Artículos de investigación

Diseño de la Parte Activa de un Transformador de Potencia Mediante Algoritmos Genéticos para la Minimizar las Pérdidas

Design of the Active Part of a Power Transformer Using Genetic Algorithms for the minimization of losses

Ortız Licona, Alberto; Hernández Romero, Norberto; Seck Tuoh Mora, Juan Carlos; Lagos Eulogio, Pedro; Medina Marín, Joselito; Rosas Ortiz, German

Alberto Ortız Licona
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
Norberto Hernández Romero
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
Juan Carlos Seck Tuoh Mora
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
Pedro Lagos Eulogio
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
Joselito Medina Marín
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
German Rosas Ortiz
nstituto Tecnológico de Pachuca, México

Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
ISSN-e: 2007-6363
Periodicidad: Semestral
vol. 7, núm. 14, 52-58, 2020
sitioweb@uaeh.edu.mx

URL: http://portal.amelica.org/ameli/journal/595/5953114002/

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Resumen: Este trabajo aborda el problema de optimización del diseño de la parte activa de un transformador trifásico de potencia de 10 MVA y 115/13.8 kV con núcleo tipo columnas y devanados en disco. El objetivo es determinar un diseño que cumpla con el menor costo total de adquisición considerando los factores de evaluación de pérdidas. Este es un problema frecuente al que se enfrentan los fabricantes de transformadores durante la etapa de licitación donde deben ofrecer en corto tiempo un diseño que minimiza el costo de adquisición, el cual está compuesto por el costo de materiales más el costo monetario de las perdidas. Es por ello que el problema de optimización está construido por estos dos factores que actúan como fuerzas opuestas. Se reporta el método de Algoritmos Genéticos (AG) para la implementación de la optimización al modelo de la parte activa que calcula dimensiones, masa del núcleo, devanados, perdidas en el núcleo e impedancia del transformador. Se reportan los resultados mostrando que se encuentran los parámetros del diseño que minimizan la función costo y que cumple con las restricciones especificadas.

Palabras clave: Diseño de transformadores, optimización, transformador de potencia, algoritmo genético, diseño de máquinas eléctricas.

Abstract: This work deals with the problem of optimizing the design of the active part of a three-phase power transformer, for a power range of 10 MVA and 115 / 13.8 kV core type and disk windings. The objective is to determine a design that meets the lowest total cost of owning considering the loss evaluation. This is a typical problem faced by transformer manufacturers during the bidding stage where they must offer in a short time a design that minimizes the cost of acquisition, which is composed of the cost of materials plus the operation cost monetary loss. That is why the optimization problem is built by these two factors that act as opposing forces. The method of Genetic Algorithms (AG) is reported for the implementation of the optimization to the model of the active part that calculates dimensions, mass of the core, windings, losses in the nucleus and impedance of the transformer. This work is showing that the design parameters

are found that minimize the cost function and fulfill with the restrictions specified.

Keywords: Transformer design, optimization, power transformer, genetic algorithm, electrical machine design..

1. Introducción

Existen diferentes tipos de transformadores eléctricos en el proceso de transporte de la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta las subestaciones de transmisión y distribución. Estos se pueden clasificar en transformadores de potencia y distribución (C57.12.80, 2010). La metodología y los requisitos de diseño para la fabricación de cada uno de estos tipos puede cambiar significativamente, generalmente en los transformadores de distribución que se encuentran en el rango de 0.1 a 5 MVA se solicita mantener tan bajos como sean posibles los costos de materiales y manufactura ya que las pérdidas son fijas y están establecidas por las normas (C57.120, 2017), (C57.120.1991, 1991); mientras que en un transformador de potencia hay que considerar costo de los materiales y costo de las perdidas evaluadas. Cuando se diseña bajo la premisa anterior, estos dos costos actúan como fuerzas opuestas ya que para reducir uno se debe incrementar el otro y viceversa, (Amoiralis et al., 2009a), lo cual deja una gran cantidad de diseños posibles que deben ser analizados. La evaluación de pérdidas es una práctica implementada por los compradores de transformadores que implica cuantificar el costo operativo de las pérdidas del transformador para traducirlas en términos económicos asignando factores de penalización, generalmente en USD /kW, a las pérdidas del núcleo y los devanados. Al final el costo de materiales y pérdidas se suman para obtener el Costo Total de Adquisición que permite hacer una comparación entre diferentes fabricantes (CFE, 2015).

El problema del diseño óptimo de transformadores de potencia es una tarea difícil de realizar, debido a la gran cantidad de variables que existen. Entre estas variables se pueden considerar pérdidas sin carga, perdidas con carga, campo de dispersión e impedancia de corto circuito, corriente inrush, aislamiento y enfriamiento, con el objetivo de minimizar costos de fabricación y costos de operación cumpliendo con las diferentes normas aplicables como IEEE, IEC y de CFE México. Como consecuencia los modelos de la función costo a optimizar resultan del tipo no lineal, no convexa, multivariable, mixta y multimodal (Aghmasheh et al., 2018). Los diferentes enfoques que han sido reportados en los últimos 30 años para solucionar el problema del diseño óptimo de transformadores van desde técnicas convencionales de optimización hasta técnicas evolutivas. En el trabajo (Poloujadoff and Findlay, 1986) se presenta un procedimiento para ilustrar los efectos en la variación de parámetros en el diseño óptimo de transformadores. El estudio (Andersen, 1991) publica una rutina de optimización, MONICA, basada en la simulación de Monte Carlo, básicamente su rutina genera números aleatorios que son usados para seleccionar diseños factibles, de los cuales se selecciona el diseño de menor costo. Posteriormente en (Rubaai, 1994) explica el diseño asistido por computadora aplicado a la enseñanza de transformadores. La publicación (Hurley et al., 1998) presentan el diseño optimizado de un modelo que considera el efecto de las altas frecuencia en transformadores. En el análisis (Hernandez et al., 2008), presentan un sistema de base de conocimientos orientado a objetos para el diseño de transformadores de distribución.

El desarrollo de (Amoiralis et al., 2011) es un paquete completo de software para el cálculo óptimo de transformadores de distribución y análisis de la evaluación económica. En el tema de optimización del diseño de transformadores usando métodos determinísticos, el trabajo de (Pham et al., 1996) presenta la optimización de la forma de los devanados para la minimización de las perdidas. En (Doulamis et al., 2002) explica un esquema de red neuronal sinergética para la construcción de transformadores óptimos. En (Georgilakis et al., 2007) dieron una solución heurística al problema de optimización del costo de manufactura de transformadores. En (Amoiralis et al., 2008), presentan un esquema combinado paralelo

PDF generado a partir de XML-JATS4R

con elemento finito para el diseño optimo global de transformadores de distribución. En (Georgilakis, 2009) explica un algoritmo recursivo genético con elemento finito para la solución al problema de minimización de costo. En (Olivares-Galvan et al., 2010) se presenta la selección de cobre contra aluminio para devanados de transformadores de distribución. En (Subramanian and Padma, 2011) se lleva a cabo el diseño óptimo de un transformador monofásico usando un algoritmo BFO, el cual se basa en el comportamiento de bacterias.

Además de los métodos determinísticos se han usado técnicas de inteligencia artificial para abordar el complejo problema de optimización del diseño de transformadores. En (Nims et al., 1996) se presenta una aplicación de los algoritmos genéticos para el diseño óptimo de transformadores. En (Hui et al., 2001) se reporta un trabajo basado en un algoritmo genético mejorado para el diseño óptimo de transformadores de potencia. En Geromel and Souza (2002) se dan aplicaciones de sistemas inteligentes en el diseño de transformadores de potencia. En (Amoiralis et al., 2008) se describe un sistema de inteligencia artificial combinando elemento finito y método de elementos de frontera aplicados a la optimización del diseño, donde seleccionan el material del devanado y predicen las perdidas y reactancia del transformador.

En (Zhang et al., 2009) se describen la aplicación de un algoritmo genético caótico al diseño óptimo de transformadores. En (Georgilakis et al., 2010) se propuso un método innovador combinando algoritmos genéticos y método de elemento finito para la solución a la optimización del diseño de transformadores. En (Khatri et al., 2012) se presenta un estudio entre un algoritmo genético y un algoritmo de recocido simulado en comparación con el diseño convencional. En (Salkoski and Chorbev, 2012) se presenta la aplicación de un algoritmo basado en Evolución Diferencial para la optimización del diseño de transformadores de distribución. En la actualidad las capacidades computacionales han permitido desarrollar técnicas de cálculo basadas en el método del elemento finito (FEM por sus siglas en ingles). En (Amoiralis et al., 2009b) se presenta una propuesta para la optimización global por medio de algoritmos evolutivos y calculo numérico del campo magnético y térmico de transformadores de distribución.

En este trabajo se implementa la optimización del diseño de la parte activa de un transformador de potencia mediante algoritmo genético. El transformador estudiado es de 10 MVA, voltaje de alta tensión de 115 kV y baja tensión de 13.8 kV. El modelo propuesto del transformador desarrollado en Matlab calcula las características de diseño de los devanados en cuanto a dimensión de los conductores, numero de discos y espiras; mientras que en los trabajos similares se trabaja con la técnica del factor de espacio, el cual representa la relación entre la cantidad de cobre y aislamiento sin detallar la construcción de los devanados. Los factores de evaluación considerados son (No Load Loss) NLL = 5,000 USD/kW y (Load Loss) LL= 1,500 USD/kW para las perdidas en vacío y con carga respectivamente.

2. Núcleo y devanados

2.1. Núcleo

En la Figura 1 se muestra el núcleo trifásico tipo columnas para el transformador de potencia y sus dimensiones generales, el cual se construye mediante el apilamiento de láminas de acero al silicio de diferentes anchos para formar una sección semicircular: El espesor de cada lamina actualmente se encuentra en el rango de 0.23 a 0.30 mm, lo cual ayuda a disminuir el efecto de pérdidas por corrientes parasitas. Existe una gran variedad de fabricantes de lámina de acero al silicio con diferentes valores de perdidas especificas y niveles de calidad, lo cual es considerado en el modelo con 5 tipos de lámina distintos, los cuales también tienen un costo por kilogramo distinto.

Los tipos de lámina considerados son:

1. AK Steel 0.23mm H-0 CARLITE 2. AK Steel 0.27mm H-1 CARLITE 3. AK Steel 0.30mm H-2 CARLITE 4. NIPPON STEEL 0.23mm 23ZDKH90 5. NIPPON STEEL 0.27mm 27ZDKH95

Esta es una de las variables para optimizar y el algoritmo de optimización busca el tipo de lámina más adecuado.

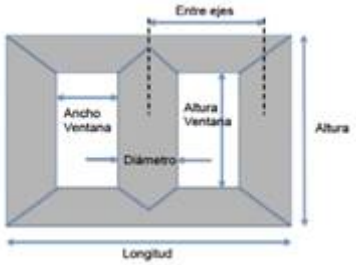

FIGURA 1
Núcleo trifásico tipo columna del transformador de potencia.

2.2. Devanados

La Figura 2 muestra una sección de un devanado en disco en el cual se tienen grupos de espiras en arreglo radial conectados en serie, a los grupos de espiras se les conoce como discos. Entre la separación de los discos se insertan espaciadores de cartón que ayudan al aislamiento eléctrico entre discos y proveen ductos de enfriamiento a los devanados.

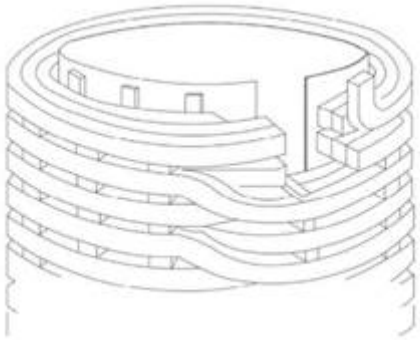

FIGURA 2
Devanado tipo disco

3. Perdidas en el transformador

3.1. Pérdidas en vacío

También conocidas como pérdidas en hierro, tienen su origen en el núcleo del transformador y se denotan como P0. Estas pérdidas son provocadas por las propiedades del material del núcleo ferromagnético. Durante la operación, estas pérdidas pueden variar en caso de que se altere significativamente la tensión de alimentación ya que genera una alteración directa a la inducción electromagnética. Las pérdidas del núcleo se calculan en base a la densidad de flujo magnético en la sección del núcleo y las pérdidas especificas de la lámina de acero al silicio. En la práctica, utilizando la siguiente ecuación se calculan las perdidas en vacío (Kulkarni and Khaparde, 2004).

$$P_0 = m_{nuc} P_{esp} k$$

(1)

Dónde: P0 son las perdidas en vacío en (W), mnuc es la masa del núcleo en (kg), Pesp son las perdidas especificas en (W/kg) y k es el factor constructivo con valor de 1.2.

3.2. Perdidas con carga

Las corrientes que circulan en los devanados generan pérdidas debido a la resistencia eléctrica del conductor. Son equivalentes a I2R en cada uno de los devanados y se les conoce como pérdidas óhmicas, donde R es la resistencia en corriente directa por el devandado. Considerando la resistencia del cobre a una temperatura de 75oC igual a 2.1×10−8Ω · m y su densidad igual a 8.9×103kg/m3 (Dellinger, 1910), las perdidas específicas por kilogramo Pecu del cobre a 75oC en función de la densidad de corriente han sido repostadas en (Sawhney and Chakrabarti, 2010) con la ecuación.

$$P_{ecu} = 2{,}36 \cdot \delta^2 \cdot m_{cu}(W/kg) \tag{2}$$

Donde δ es la densidad de corriente en A/mm2, mcu es la masa del cobre en kg.

3.3. Impedancia

La reactancia de dispersión es un fenómeno que se presenta por el hecho de que no todo el flujo producido por una bobina se enlaza a la otra bobina. Por lo tanto, como se esperaría, la magnitud de este flujo disperso esta en función de la geometría y construcción del transformador. La impedancia es una de las especificaciones más importantes que tienen gran impacto en el diseño total, es una restricción del diseño y el valor lo define el comprador o en su defecto se establecen valores estándar en las normas (C57.120, 2017). Eléctricamente, consiste de las componentes resistiva y reactiva. Las pérdidas en carga e impedancia, se determinan de la prueba de corto circuito (C57.12.90, 2015). El porcentaje de impedancia o simplemente la impedancia se calcula como:

$$\%Z = \sqrt{\%R^2 + \%X^2} \tag{3}$$

La componente resistiva es obtenida mediante la ecuación siguiente (Kulkarni and Khaparde, 2004).

$$\%R = \frac{P_{cu}}{10P_{KVA}} \tag{4}$$

Donde R es la resistencia del transformador en porciento, X es la reactancia de dispersión en porciento y Pcu son las pérdidas en carga a la potencia base en (W), PKVA es la potencia base en kVA. Para la componente reactiva, la formula analítica simple para calcular la reactancia asume que el campo magnético de dispersión es completamente axial entre los dos devanados considerados como solenoides de longitud infinita con los ampere-espiras uniformemente distribuidos axialmente (Vecchio et al., 2001):

$$\%X = 2.48 \times 10^{-5} f \left(\frac{I_f N}{H_{eq} VE} \right) \sum AE\,\%$$

(5)

Dónde: X es la reactancia del transformador en (%), f es la frecuencia en (Hz), If es la corriente de fase del devanado en (A), N es el número de espiras del devanado, Heq es la altura equivalente considerando el factor Rogowsky en (cm), VE son los volts por espira en (V) y Σ AE es la suma de la distribución en (ampere-espira) y está definida por:

$$\sum AE = \left(\frac{T_1 D_1}{3} + T_2 D_2 + \frac{T_3 D_3}{3}\right) \tag{6}$$

Donde, T1, T2 y T3 son los radios de la bobina de baja tensión, el radio medio de la distancia entre bobinas y el radio de la bobina de alta tensión, respectivamente. D1 ancho de la bobina de baja tensión, D2 ancho de la distancia entre bobinas y D3 ancho de la bobina de alta tensión.

Generalmente la resistencia de un transformador es mucho menor comparada con la reactancia, así que esta última es casi igual a la impedancia del transformador. El costo de los materiales del transformador varía con el cambio de valor de impedancia. Generalmente, existe un valor particular de impedancia que resulta en un costo mínimo del transformador, así que puede ser costoso diseñar el transformador con un valor de impedancia menor o mayor que el especificado. Si la impedancia es muy baja, las corrientes y esfuerzos de cortocircuito serían muy altos, lo cual necesariamente requiere de reducir la densidad de corriente implicando en el aumento de materiales. Por otra parte, si la impedancia requerida es muy alta, esto incrementara las corrientes de Eddy en los devanados y las pérdidas por dispersión en las partes estructurales resultando apreciablemente en pérdidas y temperaturas altas en los devanados y el líquido aislante, lo cual nuevamente forzara al diseñador a incrementar la cantidad de cobre y/o usar enfriamiento extra. El valor de impedancia, el cual es especificado por el usuario del transformador, puede llegar a ser tan bajo como 2 % en pequeños transformadores de distribución y tan alto como 20 % en transformadores de potencia. Los valores de impedancia fuera de este rango generalmente son especificados para aplicaciones especiales (Kulkarni and Khaparde, 2004).

3.4. Eficiencia del transformador

La eficiencia η a un factor de potencia unitario, resulta ser una restricción durante el diseño del transformador, los requerimientos son eficiencias superiores al 99 %. Esta dada por la relación entre la potencia de salida Psal y la potencia de entrada Pent más las pérdidas totales Ptot:

$$\eta = \frac{P_{sal(KVA)}}{P_{ent}(KVA) + P_{tot}(kW)} \tag{7}$$

3.5. Función a optimizar

Para la optimización de la parte activa del transformador, se determina la función costo que evalúa la aptitud de cada individuo y está compuesta por tres factores:

1. Costo monetario de los materiales fc1, 2. Costo monetario de las perdidas fc2, y 3. Penalización por la desviación en el valor calculado de impedancia fc3. Así la función costo total se define por:

$$f_{costo\ total} = f_{c1} + f_{c2} + f_{c3} \tag{8}$$

Cada función costo se define por:

$$f_{c1} = m_{nuc}c_{nuc} + (m_{bt} + m_{at})c_{cu} \tag{9}$$

$$f_{c2} = p_{fe}k_{vacio} + p_{cu}k_{carga} \tag{10}$$

$$f_{c3} = abs(abs(Uz) - Z^2)k_z \tag{11}$$

Dónde: mnuc = masa del núcleo (kg), mbt = masa del devanado de BT (kg), mat = masa del devanado de AT (kg), cnuc = costo del material del núcleo en dólares americanos por kilogramo (USD/kg), ccu = costo del material de los devanados (USD/kg), Pfe = perdidas en vacío (kW), Pcu = perdidas en carga (kW), kvacio = factor de evaluación de pérdidas en vacío (USD/kW), kcarga = factor de evaluación de pérdidas en carga (USD /kW), UZ = impedancia calculada (%), Z = impedancia garantizada (%), kz = factor de penalización por diferencia entre el valor esperado y el valor calculado de impedancia (USD/1 %).

4. Algoritmo genético para la optimización

El Algoritmo Genético (AG) es una técnica de optimización basada en la generación aleatoria de soluciones y mediante las reglas de la evolución natural selección, cruce y mutación logra que la poblacion de soluciones encuentre valores óptimos. Un AG permite a una poblacion compuesta de varios individuos evolucionar bajo ciertas reglas específicas hasta un estado que maximiza la aptitud (fitness). El método fue desarrollado por John H. Holland en la década de los 60s y finalmente popularizado por uno de sus estudiantes, David Goldberg, quien fue capaz de resolver un problema difícil que involucraba el control de tuberías de transmisión de gas en su trabajo de tesis (Goldberg, 1989). El trabajo original de Holland fue presentado en su libro Holland (1992) y fue el primero en desarrollar las bases teóricas de los AG y su robustez en la búsqueda de soluciones en espacios complejos. El trabajo de De-Jong (1975) demostró la utilidad del AG para optimizar una función e hizo el primer esfuerzo concreto para encontrar los parámetros óptimos a través de un AG (De-Jong, 1975). Desde entonces muchas versiones de la programación evolutiva han estado tratando con diferentes variantes. Algunas de las ventajas que ofrecen los AG incluyen:

§ Optimizan variables continuas o discretas,
§ No requieren conocer derivadas de funciones,
§ Buscan simultáneamente en todo el espacio de búsqueda de la función costo,
§ Operan con una gran cantidad de variables,
§ Se ajusta al procesamiento en paralelo de las nuevas computadoras,
§ Optimiza variables con un espacio de búsqueda extremadamente complejo,
§ Proveen una lista de las soluciones óptimas y no únicamente una solución.
§ Trabajan con datos generados numéricamente, datos experimentales o funciones analíticas.

Los operadores básicos de un algoritmo genético son: evaluación, selección, ordenación, cruce y mutación. A partir de una poblacion de individuos que se generan de forma aleatoria trae como consecuencia una

poblacion con diversidad, estos es un conjunto de individuos con diferentes aptitudes para resolver el problema. La aleatoriedad de la poblacion es escalada en los intervalos de búsqueda de la solución del problema. Una vez generada la poblacion, se da la etapa de evaluación de cada individuo en la función costo del problema, obteniendo una calificación para cada integrante de la población. Posteriormente, con la poblacion evaluada viene la etapa de selección que se encarga de separar los individuos con las mejores calificaciones de los individuos con baja calificación (aptitud). Los individuos con bajas calificaciones son desechados y los mejores se envían a la siguiente etapa. Con los mejores individuos viene el proceso de cruza que consiste generar nuevos individuos para reponer a los individuos que fueron desechados. El operador cruce se encarga de dividir el código genético de dos individuos padres e intercambiar y combinar las cadenas genéticas para generar nuevos individuos hijos con mejores aptitudes. La nueva poblacion está integrada por los individuos padres y los individuos hijos. El operador mutación se ejerce sobre la nueva población y consiste en cambiar de forma aleatoria un porcentaje muy bajo usualmente del 1 % al 2 % del código genético de toda la nueva poblacion. Esto se realiza con la finalidad de evitar la convergencia prematura y prevenir caer en un óptimo local que haga perder la diversidad de los individuos rápidamente. El diagrama de flujo de la rutina propuesta mediante la cual se obtienen los parámetros óptimos de diseño del transformador se muestra en la Figura 3.

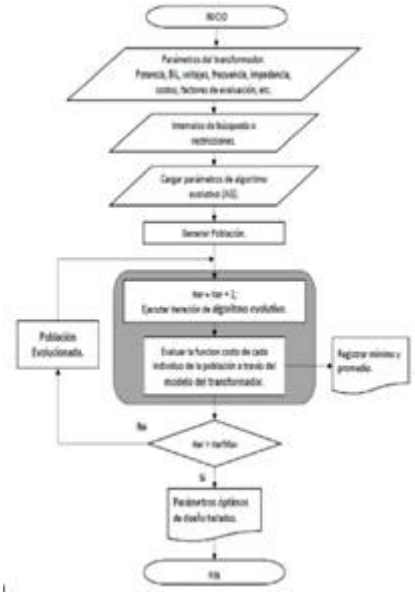

FIGURA 3:
Diagrama de flujo de la optimización de la parte activa del transformador mediante un algoritmo genético.

5. Diseño de la parte activa del transformador

Para el diseño de la parte activa de un transformador es necesario que estén claramente definidas las características principales con base a la especificación del usuario final. Para el desarrollo del proceso de diseño se tomaran las características constructivas del siguiente caso de estudio:

§ Tipo: Transformador reductor trifásico el líquido mineral aislante con ventilación natural.
§ Frecuencia: 60 Hz,
§ Potencia: 10000 kVA,
§ Voltaje AT: 115000 V,
§ Conexión AT: Delta,
§ Taps AT: ± 2×2.5 %,
§ Voltaje BT: 13800/7967V,

§ Conexión BT: Estrella,

§ Impedancia: 8.0 %, tolerancia IEEE ±7.5 %).

§ Eficiencia mínima a plena carga con factor de potencia unitario: 99.2 %,

§ Núcleo tipo uniones a 45 o apilado de láminas de acero al silicio con uniones a.

Se realizan 10 corridas, con una poblacion de 100 individuos, 100 generaciones y 1 % de mutación. Para la ejecución del algoritmo se usó Matlab 2015a con procesador Intel core i5, 2.8MHz, 8 GB en RAM y Windows 7.0 a 64 bits. Los operadores del AG evaluación, selección, ordenación, cruce y mutación se implementan mediante la programación de funciones script en Matlab.

La Figura 4 muestra la optimización de la función costo durante la corrida 10 y también muestra una corrida promedio de las corridas realizadas. Se puede observar como el algoritmo minimiza en cada evolución hasta llegar al valor costo de USD $ 140,038.00.

La Tabla 1 muestra las características de diseño que encuentra el AG en cada corrida, para la restricción de impedancia cumplen aquellas que se encuentran en el intervalo $7.4 \leq Z \leq 8.6$, se puede determinar que las corridas que satisfacen la restricción son: 1, 2, 3, 4, 5, 7, y 10. En la parte de eficiencia todas las corridas logran un valor mayor al 99.2 %. Sin embargo, las corridas 1, 2, 4 y 10 son las que alcanzan una eficiencia máxima del 99.33 %.

La Tabla 2 muestra la evaluación económica para cada corrida de los costos de los materiales, donde en la corrida 7 se obtiene el menor costo de los materiales con un valor de USD $41,187.0, pero debido a que existen restricciones esto no quiere decir que sea el diseño factible.

La Tabla 3 muestra los costos de pérdidas por calentamiento en el núcleo y los costos de pérdidas por efecto Joule, la Tabla 4 integra los costos de las tablas 2 y 3 siendo la corrida numero 10 la que logra un menor costo total. Por lo tanto, esta es la solución de diseño factible con una Z =7.5 %, eficiencia del 99.33 % y un costo total de USD $ 140,038.00.

TABLA 1
Características de desempeño del transformador encontradas por el AG

	% Z	η	B	P_0	P_{cu}	m_{fe}	m_{cu}
1	**8.03**	**99.33**	1.4199	8109	59349	8641	1552
2	**7.84**	**99.33**	1.3999	7952	59507	8770	1556
3	**7.40**	99.30	1.3901	7831	59189	8781	1547
4	**8.03**	**99.33**	1.4199	8109	59349	8641	1552
5	**8.32**	99.32	1.3999	7844	60991	8650	1594
6	9.01	99.26	1.3616	7417	66937	8731	1750
7	**8.17**	99.32	1.4252	7982	60805	8429	1590
8	7.35	99.31	1.3600	7365	62224	8692	1627
9	8.85	99.31	1.3965	7517	61957	8338	1620
10	**7.50**	**99.33**	1.3805	7703	59600	8781	1558

TABLA 2
Evaluación económica en dólares USD de los diseños encontrados por el AG de los costos de material

Num.	Costo núcleo	Costo cobre	Costo total de materiales
1	25,923	15,520	41,443
2	26,310	15,560	41,870
3	26,343	15,470	41,813
4	25,923	15,520	41,443
5	25,950	15,940	41,890
6	26,193	17,500	43,693
7	25,287	15,900	41,187
8	26,076	16,270	42,346
9	25,014	16,200	41,214
10	26,343	15,580	41,923

PDF generado a partir de XML-JATS4R

TABLA 3
Evaluación económica en dólares USD de los diseños encontrados por el AG considerando los costos de pérdidas

Num.	Costo de pérdidas en el núcleo	Costo de pérdidas	Costo total en el devandado
1	40,545	59,349	99,894
2	39,760	59,507	99,267
3	39,155	59,189	98,334
4	40,545	59,349	99,894
5	39,220	60,991	100,211
6	37,085	66,937	104,022
7	39,910	60,805	100,715
8	36,825	62,224	99,049
9	37,585	61,957	99,542
10	38,515	59,600	98,115

TABLA 4
Evaluación económica en dólares USD de los diseños encontrados por el AG de los costos totales

Num.	Costo materiales	Costos de pérdidas	Costo total del diseño
1	41,443	99,894	141,337
2	41,870	99,267	141,137
3	41,813	98,334	140,157
4	41,443	99,894	141,337
5	41,890	100,211	142,101
6	43,693	104,022	147,715
7	41,187	100,715	141,902
8	42,346	99,049	141,395
9	41,214	99,542	140,756
10	**41,923**	**98,115**	**140,038**

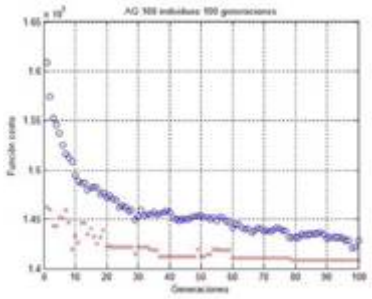

FIGURA 4
Función costo mínima de la corrida 10, trazo (x) y valor promedio de las 10 corridas, trazo (o).

6. Conclusiones

La función costo es el elemento principal a evaluar durante el proceso de calificación de una posible solución y encontrar este valor mínimo es una tarea muy complicada si se desarrolla manualmente. La implementación en un AG para la optimización del diseño permite producir configuraciones óptimas de una forma automática. El AG implementado es capaz de encontrar en poco tiempo y pocas iteraciones los parámetros que cumplen con todos los requerimientos y producen el diseño óptimo basado en el modelo del transformador que fue desarrollado, al mismo tiempo cumple con el costo mínimo de adquisición ya que las perdidas y materiales producen el menor costo total. De otra forma, el diseñador que busca un diseño óptimo puede tardar desde horas hasta días en encontrar los parámetros óptimos. Para el caso analizado es posible diseñar el transformador de potencia con las restricciones impuestas de impedancia y eficiencia. En general, el AG y los modelos de perdidas funcionan para obtener diseños de transformadores de potencia cumpliendo con las restricciones impuestas por las normas de los diferentes organismos.

Referencias

Aghmasheh, R., Rashtchi, V., Rahimpour, E., 2018. Gray box modeling of power transformer windings based on design geometry and particle swarm optimization algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery 5, 2384–2393. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2808518

Amoiralis, E., Georgilakis, P., Tsili, M. A., Souflaris, A. G. K. A. T., 2011. Complete software package for transformer design optimization and economic evaluation analysis. In Materials Science Forum 670, 535–546.

Amoiralis, E., Tsili, M., Kladas, A. G., 2009a. Transformer design and optimization: a literature survey. IEEE Transactions on Power Delivery 4, 1999–2024. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2028763

Amoiralis, E., Tsili, M. A., Georgilakis, P. S., Kladas, A., Souflaris, A., 2008. A parallel mixed integer programming-finite element method technique for global design optimization of power transformers. IEEE transactions on Magnetics 6, 1022–1025. DOI: 10.1109/tmag.2007.915119

Amoiralis, E. I., Georgilakis, P. S., Tsili, M. A., Kladas, A. G., 2009b. Global transformer optimization method using evolutionary design and numerical field computation. IEEE transactions on magnetics 3, 1720–1723. DOI: 10.1109/TMAG.2009.20127

Andersen, O. W., 1991. Optimized design of electric power equipment. IEEE Computer Applications in Power 4, 11–15. DOI: 10.1109/67.65030

C57.120, S., 2017. Ieee guide for loss evaluation of distribution and power transformers and reactors. IEEE Power and Energy Society.

C57.120.1991, S., 1991. Ieee guide for loss evaluation of distribution and power transformers and reactors. IEEE Power and Energy Society.

C57.12.80, S., 2010. Ieee standard terminology for power and distribution transformers. IEEE Power and Energy Society 1.

C57.12.90, S., 2015. Ieee test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers. IEEE Power and Energy Society 1.

CFE, 2015. Evaluación de pérdidas de transformadores de potencia y cálculo de penalización. Comisión Federal de Electricidad, CFE K0000-20.

De-Jong, K., 1975. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems,. PhD thesis, Dept. of Computer and Comm. Sciences, Univ. Of Michigan 1.

Dellinger, J. H., 1910. The temperature coefficient of resistance of copper. Journal of the Franklin Institute 170 (3), 213–216. DOI: 10.1016/s0016-0032(10)90872-7

Doulamis, N. D., Doulamis, A. D., Georgilakis, P. S., Kollias, S. D., Hatziargyriou, N. D., 2002. A synergetic neural network-genetic scheme for optimal transformer construction. Integrated Computer-Aided Engineering 1, 37–56. DOI: 10.3233/ICA-2002-9103

Georgilakis, P., 2009. Recursive genetic algorithm-finite element method technique for the solution of transformer manufacturing cost minimisation problem. IET electric power applications 6, 514–519. DOI: 10.1049/iet-epa.2008.0238

Georgilakis, P. S., Olivares, J. C., Esparza-Gonzalez, M. S., 2010. An evolutionary computation solution to transformer design optimization problem. In 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering Research 1, 226–31.

Georgilakis, P. S., Tsili, M. A., Souflaris, A. T., 2007. A heuristic solution to the transformer manufacturing cost optimization problem. Journal of materials processing technology 1, 260–266. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.034

Geromel, L. H., Souza, C. R., 2002. The application of intelligent systems in power transformer design. In: IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37373). Vol. 1. IEEE, pp. 285–290.

PDF generado a partir de XML-JATS4R

Goldberg, D. E., 1989. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston 1.

Hernandez, C., Arjona, M. A., Shi-Hai, D., 2008. Object-oriented knowledge-based system for distribution transformer design. IEEE Transactions on Magnetics 10, 2332–2337. DOI: 10.1109/tmag.2008.2001483

Holland, J. H., 1992. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press 1.

Hui, L., Li, H., Bei, H., Shunchang, Y., 2001. Application research based on improved genetic algorithm for optimum design of power transformers. In: ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No. 01EX501). Vol. 1. IEEE, pp. 242–245.

Hurley, W. G., Wolfle, W. H., Breslin, J. G., 1998. Optimized transformer design: Inclusive of high-frequency effects. IEEE Transactions on Power Electronics 4, 651–659. DOI: 10.1109/63.704133

Khatri, A., Hasmat, M., Rahi, O. P., 2012. Optimal design of power transformer using genetic algorithm. International Conference on Communication Systems and Network Technologies 1. DOI: 10.1109/csnt.2012.180

Kulkarni, S. V., Khaparde, S., 2004. Transformer engineering: design and practice. Crc Press, New York.

Nims, J., Smith, R., El-Keib, A., 1996. Application of a genetic algorithm to power transformer design. Electric machines and power Systems 24 (6), 669–680. DOI: 10.1080/07313569608955702

Olivares-Galvan, J. C., Leon, F. D., Georgilakis, P. S., Escarela-Perez, R., 2010. Selection of copper against aluminium windings for distribution transformers. IET Electric Power Applications 6, 474–485. DOI: 10.1049/iet-epa.2009.0297

Pham, T. H., Salon, S. J., Hoole, S. R. H., 1996. Shape optimization of windings for minimum losses. IEEE Transactions on Magnetics 5, 4287–4289. DOI: 10.1109/20.538845

Poloujadoff, M., Findlay, R. D., 1986. A procedure for illustrating the effect of variation of parameters on optimal transformer design. IEEE Transactions on Power Systems 4, 202–205.

Rubaai, A., 1994. Computer aided instruction of power transformer design in the undergraduate power engineering class. IEEE Transactions on Power Systems 9, 1174–1181. DOI: 10.1109/59.336081

Salkoski, R., Chorbev, I., 2012. Design optimization of distribution transformers based on differential evolution algorithms. In: 4th ICT Innovations 2012 Web Proceedings of the International Conference in Ohrid, Macedonia. Citeseer, pp. 35–44.

Sawhney, A., Chakrabarti, A., 2010. Course in electrical machine design. Dhanpat Rai.

Subramanian, S., Padma, S., 2011. Optimization of transformer design using bacterial foraging algorithm. International Journal of Computer Applications 19 (3), 52–57.

Vecchio, R. D., Poulin, B., Feeney, M. F., Feghali, P. T., Shah, D. M., Ahuja, R., Dillipkumar, M., 2001. Transformer design principles: with applications to core-form power transformers. CRC press.

Zhang, S., Hu, Q., Wang, X., Zhu, Z., 2009. Application of chaos genetic algorithm to transformer optimal design. In: 2009 International Workshop on Chaos-Fractals Theories and Applications. IEEE, pp. 108–111.

PDF generado a partir de XML-JATS4R