

Análisis del Tipo y Valor de una Impedancia Limitadora de Corrientes de Cortocircuito Monofásicas a Tierra en el Nivel de 33 Kv para su Instalación en Estaciones Transformadoras 132 /33 /13,2 Kv

Resumen: Se ha desarrollado un algoritmo en Matlab para realizar estudios de sensibilidad de corrientes de cortocircuito y sobretensiones en fases sanas según diferentes tipos y valores de impedancias de puesta a tierra para transformadores de tres arrollamientos. El algoritmo se aplica a Estaciones Transformadoras distribuidas en la provincia de Santa Fe que abastecen líneas débiles en el nivel de 33 [kV] pertenecientes a la Empresa Provincial de la Energía. De los análisis de sensibilidad realizados se infiere que las reactancias de puesta a tierra presentan un comportamiento más apropiado en comparación con los resistores, siendo los valores ideales 7 y 13 [Ω] para todas aquellas estaciones transformadoras con transformadores de 30 y 15 [MVA] respectivamente. Su inclusión representa una reducción aproximada del 60 % en la magnitud de las corrientes de falla a tierra y una atenuación del orden al 35% de los efectos electrodinámicos en el transformador.

Palabras Claves: Impedancia de puesta a tierra; Corriente de cortocircuito; Transformador de tres arrollamientos.

Abstract: An algorithm has been developed in Matlab to perform sensitivity studies of short-circuit currents and overvoltage in healthy phases, according to different types and values of ground impedances for three-winding transformers. The algorithm applies to Transformer Stations distributed along Santa Fe Province that supply weak lines at the level of 33 [kV], property of the Provincial Energy Company. From the sensitivity test realized, it is inferred that the grounding reactances present a more appropriate behavior in comparison with the resistors, being the ideal values 7 and 13 [Ω] for all transformer stations with transformers of 30 and 15 [MVA] respectively. Their inclusion represents an approximate 60 percent reduction in the magnitude of the ground fault currents and a 35 percent attenuation of the electrodynamic effects in the transformer.

Keywords: Grounding Impedance; Short circuit current; Three-winding transformers.

Matías E. Barlasina, Emanuel Guisoni, Dino Ghisolfi, Carlos A. Lucero

Grupo de Investigación en Control y Seguridad Eléctrica (CySE), Lavaise 610, Santa Fe, Facultad Regional Santa Fe, UTN

Mail: matiasbarlasina@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los cortocircuitos en las redes eléctricas provocan alteraciones en los parámetros normales de servicio, sometiendo a la misma a condiciones que resultan insostenibles en régimen permanente. Toda parte de la instalación, así como los equipamientos que la componen, al ser recorridos por la corriente de falla se ven afectados por sus efectos perjudiciales, los cuales pueden separarse en efectos térmicos y mecánicos. Dentro de una estación transformadora (ET) el transformador de potencia constituye el equipo eléctrico más importante, debido a su costo y a la función que desempeña, por lo cual debe considerarse al mismo como un elemento crítico pues su indisponibilidad suele conllevar generalmente energía no suministrada y una baja calidad de servicio técnico.

Al establecerse la corriente de cortocircuito (I_{cc}), que en general es varias veces mayor a la nominal, los arrollamientos del transformador se ven solicitados a esfuerzos térmicos y dinámicos que provocan el envejecimiento prematuro de los aislantes y el debilitamiento mecánico de sus ataduras (Ebrahimi et al.; 2014 y Gutten et al.; 2015). El sometimiento de la máquina a sucesivos eventos de cortocircuito repercute en una reducción de su vida útil, alcanzando finalmente la pérdida de rigidez dieléctrica de su aislación y su consecuente salida de servicio.

En la provincia de Santa Fe, la empresa provincial de la energía (EPESF) posee redes de distribución en el nivel de 33 [kV] caracterizadas por su gran extensión y que en varios casos presentan altas tasas de fallas debidas a cortocircuitos. Las I_{cc} (principalmente de tipo monofásicos por su mayor probabilidad de ocurrencia) repercuten muy desfavorablemente sobre los transformadores de potencia de las ETs, sometidos a efectos electrodinámicos que reducen su vida útil (Ferrelli et al.; 2009).

Una alternativa para disminuir las I_{cc} , y de este modo sus consecuencias, es la de incluir elementos limitadores, entiéndase impedancias de puesta a tierra (Pat), entre el centro de estrella del devanado secundario del transformador y tierra. Estas impedancias son en general de carácter netamente resistivo o inductivo.

El objetivo del presente trabajo es determinar el tipo de elemento limitador y él o los valores de impedancia que resulten adecuados para proteger a los transformadores 132/33/13,2 [kV] de 15 y 30 [MVA] de potencia nominal en ETs de la EPESF que abastecen líneas de 33 [kV] con deficiente calidad de servicio, de modo que el valor obtenido resulte igualmente válido para la totalidad o gran parte del conjunto de ETs analizadas.

METODOLOGÍA

En el desarrollo de este trabajo se realizan sucesivos cálculos de cortocircuito en régimen estacionario con el fin posterior de efectuar los siguientes estudios:

Análisis de sensibilidad de las corrientes de falla y sobretensiones temporarias para cada uno de los elementos limitadores en estudio (resistencia y reactancia).

Análisis de sensibilidad de las corrientes de falla y sobretensiones temporarias para los valores de potencia nominal del transformador de 15 y 30 [MVA].

Cálculo de la magnitud de la impedancia de puesta a tierra.

Consideraciones

Los estudios se realizan sobre ETs de la EPESF con transformadores de tres arrollamientos de 132/33/13,2 [kV], potencias nominales de 15 y

30 [MVA], grupo de conexión eléctrica estrella/estrella/triángulo con reactor de neutro en 13,2 kV y potencias de cortocircuito en el nivel de 132 [kV] dentro del rango de 250 a 3800 [MVA]. Tales ETs se encuentran en zonas de densidad media y baja de consumo. Gran parte de las líneas de 33 [kV] abastecen extensos corredores radiales, con longitudes mayores a 50 [km] y en muchos casos con una deficiente calidad de servicio (altas tasas de falla).

Las fallas analizadas se presentan en el nivel de 33 [kV] y corresponden a cortocircuitos monofásicos a tierra.

Se desprecian las resistencias de contacto de falla y las de puesta a tierra.

Para los cálculos y el modelado de los transformadores de tres arrollamientos y de la red, se utiliza el software Matlab.

Ecuaciones de cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico

Se modelan los transformadores a través de su equivalente monofásico (ver Figura 1).

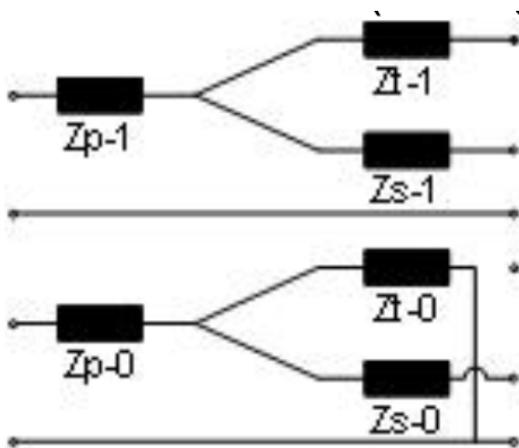


Fig. 1: Equivalente monofásico de transformador de tres arrollamientos.

Se considera la potencia del primario como potencia de base y se desprecia la componente resistiva, por ello las impedancias unitarias de los devanados del transformador se obtienen según las ecuaciones 1, 2 y 3, a partir de los datos de placa de las impedancias de cortocircuito binarias.

$$Z_p [pu] = \frac{1}{2} \times (Z_{ps} [pu] + Z_{pt} [pu] - Z_{st} [pu]) \tag{1}$$

$$Z_s [pu] = \frac{1}{2} \times (Z_{ps} [pu] + Z_{st} [pu] - Z_{pt} [pu]) \tag{2}$$

$$Z_t [pu] = \frac{1}{2} \times (Z_{pt} [pu] + Z_{st} [pu] - Z_{ps} [pu]) \tag{3}$$

Se modela la red de alta tensión (AT), vista desde la barra de 132 [kV], como un generador ideal y una impedancia a la que se desprecia su componente resistiva. Las impedancias de secuencia de la red equivalente aguas arriba de la ET en estudio, se calculan a partir de las ecuaciones 4 y 5 presentadas a continuación.

$$Z_{cc-1} [pu] = Z_{cc-2} [pu] = j \times X_{cc-1} [pu] = \frac{U_B^2}{S_{cc}} \times \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{S_B}{S_{cc}} \tag{4}$$

$$Z_{cc-0} [pu] = j \times X_{cc-0} [pu] = \left(\frac{3 \times S_B}{S_{cc-1F}} - \frac{2 \times S_B}{S_{cc-3F}} \right) \tag{5}$$

En la figura 2 se presentan los circuitos equivalentes para las redes de secuencia directa, inversa y homopolar (Roepert; 1985), con la inserción de la impedancia de Pat ($3Z_n$) y la impedancia de la línea de 33 [kV] (Z_{Li} : variable en función a la distancia de la falla) sobre la cual se simulan cortocircuitos monofásicos a diferentes distancias.

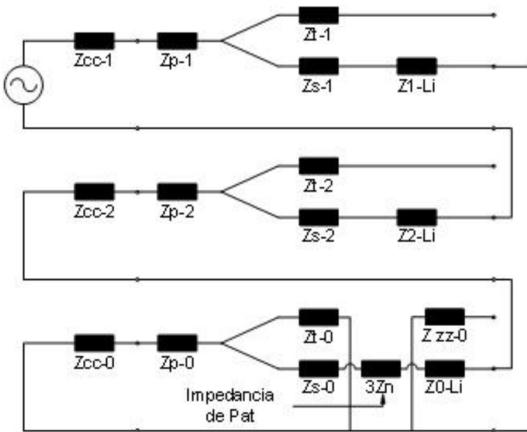


Fig. 2: Circuito equivalente del transformador para las diferentes secuencias.

Las impedancias equivalentes de cada una de las redes se obtienen según las ecuaciones 6 y 7.

$$Z_1 = Z_2 = Z_{CC-1} + Z_{p-1} + Z_{s-1} + Z_{1-Li} \tag{6}$$

$$Z_0 + 3 \cdot Z_N = \left[\frac{(Z_{cc-0} + Z_{p-0}) \times Z_{i-0}}{(Z_{cc-0} + Z_{p-0}) + Z_{i-0}} + Z_{s-0} + Z_{0-Li} \right] + 3 \cdot Z_N \tag{7}$$

Según la teoría de las componentes simétricas, la Icc monofásica a tierra se calcula según la ecuación 8.

$$I_{cc} = \frac{3 \times E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 \times Z_N} \tag{8}$$

Las tensiones en las fases sanas están dadas por las ecuaciones 9 y 10, donde “a” es el factor de fase: e^{j120° .

$$V_s = E \times \left(a^2 - \frac{a^2 \times Z_1 + a \times Z_2 + Z_0 + 3 \times Z_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 \times Z_N} \right) \tag{9}$$

$$V_T = E \times \left(a - \frac{a \times Z_1 + a^2 \times Z_2 + Z_0 + 3 \times Z_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 \times Z_N} \right) \tag{10}$$

RESULTADOS

Análisis de sensibilidad de las corrientes de falla y sobretensiones temporarias para cada uno de los elementos limitadores (resistencia-reactancia).

En el mercado argentino existen esencialmente dos tipos de elementos limitadores de Icc a incorporar en las puestas a tierra de los sistemas eléctricos, uno de naturaleza netamente “resistivo” y otro netamente “inductivo”.

A fin de determinar el tipo más adecuado para las ETs pertenecientes a la EPESF, se estudia el caso particular de la ET Esperanza, específicamente se modela un transformador de 15 [MVA] siendo la potencia de cortocircuito de la red de aproximadamente 2000 [MVA].

Se compara el comportamiento de las corrientes y sobretensiones frente a la inserción de una reactancia y una resistencia de distintas magnitudes (ver Figura 3), simulando un cortocircuito en barras de 33 [kV] de la ET.

De las gráficas obtenidas se observa que la reactancia de Pat presenta una mayor limitación de la corriente de falla que la resistencia, en cuanto a las sobretensiones, descartando los valores inferiores, ambas presentan un comportamiento similar.

Este mismo estudio se hace extensivo a todos los transformadores, se consideran las potencias de cortocircuito particulares de cada ET, y se encuentra en todos los casos resultados similares, la reactancia de Pat es la que presenta un comportamiento más efectivo. Además de presentar un mejor desempeño desde el punto de vista técnico, las reactancias presentan formatos mucho más compactos que las resistencias, lo que las hace más adecuadas dadas las habituales limitaciones de espacio que existen en las ETs.

Por las razones expuestas se concluye que las impedancias más adecuadas corresponden a las reactancias, por ello en lo siguiente, el estudio se centrará en reactancias de Pat únicamente.

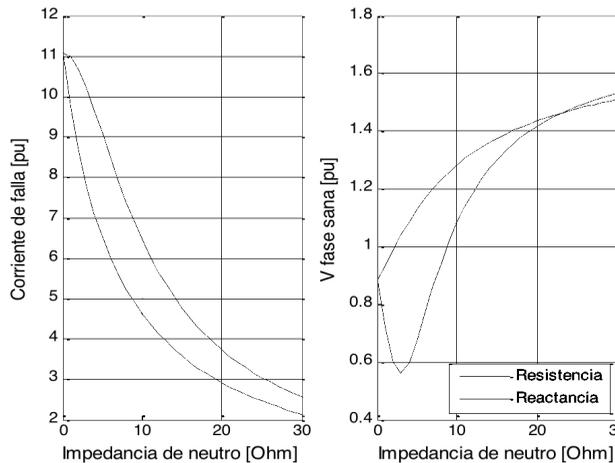


Fig. 3: Comparación corriente de falla y tensión en fases sanas vs valor de Reactancia - Resistencia limitadora para la ET Esperanza.

Análisis de sensibilidad de las corrientes de falla y sobretensiones temporarias para los valores de potencia nominal del transformador (15 y 30 [MVA])

En esta sección se analiza la influencia de la potencia nominal del transformador sobre la magnitud de las sobretensiones y corrientes de cortocircuitos para un rango de valores de reactancia de Pat. Se pretende determinar la conveniencia o no, de separar el cálculo del valor más propicio del elemento limitador en categorías definidas por las potencias nominales de las máquinas.

Para ello, se comparan los desempeños de la impedancia entre dos máquinas de 15 y 30 [MVA] (ver Figura 4), específicamente estas corresponden a las ETs Capitán Bermúdez y Calchines.

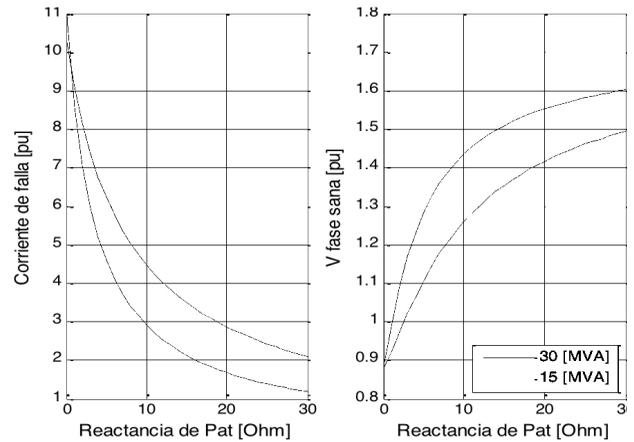


Fig. 4: Comparación de los efectos producidos por la Reactancia de Pat entre transformadores de 15 y 30 [MVA].

Según los análisis de sensibilidad realizados para diferentes valores de reactancia de Pat en transformadores de 15 y 30 [MVA], se evidencia que la pendiente de decrecimiento de la I_{cc} es similar en ambos casos, pero difieren en la magnitud de la reducción ante la inserción de un mismo valor de impedancia. Se ha obtenido que para una reactancia de Pat de 10 [Ω] la corriente disminuye aproximadamente un 70 % para la ET Calchines y un 55 % para la ET Cap. Bermúdez. Ante una reactancia de 20 [Ω] la reducción alcanza valores de 85 % y 75 % respectivamente. En el resto de las ETs analizadas se encontraron comportamientos similares, en base a esto se opta por estratificar el estudio en base a las potencias nominales de los transformadores.

Cálculo de la magnitud de la impedancia de puesta a tierra. Restricciones técnicas.

Con el propósito de encontrar un único valor de reactancia de Pat, que sea apto de ser colocado en

todas las subestaciones analizadas, se establecen restricciones técnicas que permiten rechazar o aceptar un determinado valor de la misma. A partir de estas restricciones, y en función a la potencia nominal del transformador, se obtiene un rango o franja de valores posibles que las verifican. Estas restricciones están dadas por:

Valor mínimo de la corriente de cortocircuito:
El mínimo de la corriente de falla está condicionado por la calibración de las protecciones de tierra del transformador, es práctica usual configurar estas protecciones en valores inferiores a 1 [pu] (resultando en valores de 0.3 – 0.4 [pu]), a razón de esto, se asume un margen de seguridad y se considera como límite inferior para la corriente de falla el valor de 1 [pu].

Valor máximo de la corriente de cortocircuito:
El valor máximo admisible de la corriente de falla está dado por la magnitud en que se pretenden disminuir los efectos destructivos de la misma. La Icc de diseño de los transformadores, para efectos electrodinámicos, es de como mínimo, 14 veces la nominal, habiéndose encontrado en las ET consideradas valores de corriente de falla inferiores a 12 [pu]. Se adopta como restricción corrientes máximas de 4 [pu], valor que resulta muy inferior al admisible por diseño, lo que evita que ante sucesivos cortocircuitos los arrollamientos se vean severamente afectados por tales solicitudes, pues se disminuye aproximadamente y en promedio un 60% la corriente de falla y consecuentemente un 35% los esfuerzos térmicos y dinámicos que la máquina debe soportar. Un valor límite menor reduciría los efectos perjudiciales en mayor cuantía, pero esto no es conveniente debido a que una diferencia más estrecha

entre el valor máximo y mínimo de la corriente requeriría de valores de reactancia más específicos para la condición de cada ET y el mismo perdería generalidad y por ende se desviaría del objetivo perseguido.

Sobretensiones en fases sanas: Las restricciones impuestas a las sobretensiones de las fases sanas están dadas por el denominado factor de falla a tierra, este se define como la relación de la tensión eficaz de las fases sanas durante la falla a tierra, sea ésta monofásica o bifásica, respecto del valor eficaz de la tensión de fase en ausencia de falla. Para asegurar que el sistema se encuentra a tierra, este factor debe valer 1.38, si el mismo es superado se dice que el sistema está aislado de tierra (Roepfer; 1985).

Valores ideales

Se modelaron todas las ETs consideradas a través de un programa desarrollado en Matlab, el cual, teniendo en cuenta las restricciones impuestas, permite el estudio del comportamiento de la corriente y tensiones ante una falla monofásica a tierra a distintas distancias de la ET. Para cada ET se determina un rango admisible del valor de la reactancia (Tabla I), para distancias de 0, 15, 30 y 45 [km], estos rangos son contrastados unos con otros y se obtiene un valor general, cuyos valores resultan válidos para todos los transformadores de la misma potencia.

En las Figura 5 y Figura 6 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad en transformadores de 15 y 30 [MVA] respectivamente, considerando una falla monofásica en barras de la ET.

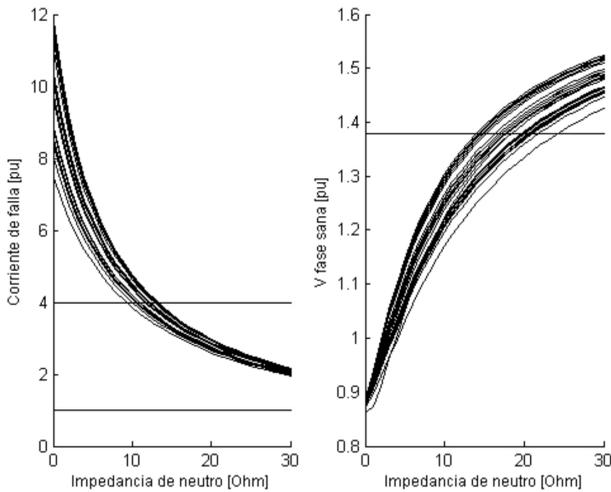


Fig. 5: Corrientes de falla y sobretensiones para transformadores de 15 [MVA].

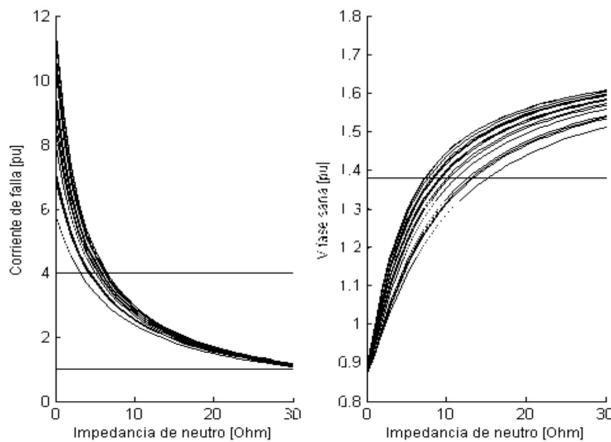


Fig. 6: Corrientes de falla y sobretensiones para transformadores de 30 [MVA].

En los casos en que el límite inferior es 0 [Ω] (Tabla I), ocurre que la impedancia de la red aguas arriba del punto de falla, es tal que logra por sí misma disminuir, por debajo de la restricción impuesta, los valores de la corriente de falla.

Potencia nominal	Reactancia de PAT [Ω]				Restricción
	Distancia de la falla				
	0 [km]	15 [km]	30 [km]	45 [km]	
15 [MVA]	13	2	0	0	I_{cc}
	15	13	13	13	V_{f-max}
30 [MVA]	7	0	0	0	I_{cc}
	8	7	7	7	V_{f-max}

Tabla I: Valores de Reactancia de Pat según restricciones.

Para distancias mayores a 45 [km] se obtienen valores de corriente de falla menores a 1 [pu], debido a la mayor proporción de impedancia de línea involucrada. En este caso, las limitaciones al valor de la reactancia están dadas por las sobretensiones de las fases sanas; con lo cual para el caso de líneas con estas características es necesario un estudio particular a fin de determinar el valor ideal de la reactancia.

Se contrastan los resultados obtenidos para cada distancia particular y se obtiene que para los transformadores de 15 [MVA] corresponde un valor de reactancia de 13 [Ω] mientras que para los de 30 [MVA] el valor ideal es de 7 [Ω].

DISCUSIÓN

El objetivo de este trabajo consiste en la obtención de un único valor de impedancia, pero esta premisa no resulta posible de cumplir debido a que el peso relativo de la impedancia limitadora resulta muy disímil según se trate de transformadores de 15 o 30 [MVA], pues sus impedancias de cortocircuito presentan diferencias cercanas al doble.

Por esta razón se opta, sin perder generalidad, por obtener valores particulares para máquinas de

potencias nominales tan dispares como las estudiadas en este trabajo (15 y 30 [MVA]). Por otra parte, en la población de ETs analizadas (más de 30 ETs) se comprueba que los diferentes niveles de potencia de cortocircuito en la barra de 132 [kV] donde se vinculan las ETs 132/33/13,2 [kV] no tienen un grado de incidencia relevante en los valores de I_{cc} obtenidos en el nivel de 33 [kV], debido al escaso peso de la impedancia de la fuente en comparación a la propia impedancia del transformador de potencia.

Por otra parte, las redes alimentadas por estas ETs son en general débiles, es decir muy impedantes, por lo que al incluir fallas a distancias considerables de la ET las mismas tienen gran influencia en la limitación de la I_{cc} y consecuentemente estrechan el margen viable de la impedancia.

En caso de líneas de 33 [kV] de largas distancias, mayores a 45 [km], se requiere un estudio particular para la ET en cuestión, a fin de obtener resultados más adecuados a la misma, por las razones antes mencionadas.

CONCLUSIONES

Se modelaron transformadores de tres arrollamientos de ETs 132/33/13,2 [kV] de la EPESF que abastecen líneas de 33 [kV] con altas tasas de fallas. Los estudios de sensibilidad de I_{cc} en función a diferentes tipos y magnitudes de impedancias de Pat permiten inferir que para una adecuada protección ante fallas monofásicas a tierra, es aconsejable la inclusión de reactancias de Pat de 13 [Ω] para las máquinas de 15 [MVA] y de 7 [Ω] para aquellas de 30 [MVA], con lo que se logra una disminución, en promedio, de un 60% de la corriente de falla y consecuente de un 35% en los esfuerzos térmicos y dinámicos a los que se someten los arrollamientos de los transformadores.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Ulises Manassero por el impulso, la orientación, y ayuda recibidos durante la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Ebrahimi, B., Fereidunian, A., Saffari, S., Faiz, J. (2014). Analytical estimation of short circuit axial and radial forces on power transformers windings. IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 8, pp. 250–260.

Gutten, M., Janura, R., Jurcik, J. (2015). Determination of the Electromagnetic Forces Caused by Short-Circuit Currents. 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU CON).

Ferrelli, R.J., Contreras C.E., Casagrande M., Laura V., Milani F. “Estadística de fallas en transformadores de potencia. Implementación de bobinas limitadoras de Icc”, Décimo tercer encuentro regional iberoamericano de Cigré. Puerto Iguazú, (2009).

Roeper, Richard, “Corrientes de cortocircuito en redes trifásicas”, Traducción de la quinta edición alemana, Marcombo, Madrid, 8 – 34, (1985).