

Sobre el autor



Luis Rouco Rodríguez, Alfonso Pontes Jiménez, Jacobo Archilla Martín-Sanz

Luis Rouco Rodríguez, Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Propio Ordinario de la E.T.S. de Ingeniería (ICAI).

Alfonso Pontes Jiménez, Ingeniero Industrial del ICAI, Deloitte.

Jacobo Archilla Martín-Sanz, Ingeniero Industrial del ICAI, Iberdrola.

Resumen del artículo

Un artículo anterior de los autores ha analizado el impacto de la pérdida de una fase en el sistema de alimentación de arranque de una central nuclear. El citado artículo abordó un problema motivado por el incidente acaecido el día 30 de enero de 2012 en la unidad 2 de la central nuclear Byron en los Estados Unidos de América. Este artículo concluye el estudio comenzado por el citado artículo, abordando el caso de pérdida de una fase en el sistema de alimentación principal. El estudio comprende el cálculo analítico de las corrientes y tensiones por medio del método de componentes simétricas y la validación de los cálculos analíticos por medio de simulación en el dominio del tiempo con el programa EMTP.

Palabras clave

Faltas serie. Componentes simétricas. EMTP. Centrales nucleares. Sistemas alimentación exterior.

Abstract

A previous paper of the authors has studied the impact of the loss of a phase in one of the electrical supply systems (the start-up system) of nuclear power system. The study was motivated by an incident occurred on January 30, in unit 2 of Byron nuclear station in the USA that 2012 involved the loss of a phase in the electrical supply system. This

paper addressed the loss of a phase in the main electrical supply system. The study consists of the analytical computation of currents and voltages by symmetrical components method and the validation of the analytical computations by time domain simulation using the EMTP program.

Keywords

Series faults. Symmetrical components. EMTP. Nuclear power plants. Electrical supply systems.

Acrónimos

EMTP: ElectroMagnetic Transients Program.

ATP: Alternative Transients Program.

TP. Transformador Principal.

TAUX: Transformador Auxiliar.

TARR: Transformador de Arranque.

SS.AA.: Servicios auxiliares.

HP: Horse Power.

Estudio del impacto de la pérdida de una fase en los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear: (y II) Pérdida de una fase en el sistema principal

30 noviembre, 2017

Introducción

Un artículo anterior de los autores [1] ha analizado el impacto de la pérdida de una fase en el sistema de alimentación de arranque de una central nuclear. El citado artículo abordó un problema motivado por el incidente acaecido el día 30 de enero de 2012 en la unidad 2 de la central nuclear Byron en los Estados Unidos de América [2]. El incidente ocurrido en la central nuclear Byron involucró la pérdida de una fase (falta serie) en uno de los sistemas de alimentación exterior.

Las centrales nucleares tienen, normalmente, dos sistemas de alimentación exterior: principal y arranque [3]. Este artículo contempla la pérdida de una fase en el sistema de principal. El artículo precedente analizó la pérdida de una fase en el sistema arranque.

Se busca determinar si los medios de detección de tensión en las barras de servicios auxiliares detectarían la apertura de una fase.

El estudio del impacto de la pérdida de la pérdida de una fase en uno de los sistemas de alimentación exterior determina las tensiones y corrientes por dos métodos:

1. Cálculo analítico mediante el uso de componentes simétrica [3].
2. Simulación en dominio del tiempo utilizando la versión ATP del programa EMTP [5].

El valor del cálculo analítico es ofrecer relaciones fundamentales. La simulación en el dominio del tiempo será utilizada para validar los resultados obtenidos con los cálculos analíticos.

Los sistemas de alimentación exterior de una central nuclear

La Figura 1 muestra el esquema unifilar de los sistemas de alimentación exterior de central nuclear del caso de estudio. El generador está conectado a la red a 400 kV a través del transformador principal 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 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 1 se han representado un único transformador auxiliar y un único transformador de arranque, una central de estas características tiene dos transformadores auxiliares y dos transformadores de arranque.

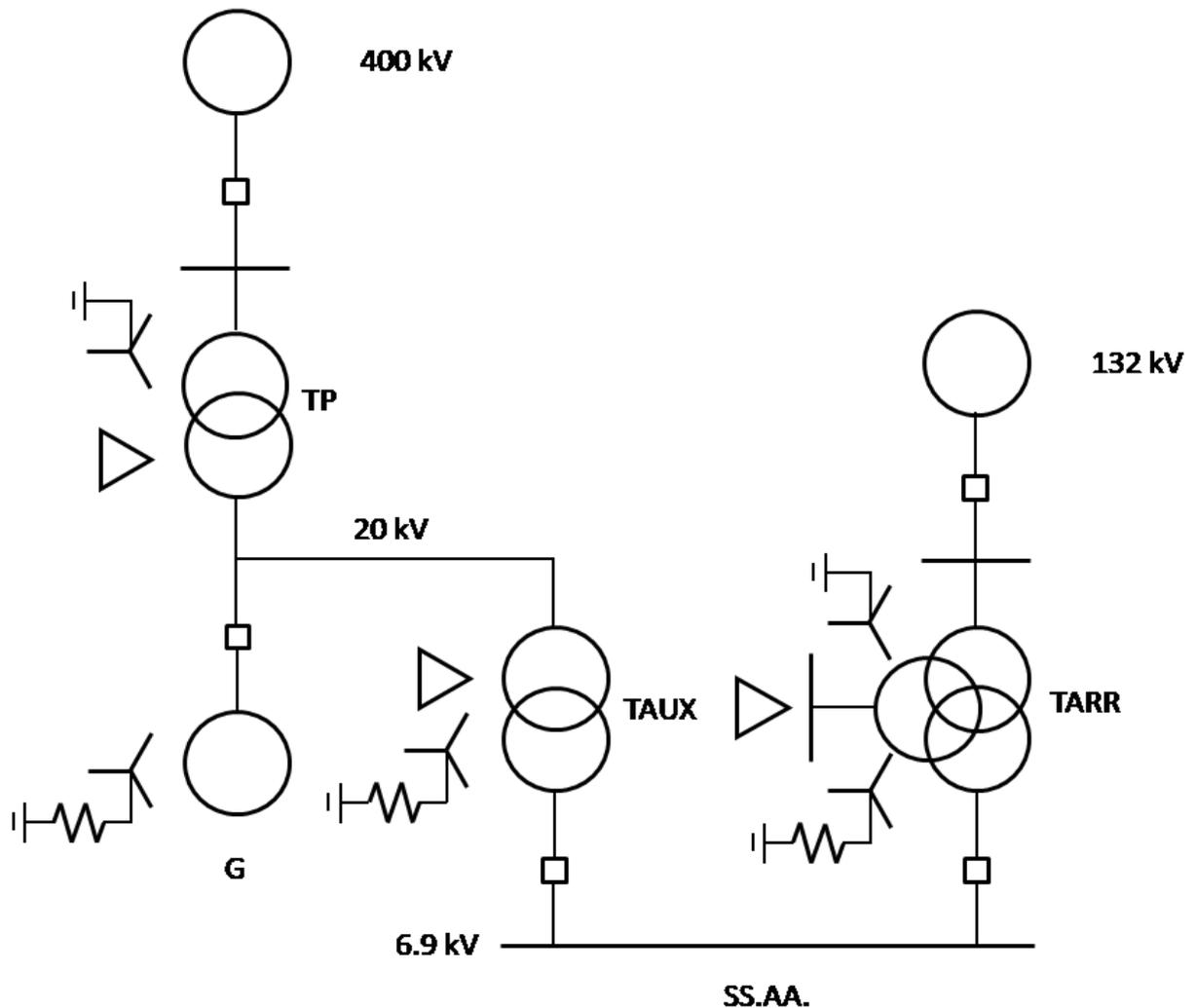


Figura 1: Esquema unifilar de los sistemas de alimentación exterior de la central nuclear del caso de estudio.

Cálculo analítico de una falta serie en la alimentación a 400 kV a una central nuclear

Esta sección analiza la ocurrencia de una falta serie en la alimentación a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio por medio de componentes simétricas. De forma más precisa, se determinan las tensiones en barras de 6.9 kV alimentadas de la red a 400 kV a través del transformador principal TP y el transformador auxiliar TAUX cuando se producen faltas serie por apertura de una fase en la alimentación a 400 kV. Se considerará la existencia de una falta serie por apertura de una fase en dos casos:

- Caso 1: cuando arranca un motor de 2500 HP. El motor será representado por la impedancia de cortocircuito del motor tanto a la secuencia directa como a la secuencia inversa. El neutro del motor no está accesible.

- Caso 2: cuando un motor de 2500HP está conectado funcionando a tensión y corriente nominal. El motor se representa por sus impedancias equivalentes a las secuencias directa e inversa calculadas.

Se considera la alimentación a las barras de 6.9 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 de grupo de conexión YNd11. El transformador auxiliar TAUX es un transformador trifásico de grupo de conexión Dyn1. El neutro del arrollamiento de 6.9 kV está conectado a tierra a través de una resistencia.

La Figura 2 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.

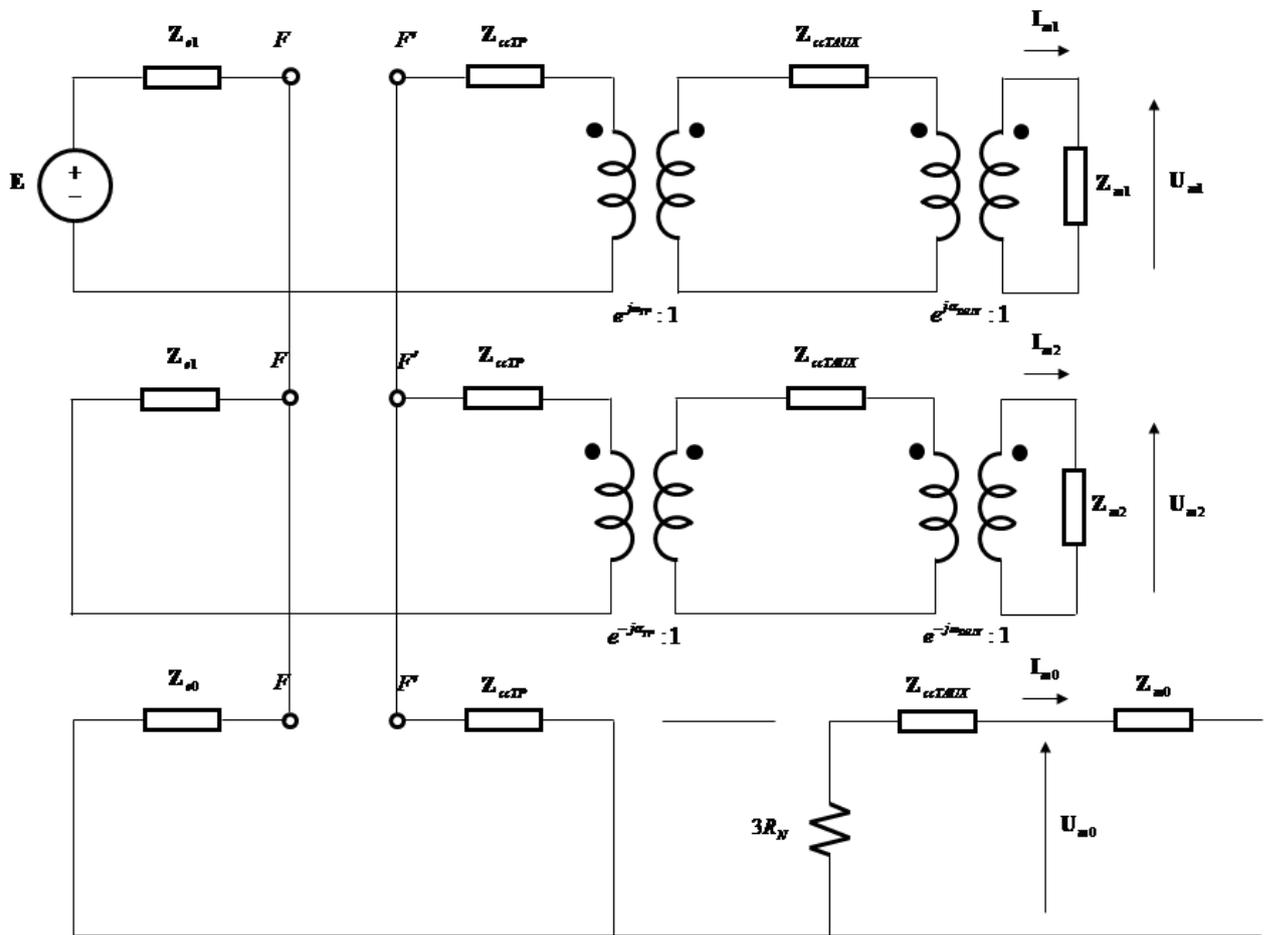


Figura 2: Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia de falta serie en la barra de 420 kV

La Figura 2 pone de manifiesto que si las barras de 6.9 kV estuvieran en vacío las corrientes de secuencia serían nulas. Por supuesto, ello es así si se considera despreciable la corriente de magnetización de los transformadores TP y TAUX.

La corriente de secuencia homopolar por el motor es nula:

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

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

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

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

Siendo:

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{ccTP} + \mathbf{k}_{1TP}^2 (\mathbf{Z}_{ccTAUX} + \mathbf{k}_{1TAUX}^2 \mathbf{Z}_{m1})$$

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_{e1} + \mathbf{Z}_{ccTP} + \mathbf{k}_{2TP}^2 (\mathbf{Z}_{ccTAUX} + \mathbf{k}_{2TAUX}^2 \mathbf{Z}_{m2})$$

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

donde:

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

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

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

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

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{Z}_{ccTP}} & \frac{-\mathbf{k}_{TP,2}}{\mathbf{Z}_{ccTP}} & 0 \\ \frac{-\mathbf{k}_{TP,2}}{\mathbf{Z}_{ccTP}} & \frac{\mathbf{k}_{TP,2}^2}{\mathbf{Z}_{ccTP}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{ccTAUX}} & \frac{-\mathbf{k}_{TAUX,2}}{\mathbf{Z}_{ccTAUX}} \\ 0 & \frac{-\mathbf{k}_{TAUX,2}}{\mathbf{Z}_{ccTAUX}} & \frac{\mathbf{k}_{TAUX,2}^2}{\mathbf{Z}_{ccTAUX}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{m2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{400kV2} \\ \mathbf{U}_{20kV2} \\ \mathbf{U}_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m2}'' \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{aligned}
\mathbf{I}_{TP1} &= \mathbf{I}_{m1}'' \\
\mathbf{I}_{TP2} &= \mathbf{I}_{m2}'' \\
\mathbf{I}_{TP0} &= -\frac{\frac{1}{\mathbf{Z}_0}}{\frac{1}{\mathbf{Z}_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_0}} \mathbf{I}_{m1}''
\end{aligned}$$

La Tabla 1 resume los resultados más destacados del análisis de falta serie en la alimentación a 400 kV.

Magnitud	Arranque directo del motor de 2500 HP	Funcionamiento normal
Menor tensión compuesta en 6.9 kV (pu)	0.9791	1.0041
Desequilibrio de tensiones en 6.9 kV (%)	0.13	0.02
Desequilibrio de corrientes en 6.9 kV (%)	0.13	0.14
Corriente homopolar en 400 kV (A)	13.7773	2.8330

Tabla 1: Resumen de resultados del análisis de falta serie en la alimentación a 400 kV.

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

Simulación de una falta serie en la alimentación a 400 kV a una central nuclear

Esta sección simula en el dominio del tiempo con el programa ATP la ocurrencia de una falta serie en la alimentación a 132 kV de la central nuclear del caso de estudio. El ATP es la versión de dominio público del programa ElectroMagnetic Transients Program (EMTP). El EMTP es un programa de ordenador que permite simular en el dominio del tiempo transitorios electromagnéticos, electromecánicos, y en sistemas de control.

Se obtienen por simulación con el programa ATP las tensiones en barras de 6.9 kV y de 400 kV y las corrientes en los lados de 400 kV y de 6.9 kV del transformador auxiliar

TAUX cuando se produce una falta serie por apertura de una fase en la alimentación a 400 kV cuando arranca un motor de 2500 HP. El motor está representado por la impedancia de cortocircuito del motor como impedancia trifásica sin acoplamiento magnético. El neutro del motor no está accesible.

La Figura 3 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, el modelo detallado de los transformadores TP y TAUX y el modelo estático del motor de 2500 HP en el momento del arranque. Se considera que la fase A en el lado de 400 kV del transformador TP está abierta en régimen permanente.

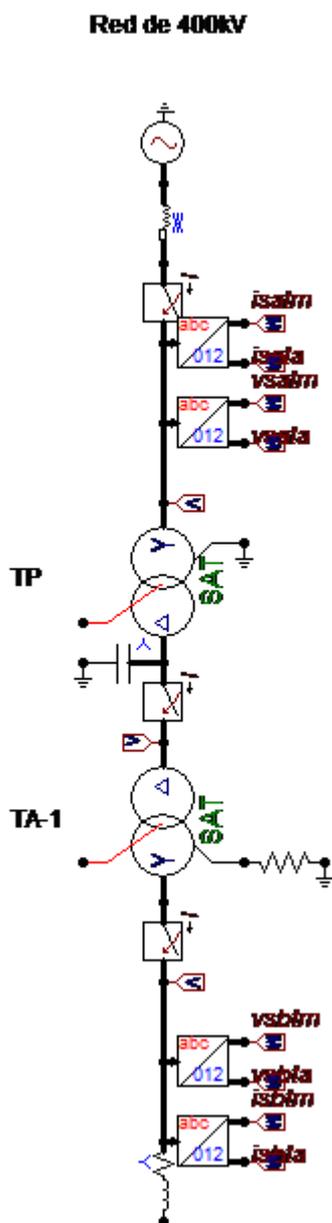


Figura 3: Modelo de simulación de la alimentación a 400 kV de la central nuclear del caso de estudio: modelo estático del motor.

La Figura 4 y la Figura 5 muestran respectivamente las tensiones de fase en el lado de 400 kV y en el lado 6.9 kV del transformador TAUX. La Figura 6 y la Figura 7 muestran las corrientes de línea en el lado de 400 kV y en el lado 6.9 kV del transformador TAUX.

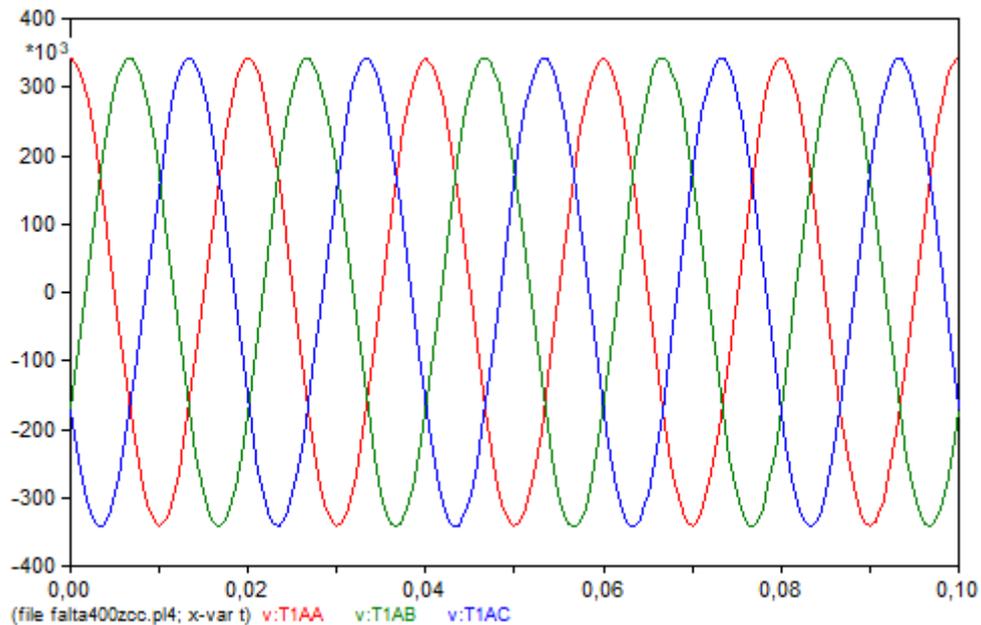


Figura 4: Tensiones fase-neutro en el lado de 400 kV del transformador TP.

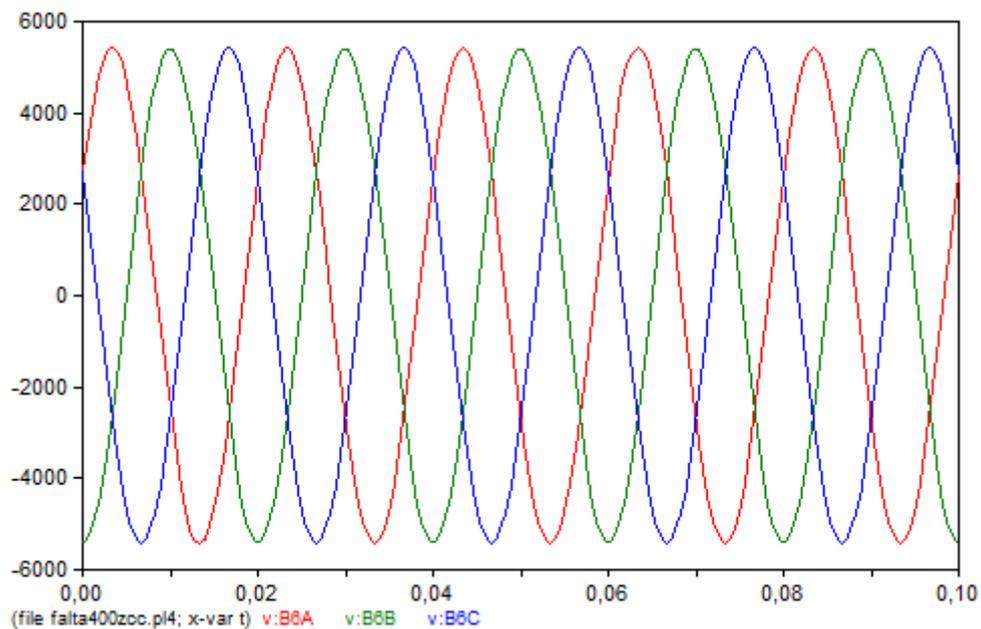


Figura 5: Tensiones fase-neutro en el lado de 6.9 kV del transformador TAUX.

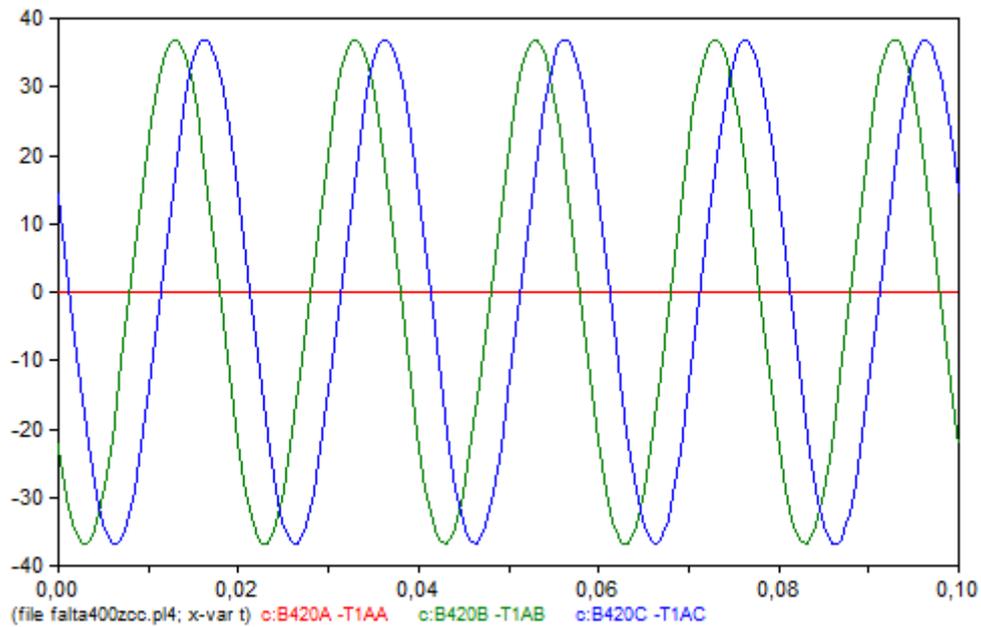


Figura 6: Corrientes de línea en el lado de 400 kV del transformador TP.

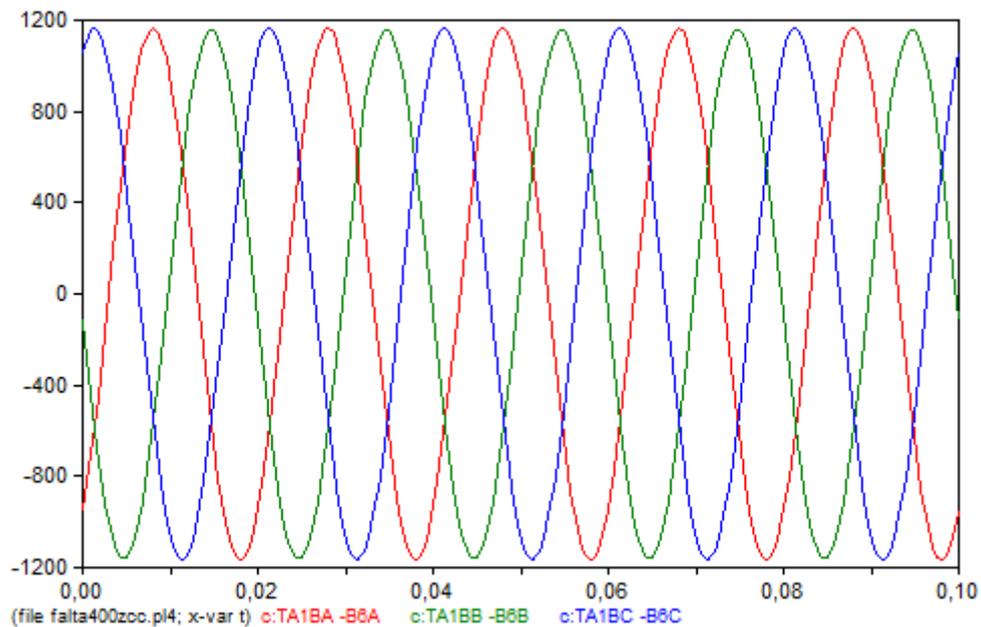


Figura 7: Corrientes de línea en el lado de 6.9 kV del transformador TAUX.

La Tabla 2 compara las corrientes de línea en el lado de 400 kV del transformador TP y del lado de 6.9 kV del transformador TAUX) obtenidos por simulación y por cálculo analítico en el caso 1. Las diferencias son muy pequeñas. Ello confirma la validez y coherencia de ambos modelos.

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

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

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

Conclusiones

El cálculo analítico por medio de componentes simétricas de la ocurrencia de una falta serie en la alimentación principal (a 400 kV) de la central nuclear del caso de estudio ha quedado validado por medio de simulación en el dominio del tipo con el programa ATP. De los cálculos y simulaciones realizadas, se puede concluir:

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

Referencias

- 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.
- NRC BULLETIN 2012-01: DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM, disponible en <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1207/ML12074A115.pdf>.
- IEEE, “IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations”, IEEE Std 308-2001, 2001.
- M. Anderson, “Analysis of Faulted Power Systems”, IEEE Press Series on Power Engineering.
- Alternative Transients Program (ATP), [euug.org](http://www.euug.org).