



Proyecto fin de grado

# **Detección de apertura de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear**

Alumno: Víctor Castro García

Director: Luis Rouco Rodríguez

Madrid

Julio 2015

## **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. Víctor Castro García, 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 PROYECTO FIN DE GRADO DETECCIÓN DE APERTURA 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) Reproducirla 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.

#### **5º. 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.

#### **6º. 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 20 de julio de 2015

**ACEPTA**

# Contenidos

1	Introducción.....	1
1.1	El tema del proyecto .....	1
1.2	Objetivos del proyecto.....	2
1.3	Organización del documento .....	2
2	Los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear.....	4
3	Detección de faltas serie en la alimentación de arranque de una central nuclear.....	6
3.1	Alimentación de arranque de una central nuclear .....	6
3.2	Análisis por componentes simétricas de una falta serie en la alimentación de arranque .....	6
3.2.1	Planteamiento .....	7
3.2.2	Datos.....	10
3.2.3	Resultados.....	11
3.3	Simulación con el programa ATP de una falta serie en la alimentación de arranque .....	12
3.3.1	Modelo de simulación del caso 1 .....	13
3.3.2	Resultados de simulación del caso 1 .....	15
3.3.3	Modelo de simulación del caso 2 .....	17
3.3.4	Resultados de simulación del caso 2 .....	19
3.4	Conclusiones parciales .....	22
4	Detección de faltas serie en la alimentación principal de una central nuclear .....	24
4.1	Alimentación principal de una central nuclear .....	24
4.2	Análisis por componentes simétricas de una falta serie en la alimentación de arranque .....	24
4.2.1	Planteamiento .....	25
4.2.2	Datos.....	27
4.2.3	Resultados.....	27
4.3	Simulación con el programa ATP .....	29
4.3.1	Modelo de simulación del caso 1 .....	29
4.3.2	Resultados de simulación del caso 1 .....	33
4.3.3	Modelo de simulación del caso 2 .....	35
4.3.4	Resultados de simulación del caso 2 .....	36
4.4	Conclusiones parciales .....	40
5	Conclusiones.....	41
6	Apéndice A: Análisis de faltas series .....	42
6.1	Método de componentes simétricas.....	42
6.2	Representación de transformadores y del equivalente Thévenin de la red a las secuencias directa, inversa y homopolar .....	45
6.2.1	Representación de transformadores.....	45
6.2.2	Representación del equivalente Thèvenin de la red .....	48
6.3	Circuitos equivalentes de secuencia .....	49
6.4	Faltas desequilibradas serie .....	50
6.4.1	Formulación general .....	50
6.4.2	Apertura de una fase .....	52
7	Apéndice B: El programa ATP.....	54
8	Apéndice C: Medidas en laboratorio .....	56
8.1	Medidas en un transformador trifásico YNd .....	56

8.2	Medidas en un banco trifásico YNd conectado a un transformador trifásico YNd	60
9	Referencias .....	65

# Resumen

Este proyecto ha abordado la detección de apertura 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 132 kV a través del transformador de arranque.

El EPRI ha propuesto un método de detección basado en la aplicación de una tensión en el neutro del transformador y en el análisis armónico de la corriente de neutro en condiciones normales y en condiciones de falta. En condiciones normales, la corriente de neutro contiene 3º armónico y no contiene 5º armónico. Por el contrario, en condiciones de fase abierta, la corriente de neutro no contiene 3º armónico y contiene 5º armónico.

El objetivo de este proyecto fin de grado es la concepción de un sistema de detección de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear, con una configuración muy común, a partir del sistema concebido por el EPRI. En lugar de aplicar una tensión en el neutro, este proyecto plantea simplemente analizar el contenido en armónicos de la corriente de neutro.

Se considera que en la citada configuración hay dos sistemas de alimentación exterior. Cuando se utiliza uno de ellos, el otro se encuentra en vacío.

Se ha abordado el problema utilizando:

1. Análisis por componentes simétricas de la pérdida de una fase.
2. Simulación detallada de la pérdida de una fase utilizando el programa ATP.

El análisis por componentes simétricas ha mostrado que la corriente de neutro en caso de falta serie es 3 veces la corriente de vacío del transformador.

La simulación por el programa ATP ha confirmado que en condiciones normales, la corriente de neutro contiene 3º armónico y no contiene 5º armónico. Por el contrario, en condiciones de fase abierta, la corriente de neutro no contiene 3º armónico y contiene 5º armónico.

Se ha comprobado que el esquema es aplicable a los dos sistemas de alimentación exterior de la central nuclear de configuración típica considerada.

# Abstract

This final degree project has addressed the development of a system to detect 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 a 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 132 kV network through the start-up transformer.

EPRI has suggested a method based on injecting a voltage at the neutral of the transformer and analyzing the harmonic content of the neutral current. In normal conditions, the neutral current contains 3<sup>rd</sup> harmonic component and does not contain 5<sup>th</sup> harmonic component. In fault conditions (open phase fault), the neutral current does not contain 3<sup>rd</sup> harmonic component and contains 5<sup>th</sup> harmonic component.

The aim of the final year project is to conceive a system to detect a one open phase fault in the electrical supply systems of a nuclear power plant which power system exhibits a common configuration based on the EPRI idea. Instead on injecting a neutral voltage, this final year project proposed to analyze merely the harmonic content of the neutral current.

We have considered a nuclear power plant which power system exhibits a common configuration supplied by two external power systems. Moreover, one system is under no load when the other is loaded.

In order to reach the project goals, the project has undertaken two studies:

1. A fundamental study: analysis of the open-phase fault in the steady state by symmetrical components.
2. A simulation study: detailed simulation of the open-phase fault using the ATP program.

The symmetrical components analysis of an open-phase fault in the external power system has revealed that the neutral current in case of open phase faults is 3 times the transformer no load current.

ATP simulation has confirmed that in normal conditions, the neutral current contains 3<sup>rd</sup> harmonic component and does not contain 5<sup>th</sup> harmonic component whereas in fault conditions (open phase fault), the neutral current does not contain 3<sup>rd</sup> harmonic component and contains 5<sup>th</sup> harmonic component.

The project has also proved that the proposed approach is applicable to both power supply systems of nuclear power plant under consideration.

# 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.

Además el autor quiere agradecer la ayuda que le han dado sus seres queridos no solo durante la realización de este proyecto, sino durante estos cuatro años de Grado. Sin su ayuda no habría llegado hasta aquí.

Muchas gracias a Isa por estar siempre ahí, en las buenas y en las malas, para todo lo que necesitara, a mi familia, sin la cual no sería quien soy y que aunque les haya dado muchos sustos han seguido apoyándome. También quiero dar las gracias a todos mis amigos y compañeros, que han hecho este tiempo mucho más llevadero.

Por último quiero dar las gracias a mi director de proyecto, Luis Rouco, que me ha ayudado muchísimo y ha permitido que este proyecto saliera adelante.

Muchísimas gracias a todos





## 1 Introducción

### 1.1 El tema del proyecto

El día 30 de enero de 2012 se produjo un incidente en unidad 2 de la central nuclear Byron (Illinois, Estados Unidos de América) que condujo a que una fase del sistema de alimentación exterior quedara abierta y que sólo fuera detectada, tras sucesivos disparos de grandes motores, de forma accidental por los operadores de la central al hacer comprobaciones de las tensiones compuestas en las barras de los servicios auxiliares. El incidente está detallado en un documento público de la Comisión Regulatoria Nuclear (Nuclear Regulatory Commission) de los Estados Unidos de América [1].

Los operadores de las centrales nucleares de todo el mundo no sólo han tenido noticia de dicho incidente a través de la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (World Association of Nuclear Operators, WANO) [2], sino que deben evaluar si un evento similar sería detectado por los sistemas de protección eléctrica de sus centrales nucleares.

En Estados Unidos, las compañías propietarias de centrales nucleares han desarrollado numerosos estudios para comprobar si los sistemas de protección existentes detectarían la falta serie en los sistemas de alimentación ([3]-[7]).

El Electric Power Research Institute (EPRI) ha abordado el problema en dos estudios aplicados a la central nuclear Byron. El primero [9] es un estudio fundamental (análisis de la pérdida de una fase en régimen permanente mediante el uso de componentes simétricas) y el segundo [10] es un estudio de simulación (simulación detallada de la pérdida de una fase utilizando el programa EMTP).

En España, el proyecto fin de grado [11] ha abordado el estudio del caso de una central nuclear española con una configuración típica utilizando la aproximación seguida por el EPRI: estudio por componentes simétricas y simulación con la versión ATP del programa EMTP (en adelante simplemente programa ATP). Los resultados del trabajo fin de grado han sido también publicados en [12] y [13].

El proyecto fin de grado [11] encontró que las protecciones de mínima tensión de las barras de servicios auxiliares no detectarían la ocurrencia de una falta serie en la alimentación exterior. También encontró que la detección de una fase abierta se podría abordar por detección de desequilibrio de corriente de línea (relación de corriente de secuencia inversa entre corriente de secuencia directa) en la alimentación de las barras de servicios auxiliares en caso de estar éstas conectadas a la alimentación en la que se produce la falta serie.

Por otra parte, compañías norteamericanas como Duke Energy [14] y Exelon Generation [15] han realizado estudios sobre métodos de detección de falta serie.

También el EPRI ha propuesto un método de detección ([16], [17]) basado en la aplicación de una tensión en el neutro del transformador y en el análisis armónico de la



corriente de neutro en condiciones normales y en condiciones de falta. En condiciones normales, la corriente de neutro contiene 3º armónico y no contiene 5º armónico. Por el contrario, en condiciones de fase abierta, la corriente de neutro no contiene 3º armónico y contiene 5º armónico.

## 1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto fin de grado es la concepción de un sistema de detección de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear, con una configuración muy común, a partir del sistema concebido por el EPRI. En lugar de aplicar una tensión en el neutro, este proyecto plantea simplemente analizar el contenido en armónicos de la corriente de neutro.

Se considera que en la citada configuración hay dos sistemas de alimentación exterior. Cuando se utiliza uno de ellos, el otro se encuentra en vacío.

Por tanto, el requisito que se impone al sistema a desarrollar es que sea capaz de detectar la falta serie en las alimentaciones exteriores estando los transformadores, que conectan las redes exteriores a las barras de servicios auxiliares, en vacío

Al igual que hizo el proyecto fin de grado [11], se utilizarán:

1. Análisis por componentes simétricas de la pérdida de una fase [18].
2. Simulación detallada de la pérdida de una fase utilizando el programa ATP [19].

## 1.3 Organización del documento

Esta memoria contiene 9 capítulos, de los cuales 3 son apéndices.

El capítulo 2 detalla la configuración del sistema eléctrico de la central objeto de estudio.

El capítulo 3 contiene el estudio de viabilidad de detección de faltas serie en la alimentación de arranque de una central nuclear.

El capítulo 4 contiene el estudio de viabilidad de detección de faltas serie en la alimentación principal de una central nuclear.

El capítulo 5 presenta las conclusiones del proyecto.

El capítulo 6 es un apéndice que revisa el análisis de faltas serie en redes eléctricas.

El capítulo 7 es un apéndice que revisa el programa el programa ATP.

El capítulo 8 es un apéndice que contiene resultados de ensayos de laboratorio.



El capítulo 9 contiene las referencias bibliográficas.

## 2 Los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear

De acuerdo con la norma IEEE 765-2006 los servicios auxiliares de una central nuclear [20] deben estar alimentados por dos líneas o fuentes independientes. En la central nuclear del caso de estudio, los sistemas de alimentación exterior son:

- Alimentación principal: la red nacional de transporte a 400 kV a la cual vierte su producción la central nuclear
- Alimentación de arranque: una red de subtransporte regional a 132 kV 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.

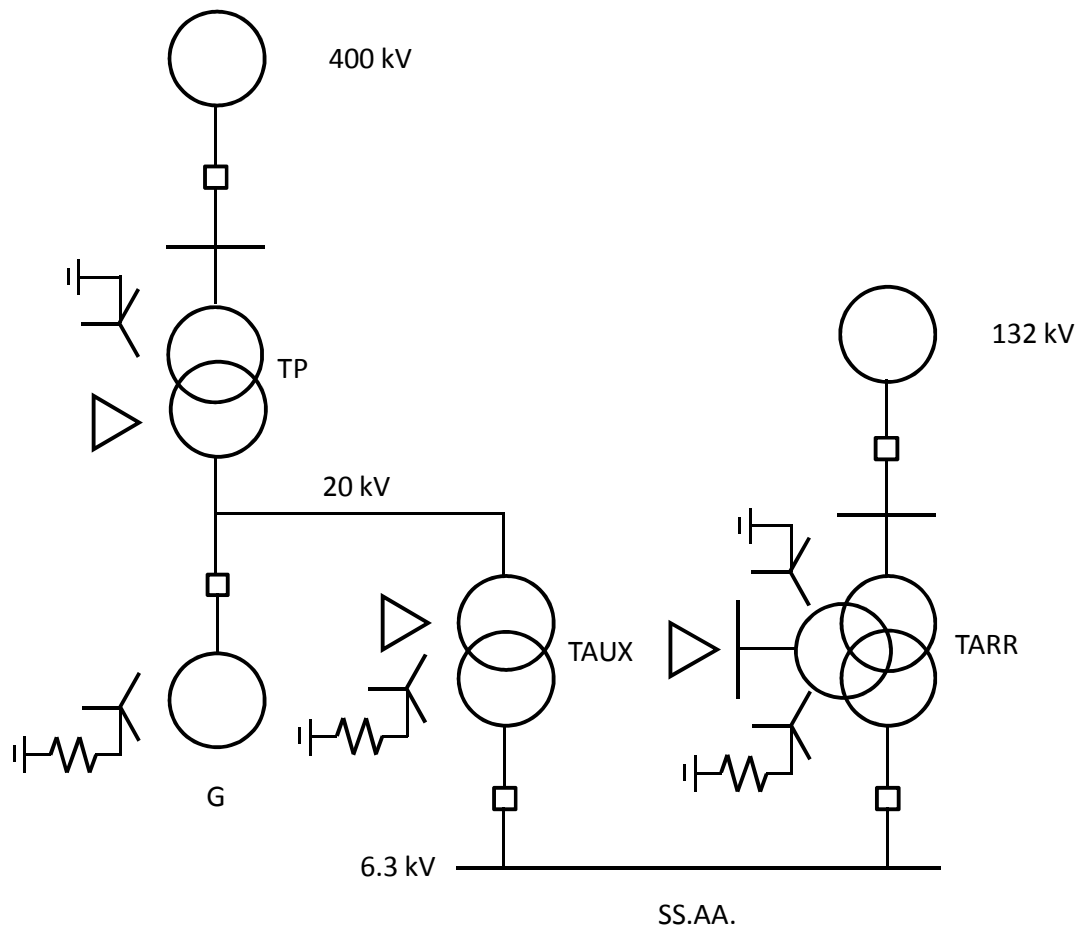


Figura 2-1: Esquema unifilar de los sistemas de alimentación exterior de la central nuclear del caso de estudio.

El generador G está conectado a la red a 400 kV a través del transformador principal TP. 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 G 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 TP y del transformador auxiliar TAUX.

El sistema eléctrico de la central también puede estar alimentado de una red a 132 kV a través del transformador de arranque TARR.

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.



### 3 Detección de faltas serie en la alimentación de arranque de una central nuclear

Este capítulo investiga la detección de una falta serie en la alimentación de arranque de la central nuclear del caso de estudio estando el transformador de arranque TARR en vacío por análisis de la corriente de neutro.

Se determina, primero, la corriente de neutro por medio de componentes simétricas. Después se valida el cálculo obtenido por componentes simétricas por medio de simulación con el programa ATP. También se investigará con el programa ATP el contenido en armónicos de la corriente de neutro en condiciones normales y en condiciones de falta serie.

#### 3.1 Alimentación de arranque de una central nuclear

La Figura 3-1 muestra la alimentación a las barras de 6.3 kV desde la red a 132 kV a través del transformador de arranque TARR 138 kV/6.9 kV. El transformador de arranque TARR 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 del transformador de arranque TARR está conectado a tierra a través de una resistencia de 4.76  $\Omega$ .

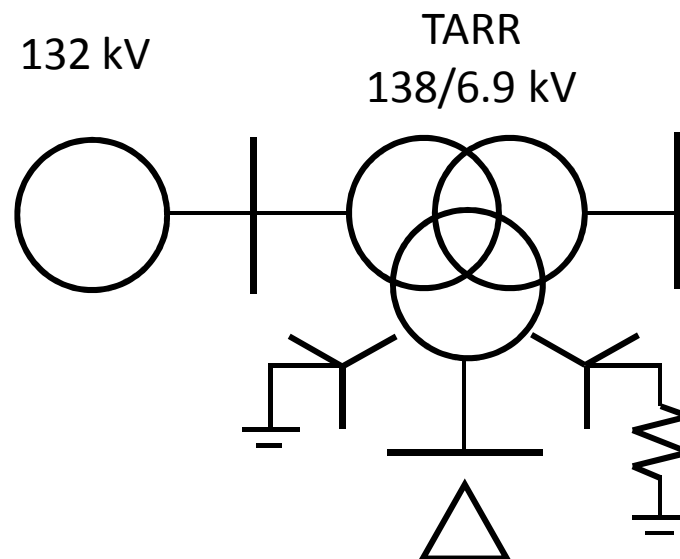


Figura 3-1: Esquema unifilar de la alimentación desde la red a 132 kV.

#### 3.2 Análisis por componentes simétricas de una falta serie en la alimentación de arranque

Esta sección determina la corriente de neutro del transformador principal TARR en caso de falta serie en la alimentación a 132 kV por medio de componentes simétricas.



### 3.2.1 Planteamiento

La Figura 3-2 muestra los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar en magnitudes reales vistos desde barras de 6.3 kV. Se señala el punto en falta. La Figura 3-3 muestra la conexión de los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar en caso de una falta serie en la alimentación a 132 kV.

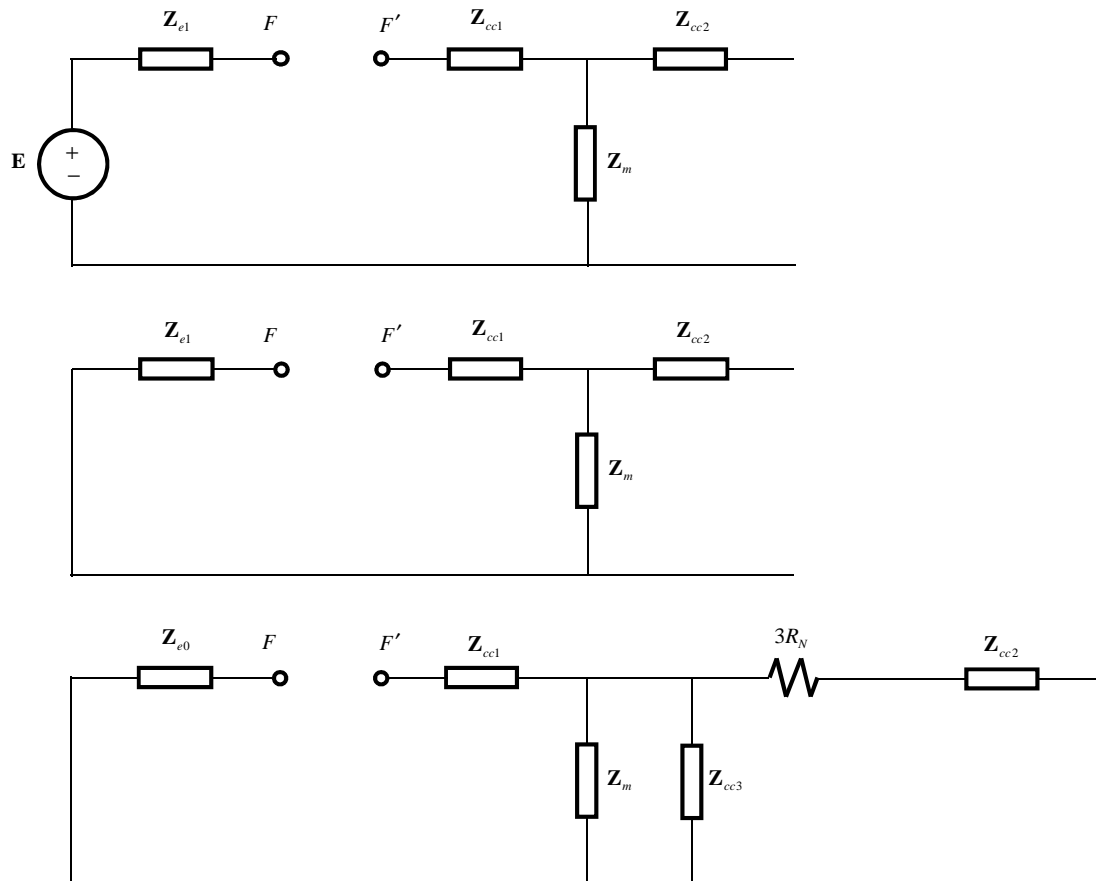


Figura 3-2: Circuitos equivalentes a las secuencias directa, inversa y homopolar.



de arranque de una central nuclear

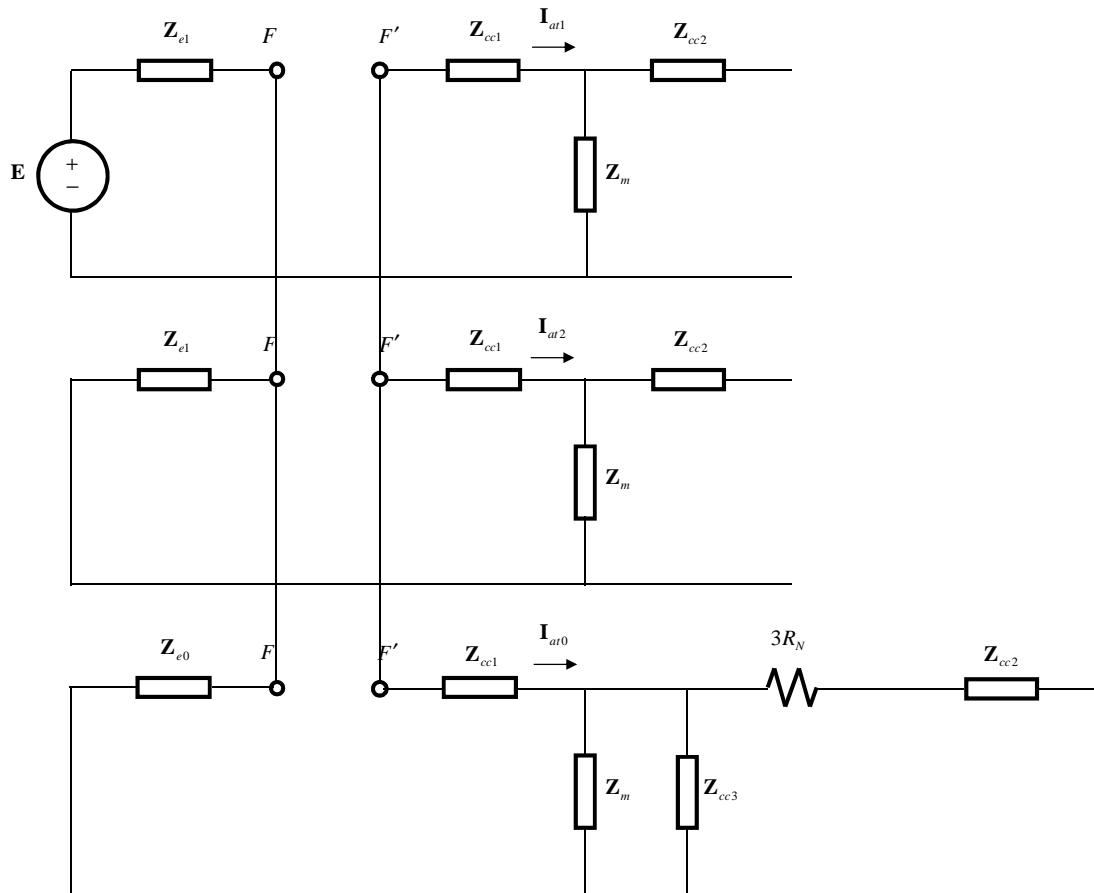


Figura 3-3: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta serie en la red a 132 kV.

Las corrientes de secuencia en el lado de 138 kV del transformador son:

$$\mathbf{I}_{at1} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1 + \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}}}$$

$$\mathbf{I}_{at2} = -\frac{\frac{1}{\mathbf{Z}_2}}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}} \mathbf{I}_{at1}$$

$$\mathbf{I}_{at0} = -\frac{\frac{1}{\mathbf{Z}_0}}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}} \mathbf{I}_{at1}$$

Siendo





$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_1 &= \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_m \\ \mathbf{Z}_2 &= \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{cc1} + \mathbf{Z}_m \\ \mathbf{Z}_0 &= \mathbf{Z}_{e0} + \mathbf{Z}_{cc1} + \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_{cc3}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_m}} \end{aligned}$$

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 impedancia de magnetización se obtiene a partir del ensayo de vacío como:



$$p_0 = \frac{P_0}{S_B}$$

$$i_{Fe} = \frac{u_0}{P_0}$$

$$r_{Fe} = \frac{u_0}{i_{Fe}} = \frac{u_0^2}{P_0}$$

$$x_{\sim} = \frac{u_0}{i_{\sim}} = \frac{u_0}{\sqrt{i_0^2 - i_{Fe}^2}}$$

$$\mathbf{Z}_m = \mathbf{z}_m \frac{U_{n2}^2}{S_B} = \left( \begin{array}{c} 1 \\ \frac{1}{r_{Fe}} + \frac{1}{jx_{\sim}} \end{array} \right) \frac{U_{n2}^2}{S_B}$$

### 3.2.2 Datos

Los datos del transformador son:

$$S_{B12} = 33MVA \quad z_{cc12} = 0.13 pu \quad r_{cc12} = 0.445\%$$

$$S_{B13} = 11.03MVA \quad z_{cc13} = 0.06 pu \quad r_{cc13} = z_{cc13} \frac{r_{cc12}}{z_{cc12}}$$

$$S_{B23} = 11.03MVA \quad z_{cc23} = 0.0195 pu \quad r_{cc23} = z_{cc23} \frac{r_{cc12}}{z_{cc12}}$$

$$S_B = 44MVA \quad i_0 = 0.53\% \quad P_0 = 39kW$$

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 de la red a 132 kV son:

$$S_{cc3w} = 1000MVA$$

$$S_{cc1w} = 1000MVA$$



### 3.2.3 Resultados

Las impedancias de secuencia directa y homopolar del equivalente Thèvenin de la red vistas desde barras de 6.3 kV se determinan como:

$$\mathbf{Z}_{e1} = \mathbf{Z}_{e0} = j \frac{6.9^2}{1000} = j 0.0476 \Omega$$

Las impedancias de cortocircuito del transformador de tres arrollamientos vistas desde barras de 6.3 kV son:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{cc12} &= \left( \frac{0.445}{100} + j \sqrt{0.13^2 - \left( \frac{0.445}{100} \right)^2} \right) \frac{6.9^2}{33} \\ &= (0.0064 + j0.1874) \Omega \\ \mathbf{Z}_{cc13} &= \left( \frac{0.06}{0.13} \frac{0.445}{100} + j \sqrt{0.06^2 - \left( \frac{0.06}{0.13} \frac{0.445}{100} \right)^2} \right) \frac{6.9^2}{11.03} \\ &= (0.0089 + j0.2588) \Omega \\ \mathbf{Z}_{cc23} &= \left( \frac{0.0195}{0.13} \frac{0.445}{100} + j \sqrt{0.0195^2 - \left( \frac{0.0195}{0.13} \frac{0.445}{100} \right)^2} \right) \frac{6.9^2}{11.03} \\ &= (0.0029 + j0.0841) \Omega \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{cc1} &= (R_{cc1} + jX_{cc1}) = (0.0062 + j0.1811) \Omega \\ \mathbf{Z}_{cc2} &= (R_{cc2} + jX_{cc2}) = (0.0002 + j0.0064) \Omega \\ \mathbf{Z}_{cc3} &= (R_{cc3} + jX_{cc3}) = (0.0027 + j0.0778) \Omega \end{aligned}$$

La impedancia de magnetización del transformador de tres arrollamientos vista desde barras de 6.3 kV son:

$$\mathbf{Z}_m = \left( \frac{1}{\frac{1}{r_{Fe}} + \frac{1}{jx_m}} \right) \frac{U_{n2}^2}{S_B} = \left( \frac{1}{\frac{1}{1128.2} + \frac{1}{j191.3745}} \right) \frac{6.9^2}{44} = (34.143 + j201.28) \Omega$$

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 lado de 138 kV del transformador TARR son:

$$\mathbf{I}_{at1} = (-3.2391 + j19.1616) A = 19.4334 A \angle 99.5946^\circ$$

$$\mathbf{I}_{at2} = (3.2479 - j19.1894) A = 19.4623 A \angle -80.3936^\circ$$

$$\mathbf{I}_{at0} = (-0.0088 + j0.0278) A = 0.0291 A \angle 107.5551^\circ$$

La corriente de neutro es tres veces la corriente de secuencia homopolar. La corriente de neutro en lado de alta tensión (138 kV) del transformador TARR es:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_N &= 3\mathbf{I}'_{at0} = 3\mathbf{I}_{at0} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = (-0.4859 + j2.8742) A \\ &= 2.9150 A \angle 99.5946^\circ = \frac{4.1224}{\sqrt{2}} A \angle 99.5946^\circ \end{aligned}$$

Debe notarse que la corriente de neutro en caso de falta serie es 3 veces la corriente de vacío del transformador:

$$\frac{I_N}{I_{01}} = \frac{I_N}{i_0 \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{n1}}} = \frac{2.9150}{0.0053 \frac{44000}{\sqrt{3} \cdot 138}} = \frac{2.9150}{0.9756} = 2.9879$$

### 3.3 Simulación con el programa ATP de una falta serie en la alimentación de arranque

Esta sección valida el cálculo obtenido por componentes simétricas por medio de simulación con el programa ATP. También se investigará con el contenido en armónicos de la corriente de neutro en condiciones normales y en condiciones de falta serie.

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

- Caso 1: se considerará que la curva de magnetización del transformador está descrita por dos puntos correspondientes a los ensayos de vacío a 100% y 110% de tensión nominal.
- Caso 2: se considerará que la curva de magnetización del transformador está descrita por siete puntos obtenidos de la interpolación de la curva obtenida de los ensayos de vacío a 100% y 110% de tensión nominal.

### 3.3.1 Modelo de simulación del caso 1

Las características del transformador TARR son:

$$33/40 \text{ MVA}, 138 \text{ kV} / 6.9 \text{ kV} / 0.4, \text{YNyn0d11}$$

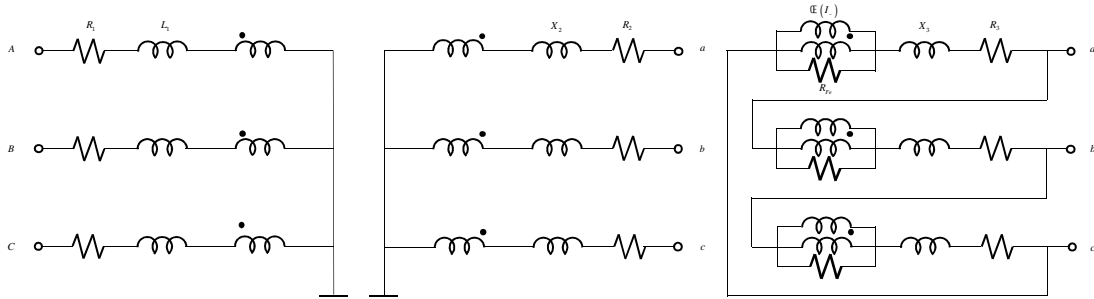
$$S_{B12} = 33 \text{ MVA}, r_{cc12} = 0.445\%, u_{cc12} = 13\%$$

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

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

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

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



**Figura 3-4: Circuito equivalente trifásico del transformador TARR.**

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

$$\mathbf{z}_{cc12} = \left( r_{cc12} + j\sqrt{z_{cc12}^2 - r_{cc12}^2} \right) = (0.0092 + j0.2704) \text{ pu}$$

$$\mathbf{z}_{cc13} = \hat{\mathbf{z}}_{cc13} \frac{S_{B12}}{S_{B13}} = \left( r_{cc13} + j\sqrt{z_{cc13}^2 - r_{cc13}^2} \right) \frac{S_{B12}}{S_{B13}} = (0.0383 + j1.117) \text{ pu}$$

$$\mathbf{z}_{cc23} = \hat{\mathbf{z}}_{cc23} \frac{S_{B12}}{S_{B23}} = \left( r_{cc23} + j\sqrt{z_{cc23}^2 - r_{cc23}^2} \right) \frac{S_{B12}}{S_{B23}} = (0.0126 + j0.3632) \text{ pu}$$

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

$$\mathbf{z}_{cc1} = (r_{cc1} + jx_{cc1}) = \frac{\mathbf{z}_{cc12} + \mathbf{z}_{cc13} - \mathbf{z}_{cc23}}{2} = (0.0062 + j0.1811) \Omega$$

$$\mathbf{z}_{cc2} = (r_{cc2} + jx_{cc2}) = \frac{\mathbf{z}_{cc12} + \mathbf{z}_{cc23} - \mathbf{z}_{cc13}}{2} = (0.0002 + j0.0064) \Omega$$

$$\mathbf{z}_{cc3} = (r_{cc3} + jx_{cc3}) = \frac{\mathbf{z}_{cc13} + \mathbf{z}_{cc23} - \mathbf{z}_{cc12}}{2} = (0.0027 + j0.0778) \Omega$$

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de menor tensión del transformador TARR son:



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

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de media tensión del transformador TARR 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 TARR 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 TARR son:

$$\mathfrak{F} = \frac{\frac{U_{n1}}{\sqrt{3}}}{4.44 \cdot 50}$$
$$\hat{I}_- = \sqrt{i_0^2 - i_{Fe}^2} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{n1}} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{i_0^2 - \left(\frac{P_0}{S_B}\right)^2} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{n1}} \cdot \sqrt{2}$$

Que para 100% y 110% de la tensión nominal valen:

$\hat{I}$	$\mathfrak{F}$
1.3603	358.8934
4.4184	394.7828

La resistencia de magnetización del transformador TARR es:

$$R_{Fe} = \frac{1}{39/44000} \cdot \frac{138^2}{44} = 488307.69\Omega$$



La Figura 3-5 muestra el modelo de simulación de la alimentación a 132 kV de la central nuclear del caso de estudio. Incluye el modelo de la red y el modelo del transformador. 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 TARR. Se considera que la fase A en el lado de 138 kV del transformador TARR está abierta en régimen permanente.

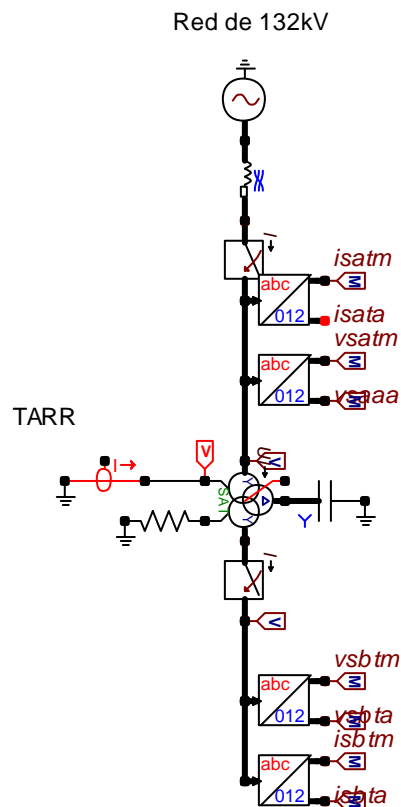


Figura 3-5: Modelo de simulación de la alimentación a 132 kV de la central nuclear del caso de estudio: transformador en vacío.

### 3.3.2 Resultados de simulación del caso 1

La Figura 3-6 y la Figura 3-7 muestran las corrientes de línea en el lado de 138 kV y la corriente de neutro en el lado 138 kV del transformador TARR cuando se produce la apertura de la fase en la alimentación a 132 kV a 20 ms de comenzada la simulación. Nótese el acuerdo entre los valores de pico de la corriente de neutro calculada por componentes simétrica y simulada con el programa ATP.

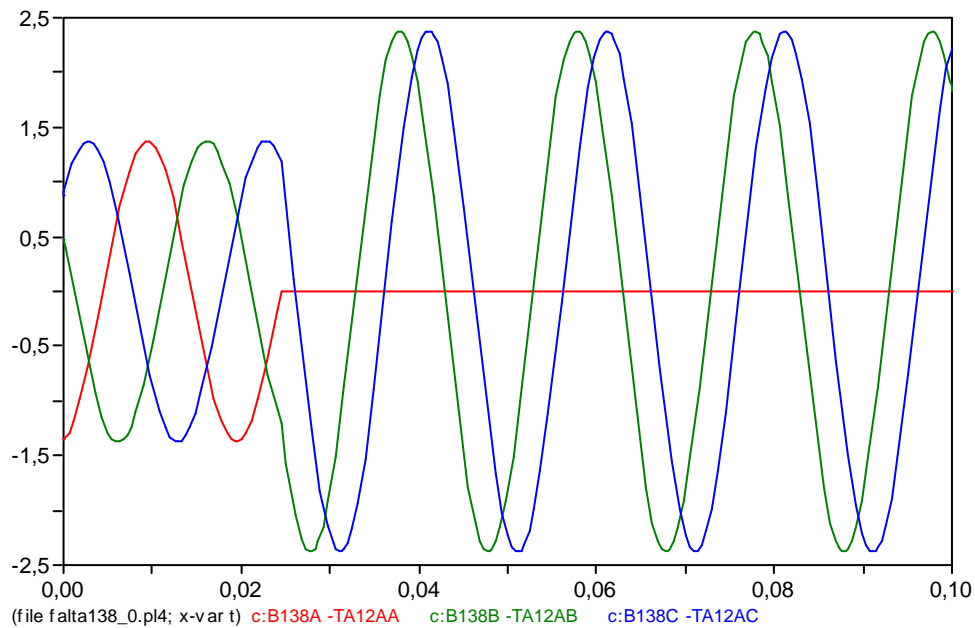
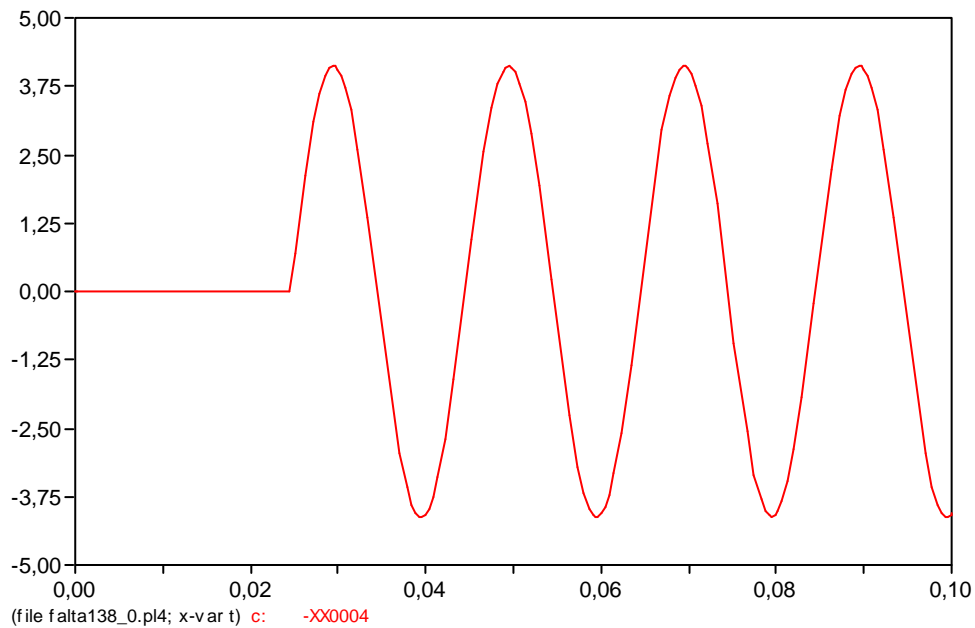


Figura 3-6: Corrientes de línea en el lado de 138 kV del transformador TARR: apertura de la fase A de la alimentación a 132 kV a 20 ms de comenzada la simulación.



Valor de pico: Simulado = 4.1190 A, Calculado = 4.1224 A

Figura 3-7: Corriente de neutro en el lado de 138 kV del transformador TARR: apertura de la fase A de la alimentación a 132 kV a 20 ms de comenzada la simulación.

Se aprecia que la corriente de neutro no contiene armónicos ni en antes ni después de la apertura de la fase A en la alimentación a 132 kV. Se estima que ello es debido a que la caracterización de la curva de magnetización del transformador por medio de dos puntos (100% y 110% de tensión nominal) es pobre.





### 3.3.3 Modelo de simulación del caso 2

Se propone enriquecer la definición de la curva de magnetización del transformador suponiendo que la componente reactiva de la corriente de magnetización se puede aproximar por la función:

$$\mathfrak{E} = \frac{a \cdot i_{-}}{1 + b \cdot |i_{-}|}$$

Donde los parámetros de la curvas se obtienen de los dos puntos disponibles como

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{E}_1 &= \frac{a \cdot i_{-1}}{1 + b \cdot i_{-1}} \\ \mathfrak{E}_2 &= \frac{a \cdot i_{-2}}{1 + b \cdot i_{-2}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} b &= \frac{\mathfrak{E}_1 \cdot i_{-2} - \mathfrak{E}_2 \cdot i_{-1}}{\mathfrak{E}_2 \cdot i_{-1} \cdot i_{-2} - \mathfrak{E}_1 \cdot i_{-1} \cdot i_{-2}} \\ a &= \frac{\mathfrak{E}_1 (1 + b \cdot i_{-1})}{i_{-1}} \end{aligned}$$

Los valores numéricos de los puntos disponibles son

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_1 &= 1 \text{ pu} & i_{-1} &= 0.0052 \text{ pu} \\ \mathfrak{E}_2 &= 1.1 \text{ pu} & i_{-2} &= 0.017 \text{ pu} \end{aligned}$$

Los valores numéricos de los parámetros de la función son:

$$\begin{aligned} b &= 1.2656 \cdot 10^3 \\ a &= 1.4570 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

Es interesante determinar la asíntota de la función para definir los puntos a obtener:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \mathfrak{E} = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{a \cdot i_{-}}{1 + b \cdot i_{-}} = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{a}{\frac{1}{i_{-}} + b} = \frac{a}{b} = \frac{1.4570 \cdot 10^3}{1.2656 \cdot 10^3} = 1.1512$$

A partir de los valores elegidos del flujo, se determina la corriente como:

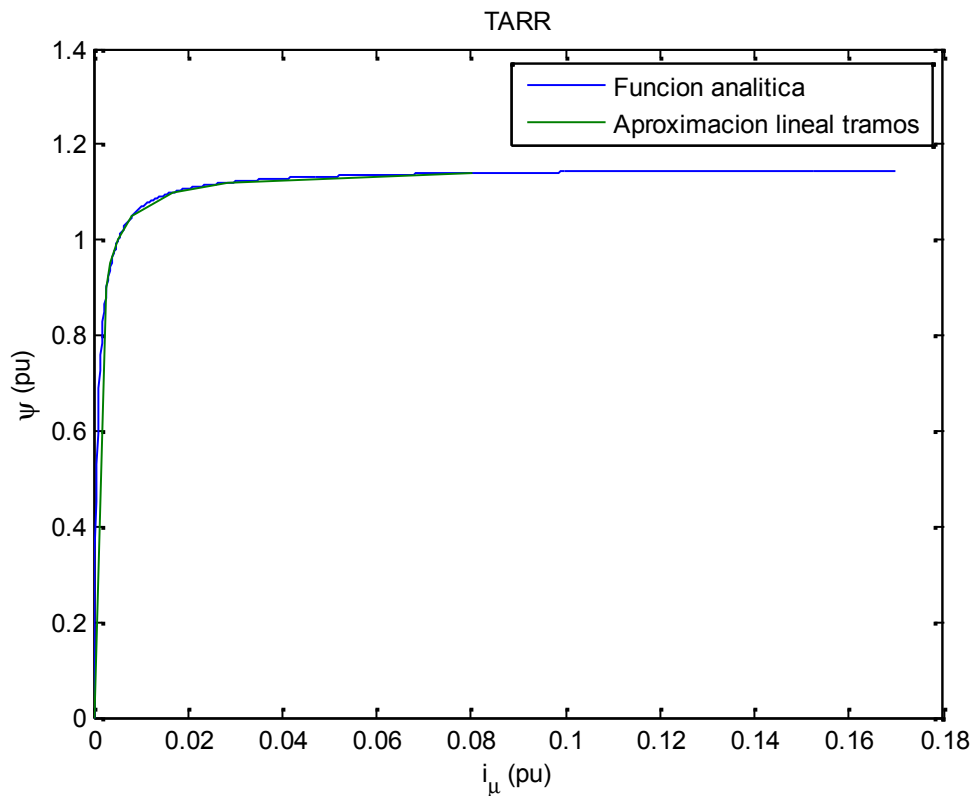
$$i_{-} = \frac{\mathfrak{E}}{a - b \cdot \mathfrak{E}}$$

La Tabla 3-1 contiene los valores elegidos del flujo y los valores calculados de la corriente de magnetización, ambos en magnitudes unitarias. La Figura 3-8 compara la función analítica con la aproximación lineal a tramos.



**Tabla 3-1: Valores de flujo e intensidad en magnitudes unitarias del transformador TARR.**

$\mathbb{E} ( pu )$	0.9000	0.9500	1.0000	1.0500	1.1000	1.1200	1.1400
$i_- ( pu )$	0.0028	0.0037	0.0052	0.0082	0.0170	0.0284	0.0804



**Figura 3-8: Comparación de la función analítica y la aproximación lineal a tramos del transformador TARR.**

Los valores de pico, tal y como deben ser introducidos en el programa ATP, se calculan de acuerdo con:

$$\mathbb{E} \left( \frac{V}{Hz} \right) = \mathbb{E} ( pu ) \cdot \frac{\frac{U_{n1}}{\sqrt{3}}}{4.44 \cdot 50}$$

$$\hat{I}_- ( A ) = i_- ( pu ) \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{n1}} \cdot \sqrt{2}$$

La Tabla 3-2 contiene los valores elegidos del flujo y los valores calculados de la corriente de magnetización, ambos en magnitudes unitarias.

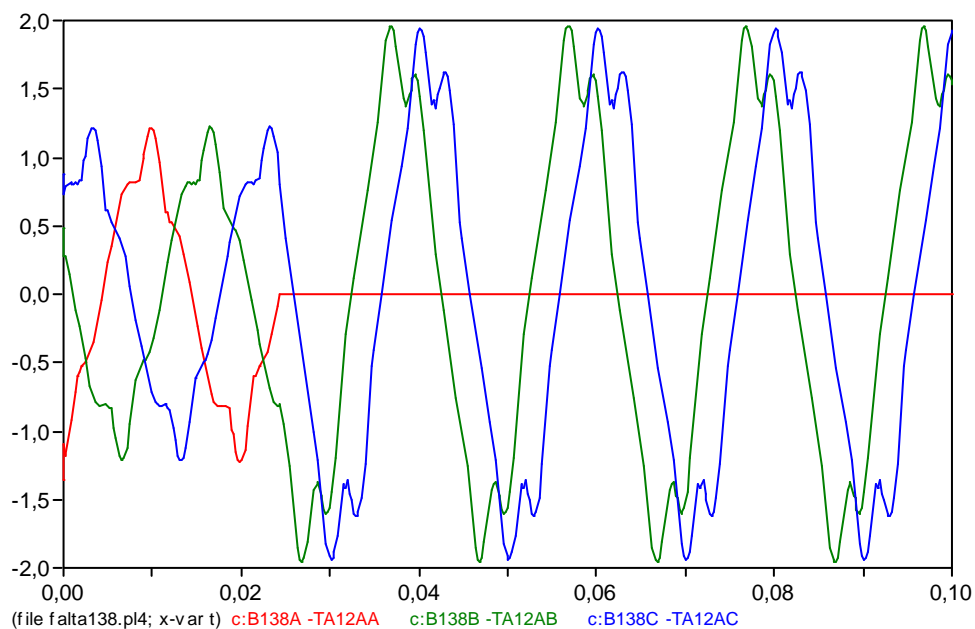


**Tabla 3-2: Valores de flujo e intensidad en magnitudes reales (valores de pico) de transformador TARR.**

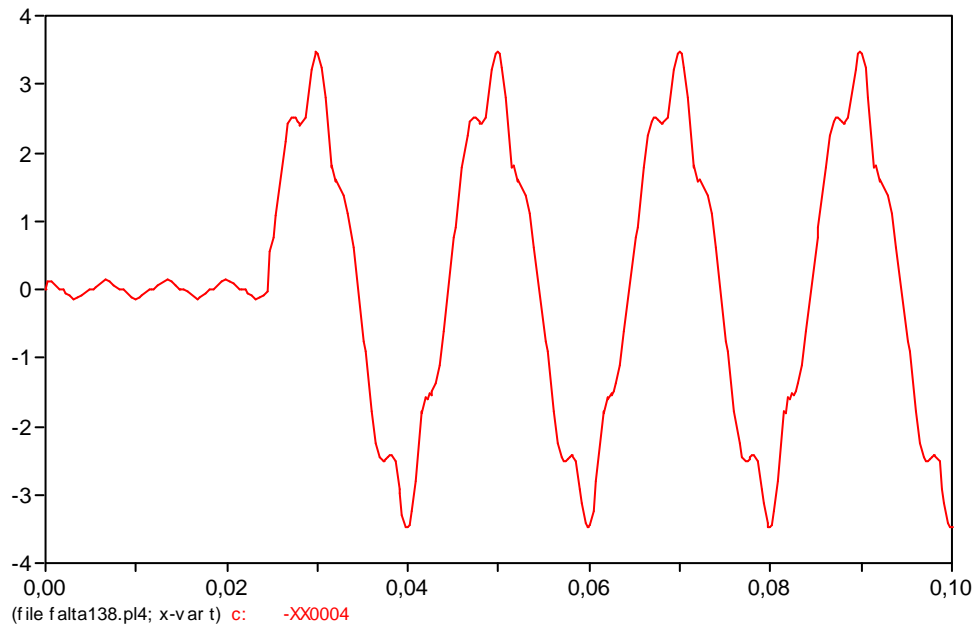
$\Phi$ (V/Hz)	323.0041	340.9487	358.8934	376.8381	394.7828	401.9606	409.1385
$\hat{i}_-$ (A)	0.7369	0.9712	1.3603	2.1340	4.4184	7.3815	20.9179

### 3.3.4 Resultados de simulación del caso 2

La Figura 3-9 y la Figura 3-10 muestran las corrientes de línea en el lado de 138 kV y la corriente de neutro en el lado 138 kV del transformador TARR cuando se produce la apertura de la fase en la alimentación a 132 kV a 20 ms de comenzada la simulación. Nótese el contenido armónico de las corrientes de línea y de la corriente de neutro como consecuencia de la mejor caracterización de la característica de magnetización.

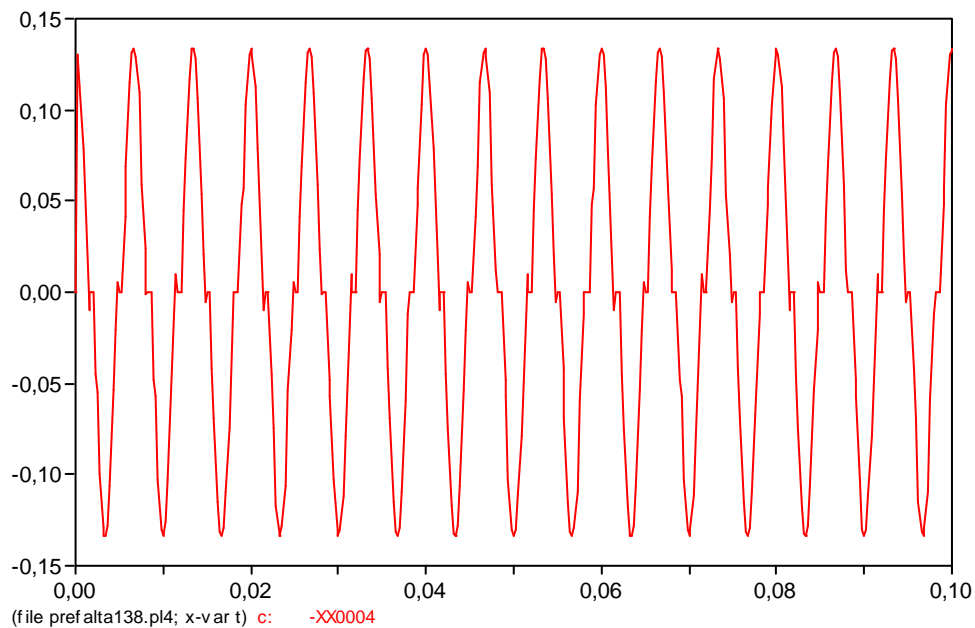


**Figura 3-9: Corrientes de línea en el lado de 138 kV del transformador TARR: apertura de la fase A de la alimentación a 132 kV a 20 ms de comenzada la simulación.**



**Figura 3-10: Corriente de neutro en el lado de 138 kV del transformador TARR: apertura de la fase A de la alimentación a 132 kV a 20 ms de comenzada la simulación.**

La Figura 3-11 muestra con detalle la corriente de neutro en el lado de 138 kV del transformador TARR en condiciones de prefalta. La Figura 3-12 muestra el análisis armónico de la citada corriente de neutro en condiciones de prefalta. Se aprecia que la componente armónica más relevante es la tercera.



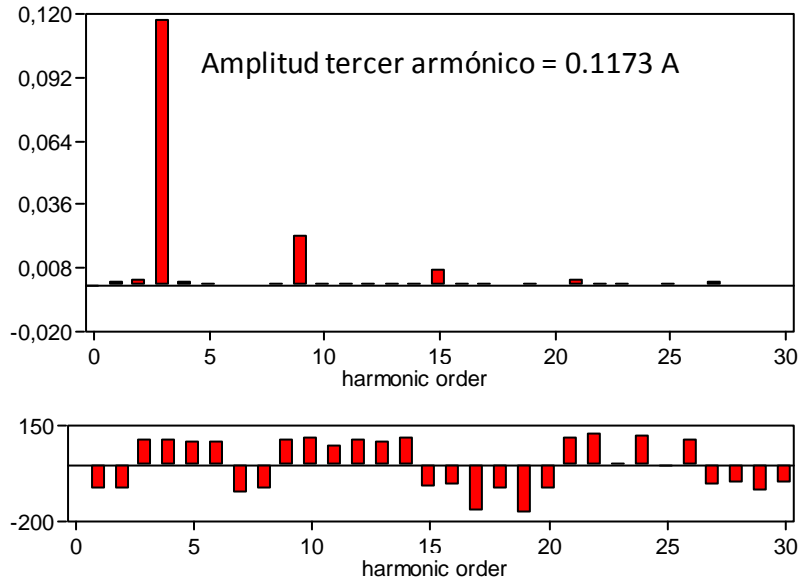
**Figura 3-11: Corriente de neutro en el lado de 138 kV del transformador TARR en condiciones de prefalta.**



**MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 30/03/2015**

File prefalta138.pl4 Variable c: -XX0004 [peak]

Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1



**Figura 3-12: Componentes armónicas de la corriente de neutro en el lado de 138 kV del transformador TARR en condiciones de prefalta.**

La Figura 3-13 muestra con detalle la corriente de neutro en el lado de 138 kV del transformador TARR en condiciones de posfalta. La Figura 3-14 muestra el análisis armónico de la citada corriente de neutro en condiciones de posfalta. Se aprecia que las componentes armónicas más relevantes son la primera y la quinta. La tercera es despreciable.

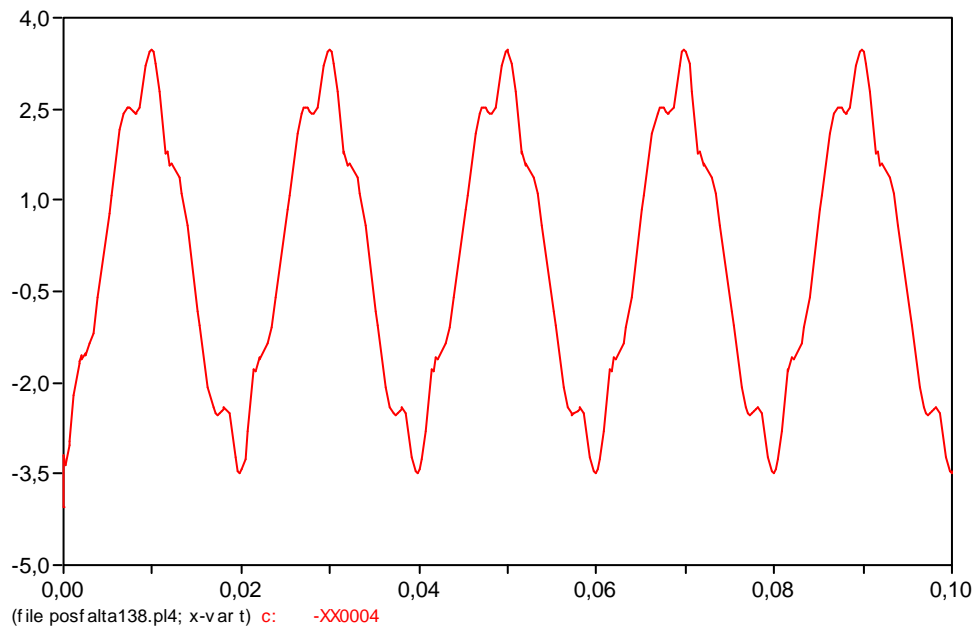


Figura 3-13: Corriente de neutro en el lado de 138 kV del transformador TARR en condiciones de posfalta.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 30/03/2015

File posfalta138.pl4 Variable c: -XX0004 [peak]

Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1

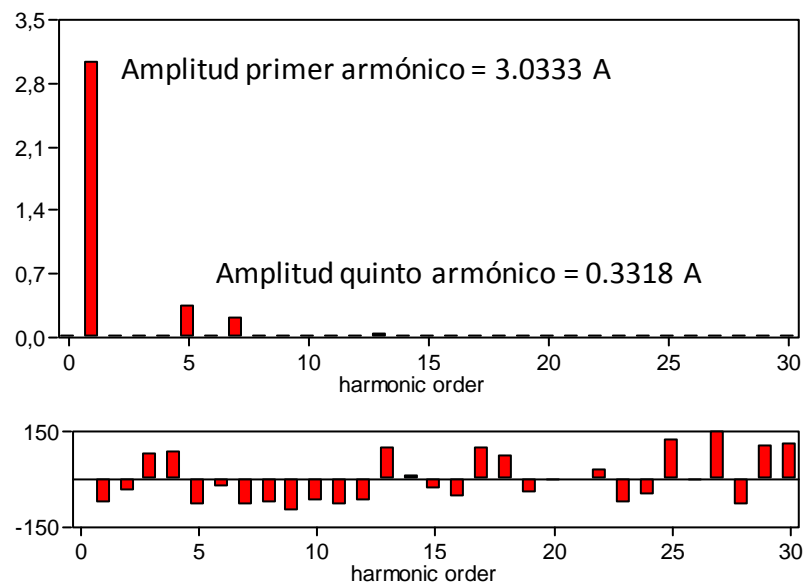


Figura 3-14: Componentes armónicas de la corriente de neutro en el lado de 138 kV del transformador TARR en condiciones de posfalta.

### 3.4 Conclusiones parciales

El análisis por componentes simétricas ha mostrado que la corriente de neutro en caso de falta serie es aproximadamente 3 veces la corriente de vacío del transformador.



La simulación por el programa ATP ha confirmado que en condiciones normales, la corriente de neutro contiene 3º armónico y no contiene 5º armónico. Por el contrario, en condiciones de fase abierta, la corriente de neutro no contiene 3º armónico y contiene 5º armónico.

Debe notarse que el modelo utilizado de transformador trifásico (tanto en componentes simétricas como en el programa ATP) no considera la asimetría del circuito magnético del mismo. Ello quiere decir que la corriente de neutro contendrá componente de primer armónico en condiciones de normales de funcionamiento debido a que las corrientes de vacío de las fases de las columnas laterales son mayores que la corriente de vacío de la fase de la columna central.



## 4 Detección de faltas serie en la alimentación principal de una central nuclear

Este capítulo investiga la detección de una falta serie en la alimentación principal de la central nuclear del caso de estudio estando el transformador principal TP y el transformador auxiliar TAUX en vacío por análisis de la corriente de neutro.

Se determina, primero, la corriente de neutro por medio de componentes simétricas. Después se valida el cálculo obtenido por componentes simétricas por medio de simulación con el programa ATP. También se investigará con el programa ATP el contenido en armónicos de la corriente de neutro en condiciones normales y en condiciones de falta serie.

### 4.1 Alimentación principal de una central nuclear

La Figura 4-1 muestra la alimentación a las barras de 6.3 kV desde la red a 400 kV a través del transformador principal TP y el transformador auxiliar TAUX. El transformador principal es un banco trifásico 420 kV/20 kV de grupo de conexión YNd11. El transformador auxiliar TAUX es un transformador trifásico 20 kV/6.9 kV de grupo de conexión Dyn1. El neutro del arrollamiento de 6.9 kV del transformador auxiliar TAUX está conectado a tierra a través de una resistencia de 4.76  $\Omega$ .

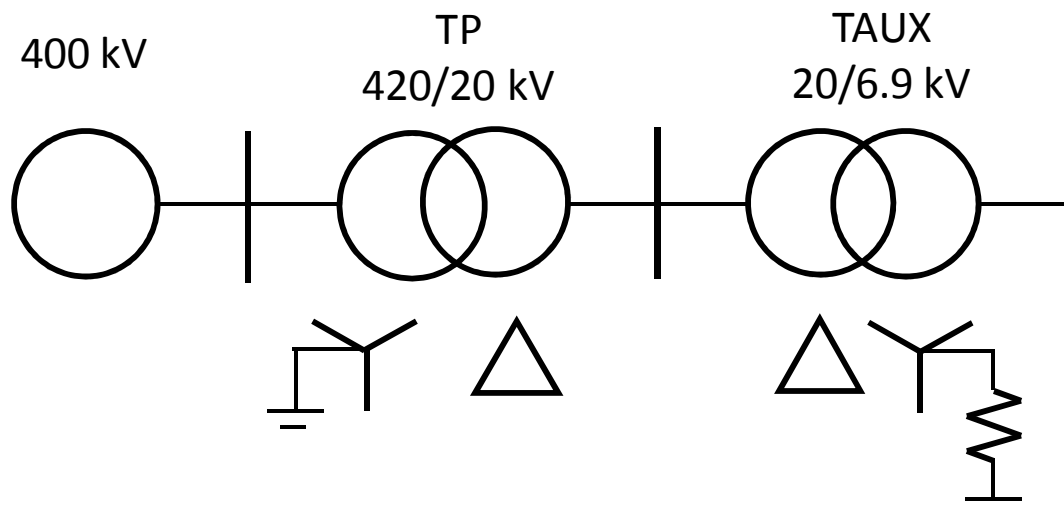


Figura 4-1: Esquema unifilar de la alimentación desde la red de 400 kV.

### 4.2 Análisis por componentes simétricas de una falta serie en la alimentación de arranque

Esta sección determina la corriente de neutro del transformador principal TP en caso de falta serie en la alimentación a 400 kV por medio de componentes simétricas.





principal de una central nuclear

#### 4.2.1 Planteamiento

La Figura 4-2 muestra los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar en magnitudes reales vistos desde barras de 6.3 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 400 kV.

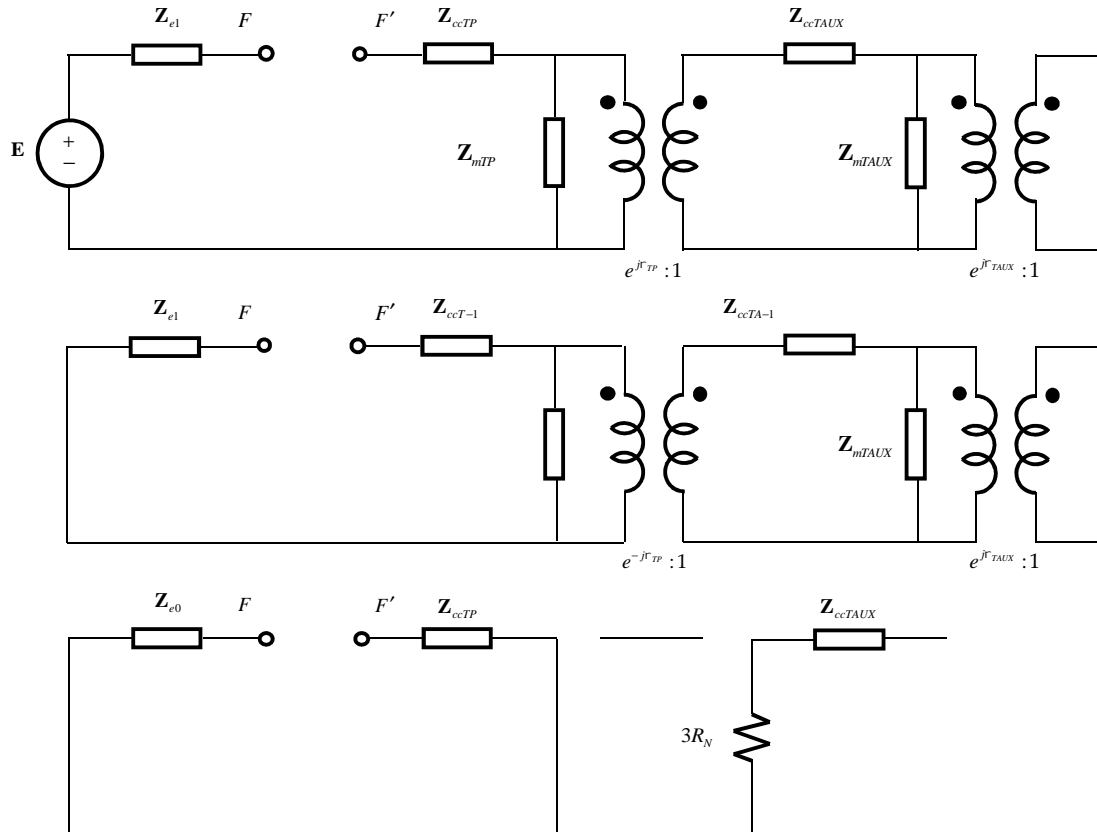


Figura 4-2: Circuitos equivalentes a las secuencias directa, inversa y homopolar.



principal de una central nuclear

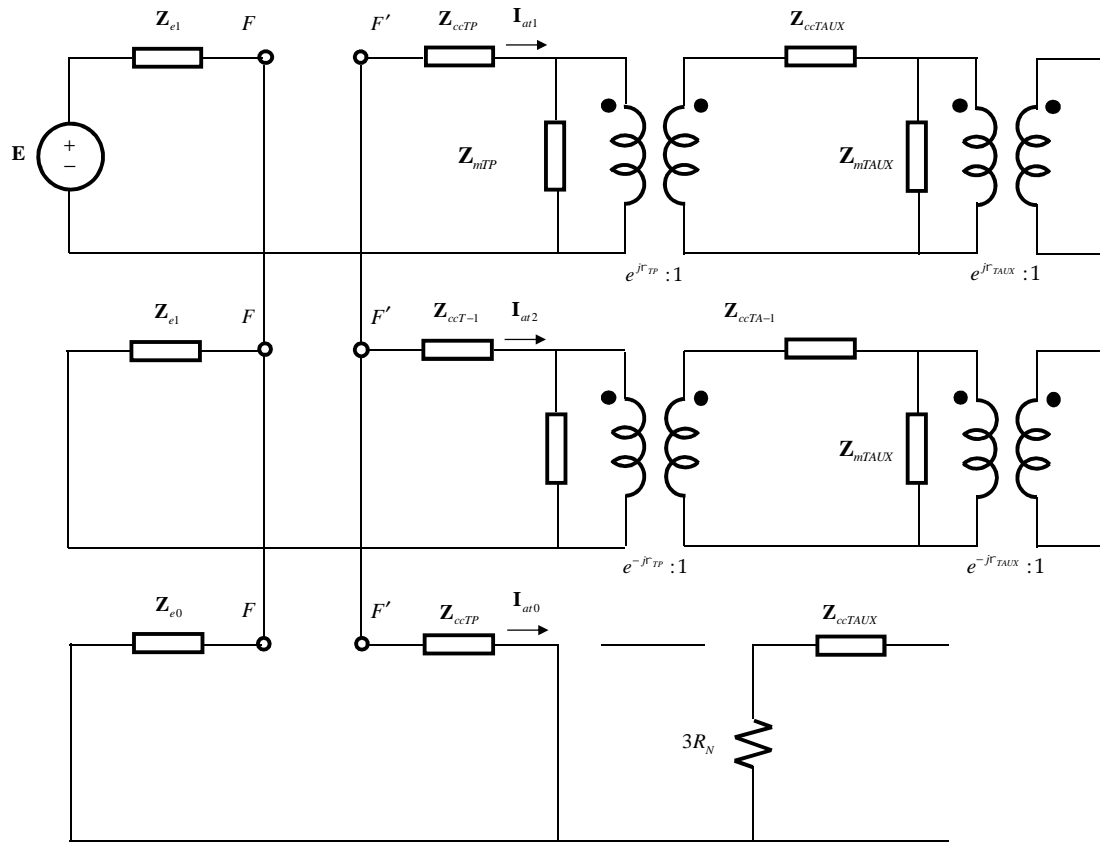


Figura 4-3: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia de falta serie en la red a 400 kV.

Las corrientes de secuencia en el lado de 420 kV del transformador TP son:

$$\mathbf{I}_{at1} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1 + \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}}}$$

$$\mathbf{I}_{at2} = -\frac{\frac{1}{\mathbf{Z}_2}}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}} \mathbf{I}_{at1}$$

$$\mathbf{I}_{at0} = -\frac{\frac{1}{\mathbf{Z}_0}}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}} \mathbf{I}_{at1}$$

Siendo:



principal de una central nuclear

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{ccTP} + \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_{mTP}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{ccTP} + \mathbf{Z}_{ccTP} \mathbf{k}_{1TAUX} \mathbf{k}_{1TAUX}^*}} \mathbf{k}_{1TP} \mathbf{k}_{1TP}^*$$

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{ccTP} + \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_{mTP}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{ccTP} + \mathbf{Z}_{ccTP} \mathbf{k}_{2TAUX} \mathbf{k}_{2TAUX}^*}} \mathbf{k}_{1TP} \mathbf{k}_{1TP}^*$$

$$\mathbf{Z}_0 = \mathbf{Z}_{e0} + \mathbf{Z}_{ccTP}$$

Donde:

$$\mathbf{k}_{1TP} = e^{j\Gamma_{T-1}} = e^{j\frac{f}{6}} \quad \mathbf{k}_{2TP} = e^{-j\Gamma_{T-1}} = e^{-j\frac{f}{6}}$$

$$\mathbf{k}_{1TAUX} = e^{j\Gamma_{TA-1}} = e^{-j\frac{f}{6}} \quad \mathbf{k}_{2TAUX} = e^{-j\Gamma_{TA-1}} = e^{j\frac{f}{6}}$$

#### 4.2.2 Datos

Los datos del transformador TP son:

$$S_{nTP} = 3 \times 420 \text{MVA} \quad z_{ccTP} = 14.7\% \quad r_{ccTP} = 0.21\% \quad x_{ccTP} = 14.69\%$$

$$i_0 = 0.08\% \quad P_0 = 390 \text{kW}$$

Los datos del transformador TAUX son:

$$S_{nTAUX} = 30 \text{MVA} \quad z_{ccTAUX} = 11.25\% \quad r_{ccTAUX} = 0.4718\% \quad x_{ccTAUX} = 11.23\%$$

$$S_{BTAUX} = 40 \text{MVA} \quad i_0 = 0.37\% \quad P_0 = 26 \text{kW}$$

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

$$R_N = 4.76 \Omega$$

Los datos de la red a 400 kV son:

$$S_{cc3W} = 15000 \text{MVA}$$

$$S_{cc1W} = 15000 \text{MVA}$$

#### 4.2.3 Resultados

Las impedancias de secuencia directa y homopolar del equivalente Thèvenin de la red vistas desde barras de 6.3 kV se determinan como:

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



principal de una central nuclear

La impedancia de cortocircuito del transformador TP vista desde barras de 6.3 kV es:

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

La impedancia de magnetización del transformador TP vista desde barras de 6.3 kV es:

$$\mathbf{Z}_{mTP} = \left( \frac{1}{\frac{1}{r_{Fe}} + \frac{1}{jx_c}} \right) \frac{U_{n2TAUX}^2}{S_{nTP}} = \left( \frac{1}{\frac{1}{3230.8} + \frac{1}{j1355.6}} \right) \frac{6.9^2}{1260} = (18.2743 + j43.5537) \Omega$$

La impedancia de cortocircuito del transformador TAUX vista desde barras de 6.3 kV es:

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

La impedancia de magnetización del transformador TAUX vista desde barras de 6.3 kV es:

$$\mathbf{Z}_{mTAUX} = \left( \frac{1}{\frac{1}{r_{Fe}} + \frac{1}{jx_c}} \right) \frac{U_{n2TAUX}^2}{S_{BTAUX}} = \left( \frac{1}{\frac{1}{1538.5} + \frac{1}{j274.5399}} \right) \frac{6.9^2}{40} = (56.513 + j316.69) \Omega$$

Las impedancias de secuencia totales son:

$$\mathbf{Z}_1 = (14.9061 + j38.5230) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = (14.9061 + j38.5230) \Omega$$

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

Las corrientes de secuencia por el lado de 420 kV del transformador TP son:

$$\mathbf{I}_{at1} = (-34.7969 + j89.9152) A = 96.4135 A \angle 111.1563^\circ$$

$$\mathbf{I}_{at2} = (34.8001 - j89.9299) A = 96.4284 A \angle -68.8451^\circ$$

$$\mathbf{I}_{at0} = (-0.0031 + j0.0147) A = 0.0150 A \angle 107.5551^\circ$$



La corriente de neutro es tres veces la corriente de secuencia homopolar. La corriente de neutro en lado de alta tensión (420 kV) del transformador TP es:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_N &= 3\mathbf{I}'_{at0} = 3\mathbf{I}_{at0} \frac{U_{n2TAUX}}{U_{n1TP}} = (-1.7150 + j4.4315) A \\ &= 4.7518A \angle 111.1563^\circ = \frac{6.7201}{\sqrt{2}} A \angle 111.1563^\circ \end{aligned}$$

Debe notarse que la corriente de neutro en caso de falta serie es aproximadamente 3 veces la suma de las corrientes de vacío de los transformadores TP y TAUX:

$$\frac{I_N}{I_{01}} = \frac{I_N}{\left| \mathbf{i}_{0TP} \frac{S_{nTP}}{\sqrt{3}U_{n1TP}} + \mathbf{i}_{0TAUX} \frac{S_{nTAUX}}{\sqrt{3}U_{n1TP}} \right|} = \frac{4.7518}{1.5848} = 2.9984$$

### 4.3 Simulación con el programa ATP

Esta sección valida el cálculo obtenido por componentes simétricas por medio de simulación con el programa ATP. También se investigará con el contenido en armónicos de la corriente de neutro en condiciones normales y en condiciones de falta serie.

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

- Caso 1: se considerará que la curva de magnetización de los transformadores está descrita por dos puntos correspondientes a los ensayos de vacío a 100% y 110% de tensión nominal.
- Caso 2: se considerará que la curva de magnetización de los transformadores está descrita por siete puntos obtenidos de la interpolación de la curva obtenida de los ensayos de vacío a 100% y 110% de tensión nominal.

#### 4.3.1 Modelo de simulación del caso 1

Las características del transformador TP son:

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

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

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

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



principal de una central nuclear

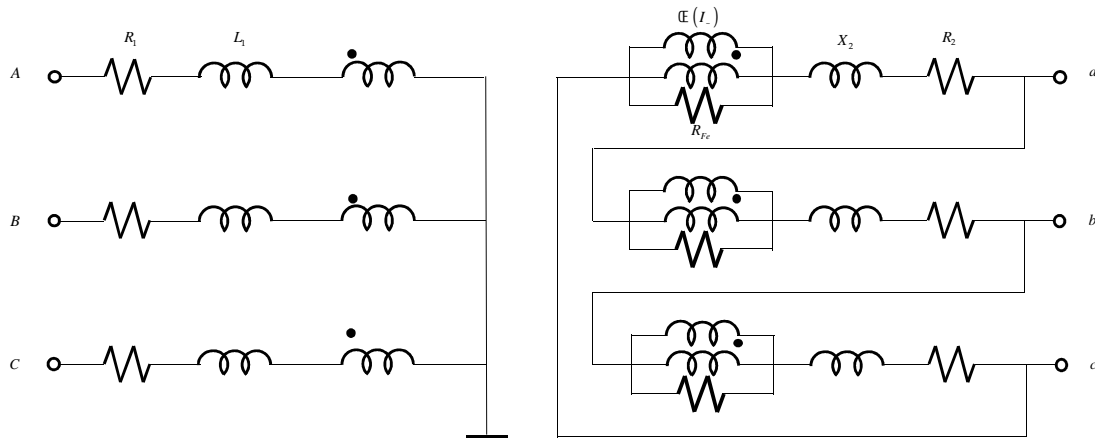


Figura 4-4: Circuito equivalente trifásico del transformador TP.

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de menor tensión del transformador TP 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 TP 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 TP son:

$$\mathcal{E} = \frac{U_{n2}}{4.44 \cdot 50}$$

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

Que para 100% y 110% de la tensión nominal valen:



$\hat{I}$	$\mathcal{E}$
21.9084	90.0901
64.5495	99.0991

La resistencia de magnetización del transformador TP es:

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

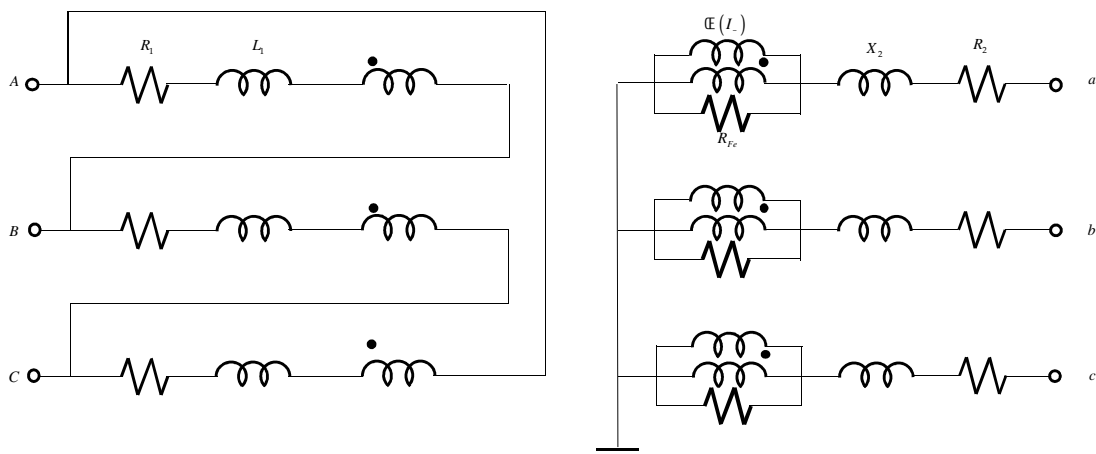
Las características del transformador TAUX son:

*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 4-5: Circuito equivalente trifásico del transformador TAUX.**

La resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento de menor tensión del transformador TAUX 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 TAUX 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 TAUX son:

$$\mathcal{E} = \frac{U_{n2} / \sqrt{3}}{4.44 \cdot 50}$$

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

Que para 100% y 110% de la tensión nominal valen:

$\hat{I}$	$\mathcal{E}$
17.2409	17.9447
55.2763	19.7391

La resistencia de magnetización del transformador TAUX es:

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

La Figura 4-6 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 el modelo del transformador. El modelo también incluye bloques que calculan las tensiones y corrientes de secuencia en el lado de 420 kV del transformador TP y de 6.9 kV del transformador TAUX. Se considera que la fase A en el lado de 420 kV del transformador TP está abierta en régimen permanente.



Red de 400kV

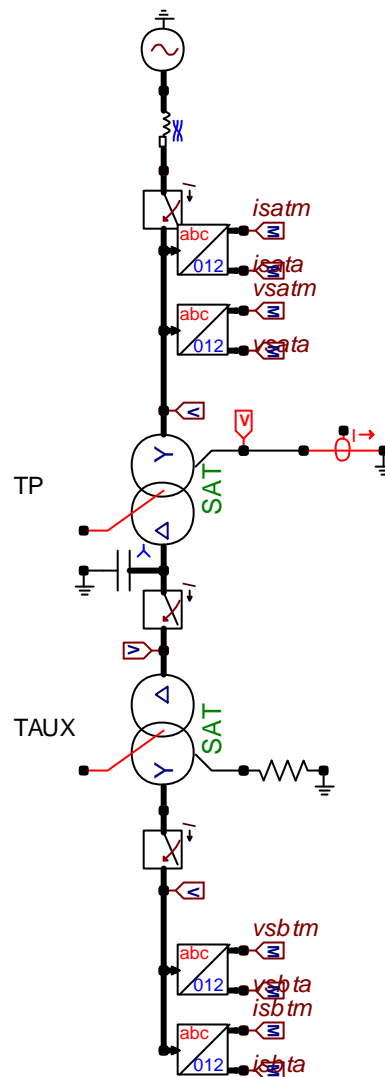


Figura 4-6: Modelo de simulación de la alimentación a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio: transformador en vacío.

#### 4.3.2 Resultados de simulación del caso 1

La Figura 4-7 y la Figura 4-8 muestran las corrientes de línea en el lado de 420 kV y la corriente de neutro en el lado 420 kV del transformador TP cuando se produce la apertura de la fase en la alimentación a 400 kV a 20 ms de comenzada la simulación. Nótese el acuerdo entre los valores de pico de la corriente de neutro calculada por componentes simétrica y simulada con el programa ATP.



principal de una central nuclear

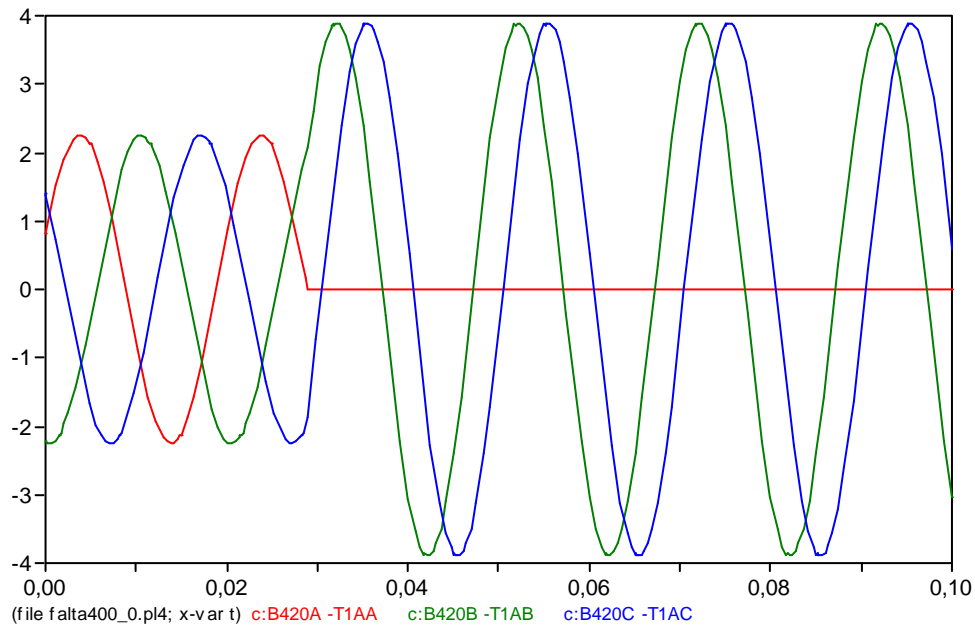
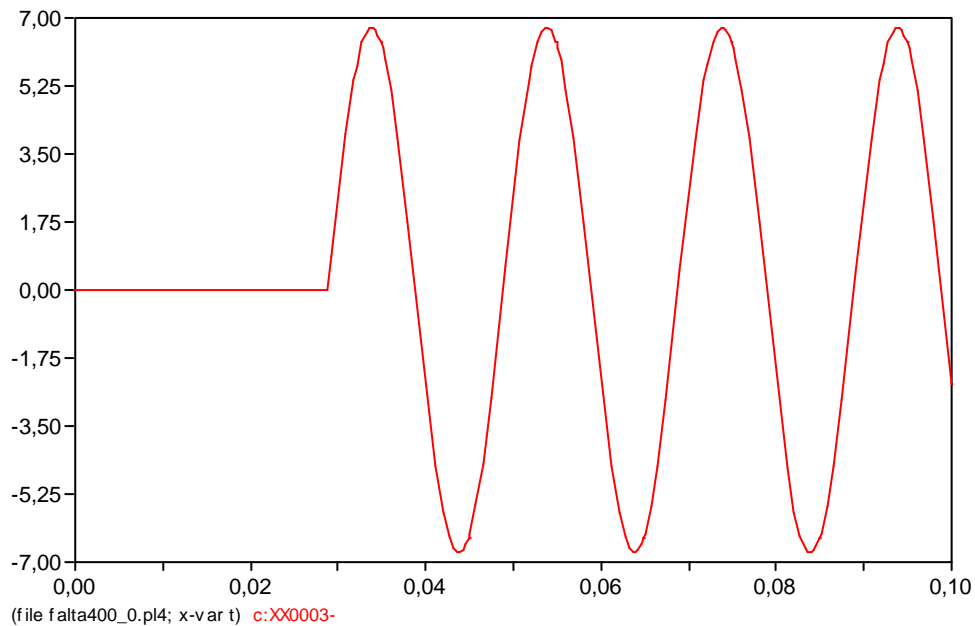


Figura 4-7: Corrientes de línea en el lado de 420 kV del transformador TP: apertura de la fase A de la alimentación a 400 kV a 20 ms de comenzada la simulación.



Valor de pico: Simulado = 6.7393 A, Calculado = 6.7201 A

Figura 4-8: Corriente de neutro en el lado de 420 kV del transformador TP: apertura de la fase A de la alimentación a 400 kV a 20 ms de comenzada la simulación.

Se aprecia que la corriente de neutro no contiene armónicos ni en antes ni después de la apertura de la fase A en la alimentación a 400 kV. Se estima que ello es debido a que la caracterización de la curva de magnetización del transformador por medio de dos puntos (100% y 110% de tensión nominal) es pobre.



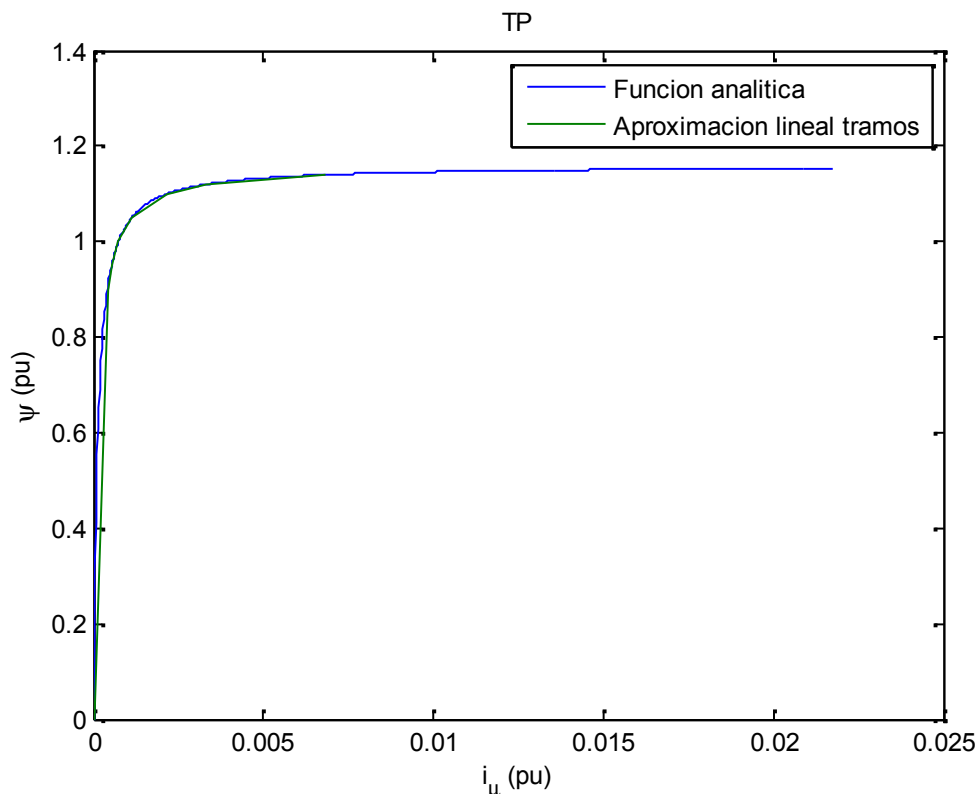
**4.3.3 Modelo de simulación del caso 2**

Se propone enriquecer la definición de la curva de magnetización del transformador suponiendo que la componente reactiva de la corriente de magnetización se puede aproximar por la función:

La Tabla 4-1 contiene los valores elegidos del flujo y los valores calculados de la corriente de magnetización del transformador TP, ambos en magnitudes unitarias. La Figura 4-9 compara la función analítica con la aproximación lineal a tramos.

**Tabla 4-1: Valores de flujo e intensidad en magnitudes unitarias y en magnitudes reales del transformador TP.**

$\mathcal{E} (pu)$	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.12	1.14
$i_{\mu} (pu)$	0.0004	0.0005	0.0007	0.0011	0.0022	0.0033	0.0069
$\mathcal{E} (V/Hz)$	81.0811	85.5856	90.0901	94.5946	99.0991	100.9009	102.7027
$\hat{I}_{\mu} (A)$	12.1216	15.8476	21.9084	33.5005	64.5495	98.9353	203.5762



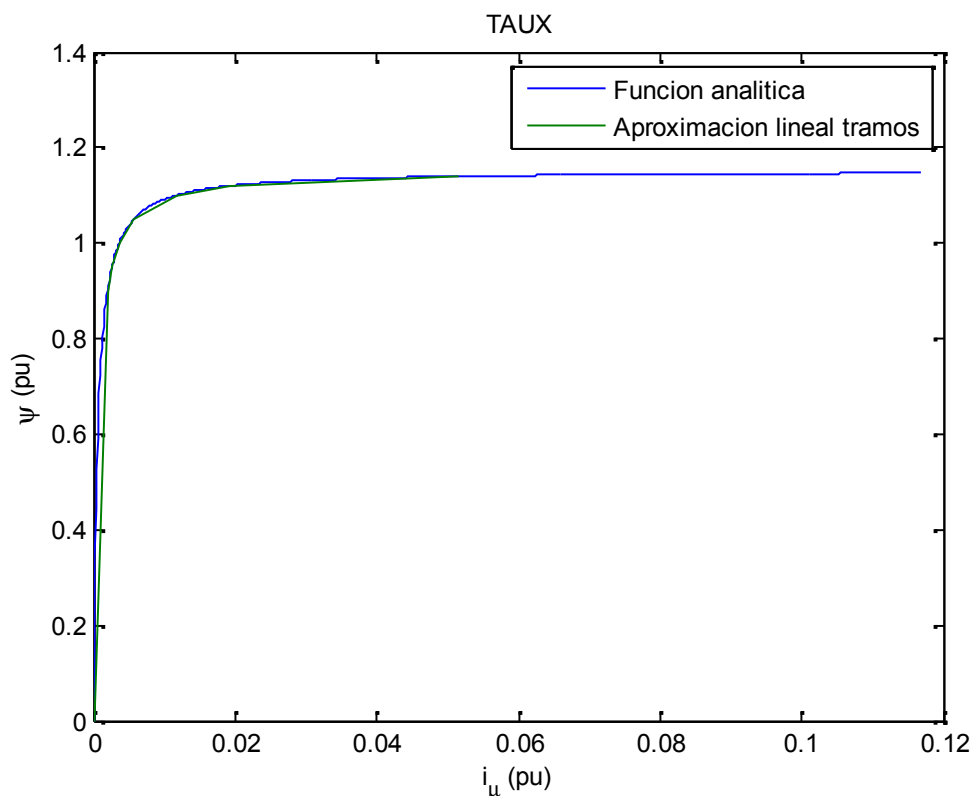
**Figura 4-9: Comparación de la función analítica y la aproximación lineal a tramos del transformador TP.**

La Tabla 4-2 contiene los valores elegidos del flujo y los valores calculados de la corriente de magnetización del transformador TAUX, ambos en magnitudes unitarias. La Figura 4-10 compara la función analítica con la aproximación lineal a tramos.



**Tabla 4-2: Valores de flujo e intensidad en magnitudes reales (valores de pico) del transformador TAUX.**

$\mathcal{E} (pu)$	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.12	1.14
$i_{\mu} (pu)$	0.002	0.0026	0.0036	0.0057	0.0117	0.0193	0.0517
$\mathcal{E} (V/Hz)$	16.1502	17.0474	17.9447	18.8419	19.7391	20.098	20.4569
$\hat{I}_{\mu} (A)$	9.3649	12.3293	17.2409	26.9571	55.2763	91.2072	244.6662



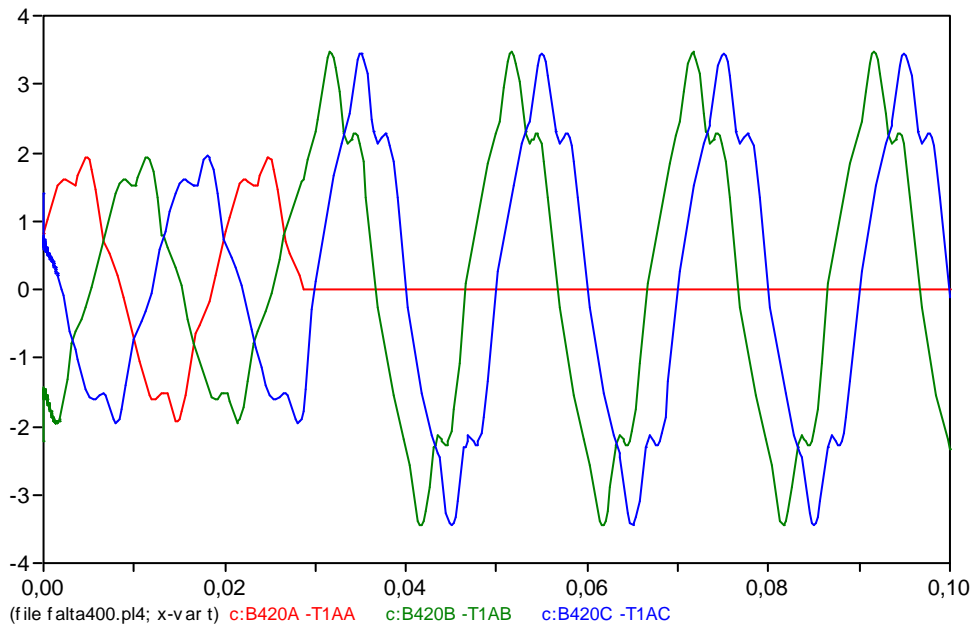
**Figura 4-10: Comparación de la función analítica y la aproximación lineal a tramos del transformador TAUX.**

#### 4.3.4 Resultados de simulación del caso 2

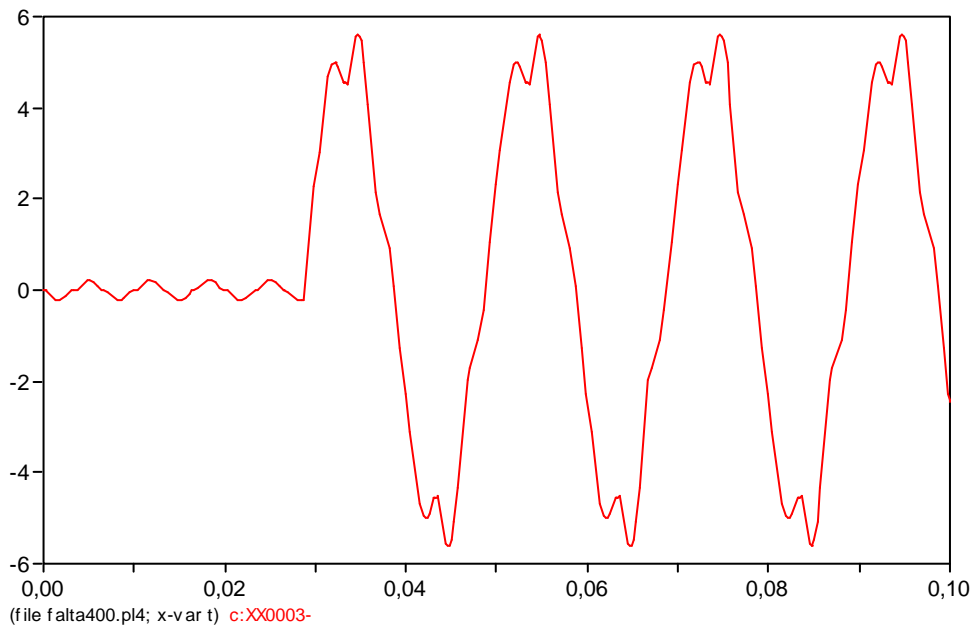
La Figura 4-11 y la Figura 4-12 muestran las corrientes de línea en el lado de 420 kV y la corriente de neutro en el lado 420 kV del transformador TARR cuando se produce la apertura de la fase en la alimentación a 400 kV a 20 ms de comenzada la simulación. Nótese el contenido armónico de las corrientes de línea y de la corriente de neutro como consecuencia de la mejor caracterización de la característica de magnetización.



principal de una central nuclear



**Figura 4-11: Corrientes de neutro en el lado de 420 kV del transformador TP: apertura de la fase A de la alimentación a 400 kV a 20 ms de comenzada la simulación.**



**Figura 4-12: Corriente de neutro en el lado de 420 kV del transformador TP: apertura de la fase A de la alimentación a 400 kV a 20 ms de comenzada la simulación.**

La Figura 4-13 muestra con detalle la corriente de neutro en el lado de 420 kV del transformador TP en condiciones de prefalta. La Figura 4-14 muestra el análisis armónico de la citada corriente de neutro en condiciones de prefalta. Se aprecia que la componente armónica más relevante es la tercera.

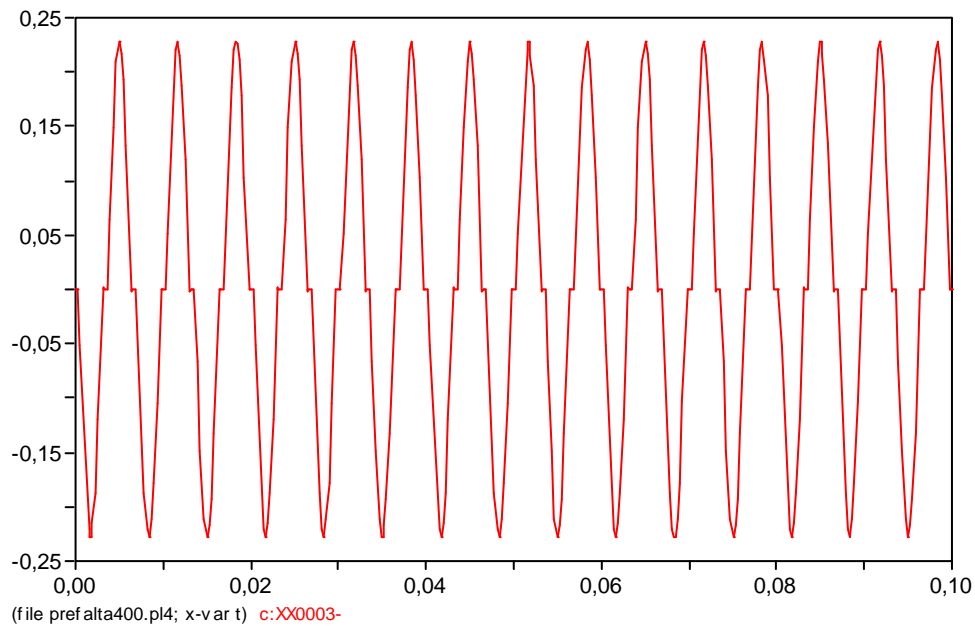


Figura 4-13: Corriente de neutro en el lado de 420 kV del transformador TP en condiciones de prefalta.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 02/04/2015

File prefalta400.pl4 Variable c:XX0003- [peak]

Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1

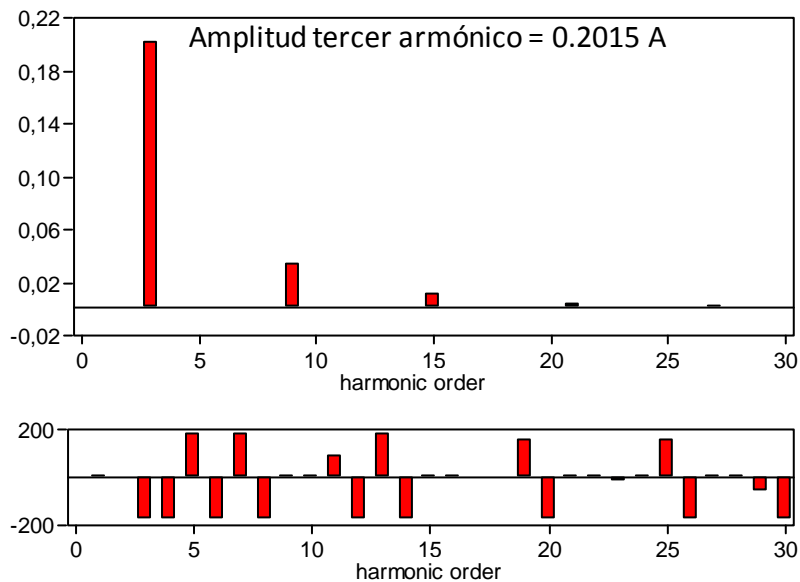


Figura 4-14: Componentes armónicas de la corriente de neutro en el lado de 420 kV del transformador TP en condiciones de prefalta.

La Figura 4-15 muestra con detalle la corriente de neutro en el lado de 420 kV del transformador TP en condiciones de posfalta. La Figura 4-16 muestra el análisis armónico de la citada corriente de neutro en condiciones de posfalta. Se aprecia que las



principal de una central nuclear

componentes armónicas más relevantes son la primera y la quinta. La tercera es despreciable.

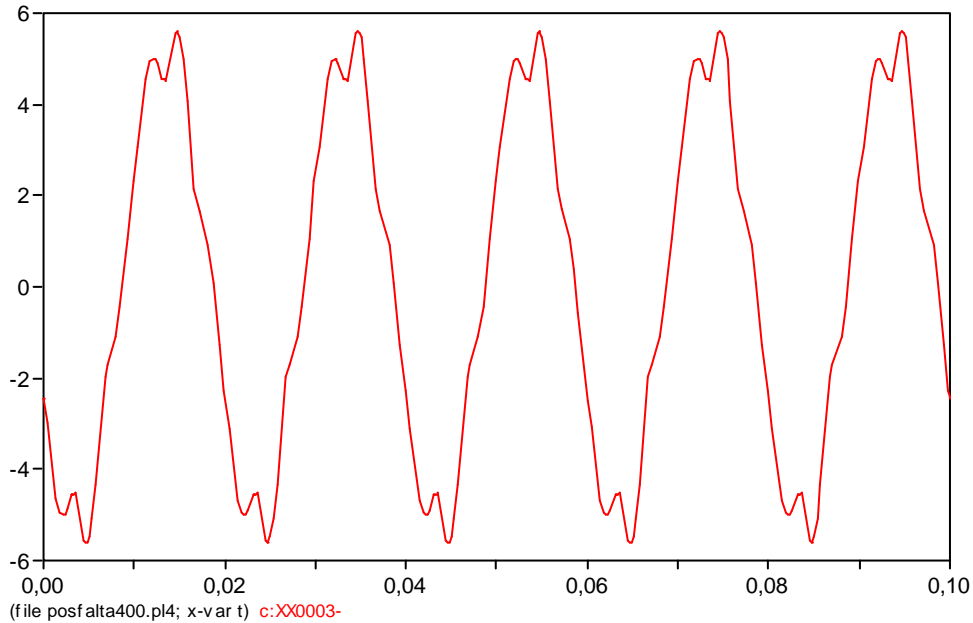


Figura 4-15: Corriente de neutro en el lado de 420 kV del transformador TP en condiciones de posfalta.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 02/04/2015

File posfalta400.pl4 Variable c:XX0003- [peak]

Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1

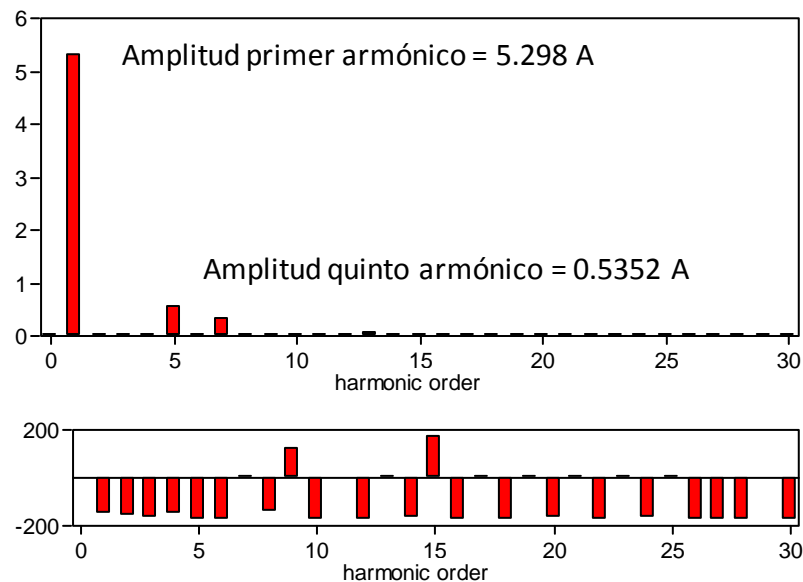


Figura 4-16: Componentes armónicas de la corriente de neutro en el lado de 420 kV del transformador TP en condiciones de posfalta.



#### **4.4 Conclusiones parciales**

El análisis por componentes simétricas ha mostrado que la corriente de neutro en caso de falta serie es 3 veces la corriente de vacío del transformador.

La simulación por el programa ATP ha confirmado que en condiciones normales, la corriente de neutro contiene 3° armónico y no contiene 5° armónico. Por el contrario, en condiciones de fase abierta, la corriente de neutro no contiene 3° armónico y contiene 5° armónico.

Debe notarse que mientras que el modelo de transformador trifásico (tanto en componentes simétricas como en el programa ATP) del transformador principal TP es preciso ya que se trata de un banco de tres unidades monofásicas, el modelo de transformador trifásico del transformador auxiliar TAUX utilizado no considera la asimetría del circuito magnético del mismo.

Dado que la contribución corriente de vacío del transformador principal TP a la corriente de vacío total es muy superior a la contribución de la corriente de vacío del transformador auxiliar TAUX (0.2034 A frente 1.3856 A), se puede afirmar la precisión del cálculo y simulación de la corriente de neutro.





## 5 Conclusiones

Este proyecto fin de grado ha abordado la concepción de un sistema de detección de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear, con una configuración muy común, a partir del sistema concebido por el EPRI.

El EPRI ha propuesto un método de detección basado en la aplicación de una tensión en el neutro del transformador y en el análisis armónico de la corriente de neutro. En condiciones normales, la corriente de neutro contiene 3º armónico y no contiene 5º armónico. Por el contrario, en condiciones de fase abierta, la corriente de neutro no contiene 3º armónico y contiene 5º armónico.

En lugar de aplicar una tensión en el neutro, este proyecto ha analizado la factibilidad de analizar simplemente el contenido en armónicos de la corriente de neutro.

Al igual que hizo el proyecto fin de grado [11], se han utilizado:

3. Análisis por componentes simétricas de la pérdida de una fase.
4. Simulación detallada de la pérdida de una fase utilizando el programa ATP.

El análisis por componentes simétricas ha mostrado que la corriente de neutro en caso de falta serie es 3 veces la corriente de vacío del transformador.

La simulación por el programa ATP ha confirmado que en condiciones normales, la corriente de neutro contiene 3º armónico y no contiene 5º armónico. Por el contrario, en condiciones de fase abierta, la corriente de neutro no contiene 3º armónico y contiene 5º armónico.

Se ha analizado la viabilidad de detectar la falta serie en el caso que la central nuclear tenga dos sistemas de alimentación exterior, de tal forma que cuando se utiliza uno de ellos, el otro se encuentra en vacío.

Se ha comprobado que el esquema es aplicable a los dos sistemas de alimentación exterior de la central nuclear de configuración típica considerada.



## 6 Apéndice A: Análisis de faltas series

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.

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.

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

Este apéndice los conceptos fundamentales del análisis de las faltas desequilibradas, con especial atención a faltas desequilibradas serie.

La teoría para el análisis de faltas trifásicas equilibradas y faltas desequilibradas paralelo puede encontrarse en gran número de libros ([21]-[24]). Sin embargo, la teoría para el análisis de faltas desequilibradas serie es más infrecuente [2].

### 6.1 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 6-1 muestra la representación fasorial de los sistemas de tensiones de secuencias directa, inversa y homopolar. La Figura 6-2, la Figura 6-3 y la Figura 6-4 muestran la representación temporal de los sistemas de secuencias directa, inversa y homopolar.

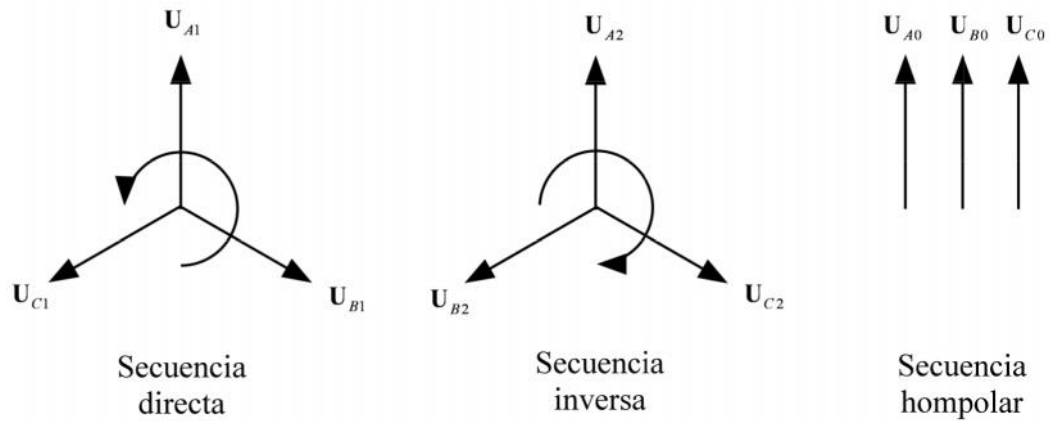


Figura 6-1: Representación fasorial de los sistemas de secuencia directa, inversa y homopolar.

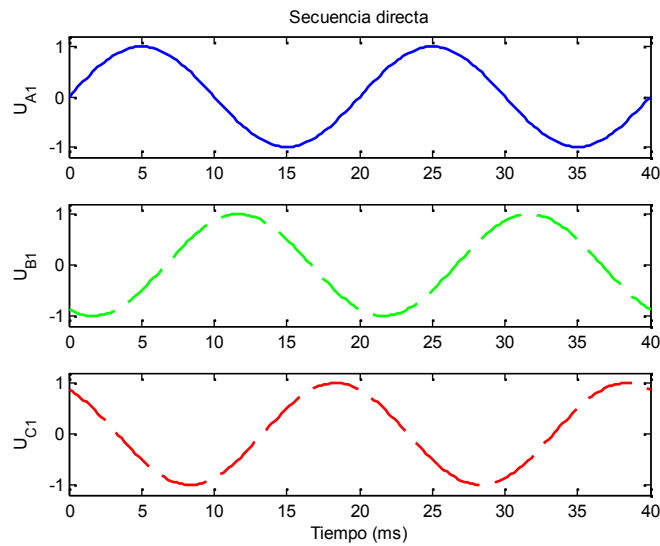


Figura 6-2: Representación temporal de un sistema de secuencia directa.

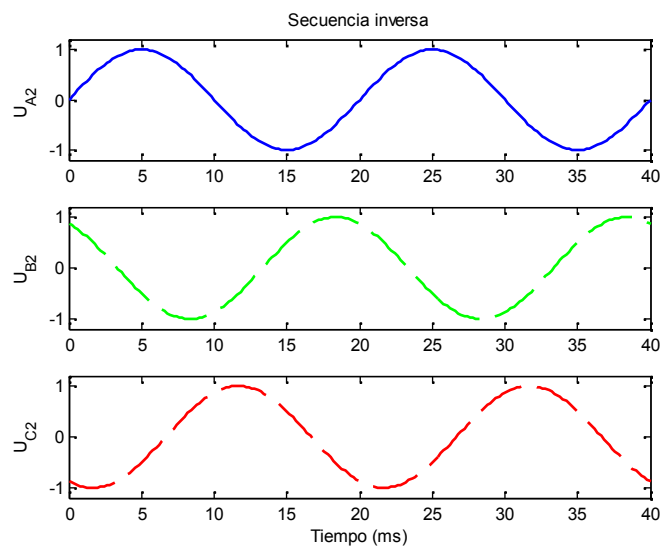
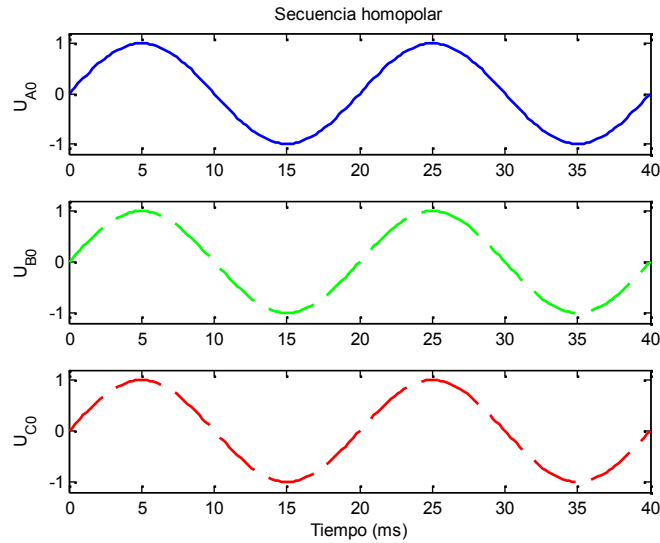


Figura 6-3: Representación temporal de un sistema de secuencia inversa.



**Figura 6-4: 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:

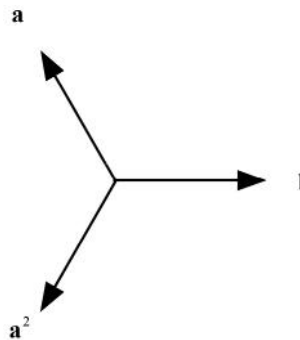
$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_0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

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

Donde (ver Figura 6-5):

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

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



**Figura 6-5: Representación fasorial de 1, a, a<sup>2</sup>.**

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

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

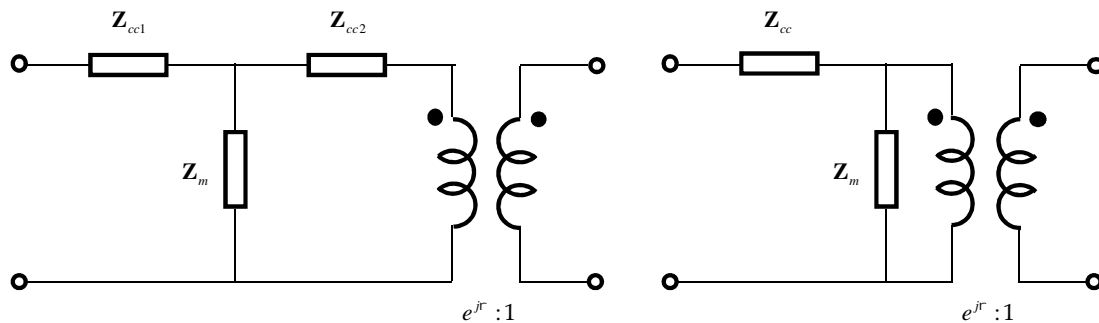
$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix}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

## 6.2 Representación de transformadores y del equivalente Thévenin de la red a las secuencias directa, inversa y homopolar

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

### 6.2.1 Representación de transformadores

La Figura 6-6 muestra el circuito equivalente a la secuencia directa de un transformador de dos arrollamientos.



**Figura 6-6: Circuito equivalente a la secuencia directa de un transformador de dos arrollamientos (left: T equivalent circuit, right: L equivalent circuit).**

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  $\gamma$  representa el desfase introducido por el grupo de conexión.

La Figura 6-7 muestra el circuito equivalente a la secuencia directa de un transformador de tres arrollamientos.

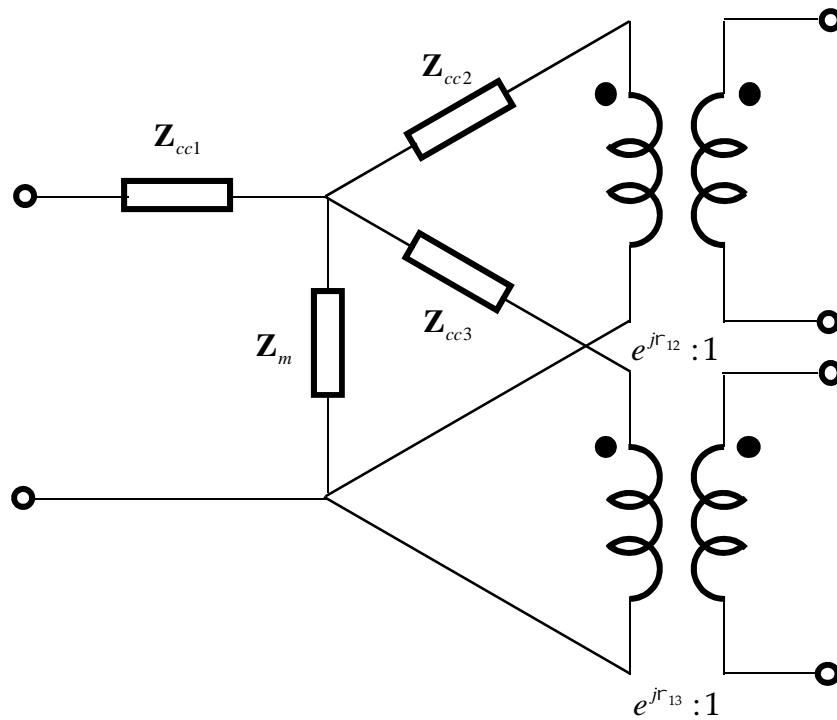


Figura 6-7: Circuito equivalente a la secuencia directa de un transformador de tres arrollamientos.

La Figura 6-8 muestra el circuito equivalente a la secuencia inversa de un transformador de dos arrollamientos.

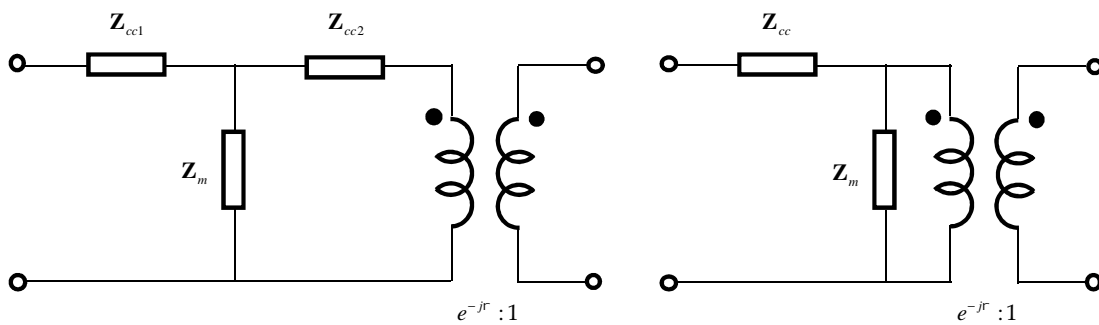


Figura 6-8: Circuito equivalente a la secuencia inversa de un transformador de dos arrollamientos (left: T equivalent circuit, right: L equivalent circuit).

La Figura 6-9 muestra el circuito equivalente a la secuencia inversa de un transformador de tres arrollamientos.

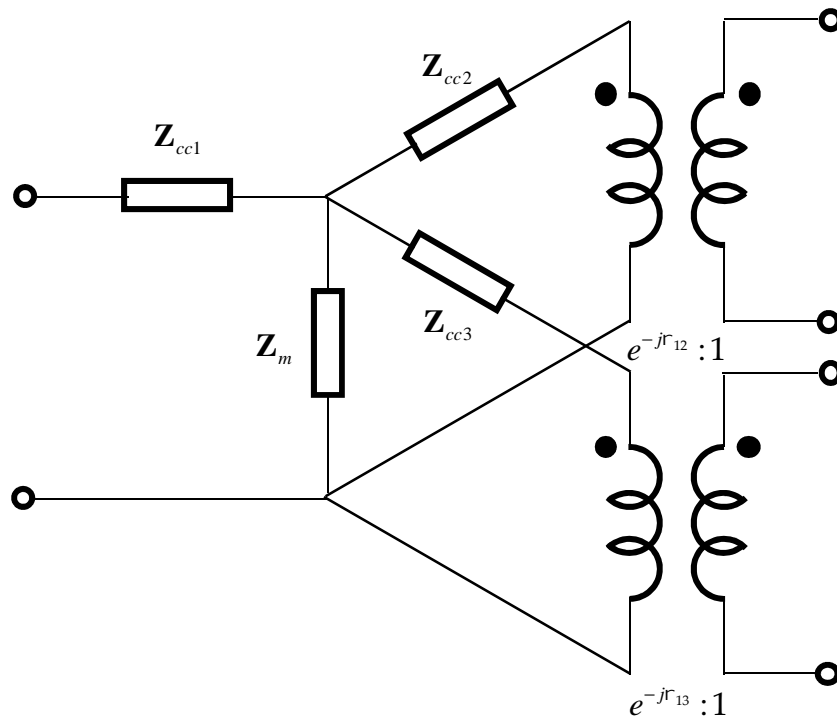


Figura 6-9: Circuito equivalente a la secuencia inversa de un transformador de tres arrollamientos.

La representación de transformadores a la secuencia homopolar depende del grupo de conexión. La Figura 6-10 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 6-11 muestra el circuito a la secuencia homopolar de un transformador de tres arrollamientos YNynd.

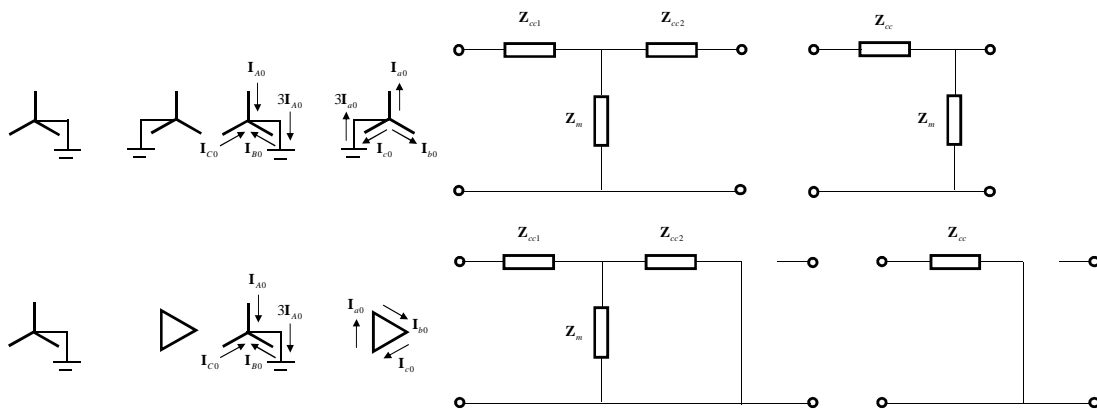


Figura 6-10: Representación de transformadores YNyn y YNd a la secuencia homopolar.

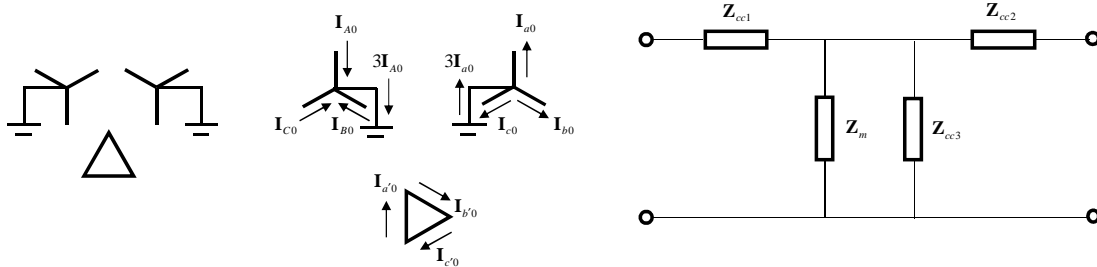


Figura 6-11: Representación de un transformador YNynD a la secuencia homopolar.

### 6.2.2 Representación del equivalente Thèvenin de la red

La Figura 6-12 muestra el circuito equivalente Thèvenin de la red a la secuencia directa.

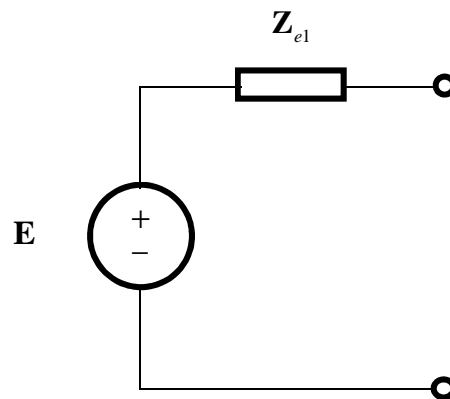


Figura 6-12: Circuito equivalente de Thèvenin de la red a la secuencia directa.

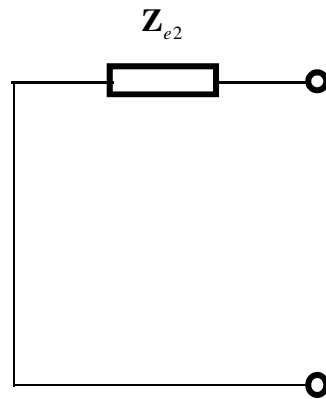
La representación equivalente de una red a la secuencia directa viene dada típicamente por la corriente de cortocircuito trifásica  $I_{cc3W}$  o la potencia de cortocircuito trifásica  $S_{cc3W}$ . La impedancia de secuencia directa del equivalente Thèvenin se determina como:

$$Z_{e1} = jX_{e1} = j \frac{E}{I_{cc3W}} = j \frac{U_n^2}{S_{cc3W}}$$

Siendo  $E$  la tensión simple nominal de la red y  $U_n$  la tensión compuesta nominal de la red.

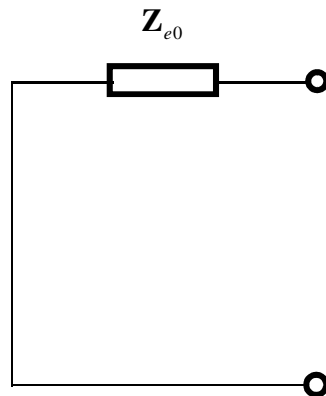
La Figura 6-13 muestra el circuito equivalente Thèvenin de la red a la secuencia inversa.





**Figura 6-13: Circuito equivalente de Thèvenin de la red a la secuencia inversa.**

La Figura 6-14 muestra el circuito equivalente Thèvenin de la red a la secuencia homopolar.



**Figura 6-14: Representación de Thèvenin de la red a la secuencia homopolar.**

La representación equivalente de una red a la secuencia directa viene dada típicamente por la corriente de cortocircuito trifásica  $I_{cc1W}$ . La impedancia de secuencia homopolar del equivalente Thèvenin se determina como:

$$\mathbf{Z}_{e0} + 2\mathbf{Z}_{e1} = jX_{e0} + 2jX_{e1} = j3 \frac{E}{I_{cc1W}}$$

$$\mathbf{Z}_{e0} = jX_{e0} = j3 \frac{E}{I_{cc1W}} - 2j \frac{E}{I_{cc3W}}$$

### 6.3 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 6-15.

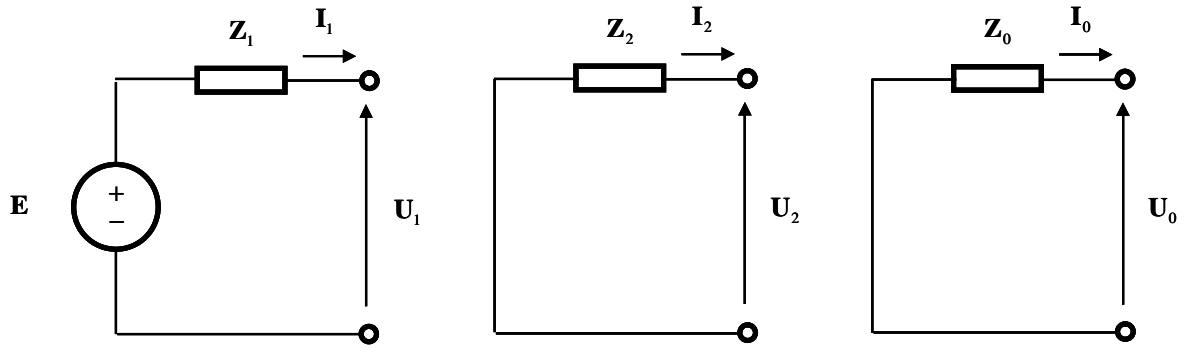


Figura 6-15: Circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar.

### 6.4 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.

#### 6.4.1 Formulación general

La Figura 6-16 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.

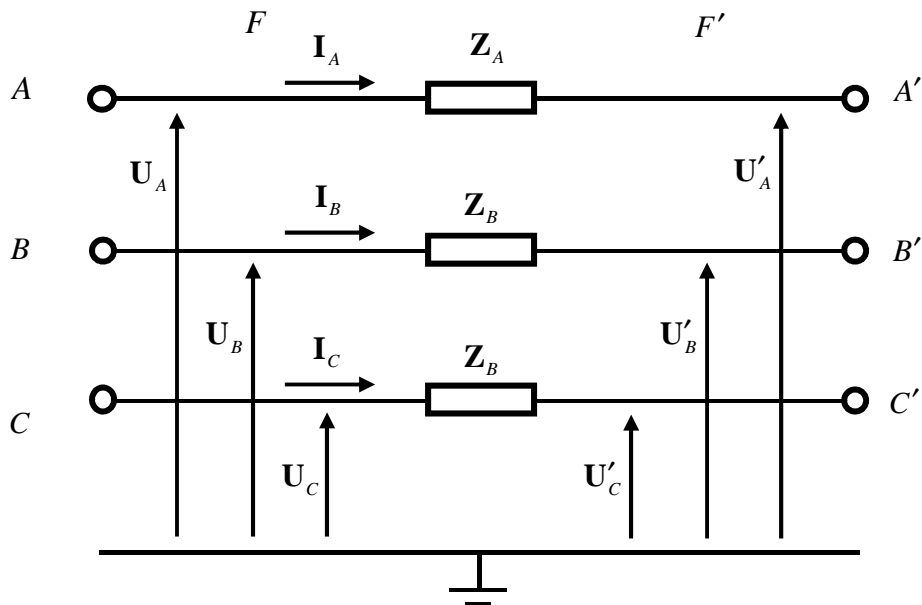


Figura 6-16: Circuito equivalente por fase de una falta serie genérica.

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



$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_A \\ \mathbf{U}'_B \\ \mathbf{U}'_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{AA'} \\ \mathbf{U}_{BB'} \\ \mathbf{U}_{CC'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_A & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_B & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix}$$

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:

$$U_{AA'-1} - Z_B I_{A1} = \frac{1}{3}(Z_A - Z_B)(I_{A0} + I_{A1} + I_{A2})$$

Figura 6-17 muestra la conexión de las redes de secuencia en caso de una falta serie genérica.

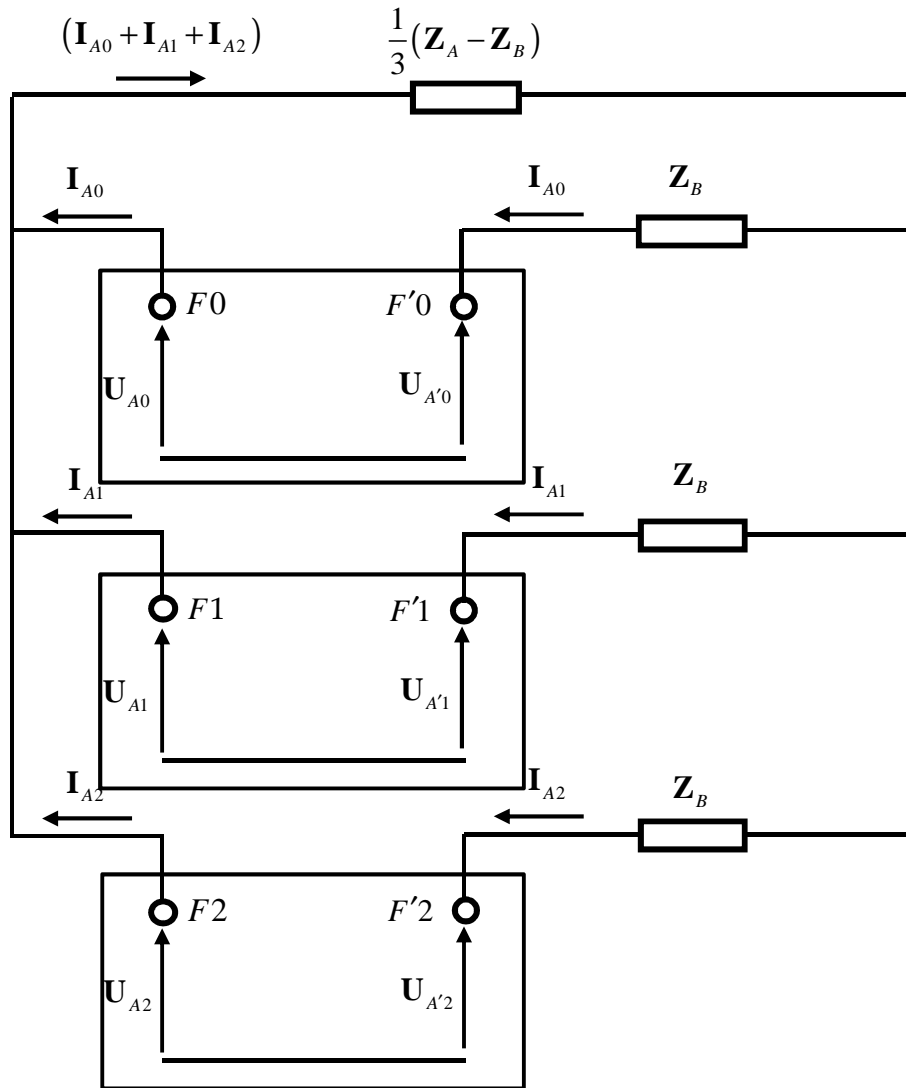


Figura 6-17: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta serie.

#### 6.4.2 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 6-17 que:

$$Z_A = \infty$$

La Figura 6-18 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.

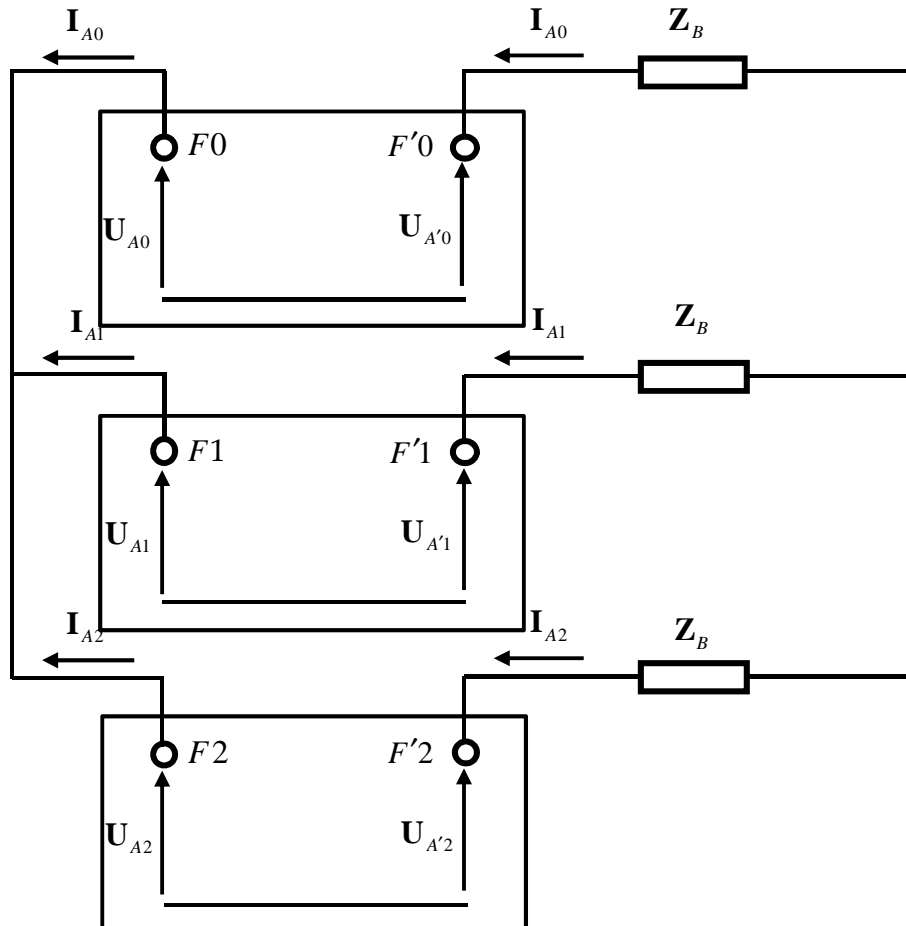


Figura 6-18: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de apertura de una fase.



## 7 Apéndice B: 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 transitorio:

- 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)

## 8 Apéndice C: Medidas en laboratorio

Este apéndice detalla las medidas realizadas en laboratorio en un transformador trifásico YNd que emula el transformador de arranque TARR y en un banco de tres unidades monofásicas YNd conectado a un transformador trifásico Dyn que emulan respectivamente el transformador principal TP y el transformador auxiliar TAUX.

### 8.1 Medidas en un transformador trifásico YNd

Se ha tomado el transformador trifásico nº 1752 de laboratorio de máquinas eléctricas de la ETS Ingeniería ICAI. Las características del citado transformador son:

6 kVA YN/d  
190 V/127 V

Se ha conectado el lado de 190 V (Y) del transformador a la red de 220 V tal y como se muestra en la Figura 8-1. El transformador se encontraba en vacío. El neutro del transformador se ha conectado al neutro de la red de 220 V.

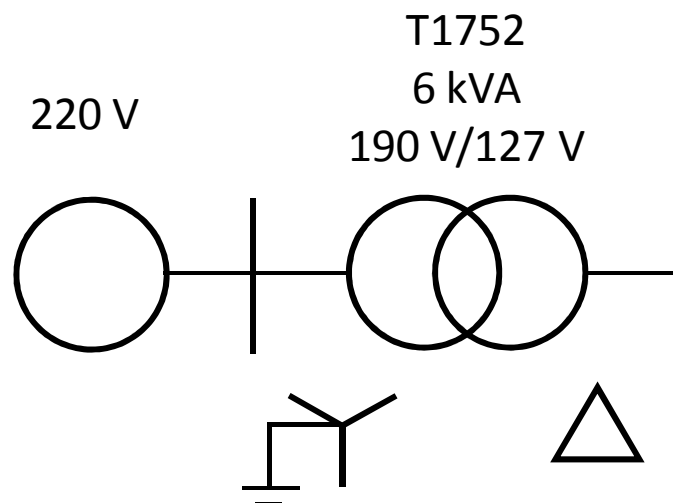


Figura 8-1: Conexión del transformador trifásico nº 1752 a la red de 220 V.

Se ha ensayado la ocurrencia de una fase abierta (fase A) en la conexión del transformador a la red de 220 V.

En el ensayo la tensión entre fases en el lado en estrella fue:

$$U_1 = 223.8 \text{ V}$$

En condiciones de prefault las corrientes de las fases ( $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$ ), la corriente de vacío ( $I_0$ ) y la corriente de neutro ( $I_N$ ) fueron:

$$I_A = 0.950 \text{ A}$$

$$I_B = 0.709 \text{ A}$$





IC = 1.057 A  
IO = 0.903 A  
IN = 0.283 A

En condiciones de posfalta las corrientes de las fases (IB e IC) y la corriente de neutro (IN) fueron:

IB = 1.39 A  
IC = 1.839 A  
IN = 3.09 A

La relación entre la corriente de neutro en condiciones de posfalta y la corriente de vacío en condiciones de prefalta es:

$$IN_{\text{posfalta}}/IO_{\text{prefalta}} = 3.09 \text{ A} / 0.903 \text{ A} = 3.4219$$

Que es ligeramente superior al valor calculado en el capítulo 3.

La Figura 8-2 muestra la corriente de neutro medida en condiciones de prefalta. La Figura 8-3 muestra las componentes armónicas corriente de neutro medida en condiciones de prefalta. La Figura 8-4 muestra la corriente de neutro medida en condiciones de posfalta. La Figura 8-5 muestra las componentes armónicas medida en condiciones de posfalta.

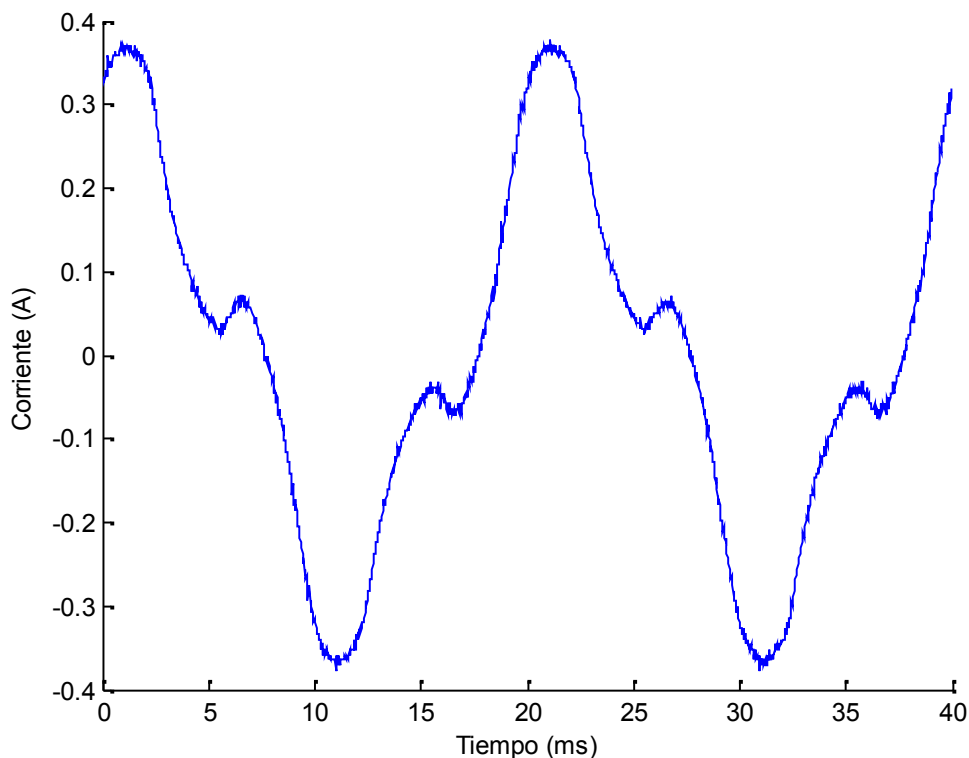


Figura 8-2: Corriente de neutro en condiciones de prefalta.

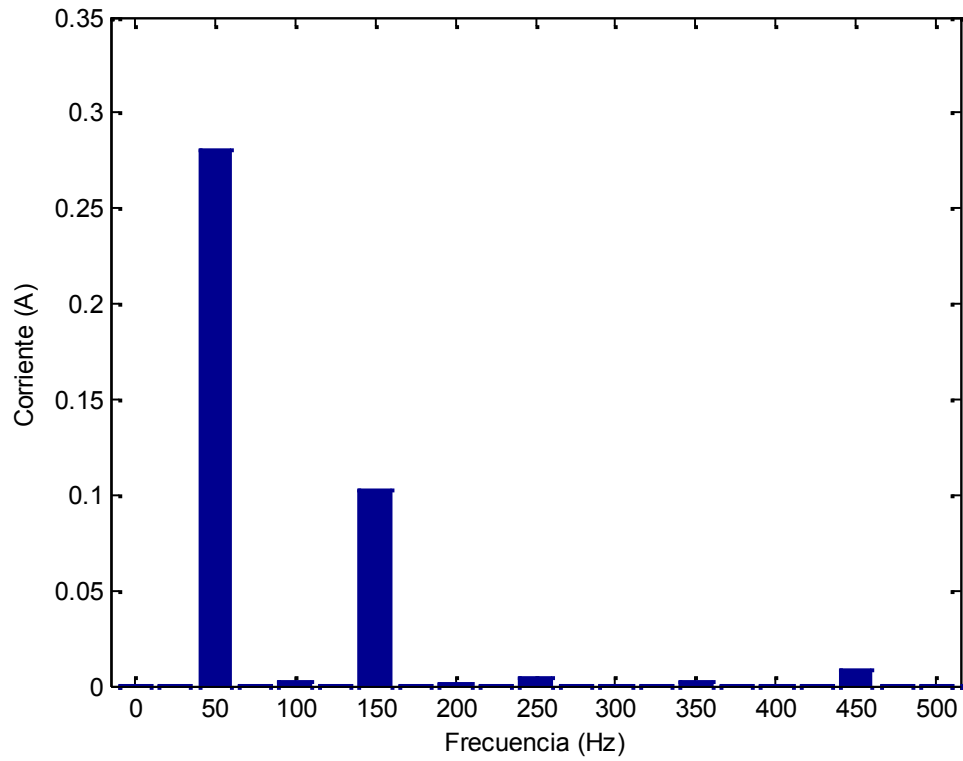


Figura 8-3: Componentes armónicas de la corriente de neutro en condiciones de prefalta.

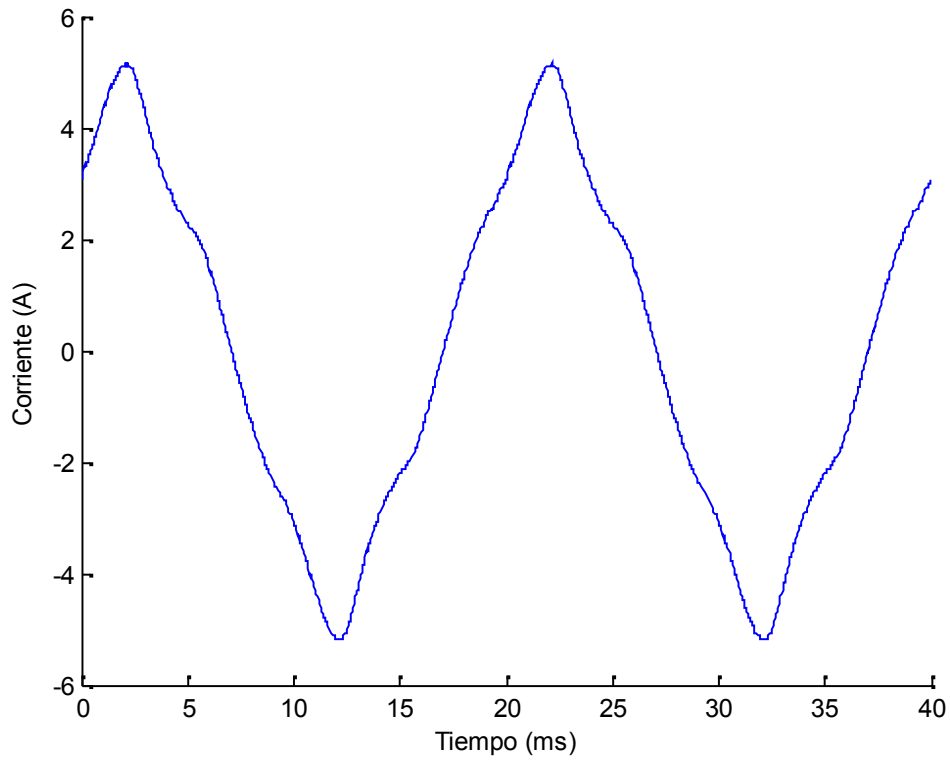


Figura 8-4: Corriente de neutro en condiciones de posfalta.

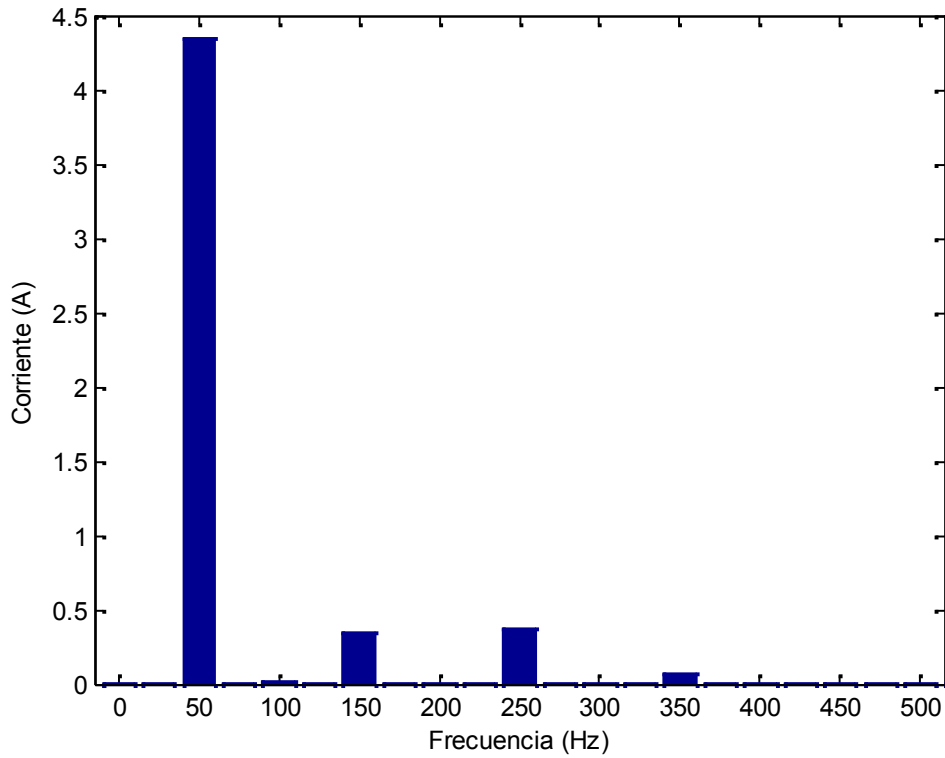


Figura 8-5: Componentes armónicas de la corriente de neutro en condiciones de posfalta.



La Tabla 8-1 detalla las componentes armónicas de la corriente de neutro en condiciones de prefalta y posfalta. Las componentes fundamental y de quinto orden experimentan cambios según lo obtenido en simulación. Por el contrario el tercer armónico en lugar de ser menor en condiciones de posfalta que en condiciones de prefalta es mayor.

**Tabla 8-1: Componentes armónicas de la corriente de neutro en condiciones de prefalta y posfalta.**

Condición	I1	I3	I5
Prefalta	0.281	0.103	0.00472
Posfalta	4.35	0.344	0.38

## 8.2 Medidas en un banco trifásico YNd conectado a un transformador trifásico YNd

Se ha tomado un banco de tres unidades monofásicas formado con los transformadores monofásicos nº 1710, 1711 y 1712 del laboratorio de máquinas eléctricas de la ETS Ingeniería ICAI. Las características del banco son:

3x4 kVA  
110 3 V/110 V

En el lado de 127 V se ha conectado el transformador trifásico nº 1752 cuyas características son:

6 kVA YN/d  
190 V/127 V

Se ha conectado el lado de 220 V (Y) del banco de tres unidades monofásicas a la red de 220 V tal y como se muestra en la Figura 8-6. Los transformadores se encontraban en vacío. El neutro del transformador se ha conectado al neutro de la red de 220 V.

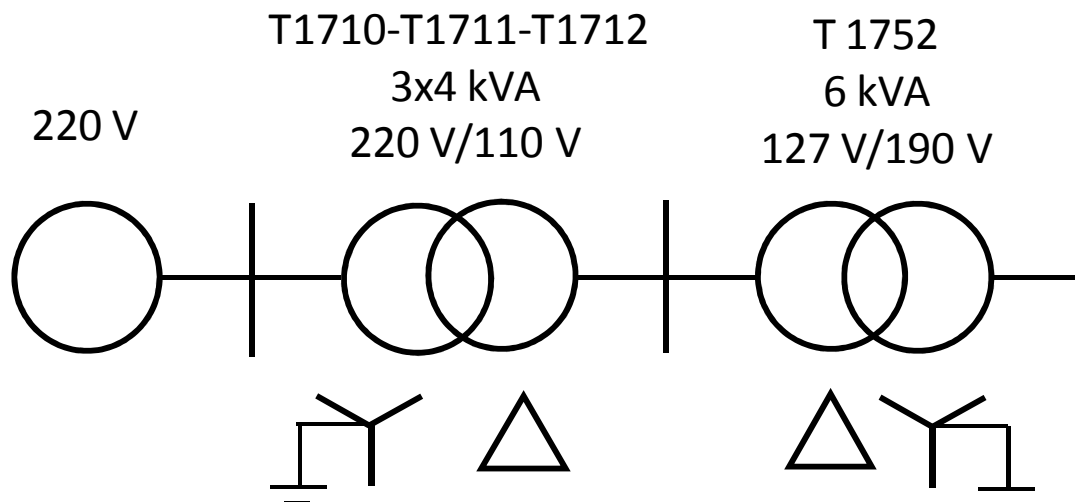


Figura 8-6: Conexión del banco de tres unidades monofásicas n° 1710, 1711 y 1712 y del transformador trifásico n° 1752 y a la red de 220 V.

Se ha ensayado la ocurrencia de una fase abierta (fase A) en la conexión del banco de tres unidades monofásicas a la red 220 V.

En el ensayo la tensión entre fases en el lado en estrella fue:

$$U_1 = 223.8 \text{ V}$$

En condiciones de prefalta las corrientes de las fases (IA, IB e IC), la corriente de vacío (I0) y la corriente de neutro (IN) fueron:

$$I_A = 0.396 \text{ A}$$

$$I_B = 0.340 \text{ A}$$

$$I_C = 0.674 \text{ A}$$

$$I_0 = 0.471 \text{ A}$$

$$I_N = 0.790 \text{ A}$$

En condiciones de posfalta las corrientes de las fases (IB e IC) y la corriente de neutro (IN) fueron:

$$I_B = 0.450 \text{ A}$$

$$I_C = 0.986 \text{ A}$$

$$I_N = 1.680 \text{ A}$$

La relación entre la corriente de neutro en condiciones de posfalta y la corriente de vacío es:

$$I_{N\_posfalta} / I_{0\_prefalta} = 1.680 \text{ A} / 0.471 \text{ A} = 3.5669$$

Que es ligeramente superior al valor calculado en el capítulo 4.



La Figura 8-7 muestra la corriente de neutro medida en condiciones de prefalta. La Figura 8-8 muestra las componentes armónicas corriente de neutro medida en condiciones de prefalta. La Figura 8-9 muestra la corriente de neutro medida en condiciones de posfalta. La Figura 8-10 muestra las componentes armónicas medida en condiciones de posfalta.

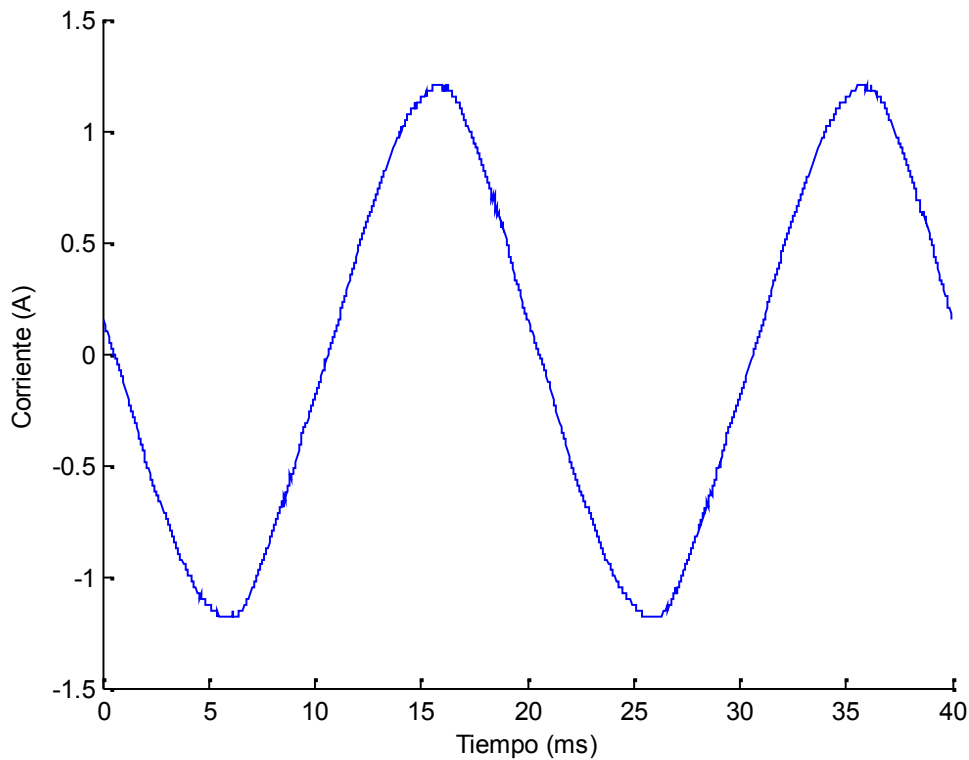


Figura 8-7: Corriente de neutro en condiciones de prefalta.

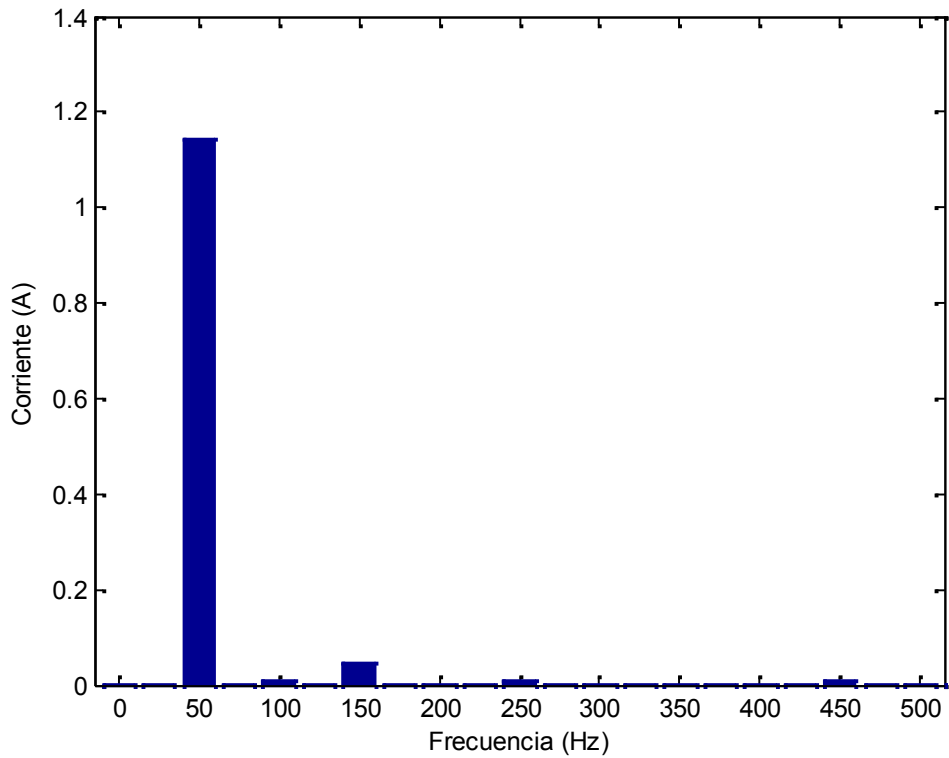


Figura 8-8: Componentes armónicas de la corriente de neutro en condiciones de prefalta.

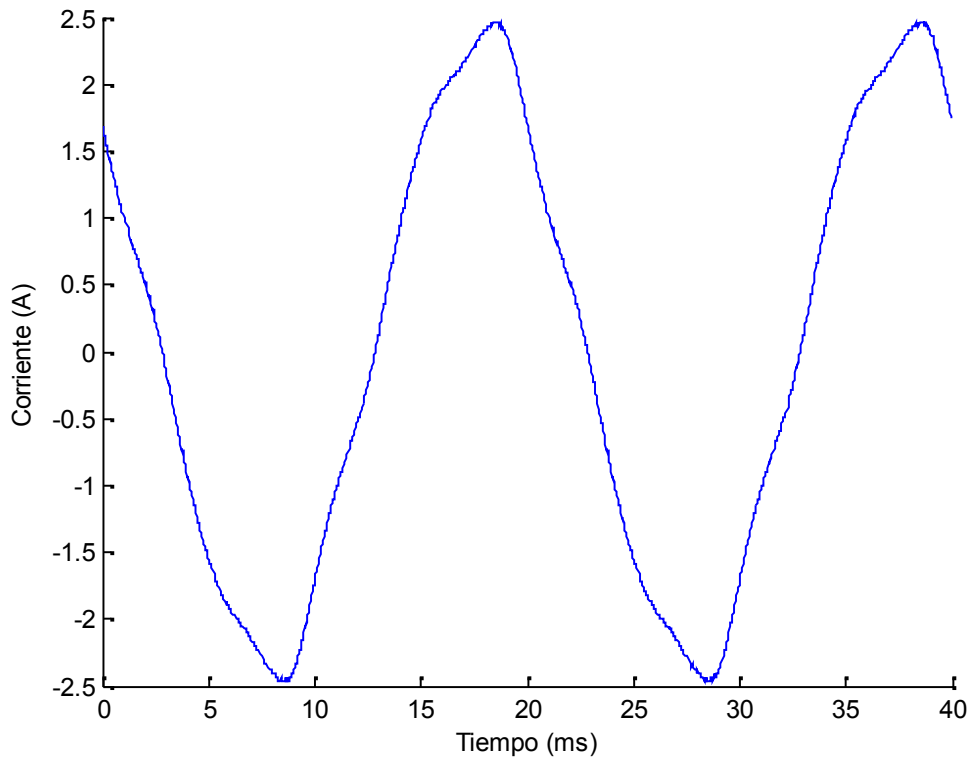


Figura 8-9: Corriente de neutro en condiciones de posfalta.

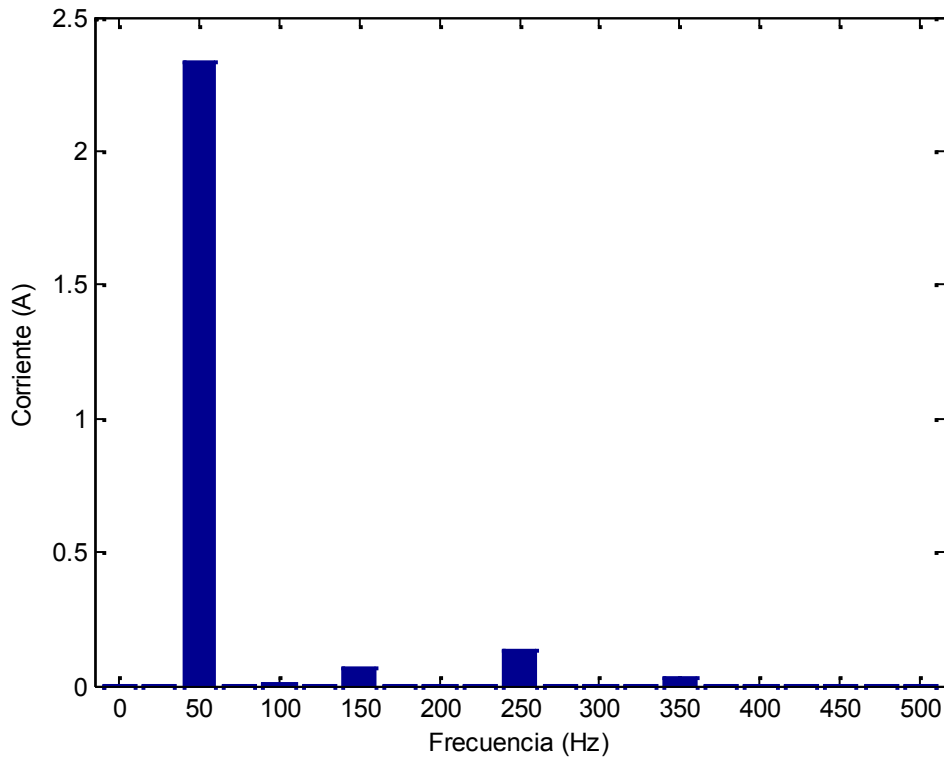


Figura 8-10: Componentes armónicas de la corriente de neutro en condiciones de posfalta.

La Tabla 8-2 detalla las componentes armónicas de la corriente de neutro en condiciones de prefalta y posfalta. Las componentes fundamental y de quinto orden experimentan cambios según lo obtenido en simulación. Por el contrario el tercer armónico en lugar de ser menor en condiciones de posfalta que en condiciones de prefalta es mayor.

Tabla 8-2: Componentes armónicas de la corriente de neutro en condiciones de prefalta y posfalta.

Condición	I1	I3	I5
Prefalta	1.14	0.0462	0.00999
Posfalta	2.33	0.0675	0.134





## 9 Referencias

- [1] NRC BULLETIN 2012-01: DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM, disponible en <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1207/ML12074A115.pdf>.
- [2] World Association of Nuclear Operators, WANO, [www.wano.info](http://www.wano.info).
- [3] 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>.
- [4] 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>
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] N. Y. Abed, F. Ashrafi, and K. Chang, "Simulation and detection of open phase for generating station auxiliary three phase transformers", IEEE PES General Meeting 2014.
- [9] 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=000000000001025772>
- [10] EPRI, "Development and Analysis of an Open-Phase Detection Scheme", (EPRI report 1026484) <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001026484>
- [11] A. Pontes Jiménez, "Estudio del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear", Proyecto Fin de Grado, Ingeniería Electromecánica, E.T.S. de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas, Mayo 2014.



- [12] L. Rouco, A. Pontes Jiménez, J. Archilla Martín-Sanz, "Estudio del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear: (I) Pérdida de una fase en el sistema de arranque", Anales de Mecánica y Electricidad, vol. XCI, no. V, pp. 34-40, Octubre 2014.
- [13] L. Rouco, A. Pontes, J. Archilla, "Open Phase Faults in the External Power Supply Systems of a Nuclear Power Generating Station: Symmetrical Components Analysis and EMTP Validation", propuesto a 2015 IEEE PES General Meeting, Denver, 26-30 Julio 2015.
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] EPRI, "Development and Analysis of an Open Phase Detection Scheme for Various Configurations of Auxiliary Transformers" disponible en <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000003002000764>
- [17] EPRI, "Interim Report: EPRI Open-Phase Detection Method", disponible en <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000003002004432>.
- [18] P.M. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems", IEEE Press Series on Power Engineering.
- [19] Alternative Transients Program (ATP), [www.euug.org](http://www.euug.org).
- [20] IEEE, "IEEE Standard for Preferred Power Supply (PPS) for Nuclear Power Generating Stations (NPGS)", IEEE Standard 765-2006.
- [21] O. I. Elgerd, "Electric Energy Systems Theory: An Introduction", Second Edition, Mc Graw Hill, 1982.
- [22] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, "Power System Analysis", Mc Graw Hill, 1994.
- [23] A. R. Bergen, V. Vittal, "Power System Analysis", Second Edition, Prentice Hall, 2000.
- [24] A. Gómez Expósito, A. J. Conejo, C. Cañizares, "Electric Energy Systems: Analysis and Operation", CRC Press, 2009.