



Proyecto fin de grado

Estudio del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear

Alumno: Alfonso Pontes Jiménez

Director: Luis Rouco Rodríguez

Madrid

Mayo 2014

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO DE DOCUMENTACIÓN

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Alfonso Pontes Jiménez, como alumno de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA**

que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra *Estudio del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear*, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita* (*con las limitaciones que más adelante se detallan*) por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión.

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

- (a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- (b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .
- (c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- (d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital.

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

- a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación (curiarte@rec.upcomillas.es).

d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.

d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5°. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.

b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

a) Deberes del repositorio Institucional:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se

reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.

- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.

- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.

b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 24 de mayo de 2014

ACEPTA

Fdo: Alfonso Pontes Jiménez

Autorizada la entrega del proyecto del alumno:

Alfonso Pontes Jiménez



Autoriza la entrega del proyecto cuya información no es de carácter confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Luis Rouco Rodríguez



Fdo.:

Fecha: 23 // 05 // 2014

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fernando de Cuadra García

Fecha: ___ // ___ // _____

Fdo.:



Proyecto fin de grado

Estudio del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear

Alumno: Alfonso Pontes Jiménez

Director: Luis Rouco Rodríguez

Madrid

Mayo 2014



Contenidos

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 El tema del proyecto	1
1.2 Objetivos del proyecto	2
1.3 Organización del documento	3
Capítulo 2. El evento de la central nuclear Byron del día 30 de enero de 2012	4
2.1 La central nuclear Byron	4
2.2 El evento del 30 de enero de 2012 en la central nuclear Byron	6
2.3 La respuesta de la industria nuclear norteamericana al evento del 30 de enero de 2012 en la central nuclear Byron	8
2.4 Los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear	9
2.5 Las protecciones de mínima tensión de una central nuclear	11
Capítulo 3. Análisis de faltas	13
3.1 Faltas trifásicas equilibradas.....	14
3.1.1 <i>Falta trifásica franca en circuitos trifásicos sin acoplamiento magnético.....</i>	<i>15</i>
3.2 Falta trifásica franca en circuitos trifásicos con acoplamiento magnético....	17
3.3 Falta trifásica a través de una impedancia en circuitos trifásicos con acoplamiento magnético.....	19
3.4 Método de componentes simétricas.....	21
3.5 Representación de generadores, motores y transformadores a las secuencias directa, inversa y homopolar	27
3.5.1 <i>Representación de generadores síncronos</i>	<i>28</i>
3.5.2 <i>Representación de motores asíncronos</i>	<i>30</i>
3.5.3 <i>Representación de transformadores.....</i>	<i>33</i>
3.5.4 <i>Representación equivalente de la red.....</i>	<i>37</i>
3.6 Circuitos equivalentes de secuencia	38
3.7 Faltas desequilibradas paralelo.....	39
3.7.1 <i>Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de una falta monofásica a tierra.....</i>	<i>39</i>
3.7.2 <i>Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de una falta monofásica a tierra a través de impedancia</i>	<i>44</i>
3.7.3 <i>Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta bifásica.....</i>	<i>46</i>



3.7.4	<i>Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta bifásica a través de impedancia</i>	49
3.7.5	<i>Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta bifásica a tierra</i>	52
3.7.6	<i>Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta bifásica a tierra a través de impedancia</i>	54
3.8	Faltas desequilibradas serie	56
3.8.1	<i>Formulación general</i>	57
3.8.2	<i>Apertura de una fase</i>	60
3.8.3	<i>Apertura de dos fases</i>	62
Capítulo 4. Análisis de faltas serie en las alimentaciones a la central nuclear ...		64
4.1	Falta serie en la alimentación a 138 kV	65
4.1.1	<i>Planteamiento</i>	65
4.1.2	<i>Datos</i>	70
4.1.3	<i>Resultados caso 1</i>	71
4.1.4	<i>Resultados caso 2</i>	76
4.1.5	<i>Resumen de resultados</i>	80
4.2	Falta serie en la alimentación a 400 kV	81
4.2.1	<i>Planteamiento</i>	81
4.2.2	<i>Datos</i>	86
4.2.3	<i>Resultados caso 1</i>	87
4.2.4	<i>Resultados caso 2</i>	91
4.2.5	<i>Resumen de resultados</i>	94
4.3	Conclusiones parciales	94
Capítulo 5. Simulación de faltas serie en las alimentaciones a la central nuclear		96
5.1	El programa ATP	97
5.2	Falta serie en la alimentación a 138 kV	99
5.2.1	<i>Modelo de simulación del caso 1</i>	99
5.2.2	<i>Resultados de simulación del caso 1</i>	103
5.2.3	<i>Modelo de simulación del caso 2</i>	110
5.2.4	<i>Resultados de simulación del caso 2</i>	113
5.3	Falta serie en la alimentación a 400 kV	121
5.3.1	<i>Modelo de simulación del caso 1</i>	121
5.3.2	<i>Resultados de simulación del caso 1</i>	127
5.3.3	<i>Modelo de simulación del caso 2</i>	133



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO ELECTROMECÁNICO

5.3.4	<i>Resultados de simulación del caso 2</i>	135
5.4	Conclusiones parciales	143
<i>Capítulo 6.</i>	<i>Conclusiones</i>	<i>144</i>
<i>Capítulo 7.</i>	<i>Referencias</i>	<i>147</i>
<i>Capítulo 8.</i>	<i>Apéndice: modelo de motor de inducción</i>	<i>150</i>



Resumen

Este proyecto ha abordado el estudio del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear con una configuración muy común.

En la configuración estudiada, el generador está conectado a la red a 400 kV a través del transformador principal. La red a 400 kV es la red de transporte a la cual la central vierte su producción. Se considera que existe interruptor de generación, que permite aislar el generador del resto del sistema eléctrico de la central, permitiendo que, en caso de parada del grupo, el sistema eléctrico de la central quede alimentado desde la red a 400 kV a través del transformador principal y del transformador auxiliar. El sistema eléctrico de la central también puede estar alimentado de una red a 138 kV a través del transformador de arranque.

Este proyecto parte de un evento ocurrido en la central nuclear Byron (IL, USA). El proyecto ha considerado el análisis que hizo del evento de la central nuclear Byron la Comisión Regulatoria Nuclear (NRC) del gobierno de los Estados Unidos y el planteamiento metodológico propuesto por el Electric Power Research Institute (EPRI) también de los Estados Unidos.

Para alcanzar objetivo planteado, se han realizado dos estudios del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear:

1. Estudio fundamental: análisis de la pérdida de una fase en régimen permanente mediante el uso de componentes simétricas.
2. Estudio de simulación: simulación detallada de la pérdida de una fase utilizando la versión ATP del programa EMTP.



Del análisis por medio de componentes simétricas de la ocurrencia de una falta serie en las alimentaciones a 138 kV y a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio, en las condiciones estudiadas, se puede concluir que los medios de detección de tensión en las barras de servicios auxiliares no detectarían la apertura de una fase.

Por el contrario:

- La corriente de falta sólo es distinta de cero (salvo la corriente de vacío de los transformadores) cuando las barras de servicios auxiliares tienen carga.
- El desequilibrio medido como relación entre las intensidades de secuencia inversa y directa es apreciable (5.9%) cuando la fase abierta está en la alimentación a 138 kV.
- La corriente homopolar en el lado de alta tensión de la alimentación (138 kV o 400 kV) es del orden de magnitud de la corriente de secuencia directa.

De la simulación por medio del programa ATP de la ocurrencia de una falta serie en las alimentaciones a 138 kV y a 400 kV de la central nuclear caso de estudio, en las condiciones estudiadas, se puede concluir que en el análisis por medio de componentes simétricas ofrece resultados muy precisos y que las conclusiones extraídas con dicho método de estudio han quedado plenamente confirmadas.



Abstract

This final degree project has studied the impact of an open-phase fault in the external power system of a nuclear power plant which power system exhibits a common configuration.

In case of such configuration, the generator is connected through the main transformer to 400 kV network, which is the transmission network that receives the power plant production. The plant has a generator circuit breaker which isolates the generator from the plant electric power system. In case that the generator is disconnected from the network, the plant electric power system remains fed by the 400 kV network through the main transformer and the station auxiliary transformer. The plant electric power systems may also be fed by a 138 kV network through the start-up transformer.

This project has been motivated by an event occurred at Byron's nuclear plant (IL, USA). The project has considered the analysis of this event made the US Nuclear Regulatory Commission (NRC) and also the work made by the Electric Power Research Institute (EPRI), also from the United States.

In order to reach the project, the project has undertaken two studies of the impact of an open-phase fault in the external power source system of a nuclear plant:

3. A fundamental study: analysis of the open-phase fault in the steady state by symmetrical components.
4. A simulation study: detailed simulation of the open-phase fault using the ATP version of EMTP program.

The symmetrical components analysis of an open-phase fault in the external power system (138 kV and 400 kV) of the nuclear plant has revealed that



undervoltage protections of the auxiliary services busbars would not have detected the fault.

On the contrary:

- There is a significant unbalance (5.9%) when the open phase condition occurs the 138 kV external power system. The unbalance is measured as the ratio between the negative and the positive sequence currents.
- The zero-sequence current at the high voltage side of the external power system (138 kV or 400 kV) is almost the positive-sequence current.

The simulation study of the open-phase condition in both 400 kV and 138 kV external power systems has confirmed the results of the symmetrical components study.



Agradecimientos

El tema de este proyecto fin de carrera ha sido suscitado por el ingeniero industrial del ICAI D. Jacobo Archilla Martín-Sanz. También él ha proporcionado los datos de la planta considerados en el estudio.

El autor agradece al Sr. Archilla Martín-Sanz su colaboración.



Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 EL TEMA DEL PROYECTO

La seguridad es el factor fundamental que afecta la generación de energía eléctrica con plantas nucleares. La seguridad de las centrales nucleares es vigilada por organismos reguladores nacionales. En España, el Consejo de Seguridad Nuclear ejerce dicha función. A parte de los organismos nacionales, existen diversos organismos internacionales que cooperan para asegurar seguridad de las centrales nucleares.

Merece especial relevancia la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (World Association of Nuclear Operators, WANO). WANO [1]reúne a todas las compañías y países en el mundo con centrales nucleares en operación comercial con el propósito de alcanzar los más altos niveles de seguridad nuclear. Para alcanzar dicho objetivo, WANO hace que los operadores nucleares del mundo trabajen juntos para valorar y mejorar el comportamiento de las plantas gracias al apoyo mutuo, el intercambio de información y la imitación de las mejores prácticas. Entre otras prácticas WANO tiene establecido un procedimiento de comunicación de incidentes ocurridos en plantas nucleares que puedan afectar su seguridad para que los restantes operadores puedan aprender de ellos.

Este proyecto fin de grado parte de un evento ocurrido en la central nuclear Byron (IL, USA) y aborda el estudio de cómo respondería una central nuclear con una configuración muy común en caso de un suceso similar.



En efecto, el día 30 de enero de 2012 se produjo un disparo automático en la unidad 2 de la central nuclear Byron (IL, USA), estando ésta operando a plena potencia, debido al disparo de bombas principales por una subtensión en el tren de 6.9 kV. La subtensión se produjo por la rotura de un aislador de la fase C del sistema de 345 kV que alimenta los transformadores auxiliares. Esta rotura hizo que se cayese el conductor de la fase C, provocando que dicha fase quedara abierta.

El proyecto parte del análisis que hizo del evento de la central nuclear Byron la Comisión Regulatoria Nuclear (NRC) del gobierno de los Estados Unidos [2].

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto fin de grado es el estudio del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear con una configuración muy común.

De forma más precisa, se busca determinar si los medios de detección de tensión en las barras de servicios auxiliares detectarían la apertura de una fase.

Para alcanzar dicho objetivo, el proyecto plantea realizar dos estudios del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear:

5. Estudio fundamental: análisis de la pérdida de una fase en régimen permanente mediante el uso de componentes simétricas [3].



6. Estudio de simulación: simulación detallada de la pérdida de una fase utilizando la versión ATP del programa EMTP [4].

1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Esta memoria contiene Capítulo 8 capítulos.

El capítulo Capítulo 2 revisa el evento de la central nuclear Byron del día 30 de enero de 2012 y establece la configuración del sistema eléctrico de la central objeto de estudio.

El capítulo Capítulo 3 revisa el análisis de faltas equilibradas y desequilibradas en redes eléctricas.

El capítulo Capítulo 4 contiene el análisis de faltas serie en las alimentaciones a la central nuclear objeto de estudio.

El capítulo Capítulo 5 contiene la simulación de faltas serie en las alimentaciones a la central nuclear objeto de estudio.

El capítulo Capítulo 6 presenta las conclusiones del proyecto. El capítulo Capítulo 7 contiene las referencias bibliográficas.

El capítulo 8 es un apéndice que detalla el modelo del motor de inducción utilizado a lo largo del proyecto.



Capítulo 2. EL EVENTO DE LA CENTRAL NUCLEAR BYRON DEL DÍA 30 DE ENERO DE 2012

El Boletín 2012-01 Design Vulnerability in Electric Power System de la Nuclear Regulatory Commission de los Estados Unidos describe el suceso ocurrido en la central nuclear Byron de indisponibilidad inadvertida y la consecuente pérdida de energía exterior, ocurrida el 30 de enero de 2012.

La indisponibilidad de la fuente alternativa de energía eléctrica, ocurre como consecuencia de una falta de pérdida de una fase (falta serie) en la red alternativa que pasa inadvertida por el sistema de detección de mínima tensión de la central; posteriormente, se produce transferencia de la red principal a la alternativa, no siendo satisfactoria la misma por la indisponibilidad anteriormente descrita, y provocando la transferencia al diesel no automática. La especial gravedad del suceso reside en la no transferencia automática a los generadores diesel, estando parte de los servicios auxiliares, durante 8 minutos, sin alimentación exterior y sin alimentación del diesel.

2.1 LA CENTRAL NUCLEAR BYRON

La central nuclear Byron consta de dos grupos de tecnología Westinghouse PWR con una potencia de 1168 MW cada uno.



La red de 345 kV proporciona el suministro exterior de energía a cada una de las dos unidades de la central nuclear Byron a través de los transformadores denominados SAT (Station Auxiliary Transformer). Cada una de las unidades SAT puede suministrar la potencia necesaria para operar la planta al 100 % de carga. Cada una de las unidades de SAT, puede suministrar a todos los sistemas auxiliares relacionados con la seguridad de las dos unidades, por lo tanto se tiene la segunda fuente redundante exterior para cada unidad. Las barras relacionadas con la seguridad (ESF según siglas en inglés) y los equipos alimentados por las mismas, están protegidas frente a subtensiones mediante un sistema con dos niveles de subtensión. Por diseño, en el caso de pérdida de energía exterior, subtensión o tensión degradada prolongada, el suministro de energía eléctrica a las cargas relacionadas con la seguridad (ESF) se hace desde grupos diesel.

El sistema de distribución eléctrica de la central nuclear Byron unidad 2, consiste en 4 barras no relacionadas con la seguridad de 6.9 kV (non ESF), dos barras no relacionadas con la seguridad de 4.16 kV (non ESF) y dos barras relacionadas con la seguridad de 4.16 kV (ESF).

Durante la operación normal de la planta, dos barras ESF de 4.16 kV y dos barras no ESF de 6.9 kV se alimentan desde los transformadores SAT, los cuales están conectados a la red de 345 kV. El resto de las barras no ESF de 6.9 kV y 4.6 kV se alimentan desde dos transformadores auxiliares UAT (Unit Auxiliary Transformer) que se alimentan desde el generador principal.

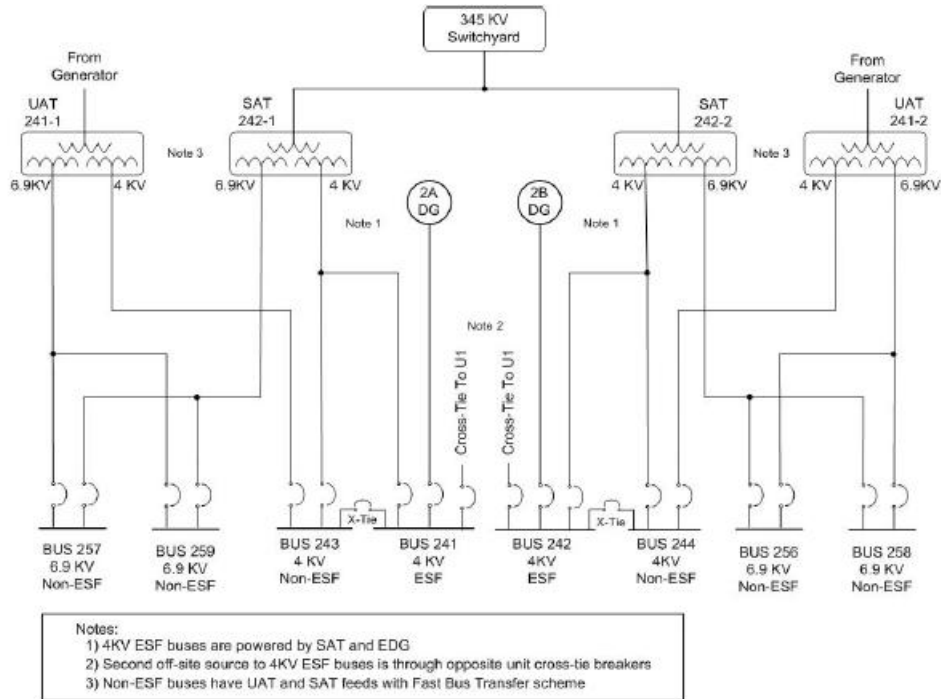


Figura 1: Esquema unifilar simplificado de la central nuclear Byron.

2.2 EL EVENTO DEL 30 DE ENERO DE 2012 EN LA CENTRAL NUCLEAR BYRON

El 30 de junio de 2012 disparó de forma automática la unidad 2 de la central nuclear Byron, estando operando a plena potencia en ese momento, debido al disparo de dos bombas de principales (B y C) por una subtensión en el sistema de 6.9 kV. La subtensión fue provocada por la rotura de un aislador de la fase C del sistema de 345kV que da tensión a los transformadores SAT. La rotura del aislador, provocó la caída del conductor de la fase C, resultando la pérdida, por circuito abierto, de la fase C y una falta de alta impedancia en dicha fase.



Tras el disparo del reactor, los dos embarrados de 6.9 kV que daban tensión a las RCPs A y D, que estaban alineadas a los transformadores UATs, automáticamente transfirieron a los transformadores SATs, conforme a diseño. Debido a que la fase C estaba en circuito abierto, el flujo de corriente en las fases A y B se incrementó debido al desequilibrio en tensiones y provocó el fallo de las cuatro RCPs que dispararon por sobrecorriente. A pesar de estar la fase C en circuito abierto, los transformadores SATs siguieron suministrando tensión a las barras de 4.16 kV ESF (barras A y B) debido a una debilidad en el diseño. El circuito abierto provocó una tensión desequilibrada en las barras de 6.9 kV no ESF y en las dos barras de 4.16 kV ESF. El desequilibrio de tensiones provocó sobrecorriente en diversas cargas relacionadas con la seguridad, lo cual provocó el disparo de las mismas.

Sin las RCPs, se realizó un enfriamiento mediante circulación natural de agua. Aproximadamente 8 minutos después del disparo del reactor, al accionar el conmutador de tensión desde la tensión A-B a las tensiones B-C y C-A, los operadores detectaron la pérdida de tensión en la fase C, procediendo a independizarse de la fuente de tensión exterior afectada. Al independizarse de la fuente de tensión exterior, se perdió tensión en las barras de 4.16kV ESF, arrancando los generadores diesel de forma automática. El titular declaró el evento como “evento no usual basado en pérdida de tensión exterior”. Al día siguiente se acometieron los trabajos de reparación y se restauró la fuente de tensión exterior.

El titular revisó el informe del evento e identificó debilidades en el sistema de protección de las barras de 4.16kV ESF. El sistema de protección frente a subtensiones está diseñado con dos relés de subtensión en cada una de las barras



ESF. Estos relés forman parte de una lógica dos de dos basada en la monitorización de las fases A-B y B-C. A pesar de estar la fase C en circuito abierto, la tensión en las fases A-B era normal; de esta forma, la situación no cumplía con los requisitos de la lógica para actuar. Al no actuarse la lógica dos de dos, a pesar de existir una situación de ausencia de tensión en una de las fases, el sistema no provocó la transferencia para separar las barras ESF desde la fuente de tensión exterior que no estaba operativa.

2.3 LA RESPUESTA DE LA INDUSTRIA NUCLEAR NORTEAMERICANA AL EVENTO DEL 30 DE ENERO DE 2012 EN LA CENTRAL NUCLEAR BYRON

El evento del 30 de enero de 2012 en la central nuclear Byron ha tenido una amplia respuesta por parte de la industria nuclear norteamericana. Cabe destacar especialmente la reunión que tuvo lugar el 28 de febrero de 2013, cuyo fin era discutir lo ocurrido en Byron, y que dejó algunas respuestas interesantes al respecto de empresas e instituciones de la industria nuclear:

- Duke Energy: esta empresa propuso la utilización de un relé de medida, que conjugase el objetivo de fiabilidad con la simplicidad del dispositivo. Para ello habían diseñado un modelo con PSCAD y ETAP, incidiendo fundamentalmente en la medida de las tres corrientes de fase, pues la fase abierta presenta corriente nula, mientras que las otras dos fases no. Se defendió la utilización de esos sistemas de relés de corriente por ser simples, tener múltiples fabricantes, ser potencialmente proactivos e



independientes de las impedancias a tierra o del transformador y presentar un diseño e instalación fácilmente replicables.

- Exelon Generation: esta compañía mostró en la reunión un algoritmo de detección/protección en el que se distinguían dos lazos lógicos separados. Por un lado, el primer lazo L1 proporciona detección de la condición de fase abierta a tierra y compara el cero de corriente de secuencia del relé con un valor establecido por el modelo analítico del programa de simulación EMTP. Por otro lado, el segundo lazo L2 compara las corrientes de fase medidas. En el momento de la reunión este algoritmo estaba siendo desarrollado en las centrales nucleares de Limerick, Peach Bottom y Oyster Creek.
- Electric Power Reserach Institute (EPRI): este instituto presentó dos estudios aplicados a la central nuclear Byron cuyo planteamiento es similar al realizado por este proyecto fin de grado. El primero [11] es un estudio fundamental (análisis de la pérdida de una fase en régimen permanente mediante el uso de componentes simétricas) y el segundo [12] es un estudio de simulación (simulación detallada de la pérdida de una fase utilizando el programa EMTP).

Estos estudios han sido conocidos durante el proceso de desarrollo del presente proyecto fin de grado.

2.4 LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN EXTERIOR DE UNA CENTRAL NUCLEAR

Las centrales nucleares tienen dos sistemas de alimentación exterior:



- Principal: la red de transporte a la cual vierte su producción la central nuclear
- Arranque: una red de nivel de tensión y capacidad inferior que permite el arranque en caso de indisponibilidad de la red de transporte a la cual vierte su producción la central nuclear

La Figura 2-1 muestra el esquema unifilar de los sistemas de alimentación exterior de central nuclear del caso de estudio.

El generador está conectado a la red a 400 kV a través del transformador principal T-1. La red a 400 kV es la red de transporte a la cual la central vierte su producción.

Se considera que existe interruptor de generación, que permite aislar el generador del resto del sistema eléctrico de la central, permitiendo que, en caso de parada del grupo, el sistema eléctrico de la central quede alimentado desde la red a 400 kV a través del transformador principal T-1 y del transformador auxiliar TA-1.

El sistema eléctrico de la central también puede estar alimentado de una red a 138 kV a través del transformador de arranque TA-12.

Aunque en el esquema unifilar de la Figura 2-1 se han representado un único transformador auxiliar y un único transformador de arranque, una central de estas características tiene dos transformadores auxiliares y dos transformadores de arranque.

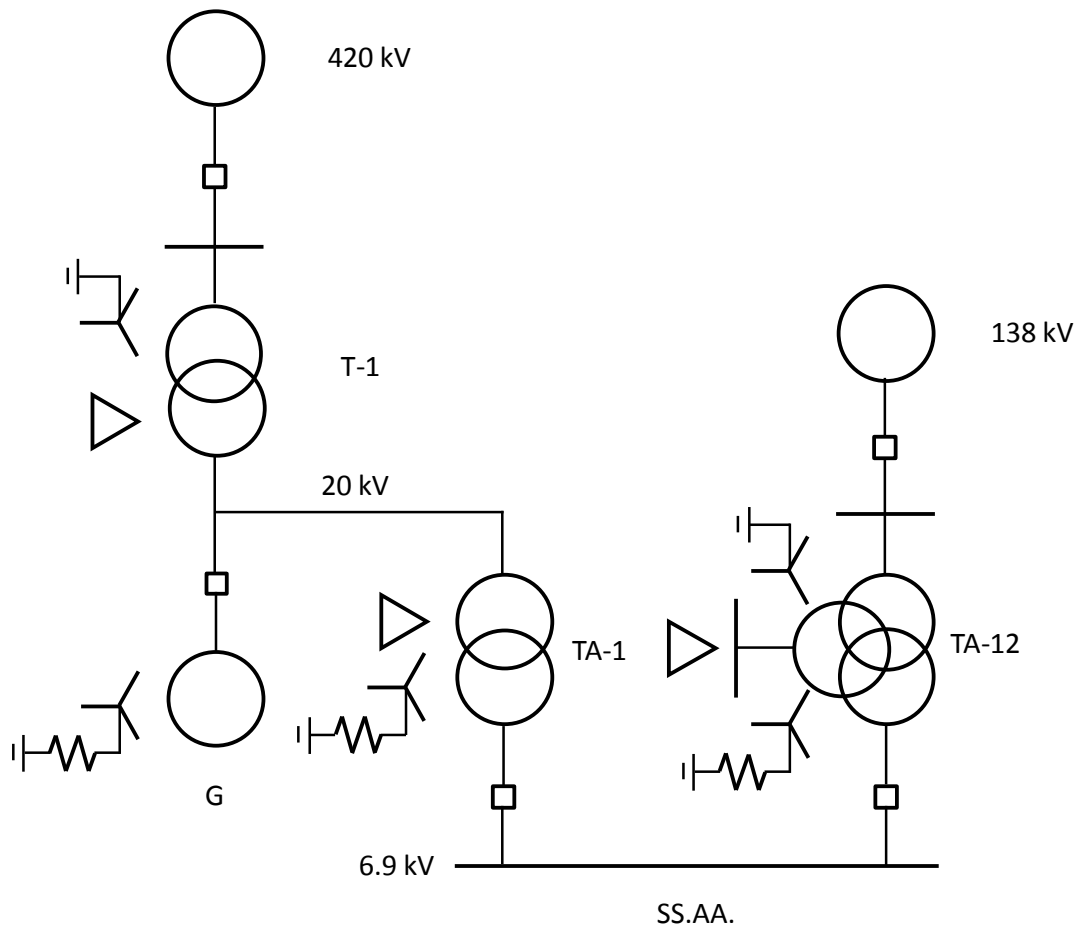


Figura 2-1: Esquema unifilar de los sistemas de alimentación exterior de la central nuclear del caso de estudio.

2.5 LAS PROTECCIONES DE MÍNIMA TENSIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR

Las protecciones de mínima tensión de las barras de servicios auxiliares de una central nuclear detectan la degradación de la tensión de alimentación a las cargas de la central (sobre motores, y entre ellos, los más importantes son los que



mueven las bombas de refrigeración del reactor) en caso de faltas en la red externa o interna de la central.

La degradación de la tensión de alimentación afecta a las prestaciones de las cargas movidas por los motores. Dependiendo de la magnitud y duración de la variación de tensión, las cargas pueden ser transferidas a una alimentación alternativa (red alternativa o generadores diesel).

Variaciones de tensión que pueden dar lugar a actuación son típicamente 90, 80 y 70%.

La medida de tensión en barras de servicios auxiliares se realiza típicamente con dos transformadores de tensión conectados en V.

Dependiendo de las barras de servicios auxiliares, las lógicas de las protecciones de mínima tensión pueden ser dos de tres o tres de tres.

La detección de la apertura de una fase en la alimentación exterior plantea no sólo si las protecciones de mínima tensión de las barras de servicios auxiliares podrían detectar este tipo de faltas, sino las barras de 138 kV y de 400 kV están equipadas con protecciones de mínima tensión.

Las barras de 138 kV no suelen disponer de protecciones de mínima tensión.

Las barras de 400 kV disponen de protecciones de mínima tensión. Los ajustes están típicamente ligados a la detección de falta de tensión en caso de cero.



Capítulo 3. ANÁLISIS DE FALTAS

Un cortocircuito es una situación anómala de un circuito eléctrico en la que dos puntos que en condiciones normales de funcionamiento están a distinto potencial se ponen accidentalmente en contacto. En general los cortocircuitos se producen al fallar el aislamiento. El aislamiento puede fallar debido a muy diferentes causas como son: pérdida de las propiedades aislantes del medio, sobretensiones inadmisibles o efectos mecánicos (roturas, deformaciones o desplazamientos).

Los cortocircuitos producen, en general, elevadas corrientes. Los efectos de las corrientes son de tres tipos:

- Dinámicos (fuerzas). Dependen del valor máximo (pico) de la corriente.
- Térmicos (calentamientos). Dependen del valor eficaz de las corrientes.
- Caídas de tensión.

En los sistemas trifásicos los cortocircuitos pueden ser:

- Equilibrados. Las tres fases se ponen en contacto en el mismo punto y al mismo tiempo. El circuito trifásico resulta equilibrado.
- Desequilibrados. Una fase se pone en contacto con tierra o dos fases se ponen en contacto entre sí o entre sí y a tierra. El circuito trifásico resulta desequilibrado.

El concepto de falta es más general que el concepto de cortocircuito. Además de las faltas desequilibradas mencionadas que son faltas desequilibradas paralelo,



pueden ocurrir faltas desequilibradas serie. En las faltas serie, una fase o dos fases están abiertas.

Las aplicaciones fundamentales de los análisis de faltas son:

- Dimensionamiento de equipos e instalaciones.
- Ajuste de las protecciones.

Este proyecto fin de grado estudia el comportamiento de sistemas eléctricos en condiciones desequilibradas.

Este capítulo se presenta los conceptos fundamentales del análisis de las faltas trifásicas equilibradas como de las faltas desequilibradas paralelo y serie.

La teoría para el análisis de faltas trifásicas equilibradas y faltas desequilibradas para paralelo puede encontrarse en gran número de libros ([14]-[17]). Sin embargo, la teoría para el análisis de faltas desequilibradas serie es más infrecuente [3].

3.1 FALTAS TRIFÁSICAS EQUILIBRADAS

En los cortocircuitos equilibrados, las tres fases se ponen en contacto en el mismo punto y al mismo tiempo. Si el circuito de prefault es trifásico equilibrado, el circuito en falta resultará un circuito trifásico equilibrado. Se van a considerar dos casos circuitos trifásicos equilibrados: uno sin acoplamiento magnético y otro con acoplamiento magnético.



3.1.1 FALTA TRIFÁSICA FRANCA EN CIRCUITOS TRIFÁSICOS SIN ACOPLAMIENTO MAGNÉTICO

Considérese el circuito trifásico en falta de la Figura 3-1. Este circuito puede representar la ocurrencia de un cortocircuito trifásico en un circuito representado por su equivalente Thèvenin (fuente trifásica en serie con una impedancia trifásica). Si se considera que el circuito trifásico es equilibrado:

$$\mathbf{E}_A = E \angle 0^\circ$$

$$\mathbf{E}_B = E \angle -120^\circ$$

$$\mathbf{E}_C = E \angle 120^\circ$$

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_C = \mathbf{Z} = Z \angle \varphi$$

entonces:

$$\mathbf{I}_A = I \angle (-\varphi)$$

$$\mathbf{I}_B = I \angle (-120^\circ - \varphi)$$

$$\mathbf{I}_C = I \angle (120^\circ - \varphi)$$

$$I = \frac{E}{Z}$$

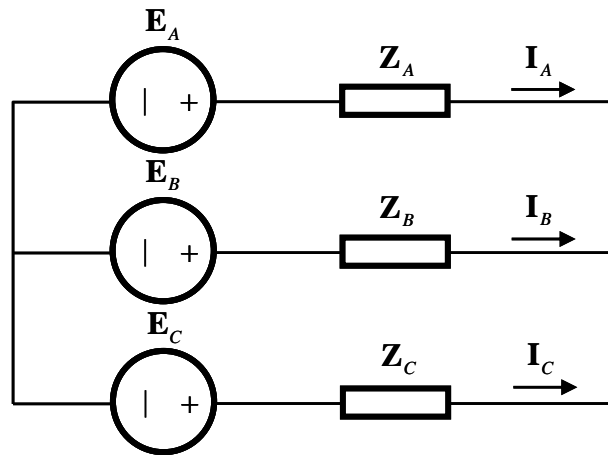


Figura 3-1: Circuito trifásico en falta.

Por tanto, circuito trifásico equilibrado se puede resolver resolviendo el circuito equivalente fase-neutro de la Figura 3-2 donde la corriente de falta trifásica es:

$$I_F = \frac{E}{Z}$$

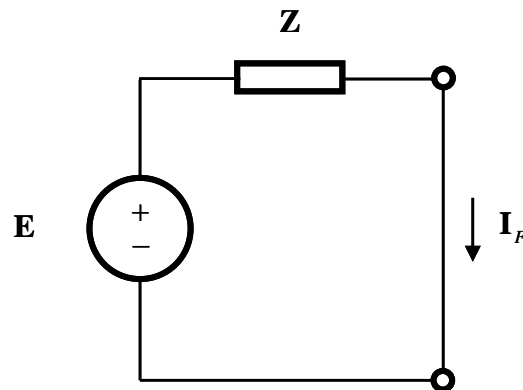


Figura 3-2: Circuito equivalente fase-neutro del circuito trifásico en falta de la Figura 3-1.

La potencia de cortocircuito en el punto en falta se define como:



$$S_{cc} = \sqrt{3}U_n I_F$$

donde U_n es la tensión compuesta (fase-fase) nominal.

3.2 FALTA TRIFÁSICA FRANCA EN CIRCUITOS TRIFÁSICOS CON ACOPLAMIENTO MAGNÉTICO

Nótese que en el apartado anterior no se ha considerado acoplamiento magnético entre las fases. En realidad en las redes eléctricas (líneas, transformadores y generadores) existe acoplamiento magnético entre las fases. En ese caso, la formulación más general del circuito de la Figura 3-1 sería:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_A \\ \mathbf{E}_B \\ \mathbf{E}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA} & \mathbf{Z}_{AB} & \mathbf{Z}_{AC} \\ \mathbf{Z}_{BA} & \mathbf{Z}_{BB} & \mathbf{Z}_{BC} \\ \mathbf{Z}_{CA} & \mathbf{Z}_{CB} & \mathbf{Z}_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix}$$

mientras que la formulación particular del circuito de la Figura 3-1 es:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_A \\ \mathbf{E}_B \\ \mathbf{E}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_A & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_B & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix}$$

con:

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_C = \mathbf{Z}$$



En el caso particular de acoplamiento magnético simétrico (se encuentra en las líneas eléctricas idealmente traspuestas, ver Figura 3-3):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_A \\ \mathbf{E}_B \\ \mathbf{E}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_s & \mathbf{Z}_m & \mathbf{Z}_m \\ \mathbf{Z}_m & \mathbf{Z}_s & \mathbf{Z}_m \\ \mathbf{Z}_m & \mathbf{Z}_m & \mathbf{Z}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix}$$

Línea área trifásica traspuesta

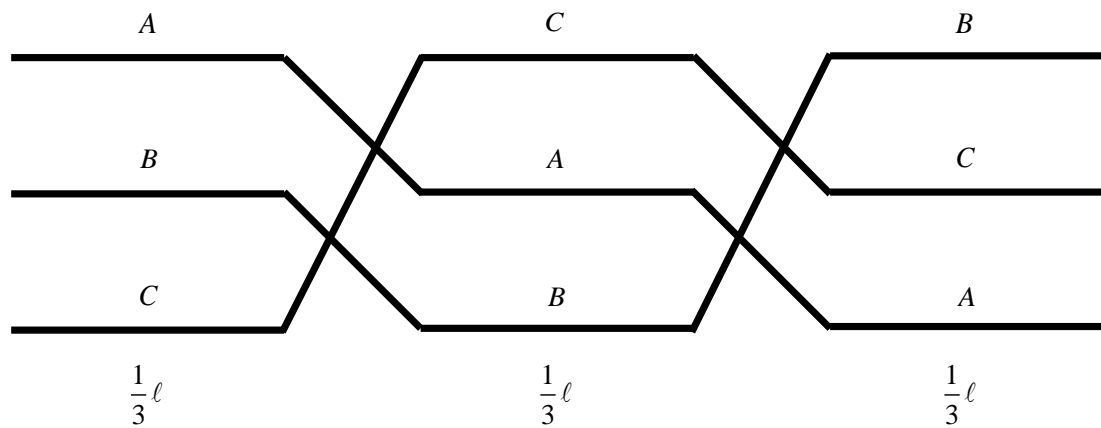


Figura 3-3: Línea eléctrica idealmente traspuesta.

se puede resolver el circuito trifásico por medio de un circuito equivalente fase-neutro como el de la Figura 3-4 siendo la corriente de cortocircuito trifásico:

$$\mathbf{I}_F = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1}$$

donde Z_1 es la denominada impedancia de secuencia positiva:

$$Z_1 = Z_s - Z_m$$

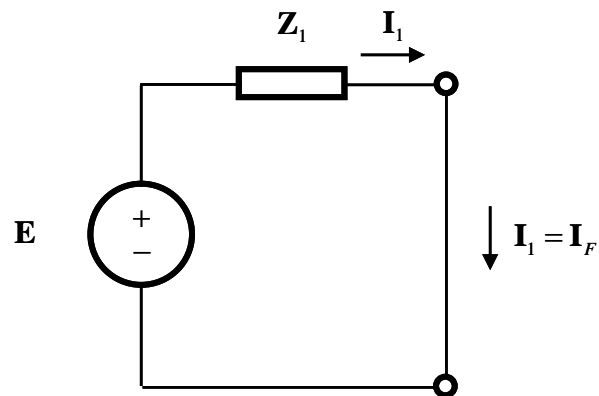


Figura 3-4: Circuito equivalente fase-neutro de circuito trifásico con acoplamiento magnético simétrico.

3.3 FALTA TRIFÁSICA A TRAVÉS DE UNA IMPEDANCIA EN CIRCUITOS TRIFÁSICOS CON ACOPLAMIENTO MAGNÉTICO

Considérese una falta trifásica a tierra a través de impedancia tal y como se muestra en la Figura 3-5.

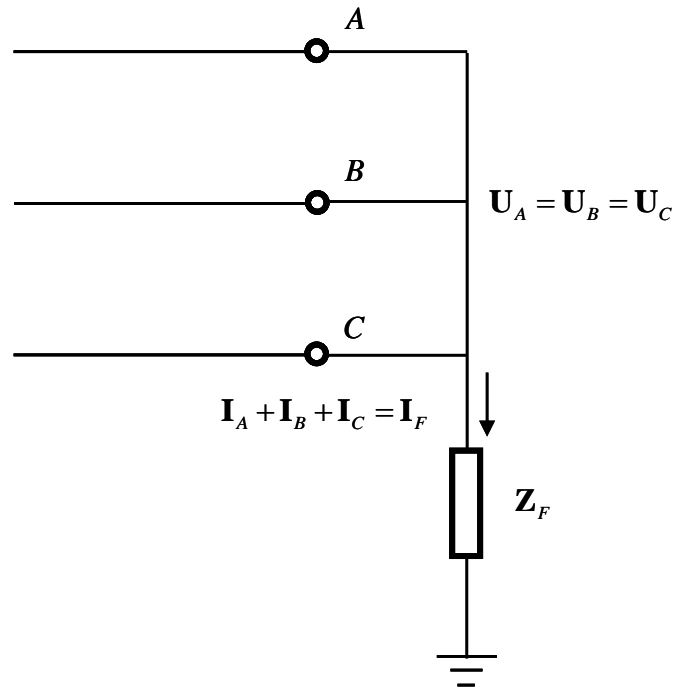


Figura 3-5: Falta trifásica a través de impedancia.

El análisis de la red eléctrica en caso de una falta trifásica se hace mediante el circuito equivalente fase-neutro a la secuencia directa. La Figura 3-5 muestra el equivalente Thèvenin de la red desde el punto en falta y la impedancia de falta siendo:

E la tensión simple (fase-neutro) en V a circuito abierto en el punto en falta

Z₁ la impedancia por fase en Ohm a circuito abierto en el pinto en falta

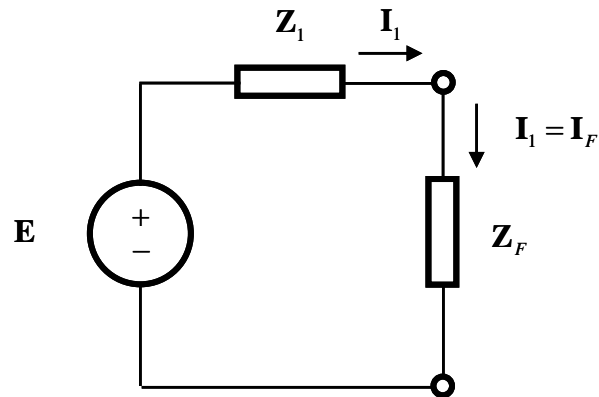


Figura 3-6: Circuito equivalente en caso de falta trifásica.

La corriente de falta es:

$$I_F = I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_F}$$

3.4 MÉTODO DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

Esta sección comienza con la presentación del método de componentes simétricas. Sigue con la obtención de la forma de conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de faltas monofásicas a tierra, de faltas bifásicas y de faltas bifásicas a tierra. Después se detalla la representación de los componentes de las redes eléctricas a las secuencias inversa y homopolar.

El Teorema de Fortesque dice que todo sistema trifásico desequilibrado se puede expresar como superposición de tres sistemas trifásicos equilibrados (uno de secuencia directa, otro de secuencia inversa y otro de secuencia homopolar). La Figura 3-7 muestra la representación fasorial de los sistemas de tensiones de



secuencias directa, inversa y homopolar. La Figura 3-8, la Figura 3-9 y la Figura 3-10 muestran la representación temporal de los sistemas de secuencias directa, inversa y homopolar.

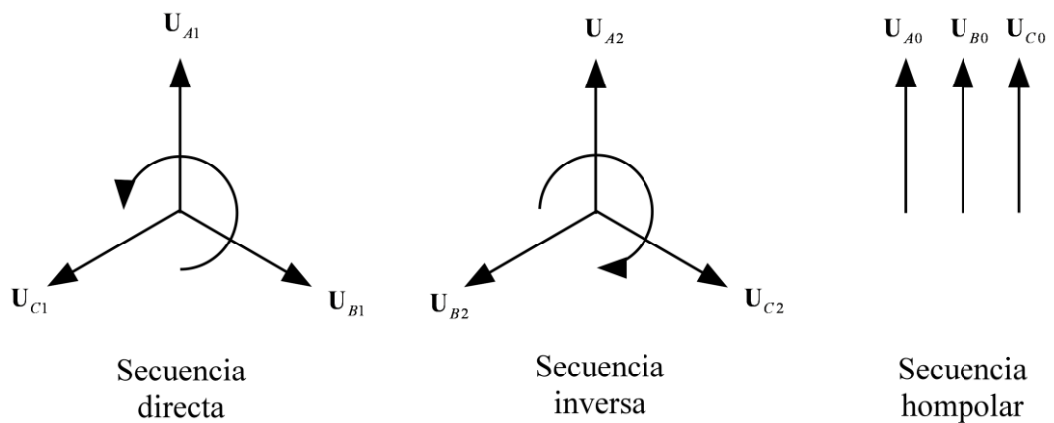


Figura 3-7: Representación fasorial de los sistemas de secuencia directa, inversa y homopolar.

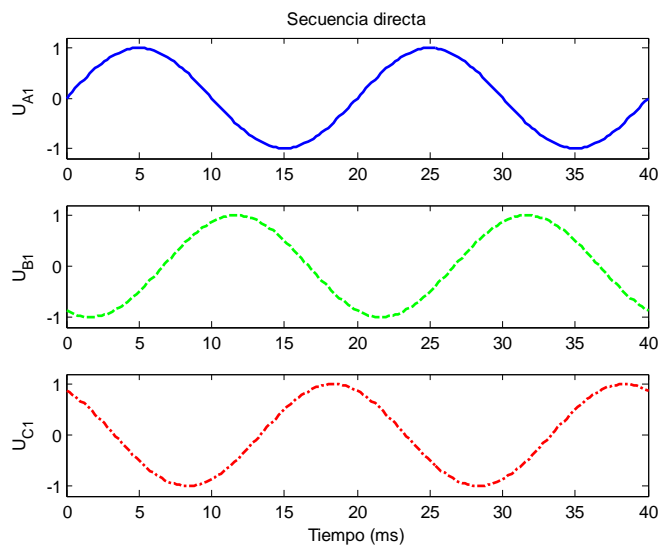


Figura 3-8: Representación temporal de un sistema de secuencia directa.

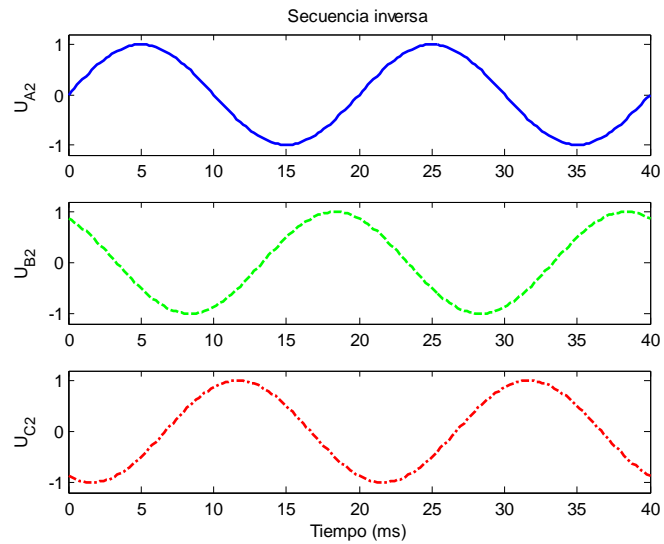


Figura 3-9: Representación temporal de un sistema de secuencia inversa.

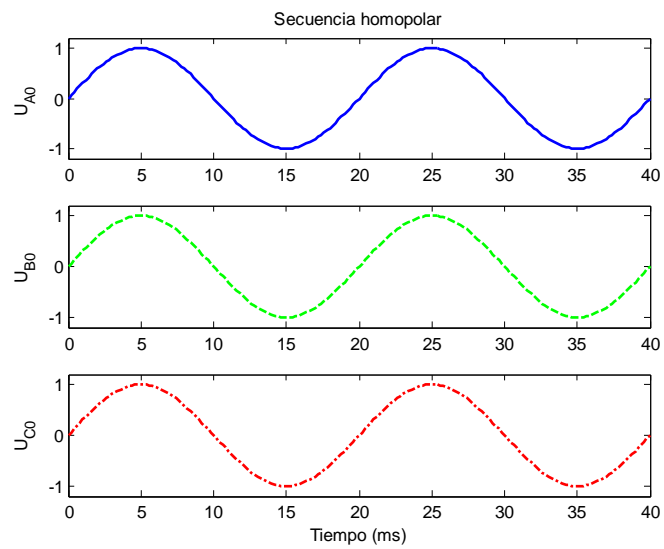


Figura 3-10: Representación temporal de un sistema de secuencia homopolar.



El teorema de Fortesque se puede formular matemáticamente por medio de una transformación lineal denominada transformación directa de componentes simétricas que se aplica tanto a las tensiones como a las corrientes:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}$$

donde (ver Figura 3-11):

$$\mathbf{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$
$$\mathbf{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

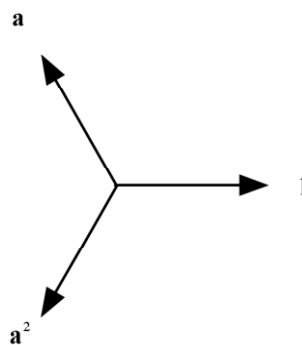


Figura 3-11: Representación fasorial de 1, \mathbf{a} , \mathbf{a}^2 .



Por supuesto, se puede definir la transformación inversa de componentes simétricas de tensiones y corrientes como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix}$$

El significado físico de la corriente y de la tensión homopolar se puede mostrar a través de dos ejemplos sencillos.

La conexión paralelo de los secundarios de los transformadores de intensidad (conexión Hollgreen) permite medir la corriente homopolar tal y como muestra la Figura 3-12

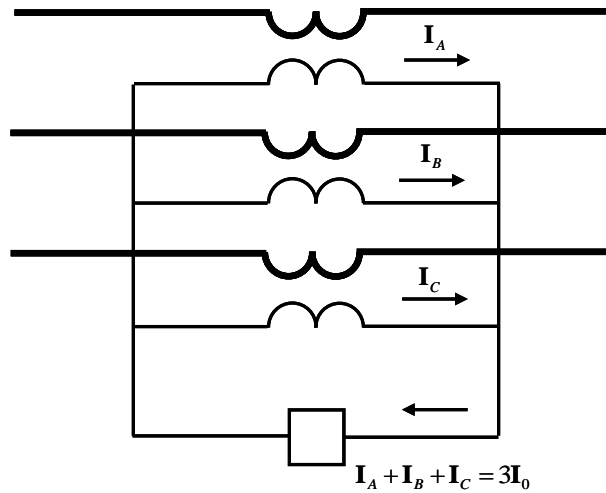


Figura 3-12: Conexión paralelo de los secundarios de los transformadores de intensidad para medir la corriente homopolar.

La conexión en triángulo abierto de los secundarios de los transformadores de tensión permite medir la tensión homopolar tal y como muestra la Figura 3-13.

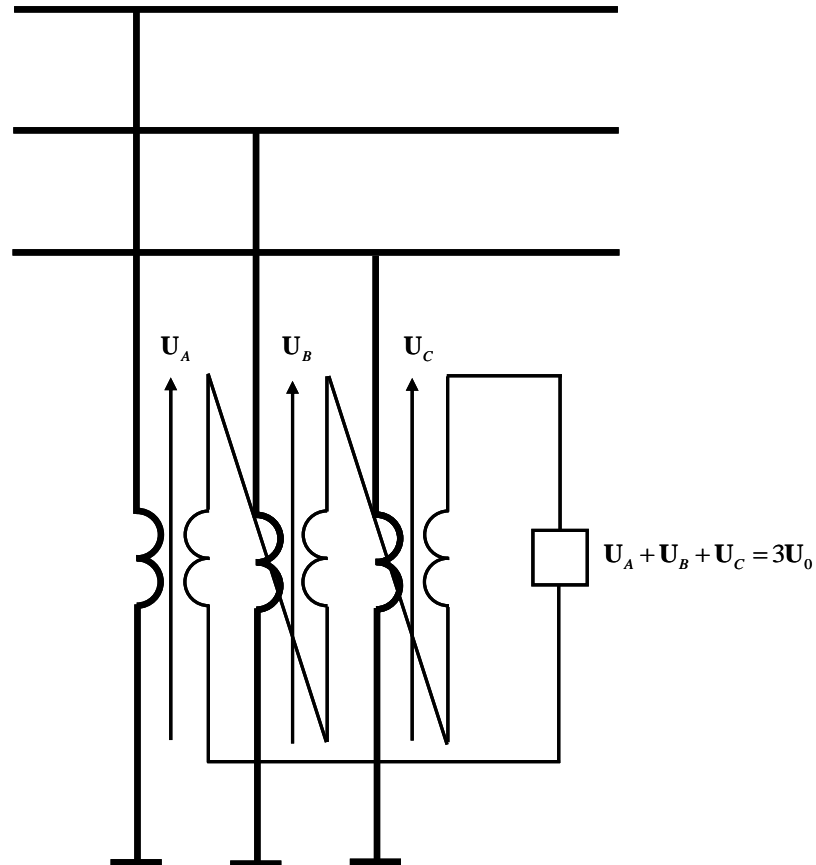


Figura 3-13: Conexión en triángulo abierto de los secundarios de los transformadores de tensión para medir la tensión homopolar.

3.5 REPRESENTACIÓN DE GENERADORES, MOTORES Y TRANSFORMADORES A LAS SECUENCIAS DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR

Este apartado revisa los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar de generadores, motores, líneas y transformadores.

3.5.1 REPRESENTACIÓN DE GENERADORES SÍNCRONOS

La Figura 3-14 muestra el circuito equivalente de un generador síncrono a la secuencia directa.

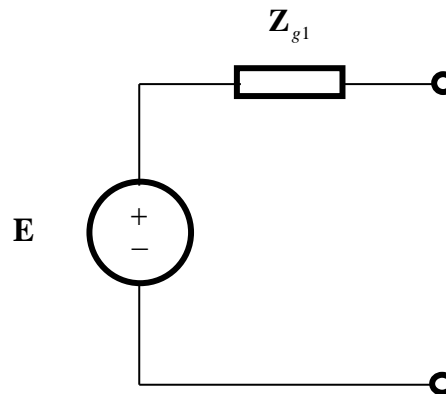


Figura 3-14: Circuito equivalente de un generador a la secuencia directa.

El comportamiento de los generadores síncronos en caso de un cortocircuito depende del tiempo tras la ocurrencia del cortocircuito. Dependiendo de la aplicación del estudio de cortocircuitos, los generadores síncronos se representan por el circuito equivalente subtransitorio (cuando la aplicación del estudio de cortocircuitos es la selección de aparamenta) o por el circuito equivalente transitorio (cuando el propósito del estudio de cortocircuitos es el ajuste de protecciones).

La impedancia de secuencia directa de un generador es la suma de la resistencia del estator y de la correspondiente reactancia. La resistencia del estator es del orden de 0.001 pu.



La reactancia subtransitoria X'' está comprendida entre 0.1 y 0.3 pu en la potencia aparente base de la máquina.

La reactancia transitoria X' está comprendida entre 0.2 y 0.5 pu en la potencia aparente base de la máquina.

La Figura 3-15 muestra el circuito equivalente de un generador síncrono a la secuencia inversa.

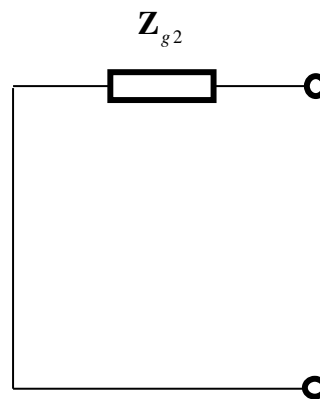


Figura 3-15: Circuito equivalente de un generador a la secuencia inversa.

La representación de los generadores a la secuencia homopolar: (está afectada por la forma de puesta a tierra). Los arrollamientos de los generadores de las grandes centrales de generación están conectados en estrella con el neutro puesto a tierra a través de resistencia. La Figura 3-16 muestra el circuito equivalente a la secuencia homopolar.

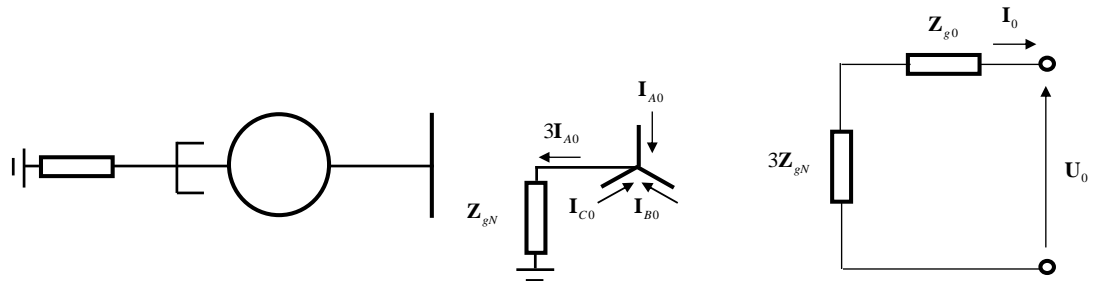


Figura 3-16: Representación de generadores a la secuencia homopolar.

3.5.2 REPRESENTACIÓN DE MOTORES ASÍNCRONOS

El comportamiento de los motores asíncronos en caso de un cortocircuito depende del tiempo tras la ocurrencia del cortocircuito.

La Figura 3-17 muestra el circuito equivalente transitorio de un motor asíncrono a la secuencia directa.

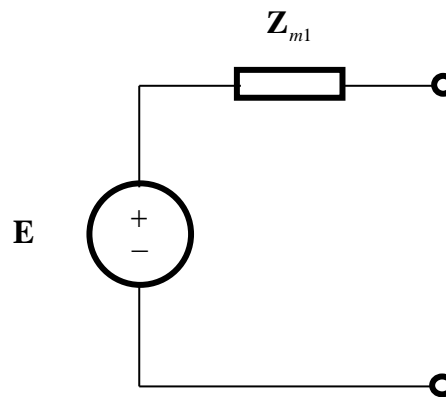


Figura 3-17: Circuito equivalente transitorio de un motor asíncrono a la secuencia directa.



La impedancia transitoria es la impedancia de cortocircuito. Si la máquina asíncrona se representa por su circuito equivalente en T, la impedancia transitoria es la impedancia de cortocircuito:

$$\mathbf{Z}_{m1} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{R_2 + jX_2}}$$

La Figura 3-18 muestra el circuito equivalente permanente de un motor asíncrono a la secuencia directa.

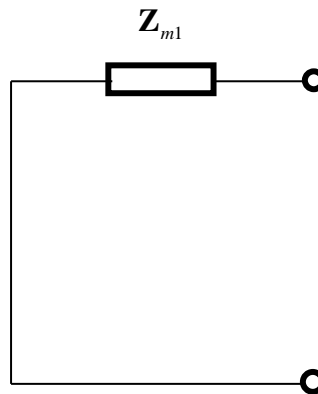


Figura 3-18: Circuito equivalente permanente de un motor asíncrono a la secuencia directa.

Si la máquina asíncrona se representa por su circuito equivalente en T, la impedancia permanente de secuencia directa es:

$$\mathbf{Z}_{m1} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}}$$



La Figura 3-18 muestra el circuito equivalente permanente de un motor asíncrono a la secuencia directa.

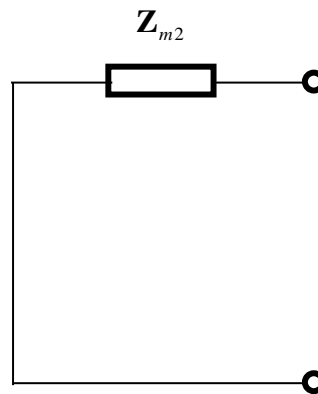


Figura 3-19: Circuito equivalente de un motor asíncrono a la secuencia inversa.

Si la máquina asíncrona se representa por su circuito equivalente en T, la impedancia de secuencia inversa es:

$$\mathbf{Z}_{m2} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\frac{R_2}{2-s} + jX_2}}$$

También la representación de los motores asíncronos a la secuencia homopolar está afectada por la forma de puesta a tierra del neutro. Los arrollamientos del motor pueden estar conectados en triángulo o en estrella con el neutro no accesible. La Figura 3-20 muestra el circuito equivalente a la secuencia homopolar de un motor asíncrono cuando los arrollamientos del motor están conectados en estrella y el neutro no está accesible.

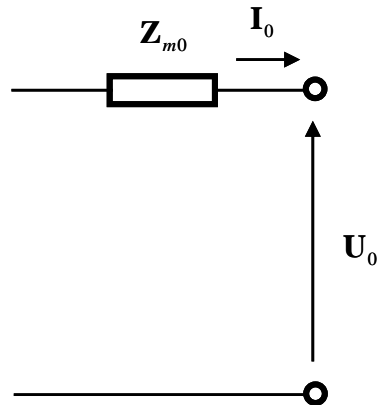


Figura 3-20: Circuito equivalente de secuencia homopolar de un motor con el neutro no accesible.

3.5.3 REPRESENTACIÓN DE TRANSFORMADORES

La Figura 3-21 muestra el circuito equivalente a la secuencia directa de un transformador de dos arrollamientos.

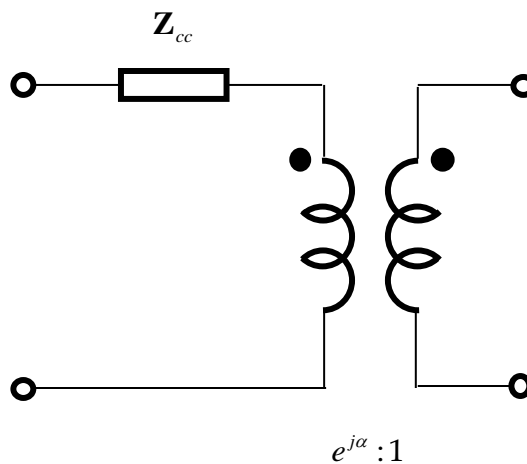


Figura 3-21: Circuito equivalente a la secuencia directa de un transformador de dos arrollamientos.

La impedancia de cortocircuito del transformador Z_{cc} está comprendida entre el 0.04 y el 0.18 pu en la potencia aparente base de la máquina. El ángulo α representa el desfase introducido por el grupo de conexión.

La Figura 3-22 muestra el circuito equivalente a la secuencia directa de un transformador de tres arrollamientos.

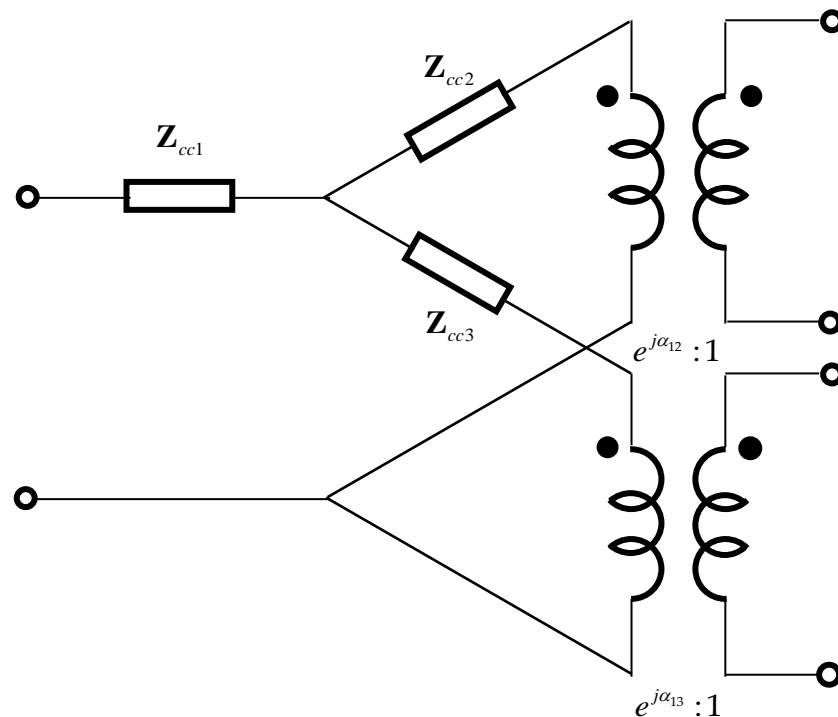


Figura 3-22: Circuito equivalente a la secuencia directa de un transformador de tres arrollamientos.

La Figura 3-23 muestra el circuito equivalente a la secuencia inversa de un transformador de dos arrollamientos.

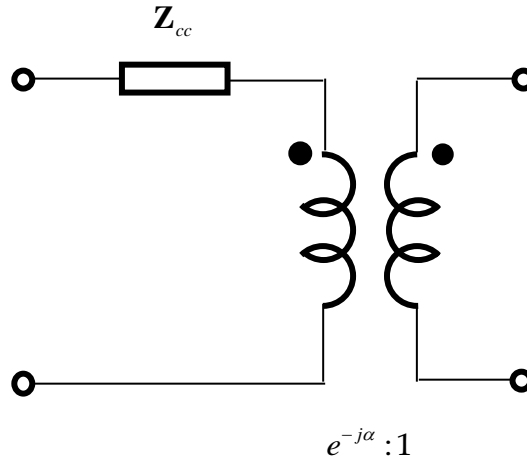


Figura 3-23: Circuito equivalente a la secuencia inversa de un transformador de dos arrollamientos.

La Figura 3-24 muestra el circuito equivalente a la secuencia inversa de un transformador de tres arrollamientos.

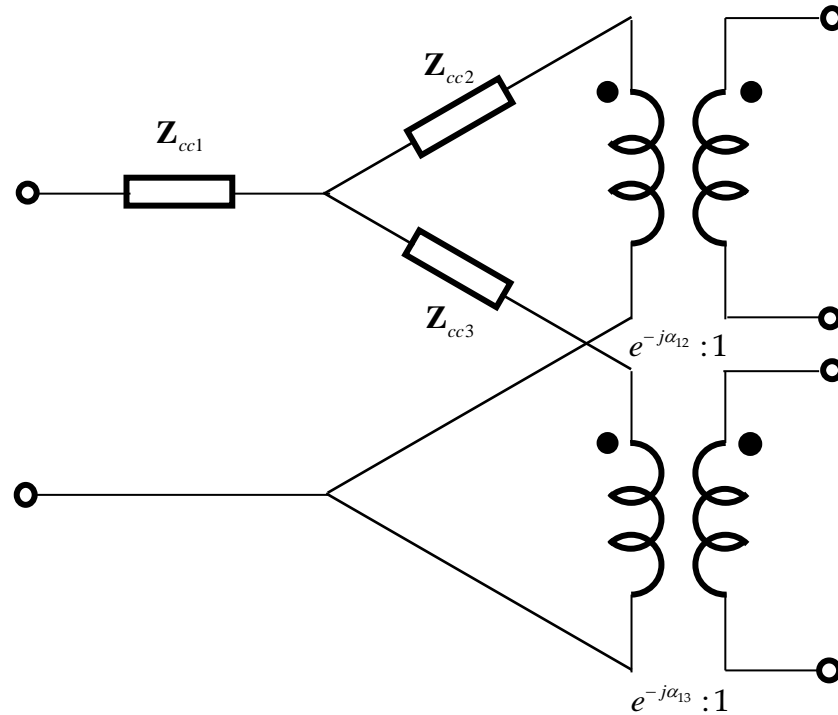


Figura 3-24: Circuito equivalente a la secuencia inversa de un transformador de tres arrollamientos.

La representación de transformadores a la secuencia homopolar depende del grupo de conexión. La Figura 3-25 Representación de transformadores YNyn y YNd a la secuencia homopolar. Se muestra como el transformador YNyn permite el paso de la secuencia homopolar mientras que el transformador YNd no lo permite. La Figura 3-26 muestra el circuito a la secuencia homopolar de un transformador de tres arrollamientos YNynd.

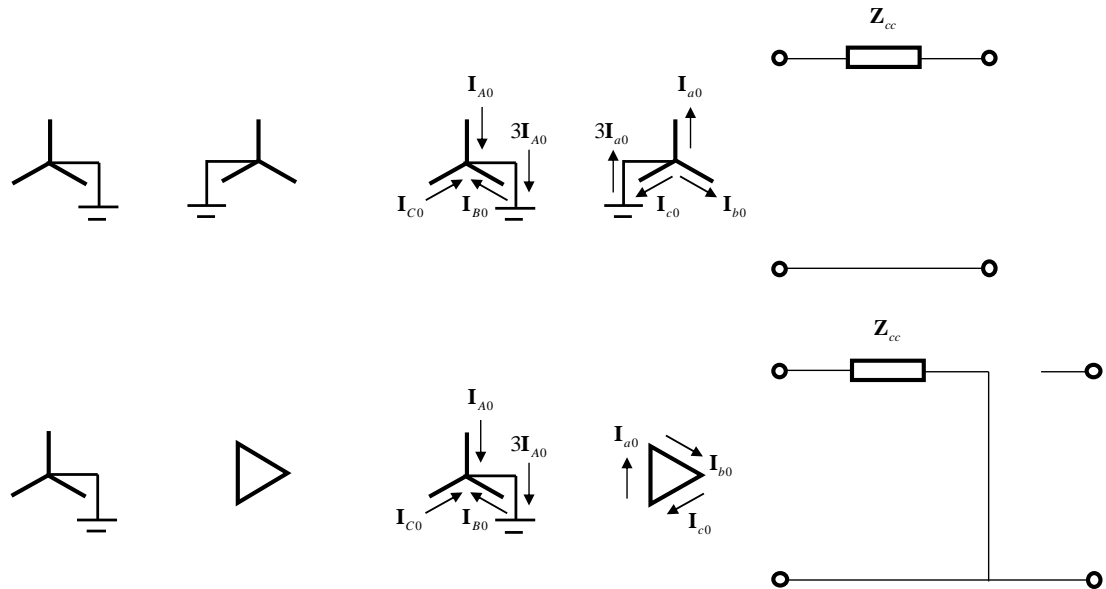


Figura 3-25: Representación de transformadores YNyn y YNd a la secuencia homopolar.

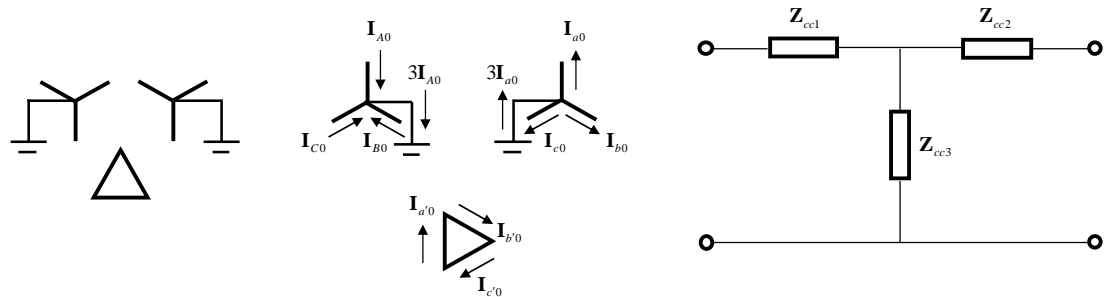


Figura 3-26: Representación de un transformador YNynd a la secuencia homopolar.

3.5.4 REPRESENTACIÓN EQUIVALENTE DE LA RED

La representación equivalente de una red a la secuencia directa viene dada típicamente por la corriente de cortocircuito trifásica $I_{cc3\phi}$ o la potencia de cortocircuito trifásica $S_{cc3\phi}$. La impedancia de secuencia directa del equivalente Thèvenin se determina como:



$$\mathbf{Z}_{e1} = jX_{e1} = j \frac{E}{I_{cc3\phi}} = j \frac{U_n^2}{S_{cc3\phi}}$$

siendo E la tensión simple nominal de la red y U_n la tensión compuesta nominal de la red.

La representación equivalente de una red a la secuencia directa viene dada típicamente por la corriente de cortocircuito trifásica $I_{cc1\phi}$. La impedancia de secuencia homopolar del equivalente Thèvenin se determina como:

$$\mathbf{Z}_{e0} + 2\mathbf{Z}_{e1} = jX_{e0} + 2jX_{e1} = j3 \frac{E}{I_{cc1\phi}}$$
$$\mathbf{Z}_{e0} = jX_{e0} = j3 \frac{E}{I_{cc1\phi}} - 2j \frac{E}{I_{cc3\phi}}$$

3.6 CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA

El punto de partida para el análisis de faltas desequilibradas es la obtención de los circuitos equivalentes fase-neutro de la red eléctrica visto desde el punto en falta a las secuencias directa, inversa y homopolar mostrados en la Figura 3-27.

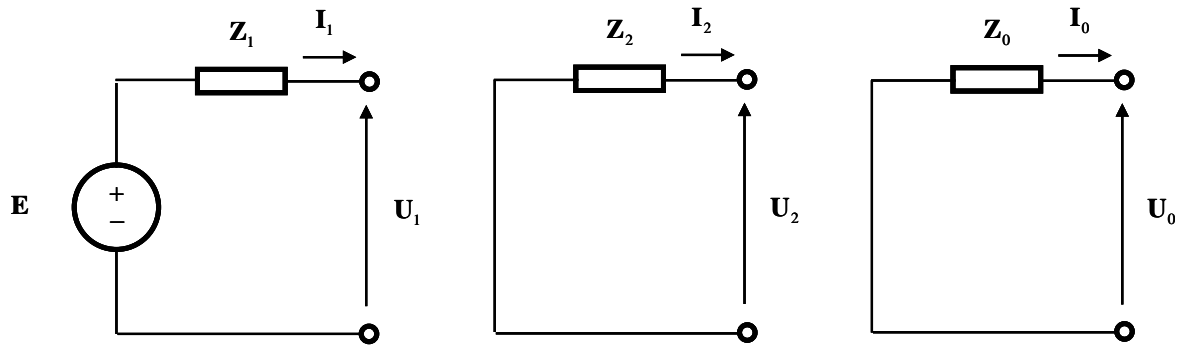


Figura 3-27: Circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar.

3.7 FALTAS DESEQUILBRADAS PARALELO

Esta sección está dedicada al análisis de faltas desequilibradas paralelo. Las faltas desequilibradas paralelo pueden ser:

- Faltas monofásicas a tierra.
- Faltas bifásicas.
- Faltas bifásicas a tierra.

3.7.1 CONEXIÓN DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA EN CASO DE UNA FALTA MONOFÁSICA A TIERRA

La Figura 3-28 muestra la ocurrencia de una falta monofásica a tierra en la fase A a través de una impedancia.

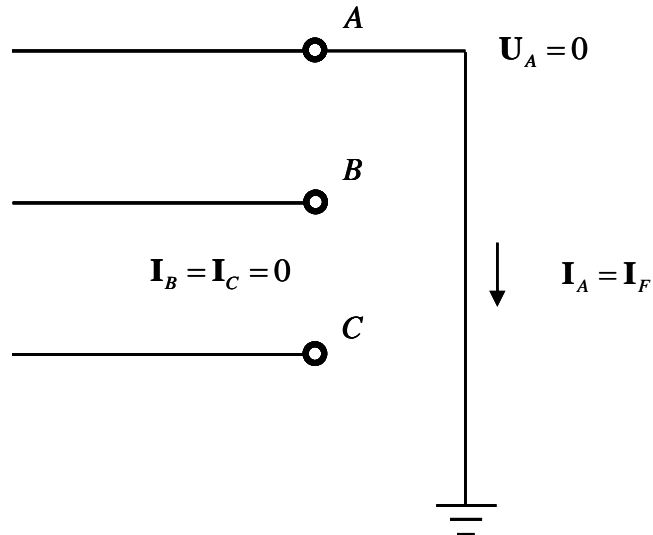


Figura 3-28: Falta monofásica a tierra.

Las condiciones de una falta monofásica a tierra en la fase A a través de una impedancia son:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_B &= \mathbf{I}_C = 0 \\ \mathbf{U}_A &= 0 \end{aligned}$$

Si se imponen las condiciones de la falta a las corrientes de secuencia, queda:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_0 &= \frac{1}{3} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_1 &= \frac{1}{3} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_2 &= \frac{1}{3} \mathbf{I}_A \end{aligned} \right\} \mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$$

La corriente de falta será:



$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = \frac{1}{3} \mathbf{I}_A = \frac{1}{3} \mathbf{I}_F$$
$$\mathbf{I}_F = 3 \cdot \mathbf{I}_0$$

Si se imponen las condiciones de la falta a la tensión de la fase A resulta:

$$\mathbf{U}_A = \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 = 0$$

Se deduce que las redes de secuencia directa, inversa y homopolar se conectan en SERIE tal y como se muestra en la Figura 3-29.

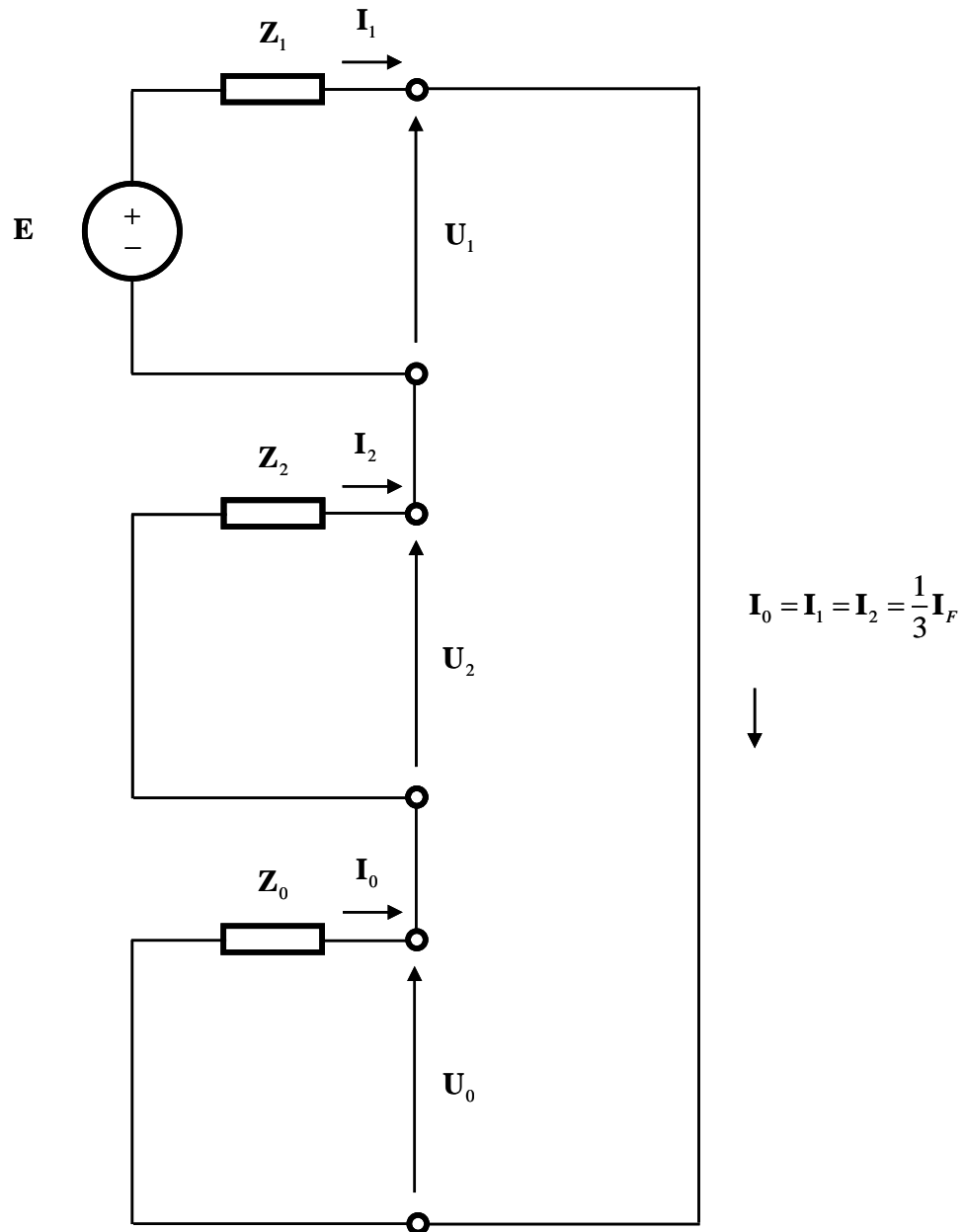


Figura 3-29: Conexión de las redes de secuencia en caso de una falta monofásica a tierra.

La corriente de falta se calcula como:



$$\mathbf{I}_F = 3 \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0}$$

Teniendo presente que la corriente de cortocircuito trifásico vale:

$$\mathbf{I}_{F,3\phi} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1}$$

cuando las impedancias de secuencia son iguales, las corrientes de cortocircuito monofásico y trifásico están relacionadas por:

$$\mathbf{I}_{F,1\phi} = 3 \cdot \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0} \Big|_{\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_0} = 3 \cdot \frac{\mathbf{E}}{3\mathbf{Z}_1} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1} = \mathbf{I}_{F,3\phi}$$

La corriente de cortocircuito monofásico es igual a la corriente de cortocircuito trifásico cuando las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar son iguales.

La corriente de cortocircuito monofásico podría ser más grande que la corriente de cortocircuito trifásico si la impedancia de secuencia homopolar es más pequeña que la impedancia de secuencia directa.



3.7.2 CONEXIÓN DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA EN CASO DE UNA FALTA MONOFÁSICA A TIERRA A TRAVÉS DE IMPEDANCIA

Considérese una falta monofásica a tierra a través de impedancia tal y como se muestra en la Figura 3-30.

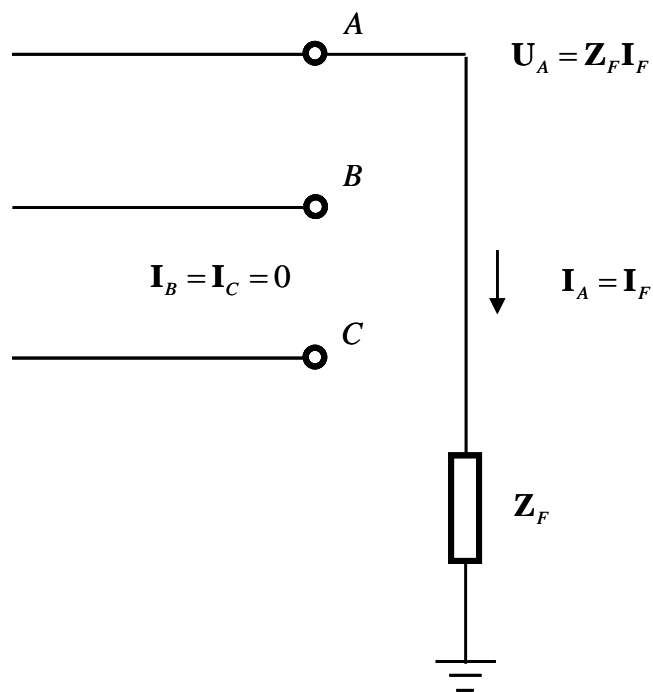


Figura 3-30: Falta monofásica a tierra a través de impedancia.

Las condiciones que describen una falta monofásica a través de una impedancia son:

$$I_B = I_C = 0$$
$$U_A = Z_F I_A = Z_F I_F$$



Si se imponen las condiciones de la falta a las corrientes de secuencia, queda:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_0 &= \frac{1}{3} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_1 &= \frac{1}{3} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_2 &= \frac{1}{3} \mathbf{I}_A \end{aligned} \right\} \mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$$

La corriente de falta será:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 &= \frac{1}{3} \mathbf{I}_A = \frac{1}{3} \mathbf{I}_F \\ \mathbf{I}_F &= 3 \cdot \mathbf{I}_0 \end{aligned}$$

Si se imponen las condiciones de la falta a la tensión de la fase A resulta:

$$\mathbf{U}_A = \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 = \mathbf{Z}_F \mathbf{I}_F = 3\mathbf{Z}_F \mathbf{I}_0$$

Se deduce que las redes de secuencia directa, inversa y homopolar se conectan en SERIE tal y como se muestra en la Figura 3-31.

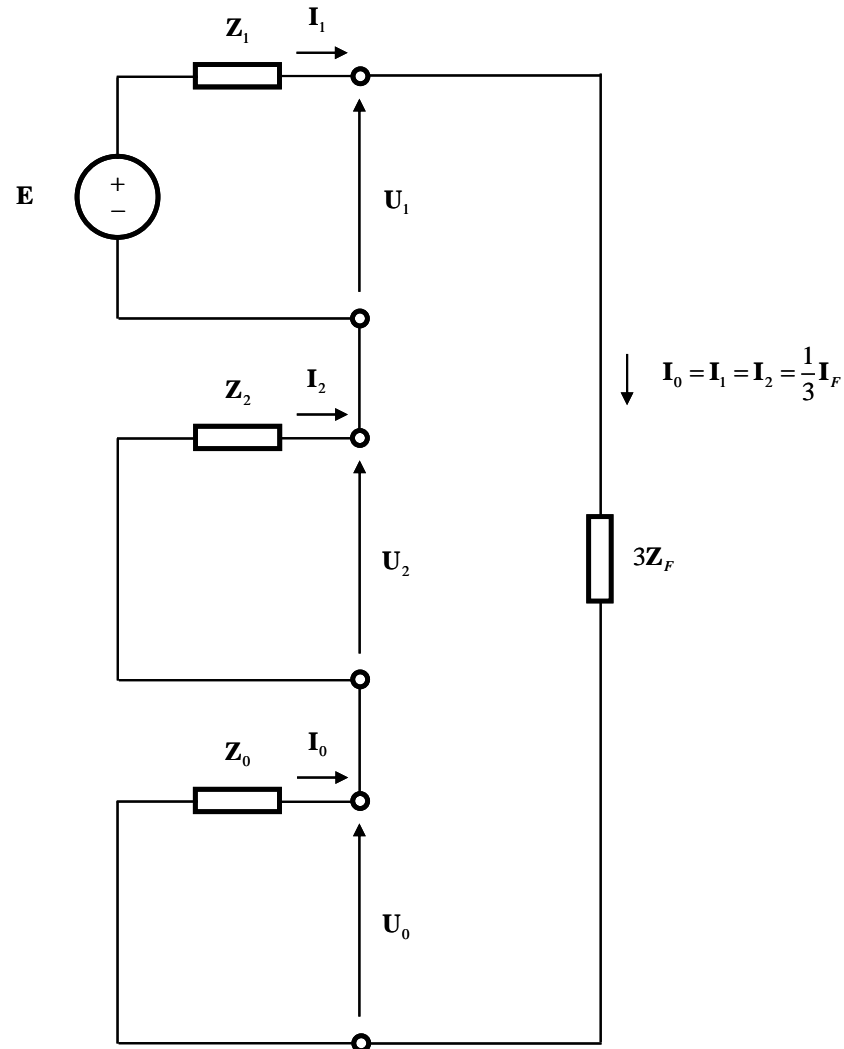


Figura 3-31: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta monofásica a tierra a través de impedancia.

3.7.3 CONEXIÓN DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA EN CASO DE FALTA BIFÁSICA

La Figura 3-32 muestra la ocurrencia de una falta bifásica a través de impedancia entre las fases B y C.

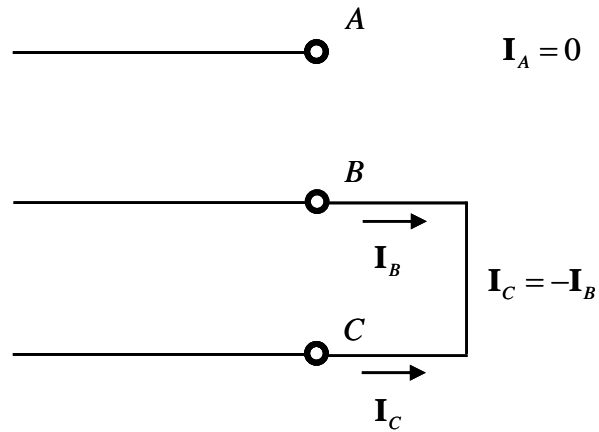


Figura 3-32: Falta bifásica.

Las condiciones de la falta bifásica entre las fases B y C son:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_A &= 0 \\ \mathbf{I}_C &= -\mathbf{I}_B \\ \mathbf{U}_B &= \mathbf{U}_C \end{aligned}$$

Si se imponen las condiciones de la falta a las corrientes de secuencia, queda:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_A &= 0 \\ \mathbf{I}_C &= -\mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_0 &= 0 \\ \mathbf{I}_1 &= \frac{1}{3}(\mathbf{a} - \mathbf{a}^2)\mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_2 &= \frac{1}{3}(\mathbf{a}^2 - \mathbf{a})\mathbf{I}_B = -\mathbf{I}_1 \end{aligned}$$



Si la corriente de secuencia homopolar es nula, entonces la corriente de secuencia homopolar también es nula, ya que

$$U_0 = -Z_0 I_0 = 0$$

La relación entre tensiones de secuencia directa e inversa se obtiene a partir de:

$$\begin{aligned} U_B - U_C &= 0 \\ (a^2 - a)U_1 + (a - a^2)U_2 &= 0 \\ U_1 - U_2 &= 0 \\ U_1 &= U_2 \end{aligned}$$

Entonces, como $I_2 = -I_1$ y $U_1 = U_2$, las redes de secuencia directa e inversa se conectan en PARALELO tal y como se muestra en la Figura 3-33.

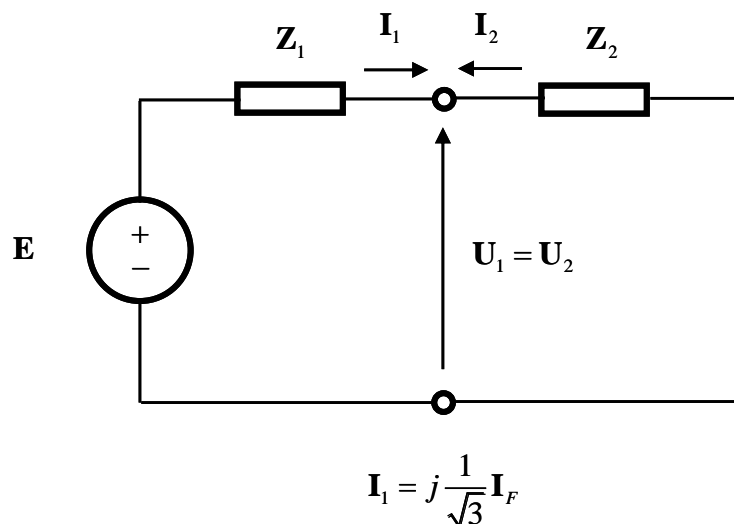


Figura 3-33: Conexión de las redes de secuencia en caso de una falta bifásica a tierra.



La corriente de falta será:

$$\mathbf{I}_1 = \frac{1}{3}(\mathbf{a} - \mathbf{a}^2)\mathbf{I}_B = j\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{I}_B$$
$$\mathbf{I}_F = \mathbf{I}_B = -j\sqrt{3}\mathbf{I}_1$$

Cuando las impedancias de secuencia son iguales, las corrientes de cortocircuito bifásico y trifásico están relacionadas por:

$$\mathbf{I}_{F,2\phi} = -j\sqrt{3}\mathbf{I}_1 = -j\sqrt{3}\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2}\Big|_{\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2} = -j\sqrt{3}\frac{\mathbf{E}}{2\mathbf{Z}_1} = -j0.87\mathbf{I}_{F,3\phi}$$

La corriente de cortocircuito bifásico es ligeramente inferior a la corriente de cortocircuito trifásico.

3.7.4 CONEXIÓN DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA EN CASO DE FALTA BIFÁSICA A TRAVÉS DE IMPEDANCIA

Considérese una falta bifásica a través de impedancia tal y como se muestra en la Figura 3-34.

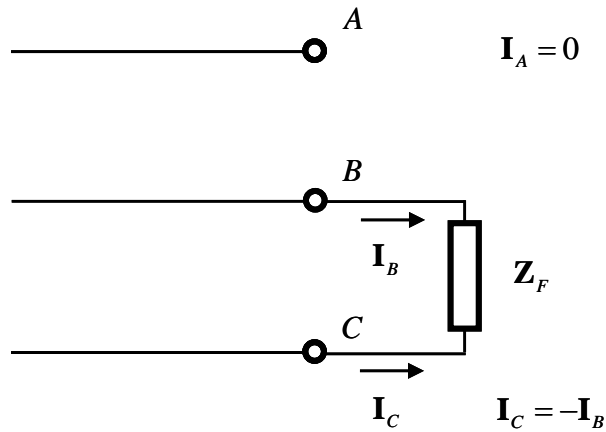


Figura 3-34: Falta bifásica a través de impedancia.

Las condiciones que describen una falta bifásica a través de una impedancia son:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_A &= 0 \\ \mathbf{I}_C &= -\mathbf{I}_B \\ \mathbf{U}_B - \mathbf{U}_C &= \mathbf{Z}_F \mathbf{I}_B = \mathbf{Z}_F \mathbf{I}_F \end{aligned}$$

Si se imponen las condiciones de la falta a las corrientes de secuencia, queda:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_0 &= 0 \\ \mathbf{I}_1 &= \frac{1}{3}(\mathbf{a} - \mathbf{a}^2)\mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_2 &= \frac{1}{3}(\mathbf{a}^2 - \mathbf{a})\mathbf{I}_B = -\mathbf{I}_1 \end{aligned}$$

Si la corriente de secuencia homopolar es nula, entonces la corriente de secuencia homopolar también es nula, ya que:



$$U_0 = -Z_0 I_0 = 0$$

La relación entre tensiones de secuencia directa e inversa se obtiene a partir de:

$$U_B - U_C = Z_F I_B$$

$$(a^2 - a)U_1 + (a - a^2)U_2 = \frac{1}{3}Z_F (a - a^2)I_1$$

$$U_1 - U_2 = Z_F I_1$$

Entonces, como $I_2 = -I_1$ las redes de secuencia directa e inversa se conectan en PARALELO tal y como se muestra en la Figura 3-34.

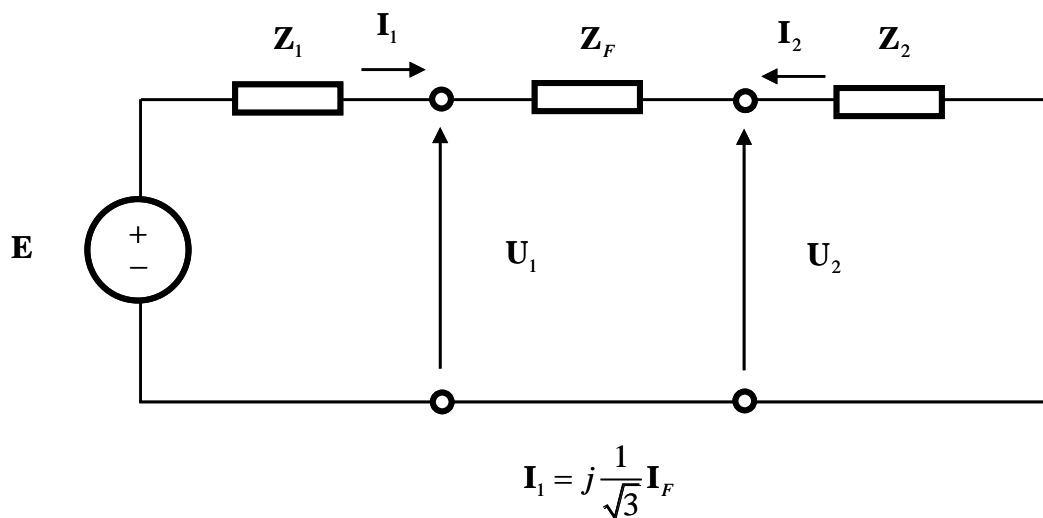


Figura 3-35: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta bifásica a través de impedancia.

La corriente de falta será:



$$\mathbf{I}_1 = \frac{1}{3}(\mathbf{a} - \mathbf{a}^2)\mathbf{I}_B = j\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{I}_B$$

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{I}_B = -j\sqrt{3}\mathbf{I}_1$$

3.7.5 CONEXIÓN DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA EN CASO DE FALTA BIFÁSICA A TIERRA

La Figura 3-36 muestra la ocurrencia de una falta bifásica entre las fases B y C y a tierra a través de impedancia.

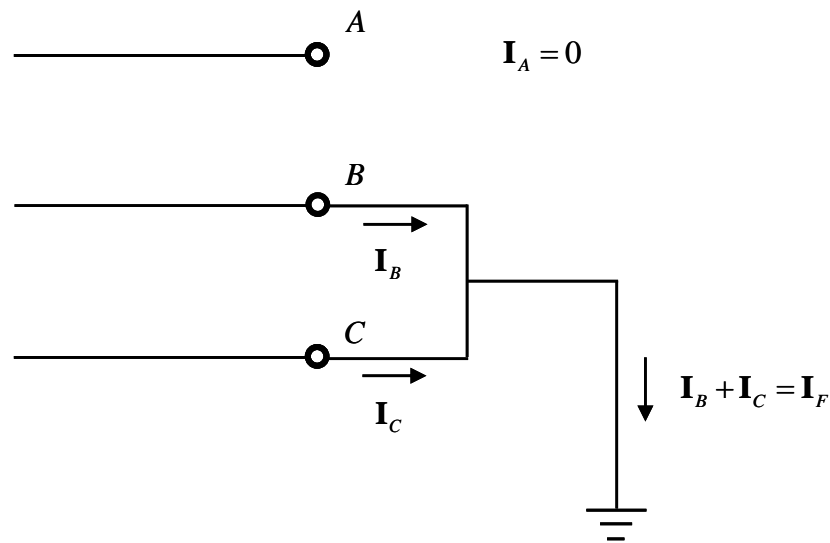


Figura 3-36: Falta bifásica a tierra.

Las condiciones de una falta bifásica franca a tierra:

$$\mathbf{I}_A = 0$$

$$\mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C = \mathbf{I}_F$$

$$\mathbf{U}_B = \mathbf{U}_C = 0$$



Si se imponen las condiciones de la falta a las corrientes de secuencia, queda:

$$\mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 = 0$$

Si se imponen las condiciones de la falta a las tensiones de secuencia, queda:

$$\mathbf{U}_B = \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_1 + \mathbf{a} \mathbf{U}_2 = 0$$

$$\mathbf{U}_C = \mathbf{U}_0 + \mathbf{a} \mathbf{U}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_2 = 0$$

$$\mathbf{U}_B - \mathbf{U}_C = (\mathbf{a}^2 - \mathbf{a}) \mathbf{U}_1 + (\mathbf{a} - \mathbf{a}^2) \mathbf{U}_2 = 0$$

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2$$

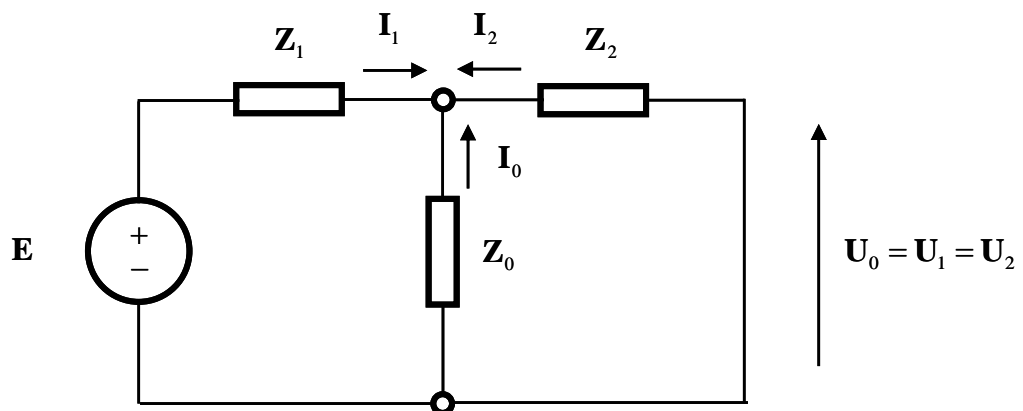
$$\mathbf{U}_B = \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_1 + \mathbf{a} \mathbf{U}_2 = 0$$

$$\mathbf{U}_0 + (\mathbf{a}^2 + \mathbf{a}) \mathbf{U}_1 = 0$$

$$\mathbf{U}_0 - \mathbf{U}_1 = 0$$

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_0$$

Entonces, las redes de secuencia directa, inversa y homopolar se conectan en PARALELO:



La corriente de falta es:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_F &= \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C = 2\mathbf{I}_0 + (\mathbf{a}^2 + \mathbf{a})\mathbf{I}_1 + (\mathbf{a} + \mathbf{a}^2)\mathbf{I}_2 \\ &= 2\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_2 \end{aligned}$$

3.7.6 CONEXIÓN DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA EN CASO DE FALTA BIFÁSICA A TIERRA A TRAVÉS DE IMPEDANCIA

Considérese una falta bifásica franca a tierra a través de impedancia tal y como se muestra en la Figura 3-37.

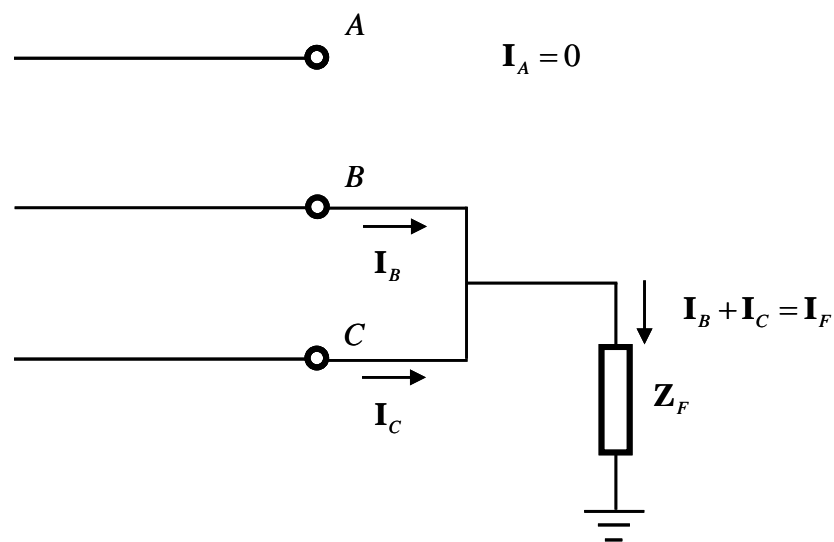


Figura 3-37: Falta bifásica a tierra a través de impedancia.

Las condiciones que describen una falta bifásica franca a tierra son:



$$\mathbf{I}_A = 0$$

$$\mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C = \mathbf{I}_F$$

$$\mathbf{U}_B = \mathbf{U}_C = \mathbf{Z}_F \mathbf{I}_F$$

Si se imponen las condiciones de la falta a las corrientes de secuencia, queda:

$$\mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 = 0$$

Si se imponen las condiciones de la falta a las tensiones de secuencia, queda:

$$\mathbf{U}_B = \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_1 + \mathbf{a} \mathbf{U}_2 = \mathbf{Z}_F \mathbf{I}_F$$

$$\mathbf{U}_C = \mathbf{U}_0 + \mathbf{a} \mathbf{U}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_2 = \mathbf{Z}_F \mathbf{I}_F$$

$$\mathbf{U}_B - \mathbf{U}_C = (\mathbf{a}^2 - \mathbf{a}) \mathbf{U}_1 + (\mathbf{a} - \mathbf{a}^2) \mathbf{U}_2 = 0$$

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2$$

$$\mathbf{U}_B = \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_1 + \mathbf{a} \mathbf{U}_2 = \mathbf{Z}_F \mathbf{I}_F$$

$$\mathbf{U}_0 + (\mathbf{a}^2 + \mathbf{a}) \mathbf{U}_1 = \mathbf{Z}_F (2\mathbf{I}_0 + (\mathbf{a}^2 + \mathbf{a})(\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2))$$

$$\mathbf{U}_0 - \mathbf{U}_1 = \mathbf{Z}_F (2\mathbf{I}_0 - (-\mathbf{I}_0))$$

$$\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_0 = -3\mathbf{Z}_F \mathbf{I}_0$$

Entonces, las redes de secuencia directa, inversa y homopolar se conectan en PARALELO tal y como se muestra en la Figura 3-38.

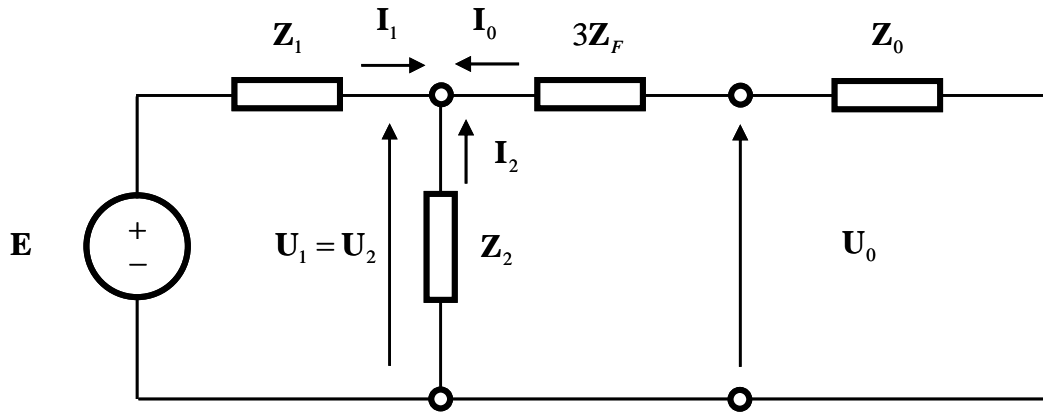


Figura 3-38: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta monofásica a tierra.

La corriente de cortocircuito bifásico a tierra es:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_F &= \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C = 2\mathbf{I}_0 + (\mathbf{a}^2 + \mathbf{a})\mathbf{I}_1 + (\mathbf{a} + \mathbf{a}^2)\mathbf{I}_2 \\ &= 2\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_2 \end{aligned}$$

3.8 FALTAS DESEQUILIBRADAS SERIE

Esta sección está dedicada al análisis de faltas desequilibradas serie. Las faltas desequilibradas serie pueden ser:

- Apertura de una fase.
- Apertura de dos fases.

3.8.1 FORMULACIÓN GENERAL

La Figura 3-39 muestra en variables de fase un circuito trifásico desacoplado en el que variando los valores de las impedancias se pueden representar faltas serie: la apertura de una fase y la apertura de dos fases.

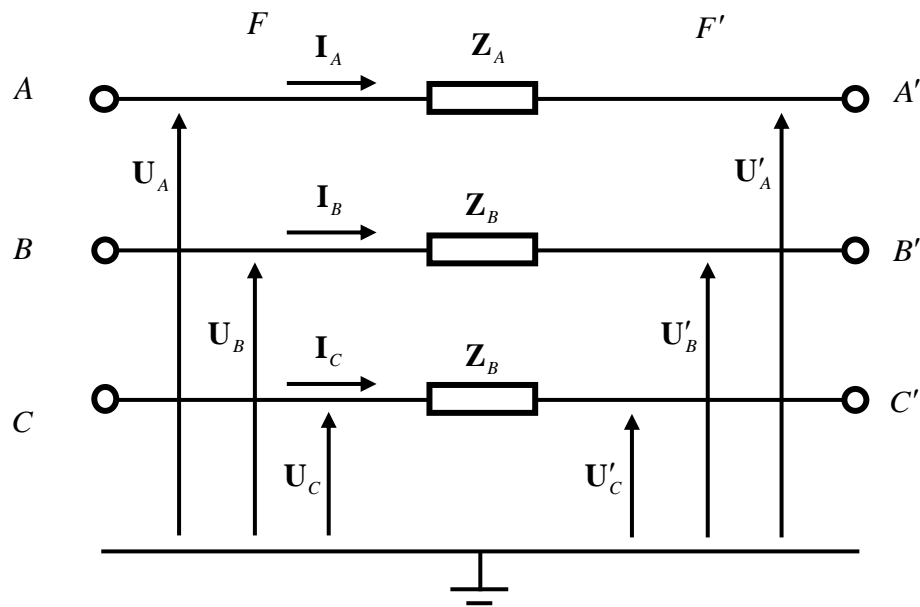


Figura 3-39: Circuito equivalente por fase de una falta serie genérica.

Las tensiones de fase y corrientes de línea en el punto en falta vienen dadas por las expresiones:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U'_A \\ U'_B \\ U'_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{AA'} \\ U_{BB'} \\ U_{CC'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & 0 & 0 \\ 0 & Z_B & 0 \\ 0 & 0 & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$



Las tensiones y corrientes de secuencia en el punto en falta se obtienen tras aplicar la transformación de componentes simétricas:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{AA'-0} \\ \mathbf{U}_{AA'-1} \\ \mathbf{U}_{AA'-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_A & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_B & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{A0} \\ \mathbf{I}_{A1} \\ \mathbf{I}_{A2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{AA'-0} \\ \mathbf{U}_{AA'-1} \\ \mathbf{U}_{AA'-2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_A & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_B & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{A0} \\ \mathbf{I}_{A1} \\ \mathbf{I}_{A2} \end{bmatrix}$$

que operando resulta:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{AA'-0} \\ \mathbf{U}_{AA'-1} \\ \mathbf{U}_{AA'-2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_A + 2\mathbf{Z}_B & \mathbf{Z}_A - \mathbf{Z}_B & \mathbf{Z}_A - \mathbf{Z}_B \\ \mathbf{Z}_A - \mathbf{Z}_B & \mathbf{Z}_A + 2\mathbf{Z}_B & \mathbf{Z}_A - \mathbf{Z}_B \\ \mathbf{Z}_A - \mathbf{Z}_B & \mathbf{Z}_A - \mathbf{Z}_B & \mathbf{Z}_A + 2\mathbf{Z}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{A0} \\ \mathbf{I}_{A1} \\ \mathbf{I}_{A2} \end{bmatrix}$$

Restando la primera y la segunda fila resulta:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{AA'-0} - \mathbf{U}_{AA'-1} &= \mathbf{Z}_B (\mathbf{I}_{A0} - \mathbf{I}_{A1}) \\ \mathbf{U}_{AA'-0} - \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_{A0} &= \mathbf{U}_{AA'-1} - \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_{A1} \end{aligned}$$

Restando la segunda y la tercera fila resulta:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{AA'-1} - \mathbf{U}_{AA'-2} &= \mathbf{Z}_B (\mathbf{I}_{A1} - \mathbf{I}_{A2}) \\ \mathbf{U}_{AA'-1} - \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_{A1} &= \mathbf{U}_{AA'-2} - \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_{A2} \end{aligned}$$



Resumiendo queda:

$$\mathbf{U}_{AA'-0} - \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_{A0} = \mathbf{U}_{AA'-1} - \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_{A1} = \mathbf{U}_{AA'-2} - \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_{A2}$$

Sumando la primera y la segunda fila resulta:

$$\mathbf{U}_{AA'-0} + \mathbf{U}_{AA'-1} = \frac{1}{3}(2\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B)(\mathbf{I}_{A0} + \mathbf{I}_{A1}) + \frac{2}{3}(\mathbf{Z}_A - \mathbf{Z}_B)\mathbf{I}_{A2}$$

Substituyendo la tensión de secuencia homopolar y manipulando resulta:

$$\mathbf{U}_{AA'-1} - \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_{A1} = \frac{1}{3}(\mathbf{Z}_A - \mathbf{Z}_B)(\mathbf{I}_{A0} + \mathbf{I}_{A1} + \mathbf{I}_{A2})$$

Figura 3-40 muestra la conexión de las redes de secuencia en caso de una falta serie genérica.

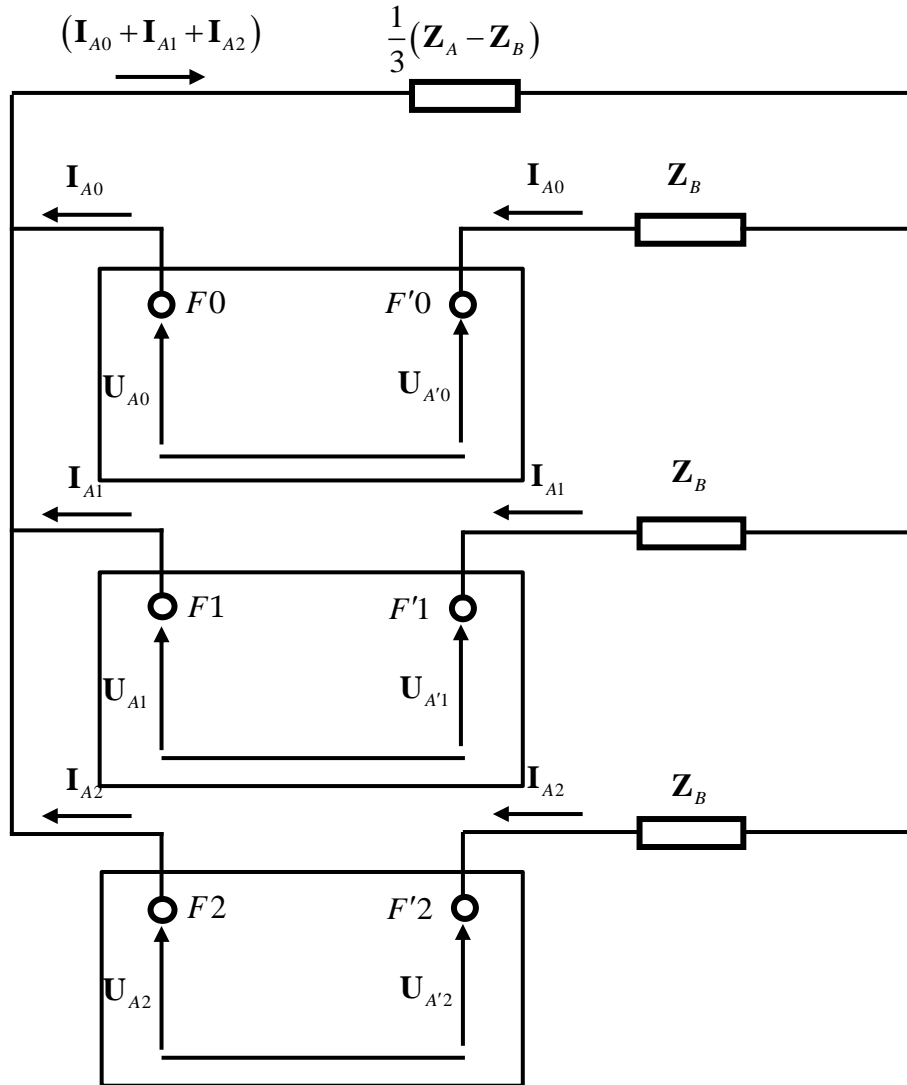


Figura 3-40: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta serie.

3.8.2 APERTURA DE UNA FASE

El caso de una falta serie consistente en la apertura de una fase se deduce considerando en el circuito de la Figura 3-40 que:

$$Z_A = \infty$$

La Figura 3-41 muestra la conexión de las redes de secuencia en caso de una falta serie consistente en la apertura de una fase. Las redes de secuencia se conectan en PARALELO.

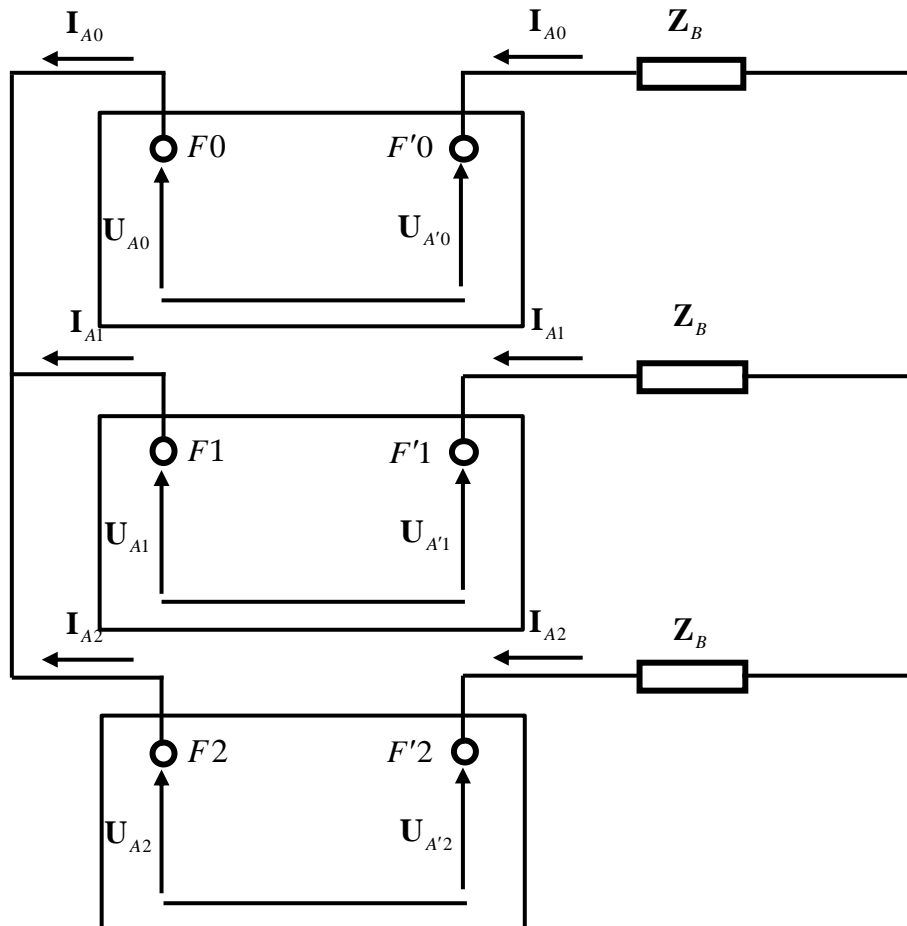


Figura 3-41: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de apertura de una fase.



3.8.3 APERTURA DE DOS FASES

La apertura de dos fases no se puede deducir simplemente particularizando en el circuito de la Figura 3-40 el caso:

$$\mathbf{Z}_B = \infty$$

Las condiciones de contorno en variables de fase son:

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{I}_C = 0$$

$$\mathbf{U}_{AA'} = \mathbf{Z}_A \mathbf{I}_A$$

Las condiciones de contorno en variables de secuencia son:

$$\mathbf{I}_{A0} = \frac{1}{3} \mathbf{I}_A$$

$$\mathbf{I}_{A1} = \frac{1}{3} \mathbf{I}_A$$

$$\mathbf{I}_{A2} = \frac{1}{3} \mathbf{I}_A$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{AA'-0} + \mathbf{U}_{AA'-1} + \mathbf{U}_{AA'-2} &= \mathbf{Z}_A (\mathbf{I}_{A0} + \mathbf{I}_{A1} + \mathbf{I}_{A2}) \\ (\mathbf{U}_{AA'-0} - \mathbf{Z}_A \mathbf{I}_{A0}) + (\mathbf{U}_{AA'-1} - \mathbf{Z}_A \mathbf{I}_{A1}) + (\mathbf{U}_{AA'-2} - \mathbf{Z}_A \mathbf{I}_{A2}) &= 0 \end{aligned}$$

La Figura 3-42 muestra la conexión de las redes de secuencia en caso de una falta serie consistente en la apertura de dos fases. Las redes de secuencia se conectan en SERIE.

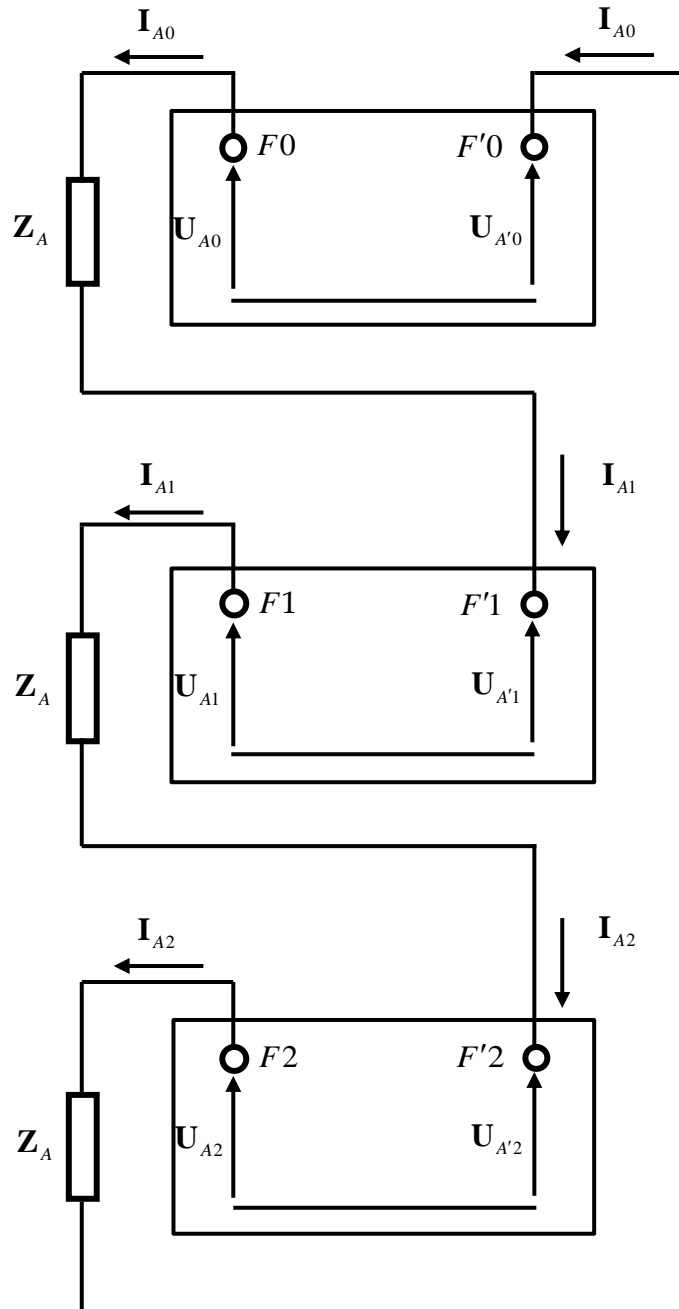


Figura 3-42: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de apertura de dos fases.



Capítulo 4. ANÁLISIS DE FALTAS SERIE EN LAS ALIMENTACIONES A LA CENTRAL NUCLEAR

Este capítulo analiza la ocurrencia de una falta serie en las alimentaciones a 138 kV y a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio por medio de componentes simétricas.

De forma más precisa, se determinan las tensiones en barras de 6.9 kV alimentadas de la red a 138 kV a través del transformador de arranque TA-12 o alimentadas de la red a 400 kV a través del transformador principal T-1 y el transformador auxiliar TA-1 cuando se producen faltas serie por apertura de una fase en las alimentaciones a 138 kV y 400 kV respectivamente.

Se considerará la existencia de una falta serie por apertura de una fase en dos casos:

- Caso 1: cuando arranca un motor de 2500 HP. El motor será representado por la impedancia de cortocircuito del motor tanto a la secuencia directa como a la secuencia inversa. El neutro del motor no está accesible.
- Caso 2: cuando un motor de 2500HP está conectado funcionando a tensión y corriente nominal. El motor se representa por sus impedancias equivalentes a las secuencias directa e inversa calculadas tal y como se explica en el capítulo Capítulo 8.

4.1 FALTA SERIE EN LA ALIMENTACIÓN A 138 kV

La Figura 4-1 muestra la alimentación a las barras de 6.9 kV desde la red a 138 kV a través del transformador de arranque TA-12. El transformador de arranque TA-12 es un transformador de tres arrollamientos YNynd1 en el que el terciario es meramente un arrollamiento de compensación. El neutro del arrollamiento de 6.9 kV está conectado a tierra a través de una resistencia de 4.76 Ω .

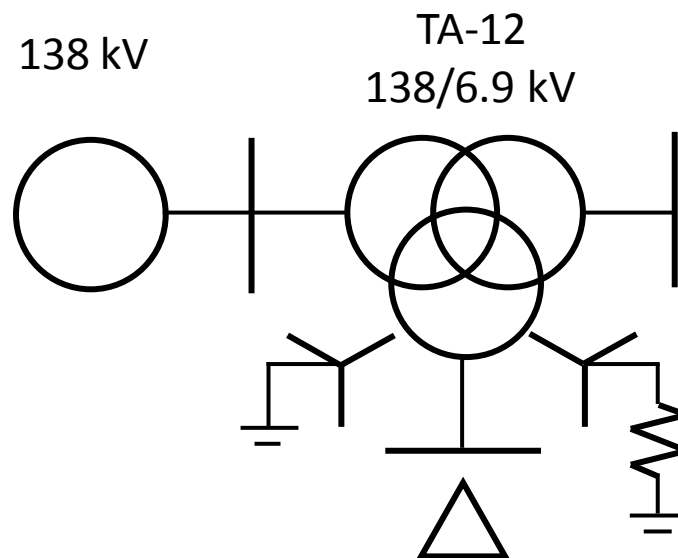


Figura 4-1: Esquema unifilar de la alimentación desde la red a 138 kV.

4.1.1 PLANTEAMIENTO

La Figura 4-2 muestra los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar en magnitudes reales vistos desde barras de 6.9 kV. Se señala el punto en falta. La Figura 4-3 muestra la conexión de los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar en caso de una falta serie en la alimentación en la alimentación a 138 kV.

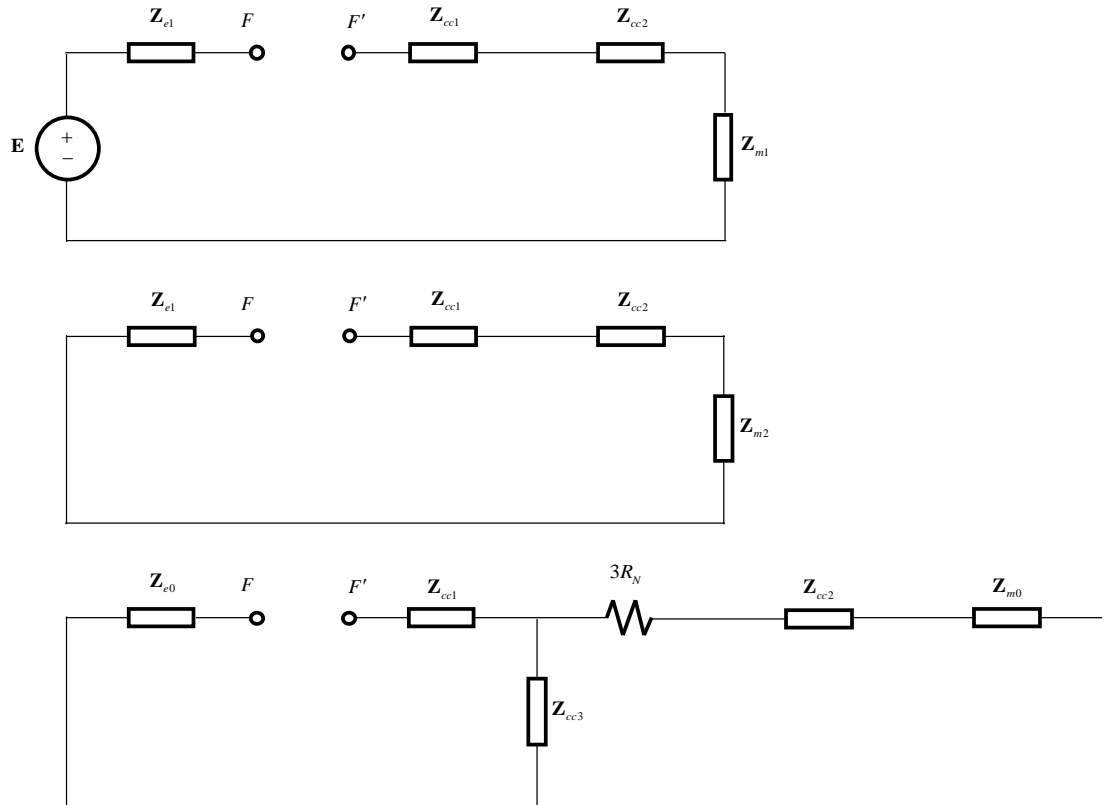


Figura 4-2: Circuitos equivalentes a las secuencias directa, inversa y homopolar.

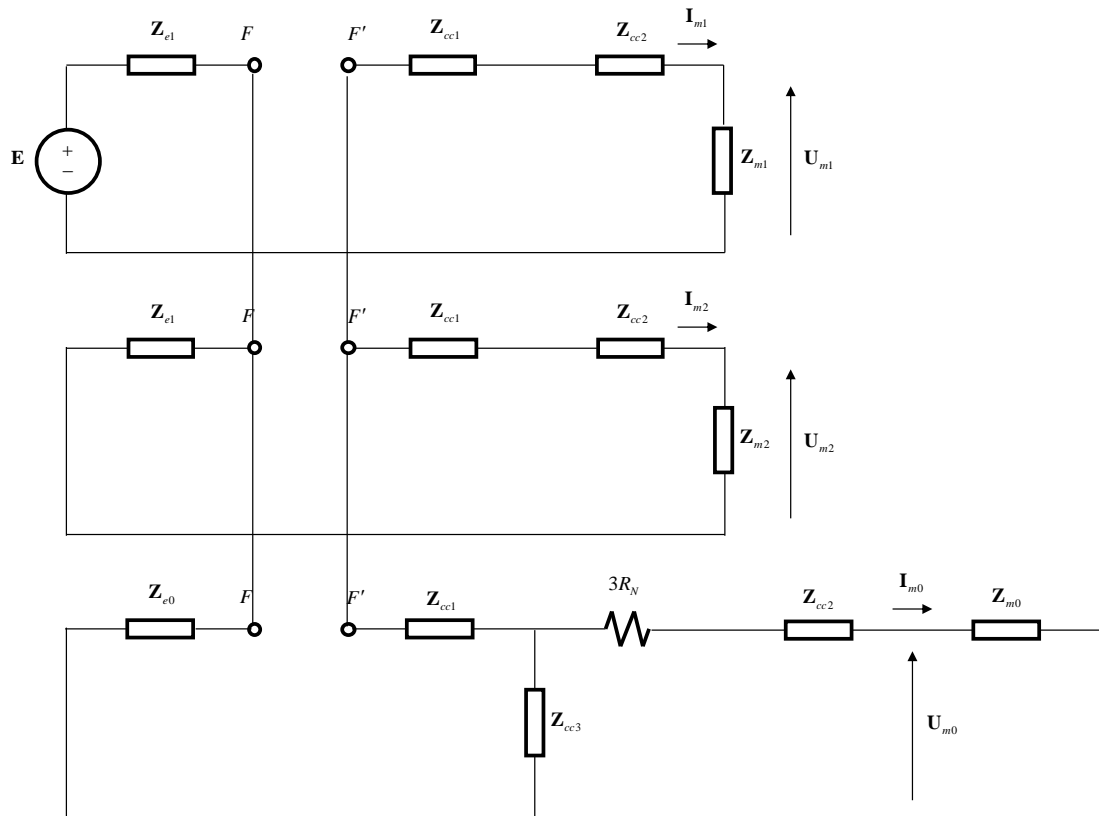


Figura 4-3: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta serie en la barra de 138 kV.

La Figura 4-3 pone de manifiesto que si las barras de 6.9 kV estuvieran en vacío las corrientes de secuencia serían nulas. Por supuesto, ello es así si se considera despreciable la corriente de magnetización del transformador TA-12.

Las tensiones de secuencia en bornes del motor de 6.9 kV son:

$$U_{m1} = Z_{m1} I_{m1}$$

$$U_{m2} = Z_{m2} I_{m2}$$

$$U_{m0} = 0$$



siendo:

$$\mathbf{I}_{m1} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1 + \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}}}$$
$$\mathbf{I}_{m2} = -\frac{\frac{1}{\mathbf{Z}_2}}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}} \mathbf{I}_{m1}$$

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_{cc2} + \mathbf{Z}_{m1}$$

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_{cc2} + \mathbf{Z}_{m2}$$

$$\mathbf{Z}_0 = \mathbf{Z}_{e0} + \mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_{cc3}$$

Las tensiones de secuencia en alta tensión del transformador son:

$$\mathbf{U}_{at1} = (\mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_{cc2} + \mathbf{Z}_{m1}) \mathbf{I}_{at1}$$

$$\mathbf{U}_{at2} = (\mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_{cc2} + \mathbf{Z}_{m1}) \mathbf{I}_{at2}$$

$$\mathbf{U}_{at0} = (\mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_{cc3}) \mathbf{I}_{at2}$$

siendo:



$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{at1} &= \mathbf{I}_{m1} \\ \mathbf{I}_{at2} &= \mathbf{I}_{m2} \\ \mathbf{I}_{at0} &= -\frac{\frac{1}{\mathbf{Z}_0}}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}} \mathbf{I}_{m1} \end{aligned}$$

Las impedancias de cortocircuito de un transformador de tres arrollamientos se obtienen a partir de los ensayos de cortocircuito:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{cc12} &= \mathbf{z}_{cc12} \frac{U_{n2}^2}{S_{B12}} = (r_{cc12} + jx_{cc12}) \frac{U_{n2}^2}{S_{B12}} = \left(r_{cc12} + j\sqrt{z_{cc12}^2 - r_{cc12}^2} \right) \frac{U_{n2}^2}{S_{B12}} \\ \mathbf{Z}_{cc13} &= \mathbf{z}_{cc13} \frac{U_{n2}^2}{S_{B13}} = (r_{cc13} + jx_{cc13}) \frac{U_{n2}^2}{S_{B13}} = \left(r_{cc13} + j\sqrt{z_{cc13}^2 - r_{cc13}^2} \right) \frac{U_{n2}^2}{S_{B13}} \\ \mathbf{Z}_{cc23} &= \mathbf{z}_{cc23} \frac{U_{n2}^2}{S_{B23}} = (r_{cc23} + jx_{cc23}) \frac{U_{n2}^2}{S_{B23}} = \left(r_{cc23} + j\sqrt{z_{cc23}^2 - r_{cc23}^2} \right) \frac{U_{n2}^2}{S_{B23}} \end{aligned}$$

Las impedancias del circuito equivalente de un transformador de tres arrollamientos se obtienen a partir de las impedancias de cortocircuito de acuerdo con:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{cc1} &= (R_{cc1} + jX_{cc1}) = \frac{\mathbf{Z}_{cc12} + \mathbf{Z}_{cc13} - \mathbf{Z}_{cc23}}{2} \\ \mathbf{Z}_{cc2} &= (R_{cc2} + jX_{cc2}) = \frac{\mathbf{Z}_{cc12} + \mathbf{Z}_{cc23} - \mathbf{Z}_{cc13}}{2} \\ \mathbf{Z}_{cc3} &= (R_{cc3} + jX_{cc3}) = \frac{\mathbf{Z}_{cc13} + \mathbf{Z}_{cc23} - \mathbf{Z}_{cc12}}{2} \end{aligned}$$

ya que:



$$\begin{aligned}\mathbf{Z}_{cc12} &= (R_{cc12} + jX_{cc12}) = \mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_{cc2} \\ \mathbf{Z}_{cc13} &= (R_{cc13} + jX_{cc13}) = \mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_{cc3} \\ \mathbf{Z}_{cc23} &= (R_{cc23} + jX_{cc23}) = \mathbf{Z}_{cc2} + \mathbf{Z}_{cc3}\end{aligned}$$

La primera conclusión que se deduce del análisis de la falta serie en la alimentación a 138 kV de la central nuclear del caso de estudio se refiere a que sólo hay corriente de falta si el transformador alimenta una carga, suponiendo que se desprecia la corriente de vacío de los transformadores.

4.1.2 DATOS

Los datos del transformador son:

$$\begin{aligned}S_{B12} &= 33MVA & z_{cc12} &= 0.13 pu & r_{cc12} &= 0.445\% \\ S_{B13} &= 11.03MVA & z_{cc13} &= 0.06 pu & r_{cc13} &= z_{cc13} \frac{r_{cc12}}{z_{cc12}} \\ S_{B23} &= 11.03MVA & z_{cc23} &= 0.0195 pu & r_{cc23} &= z_{cc23} \frac{r_{cc12}}{z_{cc12}}\end{aligned}$$

Como quiera que las pérdidas de los ensayos r_{cc13} , r_{cc23} no están disponibles, se ha supuesto que las relaciones r/z de los arrollamientos son iguales.

La resistencia de puesta a tierra del neutro del transformador es:

$$R_N = 4.76\Omega$$



Los datos del motor son:

$$P_n = 2500HP = 1865kW$$

$$U_n = 6900V$$

$$I_n = 171.978A$$

$$r_1 = r_2 = 0.01pu$$

$$x_1 = x_2 = 0.1pu$$

$$x_m = 5pu$$

Los datos de la red a 138 kV son:

$$S_{cc3\phi} = 1000MVA$$

$$S_{cc1\phi} = 1000MVA$$

4.1.3 RESULTADOS CASO 1

Las impedancias de secuencia directa y homopolar del equivalente Thèvenin de la red vistas desde barras de 6.9 kV se determinan como:

$$Z_{e1} = Z_{e0} = j \frac{6.9^2}{1000} = j 0.0476\Omega$$

Las impedancias de cortocircuito del transformador de tres arrollamientos vistas desde barras de 6.9 kV son:



$$\mathbf{Z}_{cc12} = \left(\frac{0.445}{100} + j\sqrt{0.13^2 - \left(\frac{0.445}{100}\right)^2} \right) \frac{6.9^2}{33}$$
$$= (0.0064 + j0.1874)\Omega$$

$$\mathbf{Z}_{cc13} = \left(\frac{0.06 \cdot 0.445}{0.13 \cdot 100} + j\sqrt{0.06^2 - \left(\frac{0.06 \cdot 0.445}{0.13 \cdot 100}\right)^2} \right) \frac{6.9^2}{11.03}$$
$$= (0.0089 + j0.2588)\Omega$$

$$\mathbf{Z}_{cc23} = \left(\frac{0.0195 \cdot 0.445}{0.13 \cdot 100} + j\sqrt{0.0195^2 - \left(\frac{0.0195 \cdot 0.445}{0.13 \cdot 100}\right)^2} \right) \frac{6.9^2}{11.03}$$
$$= (0.0029 + j0.0841)\Omega$$

Las impedancias del circuito equivalente del transformador de tres arrollamientos son:

$$\mathbf{Z}_{cc1} = (R_{cc1} + jX_{cc1}) = (0.0062 + j0.1811)\Omega$$

$$\mathbf{Z}_{cc2} = (R_{cc2} + jX_{cc2}) = (0.0002 + j0.0064)\Omega$$

$$\mathbf{Z}_{cc3} = (R_{cc3} + jX_{cc3}) = (0.0027 + j0.0778)\Omega$$

Las impedancias de secuencia directa e inversa del motor en el arranque vistas desde barras de 6.9 kV son:

$$\mathbf{Z}_{m1} = \mathbf{Z}_{m2} = (0.02 + j0.2) \frac{6.9/\sqrt{3}}{171.978} = (0.00046 + j0.0046)\Omega$$

Las impedancias de secuencia totales son:



$$\mathbf{Z}_1 = (0.4697 + j4.8680)\Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = (0.4697 + j4.8680)\Omega$$

$$\mathbf{Z}_0 = (0.0089 + j0.3064)\Omega$$

Las corrientes de secuencia por el motor son:

$$\mathbf{I}_{m1} = (71.185 - j765.97)A = 769.2740A \angle -84.6905^\circ$$

$$\mathbf{I}_{m2} = (-7.05 + j44.8331)A = 45.3840A \angle 98.9366^\circ$$

$$\mathbf{I}_{m0} = 0$$

La corriente de secuencia directa en el 90% de la corriente de arranque del motor (855.6080 A) y la corriente de secuencia inversa es algo superior al 5% de la corriente de corriente de arranque. La corriente de arranque es del orden de 5 veces la corriente nominal del motor.

Las tensiones de secuencia en barras de 6.9 kV son:

$$\mathbf{U}_{m0} = 0$$

$$\mathbf{U}_{m1} = (3518.7 - j25.075)V = 3518.79V \angle -0.4^\circ = 0.8991pu \angle -0.411^\circ$$

$$\mathbf{U}_{m2} = (-210.97 - j11.891)V = 211.3V \angle -176.77^\circ = 0.0530pu \angle -176.7740^\circ$$

Resulta interesante, para comprobar la magnitud del desequilibrio, estudiar el cociente entre tensiones de secuencia (directa e inversa), así como intensidades, en el lado del motor.



$$\frac{U_{m2}}{U_{m1}} = \frac{211.3V}{3518.79V} = 5.90\%$$

$$\frac{I_{m2}}{I_{m1}} = \frac{45.3840A}{769.2740A} = 5.90\%$$

Las tensiones simples en barras de 6.9 kV son:

$$U_{mA} = (3370.7 - j36.967)V = 3370.9V \angle -0.6283^\circ = 0.8462 pu \angle -0.6283^\circ$$

$$U_{mB} = (-1696.8 - j3266.0)V = 3680.5V \angle -117.4527^\circ = 0.9239 pu \angle -117.4527^\circ$$

$$U_{mC} = (-1673.9 + j3303.0)V = 3702.9V \angle 116.8754^\circ = 0.9295 pu \angle 116.8754^\circ$$

Las tensiones compuestas en barras de 6.9 kV son:

$$\begin{aligned} U_{mAB} &= U_{mA} - U_{mB} = (5067.4 + j3229.1)V = 6008.8V \angle 32.5060^\circ \\ &= 0.8708 pu \angle 28.7545^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{mBC} &= U_{mB} - U_{mC} = (-22.8 - j6569.0)V = 6569.1V \angle -90.19922^\circ \\ &= 0.9520 pu \angle -90.5572^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{mCA} &= U_{mC} - U_{mA} = (-5044.6 + j3340.0)V = 6050.1V \angle 146.4920^\circ \\ &= 0.8768 pu \angle 148.2809^\circ \end{aligned}$$

También es interesante analizar lo que sucede en el lado de alta tensión (138 kV) del transformador TA-12.

Las corrientes de secuencia en lado de alta tensión (138 kV) del transformador TA-12 son:



$$\mathbf{I}'_{at0} = \mathbf{I}_{at0} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = (-3.2067 + j36.0570) A = 36.1993A \angle 95.0823^\circ$$

$$\mathbf{I}'_{at1} = \mathbf{I}_{at1} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = (3.5592 - j38.2987) A = 38.4637A \angle -84.6905^\circ$$

$$\mathbf{I}'_{at2} = \mathbf{I}_{at2} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = (-0.3525 + j2.2417) A = 2.2692A \angle 98.9366^\circ$$

Es interesante comparar la corriente de secuencia homopolar con la corriente de secuencia homopolar en caso de falta a tierra en el secundario del transformador:

$$\begin{aligned} I'_{0,1\phi} &\approx \frac{E}{3R_N} \frac{X_{cc3}}{X_{e0} + X_{cc1} + X_{cc3}} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} \\ &= \frac{6900}{3 \cdot 4.76} \frac{0.0778}{0.0476 + 0.0778 + 0.1811} \frac{6900}{138000} = 3.5406A \end{aligned}$$

Se aprecia que la corriente de secuencia homopolar en caso de falta serie es superior a la corriente de secuencia homopolar en caso de falta a tierra en el secundario del transformador.

Las tensiones de secuencia en barras de 138 kV son:



$$\begin{aligned}U'_{at0} &= \mathbf{U}_{at0} \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = (-3744 - j204)V = 3750V \angle 95.0823^\circ \\ &= 0.0471 pu \angle 95.0823^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U'_{at1} &= \mathbf{U}_{at1} \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = (7.4514 - j333)V = 74515V \angle -84.6905^\circ \\ &= 0.9352 pu \angle -84.6905^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U'_{at2} &= \mathbf{U}_{at2} \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = (-4388 - j258)V = 4396V \angle 98.9366^\circ \\ &= 0.9352 pu \angle 98.9366^\circ\end{aligned}$$

Las tensiones simples en barras de 138 kV son:

$$\begin{aligned}U'_{atA} &= \mathbf{U}_{atA} \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = (66381 - j796)V = 66386V \angle -1.95^\circ \\ &= 0.8332 pu \angle -0.6867^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U'_{atB} &= \mathbf{U}_{atC} \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = (-38872 - j68240)V = 78535V \angle -120.13^\circ \\ &= 0.9857 pu \angle -119.6673^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U'_{atC} &= \mathbf{U}_{atC} \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = (-38872 - j68240)V = 7.8630V \angle 119.8^\circ \\ &= 0.9869 pu \angle 119.5195^\circ\end{aligned}$$

4.1.4 RESULTADOS CASO 2

Las impedancias de secuencia directa e inversa del motor vistas desde barras de 6.9 kV son:



$$\mathbf{Z}_{m1} = (0.9267 + j0.3759) \frac{6.9/\sqrt{3}}{171.978} = (21.4665 + j8.7075)\Omega$$
$$\mathbf{Z}_{m2} = (0.0148 + j0.1980) \frac{6.9/\sqrt{3}}{171.978} = (0.3428 + j4.5866)\Omega$$

Las impedancias de secuencia totales son:

$$\mathbf{Z}_1 = (21.4730 + j8.9426)\Omega$$
$$\mathbf{Z}_2 = (0.3493 + j4.8216)\Omega$$
$$\mathbf{Z}_0 = (0.0089 + j0.3064)\Omega$$

Las corrientes de secuencia por el motor son:

$$\mathbf{I}_{m0} = 0$$
$$\mathbf{I}_{m1} = (156.54 - j67.26)A = 170.3805A \angle -23.2530^\circ$$
$$\mathbf{I}_{m2} = (-9.49 + j3.63)A = 10.6111A \angle 159.0847^\circ$$

La corriente de secuencia directa es ligeramente inferior a la corriente nominal del motor (171.978 A) y la corriente de secuencia inversa es algo superior al 5% de la corriente de nominal del motor.

Las tensiones de secuencia en barras de 6.9 kV son:

$$\mathbf{U}_{m0} = 0$$
$$\mathbf{U}_{m1} = (3946.1 - j80.9)V = 3946.9V \angle -1.1739^\circ = 0.9908pu \angle -1.1739^\circ$$
$$\mathbf{U}_{m2} = (-19.9 - j42.3)V = 46.7V \angle -115.1901^\circ = 0.0117pu \angle -115.1901^\circ$$



Resulta interesante, para comprobar la magnitud del desequilibrio, estudiar el cociente entre tensiones de secuencia (directa e inversa), así como intensidades, en el lado del motor.

$$\frac{U_{m2}}{U_{m1}} = \frac{46.7V}{3946.9V} = 1.18\%$$
$$\frac{I_{m2}}{I_{m1}} = \frac{10.6111A}{170.3805A} = 5.96\%$$

Las tensiones simples en barras de 6.9 kV son:

$$U_{mA} = (3926.2 - j123.2)V = 3928.1V \angle -1.7966^\circ = 0.9860 pu \angle -1.7966^\circ$$
$$U_{mB} = (-1996.5 - j3373.1)V = 3919.6V \angle -120.6211^\circ = 0.9839 pu \angle -120.6211^\circ$$
$$U_{mC} = (-1929.7 + j3496.2)V = 3993.4V \angle 118.8960^\circ = 1.0024 pu \angle 118.8960^\circ$$

Las tensiones compuestas en barras de 6.9 kV son:

$$U_{mAB} = U_{mA} - U_{mB} = (5922.7 + j3249.9)V = 6755.8V \angle 28.7545^\circ$$
$$= 0.9791 pu \angle 28.7545^\circ$$
$$U_{mBC} = U_{mB} - U_{mC} = (-66.8 - j6869.3)V = 6869.6V \angle -90.5572^\circ$$
$$= 0.9956 pu \angle -90.5572^\circ$$
$$U_{mCA} = U_{mC} - U_{mA} = (-5855.9 + j3619.4)V = 6884.1V \angle 148.2809^\circ$$
$$= 0.9977 pu \angle 148.2809^\circ$$

Resulta interesante, para comprobar la magnitud del desequilibrio, estudiar el cociente entre tensiones de secuencia (directa e inversa), así como intensidades, en el lado del motor.



$$\frac{U_{m2}}{U_{m1}} = \frac{46.7V}{3946.9V} = 1.18\%$$
$$\frac{I_{m2}}{I_{m1}} = \frac{10.6111A}{170.3805A} = 5.96\%$$

También es interesante analizar lo que sucede en el lado de alta tensión (138 kV) del transformador TA-12.

Las corrientes de secuencia en lado de alta tensión (138 kV) del transformador TA-12 son:

$$\mathbf{I}'_{at0} = \mathbf{I}_{at0} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = (-7.3524 + j3.1819)A = 8.0114A \angle 156.5988^\circ$$
$$\mathbf{I}'_{at1} = \mathbf{I}_{at1} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = (7.8270 - j3.3632)A = 8.5190A \angle -23.2530^\circ$$
$$\mathbf{I}'_{at2} = \mathbf{I}_{at2} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = (-0.4746 + j0.1814)A = 0.5081A \angle 159.0847^\circ$$

Las tensiones de secuencia en barras de 138 kV son:

$$\mathbf{U}_{at0} = (-356 - j750)V = 830V \angle -115.3629^\circ = 0.0104pu \angle -115.3629^\circ$$
$$\mathbf{U}_{at1} = (79194 - j1039)V = 79201V \angle -0.7517^\circ = 0.9941pu \angle -0.7517^\circ$$
$$\mathbf{U}_{at2} = (-413 - j881)V = 973V \angle -115.0995^\circ = 0.0122pu \angle -115.0995^\circ$$

Las tensiones simples en barras de 138 kV son:



$$U_{atA} = (78426 - j2670)V = 78471V \angle -1.9498^\circ = 0.9849 pu \angle -1.9498^\circ$$

$$U_{atB} = (-39883 - j68732)V = 79465V \angle -120.1255^\circ = 0.9974 pu \angle -120.1255^\circ$$

$$U_{atC} = (-39609 + j69152)V = 79692V \angle 119.8037^\circ = 1.0002 pu \angle 119.8037^\circ$$

4.1.5 RESUMEN DE RESULTADOS

La Tabla 4-1 resume los resultados más destacados del análisis de falta serie en la alimentación a 138 kV.

Tabla 4-1: Resumen de resultados del análisis de falta serie en la alimentación a 138 kV.

Magnitud	Arranque	Funcionamiento normal
Menor tensión compuesta en 6.9 kV (pu)	0.8708	0.9791
Desequilibrio de tensiones en 6.9 kV (%)	5.90	1.18
Desequilibrio de corrientes en 6.9 kV (%)	5.90	5.96
Corriente homopolar en 138 kV (A)	769.2740	8.0148

Lógicamente cuando se produce el arranque directo del motor de 2500 HP variación de las tensiones compuestas y desequilibrios de tensiones y corrientes en barras de 6.9 kV y de corriente homopolar en 138 kV son mayores que cuando el motor está en funcionamiento normal.

4.2 FALTA SERIE EN LA ALIMENTACIÓN A 400 kV

La Figura 4-4 muestra la alimentación a las barras de 6.9 kV desde la red a 400 kV a través del transformador principal T-1 y el transformador auxiliar TA-1. El transformador principal es un banco trifásico de grupo de conexión YNd11. El transformador auxiliar TA-1 es un transformador trifásico de grupo de conexión Dyn1. El neutro del arrollamiento de 6.9 kV está conectado a tierra a través de una resistencia de 4.76 Ω .

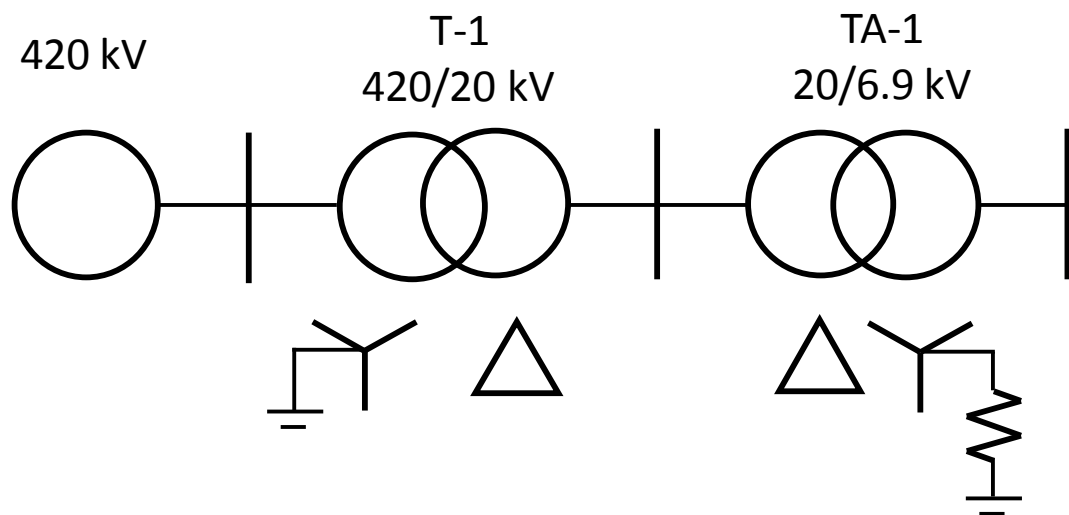


Figura 4-4: Esquema unifilar de la alimentación desde la red de 400 kV.

4.2.1 PLANTEAMIENTO

La Figura 4-5 muestra los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar en magnitudes reales vistos desde barras de 6.9 kV. Se señala el punto en falta. La Figura 4-6 muestra la conexión de los circuitos equivalentes de

secuencia directa, inversa y homopolar en caso de una falta serie en la alimentación en la alimentación a 400 kV.

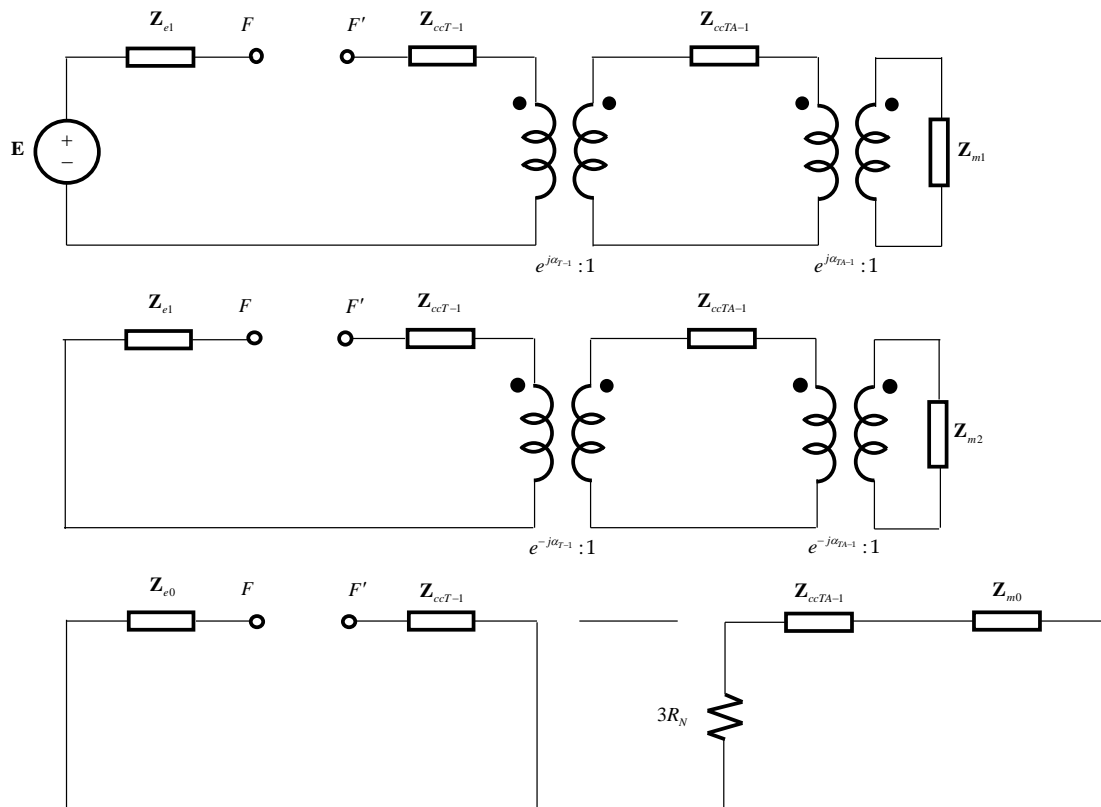


Figura 4-5: Circuitos equivalentes a las secuencias directa, inversa y homopolar.

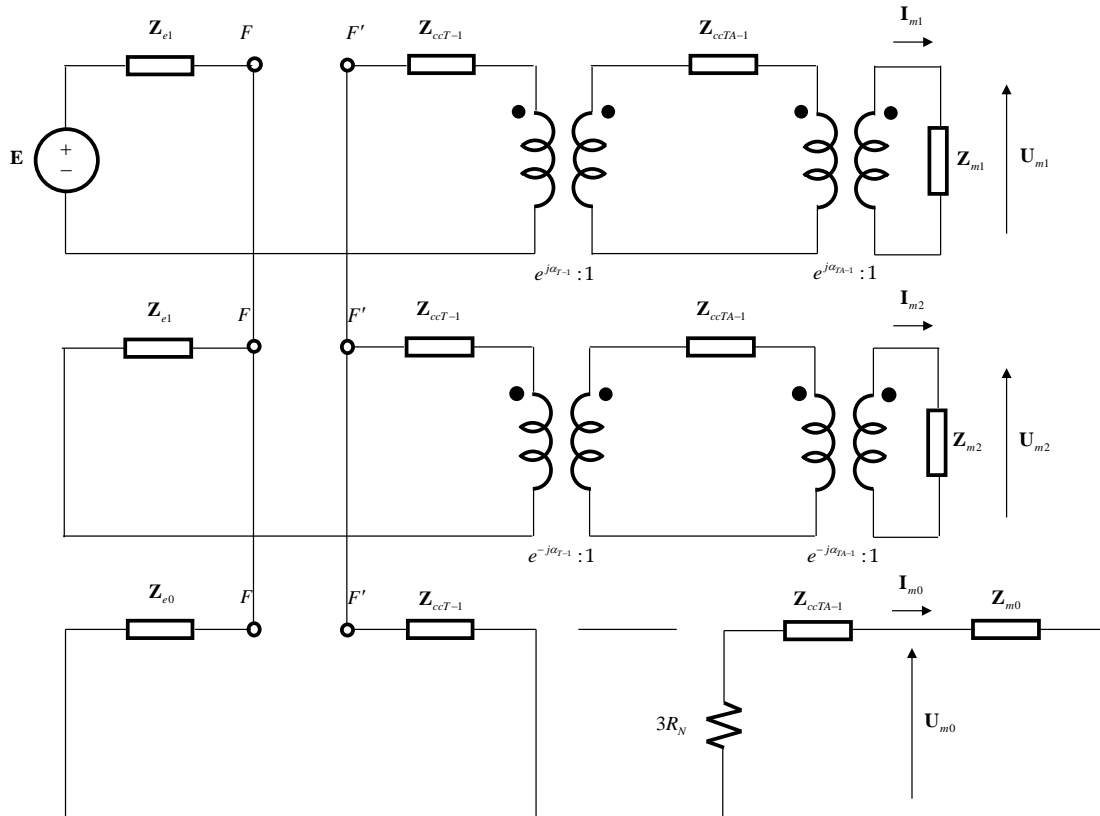


Figura 4-6: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia de falta serie en la barra de 420 kV.

La Figura 4-6 pone de manifiesto que si las barras de 6.9 kV estuvieran en vacío las corrientes de secuencia serían nulas. Por supuesto, ello es así si se considera despreciable la corriente de magnetización de los transformadores T-1 y TA-1.

La corriente de secuencia homopolar por el motor es nula:

$$I_{m0} = 0$$



Las corrientes de secuencia directa e inversa por el motor vistas desde el punto de falta son:

$$\mathbf{I}_{m1}'' = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1 + \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}}}$$

$$\mathbf{I}_{m2}'' = -\frac{\frac{1}{\mathbf{Z}_2}}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}} \mathbf{I}_{m1}''$$

Siendo:

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{ccT-1} + \mathbf{k}_{1T-1}^2 (\mathbf{Z}_{ccTA-2} + \mathbf{k}_{1TA-1}^2 \mathbf{Z}_{m1})$$

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{ccT-1} + \mathbf{k}_{2T-1}^2 (\mathbf{Z}_{ccTA-2} + \mathbf{k}_{2TA-1}^2 \mathbf{Z}_{m2})$$

$$\mathbf{Z}_0 = \mathbf{Z}_{e0} + \mathbf{Z}_{ccT-1}$$

donde:

$$\mathbf{k}_{1T-1} = e^{j\alpha_{T-1}} = e^{j\frac{\pi}{6}} \quad \mathbf{k}_{2T-1} = e^{-j\alpha_{T-1}} = e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

$$\mathbf{k}_{1TA-1} = e^{j\alpha_{TA-1}} = e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad \mathbf{k}_{2TA-1} = e^{-j\alpha_{TA-1}} = e^{j\frac{\pi}{6}}$$

Las tensiones de secuencia se calcularán resolviendo los sistemas de ecuaciones lineales:



$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} & \frac{-\mathbf{k}_{T-1,1}}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} & 0 \\ \frac{-\mathbf{k}_{T-1,1}}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} & \frac{\mathbf{k}_{T-1,1}^2}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{ccTA-1}} & \frac{-\mathbf{k}_{TA-1,1}}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} \\ 0 & \frac{-\mathbf{k}_{TA-1,1}}{\mathbf{Z}_{ccTA-1}} & \frac{\mathbf{k}_{TA-1,1}^2}{\mathbf{Z}_{ccTA-1}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{m1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{400kV1} \\ \mathbf{U}_{20kV1} \\ \mathbf{U}_{m1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m1}'' \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} & \frac{-\mathbf{k}_{T-1,2}}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} & 0 \\ \frac{-\mathbf{k}_{T-1,2}}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} & \frac{\mathbf{k}_{T-1,2}^2}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{ccTA-1}} & \frac{-\mathbf{k}_{TA-1,2}}{\mathbf{Z}_{ccT-1}} \\ 0 & \frac{-\mathbf{k}_{TA-1,2}}{\mathbf{Z}_{ccTA-1}} & \frac{\mathbf{k}_{TA-1,2}^2}{\mathbf{Z}_{ccTA-1}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{m2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{400kV2} \\ \mathbf{U}_{20kV2} \\ \mathbf{U}_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m2}'' \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dichos sistemas de ecuaciones están basados en la representación de un transformador en términos de la matriz de admitancias nodales:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{Z}_{cc}} & \frac{-1}{\mathbf{Z}_{cc}} \mathbf{k} \\ \frac{-1}{\mathbf{Z}_{cc}} \mathbf{k} & \frac{1}{\mathbf{Z}_{cc}} \mathbf{k}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_1 \end{bmatrix}$$

Las corrientes de secuencia en alta tensión del transformador T1 son:



$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{at1} &= \mathbf{I}_{m1}'' \\ \mathbf{I}_{at2} &= \mathbf{I}_{m2}'' \\ \mathbf{I}_{at0} &= -\frac{\frac{1}{\mathbf{Z}_0}}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}} \mathbf{I}_{m1}'' \end{aligned}$$

4.2.2 DATOS

Los datos del transformador T-1 son:

$$S_n = 3 \times 420 \text{ MVA} \quad z_{ccT-1} = 14.7\% \quad r_{ccT-1} = 0.21\% \quad x_{ccT-1} = 14.69\%$$

Los datos del transformador TA-1 son:

$$S_n = 30 \text{ MVA} \quad z_{ccTA-1} = 11.25\% \quad r_{ccTA-1} = 0.4718\% \quad x_{ccTA-1} = 11.23\%$$

La resistencia de puesta a tierra del neutro del transformador TA-1 es:

$$R_N = 4.76 \Omega$$

Los datos del motor son:



$$P_n = 2500HP = 1865kW$$

$$U_n = 6900V$$

$$I_n = 171.978A$$

$$r_1 = r_2 = 0.01pu$$

$$x_1 = x_2 = 0.1pu$$

$$x_m = 5pu$$

Los datos de la red a 400 kV son:

$$S_{cc3\phi} = 15000MVA$$

$$S_{cc1\phi} = 15000MVA$$

La primera conclusión extraída del análisis de la falta serie en la alimentación a 138 kV de la central nuclear del caso de estudio se mantiene en caso de falta serie en la alimentación a 400 kV: sólo hay corriente de falta si el conjunto de los dos transformadores en serie alimenta una carga, suponiendo que se desprecia la corriente de vacío de los transformadores.

4.2.3 RESULTADOS CASO 1

Las impedancias de secuencia directa y homopolar del equivalente Thèvenin de la red vistas desde barras de 6.9 kV se determinan como:

$$\mathbf{Z}_{e1} = \mathbf{Z}_{e0} = j \frac{6.9^2}{15000} = j0.003174\Omega$$



La impedancia de cortocircuito del transformador T-1 vista desde barras de 6.9 kV es:

$$\mathbf{Z}_{ccT-1} = \left(\frac{0.21}{100} + j \frac{14.69}{100} \right) \frac{6.9^2}{1260} = 0.00008 + j0.0056\Omega$$

La impedancia de cortocircuito del transformador TA-1 vista desde barras de 6.9 kV es:

$$\mathbf{Z}_{ccTA-1} = \left(\frac{0.4718}{100} + j \frac{11.23}{100} \right) \frac{6.9^2}{30} = 0.0075 + j0.1782\Omega$$

Las impedancias de secuencia directa e inversa del motor en el arranque vistas desde barras de 6.9 kV son:

$$\mathbf{Z}_{m1} = \mathbf{Z}_{m2} = (0.02 + j0.2) \frac{6900/\sqrt{3}}{171.978} = (0.4633 + j4.6329)\Omega$$

Las impedancias de secuencia totales son:

$$\mathbf{Z}_1 = (0.3159 + j4.7340)\Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = (0.6246 + j4.7211)\Omega$$

$$\mathbf{Z}_0 = (0.0033 + j0.0056)\Omega$$

Las corrientes de secuencia por el motor son:



$$\mathbf{I}_{m0}'' = 0$$

$$\mathbf{I}_{m1}'' = (56.35 - j836.72) A = 838.6195 A \angle -86.1472^\circ$$

$$\mathbf{I}_{m2}'' = (0.37 + j1.07) A = 1.1316 A \angle 71.0445^\circ$$

La corriente de secuencia directa es muy próxima a la corriente de arranque del motor (855.6080 A) y la corriente de secuencia inversa es menor del 0.2% de la corriente de corriente de arranque. La corriente de arranque es del orden de 5 veces la corriente nominal del motor.

Las tensiones de secuencia en barras de 6.9 kV son:

$$\mathbf{U}_{m0} = 0$$

$$\mathbf{U}_{m1} = (3902.6 - j126.6) V = 3904.6 V \angle -1.8578^\circ = 0.9801 pu \angle -1.8578^\circ$$

$$\mathbf{U}_{m2} = (-4.8 + j2.2) V = 5.3 V \angle 155.3339^\circ = 0.0013 pu \angle 155.3339^\circ$$

Resulta interesante, para comprobar la magnitud del desequilibrio, estudiar el cociente entre tensiones de secuencia (directa e inversa), así como intensidades, en el lado del motor.

$$\frac{U_{m2}}{U_{m1}} = \frac{5.3 V}{3904.6 V} = 0.13\%$$

$$\frac{I_{m2}}{I_{m1}} = \frac{1.1316 A}{838.6195 A} = 0.13\%$$

Las tensiones simples en barras de 6.9 kV son:



$$\begin{aligned}U_{m_A} &= (3897.8 - j124.4)V = 3899.8V \angle -1.8278^\circ = 0.9789pu \angle -1.8278^\circ \\U_{m_B} &= (-2060.4 - j3321.7)V = 3908.8V \angle -121.8111^\circ = 0.9812pu \angle -121.8111^\circ \\U_{m_C} &= (-1.8374 + j3.4461)V = 3905.3V \angle 118.0655^\circ = 0.9803pu \angle 118.0655^\circ\end{aligned}$$

Las tensiones compuestas en barras de 6.9 kV son:

$$\begin{aligned}U_{m_{AB}} &= U_{m_A} - U_{m_B} = (5958.2 + j3197.3)V = 6761.9V \angle 28.2189^\circ \\&= 0.9800pu \angle 28.2189^\circ \\U_{m_{BC}} &= U_{m_B} - U_{m_C} = (-223.1 - j6767.7)V = 6771.4V \angle -91.8877^\circ \\&= 0.9814pu \angle -91.8877^\circ \\U_{m_{CA}} &= U_{m_C} - U_{m_A} = (-5735.1 + j3570.4)V = 6755.7V \angle 148.0954^\circ \\&= 0.9791pu \angle 148.0954^\circ\end{aligned}$$

También es interesante analizar lo que sucede en el lado de alta tensión (400 kV) del transformador T-1.

Las corrientes de secuencia en lado de alta tensión (400 kV) del transformador T-1 son:

$$\begin{aligned}I'_{at0} &= I_{at0} \frac{U_{n2TA-1}}{U_{n1T1}} = (-0.9318 + j13.7286)A = 13.7602A \angle 93.8828^\circ \\I'_{at1} &= I_{at1} \frac{U_{n2TA-1}}{U_{n1T1}} = (0.9257 - j13.7462)A = 13.7773A \angle -86.1472^\circ \\I'_{at2} &= I_{at2} \frac{U_{n2TA-1}}{U_{n1T1}} = (0.0060 + j0.0176)A = 0.0186A \angle 71.0445^\circ\end{aligned}$$



A la vista de los resultados obtenido en el caso de falta serie en la alimentación a 138 kV y de las tensiones en barras de 6.9 kV, las tensiones simples en barras de 400 kV no se calculan por su falta de relevancia.

4.2.4 RESULTADOS CASO 2

Las impedancias de secuencia directa e inversa del motor vistas desde barras de 6.9 kV son:

$$\mathbf{Z}_{m1} = (0.9267 + j0.3759) \frac{6900/\sqrt{3}}{171.978} = (21.4665 + j8.7075) \Omega$$
$$\mathbf{Z}_{m2} = (0.0148 + j0.1980) \frac{6900/\sqrt{3}}{171.978} = (0.3428 + j4.5866) \Omega$$

Las impedancias de secuencia totales son:

$$\mathbf{Z}_1 = (21.4730 + j8.9426) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = (0.3493 + j4.8216) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_0 = (0.0089 + j0.3064) \Omega$$

Las corrientes de secuencia por el motor son:

$$\mathbf{I}_{m0} = 0$$

$$\mathbf{I}_{m1} = (159.57 - j65.96) A = 172.6613 A \angle -22.4591^\circ$$

$$\mathbf{I}_{m2} = (-0.16 + j0.17) A = 0.2360 A \angle 133.3535^\circ$$



La corriente de secuencia directa es ligeramente inferior a la corriente nominal del motor (171.978 A) y la corriente de secuencia inversa es algo superior al 5% de la corriente de nominal del motor.

Las tensiones de secuencia en barras de 6.9 kV son:

$$\begin{aligned}U_{m0} &= 0 \\U_{m1} &= (3999.7 - j265)V = 3999.8V \angle -0.3800^\circ = 1.0040 pu \angle -0.3800^\circ \\U_{m2} &= (-0.8 - j0.7)V = 1.1V \angle -140.9213^\circ = 0.0003 pu \angle -140.9213^\circ\end{aligned}$$

Las tensiones simples en barras de 6.9 kV son:

$$\begin{aligned}U_{mA} &= (3926.2 - j123.2)V = 3928.1V \angle -1.7966^\circ = 0.9860 pu \angle -1.7966^\circ \\U_{mB} &= (-1996.5 - j3373.1)V = 3919.6V \angle -120.6211^\circ = 0.9839 pu \angle -120.6211^\circ \\U_{mC} &= (-1929.7 + j3496.2)V = 3993.4V \angle 118.8960^\circ = 1.0024 pu \angle 118.8960^\circ\end{aligned}$$

Las tensiones compuestas en barras de 6.9 kV son:

$$\begin{aligned}U_{mAB} &= U_{mA} - U_{mB} = (6.0206 + 3.4237i)V = 6926.0V \angle 29.6254^\circ \\&= 1.0038 pu \angle 29.6254^\circ \\U_{mBC} &= U_{mB} - U_{mC} = (-44.8 - j6929.1)V = 6929.2V \angle -90.3701^\circ \\&= 1.0042 pu \angle -90.3701^\circ \\U_{mCA} &= U_{mC} - U_{mA} = (-5975.9 + j3505.4)V = 6928.1V \angle 149.6046^\circ \\&= 1.0041 pu \angle 149.6046^\circ\end{aligned}$$



Resulta interesante, para comprobar la magnitud del desequilibrio, estudiar el cociente entre tensiones de secuencia (directa e inversa), así como intensidades, en el lado del motor.

$$\frac{U_{m2}}{U_{m1}} = \frac{1.1V}{3999.8V} = 0.02\%$$
$$\frac{I_{m2}}{I_{m1}} = \frac{0.2360A}{172.6613A} = 0.14\%$$

También es interesante analizar lo que sucede en el lado de alta tensión (400 kV) del transformador T-1.

Las corrientes de secuencia en lado de alta tensión (400 kV) del transformador T-1 son:

$$\mathbf{I}'_{at0} = \mathbf{I}_{at0} \frac{U_{n2TA-1}}{U_{n1T-1}} = (-2.6188 + j1.0808) A = 2.8330A \angle 157.5730^\circ$$
$$\mathbf{I}'_{at1} = \mathbf{I}_{at1} \frac{U_{n2TA-1}}{U_{n1T-1}} = (2.6214 - j1.0836i) A = 2.8366A \angle -22.4591^\circ$$
$$\mathbf{I}'_{at2} = \mathbf{I}_{at2} \frac{U_{n2TA-1}}{U_{n1T-1}} = (-0.0027 + j0.0028) A = 0.0039A \angle 133.3535^\circ$$

A la vista de los resultados obtenido en el caso de falta serie en la alimentación a 138 kV y de las tensiones en barras de 6.9 kV, las tensiones simples en barras de 400 kV no se calculan por su falta de relevancia.



4.2.5 RESUMEN DE RESULTADOS

La Tabla 4-2 resume los resultados más destacados del análisis de falta serie en la alimentación a 400 kV.

Tabla 4-2: Resumen de resultados del análisis de falta serie en la alimentación a 400 kV.

Magnitud	Arranque	Funcionamiento normal
Menor tensión compuesta en 6.9 kV (pu)	0.9791	1.0041
Desequilibrio de tensiones en 6.9 kV (%)	0.13	0.02
Desequilibrio de corrientes en 6.9 kV (%)	0.13	0.14
Corriente homopolar en 400 kV (A)	13.7773	2.8330

Lógicamente cuando se produce el arranque directo del motor de 2500 HP, la variación de las tensiones compuestas y desequilibrios de tensiones y corrientes en barras de 6.9 kV y de corriente homopolar en 400 kV son mayores que cuando el motor está en funcionamiento normal.

4.3 CONCLUSIONES PARCIALES

Del análisis por medio de componentes simétricas de la ocurrencia de una falta serie en las alimentaciones a 138 kV y a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio, en las condiciones estudiadas, se puede concluir:



- La corriente de falta sólo es distinta de cero (salvo la corriente de vacío de los transformadores) cuando las barras de servicios auxiliares tienen carga.
- Las variaciones de tensión en barras de 6.9 kV no permiten determinar la ocurrencia de una fase abierta en ninguna de las alimentaciones.
- El desequilibrio medido como relación entre las intensidades de secuencia inversa y directa es apreciable (5.9%) cuando la fase abierta está en la alimentación a 138 kV y es inapreciable (0.13%) cuando está en la alimentación a 400 kV.
- La corriente homopolar en el lado de alta tensión de la alimentación (138 kV o 400 kV) es del orden de magnitud de la corriente de secuencia directa.



Capítulo 5. SIMULACIÓN DE FALTAS SERIE EN LAS ALIMENTACIONES A LA CENTRAL NUCLEAR

Este capítulo analiza la ocurrencia de una falta serie en las alimentaciones a 138 kV y a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio por medio de simulación con el programa ATP.

De forma más precisa, se determinan las tensiones en barras de 6.9 kV alimentadas de la red a 138 kV a través del transformador de arranque TA-12 o alimentadas de la red a 400 kV a través del transformador principal T-1 y el transformador auxiliar TA-1 cuando se producen faltas serie por apertura de una fase en las alimentaciones a 138 kV y 400 kV respectivamente.

Se considerará la existencia de una falta serie por apertura de una fase en dos casos estudiados en el capítulo Capítulo 4:

- Caso 1: cuando arranca un motor de 2500 HP. El motor será representado por la impedancia de cortocircuito del motor como impedancia trifásica sin acoplamiento magnético. El neutro del motor no está accesible.
- Caso 2: cuando un motor de 2500HP está conectado funcionando a tensión y corriente nominal. El motor se representa por su modelo dinámico.



5.1 EL PROGRAMA ATP

El ATP es la versión de dominio público del programa ElectroMagnetic Transients Program (EMTP). Es distribuido por el European EMTP User's Group (EEUG).

El EMTP es un programa de ordenador que permite simular en el dominio del tiempo transitorios:

- electromagnéticos,
- electromecánicos, y
- en sistemas de control.

El programa EMTP fue desarrollado por Herman Dommel a finales de los años 60 en la Bonneville Power Administration (BPA) para el estudio de transitorios de maniobra en redes eléctricas. Durante los años 70 y primera mitad de los 80 fueron incorporadas nuevas capacidades de modelado (máquinas eléctricas, sistemas de control, etc.). El desarrollo del EMTP fue realizado con fondos del gobierno de los Estados Unidos, por lo que el programa tenía carácter público. En el año 1982 se formó el "EMTP Development Coordination Group" (DGC) con objeto de apoyar el mantenimiento y desarrollo del programa. En 1984 el Electric Power Research Institute (EPRI) se unió al DGC. Desde 1985 hay dos versiones:

- DGC/EPRI EMTP.
- ATP (Alternative Transients Program).

Las capacidades de modelado del programa EMTP son muy amplias:



- Resistencias, bobinas y condensadores lineales no acoplados.
- Resistencias, bobinas y condensadores lineales y acoplados.
- Resistencias y bobinas no lineales.
- Líneas aéreas.
- Cables.
- Transformadores.
- Fuentes de tensión y de corriente.
- Máquinas síncronas.
- Máquina universal.
- Interruptores.
- Sistemas de control.

Las aplicaciones del programa EMTP son muy variadas. Se pueden destacar:

- Sobretensiones debidas a maniobras (deterministas y probabilistas, disparo monofásico, reenganche rápido, maniobra de condensadores y reactancias, tensión transitoria de restablecimiento, maniobra de cables.
- Sobretensiones atmosféricas (cebado, sobretensiones inducidas, sobretensiones en subestaciones)
- Coordinación de aislamiento (líneas aéreas, subestaciones de intemperie., subestaciones blindadas, pararrayos)
- Esfuerzos torsionales en ejes de turbogeneradores (producidos por maniobras como el reenganche rápido o la sincronización fuera de fase, debidos a resonancia subsíncrona)

- Enlaces en corriente continua a alta tensión (controles, transitorios eléctricos, armónicos)
- Otros (ferroresonancia, resonancia en líneas en paralelo, pérdidas en el conductor de tierra, puestas a tierra, arranque de motores)

5.2 FALTA SERIE EN LA ALIMENTACIÓN A 138 kV

5.2.1 MODELO DE SIMULACIÓN DEL CASO 1

Las características del transformador TA-12 son:

$33/40\text{ MVA}, 138\text{ kV}/6.9\text{ kV}/0.4, \text{YNyn}0\text{d}11$

$S_{B12} = 33\text{ MVA}, r_{cc12} = 0.445\%, u_{cc12} = 13\%$

$S_{B13} = 11.03\text{ MVA}, r_{cc13} = 0.445\% (0.06/0.13), u_{cc12} = 0\%$

$S_{B23} = 11.03\text{ MVA}, r_{cc13} = 0.445\% (0.0195/0.13), u_{cc12} = 1.95\%$

$P_0 (100\% U_n) = 39\text{ kW}, i_0 (100\% U_n, 44\text{ MVA}) = 0.53\%$

$P_0 (110\% U_n) = 55.6\text{ kW}, i_0 (110\% U_n, 44\text{ MVA}) = 1.7\%$

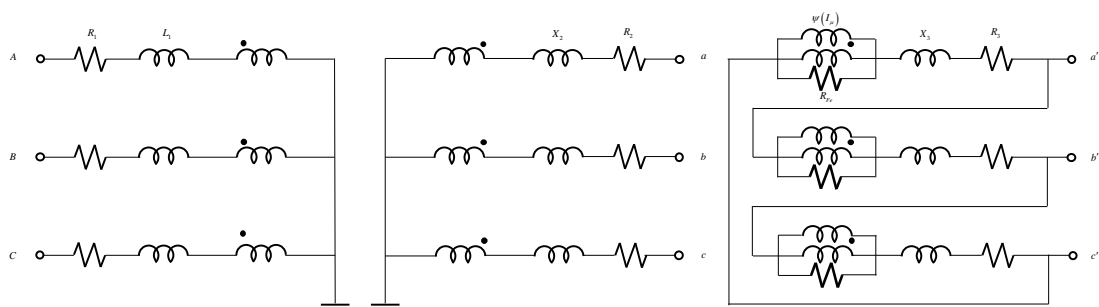


Figura 5-1: Circuito equivalente trifásico del transformador TA-12.



Las impedancias de cortocircuito del transformador en magnitudes unitarias de la base común son:

$$\begin{aligned}z_{cc12} &= \left(r_{cc12} + j\sqrt{z_{cc12}^2 - r_{cc12}^2} \right) = (0.0092 + j0.2704) pu \\z_{cc13} &= \hat{z}_{cc13} \frac{S_{B12}}{S_{B13}} = \left(r_{cc13} + j\sqrt{z_{cc13}^2 - r_{cc13}^2} \right) \frac{S_{B12}}{S_{B13}} = (0.0383 + j1.117) pu \\z_{cc23} &= \hat{z}_{cc23} \frac{S_{B12}}{S_{B23}} = \left(r_{cc23} + j\sqrt{z_{cc23}^2 - r_{cc23}^2} \right) \frac{S_{B12}}{S_{B23}} = (0.0126 + j0.3632) pu\end{aligned}$$

Las impedancias del circuito equivalente de un transformador de tres arrollamientos se obtienen a partir de las impedancias de cortocircuito de acuerdo con:

$$\begin{aligned}z_{cc1} &= (r_{cc1} + jx_{cc1}) = \frac{z_{cc12} + z_{cc13} - z_{cc23}}{2} = (0.0062 + j0.1811)\Omega \\z_{cc2} &= (r_{cc2} + jx_{cc2}) = \frac{z_{cc12} + z_{cc23} - z_{cc13}}{2} = (0.0002 + j0.0064)\Omega \\z_{cc3} &= (r_{cc3} + jx_{cc3}) = \frac{z_{cc13} + z_{cc23} - z_{cc12}}{2} = (0.0027 + j0.0778)\Omega\end{aligned}$$

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de menor tensión del transformador TA-12 son:

$$\begin{aligned}R_3 &= 3 \cdot r_{cc3} \cdot \frac{0.4^2}{33} = 0.0000393\Omega \\X_3 &= 3 \cdot x_{cc3} \cdot \frac{0.4^2}{33} = 0.001132\Omega\end{aligned}$$



La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de media tensión del transformador TA-12 son:

$$R_2 = r_{cc2} \cdot \frac{0.4^2}{33} = 0.00000097\Omega$$
$$X_2 = x_{cc2} \cdot \frac{0.4^2}{33} = 0.000031\Omega$$

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de mayor tensión del transformador TA-12 son:

$$R_1 = r_{cc1} \cdot \frac{0.4^2}{33} = 0.00003\Omega$$
$$X_1 = x_{cc1} \cdot \frac{0.4^2}{33} = 0.000878\Omega$$

La característica enlaces de flujo/corriente del transformador TA-12 son:

$$\hat{\psi} = \frac{U_{n2}}{4.44 \cdot 50}$$
$$\hat{I}_\mu = \sqrt{i_0^2 - i_{Fe}^2} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{n2}} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{i_0^2 - \left(\frac{P_0}{S_n}\right)^2} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{n2}} \cdot \sqrt{2}$$

\hat{I}	$\hat{\psi}$
60.6049	1.0403
214.1506	1.1443

La resistencia de magnetización del transformador TA-12 son:



$$R_{Fe} = \frac{1}{39/44000} \cdot \frac{0.4^2}{44} = 4.103\Omega$$

Las impedancias de secuencia directa e inversa del motor en el arranque vistas desde barras de 6.9 kV son:

$$\mathbf{Z}_{e1} = \mathbf{Z}_{e0} = j \frac{138^2}{1000} = j19.044\Omega$$

Las impedancias de por fase del motor en el arranque vistas desde barras de 6.9 kV son:

$$\mathbf{Z}_m = (0.02 + j0.2) \frac{6900/\sqrt{3}}{171.978} = (0.4633 + j4.6329)\Omega$$

La Figura 5-2 muestra el modelo de simulación de la alimentación a 138 kV de la central nuclear del caso de estudio. Incluye el modelo de la red y el modelo estático del motor de 2500 HP en el momento del arranque. El modelo también incluye bloques que calculan las tensiones y corrientes de secuencia en los lados de 138 kV y de 6.9 kV del transformador TA-12. Se considera que la fase A en el lado de 138 kV del transformador TA-12 está abierta en régimen permanente.

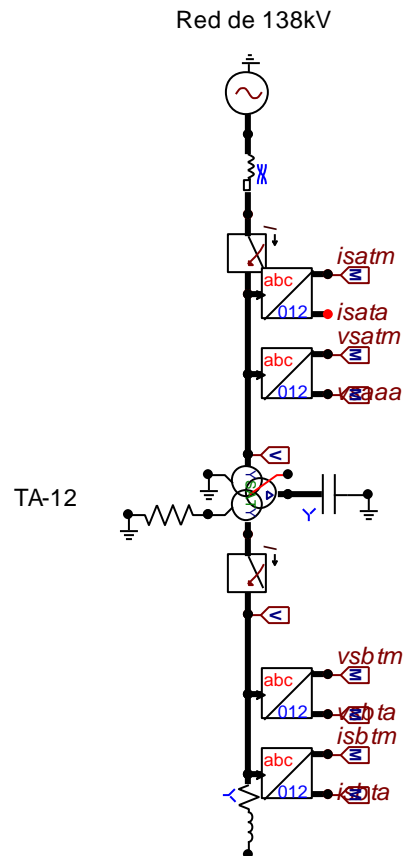


Figura 5-2: Modelo de simulación de la alimentación a 138 kV de la central nuclear del caso de estudio: modelo estático del motor.

5.2.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL CASO 1

La Figura 5-3 y la Figura 5-4 muestran respectivamente las tensiones de fase en el lado de 138 kV y en el lado 6.9 kV del transformador TA-12. La Figura 5-5 y la Figura 5-6 y muestran las corrientes de línea en el lado de 138 kV y en el lado 6.9 kV del transformador TA-12.

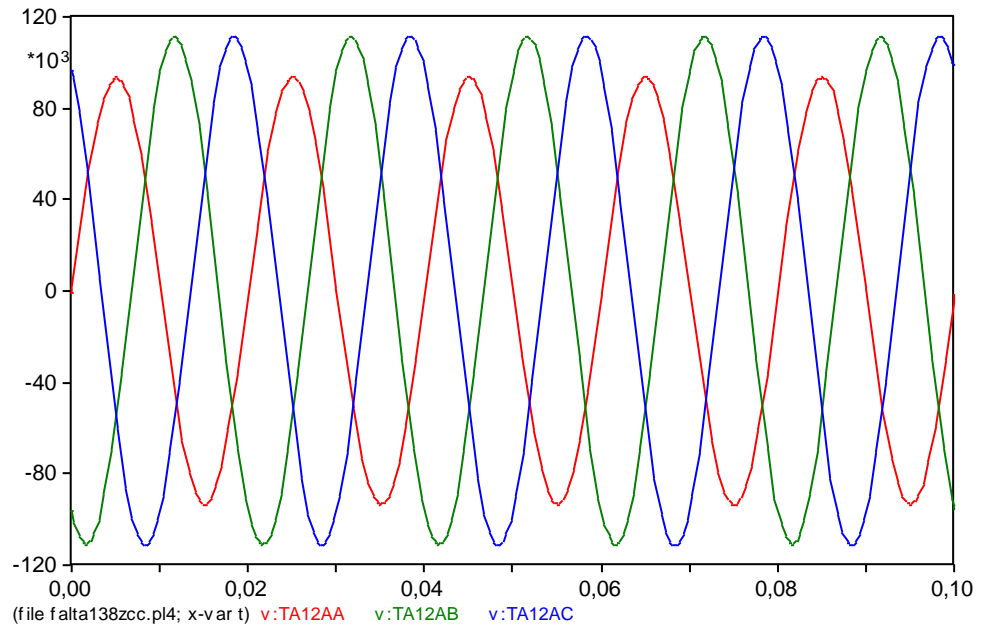


Figura 5-3: Tensiones de fase en el lado de 138 kV del transformador TA-12.

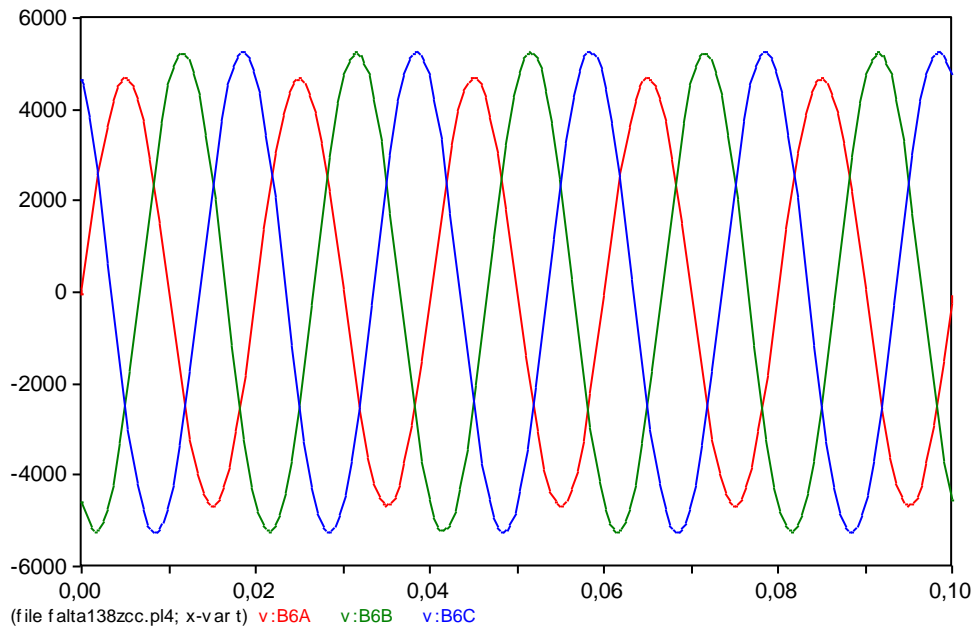


Figura 5-4: Tensiones de fase en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12.

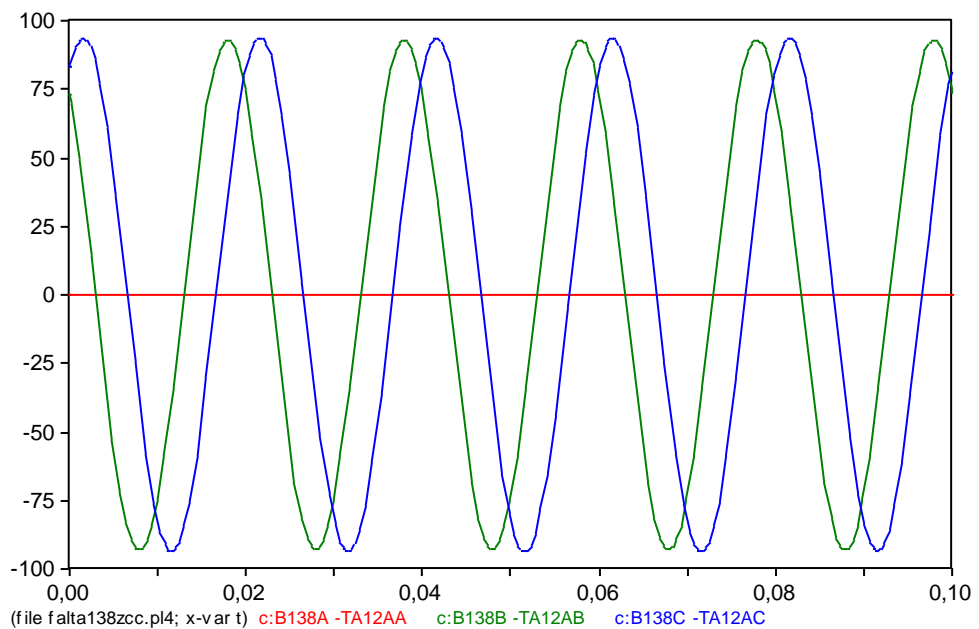


Figura 5-5: Corrientes de línea en el lado de 138 kV del transformador TA-12.

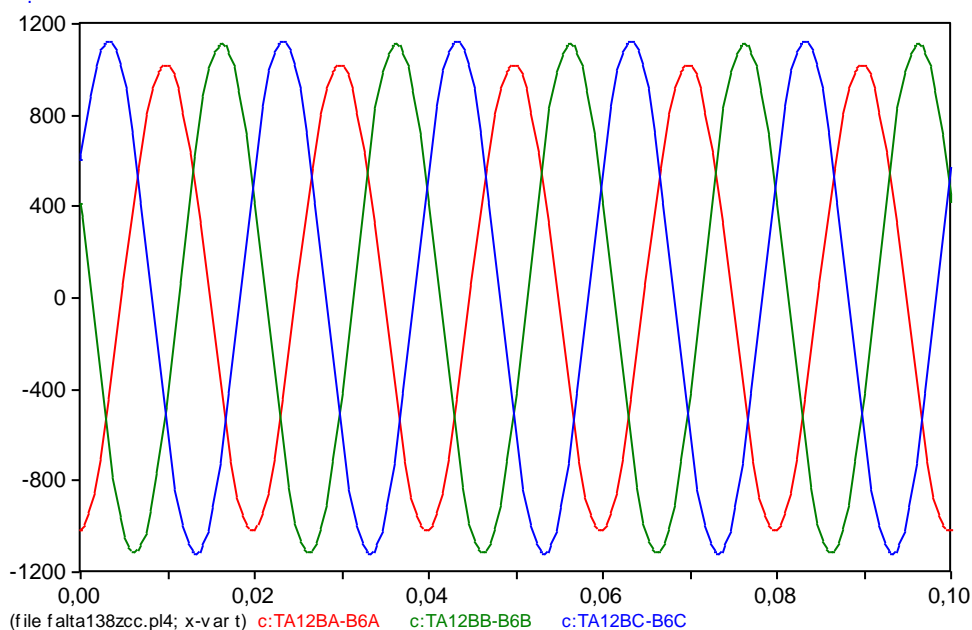


Figura 5-6: Corrientes de línea en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12.

La Tabla 5-1 compara los resultados (tensiones de fase y corrientes de líneas en los lados de 138 kV y de 6.9 kV del transformador TA-12) obtenidos por simulación y por cálculo analítico en el caso 1. Las diferencias son muy pequeñas. Ello confirma la validez de ambos modelos.

Tabla 5-1: Comparación de resultados obtenidos por simulación y por cálculo analítico.

Tensiones simples en lado 138 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	93539	111018	111162
Cálculo analítico	93880	111060	111200

Corrientes línea en lado 138 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	0	93	94
Cálculo analítico	0	91	92

Tensiones simples en lado 6.9 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	4670	5238	5262
Cálculo analítico	4767	5205	5237

Corrientes línea en lado 6.9 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	1020	1116	1123
Cálculo analítico	1024	1118	1125



La Figura 5-7 y la Figura 5-8 muestran respectivamente las tensiones de secuencia (directa, inversa y homopolar) en el lado de 138 kV y en el lado 6.9 kV del transformador TA-12. La Figura 5-9 y la Figura 5-10 muestran respectivamente las corrientes de secuencia (directa, inversa y homopolar) en el lado de 138 kV y en el lado 6.9 kV del transformador TA-12. La magnitud cuya letras finales son A, B y C es respectivamente la componente de secuencia homopolar, directa e inversa. El transitorio de cálculo de las componentes de secuencia dura un ciclo (20 ms) de la frecuencia fundamental (50 Hz).

La simulación confirma las conclusiones alcanzadas en el cálculo analítico:

- La corriente en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12 no contiene componente de secuencia homopolar.
- Las componentes de secuencia inversa de la tensión y de la corriente en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12 son pequeñas comparadas con las componentes de secuencia directa. Por tanto, los desequilibrios pequeños.
- La componente de secuencia homopolar de la corriente en el lado de 138 kV del transformador TA-12 es próxima a la componente de secuencia directa.

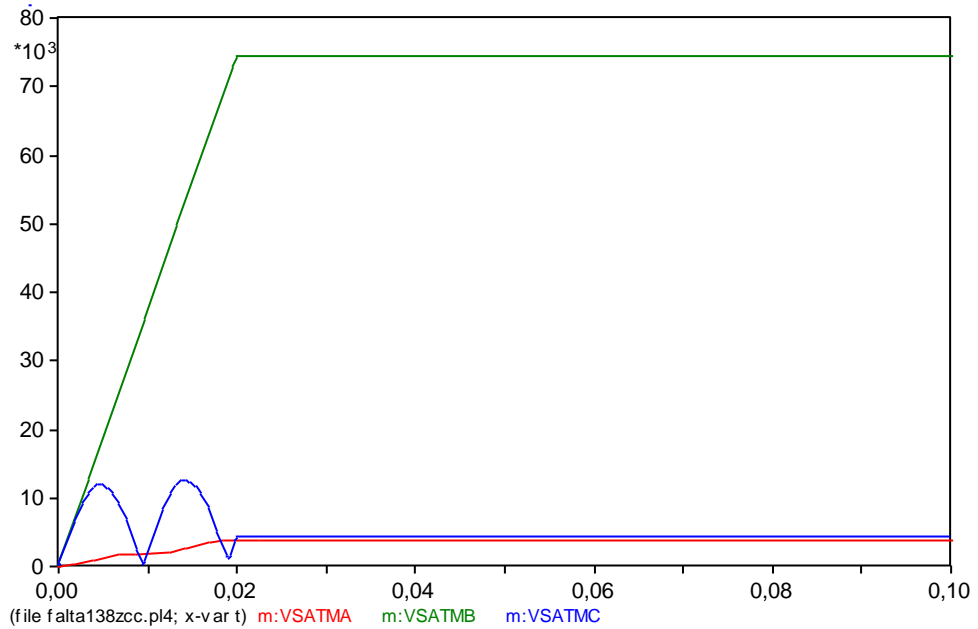


Figura 5-7: Tensiones de secuencia en el lado de 138 kV del transformador TA-12.

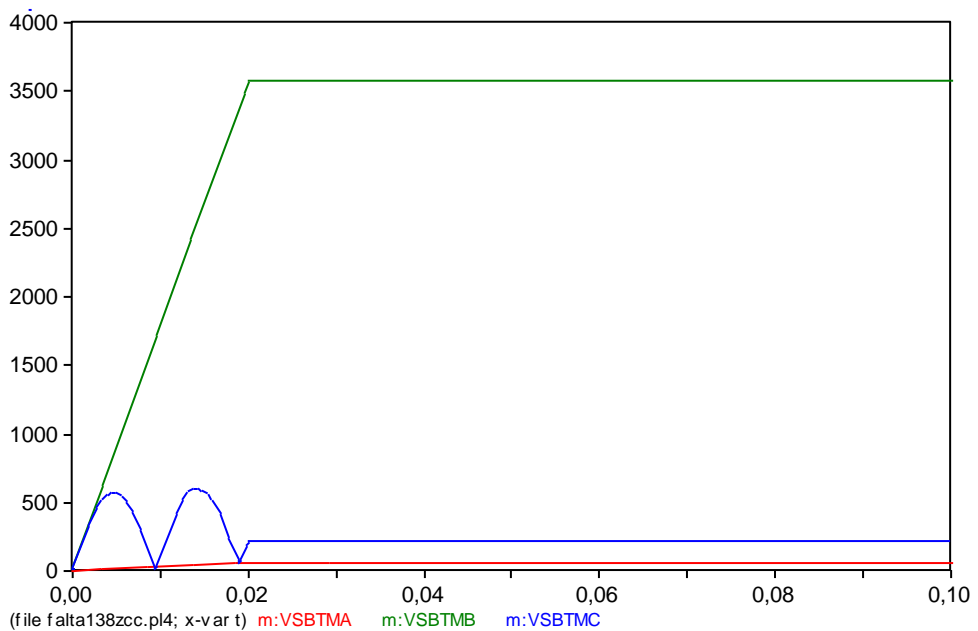


Figura 5-8: Tensiones de secuencia en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12.

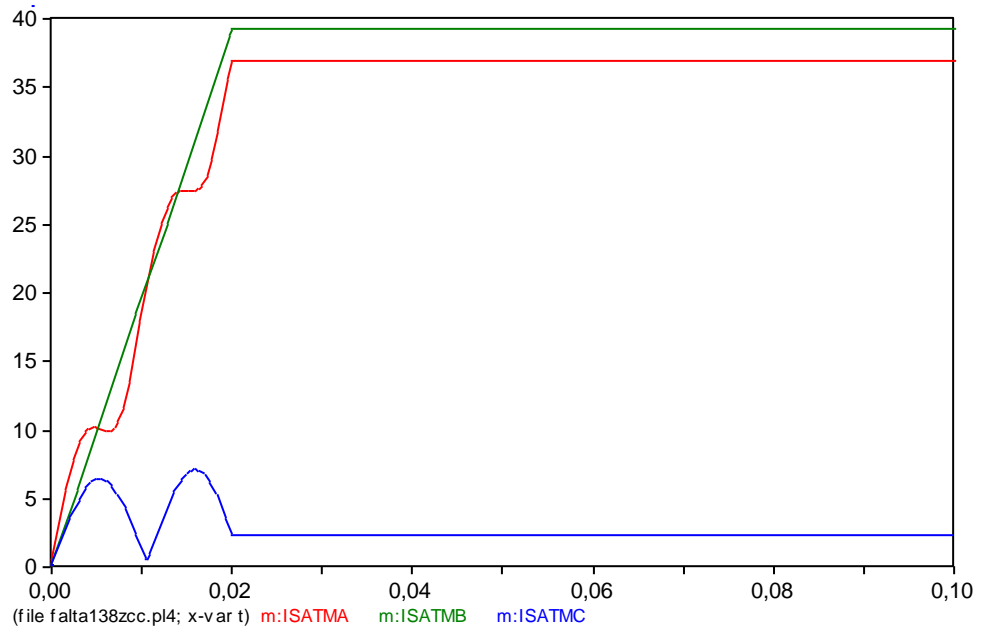


Figura 5-9: Corriente de secuencia en el lado de 138 kV del transformador TA-12.

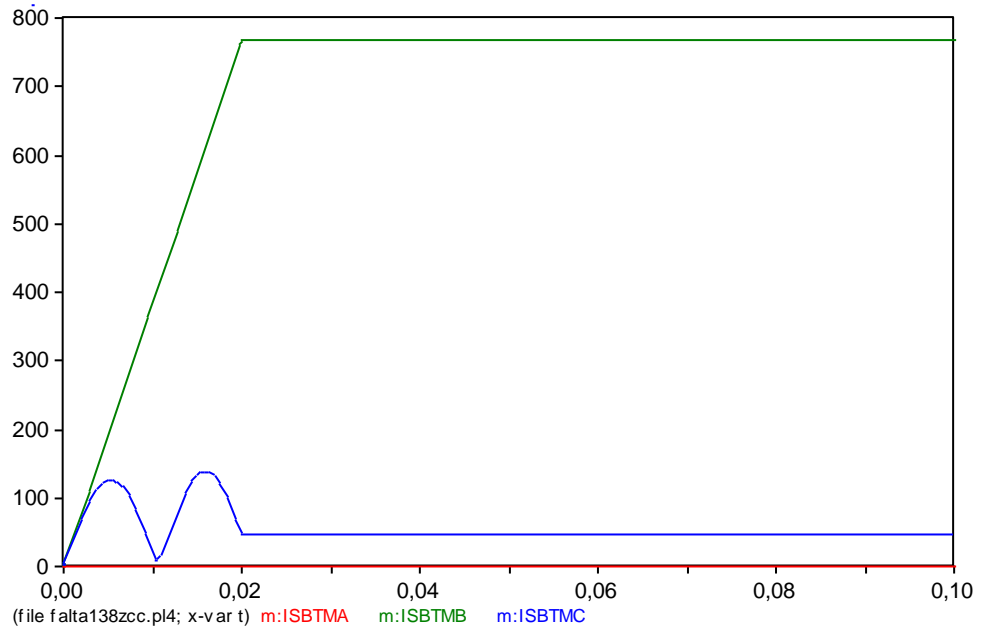


Figura 5-10: Corriente de secuencia en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12.

5.2.3 MODELO DE SIMULACIÓN DEL CASO 2

La Figura 5-5 muestra el modelo de simulación de la alimentación a 138 kV de la central nuclear del caso de estudio. Incluye el modelo de la red y modelo dinámico del motor de 2500 HP funcionando en condiciones nominales.

Las resistencias y reactancias del motor en el arranque vistas desde barras de 6.9 kV son:



$$R_1 = R_2 = 0.01 \frac{6900/\sqrt{3}}{171.978} = 0.2316\Omega$$

$$L_1 = L_2 = \frac{0.1}{2\pi 50} \frac{6900/\sqrt{3}}{171.978} = 0.0075H$$

$$L_m = \frac{5}{2\pi 50} \frac{6900/\sqrt{3}}{171.978} = 0.3687H$$

Suponiendo que la inercia del motor es 1 segundo, el momento de inercia resultante es:

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \Omega_1^2}{\sqrt{3} U_n I_n} = 1s$$

$$J = H \frac{2}{\Omega_1^2} \sqrt{3} U_n I_n = 1 \frac{2}{\left(\frac{2\pi 50}{2}\right)^2} \sqrt{3} \cdot 6900 \cdot 171.978 = 166.5992 \text{kgm}^2$$

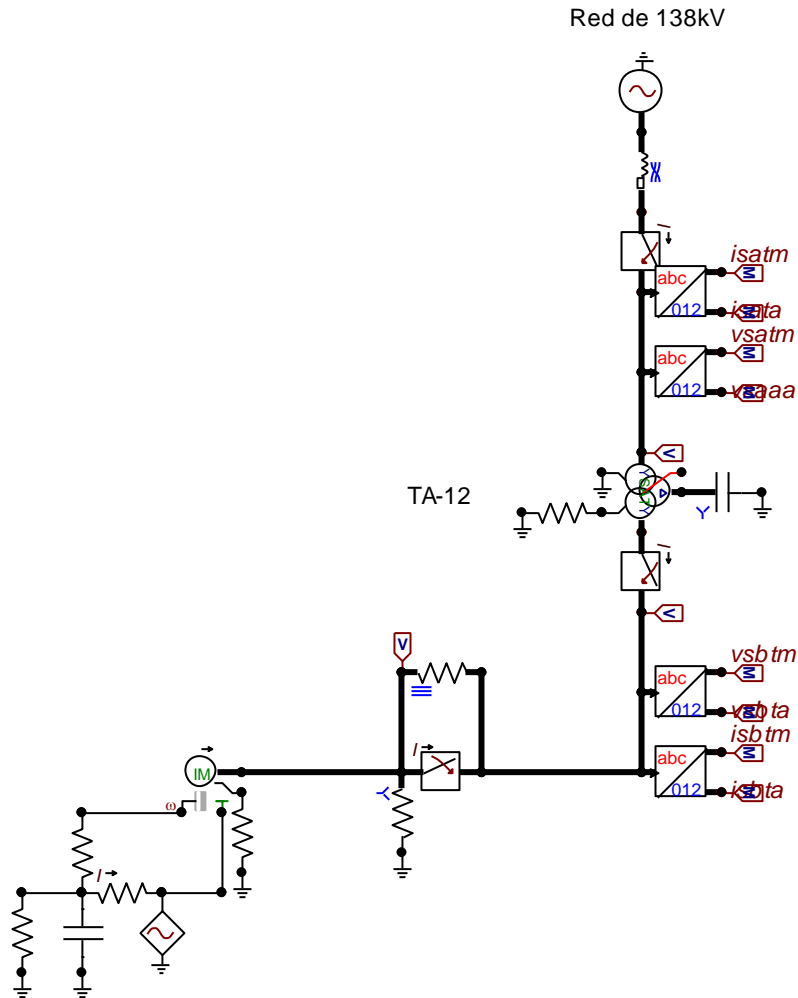


Figura 5-11: Modelo de simulación de la alimentación a 138 kV de la central nuclear del caso de estudio: modelo dinámico del motor.

Se considera que la fase A en el lado de 138 kV del transformador TA-12 abre 0.5 segundos después de comenzada la simulación. La aplicación de la perturbación se retrasa 0.5 segundos para asegurar que el sistema ha alcanzado el punto de equilibrio.



5.2.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL CASO 2

La Figura 5-12 y la Figura 5-13 muestran respectivamente la velocidad y el par electromagnético del motor.

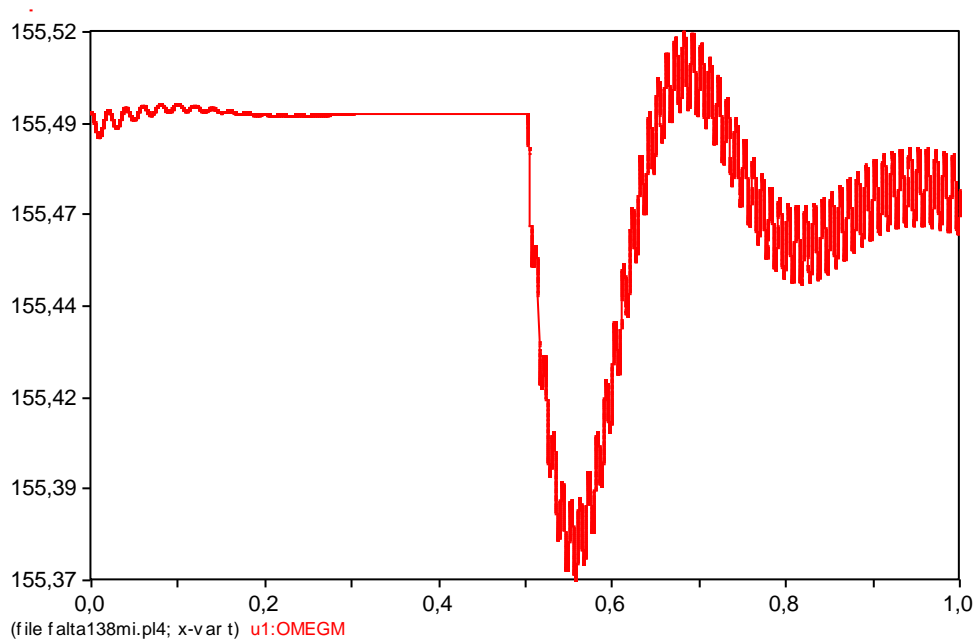


Figura 5-12: Velocidad del motor.

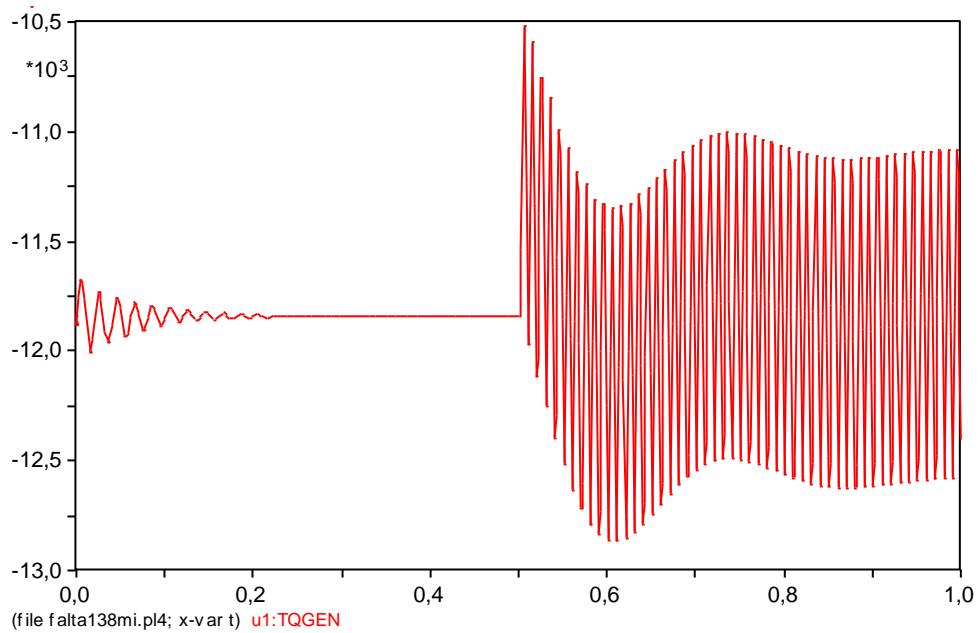


Figura 5-13: Par electromagnético del motor.

La Figura 5-14 y la Figura 5-15 muestran respectivamente las tensiones de fase en el lado de 138 kV y en el lado 6.9 kV del transformador TA-12. La Figura 5-16 y la Figura 5-17 muestran el módulo de las corrientes de línea en el lado de 138 kV y en el lado 6.9 kV del transformador TA-12.

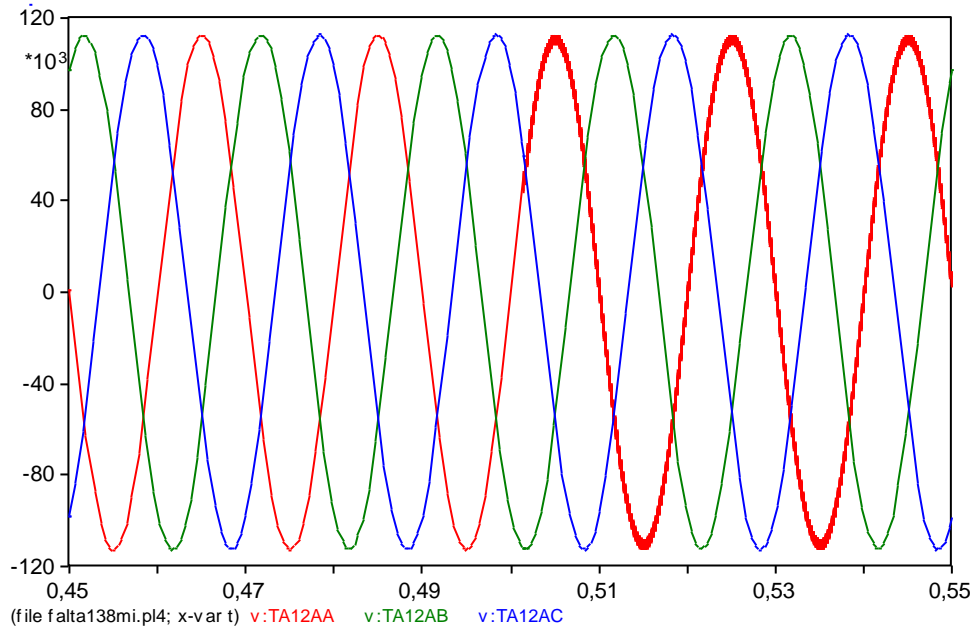


Figura 5-14: Tensiones de fase en el lado de 138 kV del transformador TA-12.

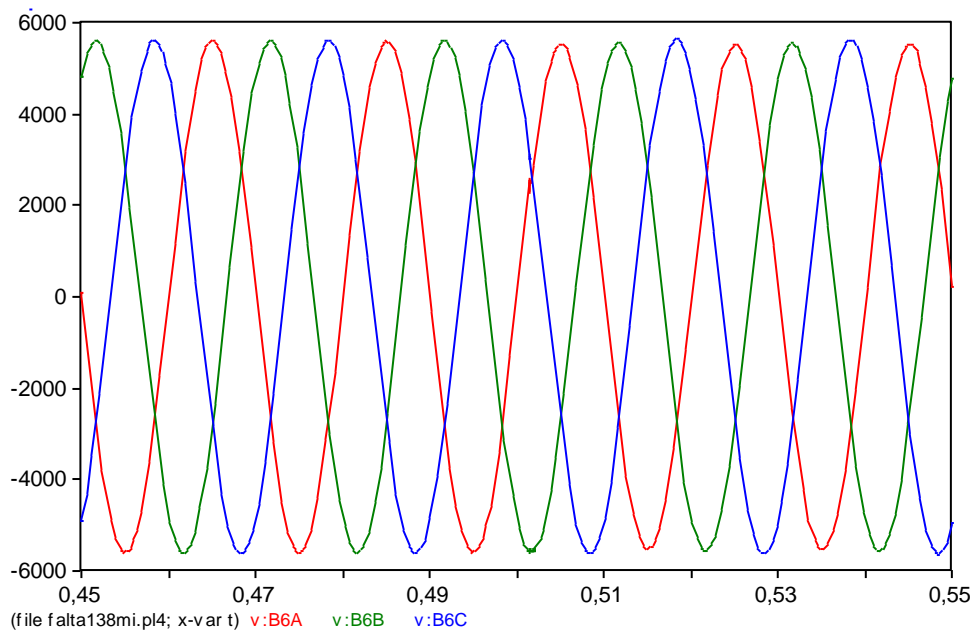


Figura 5-15: Tensiones de fase en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12.

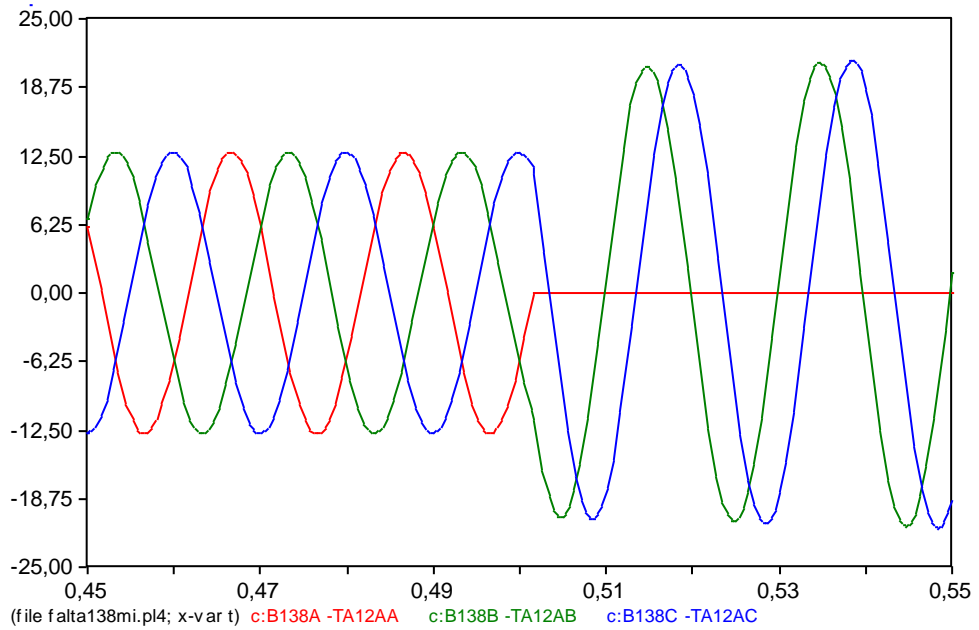


Figura 5-16: Corrientes de línea en el lado de 138 kV del transformador TA-12 (alrededor del comienzo de la apertura de la fase).

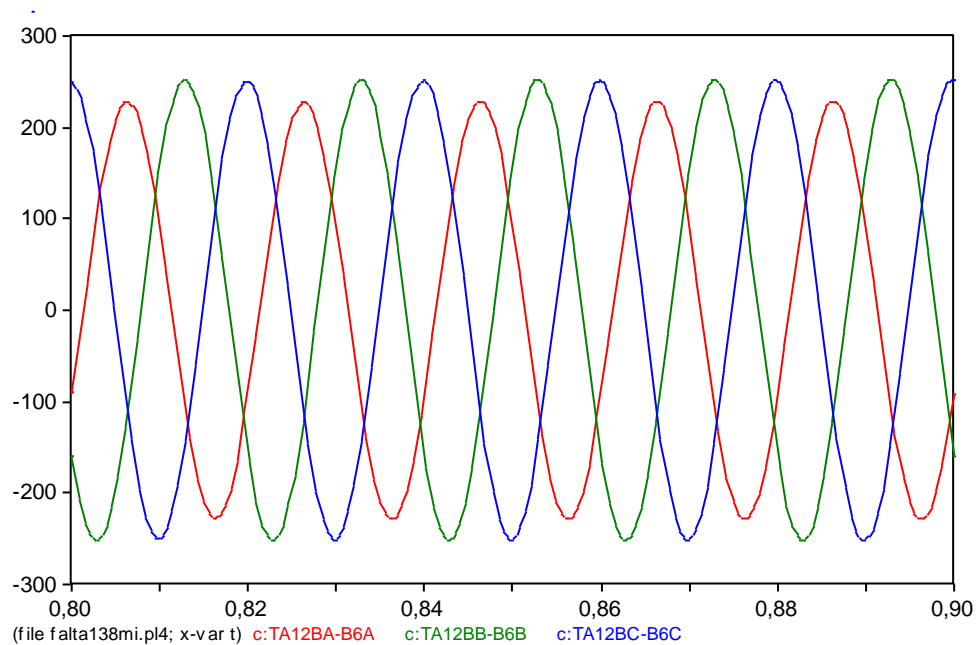


Figura 5-17: Corrientes de línea en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12 (una vez alcanzado el régimen permanente del motor).

La Tabla 5-2 compara los resultados (tensiones de fase y corrientes de líneas en los lados de 138 kV y de 6.9 kV del transformador TA-12) obtenidos por simulación y por cálculo analítico en el caso 2. Las diferencias son muy pequeñas. Ello confirma la validez de ambos modelos.

Tabla 5-2: Comparación de resultados obtenidos por simulación y por cálculo analítico.

Tensiones simples en lado 138 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	104840	112340	112620
Cálculo analítico	110975	112381	112702

Corrientes línea en lado 138 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	0	21	21
Cálculo analítico	0	20	20

Tensiones simples en lado 6.9 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	5529	5551	5626
Cálculo analítico	5555	5543	5648

Corrientes línea en lado 6.9 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	227	248	249
Cálculo analítico	228	252	251



La Figura 5-18 y la Figura 5-19 muestran respectivamente las tensiones de secuencia (directa, inversa y homopolar) en el lado de 138 kV y en el lado 6.9 kV. La Figura 5-20 y la Figura 5-21 muestran respectivamente las corrientes de secuencia (directa, inversa y homopolar) en el lado de 138 kV y en el lado 6.9 kV. La magnitud cuya letras finales son A, B y C es respectivamente la componente de secuencia homopolar, directa e inversa. El transitorio de cálculo de las componentes de secuencia dura un ciclo (20 ms) de la frecuencia fundamental (50 Hz).

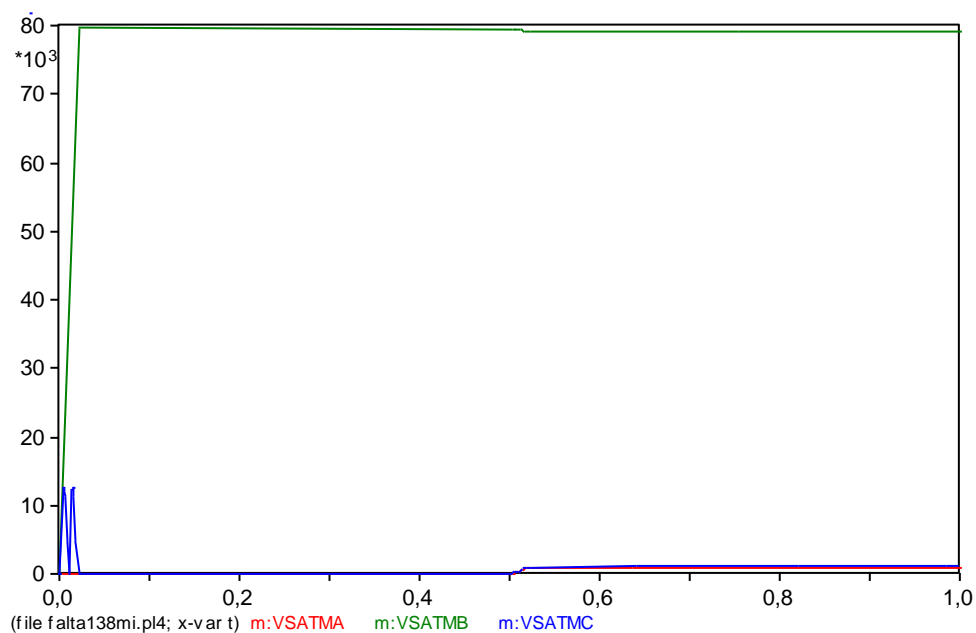


Figura 5-18: Tensiones de secuencia en el lado de 138 kV del transformador TA-12.

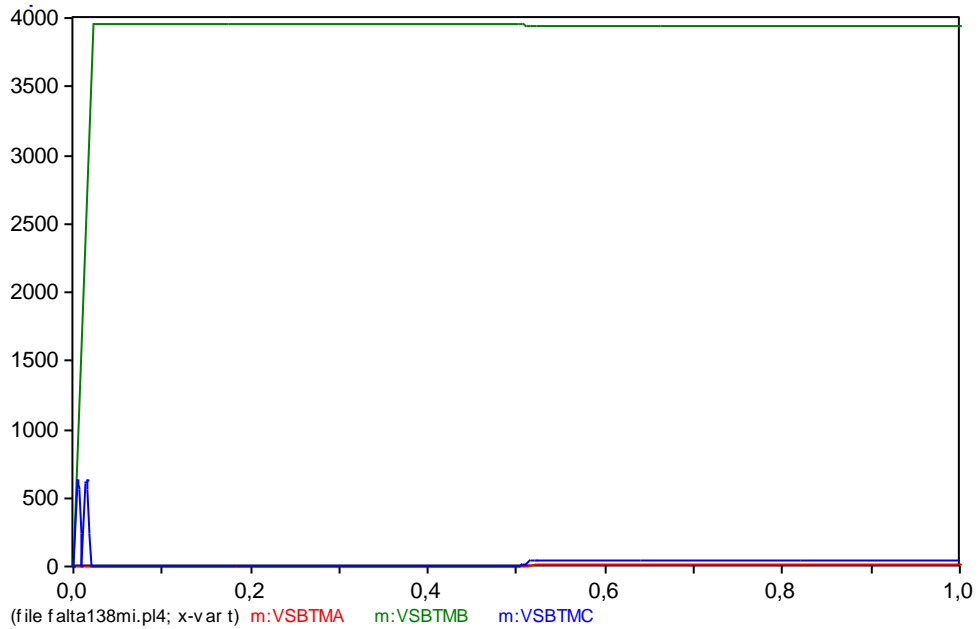


Figura 5-19: Tensiones de secuencia en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12.

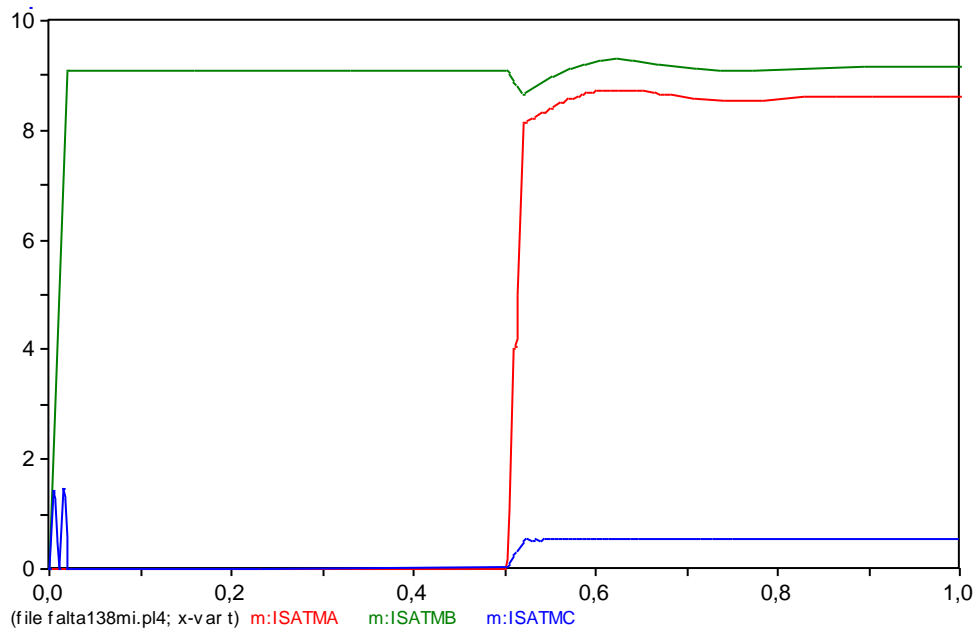


Figura 5-20: Corrientes de secuencia en el lado de 138 kV del transformador TA-12.

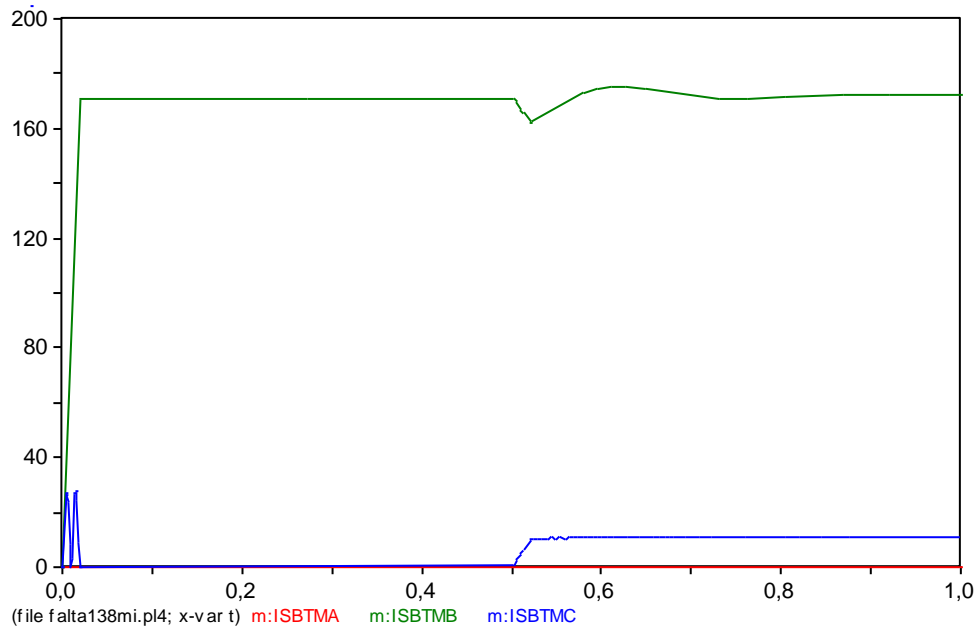


Figura 5-21: Corrientes de secuencia en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12.

La simulación confirma las conclusiones alcanzadas en el cálculo analítico:

- La corriente en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12 no contiene componente de secuencia homopolar.
- La componente de secuencia inversa de la corriente en el lado de 6.9 kV del transformador TA-12 es apreciable.
- La componente de secuencia homopolar de la corriente en el lado de 138 kV del transformador TA-12 es próxima a la componente de secuencia directa.
- Las componentes de secuencia inversa y homopolar de la tensión en tanto en el lado de 138 kV como lado de 6.9 kV del transformador TA-12 son muy pequeñas comparadas con las componentes de secuencia directa.

5.3 FALTA SERIE EN LA ALIMENTACIÓN A 400 kV

5.3.1 MODELO DE SIMULACIÓN DEL CASO 1

Las características del transformador T-1 son:

$$3 \times 420 \text{ MVA}, 420 \text{ kV} / 20 \text{ kV}, \text{YNd11}$$

$$r_{cc} = 0.2\%, u_{cc} = 14.7\%$$

$$P_0(100\%U_n) = 3 \times 130 \text{ kW}, i_0(100\%U_n) = 0.08\%$$

$$P_0(110\%U_n) = 3 \times 177 \text{ kW}, i_0(110\%U_n) = 0.22\%$$

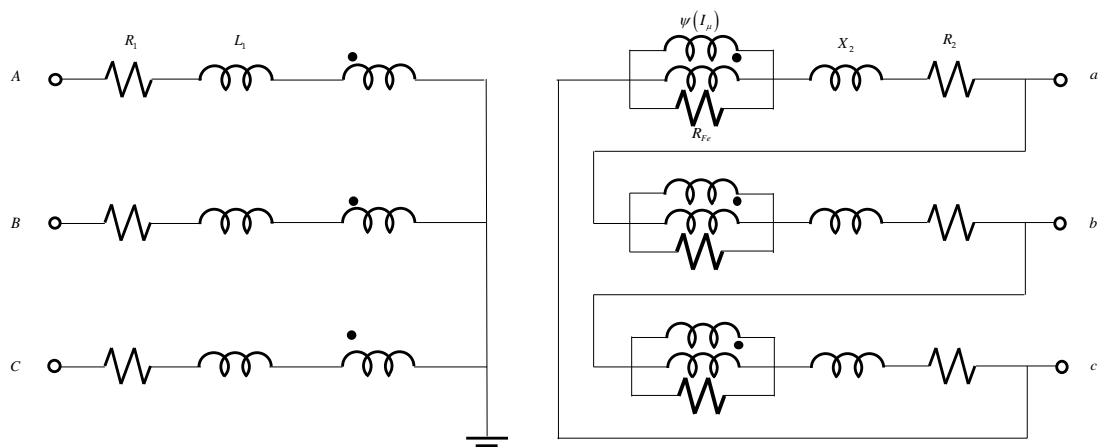


Figura 5-22: Circuito equivalente trifásico del transformador T-1.

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de menor tensión del transformador T-1 son:



$$R_2 = 3 \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{0.2}{100} \cdot \frac{20^2}{1260} \right) = 0.0009524 \Omega$$
$$X_2 = 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{20^2}{1260} \sqrt{0.147^2 - \left(\frac{0.2}{100} \right)^2} = 0.07 \Omega$$

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de mayor tensión del transformador T-1 son:

$$R_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{0.2}{100} \cdot \frac{420^2}{1260} \right) = 0.14 \Omega$$
$$X_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{420^2}{1260} \sqrt{0.147^2 - \left(\frac{0.2}{100} \right)^2} = 10.289 \Omega$$

La característica enlaces de flujo/corriente del transformador T-1 son:

$$\hat{\psi} = \frac{U_{n2}}{4.44 \cdot 50}$$
$$\hat{I}_\mu = \sqrt{i_0^2 - i_{Fe}^2} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{n2}} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{i_0^2 - \left(\frac{P_0}{S_n} \right)^2} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{n2}} \cdot \sqrt{2}$$

\hat{I}	$\hat{\psi}$
60.6049	1.0403
214.1506	1.1443

La resistencia de magnetización del transformador T-1 son:

$$R_{Fe} = \frac{1}{130/420000} \cdot \frac{20^2}{420} = 37.2093\Omega$$

Las características del transformador TA-1 son:

30/40 MVA, 20kV/6.9kV , Dyn1

$r_{cc} (30MVA) = 0.4718\%$, $u_{cc} (30MVA) = 11.25\%$

$P_0 (100\%U_n) = 26kW$, $i_0 (100\%U_n, 40MVA) = 0.37\%$

$P_0 (110\%U_n) = 38kW$, $i_0 (110\%U_n, 40MVA) = 1.17\%$

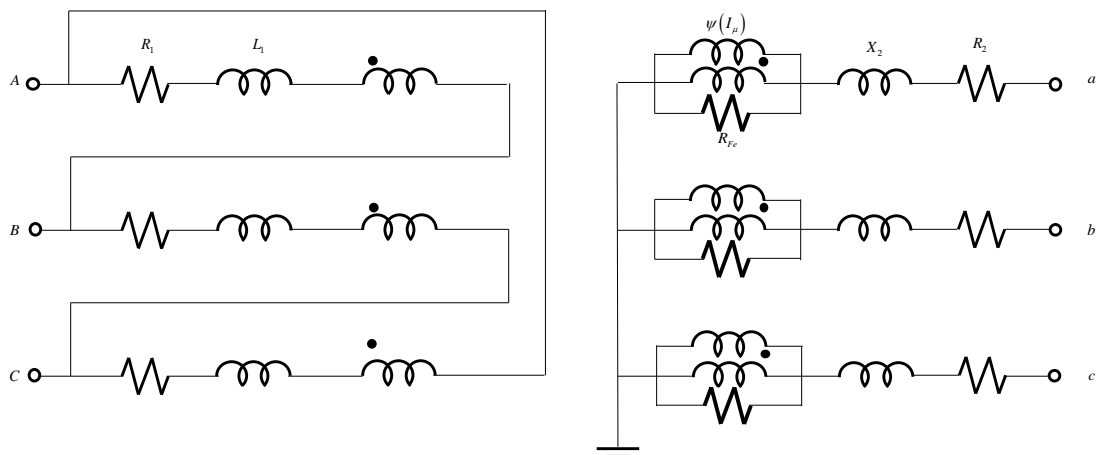


Figura 5-23: Circuito equivalente trifásico del transformador TA-1.

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de menor tensión del transformador TA-1 son:



$$R_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{0.4718}{100} \cdot \frac{6.9^2}{30} \right) = 0.00374 \Omega$$
$$X_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{6.9^2}{30} \sqrt{0.1125^2 - \left(\frac{0.4718}{100} \right)^2} = 0.0892 \Omega$$

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de mayor tensión del transformador TA-1 son:

$$R_2 = 3 \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{0.4718}{100} \cdot \frac{6.9^2}{30} \right) = 0.01123 \Omega$$
$$X_2 = 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{6.9^2}{30} \sqrt{0.1125^2 - \left(\frac{0.4718}{100} \right)^2} = 0.2676 \Omega$$

La característica enlaces de flujo/corriente del transformador TA-1 son:

$$\hat{\psi} = \frac{U_{n2} / \sqrt{3}}{4.44 \cdot 50}$$
$$\hat{I}_\mu = \sqrt{i_0^2 - i_{Fe}^2} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{n2}} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{i_0^2 - \left(\frac{P_0}{S_n} \right)^2} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{n2}} \cdot \sqrt{2}$$

\hat{I}	$\hat{\psi}$
60.6049	1.0403
214.1506	1.1443

La resistencia de magnetización del transformador TA-12 son:



$$R_{Fe} = \frac{1}{26/40000} \cdot \frac{6.9^2}{40} = 1831.15\Omega$$

La Figura 5-24 muestra el modelo de simulación de la alimentación a 400 kV de la central nuclear. Incluye el modelo de la red y del motor de 2500 HP en el momento del arranque. El modelo también incluye bloques que calculan las tensiones y corrientes de secuencia en los lados de 400 kV del transformador T-1 y de 6.9 kV del transformador TA-1. Se considera que la fase A en el lado de 400 kV del transformador T-1 está abierta en régimen permanente.

Red de 420kV

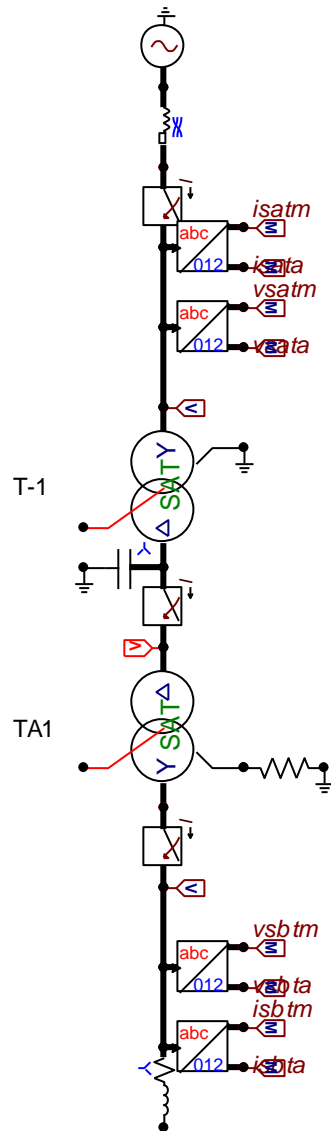


Figura 5-24: Modelo de simulación de la alimentación a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio: modelo estático del motor.



5.3.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL CASO 1

La Figura 5-25 y la Figura 5-26 muestran respectivamente las tensiones de fase en el lado de 400 kV del transformador T-1 y en el lado 6.9 kV del transformador TA-1. La Figura 5-27 y la Figura 5-28 muestran las corrientes de línea en el lado de de 400 kV del transformador T-1 y en el lado 6.9 kV del transformador T-A1.

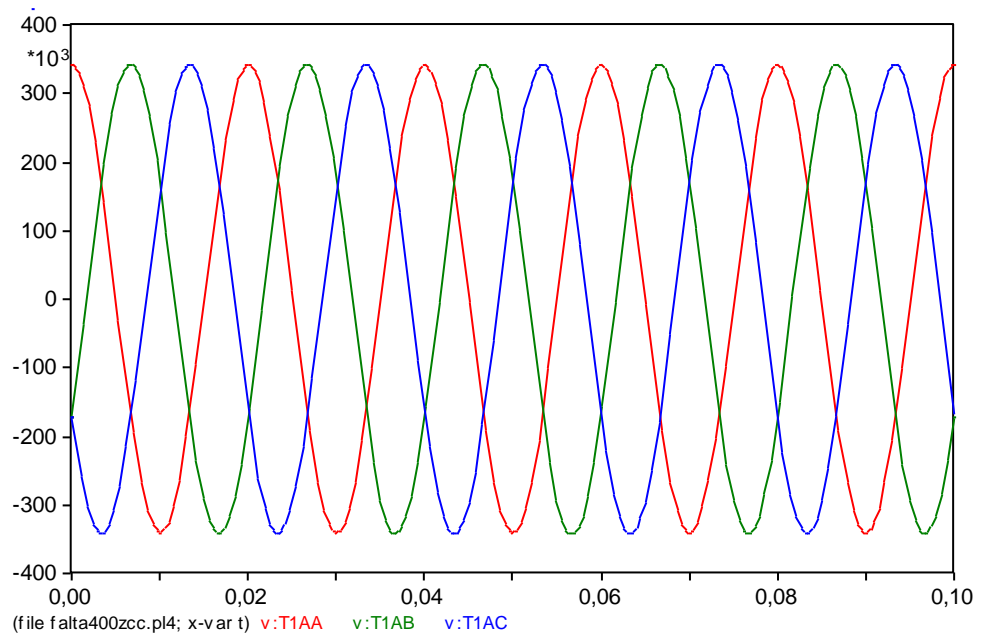


Figura 5-25: Tensiones de fase en el lado de 400 kV del transformador T-1.

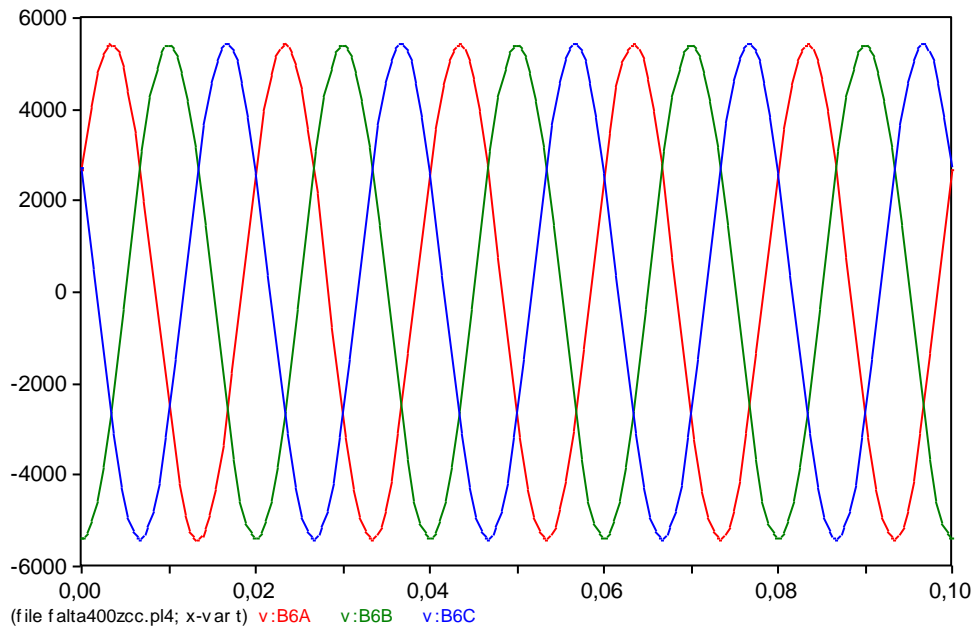


Figura 5-26: Tensiones de fase en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1.

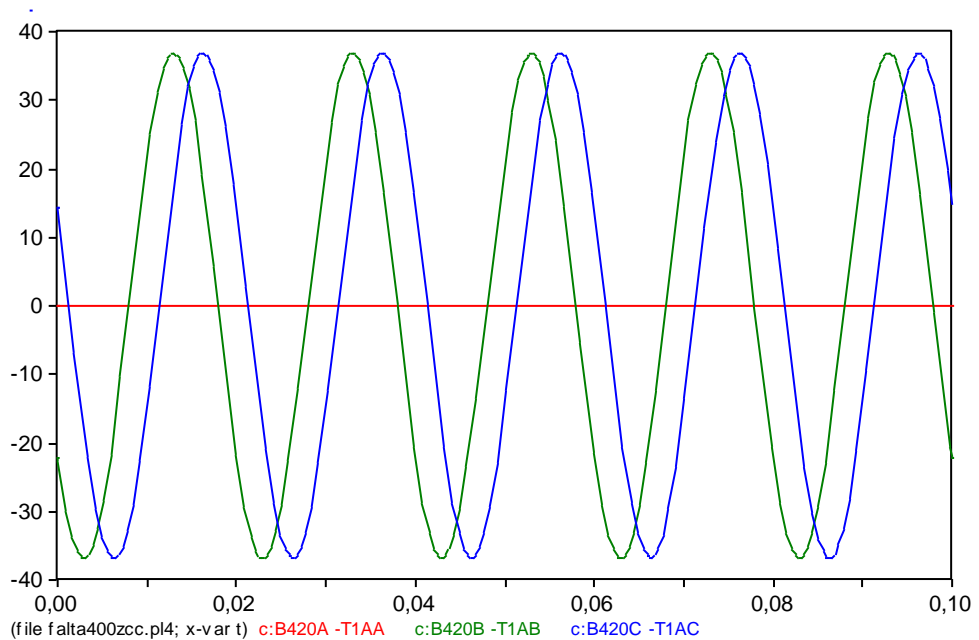


Figura 5-27: Corrientes de línea en el lado de 400 kV del transformador T-1.

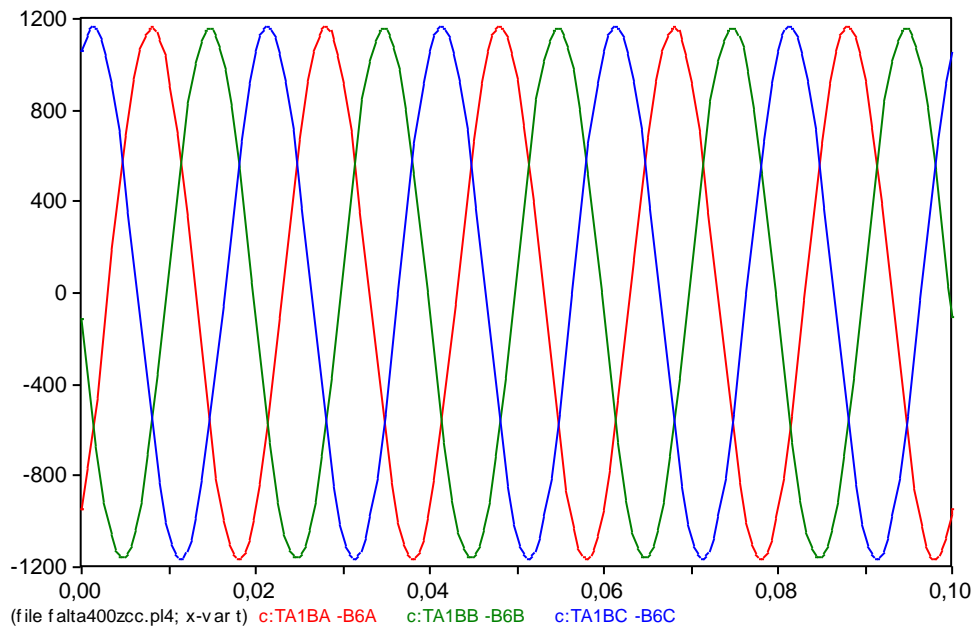


Figura 5-28: Corrientes de línea en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1.

La Tabla 5-3 compara los resultados (corrientes de líneas en los lados de 400 kV del transformador T-1 y de 6.9 kV del transformador TA-1) obtenidos por simulación y por cálculo analítico en el caso 1. Las diferencias son muy pequeñas. Ello confirma la validez de ambos modelos.

Las tensiones de fase no se comparan ya que el cálculo analítico informa de muy pequeñas variaciones de tensión.



Tabla 5-3: Comparación de resultados obtenidos por simulación y por cálculo analítico.

Corrientes línea en lado 400 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	0	37	94
Cálculo analítico	0	34	34

Corrientes línea en lado 6.9 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	1164	1161	1164
Cálculo analítico	1185	1187	1186

La Figura 5-29 y la Figura 5-30 muestran respectivamente las tensiones de secuencia (directa, inversa y homopolar) en el de 400 kV del transformador y en el lado 6.9 kV del transformador TA-1. La Figura 5-31 y la Figura 5-32 muestran respectivamente las corrientes de secuencia (directa, inversa y homopolar) en el lado de 400 kV del transformador T-1 y en el lado 6.9 kV del transformador TA-1. La magnitud cuya letras finales son A, B y C es respectivamente la componente de secuencia homopolar, directa e inversa. El transitorio de cálculo de las componentes de secuencia dura un ciclo (20 ms) de la frecuencia fundamental (50 Hz).

La simulación confirma las conclusiones alcanzadas en el cálculo analítico:

- La corriente en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1 no contiene componente de secuencia homopolar.
- Las componentes de secuencia inversa de la tensión y de la corriente en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1 son pequeñas comparadas con las componentes de secuencia directa: desequilibrios pequeños.



- La componente de secuencia homopolar de la corriente en el lado de 400 kV del transformador T-1 es próxima a la componente de secuencia directa.

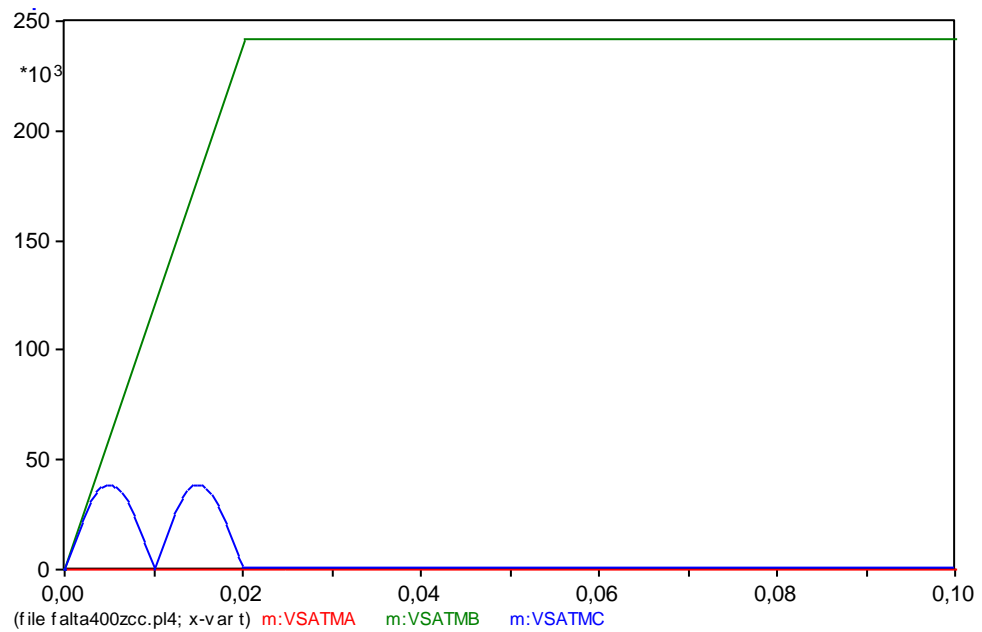


Figura 5-29: Tensiones de secuencia en el lado de 400 kV del transformador T-1.

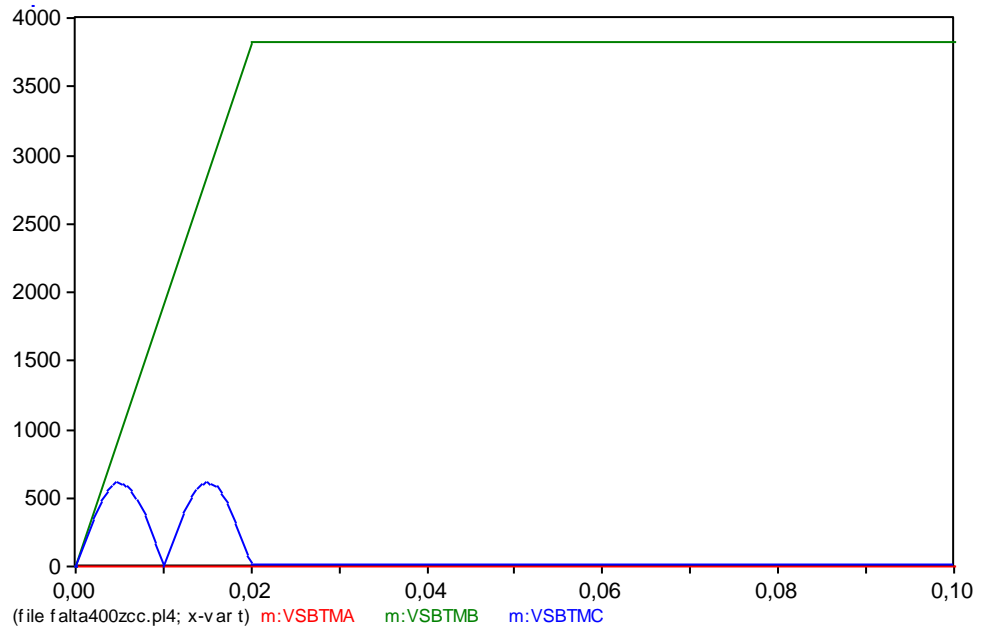


Figura 5-30: Tensiones de secuencia en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1.

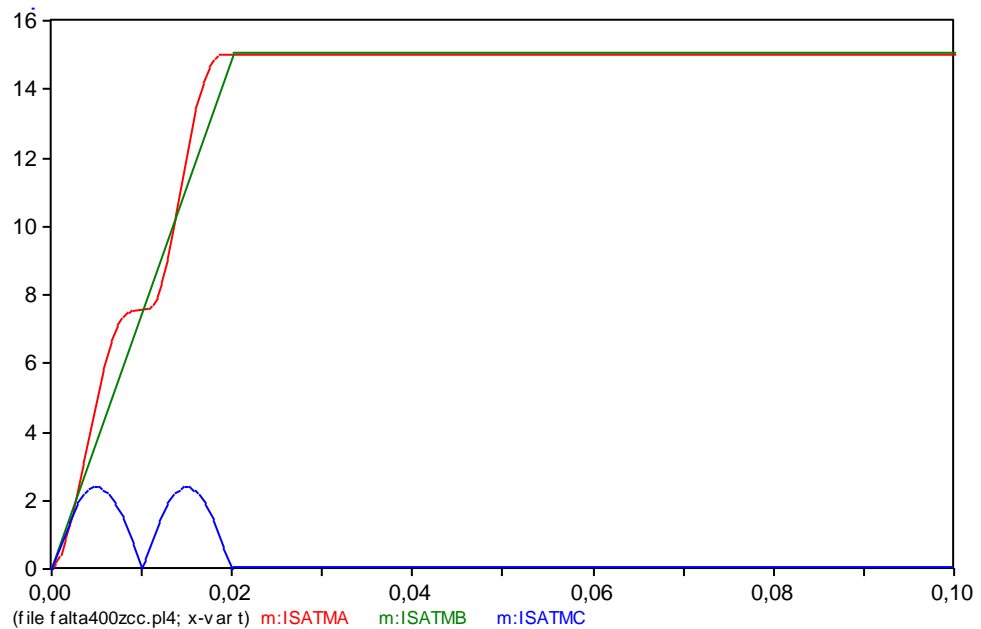


Figura 5-31: Corriente de secuencia en el lado de 400 kV del transformador T-1.

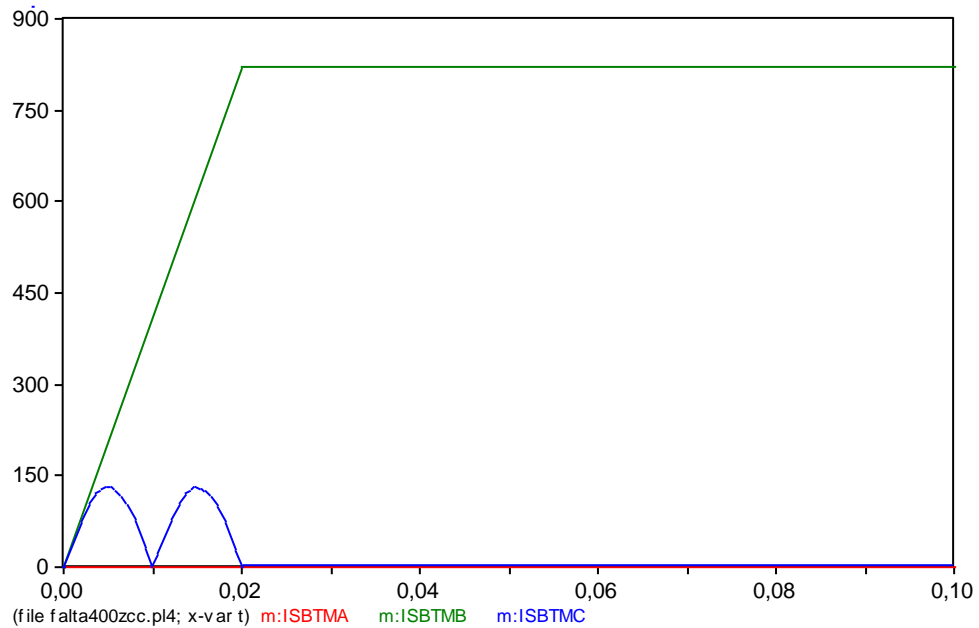


Figura 5-32: Corriente de secuencia en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1.

5.3.3 MODELO DE SIMULACIÓN DEL CASO 2

La Figura 5-33 muestra el modelo de simulación de la alimentación a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio. Incluye el modelo de la red y modelo dinámico del motor de 2500 HP funcionando en condiciones nominales. Se considera que la fase A en el lado de 400 kV del transformador T-1 abre 0.5 segundos después de comenzada la simulación. La aplicación de la perturbación se retrasa 0.5 segundos para asegurar que el sistema ha alcanzado el punto de equilibrio.

El modelo también incluye bloques que calculan las tensiones y corrientes de secuencia en los lados de 400 kV del transformador T-1 y de 6.9 kV del transformador TA-1.



Red de 420kV

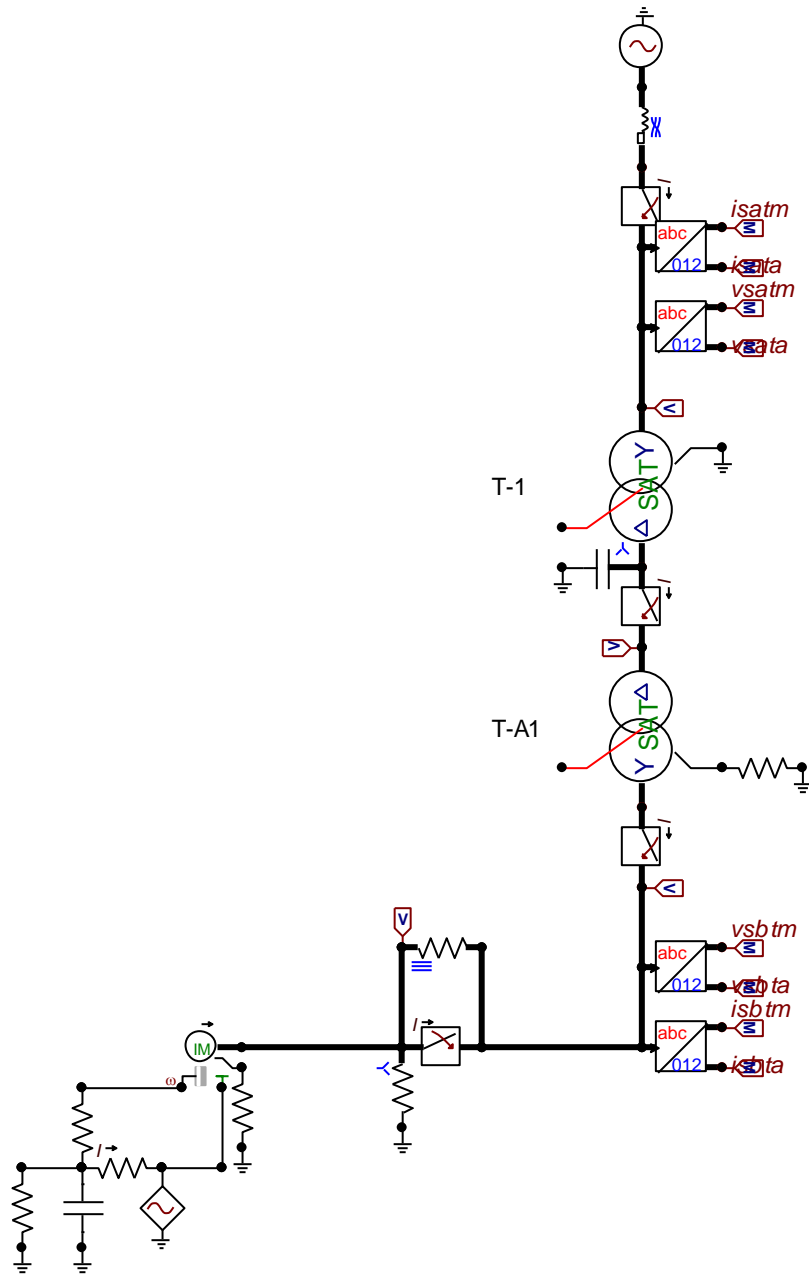




Figura 5-33: Modelo de simulación de la alimentación a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio: modelo dinámico del motor.

5.3.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL CASO 2

La Figura 5-12 y la Figura 5-13 muestran respectivamente la velocidad y el par electromagnético del motor. Debe notarse que se han adoptado las mismas escalas que en la Figura 5-12 y la Figura 5-13 para una comparación más justa del efecto de la apertura de la fase sobre el funcionamiento del motor.

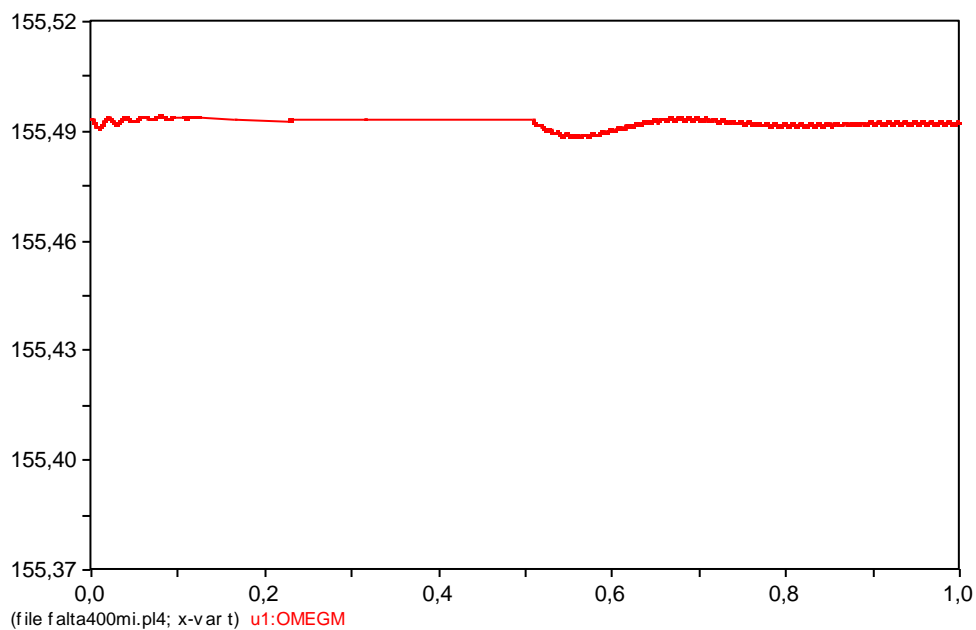


Figura 5-34: Velocidad del motor.

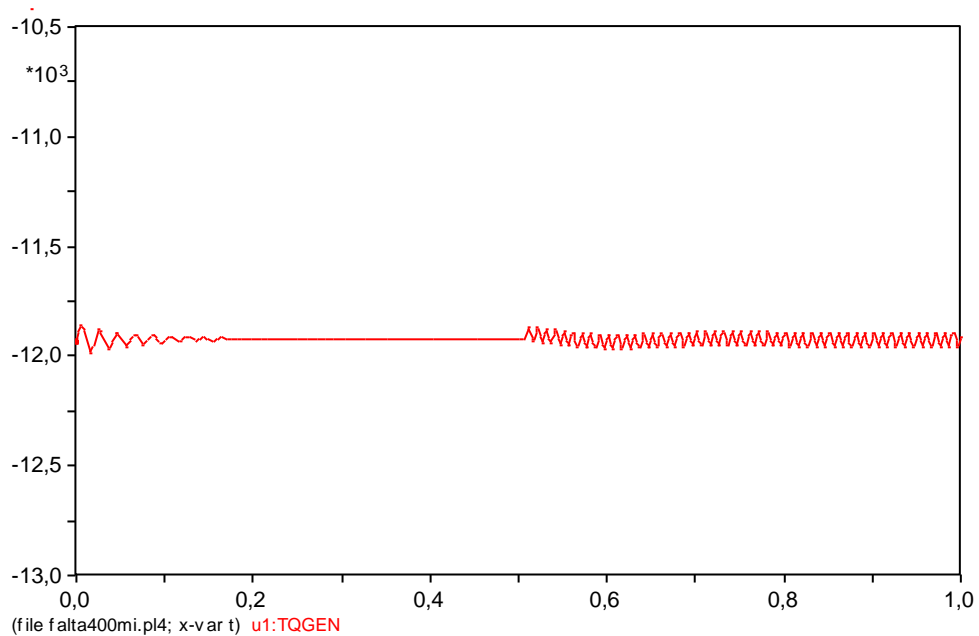


Figura 5-35: Par electromagnético del motor.

La Figura 5-36 y la Figura 5-37 muestran respectivamente las tensiones de fase en el lado de 400 kV del transformador T-1 y en el lado 6.9 kV del transformador TA-1. La Figura 5-38 y la Figura 5-39 muestran el módulo de las corrientes de línea en el lado de 400 kV del transformador T-1 y en el lado 6.9 kV del transformador TA-1.

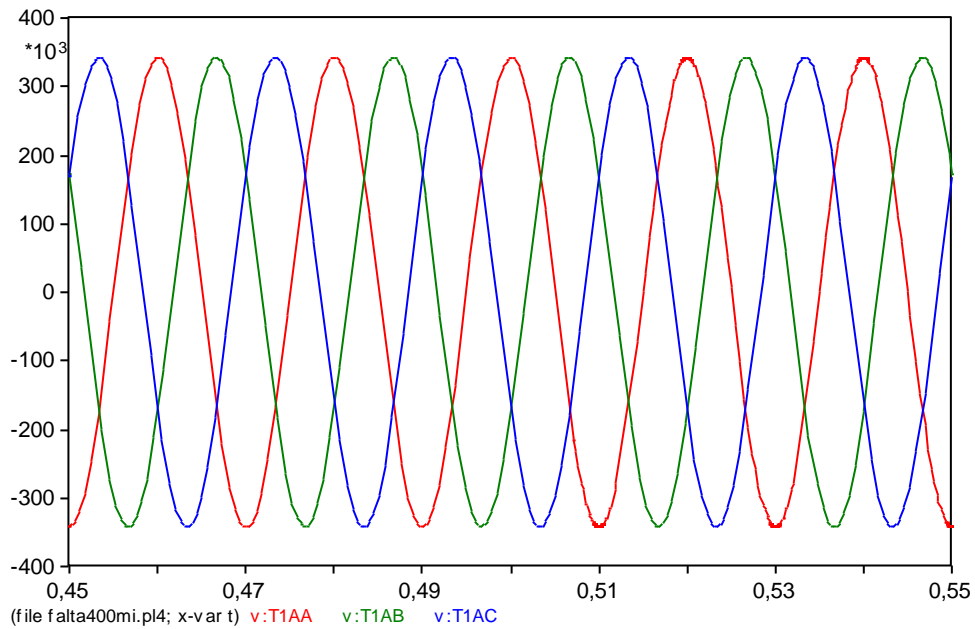


Figura 5-36: Tensiones de fase en el lado de 400 kV del transformador T-1.

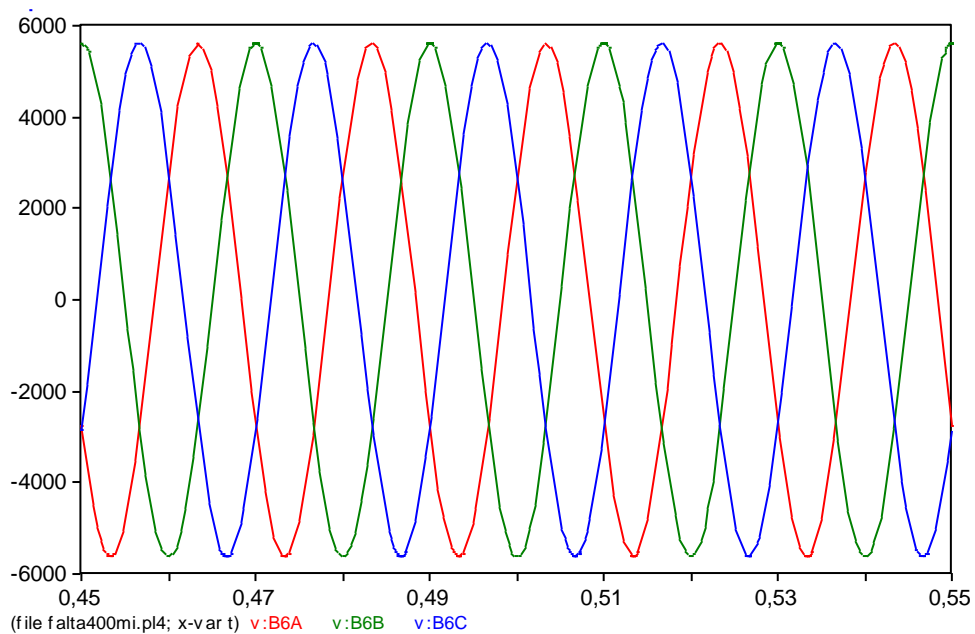


Figura 5-37: Tensiones de fase en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1.

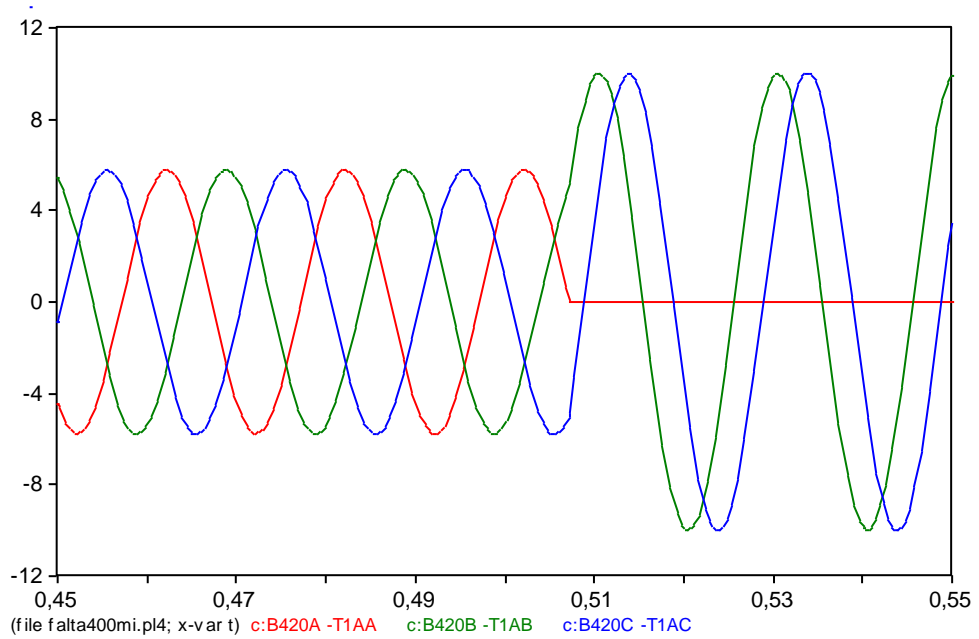


Figura 5-38: Corrientes de línea en el lado de 400 kV del transformador T-1.

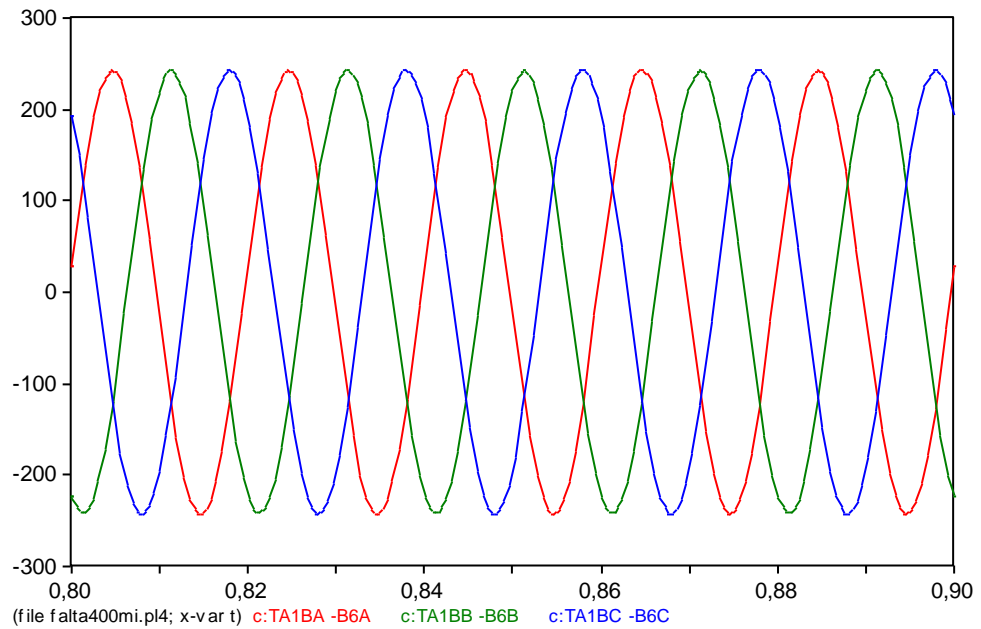


Figura 5-39: Corrientes de línea en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1.

La Tabla 5-4 compara los resultados (tensiones de fase y corrientes de líneas en los lados de 400 kV del transformador T-1 y de 6.9 kV del transformador TA-1) obtenidos por simulación y por cálculo analítico en el caso 2. Las diferencias son muy pequeñas. Ello confirma la validez de ambos modelos.

Las tensiones de fase no se comparan ya que el cálculo analítico informa de muy pequeñas variaciones de tensión.



Tabla 5-4: Comparación de resultados obtenidos por simulación y por cálculo analítico.

Corrientes línea en lado 400 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	0	10	10
Cálculo analítico	0	7	7

Corrientes línea en lado 6.9 kV (valor pico)			
	A	B	C
Simulación	243	243	242
Cálculo analítico	244	244	244

La Figura 5-40 y la Figura 5-41 muestran respectivamente las tensiones de secuencia (directa, inversa y homopolar) en el lado de 400 kV del transformador T-1 y en el lado 6.9 kV del transformador TA-1. La Figura 5-42 y la Figura 5-43 muestran respectivamente las corrientes de secuencia (directa, inversa y homopolar) de 400 kV del transformador T-1 y en el lado 6.9 kV del transformador TA-1. La magnitud cuya letras finales son A, B y C es respectivamente la componente de secuencia homopolar, directa e inversa. El transitorio de cálculo de las componentes de secuencia dura un ciclo (20 ms) de la frecuencia fundamental (50 Hz).

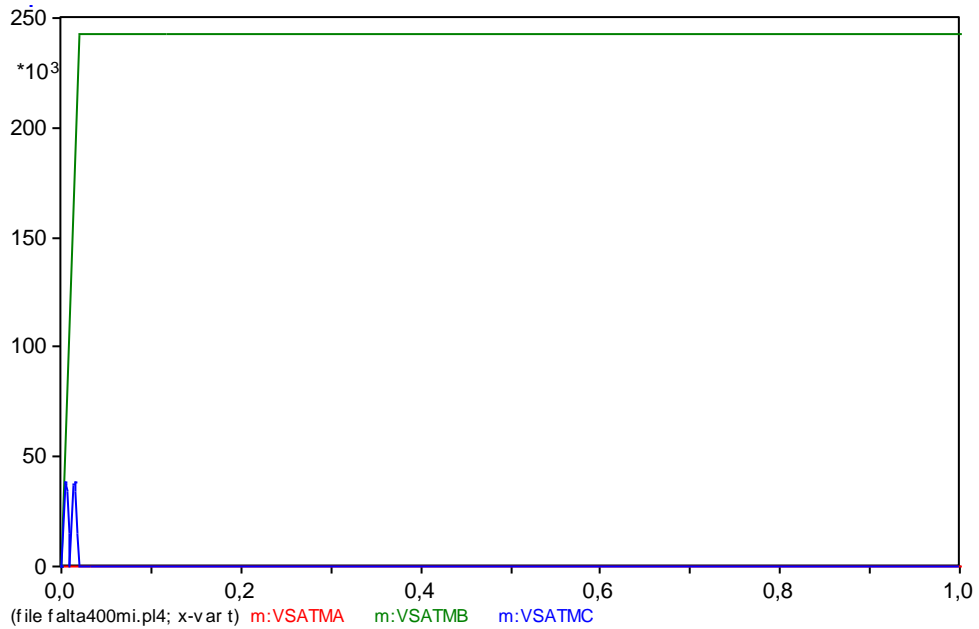


Figura 5-40: Tensiones de secuencia en el lado de 400 kV del transformador T-1.

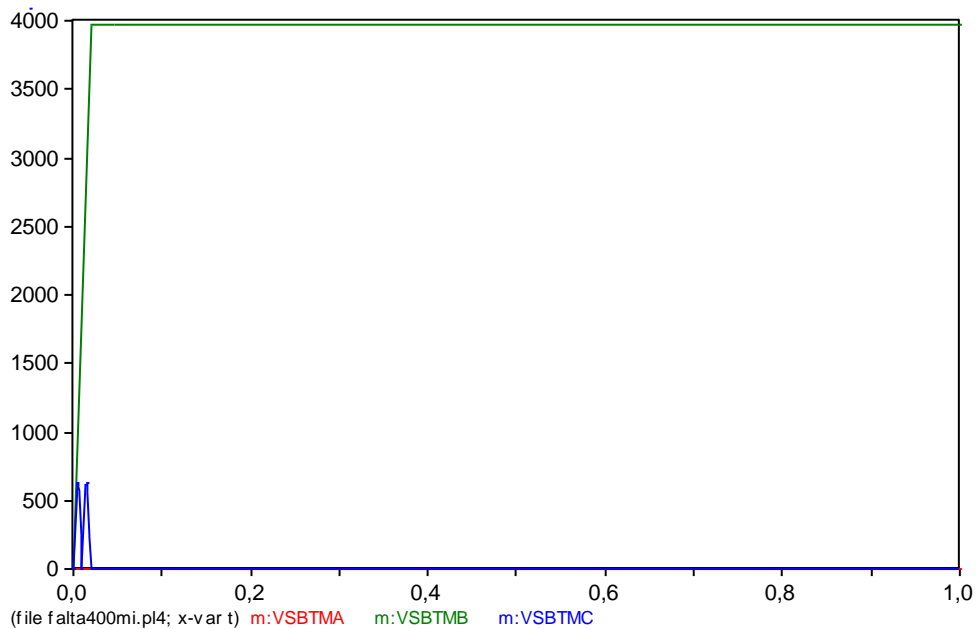


Figura 5-41: Tensiones de secuencia en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1.

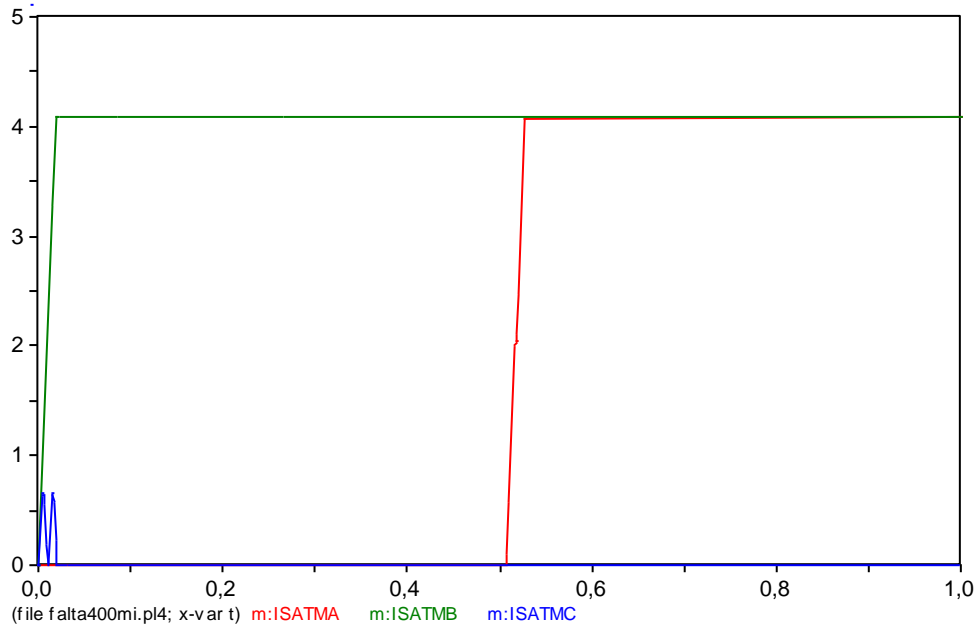


Figura 5-42: Corrientes de secuencia en el lado de 400 kV del transformador T-1.

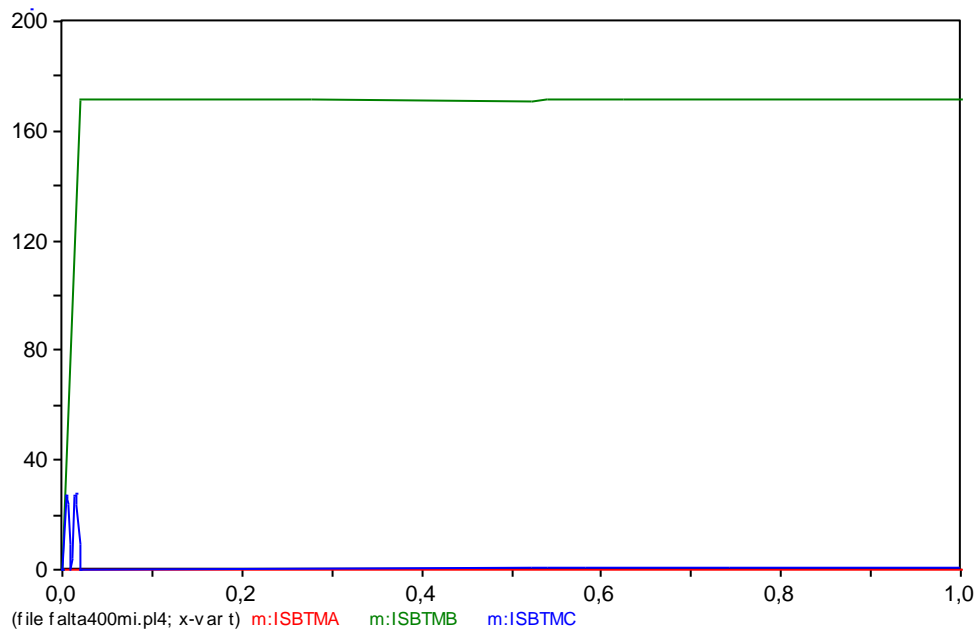




Figura 5-43: Corrientes de secuencia en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1.

La simulación confirma las conclusiones alcanzadas en el cálculo analítico:

- La corriente en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1 no contiene componente de secuencia homopolar.
- Las componentes de secuencia inversa de la tensión y de la corriente en el lado de 6.9 kV del transformador TA-1 son muy pequeñas comparadas con las componentes de secuencia directa: desequilibrios pequeños.
- La componente de secuencia homopolar de la corriente en el lado de 400 kV del transformador T-1 es prácticamente igual a la componente de secuencia directa.

5.4 CONCLUSIONES PARCIALES

De la simulación por medio del programa ATP de la ocurrencia de una falta serie en las alimentaciones a 138 kV y a 400 kV de la central nuclear caso de estudio, en las condiciones estudiadas, se puede concluir que en el análisis por medio de componentes simétricas ofrece resultados muy precisos y que las conclusiones extraídas con dicho método de estudio han quedado plenamente confirmadas.



Capítulo 6. CONCLUSIONES

Este proyecto ha abordado el estudio del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear con una configuración muy común. De forma más precisa, se ha determinado si los medios de detección de tensión en las barras de servicios auxiliares detectarían la apertura de una fase.

En la configuración estudiada, el generador está conectado a la red a 400 kV a través del transformador principal. La red a 400 kV es la red de transporte a la cual la central vierte su producción. Se considera que existe interruptor de generación, que permite aislar el generador del resto del sistema eléctrico de la central, permitiendo que, en caso de parada del grupo, el sistema eléctrico de la central quede alimentado desde la red a 400 kV a través del transformador principal y del transformador auxiliar. El sistema eléctrico de la central también puede estar alimentado de una red a 138 kV a través del transformador de arranque.

Este proyecto parte de un evento ocurrido en la central nuclear Byron (IL, USA). El proyecto ha considerado el análisis que hizo del evento de la central nuclear Byron la Comisión Regulatoria Nuclear (NRC) del gobierno de los Estados Unidos y el planteamiento metodológico propuesto por el Electric Power Research Institute (EPRI) también de Estados Unidos.

Para alcanzar objetivo planteado, el proyecto ha realizados dos estudios del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear:



7. Estudio fundamental: análisis de la pérdida de una fase en régimen permanente mediante el uso de componentes simétricas.
8. Estudio de simulación: simulación detallada de la pérdida de una fase utilizando la versión ATP del programa EMTP.

Del análisis por medio de componentes simétricas de la ocurrencia de una falta serie en las alimentaciones a 138 kV y a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio, en las condiciones estudiadas, se puede concluir:

- La corriente de falta sólo es distinta de cero (salvo la corriente de vacío de los transformadores) cuando las barras de servicios auxiliares tienen carga.
- La variaciones de tensión en barras de 6.9 kV no permiten determinar la ocurrencia de una fase abierta en ninguna de las alimentaciones.
- El desequilibrio medido como relación entre las intensidades de secuencia inversa y directa es apreciable (5.9%) cuando la fase abierta está en la alimentación a 138 kV y es inapreciable (0.13%) cuando está en la alimentación a 400 kV.
- La corriente homopolar en el lado de alta tensión de la alimentación (138 kV o 400 kV) es del orden de magnitud de la corriente de secuencia directa.

De la simulación por medio del programa ATP de la ocurrencia de una falta serie en las alimentaciones a 138 kV y a 400 kV de la central nuclear caso de estudio, en las condiciones estudiadas, se puede concluir que en el análisis por medio de componentes simétricas ofrece resultados muy precisos y que las conclusiones extraídas con dicho método de estudio han quedado plenamente confirmadas.



De las conclusiones extraídas se puede afirmar, que la falta de capacidad de detección de una fase abierta en la central nuclear Byron por protecciones de mínima tensión se produce también en la central del caso de estudio cuya configuración es muy típica.

También, las conclusiones extraídas indican que la detección de una fase abierta se podría abordar por detección de corriente homopolar en la corriente de línea 138 kV o 400 kV o por detección de desequilibrio de corriente de línea (relación de corriente de secuencia inversa entre corriente de secuencia directa) en 6.9 kV.



Capítulo 7. REFERENCIAS

- [1] World Association of Nuclear Operators, WANO, www.wano.info.

- [2] NRC BULLETIN 2012-01: DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM, disponible en <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1207/ML12074A115.pdf>.

- [3] P.M. Anderson, “Analysis of Faulted Power Systems”, IEEE Press Series on Power Engineering.

- [4] Alternative Transients Program (ATP), www.euug.org.

- [5] SUMMARY OF PUBLIC MEETING HELD ON JUNE 27, 2013 - BULLETIN 2012-01, “DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM.”, disponible en <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1319/ML13196A283.pdf>.

- [6] ML13066A620 - NRC Public Meeting with EPRI - Open-Phase Design Vulnerability February 28, 2013. (7 page(s), 2/28/2013), disponible en <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1306/ML13066A620.pdf>

- [7] ML13066A708 - Duke Open Phase Detection - Meter Relay Option -Public Meeting to Discuss NRC Bulletin 2012-01. (7 page(s), 2/28/2013), disponible en <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1306/ML13066A708.pdf>



- [8] ML13066A741 - Exelon Byron Single Phase Event NRC Presentation, 2/28/2013. (13 page(s), 2/28/2013), disponible en <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1306/ML13066A741.pdf>
- [9] ML13066A765 - NRC Bulletin 2012-1 - Design Vulnerability in Electric Power System EEEB - February 28-2013, NRC Slides. (13 page(s), 2/28/2013), disponible en, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1306/ML13066A765.pdf>
- [10] ML13072A160 - 2/28/2013 - Summary of Public Meeting on Bulletin 2012-01, "Design Vulnerability in Electric Power System". (6 page(s), 3/18/2013), disponible en <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1307/ML13072A160.pdf>
- [11] EPRI, "Analysis of Station Auxiliary Transformer Response to Open Phase Conditions", (EPRI report 1025772), disponible en <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=0000000001025772>
- [12] EPRI, "Development and Analysis of an Open-Phase Detection Scheme", (EPRI report 1026484) <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001026484>
- [13] Industry presentations on industry strategy, disponibles en <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1320/ML13203A270.pdf>,
-



<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1320/ML13203A271.pdf>

y

<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1319/ML13193A341.pdf>

- [14] O. I. Elgerd, “Electric Energy Systems Theory: An Introduction”, Second Edition, Mc Graw Hill, 1982.

- [15] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, “Power System Analysis”, Mc Graw Hill, 1994.

- [16] A. R. Bergen, V. Vittal, “Power System Analysis”, Second Edition, Prentice Hall, 2000.

- [17] A. Gómez Expósito, A. J. Conejo, C. Cañizares, “Electric Energy Systems: Analysis and Operation”, CRC Press, 2009.



Capítulo 8. APÉNDICE: MODELO DE MOTOR DE INDUCCIÓN

Este apéndice explica como dada la potencia nominal y la tensión nominal de un motor de inducción y supuestos los parámetros en magnitudes unitarias de su circuito equivalente en T (Figura 8-1) se determina la corriente nominal, deslizamiento nominal y par nominal.

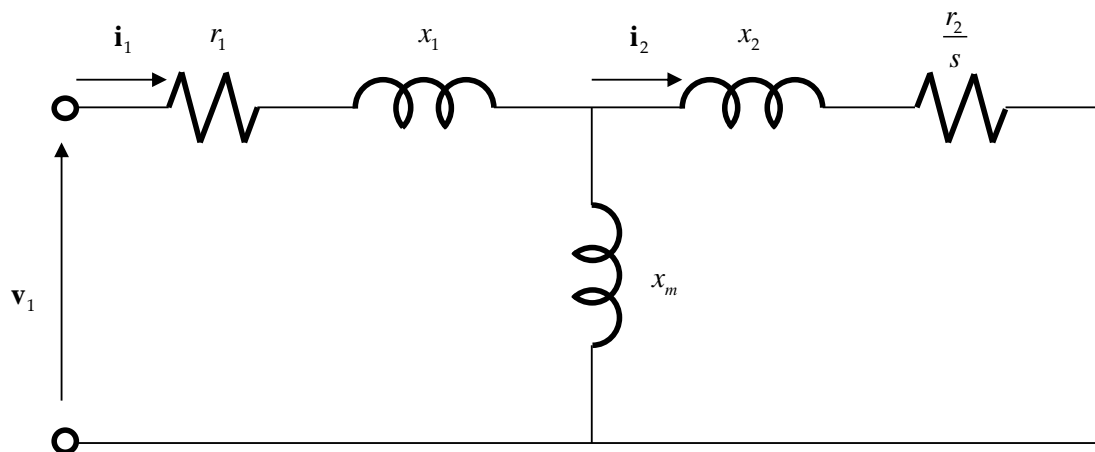


Figura 8-1: Circuito equivalente en T de un motor de inducción.

El deslizamiento nominal se calcula resolviendo la ecuación de la corriente nominal a tensión nominal:



$$i_1 = \frac{u_1}{r_1 + jx_1 + \frac{1}{\frac{1}{\frac{r_2}{s} + jx_2} + \frac{1}{jx_m}}} \Bigg|_{u_1=1} = 1$$

Una vez calculado el deslizamiento se calcula la potencia mecánica interna y el par como:

$$p_{mi} = r_2 \frac{(1-s)}{s} i_2^2$$

$$m_i = p_a = r_2 \frac{1}{s} i_2^2$$

donde:

$$i_1 = \frac{u_1}{r_1 + jx_1 + \frac{1}{\frac{1}{\frac{r_2}{s} + jx_2} + \frac{1}{jx_m}}}$$

$$i_2 = \frac{1}{\frac{\frac{r_2}{s} + jx_2}{1} + \frac{1}{jx_m}} i_1$$



La corriente nominal se calcula según:

$$p_{mi} = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n I_n}$$
$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n p_{mi}}$$

El par nominal se calcula de acuerdo con:

$$m_i = \frac{M_i}{\frac{\sqrt{3}U_n I_n}{\Omega_1}}$$
$$M_i = \frac{\sqrt{3}U_n I_n}{\Omega_1} m_i = \frac{\sqrt{3}U_n I_n}{2\pi f_1} m_i$$

En el caso del motor de 2500 HP a 6900 V

$$P_n = 2500HP = 1865kW$$

$$U_n = 6900V$$

suponiendo que los parámetros en magnitudes unitarias del circuito equivalente en

T son:

$$r_1 = r_2 = 0.01pu$$

$$x_1 = x_2 = 0.1pu$$

$$x_m = 5pu$$



Se obtiene:

$$s_n = 0.0101 = 1.01\%$$

$$\mathbf{i}_1 = (0.9267 - j0.3759) pu$$

$$\mathbf{i}_2 = (0.9444 - j0.1853) pu$$

$$p_{mi} = 0.9074 pu$$

$$I_n = 171.9780 A$$

$$m_i = 0.9167 pu$$

$$M_i = 11994 Nm$$

Las impedancias en magnitudes unitarias del motor a las secuencias directa e inversa se calculan como:

$$\mathbf{z}_{m1} = r_1 + jx_1 \frac{1}{\frac{1}{\frac{r_2}{s} + jx_2} + \frac{1}{jx_m}}$$

$$\mathbf{z}_{m2} = r_1 + jx_1 \frac{1}{\frac{1}{\frac{r_2}{2-s} + jx_2} + \frac{1}{jx_m}}$$

Obteniéndose:



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO ELECTROMECÁNICO

$$\mathbf{z}_{m1} = (0.9267 + j0.3759) pu$$

$$\mathbf{z}_{m2} = (0.0148 + j0.1980) pu$$