

Problemas en la protección frente a faltas monofásicas en redes de media tensión con neutro puesto a tierra a través de reactancia

Palabras clave: Redes de media tensión, faltas a tierra, reactancia de puesta a tierra, protecciones de sobreintensidad.

Resumen

La protección contra faltas a tierra en redes de media tensión está afectada por el estado del neutro de la red y por la capacidad a tierra de las líneas. En redes con el neutro puesto a tierra a través de reactancia limitadora, la protección se realiza con protecciones de sobreintensidad de neutro. El valor de la reactancia limitadora varía de redes aéreas a subterráneas. Es frecuente que redes de media tensión concebidas originalmente como aéreas, evolucionen con el tiempo a redes mixtas o incluso con predominio de tramos subterráneos. Cuando esto ocurre, los ajustes de las protecciones de dichas líneas, establecidos para una red aérea, pueden dar lugar a problemas de sensibilidad y selectividad. Este artículo analiza los problemas encontrados en la protección de una instalación real.

Key words: Medium voltage grids, ground faults, grounding reactor, overcurrent protections.

Abstract:

Protection against ground phase faults in medium voltage grids depends on the status of the grid neutral and the line charging. Overcurrent protections are used in case of grid neutral grounded with grounding reactors. Grounding reactors depend on the grid type (overhead or underground) from overhead to underground grid. Overhead grids frequently evolve to underground grids. In such circumstances, the protection settings determined for overhead grids can lead to sensitivity and selectivity problems. This paper discusses the problems encountered in a real installation.



L. Rouco Rodríguez

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



J.A. Torres Santana

Ingeniero Industrial. Profesor Titular de Escuela Universitaria de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.



J.M. García Muñoz

Ingeniero Industrial, Endesa.



J. Sánchez Paz

Ingeniero Industrial, Endesa.

Introducción

Este artículo discute problemas encontrados en la protección frente a faltas monofásicas en líneas de media tensión de distribución en redes con neutro puesto a tierra a través de reactancia. La protección frente a faltas a tierra de líneas de media tensión es de gran importancia para la seguridad y calidad del suministro de energía eléctrica, ya que las faltas monofásicas a tierra son las más frecuentes en redes eléctricas de media tensión de distribución. Las protecciones deben exhibir, entre otras, dos cualidades fundamentales: sensibilidad y selectividad. La sensibilidad se refiere a que deben ser capaces de detectar no sólo faltas francas sino también faltas resistivas. La selectividad se refiere a que deben ser capaces de aislar únicamente la línea en falta, permaneciendo las sanas en servicio.

La protección contra faltas a tierra está afectada por el estado del neutro de la red de media tensión y por la capacidad a tierra (corrientes capacitivas) de las líneas. En redes con el neutro puesto a tierra a través de reactancia limitadora (la impedancia limita la corriente de falta monofásica típicamente a 500 A en redes aéreas y a 1.000 A en redes subterráneas), la protección se realiza con protecciones de sobreintensidad de neutro ([1], [2]).

Condiciones ambientales y sociales provocan con frecuencia que redes de media tensión concebidas originalmente como aéreas, y por tanto con reactancias de puesta a tierra dimensionadas conforme a tal configuración, evolucionen con el tiempo a redes mixtas o incluso con predominio de tramos subterráneos. Cuando esto ocurre, los ajustes de las protecciones de dichas líneas, establecidos para una red aérea, pueden dar lugar a problemas de sensibilidad y selectividad.

Este artículo analiza la selectividad proporcionada por los ajustes encontrados en las protecciones de sobreintensidad de neutro de las líneas conectadas a una de las dos barras de una subestación transformadora 66 kV/20 kV, estando el neutro

de la red de 20 kV puesto a tierra a través de reactancia limitadora de la corriente de falta monofásica franca a 500 A. Las líneas consideradas han ido cambiando su tipo con el tiempo, ya que numerosos tramos aéreos han pasado a ser subterráneos. El artículo también discute la sensibilidad máxima alcanzable con las protecciones de sobreintensidad instaladas.

Red de estudio

Se analiza el comportamiento de las protecciones de sobreintensidad de neutro (elementos instantáneo 50N y temporizado 51N) de las cinco líneas de 20 kV asociadas a una de las dos barras (barras 1) de una subestación transformadora 66 kV/20kV. Cada barra de 20 kV de la subestación está alimentada por un transformador YNd 66 kV/20 kV de 40 MVA y una tensión de cortocircuito del 14.8%. La corriente de cortocircuito trifásico en las barras de 66 kV de la subestación es de 8.500 A. El neutro de la red de 20 kV está puesto a tierra a través de una reactancia zig-zag conectada en barras que limita la corriente de falta monofásica a 500 A.

Las características de las líneas asociadas a las barras 1 de la subestación están detalladas en la Tabla 1. Se deta-

llan el tipo de línea, la capacidad en mF, la corriente capacitiva en A (a la tensión nominal) y la relación del transformador de intensidad de línea.

La Tabla 2 detalla las características de las funciones de sobreintensidad de neutro instantánea 50N y temporizada 51N del relé de protección multipropósito instalado en las líneas de la red de estudio.

Corriente de falta monofásica en redes de media tensión de distribución con neutro puesto a tierra a través de reactancia

La corriente de falta monofásica se calcula a partir del circuito equivalente obtenido tras la conexión en serie de los circuitos equivalentes fase-neutro de secuencias directa, inversa y homopolar mostrado en la Figura 1, como:

$$I_f = 3I_0 = 3 \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f}$$

donde:

$$E = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3}}$$

El análisis de cortocircuitos se puede encontrar en numerosos libros de análisis de sistemas de energía eléctrica. Un tratamiento exhaustivo puede encontrarse en [3].

Tabla 1. Características de las líneas del caso de estudio

Línea	Tipo	Capacidad (mF)	Corriente capacitiva (A)	Relación TI
L1	Subterránea	2.784	33.3	300/5
L2	Subterránea	1.8	21.6	300/5
L5	Mixta	11.205	134.1	300/5
L6	Subterránea	7.13	85.4	300/5
L9	Mixta	3.718	44.5	400/5

Tabla 2. Parámetros de las funciones 50N y 51N de un relé de protección multipropósito

	50N		51N		
	Rango	Paso		Rango	Paso
Arranque ($I >>$)	0.2-32 A	0.01 A	Arranque ($I >$)	0.2-2.4 A	0.01 A
Temporización	0-60 s	0.01 s	Dial (T)	0.05-1 s	0.01 s

Las impedancias equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar en barras de 20 kV se calculan como:

$$Z_1 = Z_2 = j \frac{u_n (\%) \cdot U_{20}^2}{100 \cdot S_n} + j \frac{U_{20} / \sqrt{3}}{I_{20} \cdot (U_{20} / U_{20})^2}$$

$$= j 0,148 \frac{20^2}{40} + j \frac{66 / \sqrt{3}}{8,5 \cdot (66 / 20)^2}$$

$$Z_0 = \frac{1}{\frac{1}{Z_N} + \frac{1}{Z_C}}$$

$$Z_N = j X_N$$

$$Z_C = \frac{1}{j \omega C}$$

La reactancia de puesta a tierra del neutro se calcula para que la corriente de defecto monofásico sea de 500 A a la tensión más alta de la red (22 kV):

$$X_N = \frac{E}{I_f / 3} = \frac{22000 / \sqrt{3}}{500 / 3} = 76 \Omega$$

Los principios fundamentales de la puesta a tierra del neutro de redes de media tensión de distribución a través de reactancia pueden encontrarse por ejemplo en las referencias [4] y [5]. Mayores detalles se encuentran en [6], [7] y [8].

Debe notarse que en la impedancia de secuencia directa e inversa se ha despreciado la capacidad a tierra de las líneas, mientras que en la impedancia de secuencia homopolar se desprecia la impedancia serie de las líneas.

La corriente homopolar aportada por cada línea sana a una falta se calcula según el divisor de corriente de la Figura 2:

$$I_{0,s} = -\frac{1/Z_{C,s}}{1/Z_0} I_0$$

Figura 2. Circuito equivalente de secuencia homopolar con identificación de corriente homopolar en cada línea

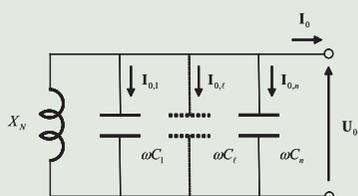
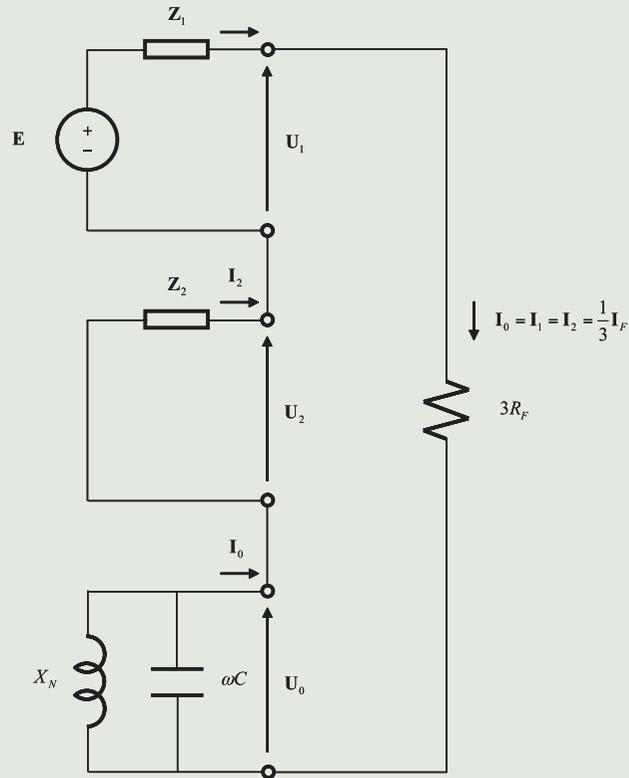


Figura 1. Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia en caso de falta monofásica a tierra



La corriente homopolar por la línea en falta se calcula según el circuito equivalente de la Figura 4 como:

$$I_{0,f} = \frac{1/Z_{C,f}}{1/Z_0} I_0 + I_0$$

La Figura 5 muestra la variación de la corriente de falta en función de la resistencia de falta. Debe notarse que la corriente de falta monofásica franca es de 196.5 A. Este valor es considerablemente inferior a los 500 A de

Figura 3. Circuito equivalente de secuencia homopolar con identificación de las corrientes homopolares en la línea en falta "f" y las líneas sanas "s"

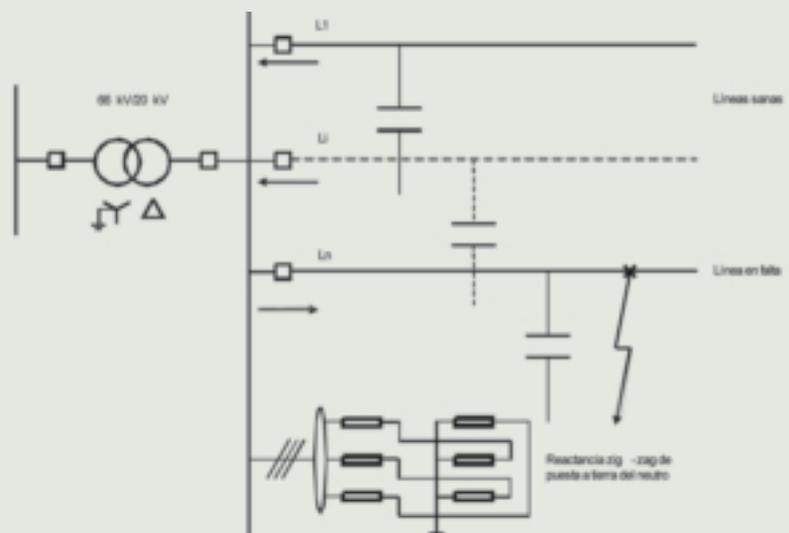
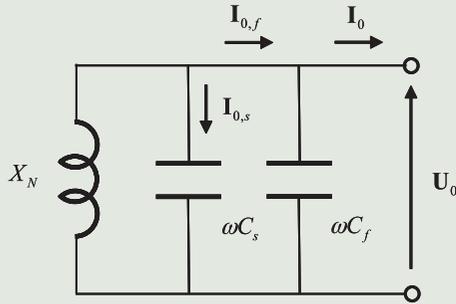


Figura 4. Circuito equivalente de secuencia homopolar con identificación de las corrientes homopolares en la línea en falta "f" y las líneas sanas "s"



sanas en caso de falta monofásica en función de la resistencia de falta. La corriente por las líneas sanas en caso de falta franca está comprendida entre 23.2 A en la línea L2 y 144.4 A en la línea L5. Debe notarse que la corriente que aporta una línea sana (la L5) a una falta es del orden de magnitud de la corriente de falta de una línea (la L2). Ello suscita la posibilidad de problemas de selectividad de la protección de sobretensión de neutro.

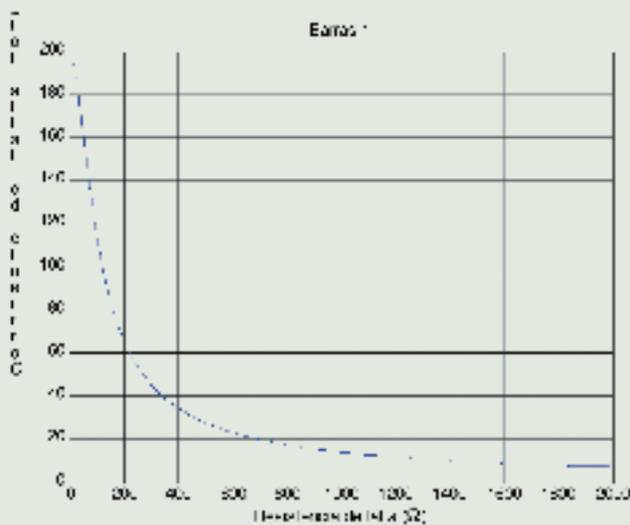
Selectividad

En esta sección estudiaremos la selectividad proporcionada por los elementos instantáneos y de tiempo inverso de la protección de sobretensión de neutro de las líneas de la red de estudio con los ajustes encontrados. La selectividad es la propiedad según la cual las protecciones deben desconectar sólo el elemento en falta y no los elementos sanos.

Elemento instantáneo de la protección de sobretensión de neutro (50N)

El elemento instantáneo de la protección de sobretensión de neutro debiera actuar cuando se produzca falta monofásica franca en la propia línea y no debiera actuar cuando se produzca una falta monofásica franca en otra

Figura 5. Corriente de falta monofásica en función de la resistencia de falta



corriente de falta monofásica franca determinados exclusivamente por la reactancia limitadora de puesta a tierra. Ello es debido a la elevada impedancia capacitiva de las líneas. Nos encontramos ante una subestación cuyas líneas eran mayoritariamente aéreas o subterráneas de pequeña longitud cuando se instalaron las reactancias limitadoras. Sin embargo, el desarrollo posterior de la red ha estado basado mayoritariamente en cables subterráneos.

La Figura 6 muestra la variación de la corriente en cada línea en falta, en caso de falta monofásica en función de la resistencia de falta. La corriente de falta franca está comprendida entre 219.6 A en caso de falta en la línea L2 y 340.8 A en caso de falta en la línea L5. La Figura 7 muestra la variación de la corriente por las líneas

Figura 6. Corriente por la línea en falta en caso de falta monofásica en función de la resistencia de falta

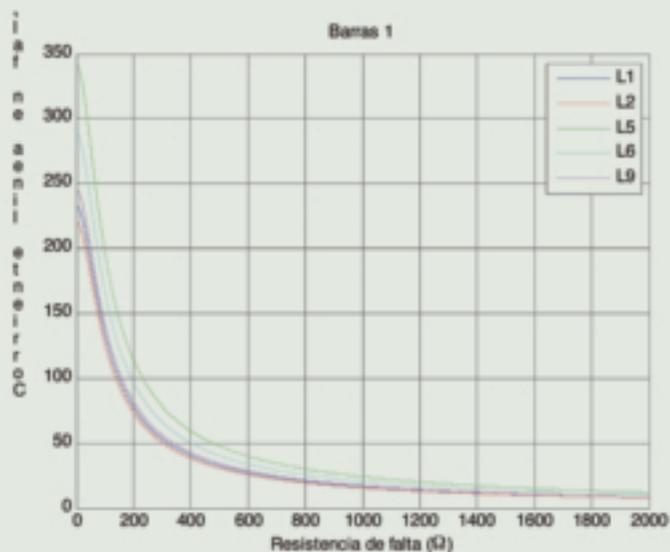
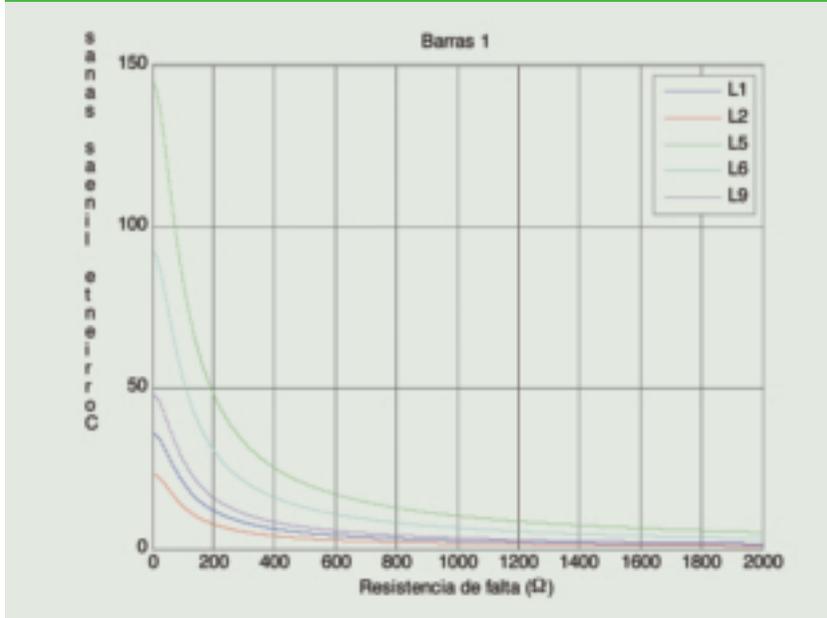
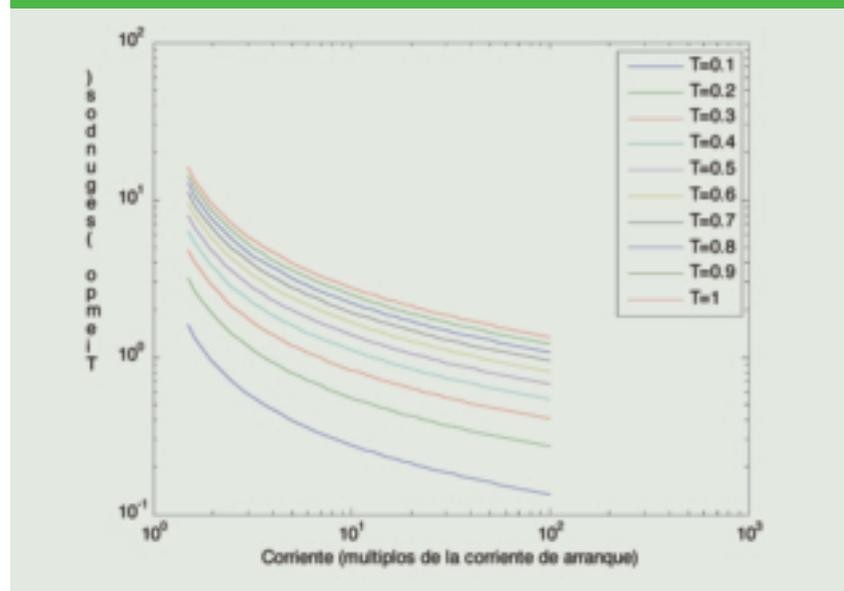


Figura 7. Corriente por la línea sana en caso falta monofásica en función de la resistencia de falta



línea. La Tabla 3 detalla la corriente de línea en caso de falta en la propia línea y la corriente de línea en caso de falta en otra línea y la corriente de arranque del elemento instantáneo de la protección de sobreintensidad encontrado en A de la protección [9] y en A de la línea. Se comprueba que la corriente en una línea sana es siempre inferior a la corriente en la línea en falta. Se encuentra que el elemento instantáneo de la protección de sobreintensidad de la línea L5 actuará cuando se produzca una falta franca en cualquier otra línea. Además, el elemento instantáneo de la protección de sobreintensidad de la línea L9 no actuará en caso de falta monofásica franca en la línea L9, sino en caso de falta resistiva.

Figura 8. Características de tiempo inverso para varios valores del dial



Elemento de tiempo inverso de la protección de sobreintensidad de neutro (51N)

El tiempo de actuación de una protección de sobreintensidad de tiempo inverso viene dado por la expresión:

$$t = \frac{a \cdot T}{\left(\frac{I}{I >}\right)^b - 1}$$

donde $I >$ es la corriente de arranque, T es el dial y a y b son parámetros que dependen del tipo de característica. Cuando la característica es inversa $a=0.13$ y $b=0.02$. La Figura 8 muestra las características de tiempo inverso para varios valores del dial.

La Tabla 4 contiene los ajustes encontrados del elemento de tiempo inverso de la protección de sobreintensidad de neutro de las líneas de la red de estudio. Se proporciona la

Tabla 3. Comportamiento del elemento instantáneo de la protección de sobreintensidad de neutro

Línea	Corriente de línea en caso falta en la propia línea (A)	Corriente de línea en caso de falta en otra línea (A)	$I >>$ Corriente de arranque (A protección)	$I >>$ Corriente de arranque (A línea)
L1	233.3	36.0	2.0	120
L2	220.6	23.3	4.6	276
L5	342.3	145.0	2.0	120
L6	289.6	92.3	2.0	120
L9	245.4	48.1	4.0	320

Tabla 4. Ajuste del elemento temporizado (51N)

Línea	I>	T
L1	0.20	0.10
L2	0.23	0.05
L5	0.20	0.20
L6	0.20	0.10
L9	0.40	0.10

Tabla 5. Tiempos de actuación de la protección de sobreintensidad de tiempo inverso para una falta monofásica a tierra franca

Tiempo de actuación de la protección de la línea (ms)					
Falta en la línea	L1	L2	L5	L6	L9
L1	213	618	509	312	1587
L2	585	114	509	313	1587
L5	585	618	375	312	1587
L6	585	618	509	198	1587
L9	585	618	509	312	313

corriente de arranque ($I>$) y el dial (T) de la protección [9]. La Tabla 5 presenta los tiempos de actuación de las protecciones de sobreintensidad de tiempo inverso de neutro de las líneas en caso de faltas francas en cada una de las líneas. Se detecta que en caso de falta en la línea L5 la protección de la línea L6 actuará en 312 milisegundos mientras que la protección de la propia línea L5 actuará en 375 milisegundos. También se encuentra que en

caso de falta en la línea L9 mientras que la protección de la línea L6 actuará en 312 milisegundos, la protección de la línea L9 actuará en 313 milisegundos. La Figura 9 muestra los tiempos de actuación de las protecciones de cada línea en caso de falta en la línea L5, confirmando que mientras que la resistencia de falta sea inferior a 125 W, la protección de la línea L6 actuará antes que la protección de la línea L5 en caso de falta en la línea

L5. La Figura 10 muestra los tiempos de actuación de las protecciones de cada línea en caso de falta en la línea L9. Las curvas correspondientes a las líneas L6 y L9 coinciden exactamente, indicando que no hay discriminación en la actuación de las protecciones de sobreintensidad de neutro de tiempo inverso de las líneas L6 y L9 en caso de falta en la línea L9.

Sensibilidad

Esta sección analiza la sensibilidad proporcionada por las protecciones de sobreintensidad de neutro de las líneas de la red de estudio. La sensibilidad se refiere a que deben ser capaces de detectar no sólo faltas francas sino también las resistivas, que se caracterizan por los bajos valores de las corrientes de falta.

La Figura 6 ha mostrado como en caso de falta resistiva de 2000 W(A), la corriente de falta está comprendida entre 7.8 A en caso de falta en la línea L2 y 12.1 A en caso de falta en la línea L5. La mínima corriente detectable por la protección de sobreintensidad tal y como se detalla en la Tabla 2 es de 0.2 A [9]. La Tabla 6 detalla la mínima corriente de falta detectable por la protección en A de línea, teniendo presente la relación de transformación de los transformadores de intensidad de línea. Detalla, asimismo, la correspondiente resistencia máxima de falta detectable por la protección. Las sensibilidades máximas

Figura 9. Tiempo de actuación de los elementos de tiempo inverso de la protección de sobreintensidad de neutro en caso de falta en la línea L5 en función de la resistencia de falta

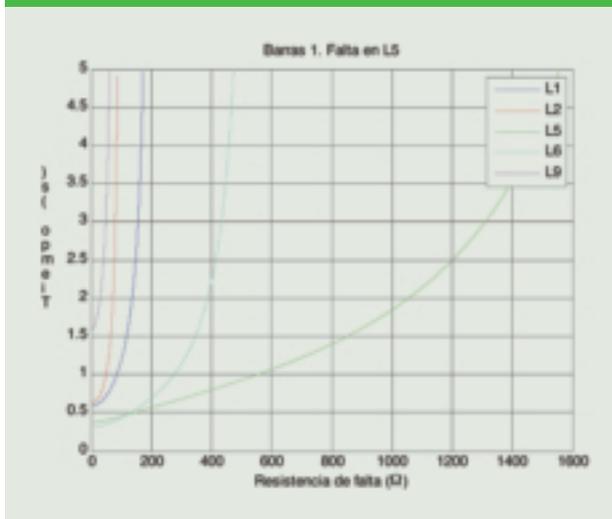
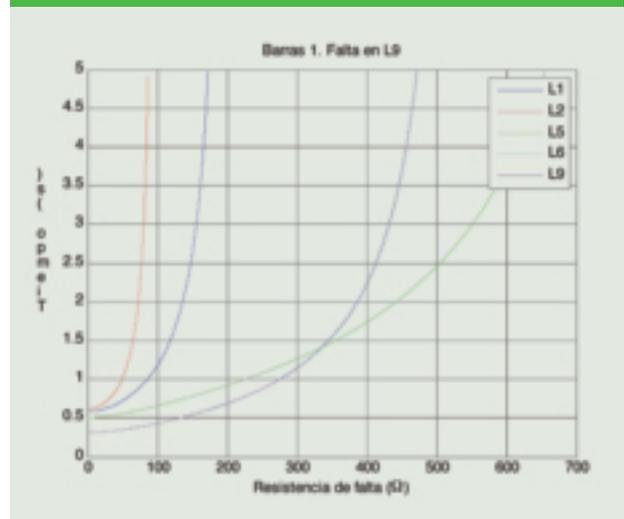


Figura 10. Tiempo de actuación de los elementos de tiempo inverso de la protección de sobreintensidad de neutro en caso de falta en la línea L9 en función de la resistencia de falta





están en el rango entre 1000 y 2000 W aproximadamente. Se comprueba que para líneas con iguales transformadores de intensidad, la sensibilidad es mayor cuanto mayor es la corriente capacitiva de la línea. Por eso la mayor y menor sensibilidad de las protecciones de las líneas con transformadores de intensidad 300/5 son respectivamente las líneas L5 y L2. La sensibilidad de las protecciones de la línea L9 es menor porque los transformadores de intensidad son de relación 400/5. La Figura 9 y la Figura 10 muestran que, sin embargo, la actuación de las protecciones en caso de falta muy resistiva se demora en varios segundos.

Conclusiones

Este artículo ha analizado la selectividad y sensibilidad proporcionada por los ajustes encontrados de las protecciones de sobreintensidad de neutro de las líneas conectadas a

una de las barras de una subestación transformadora 66 kV/20 kV. El neutro de la red de 20 kV se encuentra conectado a tierra a través de una reactancia zig-zag calculada para limitar la corriente de falta monofásica franca a 500 A. El estudio realizado ha puesto manifiesto que la corriente de falta monofásica franca (196.5 A) es sensiblemente inferior a los 500 A determinados exclusivamente por la reactancia limitadora de puesta a tierra. Ello es debido a que nos encontramos ante una subestación cuyas líneas eran mayoritariamente aéreas o subterráneas de pequeña longitud cuando se instalaron las reactancias limitadoras y cuyo desarrollo posterior ha estado basado mayoritariamente en cables subterráneos.

Se ha encontrado que los ajustes de los elementos instantáneos y de tiempo inverso de las protecciones de

algunas líneas no aseguran la selectividad de la actuación de las protecciones. Se estima que se han aplicado ajustes típicos de las protecciones y que los ajustes de las protecciones no hayan sido actualizados con la evolución de la red. Las protecciones ofrecen sensibilidades máximas comprendidas aproximadamente entre 1000 y 2000 W con tiempos de actuación de varios segundos.

En próximos artículos propondremos un método de ajuste de protecciones de sobreintensidad de neutro que garanticen la selectividad de la actuación de las protecciones. También exploraremos alternativas para la mejora de la selectividad y sensibilidad de las protecciones. ■

Referencias

- [1] J. Eisman, G. Gómez, E. Suárez, J. F. Nevado, J. L. Ruiz, P. Benito, R. García, J. L. Gutiérrez, *Estudio de faltas resistentes a tierra en redes de distribución en media tensión*, Informe proyecto P.I.E. 132.074, Junio 1992.
- [2] A. M. Germain, D. Daniel, M. Clément, C. Dubreuil, *Perspective d'évolution de la mise à la terre du neutre moyenne tension dans les réseaux ruraux*, Revue Générale L'Electricité, N° 1, Janvier 1991, pp. 50-55.
- [3] P.M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1973.
- [4] P. Montané, *Protecciones en las Instalaciones Eléctricas: Evolución y Perspectivas*, Segunda Edición, Marcombo, Barcelona, 1993.
- [5] GEC Alstom T&D, *Protective Relays Application Guide, Chapter 7: Overcurrent Protection for Phase and Earth Faults*, disponible en <http://www.alstom.com/grid/NPAG/>.
- [6] J. Bergeal, L. Berthet, O. Grob, P. Bertrand, B. Lacroix, *Single-phase faults on compensated neutral medium voltage networks*, 12th CIREED International Conference, 17-21 May 1993, Birmingham, UK, Volumen 2, Artículo 2.9.
- [7] H. Roman, H. Pietzsch, *Earth-fault treatment in medium-voltage networks*, 14th CIREED International Conference and Exhibition, 2-5 June 1997, Birmingham, UK, IEE Conference Publication No. 438, Volumen 4, Artículo 4.36.
- [8] P. Folliot, J. M. Boyer, S. Bolle, *Neutral grounding reactor for medium voltage networks*, 16th CIREED International Conference, 18-21 June 2001, Amsterdam, The Netherlands, IEE Conf. Publication No. 482, Volumen 1, Artículo 1.5.
- [9] General Electric Power Management, *Sistema Integrado de Protección y Control DDS*, Instrucciones GEK 106163A.

Tabla 6. Mínima corriente y máxima resistencia de falta detectable por la protección

Línea	Mínima corriente de la protección (A línea)	Resistencia de falta máxima (W)
L1	12	1375
L2	12	1300
L5	12	2019
L6	12	1707
L9	16	1084