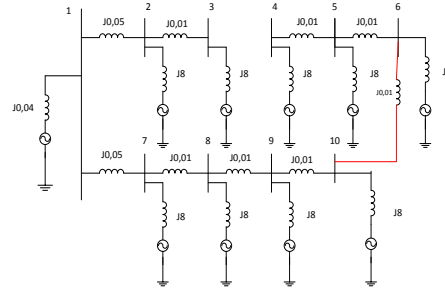
Caso # 8 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0541
B2	1,0254
B3	1,0209
B4	1,0178
B5	1,0159
B6	1,0152
B7	1,0254
B8	1,0209
B9	1,0178
B10	1,0159

**Caso # 8.1 Diagrama Unifilar.
Conexión B10-B6, apertura B3-B4.**



Caso # 8.1 Red de secuencia positiva



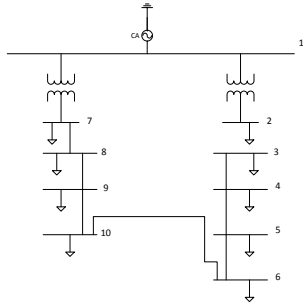
Caso # 8.1 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J120,125	J100	0	0	0	0	0	0	0
③	0	J100	-J100,125	0	0	0	0	0	0	0
④	0	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J200,125	0	0	0	J100
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	J100	0	0	J100	-J200,125

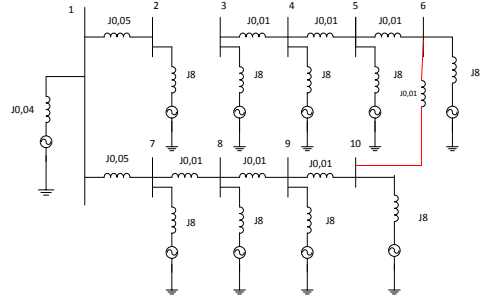
Caso # 8.1 Voltajes en cada una de las barras unifilar.

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0548
B2	1,0417
B3	1,0404
B4	0,9853
B5	0,9865
B6	0,9889
B7	1,0112
B8	1,0038
B9	0,9976
B10	0,9926

Conexión B10-B6, apertura B2-B3.



Caso # 8.2 Red de secuencia positiva



Caso # 8.2 Y de barra de la red de secuencia positiva anterior

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	0	J20	0	0	0	0	J20	0	0	0
②	J20	-J20,125	0	0	0	0	0	0	0	0
③	0	0	-J100,125	J100	0	0	0	0	0	0
④	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0	0
⑤	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0	0	0	0
⑥	0	0	0	0	J100	-J200,125	0	0	0	J100
⑦	J20	0	0	0	0	0	-J120,125	J100	0	0
⑧	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100	0
⑨	0	0	0	0	0	0	0	J100	-J200,125	J100
⑩	0	0	0	0	0	J100	0	0	J100	-J200,125

Caso # 8.2 Voltajes en cada una de las barras

Barra	Voltaje (pu)
B1	1,0554
B2	1,0488
B3	0,9719
B4	0,9731
B5	0,9756
B6	0,9792
B7	1,0061
B8	0,9975
B9	0,9902
B10	0,9841

Anexo D

Estudio del estado transitorio

En este anexo se muestra cómo se hicieron los cálculos para realizar el análisis del estado transitorio. Para esto se tomó como caso base la conexión entre las barras B10-B6 para realizar el acople donador-receptor.

La corriente que fluye por los neutros de los circuitos donador y receptor respectivamente son las que interesan hallar principalmente, ya que éstas son las que activan las protecciones de los respectivos neutros. Se sabe que en un sistema desbalanceado la corriente que fluye por el neutro es:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (32)$$

Sustituyendo los valores de I_a , I_b e I_c por sus componentes simétricas en la Ec. (32) se llega a que $I_n = 3I_0$. Para calcular dicha corriente cuando se cierra una sola fase, es lo mismo que analizar el sistema cuando las tres fases se encuentran conectadas y se abren dos fases, esto último es lo que se hizo ya que nos permite usar la teoría de fallas de conductor abierto, en especial para este caso la falla de dos conductores abiertos. Se puede observar de la fig.47 y con la Ec. (32) que la corriente que fluye por el neutro es:

$$I_n = 3 \left(\frac{V_t - \Delta V_7}{j0,05} \right), \quad (33)$$

donde V_t representa al voltaje de tierra, que es igual a cero. Haciendo el análisis sólo para la corriente del neutro del circuito receptor (el análisis es similar para el neutro del circuito donador) se tiene que para hallar el valor de I_n se necesita saber el valor de ΔV_7 , con la ayuda de la Ec. (14a) se tiene que:

$$\Delta V_7 = \frac{Z_{7-10}^{(0)} - Z_{7-6}^{(0)}}{Z_0} V_a^{(0)}, \quad (34)$$

donde $Z_{7-10}^{(0)}$ es el término que aparece en la séptima fila y décima columna de la $Z_{barra}^{(0)}$ que se obtiene de la red de secuencia cero cuando se encuentran interconectadas las barras B10-B6; y $Z_{7-6}^{(0)}$ es el término que aparece en la séptima fila y sexta columna de la $Z_{barra}^{(0)}$. Para calcular ΔV_7 de la Ec. (34) se debe calcular primero $V_a^{(0)}$, esto se hace con la ayuda de la Ec. (31c), de esta última se observa que se necesitan los valores de $Z_{pp'}^{(0)}$, $Z_{pp'}^{(1)}$ y $Z_{pp'}^{(2)}$, además de la corriente I_{mn} que en realidad es la corriente I_{10-6} que fluye entre las barras B10-B6 ya que para este caso $m=10$ (barra 10) y $n=6$ (barra 6). Se sabe que $Z_{pp'}^{(1)} = Z_{pp'}^{(2)}$ ya que las redes de secuencia positiva y negativa son iguales generalmente y se calculan con la Ec. (15) o la Ec. (19); en la Ec. (15) $Z_{th,mm}^{(1)} = Z_{mm}^{(1)} + Z_{nn}^{(1)} - 2Z_{mn}^{(1)} = Z_{1010}^{(1)} + Z_{66}^{(1)} - 2Z_{10-6}^{(1)}$ y estos valores de impedancia se obtienen de la red de secuencia positiva del sistema cuando están interconectadas las barras B10-B6 y son: $Z_{1010}^{(1)} = 0,07879j$, $Z_{66}^{(1)} = 0,07926j$, $Z_{10-6}^{(1)} = 0,07431j$ y el valor de la corriente I_{10-6} es $I_{10-6} = \frac{(V_m - V_n)}{Z_1} = \frac{(1,0159 - 1,0152)}{j0,01} = -0,07j$; los valores de V_m y V_n se obtienen de la tabla de voltajes del caso #8 (anexo C). El valor de $Z_{pp'}^{(0)}$ se obtiene de manera similar pero obteniendo las impedancias de la $Z_{barra}^{(0)}$, obteniéndose $Z_{pp'}^{(0)} = 0,32727j$.

Sustituyendo en la Ec. (31c) se obtiene que $V_a^{(0)} = -0,00593 \angle 0^\circ$, luego sustituyendo este último valor en la Ec. (34) se tiene que $\Delta V_7 = 8,63311 * 10^{-4} \angle 180^\circ$, finalmente para obtener la corriente que fluye por el neutro se sustituye en la Ec. (33) para obtener que $I_n = -0,05180j$ (tabla 18).

Para realizar el cierre de dos fases se debe tener presente que es equivalente a la apertura de una sola fase; el procedimiento para hallar la corriente de neutro es similar ya que se usan también las ecuaciones (33) y (34), pero para calcular $V_a^{(0)}$ se utiliza la Ec. (27) y sustituyendo los valores se tiene que $I_n = 0,04232j$ ver tabla 19.

Cuando se cierra la tercera fase el sistema vuelve a un estado de balance y no fluye corriente por los neutros porque la asimetría causada por los conductores abiertos desaparece. Para terminar de realizar la maniobra en paralelo se debe proceder a la apertura en el circuito Donador para traspasar la carga al Receptor; particularmente se hace esta apertura entre las barras B2-B3. Cuando se hace la apertura de la primera fase se utiliza la Ec. (27), y tomando los valores $V_m = V_2 = 10254 \angle 0^\circ$ y $V_n = V_3 = 1,0209 \angle 0^\circ$ de la tabla de voltajes del caso #8 (anexo C) para calcular la corriente $I_{nm} = I_{23} = \frac{(V_2 - V_3)}{j0,05} = -0,45j$ en la Ec. (15) ahora $Z_{th,nn}^{(1)} = Z_{nm}^{(1)} + Z_{nn}^{(1)} - 2Z_{nn}^{(1)} = Z_{22}^{(1)} + Z_{33}^{(1)} - 2Z_{23}^{(1)}$ y estos valores de impedancia se obtienen de la red de secuencia positiva del sistema cuando están interconectadas las barras B10-B6 y son: $Z_{22}^{(1)} = 0,07165j$, $Z_{33}^{(1)} = 0,07499j$, $Z_{23}^{(1)} = 0,06861j$. El valor de $Z_{pp'}^{(0)}$ se obtiene de manera similar pero obteniendo las impedancias de la $Z_{barra}^{(0)}$, obteniéndose $Z_{pp'}^{(0)} = 0,31359j$.

Sustituyendo en la Ec. 27 se obtiene que $V_a^{(0)} = 0,03043 \angle 0^\circ$, luego sustituyendo este último valor en la Ec. (34) se tiene que $\Delta V_2 = \left(\frac{(Z_{7-2}^{(0)} - Z_{7-3}^{(0)})}{Z_0} \right) V_a^{(0)} = 8,63311 \times 10^{-4} \angle 180^\circ$; finalmente para obtener la corriente que fluye por el neutro se sustituye en la Ec. (33) para obtener que $I_n = -0,025103j$ (tabla 20).

Para calcular la corriente I_n cuando se realiza la apertura de dos fases se usan también las ecuaciones (33) y (34), y para calcular $V_a^{(0)}$ se utiliza la Ec. (31c); sustituyendo los valores se tiene que $I_n = 0,30486j$ (ver tabla 21).

Cuando se abre la tercera fase el sistema vuelve a un estado de balance y no fluye corriente por los neutros porque la asimetría causada por los conductores abiertos desaparece.

Anexo E

6.- AJUSTES EN EL INTERRUPTOR PRINCIPAL DE LA SUBESTACIÓN PARA LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DE ALIMENTADORES DE DISTRIBUCIÓN

6.1- PROTECCIÓN DE LAS FASES

6.1.1.- Relé de Sobrecorriente de Tiempo Inverso

Para los relés de sobrecorriente existiendo dos ajustes principales a obedecer que son:

El TDS es el dial de ajuste de tiempo, el relé debe ser capaz de detectar la corriente mínima en el extremo más remoto del circuito troncal. Como límite superior para el TAP tenemos que:

$$2 I_{c \text{ min}} / RTC \leq TAP \leq I_{F \text{ min}} / RTC$$

El TAP del transformador de corriente que alimenta al relé se ajustará de acuerdo a la corriente nominal de los conductores según la siguiente expresión:

$$TAP = 1,5 * I_{N \text{ nominal}} / RTC, \text{ donde}$$

$I_{N \text{ nominal}}$: Intensidad nominal en Amperios de los conductores

RTC: Relación de transformación de los transformadores de corriente (600:5)

Aplicando este criterio, los ajustes de los diferentes alimentadores de distribución normalizados en la C.A. La Electricidad de Caracas serán los indicados en la Tabla 1.

Código Documento	Supervisor	Aprobado por:				Fecha	Pag. 7 de 13
		Norma de Ingeniería		G. de Diseño			
(IID) 4 - 2006 16/10/2006		M. Enríq. G. Figueroa	A. Rivas	W. Solís	A. Rivas	10 / 06	



Tabla 1. AJUSTES DEL TAP DE FASE

CONDUCTORES			TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	
TIPO	CARACTERISTICAS	CAPACIDAD NOMINAL	CAPACIDAD	TAP
AÉREO	4/0 Al 6201 Desnuda	360	540	5
	3/0 Cu Duro Desnuda	340	510	5
	2/0 Cu Duro Desnuda	300	450	4
	1/0 Al 6201 Desnuda	230	345	3
	2 Cu Duro Desnuda	200	300	2,5
SUBTERRANEO	500 MCM Cu, PLT, PVC, con PANT, 15 kV, FC: 100%, 4 ductos ocupados, un circuito en emergencia	430	645	5
	250 MCM Cu, PLT, PVC, con PANT, 15 kV, FC: 100%, 4 ductos ocupados, un circuito en emergencia	298	447	4

Se incluyen en la Tabla 1 las características de los conductores subterráneos, en vista de que la gran mayoría de los circuitos aéreos de la red de distribución de la C.A. La Electricidad de Caracas tiene salida subterránea en la Subestación.

6.1.2. Ajuste de la Unidad Instantánea

El relé no debe operar ante corrientes transitorias de ~~reas~~ establecimiento en frío (cold load pick up), para lo cual el ajuste instantáneo será de la siguiente manera:

Alimentador con dispositivos de protección en el troncal y los ramales: El ajuste estará comprendido entre 1,25 y 1,50 veces el valor máximo de corriente de cortocircuito trifásico en el punto donde se encuentra el primer elemento de protección, aguas abajo del alimentador.

Para alimentadores largos, generalmente de más de 15 Km, el instantáneo debe proteger al menos el 80% del circuito; en caso contrario se recomienda la instalación de ~~reconectores~~ para ampliar la zona de protección.

Alimentador sin dispositivos de protección en el troncal y los ramales: La unidad instantánea deberá ajustarse en 2,5 veces la corriente nominal del circuito. ~~Esta es el caso típico de circuitos subterráneos.~~

Código, Documento	Fecha de emisión	Aprobada por:				Fecha de emisión	Pag. 8 de 13
		Norma de Ingeniería		Comité de Ingeniería			
(IID) 4 - 2006 16/10/2006		M. Enríquez	A. Rojas	M. Silva	A. Bichara	10 / 06	



Alimentadores con grandes cargas industriales: El ajuste de la unidad instantánea estará comprendido entre 4 y 10 veces la corriente nominal, para evitar que el instantáneo se dispare ante las fuertes corrientes de arranque de los motores.

6.2.- PROTECCION DEL NEUTRO

6.2.1.- Relé de Sobrecorriente de Tiempo Inverso

El relé de sobrecorriente de tiempo inverso del neutro no debe operar ante la corriente residual producida por el máximo desbalance (I_{dca}) del sistema; para esto se debe considerar un desbalance entre las fases del 30% de la intensidad nominal del circuito, es decir:

$$I_{dca} = 0,3 * I_{nom}$$

Además, la corriente mínima de operación del relé debe ser tal que detecte la corriente de falla mínima en el extremo más alejado del troncal. El ajuste del TAP del neutro será:

$$I_{dca} / RTC < TAP < I_{q, \text{mínimo en el extremo más lejano}} / RTC$$

Aplicando estos criterios los ajustes del relé de sobrecorriente de tiempo inverso del neutro, para los diferentes alimentadores normalizados en la red de distribución de la C.A. La Electricidad de Caracas serán los indicados en la Tabla 2.

Código Documento	Fecha	Aprobada por				Vigencia	Pag. 9 de 13
		Norma de Ingeniería		G. de Apoyos de Distribución			
(IID) 4 - 2006 16/10/2006		M. Enríque G. Escobar	ó. Rivas	U. J. J. J.	ó. Rivas	10 / 06	



Tabla 2. AJUSTES DEL TAP DE NEUTRO

CONDUCTORES			TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	
TIPO	CARACTERISTICAS	CAPACIDAD NOMINAL A	CAPACIDAD A	TAP A
AÉREO	4/0 Al 6201 Desnuda	108	108	0,9
	3/0 Cu Duro Desnuda	102	96	0,8
	2/0 Cu Duro Desnuda	90	96	0,8
	1/0 Al 6201 Desnuda	69	72	0,6
	2 Cu Duro Desnuda	60	60	0,5
SUBTERRANEO	500 MCM Cu, PLT, PVC, con PANT, 15 kV, FC: 100%, 4 ductos ocupados, un circuito en emergencia	129	132	1,1
	250 MCM Cu, PLT, PVC, con PANT, 15 kV, FC: 100%, 4 ductos ocupados, un circuito en emergencia	89	96	0,5

6.2.2. Ajuste de la Unidad Instantánea

El relé deberá despejar fallas a tierra equivalentes al 40% de la corriente de falla mínima al final del alimentador.

$$INST = (3 - 8) I_{c\ arg a} / RTC$$

6.3.- AJUSTE DE LOS CICLOS DE OPERACIÓN DEL RELÉ DE REENGANCHE:

Alimentadores en zonas con mucha vegetación: O - 0,3" - CO - 15" - CO - 35" - CO

Alimentadores en zonas con escasa vegetación: O - 0,3" - CO - 35" - CO

Alimentadores con cargas industriales: Se deberá desconectar el relé instantáneo. A menos que permita ajustes entre el 400% y el 100% de la corriente nominal.

Código Documento	Fecha de Emisión	Elaborado por:				Fecha	Pag. 10 de 13
		Nombre de Ingeniería	G. de Diseño	Responsable de Distribución			
(IID) 4 - 2006 16/10/2006		M. E. G. G. G.	G. G. G.	G. G. G.	G. G. G.	10 / 06	