

Disminución de distancias internas en autotransformadores de potencia

Mediante el uso de varistores en devanados de regulación

Filemon Mosqueda, Fernando Jurado, David Granados y Ricardo Galvan
Depto. de Ingeniería Electromecánica y Maestría en Ingeniería eléctrica
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
Irapuato Gto, Mexico
fejurado@itesi.edu.mx

Abstract— The present research proposes the use of varistors in the voltage regulation windings on the power autotransformers, derived from the transient and temporary voltages and sustained overvoltages as well as the oscillations that occur in this type of machines, of the varistors influences the reduction risks of the machines windings as well as incursion of special insulation and large distances between connection guides. The implementation of varistors allows to reduce internal distances and to handle more standard and lower cost insulation due to a better control of the transient voltages obtained, which results in a design of lower cost and more competitive in the electric market compared to the same design without varistors.

Keyword— Varistor, autotransformers and windings.

Resumen — La presente investigación propone el uso de varistores en los devanados de regulación de tensión de los autotransformadores de potencia, derivado de las tensiones transitorias, temporales y sobretensiones sostenidas así como de las oscilaciones que se presentan en este tipo de equipos, de tal modo la incorporación de los varistores influye en la reducción riesgos de los devanados del equipo así como incursión de aislamientos especiales y distancias grandes entre guías de conexión. La implementación de varistores permite reducir distancias internas y manejar aislamientos más estándares y de menor costo debido a un mejor control de las tensiones transitorias obtenidas, lo cual deriva en un diseño de menor costo y más competitivo en el mercado eléctrico en comparación con el mismo diseño sin varistores.

Palabras claves— Varistores, autotransformadores y devanados.

I. INTRODUCCIÓN

Desde el primer diseño del transformador, los esfuerzos para el diseño y la fabricación de equipos cada vez más eficientes y al menor costo posible ha sido el reto de la mayoría de diseñadores. Lo cual conlleva a utilizar los avances de la tecnología, aplicando la cultura de la mejora continua y la inversión en tecnologías de investigación y desarrollo para el presente y para el futuro. La demanda de energía sigue creciendo cada año, los diferentes diseñadores tienen que cubrir la demanda. Para dicho efecto, alrededor del mundo existen cientos de equipos que operan con tiempos de servicio de más de 35-40 años. Es importante tener en cuenta que hace 35-40 años la tecnología en materiales de aislamientos no era tan sofisticada como en la actualidad. Hay diferentes tipos y aplicaciones de estas máquinas, algunos de estos tipos más comúnmente utilizados en Estados Unidos, Canadá y México se mencionan [1-3].

Transformador generador: Normalmente, estos tipos de máquinas están conectados directamente al generador, que tiene una baja tensión en el primario y un voltaje más alto en el lado secundario con el fin de transmitir la potencia a alta tensión. (115, 230 o 400 kV).

Transformador auxiliar: Estas máquinas son reductores. El devanado primario se conecta directamente a la salida del generador. La tensión del secundario se utiliza para suministrar energía al equipo auxiliar en la subestación.

Transformador de subestación: Estos tipos de equipos también se utilizan como reductores y su uso común es en subestaciones en las que la tensión está por debajo de 230 kV en el lado primario y el lado secundario es 34.5, 25 o 13,8 kV, a partir de estas subestaciones la tensión se transmite y posteriormente se conectan al área de distribución para suministrar la energía doméstica. Etc.

En esta investigación se analiza el comportamiento transitorio del devanado de regulación mediante varistores instalados en un autotransformador y analizan las ventajas de éstos.

A continuación se mencionan algunos de los materiales con los que comúnmente son diseñados los devanados de este tipo de equipos [3-4]:

Cobre

Ventajas:

- Resistividad eléctrica baja
- Perdidas bajas
- Bajo calentamiento
- Dureza
- Aguante al corto circuito

Desventajas:

- Costoso

Aluminio

Ventajas:

- Bajo costo
- Manejable

Desventajas:

- Resistividad eléctrica alta
- Perdidas altas
- Ocupa más espacio
- Alto calentamiento
- Menor resistencia a la tracción

Los tipos de conductores que se utilizan en el diseño de las bobinas son normalmente tipo rectangular (solera) y cable continuamente transpuesto (CTC). El empleo de cada uno de éstos depende principalmente del nivel de corriente que cada devanado va a manejar, normalmente para devanados con corrientes superiores a 700 A se utiliza el CTC, para devanados con corrientes inferiores a este valor se utiliza solera. De acuerdo a la intensidad de la corriente que va a circular por el conductor y el número de conductores arreglados en paralelo, se selecciona una sección transversal:

- Altas tensiones secciones pequeñas.
- Bajas tensiones secciones grandes.

En ambos casos existe una densidad de corriente A/mm^2 que no debe ser sobrepasada a fin de evitar sobrecalentamiento de los conductores y lograr ciertas pérdidas.

II. ENSAMBLE DE BOBINAS

A continuación se da a conocer la disposición de estos devanados en las elementos del núcleo para el caso del autotransformador a analizar, dependiendo del elemento del núcleo hacia la bobina de mayor diámetro, esto tiene mucho que ver en la respuesta transitoria puesto que las capacitancias entre

devanados son diferentes dependiendo de cómo estén dispuestas entre sí, sin embargo dado que se debe facilitar también la salida de guías de las bobinas y reducir los peligros potenciales que representa el hecho de manejar una guía de alta tensión cercana a los elementos del núcleo (si así fuera el caso) el arreglo actual de devanados que se muestra a continuación es el óptimo para dicho caso (S. V. Kulkarni, 2012).

Las Figuras 1 y 2 muestran la parte superior e inferior del ensamble de bobinas para el conjunto de devanados del autotransformador. La disposición de los devanados a partir del elemento del núcleo y hacia la bobina de AT es el siguiente; T, BT, R, AT, la razón de esta secuencia de bobinado es que se puede obtener un diseño óptimo basado en los niveles de aislamiento y la impedancia requeridas por el cliente, teniendo el devanado de mayor tensión (AT) fuera para facilitar la salida de la guía de AT y en la parte interior (lado del elemento del núcleo) el devanado con las tensiones más bajas (T) En las Figuras 1 y 2 muestran la salida de las guías de los devanados [5].

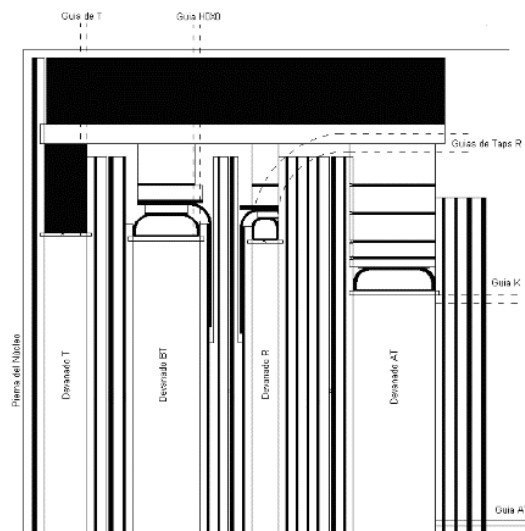


Fig. 1. Parte superior de ensamble de bobinas.

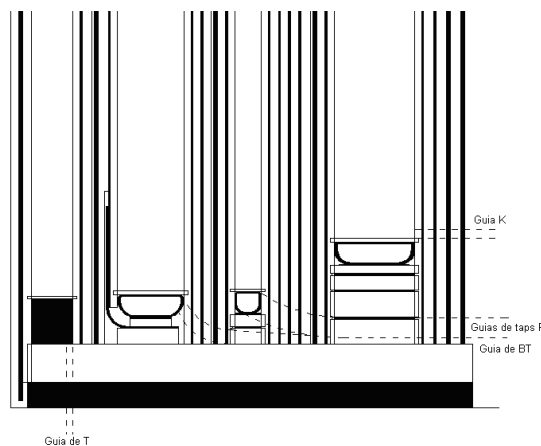


Fig. 2. Parte inferior de ensamble de bobinas

En la Figura 3 se muestra el diagrama esquemático del autotransformador. Todos los devanados están representados, el devanado de regulación está conectado en el punto de interconexión del devanado de AT y BT también se les conoce como devanado serie y común respectivamente. En este diagrama, los varistores también están representados y conectados a lo largo del devanado de regulación. La distribución máxima de corrientes en los devanados también se muestra en la Figura.

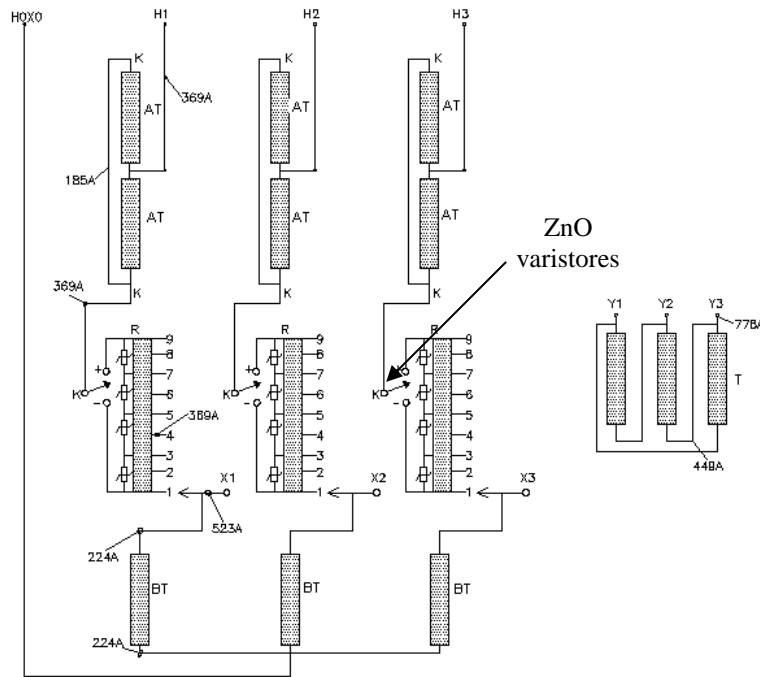


Fig. 3. Diagrama esquemático

ZnO: Óxido de zinc .Este es el compuesto químico de los varistores, en las Tablas 1, 2 y 3 se muestran las corrientes y tensiones en AT, BT.

Tabla I. Corrientes y tensiones de Baja tensión (BT).

BT voltajes y corrientes			
BT Volts	Amperes a MVA		
	75	100	125
138000	314	418	523

Tabla II. Corrientes y tensiones de devanado terciario (T)

T voltajes y corrientes	
T Volts	Amperes a MVA
	1
6900	84

Tabla III. Corrientes y tensiones de Alta tensión (AT)

Posición de tap	Conexión		AT	Amperes a MVA		
	Selector	Contacto tap	Volts	75	100	125
1	↑ K +	1	241500	179	239	299
2		2	238625	181	242	302
3		3	235750	184	245	306
4		4	232875	186	248	310
5		5	230000	188	251	314
6		6	227125	191	254	318
7		7	224250	193	257	322
8		8	221375	196	261	326
9A	K+/-	9	218500	198	264	330
9B		K	218500	198	264	330
9C		1	218500	198	264	330
10	↓ K -	2	215625	201	268	335
11		3	212750	204	271	339
12		4	209875	206	275	344
13		5	207000	209	279	349
14		6	204125	212	283	354
15		7	201250	215	287	359
16		8	198375	218	291	364
17		9	195500	221	295	369

III. GEOMETRÍA Y TIPOS DE BOBINAS

La selección del tipo de bobina a utilizar depende de:

- -Nivel de tensión
- -Intensidad de la corriente
- -Pérdidas en cobre garantizadas
- -Función de la bobina

Nivel de tensión:

El nivel de tensión es indicativo del número de vueltas que tendrá la bobina. Este número de vueltas se encuentra asociado a una tensión por vuelta el cual depende del nivel de tensión del transformador.

Intensidad de corriente:

La intensidad de la corriente determina el número de conductores que se requerirán en paralelo. Para corrientes altas se usaran un mayor número de conductores en paralelo y para corrientes bajas puede requerirse solo un conductor. La intensidad de la corriente está en función de la potencia y el nivel de tensión.

Pérdidas en cobre garantizadas:

Las pérdidas en cobre se encuentran determinadas por la densidad de corriente, la cual en algunos casos se puede llevar a valores más bajos. En tensiones bajas con el uso de devanados helicoidales se pueden lograr menores valores de pérdidas. En tensiones altas el uso de devanados disco continuo con CTC puede lograr pérdidas muy bajas.

Función de la bobina:

Una bobina puede proporcionar una tensión única o variada, haciendo uso de derivaciones. Para bobinas de regulación en cambiadores bajo carga, la tipo múltiple helicoidal es la más usada. En transformadores con cambiador sin carga las derivaciones van en la misma bobina principal, en este caso el disco continuo es el más usado.

De acuerdo al nivel de tensión e intensidad de la corriente a circular por el devanado se selecciona el tipo constructivo de bobina. Básicamente se tienen [5-8]:

- Capa: Hasta 13.8 kV y 2000 A. Hasta dos conductores radiales devanados continuamente sin espaciadores entre vueltas. Puede tener hasta 7 conductores axiales en paralelo.
- Helicoidal: Hasta 46 kV y 10000 A. Se devanan hasta 44 conductores en paralelo, 5 radiales y 3 axiales. Se colocan espaciadores entre vueltas.
- Disco: Hasta 230 kV y 1000 A. Hasta 2 conductores radiales en paralelo y dos axiales. Se colocan espaciadores entre disco y disco.
- Disco con Derivaciones: Utilizado para sacar derivaciones, mediante las cuales se puede variar un voltaje ya sea en el primario o en el secundario.

A continuación se describe algunos de los devanados típicos de uso común en los autotransformadores, en la Tabla 4 se detallan algunos datos del devano helicoidal, En la Figura 4 se puede visualizar un devanado tipo apantallado helicoidal.

Tabla IV. Datos del devanado terciario para tipo helicoidal.

Número de vueltas	71
Volt/vuelta	97.28
Número de conductores axiales	2
Número de conductores radiales	2
Transposiciones	Si
Material conductor	Cobre (CTC, cable continuamente transpuesto, con resina epóxica, forrado con papel)
Numero de soleras	21
Dimensión desnuda de las soleras	4.3 x 1.59 mm
Área del conductor por vuelta	139.07 mm ² x 4 conductores = 556.28 mm ²
Densidad de corriente (A/mm ²)	0.81 a 9.3 MVA
Número de veces que el aceite cambia de dirección	Significa que el aceite es forzado a tener un movimiento zig-zag en su interior, teniendo 8 cambios de dirección a lo largo de la bobina. Esto es con el fin de controlar y mejorar el gradiente de la bobina.
Espaciadores por circulo	20
Ancho radial del espaciador	50 mm
Espesor del espaciador	3 mm
Aislamiento del conductor	0.10 mm barniz + 0.60 mm papel Clasificación térmica del papel: W de acuerdo con IEC 554
Dimensión máxima del cable	Espesor 19.93 x Ancho 9.45 mm
Dureza del cobre	≥ 215 MPa

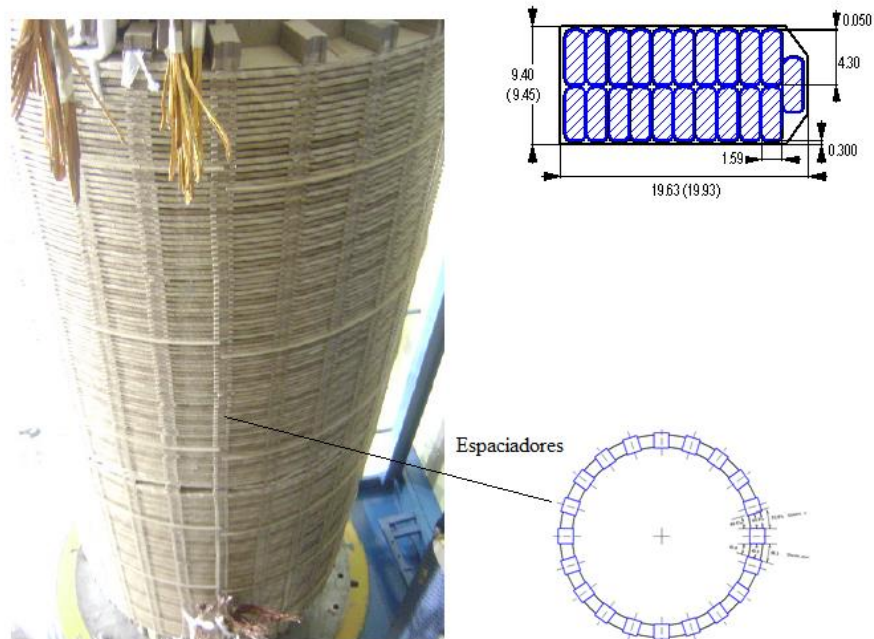


Fig. 4. Devanado de disco apantallado

Tabla V. Datos del devanado de baja tension tipo disco apantallado.

Número de vueltas	819 (142 secciones / 6 vueltas por disco)
Volt/vuelta	97.28
Número de conductores axiales	1
Número de conductores radiales	1
Transposiciones	No
Material conductor	Cobre (CTC, cable continuamente transpuesto, con resina epóxica, forrado con papel)
Número de soleras	11
Dimensión desnuda de las soleras	3.24 x 1.41 mm
Área del conductor por vuelta	47.89 mm ²
Densidad de corriente (A/mm ²)	4.67 a 125 MVA
Número de veces que el aceite cambia de dirección	Significa que el aceite es forzado a tener un movimiento zig-zag en su interior, teniendo 8 cambios de dirección a lo largo de la bobina. Esto es con el fin de controlar y mejorar el gradiente de la bobina.
Espaciadores por circulo	40
Ancho radial del espaciador	30 mm
Espesor del espaciador	5 mm
Aislamiento del conductor	0.10 mm barniz + 1.21 mm Papel Clasificación térmica del papel: W de acuerdo con IEC 554
Dimensión máxima del cable	Espesor 10.71 x Ancho 7.94 in
Dureza del cobre	≥ 215 MPa

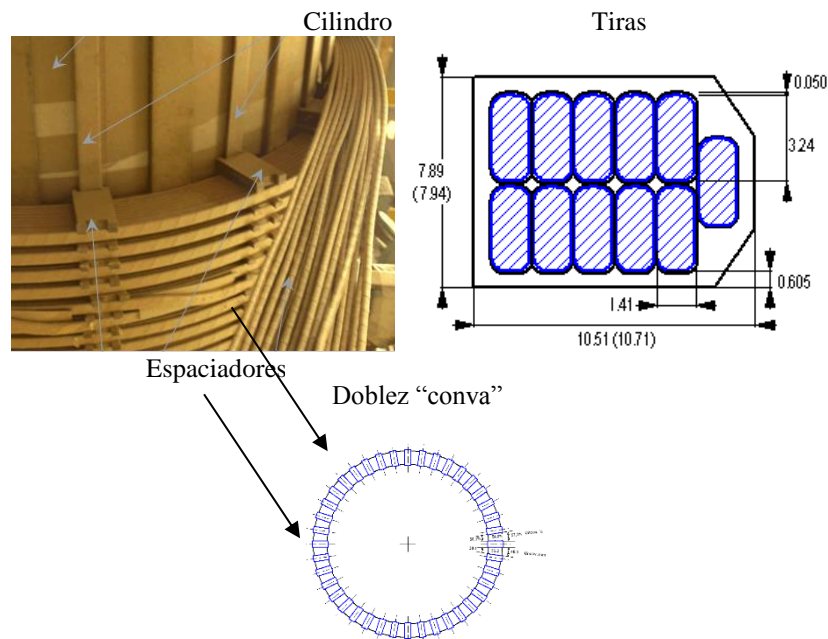


Fig. 5. Devanado disco apantallado

Tabla VI. Datos del devanado de regulación “Taps multiple”

Número de vueltas	136 (17 vueltas por tap, 8 taps)
Volt/vuelta	97.28
Número de conductores axiales	1
Número de conductores radiales	1
Transposiciones	No
Material conductor	Cobre (CTC, cable continuamente transpuesto, con resina epóxica, forrado con papel)
Número de soleras	3.71 x 1.56 mm
Varistores	Si, 4 ensambles por fase, 4 varistores por ensamble, 16 varistores en total por fase. El varistor es un dispositivo no lineal que opera a altas frecuencias
Área del conductor por vuelta	150.47 mm ²
Densidad de corriente (A/mm ²)	2.45 a 125 MVA
Número de veces que el aceite cambia de dirección	Significa que el aceite es forzado a tener un movimiento zig-zag en el interior de la bobina teniendo 8 cambios de dirección a lo largo de la bobina. Con el fin de controlar y mejorar el gradiente de la bobina.
Espaciadores por circulo	40
Ancho radial del espaciador	30 mm
Espesor del espaciador	4 mm
Aislamiento del conductor	0.10 mm barniz + 1.07 mm Papel Clasificación térmica del papel: W de acuerdo con IEC 554
Dimensión máxima del cable	Espesor 25.37 x Ancho 8.74 mm
Dureza del cobre	≥ 230 MPa

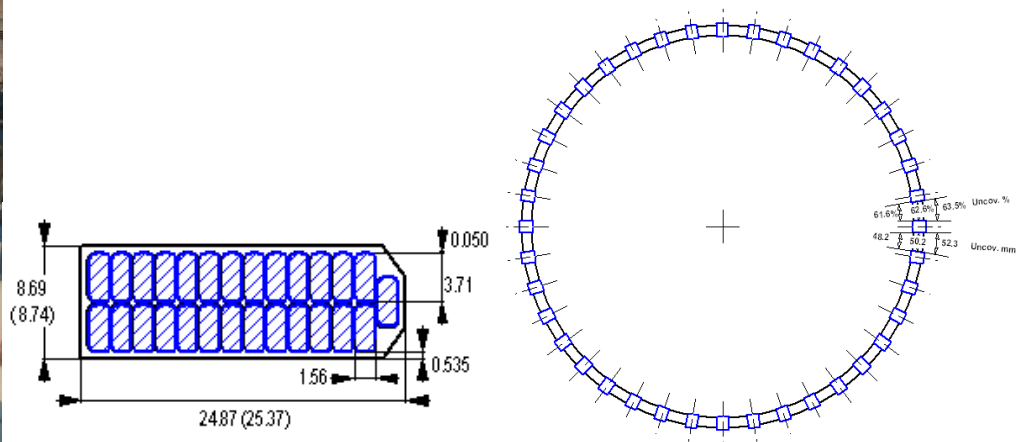


Fig. 6. Devanado tipo multiple helicoidal

IV. ESTRUCTURACIÓN DE LOS DEVANADOS MEDIANTE VARISTORES

En los sistemas eléctricos de potencia los fenómenos electromagnéticos proporcionan las máximas variables eléctricas bajo las cuales se debe diseñar y construir los elementos que forman parte de dicho sistema, para asegurar la continuidad y calidad del servicio eléctrico.

Los devanados de los transformadores proporcionan el flujo magnético eficiente de tal modo se compaginen con los acoplamientos magnéticos en los transformadores. Mediante el principio fundamental de operación de los transformadores, el cual lleva a estas máquinas a convertir la conversión de energía eléctrica de un nivel de tensión específico a otro. Los devanados de las máquinas eléctricas son diseñados para operarse bajo condiciones eléctricas específicas; en otras palabras los devanados están diseñados con elementos de características dieléctricas y conductivas, los cuales pueden verse afectado por sobretensiones transitorias. Los transformadores cuyos dieléctricos en sus devanados no soporten diferencias de potencial altas, están en riesgo de degradar la vida útil de este equipo, incluso llegar a mal servicio [9-12].

Clasificación de las sobretensiones:

En general el estándar C62.81.1-2010 del IEEE la define como la tensión de una fase a tierra o entre dos fases que tiene un valor cresta que excede el máximo valor para el que está diseñado el sistema.

Las sobretensiones se pueden clasificar de acuerdo a su forma y duración como:

Sobretensiones Temporales.

Sobretensiones Transitorias.

Distribución inicial

En el análisis de la distribución de tensión inicial el resultado es un efecto de propagación de ondas, donde la corriente se presenta como una corriente de desplazamiento la cual fluye por los aislamientos del devanado y se despreja cualquier fenómeno transitorio que ocurra inmediatamente después de que el impulso haya alcanzado su valor máximo, por lo que la distribución de tensión inicial solo es función de la longitud del devanado.

Al implementar un estudio de fenómenos transitorios con ocurrencia en los devanados de un transformador, el tiempo de duración de estos es del orden de microsegundos, y aunque este tiempo es muy pequeño, normalmente se divide en tres etapas que son: el periodo inicial, periodo transitorio y periodo final. El periodo inicial se toma a partir de que se inicia un disturbio y hasta que la tensión alcanza su valor máximo. El periodo subsecuente al periodo inicial, es el periodo transitorio durante el cual existe un intercambio continuo de energía entre los campos eléctrico y magnético, dando lugar a oscilaciones de alta frecuencia. Una vez que las oscilaciones son despreciables, se alcanza el periodo final en el que el devanado del transformador llega a un estado permanente y los volts por vuelta son uniformes en los devanados. En la Figura 7, se muestra el comportamiento de los tres periodos.

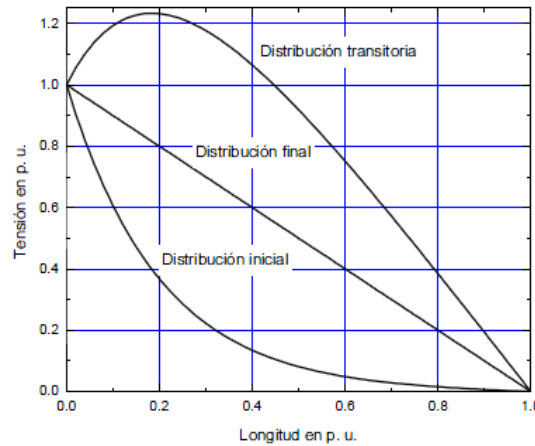


Fig. 7. Distribución de la tensión con respecto al tiempo.

La curva de la distribución de tensión transitoria, representa el límite de los valores máximos de las oscilaciones y resulta de la suma de los valores de la distribución de tensión final. El modelo capacitivo de los devanados del transformador para la distribución de tensión inicial, es válido para un tiempo de alrededor de 0.1 microsegundos. Éste tiempo es mucho más corto al de 1.2 microsegundos, que es el tiempo de frente de una onda de impulso de rayo estándar, sin embargo, la distribución de tensión inicial es un indicativo del efecto que tienen el tamaño y forma de los devanados sobre los esfuerzos de tensión producidos por ondas de impulso de frente escarpado, además también permite conocer la amplitud de las oscilaciones de tensión para tiempos más largos.

Para el cálculo de la distribución inicial lo que siempre se busca es el hecho de lograr una distribución lo más cercana a la linealidad. Este comportamiento de la curva de la distribución inicial depende mucho de la relación de la capacitancia serie y a tierra de los devanados, normalmente este valor o relación se conoce en la industria de los transformadores como “ α ” y es la constante de la distribución inicial y está dada por:

$$\alpha = \sqrt{\frac{Ca}{Ka}} \tag{Ec. 1}$$

En donde:

Ca = Capacitancia total a tierra del devanado

Ka = Capacitancia total serie del devanado

Por lo que si la capacitancia a tierra del devanado es baja o cercana a la capacitancia serie del devanado esto se traducirá en que el valor de “ α ” será más bajo y por lo tanto la distribución de tensión inicial tenderá a ser más lineal y uniforme a lo largo del devanado. A continuación en la Figura 8 se muestran diferentes valores de “ α ”:

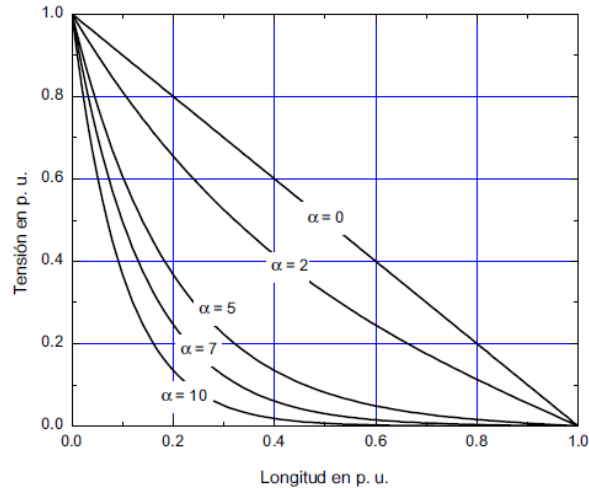


Fig. 8. Diferentes valores de constante de distribución inicial

Para un valor de “ α ” bajo, significa que la capacitancia serie tendría que incrementarse para casi igualar la capacitancia a tierra, o bien, en el transformador se tendrían distancias a las paredes del tanque algo grandes para poder tener una capacitancia a tierra baja o cercana a la capacitancia serie del devanado y así obtener un valor de constante de distribución bajo.

No siempre es esto posible ya que en la actualidad y con la competencia que existe en el mercado, siempre se están buscando medidas para reducir costos, lo que esto implica que cada vez se tengan mayores retos en cuanto a optimización de distancias internas entre devanados y a la vez de los devanados a tierra.

Una forma típica del estudio de la distribución inicial en los devanados de un transformador es de acuerdo a como se representan las capacitancias, resistencias e inductancias de un transformador, sin embargo, como se mencionó anteriormente, en la etapa de la distribución inicial solo se considera el efecto capacitivo en los devanados y a tierra, después en el periodo transitorio se tiene la participación de las resistencias e inductancias, para así obtener las máximas oscilaciones, a continuación en la Figura 9 se da un esquema representativo del modelo de devanados.

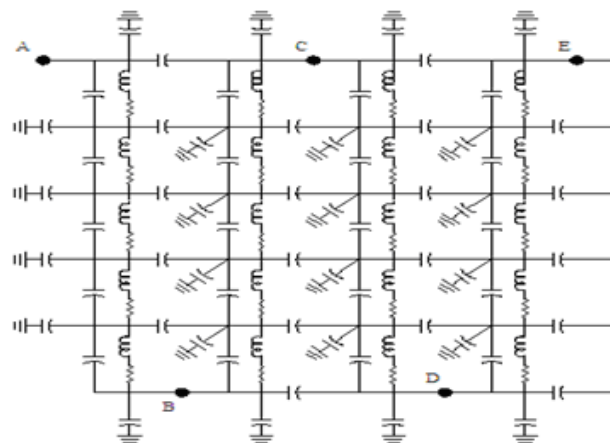


Fig. 9. Modelo de devanados del transformador

Estos parámetros son calculados por un programa de transitorios. Este estudio se enfoca exclusivamente en el análisis de resultados considerando el uso de varistores a través de la bobina de regulación y el análisis de resultados sin considerar el uso de varistores en la bobina de regulación. En esta sección recae el objetivo de esta investigación la cual es el demostrar que el colocar varistores en un devanado de regulación da la ventaja de poder ofrecer un autotransformador más económico y compacto a diferencia del que no implementa varistores en su reducción en distancias internas.

Los varistores (MOV'S) por sus siglas en inglés (Metal oxide varistors) son la esencia de la protección de equipos contra descargas o sobretensiones, y han dominado el mercado gracias a su característica de alta no-linealidad. Las pruebas estándar para los varistores están basadas en la IEEE 100-1977 y son definidas en base a una combinación de las ondas de tensión transitorias de 1.2/50 μ s y 8/20 μ s. 1.2/50 μ s representa una onda de tensión la cual define un circuito abierto cuando la tensión se incrementa entre el 90% y 100 % del valor pico a 1.2 μ s y decae de su valor cresta al 50% o menos en 50 μ s. La onda de 8/20 μ s representa una onda de corriente que alcanza su valor pico en 8 μ s y decae en 20 μ s, [13-15].

El varistor de óxidos metálicos es un disco que se compacta a altas temperaturas a través de un proceso de sinterización el cual se basa en mezclar de óxido de zinc, estos polvos son mezclados y procesados de tal forma de que se compactan y se someten a un proceso térmico de alta temperatura sin llegar al punto de licuefacción obteniendo así partes cerámicas producto de esta compactación que se componen de varios granos de óxido de zinc.

A continuación en la Figura 10 se da a conocer la microestructura del varistor:

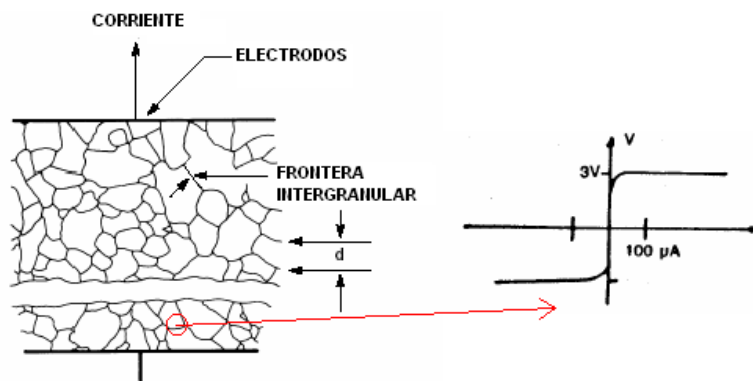


Fig. 10. Microestructura del varistor de óxido de zinc

Los varistores son apilados uno sobre otro teniendo una estructura aislada sobre la cual estos se apilan. Dependiendo el cálculo en cuanto a la cantidad varistores requeridos estos son apilados en forma vertical separados por un disco de aluminio el cual tiene un punto que es el que se convierte en terminal para que en este punto sea en donde se conecte la guía de tap proveniente de la bobina de regulación [16-18].

A continuación en la Figura 11 se muestra un arreglo típico de varistores:

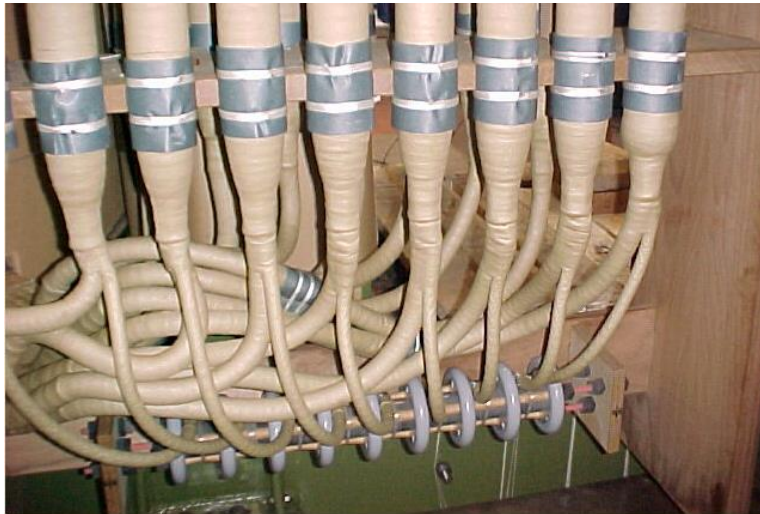


Fig. 11. Conexión de varistores y guías de taps

Para determinar la cantidad de discos que se necesitan colocar a través de la bobina de regulación se requiere primeramente conocer los valores que el varistor maneja a diferentes tipos de formas de onda y se realiza un cálculo preliminar en el cual se evalúan distintos casos de operación tales como;

- Operación a 60 Ciclos
- Operación durante pruebas de inducido (7200 ciclos realce y 1 hr)
- Operación durante prueba de impulso por rayo
- Operación durante prueba de impulso por maniobra

Para cada una de estas pruebas la cantidad de varistores que se obtiene es diferente, sin embargo, debe de existir un equilibrio en la cantidad de varistores que se determinará colocar a través de la bobina de regulación de tal manera que se asegure que el varistor no llegue a operar a niveles de 60 ciclos pero a su vez que operen al valor deseado de cresta durante una sobretensión temporal.

En la Figura 12 se puede apreciar la curva típica del varistor utilizado ZE64G23 de Meidensha Corporation.

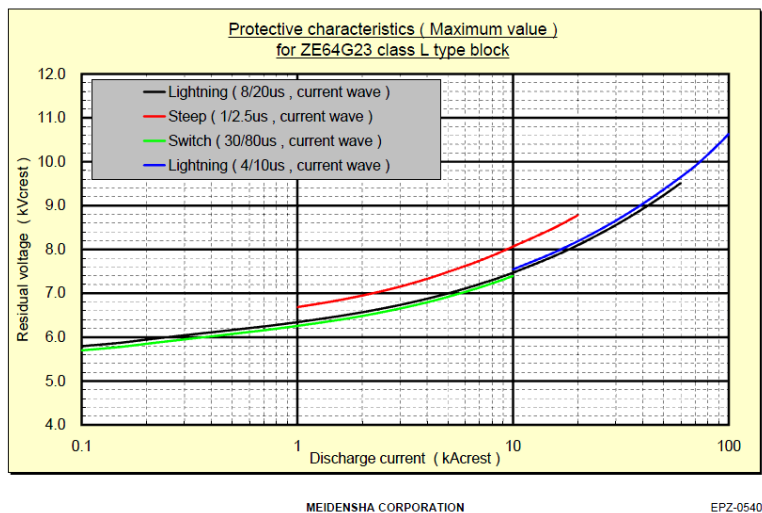


Fig. 12. Curva característica del varistor ZE64G23

Cálculo del número de varistores.

Para el cálculo del número de varistores, es necesario hacer referencia a la sección de la investigación referente a los devanados en relación al número de vueltas que tiene cada devanado, especialmente las vueltas correspondientes a la bobina de regulación, las vueltas del devanado común y las del devanado serie.

Para el caso de los varistores ZE64G23 se tiene la siguiente información en cuanto a los valores de operación:

- a) Operación a 60 ciclos: 1600 volt/varistor
- b) Operación a 7200 ciclos: 2800 volts/varistor
- c) Operación para impulso por rayo: 8000 volts/Varistor
- d) Operación para impulso por maniobra: 5000 volts/varistor

Cabe mencionar que estos valores son promedio y no máximos, en medida del análisis desarrollado y en base a ajustes en dichos valores de acuerdo con un estadístico de fabricación.

a) Operación a 60 Ciclos

Se tiene lo siguiente:

$$\text{Varistores} = \frac{(E \text{ devanado})(1.1)}{(E \text{ var})(0.8)} \quad \text{Ec. 2}$$

En donde:

Varistores: Número de varistores totales a ser instalados en el devanado analizado

E devanado: Tensión de la porción o devanado en donde se instalarán varistores

E var: Tensión del varistor para las distintas condiciones de operación

1.1: Factor de sobretensión

0.8: Factor de margen para cantidad de varistores

Volt/vuelta = 97.28 (este es el volt/vuelta de operación a 60 Hz del transformador)

Vueltas de la bobina de regulación: 136

Voltaje de la bobina de regulación: (97.28 volt/vuelta) * (136 vueltas) = 13230.98 V

$$\text{Varistores} = (13230.98 \text{ V}) * (1.10 \text{ sobretensión}) / (1600 \text{ volt/varistor}) * (0.8 \text{ factor})$$

Varistores = 11.36, por lo que se considera 12 varistores

b) Operación a 7200 ciclos

Se tiene lo siguiente:

Voltaje de prueba: 237.31 kV línea-tierra para 7200 ciclos.

Vueltas de los devanados sujetas a estrés eléctrico durante la prueba: 478 series + 136 taps + 819 común = 1433 vueltas

Volt por vuelta equivalente durante prueba de inducido: v/t = 237.31 kV/1433 vueltas = 165.40

Vueltas de la bobina de regulación: 136

Voltaje de la bobina de regulación: (165.40 volt/vuelta) * (136 vueltas) = 22495.62 V

Aplicando la ecuación 2 pero sin el 1.1 de sobretensión, se tiene:

$$\text{Varistores} = (22495.62 \text{ V}) / (2800 \text{ volt/varistor}) * (0.8 \text{ factor})$$

Varistores = 10.04, por lo que se considera 10 varistores

c) Operación para impulso por rayo

Se tiene lo siguiente:

Voltaje de prueba: 950 kV BIL línea-tierra para cuando se impulsa la terminal de HV.

Vueltas de los devanados sujetas a estrés eléctrico durante la prueba: 478 series + 136 taps + 819 común = 1433 vueltas

Volt por vuelta equivalente durante prueba de impulso: $v/t = 950 \text{ kV}/1433 \text{ vueltas} = 662.94$

Voltaje de la bobina de regulación: $(662.94 \text{ volt/vuelta}) * (136 \text{ vueltas}) = 90159.84 \text{ V}$

Aplicando la ecuación 2 pero sin el 1.1 de sobretensión, se tiene:

$$\text{Varistores} = (90159.84 \text{ V}) / (8000 \text{ volt/varistor}) * (0.8 \text{ factor})$$

Varistores = 14.88, por lo que se considera 15 varistores

Para el caso de cuando se impulsa la terminal de LV se tiene:

Voltaje de prueba: 550 kV BIL línea-tierra para cuando se impulsa la terminal de HV.

Vueltas de los devanados sujetas a estrés eléctrico durante la prueba: 478 series + 136 taps = 614 vueltas

Volt por vuelta equivalente durante prueba de impulso: $v/t = 550 \text{ kV}/614 \text{ vueltas} = 895.76$

Voltaje de la bobina de regulación: $(895.76 \text{ volt/vuelta}) * (136 \text{ vueltas}) = 121824.10 \text{ V}$

$$\text{Varistores} = (121824.10 \text{ V}) / (8000 \text{ volt/varistor})$$

Varistores = 15.22, por lo que aproximamos a 16 varistores

d) Operación para impulso por maniobra

Se tiene lo siguiente:

Voltaje de prueba: 790 kV SIL línea-tierra para cuando se impulsa la terminal de HV.

Vueltas de los devanados sujetas a estrés eléctrico durante la prueba: 478 series + 136 taps + 819 común = 1433 vueltas

Volt por vuelta equivalente durante prueba de impulso: $v/t = 790 \text{ kV}/1433 \text{ vueltas} = 551.29$

Voltaje de la bobina de regulación: $(551.29 \text{ volt/vuelta}) * (136 \text{ vueltas}) = 74975.57 \text{ V}$

$$\text{Varistores} = (74975.57 \text{ V}) / (5000 \text{ volt/varistor})$$

Varistores = 14.99, por lo que se considera 15 varistores

Cabe mencionar que el factor que se da de 0.8 es un factor que depende de que tanto margen se quiera dar al varistor para la operación de estos durante las pruebas dieléctricas y en operación normal.

V. CONCLUSIONES

En relación a la reducción de distancias internas entre devanados mediante el uso de varistores se argumenta lo siguiente:

El uso de varistores permite reducir las distancias entre devanados principales BT-R-AT en un promedio del 10%.

Con la disminución del 10% en las distancias entre devanados principales, se puede reducir la cantidad de cobre y acero puesto que al tener menos distancia entre devanados se pueden obtener diámetros internos y externos de bobinas más pequeños.

La distancia entre elementos en el núcleo, también se reduce debido a los diámetros de las bobinas lo que permite reducir la cantidad de acero total del núcleo.

Debido a la reducción en dimensiones del cobre y núcleo es posible ofrecer un diseño con menos pérdidas sin carga y con carga, lo que representa siempre una unidad más atractiva para los clientes dado que la mayoría de estos siempre aplican factores de evaluación de pérdidas para ver el costo de las mismas puesto que estas pérdidas le representan costos de generación de energía.

El cambiador de derivaciones es de un menor costo en comparación con el que se tendría que haber utilizado si no se hubiesen empleado los varistores, además de que el costo de estos justificó el uso de los mismos por la diferencia de costos entre cambiadores.

REFERENCIAS

- [1] H. Jin Sim, S. H. (2006). The making of a transformer. IEEE Transformer, 19-24,.
- [2] Jeszensky, S. (1993). History of transformers. IEEE, 565-585.
- [3] Ladroga, R. K. (2005). The history of transformers. IEEE Transformers, 55-65.
- [4]. S. V. Kulkarni, S. A. (2012). Challenges and Strategies in Transformer. IEEE, 30-38.
- [5] H. J. Sim, K. S. (2002). IEEE PES Transformers . IEEE, 36-49.
- [6] S.V Kulkarni, S.A Khaparde, Transformer Engineering Indian by Institute of Technology, Bombay, Mumbai India
- [7] J & P Transformer Book Martin J. Heathcote, C Eng FIIEE
- [8] John J. Winders Power, Transformers, principles and applications, PPL Electric Utilities
- [9] R M Del Vecchio, Transformer design principles: with applications to core form power transformers.
- [10] CAN / CSA - C88 - M90 Power transformers and reactor.,By Canadian Standards Association
- [11] Mao-hua Wang, Qing-hua Tang, Chao Yao, Electrical properties and AC degradation characteristics of low voltage ZnO varistors doped with Nd2O03.
- [12] T.K. Gupta, Application of zinc oxide varistors, J. Am. Ceram. Soc. 73 (7) (1990) 1817–1840.
- [13] “Nonohmic properties of zinc oxide ceramics”, Jpn. J. Appl. M. Matsuoka Phys. 10 (6) (1971) 736–746.
- [14] R.Baehr, Cigre study committee 12, Use of ZnO varistors in transformer, Electra No. 143 August 1992. R.Baehr, Cigre study committee 12
- [15] “Long-time experiences of ZnO varistor application in power Transformers and OLTC’s” P. Heinzig et al. Cigree Paris sesión 2006 Paper No. A2-303.
- [16] Wen Yuanfang, Experimental studies on the use of MOV in transformer windings inner protection., Pages 1441-1446, INSPEC accession number 8569570, April 2005
- [17] www.meidensha.com
- [18] www.reinhausen.com