

## IMPACTO DE LAS CORRIENTES DE SECUENCIA NEGATIVA EN LOS GENERADORES SINCRONOS INSTALADOS EN SISTEMAS INDUSTRIALES

Edgar Robles\*

Oscar Reyes\*

Roberto Campuzano \*

Enrique Priego\*\*

Instituto de Investigaciones Eléctricas\*  
Gerencia de Equipos Eléctricos  
Temixco, Morelos

PGPB\*\*  
Villahermosa, Tab.

### RESUMEN

Como resultado de la falla a tierra de uno de los alimentadores instalados en un centro procesador de gas, se dañó el engrane del reductor de velocidad de un generador de 44.5 MVA. A fin de determinar las causas de la falla del engrane, se efectuó la simulación del evento. El impacto de la falla en el generador, se evaluó aplicando pruebas dieléctricas a los devanados de estator y rotor.

### INTRODUCCIÓN

El impacto que tienen las corrientes de secuencia negativa en los generadores síncronos ha sido tema de continuo interés, y por lo tanto ha sido cubierto en diversas publicaciones técnicas. Los reportes que se tienen indican que el rotor es el elemento más propenso a sufrir daños por efecto de éstas corrientes [1]. Los daños en el rotor se deben a la circulación de corrientes de magnitudes considerables por su superficie (cuñas y anillo de retención).

Se sabe, que las causas más comunes que dan origen a la aparición de corrientes de secuencia negativa se presentan cuando el generador está alimentando cargas desbalanceadas, cuando se presentan fallas a tierra o entre fases, y cuando no cierra uno o dos polos de un interruptor. La falla entre fases es la condición que tiene mayor aportación de corriente de secuencia negativa; mientras que la condición de circuito abierto produce magnitudes reducidas de corriente de secuencia negativa [2].

Artículo recomendado y aprobado por el Comité Nacional de CIGRE – México, para presentarse en el Segundo Congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en Irapuato, Gto.

En México, en algunos esquemas de generación de tipo industrial, para limitar la corriente de cortocircuito se conecta sólo un generador a tierra a través de una resistencia y el resto se mantienen flotados. Es común que en estas plantas los generadores operen a la mitad de su capacidad. Al limitar las corrientes de falla, en ciertos casos se pueden tener problemas de sensibilidad por parte de los relevadores de protección, en especial cuando éstos son del tipo electromecánico.

En este artículo se analizan las causas de falla del engrane del reductor de velocidad de un turbogenerador instalado en un centro procesador de gas en México. El daño del engrane se presentó una semana después de ocurrida la falla a tierra de uno de los cables de energía instalados en el centro. Por información proporcionada por el personal del centro se sabe el evento tuvo una duración de algunos minutos, hasta que esta se convirtió en una falla trifásica. Se realizó la simulación del evento con la finalidad de determinar la magnitud de las corrientes de secuencia negativa en el generador, y de esta manera analizar la causa de que el relevador de secuencia negativa no haya operado. Asimismo, se llevó a cabo la evaluación indirecta del impacto de la falla en el generador, para lo cual se realizaron pruebas dieléctricas al sistema aislante de los devanados de estator y rotor.

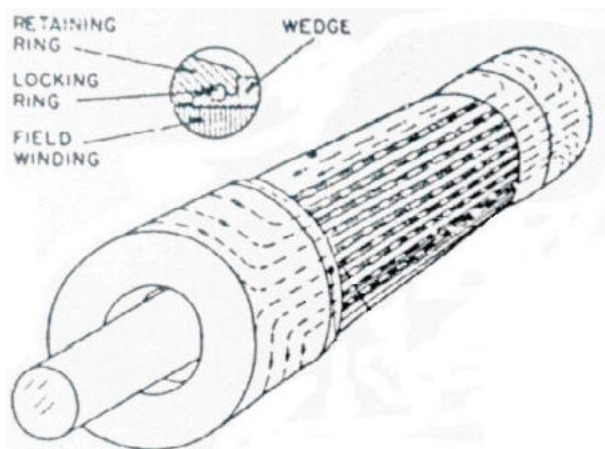
### IMPACTO DE LAS CORRIENTES DE SECUENCIA NEGATIVA EN EL GENERADOR

En un sistema trifásico balanceado, en condiciones de estado estable el generador únicamente aporta hacia el sistema corrientes de secuencia positiva. En esta condición, el flujo en el entrehierro del generador gira en la misma dirección y en sincronía con el devanado de campo. Sin embargo, durante condiciones de desbalance (p.e. cortocircuitos a tierra o entre fases), se producen corrientes de secuencia negativa que giran en dirección opuesta a la del rotor. El flujo producido por esta corriente, visto por el rotor, tiene una frecuencia del doble de la velocidad de sincronía.

La presencia de corrientes de secuencia negativa constituye un serio problema para el generador. Desde el punto de vista mecánico, estas corrientes inducen

fuerzas electromotrices que se contraponen al giro normal de la máquina durante el tiempo que dura la condición de falla. Como el sentido de giro lo determina la turbina, los esfuerzos mecánicos se reflejan directamente en el acoplamiento rotor-turbina. Los engranes del reductor de velocidad funcionan como fusibles mecánicos; cuando se excede la capacidad de los fusibles, estos “operan” evitando el daño de los elementos principales del generador como son la turbina y el propio generador.

Desde el punto de vista eléctrico, el efecto piel de la corriente del doble de la frecuencia en el rotor, ocasiona que éstas sean forzadas a circular por los elementos que están en la superficie del rotor (cuñas y anillos de retención) como se ilustra en la Fig. 1.



**Fig. 1.** Circulación de corrientes en la superficie del rotor debido a condiciones de desbalance y corrientes de secuencia negativa.

La circulación de éstas corrientes a través de las cuñas y anillos de retención del rotor, causa calentamiento en estos elementos, situación que puede generar dos modos de falla:

- Las cuñas se calientan hasta el grado que se puede propiciar su flexión, y por la fuerza centrífuga del rotor, éstas se pueden doblar provocando su ruptura.
- Debido al sobrecalentamiento del anillo de retención, este se expande y se libera del cuerpo del rotor, lo que puede provocar que se desprenda [3].

En la Fig. 2 se muestra el daño producido por la circulación de corrientes superficiales en la interfase que se forma entre las cuñas y el anillo de retención.



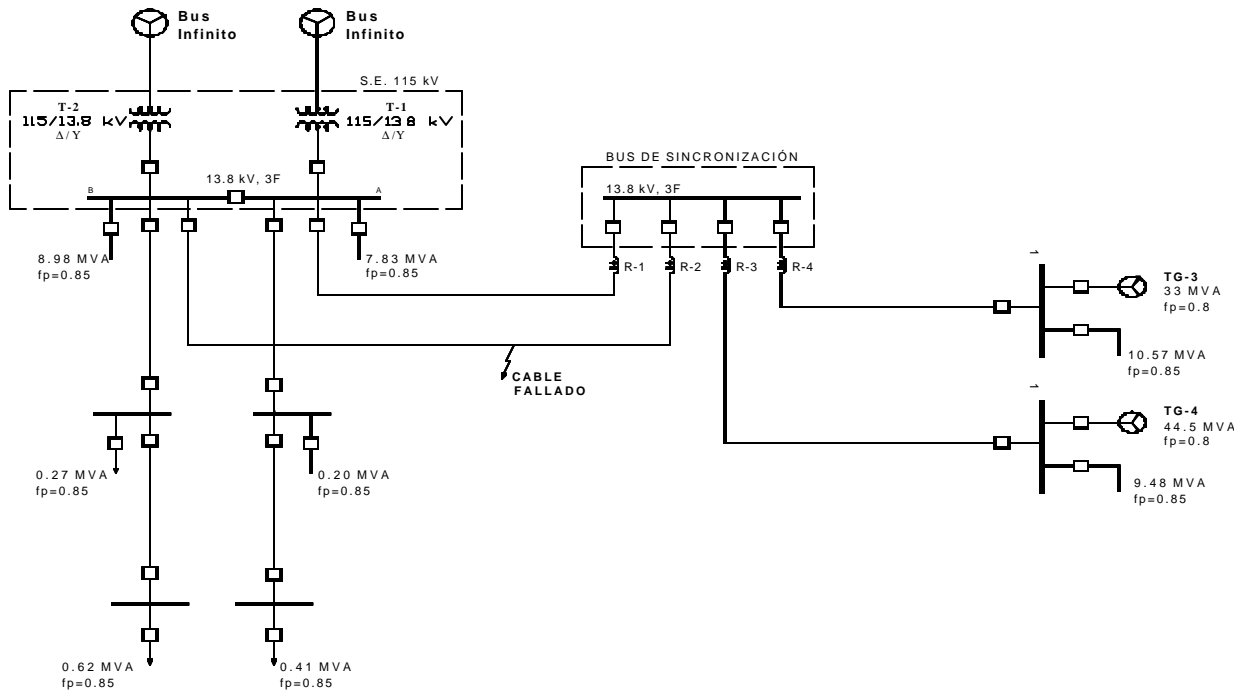
**Fig. 2.** Ejemplo del daño en la cuñas en la zona de interfase en donde se traslapan las cuñas con el anillo de retención.

#### DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO Y SECUENCIA DE EVENTOS

En diciembre del 2000 se presentó una falla a tierra en uno de los cables que conectan al interruptor de la SE de enlace de 115 kV, con el interruptor del Bus de sincronización de un centro procesador de gas. El circuito eléctrico del complejo y la localización de la falla, se muestran en la Fig.3.

Cuando ocurrió la falla, el TG-4 y el T-2 se encontraban sincronizados para suministrar la carga al complejo. El TG-4 se encontraba aportando una potencia de 22 MW. El generador operaba con su neutro aterrizado a través de un banco de resistencias de 13.3  $\Omega$ , mientras que el secundario del T-2 estaba aislado de tierra. En ese momento, el TG-3 se encontraba desconectado del sistema.

Asimismo, en el esquema eléctrico de la planta se emplean reactores para la conexión de los generadores al bus de sincronización. La finalidad de éstos reactores es limitar la corriente de cortocircuito.



**Fig. 3** Diagrama unifilar del sistema de potencia del complejo procesador de gas donde ocurrió el evento.

Se presentó una falla en uno de los alimentadores del complejo. Con la falla el generador se quedó sin referencia de tierra. Esta falla se mantuvo durante algunos minutos hasta que se convirtió en una falla trifásica y fue liberada. Es decir el generador permaneció operando en condiciones desbalanceadas durante un tiempo considerable. Esta falla fue localizada en el cable donde inició el evento; es decir, la falla monofásica evolucionó convirtiéndose en una falla trifásica.

La falla fue seccionada y se recuperó el servicio de energía eléctrica en forma normal. Sin embargo, unos días después, en enero de 2001, y bajo condiciones normales de operación, se presentó la falla del engrane del reductor de velocidad de la turbina del TG-4. Se estableció la hipótesis de que los daños en el reductor de velocidad se originaron como resultado de operar el generador en condiciones no balanceadas.

### SIMULACIÓN DEL EVENTO

Para determinar la magnitud de las corrientes que aportó el generador durante la falla del cable de energía, se simuló el evento de falla con las condiciones de operación en las que se encontraba el complejo en el

momento de la falla. También se realizaron simulaciones en condiciones de carga máxima.

Asimismo, se evaluó el impacto de los reactores utilizados para limitar la corriente de cortocircuito del sistema, y el efecto de la resistencia de arco en la magnitud de las corrientes de secuencia negativa. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 1**. En la **Fig. 4** se muestra el comportamiento de la corriente de secuencia negativa en el generador, en función de la magnitud de la resistencia de arco y de la carga aportada por el generador.

En condiciones de estado estable se obtuvieron los siguientes valores para las corrientes de fase en terminales del TG-4:

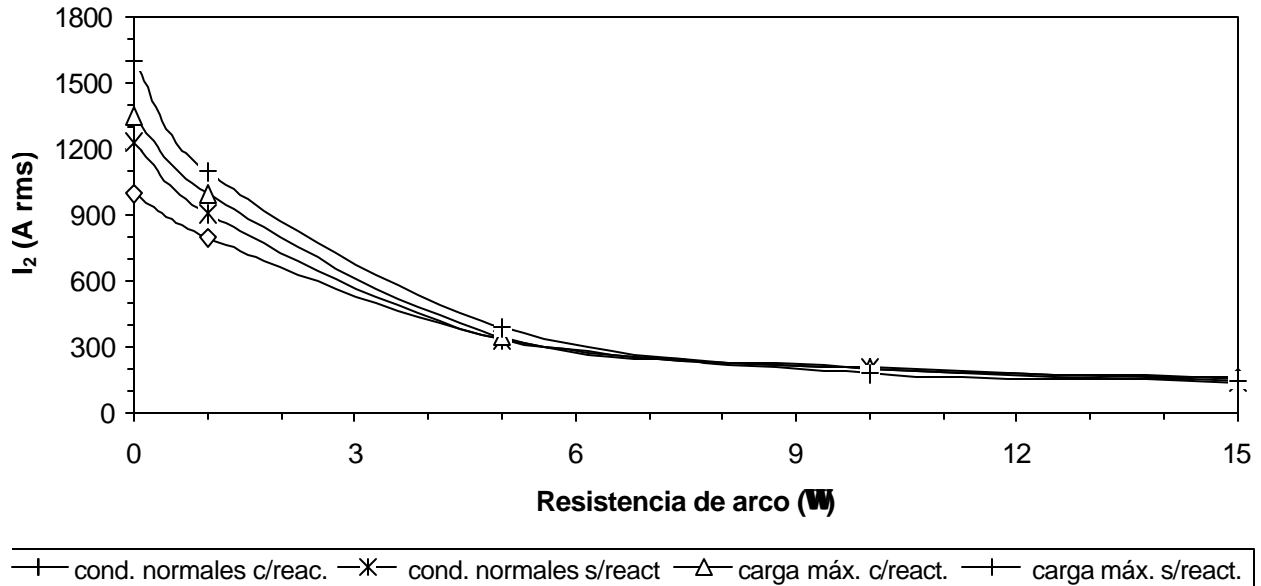
$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1861 \angle 0^\circ \\ 1861 \angle -120^\circ \\ 1861 \angle -240^\circ \end{bmatrix} A_{rms}$$

donde,

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 \angle 0^\circ \\ 1861 \angle 0^\circ \\ 0.0 \angle 0^\circ \end{bmatrix} A_{rms}$$

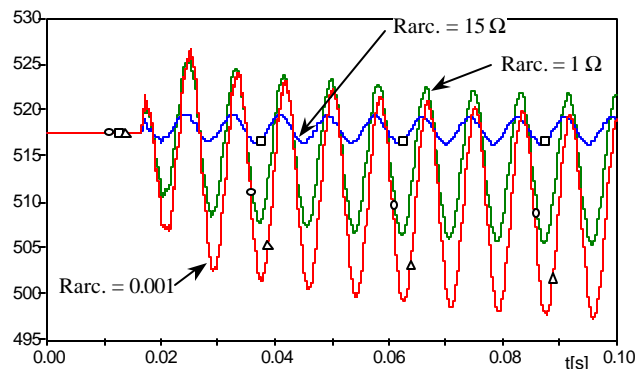
**Tabla 1.** Niveles de corriente de secuencia negativa en terminales del TG-4, como resultado de una falla a tierra de uno de los cables del alimentador.

Resistencia de arco (W)	Condiciones normales c/reactor		Condiciones normales s/reactor		Carga máxima c/reactor		Carga máxima s/reactor	
	$I_2$ (A rms)	$I_2/I_a$	$I_2$ (A rms)	$I_2/I_a$	$I_2$ (A rms)	$I_2/I_a$	$I_2$ (A rms)	$I_2/I_a$
0.001	1106.2	0.59	1233.6	0.66	1352.8	0.72	1600.2	0.85
1	793.9	0.42	898.6	0.48	1000.5	0.53	1098.7	0.59
5	339.4	0.18	335.1	0.18	348.0	0.18	388.1	0.20
10	206.0	0.11	205.6	0.11	209.1	0.11	182.6	0.10
15	162.7	0.08	142.4	0.07	154.5	0.08	149.9	0.08

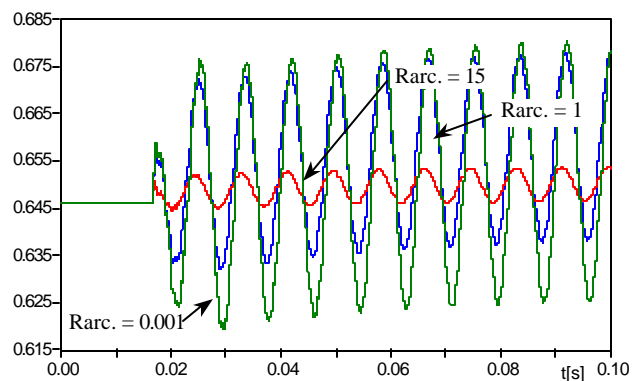


**Fig. 4.** Niveles de corriente de secuencia negativa para una falla monofásica en el alimentador, en función de la resistencia de arco. Se consideran dos condiciones de operación: condición normal y a plena carga.

En las **Figs. 5** y **6** se muestra la respuesta de la potencia mecánica y posición angular del rotor del TG-4, como resultado de una falla monofásica en el alimentador. En ambos casos se grafica la respuesta del generador en función de la resistencia de arco.



**Fig. 5.** Potencia mecánica entregada por el generador en función de la resistencia de arco. Se considera conexión de los reactores y condiciones normales de operación.



**Fig. 6.** Posición angular del generador en función de la resistencia de arco. Se considera conexión de los reactores y condiciones normales de operación.

## PRUEBAS DIELECTRICAS

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas dieléctricas realizadas a los devanados del rotor y estator del TG-4, indican que la falla no causó daños aparentes en el sistema aislante del generador. Los resultados más relevantes se muestran a continuación.

### Pruebas al estator

Los resultados obtenidos de las pruebas de descargas parciales y  $\tan \delta$ , se muestran en las Figs. 7 y 8.

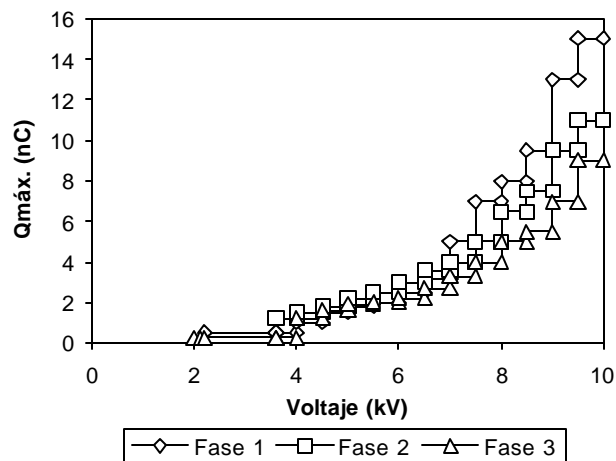


Fig. 7. Nivel de descargas parciales registrado en los devanados del estator del TG-4.

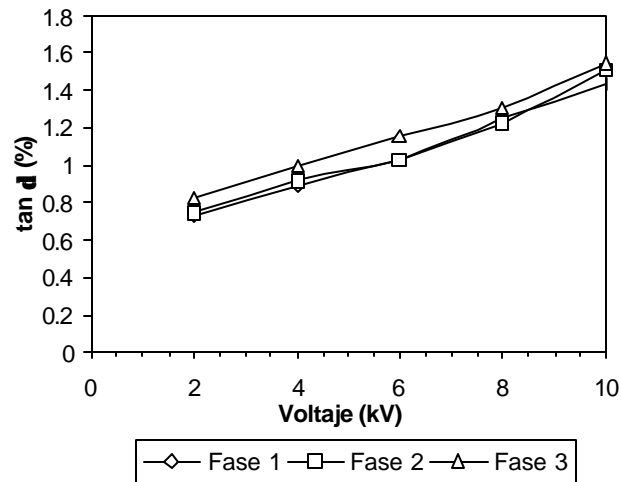


Fig. 8. Nivel de  $\tan \delta$  registrado en los devanados del estator del TG-4.

### Pruebas al rotor

En la Fig. 9 se muestran los resultados obtenidos mediante la prueba de impulso en baja tensión, realizada a los devanados del rotor del TG-4. Los resultados obtenidos indican simetría en los devanados polares del rotor.

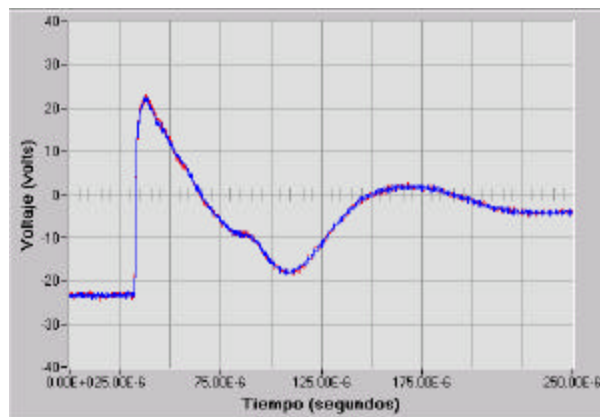


Fig. 9. Comparación de las trayectorias de los pulsos inyectados en las terminales del devanado del rotor del TG-4.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

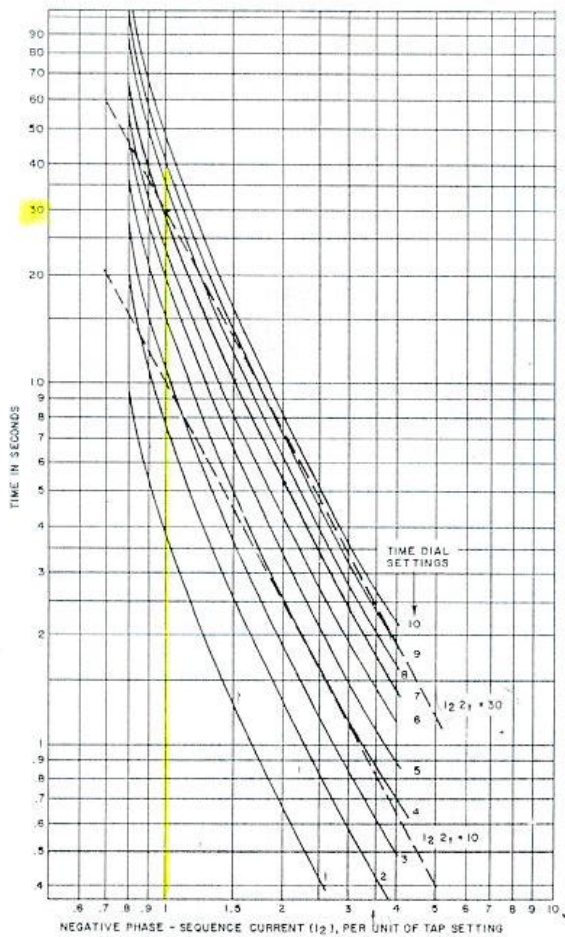
De acuerdo con la hoja técnica del fabricante, en condiciones normales de operación el generador puede operar con corrientes de secuencia negativa, con un máximo permisible de 0.1 p.u. de la corriente nominal del generador. El generador tiene una capacidad de 44.5 MVA, por lo que la corriente nominal de armadura es de 1,861 A. En estas condiciones, la corriente de secuencia negativa permisible por el generador es de 186.1A.

El generador utiliza un relevador de secuencia negativa cuya curva tiempo-corriente se muestra en la Fig. 10. Este relevador es del tipo electromecánico. Por lo general, este tipo de relevadores tienen una pobre sensibilidad. Su umbral de sensibilidad está en el rango de 0.3 pu a 0.4 pu de la corriente nominal del generador.

Los resultados obtenidos por simulación indican que la falla ocurrida en el complejo procesador de gas, posiblemente generó un nivel de 0.42 pu de  $I_0$ . Se observa que esta corriente está muy próxima al umbral de sensibilidad del relevador, y por lo tanto es muy probable que el relevador no hubiera visto la falla. Sin embargo, esto no quiere decir que el desbalance debido a la falla del cable no haya provocado los esfuerzos mecánicos que pudieran haber dañado el engrane del reductor de velocidad. En las Figs. 5 y 6, se observa la respuesta mecánica del generador como resultado de la perturbación.

Por otra parte, como se aprecia en la **Tabla 1**, los reactores utilizados para limitar la corriente de cortocircuito tiene un efecto negativo sobre la sensibilidad de la protección de corriente de secuencia negativa. Se observa que en caso de no tener reactores, el nivel de  $I_2$  habría sido de 0.48 pu. Este nivel ya no causaría problemas de sensibilidad en el relevador.

Asimismo, se observa que para el caso de fallas de alta impedancia ( $> 1\Omega$ ), el relevador de secuencia negativa no tendría la capacidad de detectar la falla, independientemente del nivel de carga en el sistema. Para valores de  $R_{arc} \geq 5\Omega$ , los niveles de corriente de secuencia negativa son  $\leq 0.2$ .



**Fig. 10.** Curva característica tiempo–corriente del relevador de secuencia negativa.

## CONCLUSIONES

Aún cuando el relevador no hubiera operado, la falla del cable provocó una situación de desbalance de corrientes de fase que tuvo un efecto secundario. Este efecto se tradujo en un esfuerzo mecánico anormal en el engrane del acoplamiento del reductor de velocidad. Es importante revisar el tipo y ajuste de los relevadores de secuencia negativa que se utilizan en los sistemas industriales de mediana tensión. En algunos generadores se utilizan relevadores de estado sólido o digitales, que ofrecen una mayor protección al generador porque operan con un rango de 0.03 a 0.2 p.u.

## REFERENCIAS

- [1] Powell P.W. "Current Unbalance (Negative Sequence) Protection", IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators, 1995, pp. 52-55.
- [2] Ross M.D. and King, E.I. "Turbine – Generator Rotor Heating During Single – Phase Short Circuits", AIEE Transactions, Vol.72, Part III, 1953, pp. 40-45.
- [3] Nippes P.I. "Generator Unbalance Load Capability". EPRI GS – 7393, Project 2591 –1, Final Report July 1991.