

# 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



**Palabras clave:** faltas serie, componentes simétricas, EMTP, centrales nucleares, sistemas de alimentación exterior.

**Key words:** series faults, symmetrical components, EMTP, nuclear power plants, electrical supply systems.

## Resumen:

Una de las prácticas más notables que lleva a cabo la industria nuclear para alcanzar los más elevados niveles de seguridad, en el marco de WANO, es el análisis de cómo cada planta respondería ante un incidente acaecido en otra planta. El día 30 de enero de 2012 se produjo un incidente en la unidad 2 de la central nuclear Byron en los Estados Unidos de América que involucró una pérdida de una fase en uno de los sistemas de alimentación exterior. Este artículo estudia el impacto de la pérdida de una fase en uno de los sistemas de alimentación exterior (el sistema de arranque) de una central nuclear con sistemas de alimentación exterior de configuración típica. 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. En un artículo futuro se abordará el impacto de la pérdida de una fase en el sistema de alimentación principal.

## Abstract:

One of the most relevant practices that the nuclear power industry carries out within WANO to achieve the highest levels of security is to analyze how every plant would respond to an incident occurred in any plant. On January 30, 2012, an incident that involved the loss of a phase in the electrical supply system occurred in unit 2 of Byron nuclear station in the USA. This paper studies 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 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. A future paper will address the impact of the loss of a phase in the main electrical supply system.



**Luis Rouco Rodríguez**

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



**Alfonso Pontes Jiménez**

Ingeniero Electromecánico del ICAI. Alumno del Máster Ingeniero Industrial del ICAI.



**Jacobo Archilla Martín-Sanz**

Ingeniero Industrial del ICAI. Iberdrola.

## Introducción

La seguridad es el factor fundamental que afecta la generación de energía eléctrica con plantas nucleares. La seguridad de las centrales nucleares es vigilada por organismos reguladores nacionales. En España, el Consejo de Seguridad Nuclear ejerce dicha función [1]. Aparte de los organismos nacionales, existen diversos organismos internacionales que cooperan para asegurar la seguridad de las centrales nucleares. Merece especial relevancia la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (World Association of Nuclear Operators, WANO). WANO [2] reúne a todas las compañías y países en el mundo con centrales nucleares en operación comercial con el propósito de alcanzar los más elevados niveles de seguridad nuclear. Para alcanzar dicho objetivo, WANO hace que los operadores nucleares del mundo trabajen juntos para valorar y mejorar el comportamiento de las plantas gracias al apoyo mutuo, el intercambio de información y la imitación de las mejores prácticas. Entre otras prácticas, WANO tiene establecido un procedimiento de comunicación de inci-

dentos ocurridos en plantas nucleares que puedan afectar su seguridad para que los restantes operadores puedan aprender de ellos.

Este artículo parte del análisis que hizo la Comisión Regulatoria Nuclear (NRC) del gobierno de los Estados Unidos de un incidente ocurrido en la central nuclear Byron situada en el estado de Illinois en los Estados Unidos de América [3]. El incidente ocurrido en la central nuclear Byron involucró la pérdida de una fase (falta serie) en uno de los sistemas de alimentación exterior. De forma más precisa, se busca determinar si los medios de detección de tensión en las barras de servicios auxiliares detectarían la apertura de una fase.

Las centrales nucleares tienen, normalmente, dos sistemas de alimentación exterior: principal y arranque. Este artículo contempla la pérdida de una fase en el sistema de arranque. Un artículo posterior considerará la pérdida de una fase en el sistema principal.

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

- Cálculo analítico mediante el uso de componentes simétricas [4].

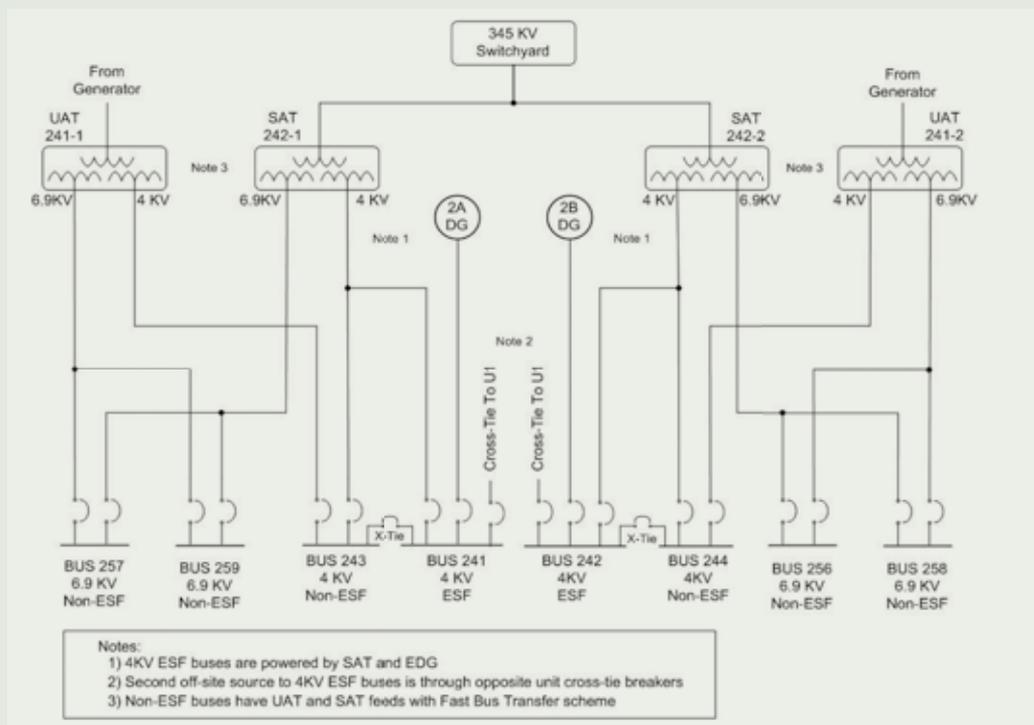
- Simulación en dominio del tiempo utilizando la versión ATP del programa ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) [5].

Si bien la aplicación de la teoría de componentes simétricas al análisis de faltas desequilibradas en paralelo (monofásicas a tierra, bifásicas, bifásicas a tierra) es bien conocida y utilizada y puede encontrarse en un gran número de libros [6-9], su aplicación al análisis de faltas desequilibradas serie (apertura de una fase o de dos fases) es más desconocida y más difícil de encontrar en la literatura [4]. 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.

## El incidente de la central nuclear Byron del 30 de enero de 2012

La central nuclear Byron (Figura 1) tiene dos unidades con una potencia total de 2.346 MW. La unidad 1 entró en servicio en 1985 y la unidad 2 lo

Figura 1. Esquema unifilar de la central nuclear Byron [3]



hizo en 1987. Está equipada con reactores tipo PWR de Westinghouse y es propiedad de Exelon Corporation. El día 30 de enero de 2012 se produjo un disparo automático en la unidad 2, estando ésta operativa a plena potencia, debido al disparo de dos (de las cuatro) bombas de refrigeración del reactor por una subtensión en las barras de 6,9 kV, que fue provocada por la rotura de un aislador de la fase C y falta a tierra en el parque de 345 kV que alimenta los transformadores SAT (Station Auxiliary Transformers).

Después del disparo del reactor, las barras de 6,9 kV que alimentaban las otras dos bombas de refrigeración del reactor fueron transferidas de los transformadores UAT (Unit Auxiliary Transformers) a los transformadores SAT. Como la fase C estaba abierta, se produjo el disparo de las dos bombas de refrigeración que seguían en servicio por sobrecorriente de las fases A y B. Aunque la fase C seguía abierta, los transformadores SAT seguían alimentando barras de 6,9 kV y de 4,16 kV. Algunas cargas dispararon por sobrecorriente debido al funcionamiento en condiciones desequilibradas. La apertura de la fase C fue detectada 8 minutos después del disparo del reactor, cuando los operadores de sala de control accionaron el conmutador de detección de tensión compuesta de A-B a B-C y C-A.

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

Las centrales nucleares tienen, normalmente, dos sistemas de alimentación exterior [10]:

- **Principal:** la red de transporte, a la cual vierte su producción la central nuclear.
- **Arranque:** la citada red de transporte (si tiene dos líneas de evacuación) o una red de nivel de tensión y capacidad inferior, que permite el arranque en caso de indisponibilidad de la red de transporte, a la cual vierte su producción la central nuclear.

La Figura 2 muestra el esquema unifilar de los sistemas de alimentación exterior de la central nuclear del caso de estudio. El generador está conectado a



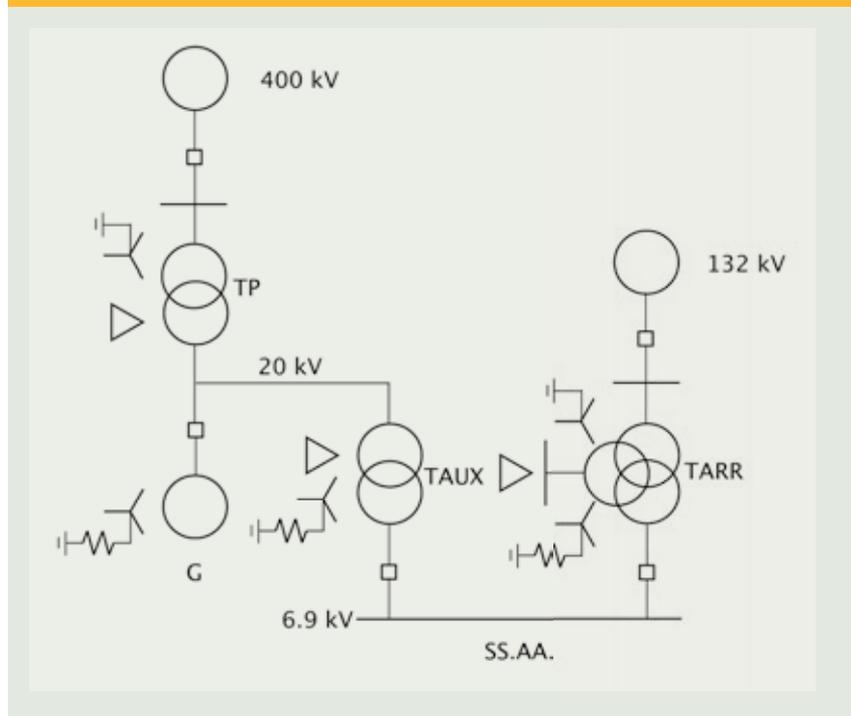
la red a 400 kV a través del transformador principal TP. La red a 400 kV es la red de transporte a la cual la central vierte su producción. Se considera que existe interruptor de generación, que permite aislar el generador del resto del sistema eléctrico de la central, permitiendo que, en caso de parada 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 2 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.

### Cálculo analítico de una falta serie en la alimentación a 132 kV a una central nuclear

Esta sección analiza la ocurrencia de una falta serie en la alimentación a 132 kV de la central nuclear del caso de estudio por medio de componentes simétricas. Se determinan

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



las tensiones en barras de 6,9 kV alimentadas de la red a 132 kV a través del transformador de arranque TARR cuando se produce una falta serie por apertura de una fase en las alimentaciones a 132 kV. Se considera la existencia de una falta serie por apertura de una fase en dos casos:

- **Caso 1:** cuando arranca un motor de 2.500 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 2.500 HP está conectado funcionando a tensión y corriente nominal. El motor se representa por sus impedancias equivalentes de secuencia directa e inversa.

El caso 1 viene a representar de forma extremadamente desfavorable el estado del motor cuando se realiza una transferencia lenta de cargas a las barras alimentadas desde el sistema de alimentación de arranque tras la pérdida del sistema de alimentación principal. El caso 2, por el contrario,

representaría de forma extremadamente favorable el estado del motor cuando se realiza una transferencia rápida de cargas. En otras palabras los casos 1 y 2 serían las situaciones extremas de funcionamiento del motor de 2.500 HP.

La Figura 3 muestra la conexión de los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar en el caso de una falta serie en la alimentación a 132 kV. Se ha considerado la representación de los circuitos equivalentes de secuencia en magnitudes reales vista desde barras de 6,9 kV.

La Figura 3 pone de manifiesto que si las barras de 6,9 kV estuvieran en vacío las corrientes de secuencia serían nulas. Por supuesto, ello es así si se considera despreciable la corriente de magnetización del transformador TARR.

Las tensiones de secuencia en bornes del motor de 6,9 kV se calculan como:

$$\begin{aligned} U_{m1} &= Z_{m1} I_{m1} \\ U_{m2} &= Z_{m2} I_{m2} \\ U_{m0} &= 0 \end{aligned} \quad (I)$$

siendo:

$$I_{m1} = \frac{E}{Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}}}$$

$$I_{m2} = -\frac{\frac{1}{Z_2}}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} I_{m1}$$

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{e1} + Z_{cc1} + Z_{cc2} + Z_{m1} \\ Z_2 &= Z_{e1} + Z_{cc1} + Z_{cc2} + Z_{m2} \\ Z_0 &= Z_{e0} + Z_{cc1} + Z_{cc3} \end{aligned}$$

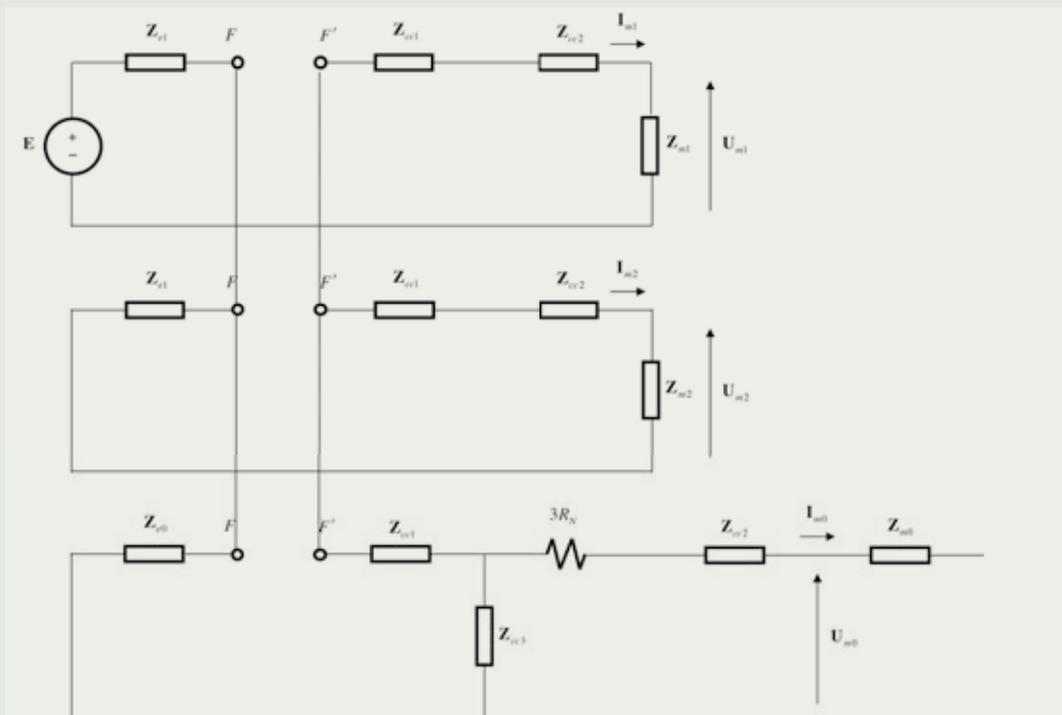
Las tensiones de secuencia en alta tensión del transformador se calculan como:

$$\begin{aligned} U_{at1} &= (Z_{cc1} + Z_{cc2} + Z_{m1}) I_{at1} \\ U_{at2} &= (Z_{cc1} + Z_{cc2} + Z_{m1}) I_{at2} \\ U_{at0} &= (Z_{cc1} + Z_{cc3}) I_{at2} \end{aligned} \quad (2)$$

siendo:

$$\begin{aligned} I_{at1} &= I_{m1} \\ I_{at2} &= I_{m2} \\ I_{at0} &= -\frac{\frac{1}{Z_0}}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} I_{m1} \end{aligned}$$

Figura 3. Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta serie en la barra de 132 kV



A partir de las tensiones de secuencia (1) y (2) se obtienen las tensiones simples de cada una de las fases por medio de la transformación de componentes simétricas. A partir de las tensiones simples se obtienen las tensiones compuestas. Además, resulta interesante, para comprobar la magnitud del desequilibrio, estudiar el cociente entre tensiones de secuencia (directa e inversa), así como intensidades, en el lado del motor:

$$\frac{U_{m2}}{U_{m1}}$$

$$\frac{I_{m2}}{I_{m1}}$$

La Tabla I resume los resultados más destacados del análisis de falta serie en la alimentación a 132 kV.

Las variaciones de tensión en barras de 6,9 kV no permiten determinar la ocurrencia de una fase abierta en ninguna de las alimentaciones ya que variaciones de tensión que pueden dar lugar a una actuación instantánea son típicamente del 70 u 80%. Sin embargo, el desequilibrio medido como relación entre las intensidades de secuencia inversa y directa es apreciable (5,9%) y la corriente homopolar en el lado de alta tensión de la alimentación (132 kV) es muy superior a la corriente homopolar en el caso de falta franca a tierra en el lado de 6,9 kV (3,53 A).

Lógicamente, cuando se produce el arranque directo del motor de 2.500 HP, la variación de las tensiones compuestas y los desequilibrios de tensiones y corrientes en barras de 6,9 kV y de corriente homopolar en 132 kV son mayores que cuando el motor está en funcionamiento normal.



### Simulación de una falta serie en la alimentación a 132 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 EMTP. El EMTP es un programa de ordenador que permite simular en el dominio del tiempo transitorios electromagnéticos, electromecánicos y en sistemas de control.

El programa EMTP fue desarrollado por Herman Dommel a finales de los años 60 en la Bonneville Power Administration (BPA) para el estudio de transitorios de maniobra en redes eléctricas. Durante los años 70 y primera mitad de los 80 fueron incorporadas nuevas capacidades de modelado (máquinas eléctricas, sistemas de control, etc.). El desarrollo del EMTP fue realizado con fondos del gobierno de los Estados Unidos, por lo que el programa tenía carácter público. La versión ATP fue creada para mantener el carácter público del EMTP. Es distribuida por el European EMTP User's Group (EEUG).

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).

Tabla I. Resumen de resultados del análisis de falta serie en la alimentación a 132 kV

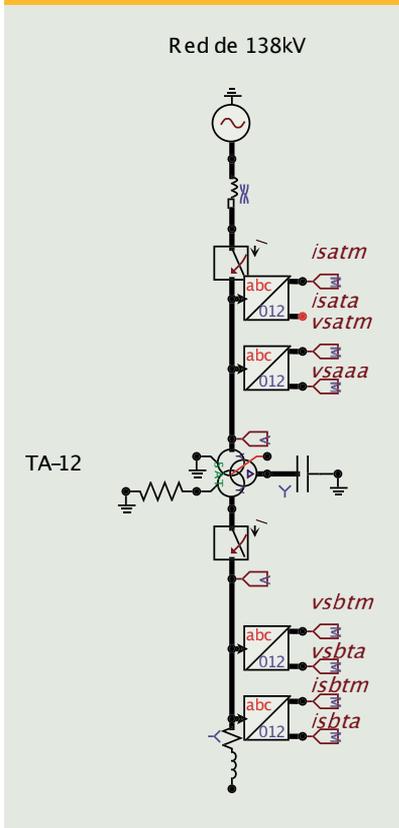
Magnitud	Arranque	Funcionamiento normal
Menor tensión compuesta en 6,9 kV (pu)	0,8708	0,9791
Desequilibrio de tensiones en 6,9 kV (%)	5,90	1,18
Desequilibrio de corrientes en 6,9 kV (%)	5,90	5,96
Corriente homopolar en 132 kV (A)	36,20	8,01

Se obtienen por simulación con el programa ATP las tensiones en barras de 6,9 kV y de 132 kV y las corrientes en los lados de 132 kV y de 6,9 kV del transformador de arranque TARR cuando se produce una falta serie por apertura de una fase en la alimentación a 132 kV cuando arranca un motor de 2.500 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.

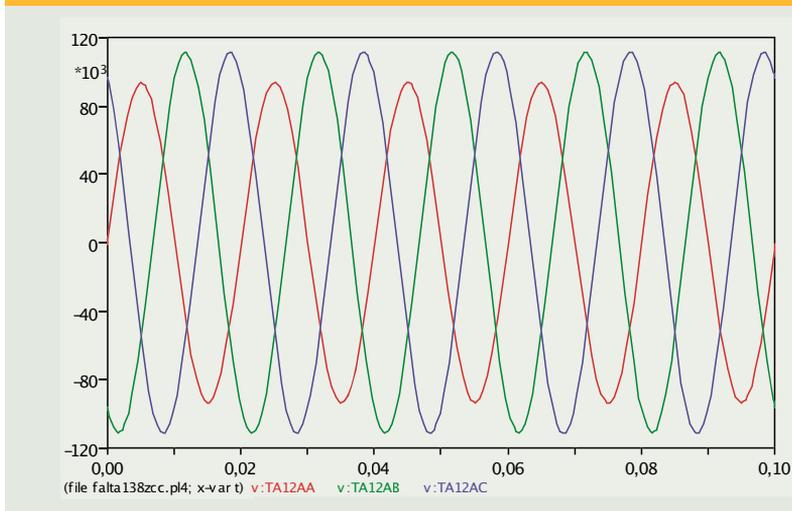
La Figura 4 muestra el modelo de simulación de la alimentación a 132 kV de la central nuclear del caso de estudio. Incluye el modelo de la red, el modelo detallado del transformador TARR y el modelo estático del motor de 2.500 HP en el momento del arranque. Se considera que la fase A en el lado de 132 kV del transformador TARR está abierta en régimen permanente.

Las Figuras 5 y 6 muestran respectivamente las tensiones de fase en el

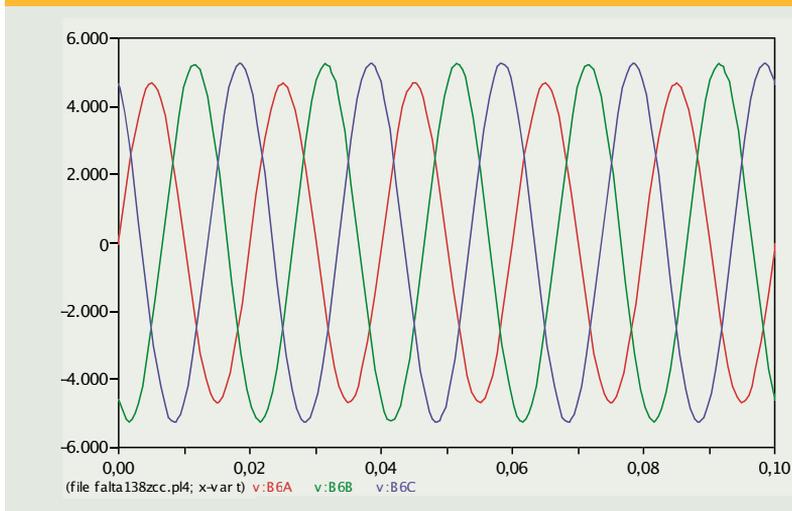
**Figura 4. Modelo de simulación de la alimentación a 132 kV de la central nuclear del caso de estudio: modelo estático del motor**



**Figura 5. Tensiones fase-neutro en el lado de 132 kV del transformador TARR**



**Figura 6. Tensiones fase-neutro en el lado de 6,9 kV del transformador TARR**



**Figura 7. Corrientes de línea en el lado de 132 kV del transformador TARR**

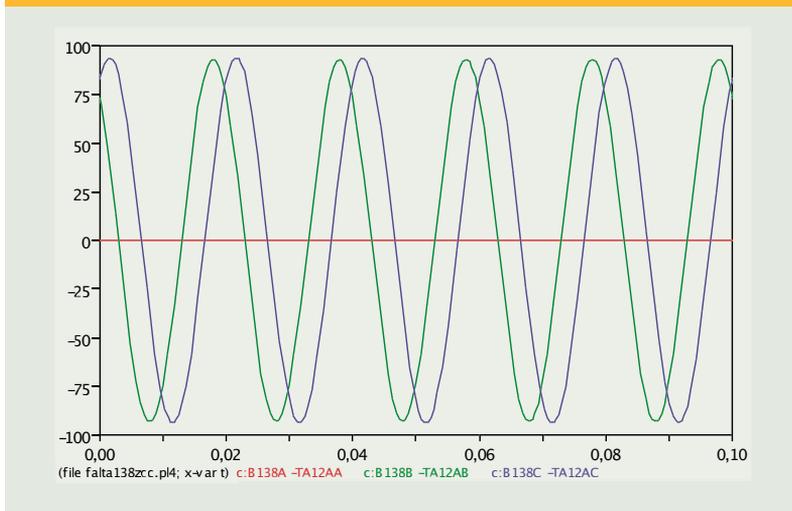


Tabla 2. Comparación de resultados obtenidos por simulación y por cálculo analítico

Tensiones fase-neutro en lado 132 kV (valor pico)				Corrientes línea en lado 132 kV (valor pico)			
	A	B	C		A	B	C
Simulación	93.539	111.018	111.162	Simulación	0	93	94
Cálculo analítico	93.880	111.060	111.200	Cálculo analítico	0	91	92

Tensiones fase-neutro en lado 6,9 kV (valor pico)				Corrientes línea en lado 6,9 kV (valor pico)			
	A	B	C		A	B	C
Simulación	4.670	5.238	5.262	Simulación	1.020	1.116	1.123
Cálculo analítico	4.767	5.205	5.237	Cálculo analítico	1.024	1.118	1.125

lado de 132 kV y en el lado de 6,9 kV del transformador TARR. Las Figuras 7 y 8 muestran las corrientes de línea en el lado de 132 kV y en el lado de 6,9 kV del transformador TARR.

La Tabla 2 compara los resultados (tensiones de fase y corrientes de líneas en los lados de 132 kV y de 6,9 kV del transformador TARR) obtenidos por simulación y por cálculo analítico en el caso 1. Las diferencias son muy pequeñas, lo que confirma la validez y coherencia de ambos modelos.

### Conclusiones

El cálculo analítico por medio de componentes simétricas de la ocu-

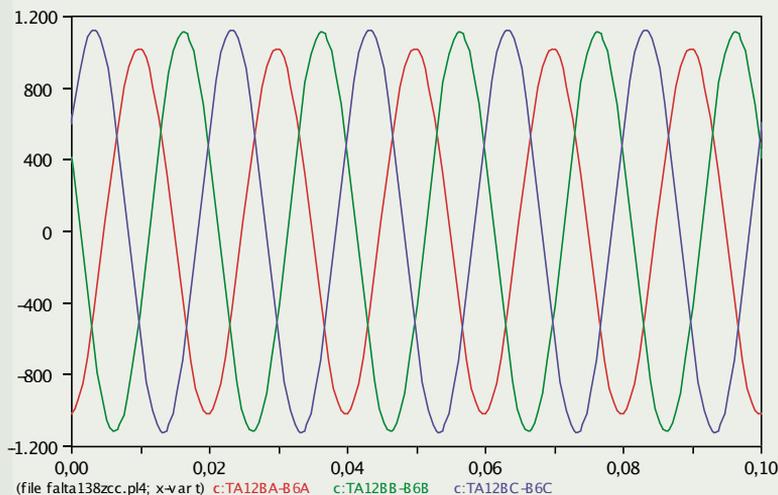
rrencia de una falta serie en la alimentación de arranque (a 132 kV) de la central nuclear del caso de estudio ha quedado validado por medio de simulación en el dominio del tipo con el programa ATP. De los cálculos y simulaciones realizadas, se puede concluir:

- 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.
- Las 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 apreciable cuando arranca un gran motor (5,9%).

• La corriente homopolar en el lado de elevada tensión de la alimentación (132 kV), cuando arranca un gran motor, es muy superior a la corriente homopolar en caso de falta franca a tierra en el lado de 6,9 kV. ■

Figura 8. Corrientes de línea en el lado de 6,9 kV del transformador TARR



### Bibliografía

- [1] Consejo de Seguridad Nuclear, [www.csn.es](http://www.csn.es).
- [2] World Association of Nuclear Operators, WANO, [www.wano.info](http://www.wano.info).
- [3] NRC BULLETIN 2012-01: Design Vulnerability in Electric Power System, disponible en: <http://pbdupws.nrc.gov/docs/ML1207/ML12074A115.pdf>.
- [4] Anderson P.M. Analysis of Faulted Power Systems. IEEE Press.
- [5] Alternative Transients Program, ATP, [www.euug.org](http://www.euug.org).
- [6] Elgerd O. I. Electric Energy Systems Theory: An Introduction. Second Edition. Mc Graw Hill, 1982.
- [7] Grainger J.J., Stevenson W.D. Power System Analysis. Mc Graw Hill, 1994.
- [8] Bergen A. R., Vittal V. Power System Analysis. Second Edition, Prentice Hall, 2000.
- [9] Gómez Expósito A., Conejo A. J., Cañizares C. Electric Energy Systems: Analysis and Operation. CRC Press, 2009.
- [10] IEEE, "IEEE Standard Criteria for Class I E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations", IEEE Std 308-2001, 2001.