



DISEÑO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN TIPO POSTE CON DEVANADOS COBRE-ALUMINIO Y NÚCLEO DE ACERO AMORFO

ÍNDICE

1. Introducción
 - Planteamiento del Problema
 - Justificación del Proyecto
 2. Objetivo General
 3. Estudio Técnico
 4. Ingeniería Básica
 - 4.1. Diseño Eléctrico del Transformador
 - 4.2. Diseño del Núcleo
 - 4.3. Diseño de las Bobinas de Media y Baja Tensión
 - 4.4. Diseño de Aislamientos
 - 4.5. Cálculo del Peso del Transformador
 5. Ingeniería de Detalle
 - 5.1. Diseño de Moldes para Núcleo
 - 5.2. Diseño del Bastidor
 - 5.3. Diseño de Partes para Tanque
 - 5.4. Diseño de Cubierta
 - 5.5. Diseño de Tanque y Accesorios
 - 5.6. Plano de Dimensiones Generales
 6. Cálculo de Enfriamiento del Transformador
 7. Cálculo de Corto Circuito
 8. Evaluación del Proyecto
 9. Conclusiones
 10. Bibliografía
-

1. Introducción

Planteamiento del Problema

Se requiere diseñar un nuevo prototipo de un transformador trifásico de distribución de 75 MVA, con núcleo de acero amorfo y devanados cobre-aluminio, con el fin de que los transformadores de distribución de la empresa cumplan con los requisitos de eficiencia de la NOM 002 SEDE-2012, ya que se ha demostrado que el uso del acero amorfo en núcleos de transformadores de distribución reduce las pérdidas sin carga, de manera considerable.

Justificación del Proyecto

Debido a las exigencias ambientales, los transformadores deben ser más eficientes, con el fin de que haya menos emisiones contaminantes, asociadas con las pérdidas de potencia eléctrica en el transformador. Además, los costos asociados con las pérdidas deben reducirse, con el fin de que el transformador sea competitivo con respecto a los transformadores fabricados actualmente.

2. Objetivo General

Desarrollar un transformador prototipo de 75 KVA, 23000 V en Media Tensión, con Protocolo de CFE.

3. Estudio Técnico

Objetivo Específico

Desarrollar la ingeniería y manufactura de transformadores con núcleo de acero amorfo, de acuerdo a los nuevos valores de la NOM 002 SEDE-2012.

4. Ingeniería Básica

4.1. Diseño Eléctrico del Transformador

Características Generales del Transformador

Capacidad nominal: 75 KVA	Número de fases: 3
Frecuencia nominal: 60 Hz	Elevación de temperatura: 65°C
Tipo: OA	Altura de operación: 2300 msnm
Relación nominal: 23000/220 V	Conexión: Delta-Estrella
Derivaciones: 2.5% 2/-2	24150-23575-23000-22425-21850 V
% Impedancia: 2.45	% Reactancia: 2.0448
% Resistencia: 1.3522	Eficiencia al 100 %: 98.58 %
Eficiencia NMX-J-285: 98.4%	Pérdidas en Vacío: 69 W
Pérdidas cobre: 1014 W	Pérdidas totales: 1083 W

4.2. Diseño del Núcleo

El núcleo va a diseñarse con acero amorfo 2605SA1, marca Metglas, el cual presenta pocas pérdidas sin carga, al ser usado en transformadores de distribución, además de que posee valores altos de permeabilidad magnética. Las láminas de acero amorfo 2605SA1 presentan las siguientes características:

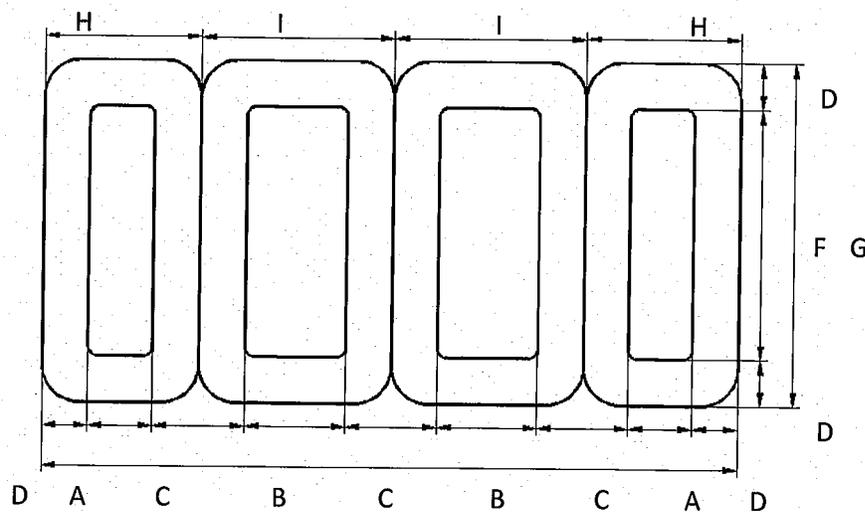
Características del Acero Amorfo

Característica	Valor	Unidades
Densidad de flujo magnético a 60 Hz y 80 A/m	≥ 1.35	T
Pérdidas en el núcleo, a 60 Hz y 1.3 T	≤ 0.17	W/kg
Pérdidas en el núcleo, a 60 Hz y 1.4 T	≤ 0.2	W/kg
Potencia aparente de excitación, a 60 Hz y 1.4 T	≤ 1.1	VA/kg
Saturación magnética	1.56	T
Resistividad eléctrica	1.3	$\mu\Omega/m$
Temperatura de Curie	395	$^{\circ}C$
Densidad	7.18	g/cm^3
Fuerza de tensión	2000	N/mm^2
Coefficiente de expansión térmica 30-300 $^{\circ}C$	$7.6 \cdot 10^{-6}$	$1/^{\circ}C$
Espesor de la tira	25 ± 4	μm
Factor de laminación	≥ 84	%

El núcleo es del tipo Wescore, de cinco piernas, con dos arcadas centrales y dos laterales, con las siguientes dimensiones, en mm:

Dimensiones del Núcleo del Transformador

A	B	C	D	E	F	G	H	I	I
66	116	114	57	820	265	370	180	230	170



Núcleo Wescore de 5 piernas.

4.3. Diseño de Bobinas de Media y Baja Tensión

Las bobinas de media tensión se fabrican de alambre de cobre tipo magneto, calibre 21, mientras que las de baja se fabrican de lámina de aluminio, marca Azinsa. Las bobinas tienen las siguientes características:

Características de las Bobinas

Media tensión	Baja tensión
Volts de fase: 23000	Volts de fase: 127.017
Corriente de fase: 1.087 A	Corriente de fase: 196.824 A
Conductor de alambre de cobre.	Conductor de aluminio, tipo lámina.
Calibre del conductor: 21 AWG	Ancho del conductor: 203.2 mm
Diámetro del conductor: 0.724 mm	Espesor del conductor: 0.762 mm
Diámetro con aislamiento: 0.79 mm	Espesor con aislamiento: 0.762 mm
Área del conductor: 0.4105 mm ²	Área del conductor: 154.8384 mm ²
Densidad del conductor: 2.65 A/mm ²	Densidad del conductor: 1.271 A/mm ²
Vueltas por columna: 3422	Vueltas por columna: 18
Bobinas: 1	Bobinas: 1
Vueltas por bobina: 3422	Vueltas por bobina: 18
Capas: 14	Capas: 18
Vueltas por capa: 245	Vueltas por capa: 1
Conductores en paralelo: 1	Conductores en paralelo: 1
Ductos parciales: 2	Ductos parciales: 1
Altura radial: 18.06 mm	Altura radial: 15.88 mm
Altura axial: 195 mm	Altura axial: 203.2 mm
Tolerancia axial: 195 mm	Tolerancia axial: 2 mm
Altura conductor: 194.21 mm	Altura conductor: 204.2 mm
Cabezal bobina: 58 mm	Cabezal bobina: 48 mm
Altura de bobina: 253 mm	Altura de bobina: 253 mm
Carpeta cabezal-yugo: 12 mm	Carpeta cabezal-yugo: 12 mm
kV Impulso: 150	kV Impulso: 30
kV Aplicado: 50	kV Aplicado: 10
kV Inducido: 48.3	kV Inducido: 0.44
Volts/vuelta: 7.0565	Volts/vuelta: 7.0565
Peso: 34.8 kg	Peso: 16.2 kg

4.4. Diseño de Aislamientos

Los aislamientos de las bobinas del prototipo son fabricados con papel insuldur diamantado, tipo DPP_TU, de 0.127 mm de espesor, fabricado por Krempel Group. El papel tiene las siguientes características:

Propiedades del Aislamiento de Papel

Propiedades	Unidad	Procedimiento de prueba	Valores requeridos	Resultado del lote de fabricación:
Espesor papel y resina	mm	DIN 7734	0.165 ± 0.02	0.147
Espesor del papel	mm	DIN 7734	0.125 ± 0.015	0.123
Peso base	g/m^2	DIN 7734	150 ± 23	139
Capa de resina	μm	DIN 7734	20 ± 10	12
Voltaje de ruptura	kV	DIN 7734	≥ 1.2	1.8

4.5. Cálculo del Peso del Transformador

El peso total aproximado de un transformador toma en cuenta las diversas estructuras y materiales que lo conforman, como el núcleo, las bobinas, los herrajes, el tanque, los accesorios y el aceite, en un transformador enfriado con aceite, de circulación natural. A continuación, se presenta el peso aproximado de las partes que conforman al prototipo de transformador:

Peso Aproximado del Prototipo de Transformador

Partes	Peso
Núcleo, bobinas y herrajes	295 kg
Tanque y accesorios	115 kg
151 lts de aceite	136 kg
Total	546 kg

5. Ingeniería de Detalle

Los siguientes diseños se presentan en el siguiente orden, al final del documento:

1. Diseño de Moldes para Núcleo
2. Diseño del Bastidor
3. Diseño de Partes para Tanque
4. Diseño de Cubierta
5. Diseño de Tanque y Accesorios
6. Desarrollo de la Parte Mecánica del Transformador

6. Cálculo de Enfriamiento del Transformador

El transformador tiene aceite como medio refrigerante. Es del tipo OA, en el cual, el enfriamiento se obtiene con la circulación natural del aceite en el dispositivo. El transformador tiene los siguientes datos, con respecto a sus características térmicas.

Características Térmicas del Transformador

Watts obtenidos en la prueba de temperatura	1150
Elevación total de temperatura	65 °C
Gradiente máximo	6.57 °C
Corrección por altitud	2 °C
Elevación del líquido	54.43 °C
Altitud msnm	23000 m
Perímetro total envolvente	2.564 m
Superficie de radiación de la envolvente del transformador	1.282 m ²
Superficie de convección del tanque	1.436 m ²
Superficie de radiación del tanque	1.436 m ²
Watts (radiación+convección) del transformador	1634
Margen de tolerancia	485 W

Se tienen los siguientes datos del tanque:

Datos del Tanque del Transformador

Largo	0.86 m
Ancho	0.42 m
Altura del aceite, a 25 °C	0.56 m
Watts que disipa el tanque, por radiación	614
Watts que disipa el tanque, por convección	710
Watts totales que disipa el tanque	1324

La cantidad de watts que disipa el tanque es mayor que la cantidad de watts obtenidos con la prueba de temperatura, por lo que no son necesarios radiadores para disipar el calor generado en el transformador.

7. Cálculo de Corto Circuito

El corto circuito es una de las situaciones más críticas que debe resistir el transformador, ya que produce corrientes de gran magnitud en las bobinas. Las corrientes de corto circuito generan esfuerzos internos en el transformador, los cuales pueden provocarle daños severos. La corriente simétrica de corto circuito del diseño del transformador con núcleo de acero amorfo es:

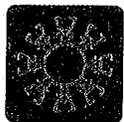
$$I_{CC} = 8033.63 \text{ A}$$

La corriente asimétrica I_{CC_AS} es la corriente, en valor pico, que se presenta durante los primeros ciclos en los que ocurre el cortocircuito, la cual debe ser soportada por el transformador. La corriente asimétrica de corto circuito del diseño es:

$$I_{CC_AS} = 8033.63 \text{ A}$$

Durante el corto circuito, se presentan esfuerzos en las bobinas del transformador, debidas a los flujos magnéticos generados. Los esfuerzos se dividen en axiales y radiales.

Los esfuerzos axiales (verticales) provocan la tendencia de las bobinas de desplazarse verticalmente, hacia arriba las de baja tensión y hacia abajo las de media



CANAME



tensión. Las uniones de papel entre las diferentes capas de las bobinas y el espacio que las separa limitan los esfuerzos axiales, en condiciones de corto circuito.

Los esfuerzos radiales (horizontales) someten a los conductores de la bobina exterior a tensiones circunferenciales, que provocan que la bobina se expanda hacia afuera del núcleo. La bobina interior es sometida a fuerzas de compresión hacia el núcleo.

Los esfuerzos verticales se denotan con FSV, cuyo límite sobre la vuelta media del espacio alta-baja es 20 lb/plg², según pruebas realizadas por la compañía Westinghouse. El valor máximo de FSV, en kg/cm², es el siguiente:

$$FSV_{\max} = 1.41 \text{ kg/cm}^2$$

Los esfuerzos horizontales se denotan con FSH, cuyo límite es 250 lb/plg², según pruebas realizadas por la compañía Westinghouse. El valor máximo de FSH, en kg/cm², es el siguiente:

$$FSH_{\max} = 17.58 \text{ kg/cm}^2$$

El diseño del transformador con núcleo de acero amorfo presentó los siguientes valores, con respecto a los esfuerzos calculados:

$$FSV = 0.86 \text{ kg/cm}^2$$

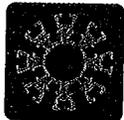
$$FSH = 8.22 \text{ kg/cm}^2$$

Los valores anteriores se encuentran dentro de los límites establecidos.

Otro esfuerzo presentado en las bobinas durante el cortocircuito es el esfuerzo circunferencial, de la primera capa interior de la bobina exterior, denotado por ST_i, que provoca que el conductor se encuentre en tensión. Se considera a la capa interior como un anillo de pared delgada, sometido a una presión interna uniforme. El límite para el esfuerzo circunferencial de la bobina exterior es igual a 2100 lb/plg² para conductores cilíndricos, como el empleado para el prototipo. El valor máximo de ST_i, en kg/cm², es el siguiente:

$$ST_{i\max} = 147.645 \text{ kg/cm}^2$$

El esfuerzo circunferencial de la primera capa exterior de la bobina interior, denotado por ST_e, provoca que el conductor de la primera vuelta de la bobina se encuentre en tensión. Se considera a la vuelta exterior de la bobina como un anillo de pared delgada, sometido a una presión externa uniforme. El límite para el esfuerzo



CANAME



circunferencial de la bobina interior es igual a 2400 lb/plg², para conductores tipo lámina, como el empleado para el prototipo. El valor máximo de ST_e, en kg/cm², es el siguiente:

$$ST_{\text{emax}} = 168.74 \text{ kg/cm}^2$$

Las bobinas del transformador de núcleo de acero amorfo presentan los siguientes esfuerzos circunferenciales:

$$ST_e = 73.89 \text{ kg/cm}^2$$

$$ST_i = 36.44 \text{ kg/cm}^2$$

Los valores anteriores se encuentran dentro de los límites establecidos.

El esfuerzo radial de delaminación del papel rómbico es la resistencia a la tensión de los papeles pegados entre los conductores, en el espacio de baja-media tensión, el cual tiende a separar a las bobinas durante el corto circuito. En la bobina interior, el esfuerzo máximo radial que tiende a separar a la bobina del espacio baja-media es igual a 11 lb/plg², y se denota por p_e. El máximo esfuerzo que tiende a separar a la bobina externa también es igual 11 lb/plg², y se denota por p_i. El límite del esfuerzo radial, en kg/cm², es el siguiente:

$$p_{\text{imax}} = p_{\text{emax}} = 0.77 \text{ kg/cm}^2$$

Los esfuerzos radiales de delaminación, obtenidos en el diseño con núcleo de acero amorfo, son los siguientes:

$$p_e = 0.6 \text{ kg/cm}^2$$

$$p_i = 0.41 \text{ kg/cm}^2$$

Los esfuerzos radiales de delaminación, de las bobinas del diseño con núcleo de acero amorfo se encuentran dentro de los límites establecidos.

Además de los esfuerzos mecánicos, las corrientes de corto circuito generan una alta elevación de temperatura en las bobinas, con respecto a la temperatura que se presenta en condiciones normales de operación. La bobina de baja tensión presenta la siguiente temperatura, calculada en base a IEC 60076-5 para conductores de aluminio, considerando que el corto circuito dura un tiempo *t* igual a 0.75 segundos, según NMX-J-116-ANCE-2005:

$$T = 135.5 \text{ }^\circ\text{C}$$



El valor máximo de temperatura que puede soportar una bobina de aluminio, sin sufrir un deterioro considerable, es 200 °C, según IEEE Std C57.12.00-1993, con lo que la bobina de baja tensión del prototipo cumple con el límite establecido.

Con respecto a la bobina de media tensión, se tiene la siguiente temperatura después del corto circuito, calculada en base a IEC 60076-5 para el cobre, en el tiempo usado para el cálculo de la temperatura de la bobina de baja tensión:

$$T = 166.4 \text{ °C}$$

El valor máximo de temperatura de una bobina de cobre es 250 °C, según IEEE Std C57.12.00-1993, por lo que la bobina de media tensión del diseño propuesto cumple con el límite de temperatura, establecido para soportar el corto circuito.

8. Evaluación del Proyecto

El diseño de transformadores involucra asegurar la compatibilidad del diseño con las especificaciones impuestas por las normas, con respecto a la eficiencia y a las máximas pérdidas permitidas, al menor precio de manufactura posible.

Un criterio para la evaluación y optimización de un transformador es el costo evaluado, que se calcula con la expresión (8.1), el cual toma en cuenta el precio del transformador y los costos de las pérdidas que genera durante su vida útil. El costo evaluado del transformador (*CET*) es:

$$CET = P + PWV + PWC = P + CWV*WV + CWC*WC \quad (8.1)$$

Donde:

<i>P</i>	Precio del transformador, en \$.
<i>PWV</i>	Costo watts vacío, en \$.
<i>PWC</i>	Costo watts cobre, en \$.
<i>WV</i>	Watts vacío, en W.
<i>CWV</i>	Costo del watt vacío, en \$/W.
<i>WC</i>	Watts cobre, en W.
<i>CWC</i>	Costo del watt cobre, en \$/W.

El prototipo del transformador con núcleo de acero amorfo tiene los siguientes datos, con respecto a su costo evaluado:

Costo Evaluado del Transformador con Núcleo de Acero Amorfo

Datos	Valor	Unidades
<i>P</i>	47,925	\$
<i>WV</i>	69	W
<i>CWV</i>	89.89	\$/W
<i>PWV</i>	6,202.41	\$
<i>WC</i>	1,014	W
<i>CWC</i>	44.28	\$/W
<i>PWC</i>	44,899.92	\$
<i>CET</i>	99,027.33	\$

Dentro del precio del transformador se incluye el costo del núcleo, que es fabricado por Lake View Metals Inc., empresa dedicada a la construcción de núcleos de acero amorfo. Un transformador, con la misma capacidad nominal y tensiones nominales del prototipo presentado y con núcleo de acero al silicio, tiene los siguientes valores con respecto a su costo evaluado:

Costo Evaluado del Transformador con Núcleo de Acero al Silicio

Datos	Valor	Unidades
<i>P</i>	49,800	\$
<i>WV</i>	261	W
<i>CWV</i>	89.89	\$/W
<i>PWV</i>	23,461.29	\$
<i>WC</i>	753	W
<i>CWC</i>	44.28	\$/W
<i>PWC</i>	33,342.84	\$
<i>CET</i>	106,604.13	\$

10. Bibliografía

- [1] NOM-002-SEDE-2010, *Requisitos de Seguridad y Eficiencia Energética para Transformadores de Distribución*, México 2010.
- [2] Anteproyecto NOM-002-SEDE-2012, *Requisitos de Seguridad y Eficiencia Energética para Transformadores de Distribución*, México 2012.
- [3] NMX-J-116-ANCE-2005, *Transformadores de Distribución Tipo Poste y Tipo Subestación-Especificaciones*, México 2005.
- [4] IEEE Std C57.12.00-1993, *IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers*, 1993.
- [5] IEC 60076-5:2000, *International Standard, Power Transformers-Part 5: Ability to Withstand Short Circuit*, 2000.
- [6] Manual de Material Metglas Inc., *Amorphous Alloys for Transformer Cores*, EUA, Metglas Inc., pp. 1-26.
- [7] J. C. Olivares-Galván, S. Magdaleno-Adame, E. Campero-Littlewood, R. Escarela- Pérez y P. S. Georgilakis, "Techno-economic evaluation of reduction of low-voltage bushings diameter in single-phase distribution transformers," *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, no. 13, pp. 1388-1402, Agosto 2011.
- [8] J. C. Olivares-Galván, P. S. Georgilakis y R. Ocón-Valdéz, "A review of transformer losses," *Electric Power Components and Systems*, vol. 37, no. 9, pp. 1046-1062, Septiembre 2009.
- [9] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili y A. G. Kladas, "Transformer design and optimization: a literature survey," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1999-2024, Octubre 2009.
- [10] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis y A. G. Kladas, "Energy efficient transformer selection implementing life cycle cost and environmental externalities," *9th International Conference. Electrical Power Quality and Utilization*, Barcelona, pp. 1-6, Octubre 2007.



CANAME



- [11] P. P. Geno, "Calculations for short circuit withstand capability of a distribution transformer," *International Journal of Advancements in Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 142-150, Enero 2011.

- [12] R. Patiño-Ruiz, J. C. Olivares-Galván, E. Campero-Littlewood, M. S. Esparza-González, "Transformadores de distribución con núcleos de acero amorfo," *Conciencia Tecnológica*, no. 38, pp. 18-23, Diciembre 2009.

- [13] P. Avelino-Pérez, *Transformadores de Distribución. Teoría, Cálculo, Construcción y Pruebas*, Editorial Reverté, tercera edición, México 2008.

- [14] S. V. Kulkarni y S. A. Khaparde, *Transformer Engineering*, Marcel Dekker, 2004.