

MEDICIÓN DE IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Ing. Gustavo Adolfo Gómez Ramírez

Resumen

Un tema importante hoy día a la hora de realizar ajustes a las protecciones es tener el conocimiento y la certeza de los parámetros de los elementos a proteger. Este llega a ser un punto neurálgico en el conocimiento de la protección de un sistema eléctrico de potencia, pues gran parte de los equipos carecen de la información necesaria para realizar los ajustes y su debida protección; en especial porque en el caso de los transformadores de potencia, tienen un costo adicional a las pruebas básicas y su costo podría llegar a ser considerable. Dicho valor es primordial para proteger equipos en conexión estrella principalmente, debido a que estos tienen un conductor *a neutro*, que normalmente está sólidamente aterrizado. Así mismo, a la hora de realizar estudios de sobretensiones el valor de impedancia de secuencia cero toma importancia. El modelo de componentes simétricos desarrollado por C.L. Fortescue, establece las condiciones para el cálculo de las fallas trifásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y monofásicas. Las dos últimas poseen componentes de secuencia cero, por lo que su cálculo es de gran trascendencia. La siguiente nota técnica desarrolla de manera sistemática cómo obtener dicho parámetro de acuerdo a la normas IEC e IEEE y apegado a la teoría que fundamenta este principio.

Palabras clave: componentes simétricas, impedancias de secuencia, protección a sistemas de potencia eléctrica.

Abstract

An important topic today at the moment of making adjustments to the power system protections is to have the knowledge and the certainty of the parameters of the elements to protect. It leads to a neuralgic point in the knowledge of the protection of an electrical system of power, due to the fact that great part of the equipment lacks the necessary information to make the adjustments and the corresponding, for instance the case of the power transformers. They have an additional cost to the basic tests and such cost might be considerable. This value is basic to protect equipment in major connection principally, due to the fact that these have a driver to neutral, which normally is solidly earthed. Likewise, at the moment of studies on overvoltage the value of impedance of sequence zero turns relevant. The model of components symmetrical developed by C.L. Fortescue, established the conditions for the calculation of the three-phase, two-phase, two-phase faults to earth and single-phase. The two last ones possess components of sequence zero, for what its calculation is important. The following technical note systematically develops how to obtain the parameter mentioned above according to the standard of IEC and IEEE together with the theory that supports this concept.

Index term: Components symmetrical, impedances of sequence, protection to systems of electrical power.

Recibido: 6 de noviembre de 2014 **Aprobado:** 20 de agosto de 2015

1. INTRODUCCIÓN

El cálculo de parámetros en máquinas eléctricas u otros elementos del sistema de potencia, puede llegar a ser muy difícil incluso costoso; por esta

razón muchas veces solo se pueden realizar en las fábricas con los equipos adecuados. Un ejemplo es la *impedancia de secuencia cero*. Este parámetro presenta limitaciones técnicas en implementación debido a que requiere equipos de gran capacidad



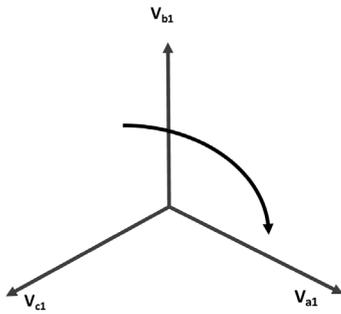


Figura 1a. Componentes de Secuencia Positiva

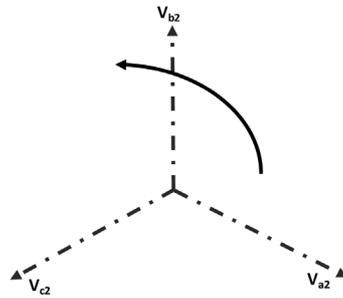


Figura 1b. Componentes de Secuencia Negativa

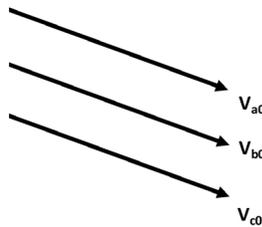


Figura 1c. Componentes de Secuencia Cero

Figura 1. Componentes de secuencias para tensiones trifásicas

y potencia para poder calcular su valor. El valor de impedancia de secuencia cero es importante, pues es un parámetro para ajustar las protecciones de un sistema de potencia, hacer estudios de sobretensiones, parametrización de equipos, cálculo de impedancias de secuencia, entre otros. Por esta razón su estimación es un insumo valioso e imprescindible principalmente para las protecciones de fallas a tierra y coordinación de aislamientos.

2. COMPONENTES SIMÉTRICOS

En 1918 se presentó el documento: “Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks” (Fortescue, 1918), donde se desarrolló el modelo matemático de los componentes simétricos, para el análisis de redes polifásicas. Este trabajo demuestra que un sistema desequilibrado de n vectores relacionados entre sí, pueden descomponerse en n

vectores equilibrados denominados componentes simétricos de los vectores originales. Esto fue de gran importancia, debido a que a partir de este principio los sistemas eléctricos se pueden modelar a partir de la red de secuencia positiva, negativa y cero, según se muestra en la Figura 1. Donde se observa:

- Figura 1a. Los componentes de secuencia positiva, formados por tres vectores de igual módulo, con diferencias de fase de 120° y con la misma secuencia de fase que los vectores originales.
- Figura 1b. Los componentes de secuencia negativa, formados por los vectores de igual módulo, con diferencias de fase de 120° y con la secuencia de fases opuesta a la de los vectores originales.
- Figura 1c. Los componentes de secuencia 0, formados por tres vectores de igual módulo y con una diferencia de fase nula.

Comocada uno de los vectores desequilibrados originales es igual a la suma de sus componentes (ver Figura 2), los vectores originales expresados en función de sus componentes son:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

De esta manera y utilizando el operador $a=1\angle 120^\circ$ se obtiene la siguiente ecuación matricial para las tensiones:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

De igual manera para obtener las corrientes de secuencia se procede de la misma forma:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

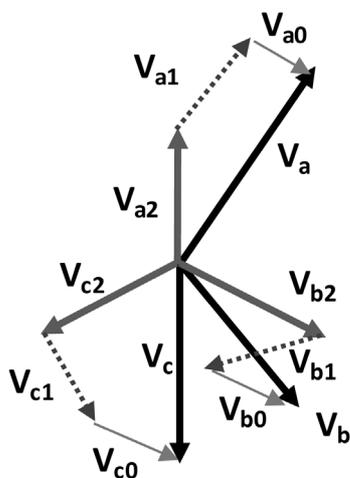


Figura 2. Suma vectorial de componentes de secuencias para tensiones trifásicas

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

El caso de tener conectada una carga al sistema eléctrico en estrella se muestra en la Figura 3.

Donde:

V_{ca} ; V_{ab} ; V_{bc} : tensiones de línea

V_{an} ; V_N : tensión de fase a neutro (a) y tensión de neutro respectivamente

I_a ; I_b ; I_c : corrientes de fase

I_N : corriente de neutro

Z_Y : impedancia por fase

Z_N : impedancia en neutro

Así, desarrollando la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_Y + 3Z_N) & 0 & 0 \\ 0 & Z_Y & 0 \\ 0 & 0 & Z_Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

De esta manera se hace el siguiente análisis.

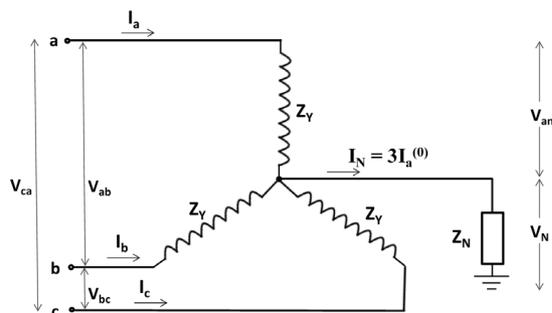


Figura 3. Red de secuencias para sistema trifásico en estrella con cargas

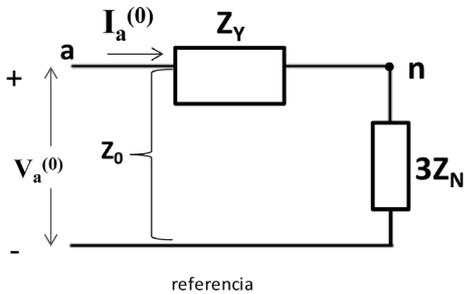


Figura 4. Circuito de secuencia cero equivalente

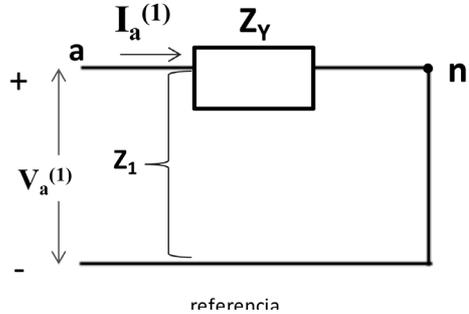


Figura 5. Circuito de secuencia positiva equivalente

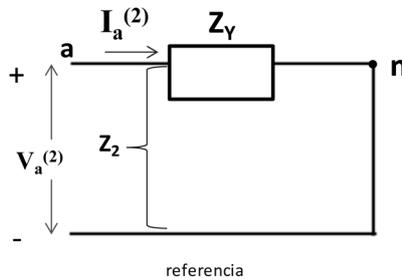


Figura 6. Circuito de secuencia negativa equivalente

2.1 Red de secuencia cero

$$V_{a0} = (Z_Y + 3Z_N) I_{a0} = (Z_0) I_{a0} \tag{1}$$

La Ecuación 1 relaciona la tensión de secuencia cero V_{a0} con la corriente de secuencia cero I_{a0} y es útil para definir la impedancia de secuencia cero Z_0 según se muestra en la Figura 4.

Red de secuencia positiva

$$V_{a1} = Z_Y I_{a1} = (Z_1) I_{a1} \tag{2}$$

Donde Z_1 se llama impedancia a la corriente de secuencia positiva (impedancia de secuencia positiva) según se muestra en la Figura 5.

2.2 Red de secuencia negativa

$$V_{a2} = Z_Y I_{a2} = (Z_2) I_{a2} \tag{3}$$

Donde Z_2 se llama impedancia a la corriente de secuencia negativa (impedancia de secuencia negativa) según se observa en la Figura 6.

Evidentemente en sistemas eléctricos conectados en delta, el análisis anterior para la impedancia de secuencia cero no se aplica, ya que estos no poseen conexión de neutro. Esto es de suma importancia, debido a que el estudio de componentes simétricos da la posibilidad de análisis de fallas en sistemas de potencia y por ende el estudio y análisis de cortocircuitos en redes eléctricas, así como el análisis de sobretensiones ocasionadas por las fallas en los sistemas de potencia. Por ello, para establecer

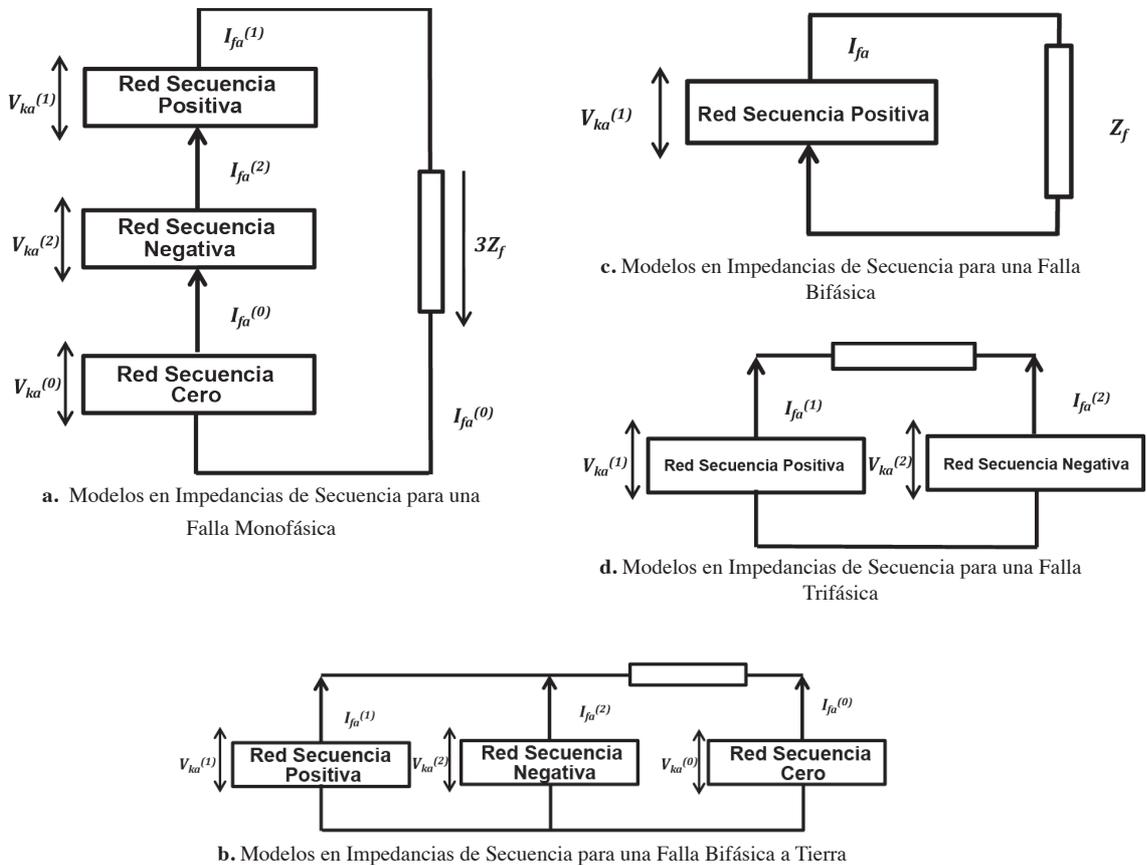


Figura 7. Modelos de Impedancias de fallas para sistemas de potencia

una correlación del tipo de falla y su análisis se debe modelar como se presenta en la Figura 7.

Asimismo, se podrá establecer un modelo equivalente para cada uno de los elementos de un sistema de potencia según se puede apreciar ven la Figura 7, donde se muestran los modelos equivalentes de fallas monofásicas, bifásicas, trifásicas y bifásicas a tierra respectivamente. Tales criterios aplican para los elementos principales del sistema de potencia como lo son líneas de transmisión, máquinas sincrónicas y transformadores de potencia (Roeper, 1985; Blackburn, 1993).

2.3 Impedancias de secuencia en líneas de transmisión

La impedancia de secuencia positiva y negativa son iguales, ya que cuando se desarrollaron las ecuaciones para la inductancia y capacitancia no se especifica algún orden para las fases. Al calcular la impedancia de secuencia cero debe tomarse en cuenta la resistencia e inductancia de los conductores que sirven de retorno a la corriente y el campo magnético debido a la corriente de secuencia cero.

2.4 Impedancias de secuencia en máquinas sincrónicas

Este tipo de impedancias normalmente son obtenidas en fábrica. El circuito de impedancia positiva contiene la tensión interna inducida y la impedancia de secuencia positiva. El circuito de secuencia negativa no contiene fuentes y la impedancia de secuencia negativa es muy similar a la impedancia de secuencia positiva. El circuito de secuencia cero tampoco contiene fuentes y la impedancia de secuencia cero es menor a las impedancias de secuencia positiva y negativa respectivamente.

3. IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

El propósito de esta prueba es una técnica para el cálculo de las condiciones de falla para un transformador de potencia donde se requiere tener conocimiento de los componentes simétricos. Algunos de los procesos en los cálculos de redes de carga simétricas trifásicas (corrientes, tensiones, reactancias, etc.) pueden ser analizados monofásicamente desde los valores de otras fases simplemente cambiadas por 120° y teniendo la misma magnitud. Esto es solamente válido para cortocircuitos trifásicos. (IEC 60076-1, 1989; IEEE C57.12.90, 1999)

Para sistemas trifásicos desbalanceados, en una falla monofásica; cada fase ha sido analizada y calculada por separado ya que las impedancias son diferentes a esa en un sistema simétrico. Estos requieren del conocimiento de la teoría de componentes simétricos y de las características de secuencias de fase de forma individual. Para utilizar este método es posible convertir algún sistema trifásico desbalanceado en uno balanceado, sabiendo:

- Valor de Secuencia Positiva (ABC)
- Valor de Secuencia Negativa (BAC)
- Valor de Secuencia Cero (magnitudes en la misma dirección)

Los componentes de tensión y corrientes de secuencia en cada componente trifásico

son combinadas con sus tres correspondientes impedancias, las cuales serán positiva, negativa y cero respectivamente. En transformadores de potencia la secuencia positiva y negativa son iguales, sin embargo, la impedancia de secuencia cero Z_0 puede diferir significativamente de la impedancia de secuencia positiva, dependiendo de la conexión del transformador, del diseño mismo del transformador, el tipo de aterrizamiento y de la calidad de la malla a tierra de la subestación.

3.1 Definición de la impedancia de secuencia cero

La impedancia de secuencia cero es la impedancia medida entre las terminales de fase y el neutro cuando las tres fases están conectadas juntas según se observa en la Figura 8. La impedancia de secuencia cero puede solamente desarrollarse en conexiones estrella en transformadores trifásicos, debido a que los sistemas eléctricos conectados en delta carecen del conductor a neutro. (Blackburn, 1993; Roeper, 1985)

A continuación se muestra en la Figura 8, según las normas internacionales (IEEE C57.12.90, 1999) (IEC 60076-1, 1989), la conexión típica para realizar la prueba en condiciones de laboratorio o fuera de este, mientras se tenga disponibilidad de condiciones adecuadas:

La impedancia de secuencia cero es relacionada a cada una de las fases individuales y es tres veces el valor medido.

$$Z_0 = 3 (U_p / I) \quad (4)$$

Donde:

U_p : valor de tensión (fase a neutro)

I : corriente en el neutro

La impedancia de secuencia cero es normalmente dada como un porcentaje de la impedancia base Z_b del transformador, como es el caso para la impedancia normal de corto circuito (circuito impedancia de secuencia positiva). La impedancia base puede ser deducida como:

$$Z_b = (U_r^2 / S_r) \Omega \quad (5)$$

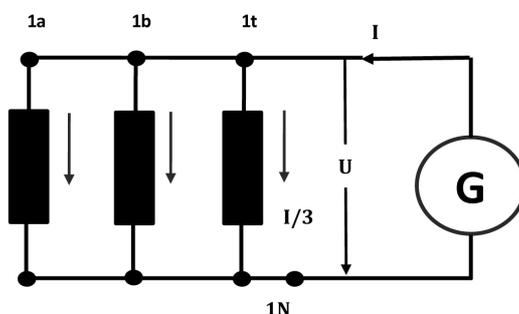


Figura 8. Conexión General de Impedancia de Secuencia Cero para transformador de potencia de tres devanados

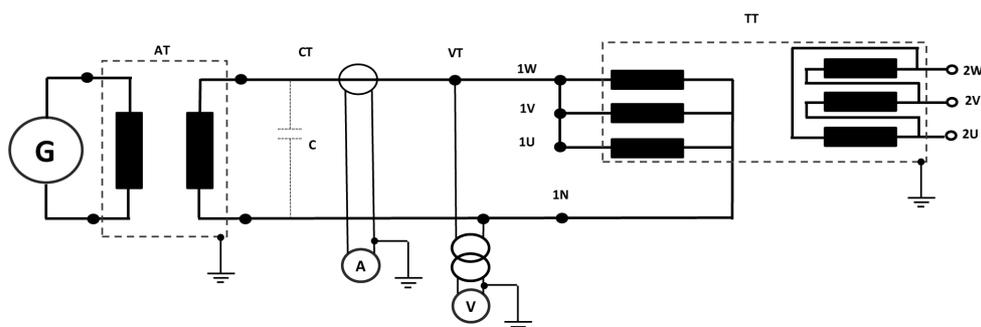


Figura 9. Circuito General de Medición de Impedancia de Secuencia Cero

Nota: AT: Alta Tensión, G: Tensión de Fuente (monofásico), C: Banco de Capacitores (eventualmente necesarios para realizar compensación), CT: Transformador de Corriente, VT: Transformador de Potencial, TT: Transformador bajo Prueba.

Donde:

S_r = valor de potencia

U_r = valor de tensión fase a fase

El valor relativo de impedancia de secuencia cero puede ser descrito como:

$$z_0 = (Z_0 / Z_b) * 100 \quad (6)$$

La impedancia de secuencia cero tiene dos componentes en la impedancia: la resistencia de secuencia cero R_0 y la reactancia de secuencia X_0 . En la práctica, como $R_0 \ll X_0$ entonces la resistencia puede ser despreciada, en otras palabras la impedancia de secuencia cero es casi

igual a la reactancia de secuencia cero asumiendo también nula la resistencia de falla y la resistencia de arco propias de una falla monofásica.

3.2 Circuito de Medición

El circuito de prueba se muestra en la Figura 9, la medición será realizada a un mismo valor de frecuencia. La medición de corriente no deberá exceder un 30% de la corriente nominal a fin de proteger el devanado. La tensión de alimentación no deberá exceder la tensión fase – tierra con el que opera normalmente. (Roeper, 1985; Blackburn, 1993)

El circuito equivalente de secuencia cero según la conexión de transformadores de

Tabla 1. Diagramas básicos de conexión para medir impedancia de secuencia cero en transformadores de potencia

No	Transformador	Circuito de Medición	Circuito equivalente para el sistema de secuencia cero
1			
2			
3		<p>Medición de $Z_{012, 3}$ abiertas</p> <p>Medición de Z_{013}</p> <p>Medición de Z_{023}</p>	

Tabla 2. Resultados obtenidos de impedancia de secuencia cero para diversas posiciones de cambiador de derivaciones en transformador de potencia

Posición	Tensión (voltios)	Corriente (Amperios)	Z_0 (Ω)	$\%Z_0$
1	38.444	17.214	6.700	5.277%
2	33.915	15.304	6.648	5.237%
3	33.852	15.304	6.622	5.216%
4	33.565	15.304	6.580	5.182%
5	33.831	15.472	6.560	5.167%

cualquier tamaño (IEC 60076-1, 1989; IEEE C57.12.90, 1999) se expone en la Tabla 1, basada en los criterios de los circuitos equivalentes de la Figura 7.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se analizó un transformador con las siguientes características:

- Tensión: 34,5/13,8 kV
- Corriente: 25,1/63 A
- Potencia Nominal: 1500 KVA
- Impedancia Nominal medido en fábrica: 5,5 %
- Conexión: Delta-Estrella
- Posiciones de cambiador de derivaciones: 5

De esta manera se tomarán los siguientes valores base para el cálculo de la impedancia de secuencia cero según lo descrito anteriormente:

- $V_{base} = 13.8 \text{ kV}$
- $I_{base} = 63 \text{ A}$
- $P_{Base} = 1500 \text{ KVA}$
- $Z_{base} = 126.96 \Omega$

Realizando la conexión del circuito básico No 2 de la Tabla 1, se obtuvieron los resultados en las cinco posiciones del cambiador de derivaciones, los cuales se presentan en la Tabla 2.

Se estima que un transformador en conexión estrella-Delta podrá tener un valor del 85-100 % de la impedancia nominal (Roeper, 1985). Para el transformador en cuestión el valor nominal de fábrica fue 5.5 %, y el valor medido es 5.21 % (impedancia de secuencia cero), de esta manera se tiene un valor cercano al 95 % de la impedancia nominal, el cual, para el tipo de transformador y la corriente nominal es aceptable.

En este caso se aplicó 15,33 A lo que equivale a un 24,28% de la corriente nominal secundaria. De esta manera se garantiza la integridad del devanado pues la norma permite un valor máximo de un 30 % para obtener valores satisfactorios. Para lograr dichos valores se requirió de una fuente regulable cuya capacidad es:

- Tensión de prueba: 2400 voltios regulables AC

- Corriente de Prueba: 50 Amperios

5. DISCUSIÓN FINAL

5.1 Conclusiones

La prueba de impedancia de secuencia cero es de suma importancia para la parametrización de las protecciones no solo de un transformador de potencia sino un sistema eléctrico de potencia así como todos sus elementos. Se hace por lo tanto necesaria su obtención con el propósito de afinar el ajuste de las protecciones y hacer cálculos de sobretensiones y de esta manera brindar mayor confiabilidad al sistema de potencia. Con ello se logrará mantener una alta selectividad en las protecciones y una buena coordinación del aislamiento.

5.2 Recomendaciones

La técnica experimentada aplica a transformadores de potencia pequeños (menores a 5 MVA) por lo que hace falta experimentar en transformadores de potencias mayores. La gran limitante es el transformador de pruebas, pues este deberá tener una impedancia muy cercana al objeto de pruebas a fin de que el acople de impedancias no ocasione problemas en la medición debido a la inductancia tan alta del transformador a probar. Una manera de minimizarlo es acoplado capacitores a fin de compensar la reactancia inductiva del transformador de pruebas y el transformador a probar junto con la reactancia capacitiva, a fin de lograr corrientes mayores, tal y como lo indica la Figura 8.

Igualmente es importante analizar la impedancia de secuencia cero en función de los armónicos, pues gran parte de las fallas a tierra tienen componentes importantes de armónicos que también deben ser considerados. Finalmente es necesario, implementar una metodología de pruebas y verificar el valor medido con respecto al valor obtenido en fábrica a fin de mantener un estricto control de este valor tanto para ajustes de protecciones como para los diversos estudios que deriven de este dato.

6. LISTA DE ABREVIATURAS

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad
 IEC: International Electrotechnical Commission
 IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
 LIMAT: Laboratorio de investigación y mantenimiento en alta tensión
 AT: alta tensión
 BT: baja tensión
 kV: kilovoltio
 A: corriente eléctrica en amperios
 Ω : Ohmios
 U: fase U
 V: fase V
 W: fase W

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blackburn, J. L. (1993). *Symmetrical Components for Power System Engineering*. New York, USA: Marcel Dekker Inc.
- Fortescue, C. (1918). Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. *34th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers*, 1027-1140.
- IEC 60076-1. (1989). IEC 60076-1. *High Voltage Test Techniques Part-1: General difinitions and test requirements*. Europa: IEC.
- IEEE C57.12.90. (1999). IEEE C57.12.90. *Zero-phase-sequence Impedance*. USA: IEEE.
- Roeper, R. (1985). *Corrientes de Cortocircuito en Redes Trifásicas*. España: MARCOMBO.

SOBRE EL AUTOR

Ing. Gustavo Adolfo Gómez Ramírez.
 Ingeniero de Laboratorio de Alta Tensión ICE-LIMAT. Profesor en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica y profesor en la Escuela de Ingeniería Electromecánica en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 2533 3060, correo electrónico: ggomezra@ice.go.cr