

SELECCIÓN EFICIENTE DE BANCOS DE TRANSFORMADORES

EFFICIENT SELECTION OF BANKS OF TRANSFORMERS

Dr. (C) Grester Garcia González¹ & M. Sc. Marcos A. de Armas Teyra²

1. Especialista A. en Redes y Sistemas, Empresa Eléctrica de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba

2. Profesor Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba

grester@eleccfg.une.cu; marmas@ucf.edu.cu

Recibido para evaluación: 14 de Octubre de 2009

Aceptación: 23 de Noviembre de 2009

Entrega de versión final: 14 de Diciembre de 2009

Resumen

El presente trabajo muestra un procedimiento para realizar la selección adecuada de los bancos de transformadores, en explotación o que puedan ser empleados en nuevas inversiones, con énfasis en la reducción de las pérdidas operacionales y en el aumento de la eficiencia del sistema mediante el empleo de técnicas de inteligencia artificial. El método constituye una herramienta que puede ser utilizada en condiciones de campo sin necesidad de realizar pruebas invasivas y con datos de fácil adquisición dado el estado del arte actual. También puede ser empleada en cualquier tipo de banco, ya sea éste monofásico o trifásico conformado por dos o tres transformadores en configuración simétrica o asimétrica o por transformadores puramente trifásicos. El análisis económico se realiza mediante la evaluación del Costo Ciclo de Vida (CCV) del banco. Se presenta como caso de estudio los resultados obtenidos en la gasolinera “La Calzada”, del municipio de Cienfuegos.

Palabras Clave: Eficiencia operacional, inteligencia artificial, selección de transformadores.

Abstract

This paper show a procedure to select the most profitable transformer banks in an specific service or in new investments with emphasis in the reduction of the operational losses, the cost in useful life, and the increase of the system efficiency using techniques of artificial intelligence. The method constitutes a tool that can be used in field conditions without invasive test and with data of easy acquisition according to the state of the art. The program was developed to analyze any type of transformers or transformer bank connection; single-phase, three-phase transformers or two or three transformers in symmetric or asymmetric configuration for three-phase and single phase services. The economic analysis is made by the Cost of Cycle Life (CCV) of the analyzed configuration. As a case the results obtained in the gas station "La Calzada" of the Cienfuegos's municipality is presented.

Keywords: Operational efficiency, Artificial intelligence, Transformer selection.

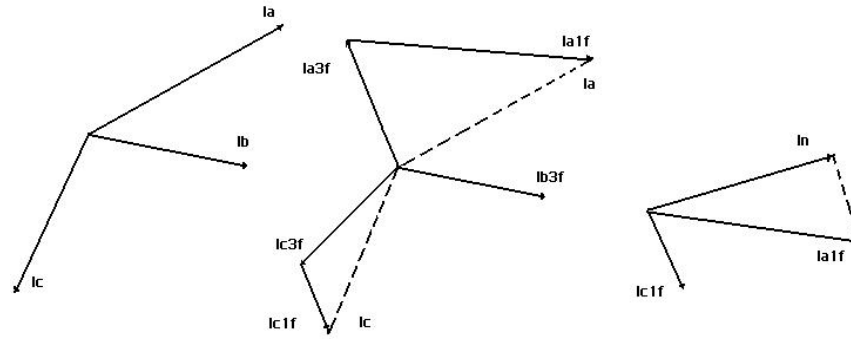


Figura 3. Sistema desbalanceado de corriente.

En este sistema se cumple que:

$$I_a = I_{a3f} + I_{a1f} \quad (1)$$

$$I_b = I_{b3f} + I_{b1f} \quad (2)$$

$$I_c = I_{c3f} + I_{c1f} \quad (3)$$

$$I_n = I_{a1f} - I_{c1f} \quad (4)$$

Si se toma como referencia de corriente trifásica aquella cuyo módulo es menor; para el caso I_b , se tiene que la componente $I_{b1f} = 0$ y (2) se reduce a:

$$I_{b3f} = I_b * e^{j0} \quad (5)$$

y las componentes trifásicas de las corrientes I_a e I_c :

$$I_{a3f} = I_b * e^{j2\pi/3} \quad (6)$$

$$I_{c3f} = I_b * e^{-j2\pi/3} \quad (7)$$

De esta forma, al sistema balanceado de corriente se asocian las cargas trifásicas y al desbalanceado las monofásicas. Conocidas estas componentes durante todo el ciclo de trabajo y el tipo y conexión del banco, se pueden determinar el estado de carga de cada transformador, sus pérdidas y eficiencia.

Aunque la eficiencia de los transformadores es elevada, las pérdidas en los bancos utilizados pueden reducirse, y en ello se fundamenta la importancia de evaluarlas cuando se desean minimizar los costos de operación y la eficiencia energética. Es una tarea sencilla pero requiere cuidado.

2.1. Eficiencia y Pérdidas en los Transformadores

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas con valores típicos de eficiencia superiores a 0.96. Su valor está dado por la relación entre la potencia de salida y la de entrada. Algo más usual es relacionar la potencia de salida y las pérdidas, aunque también suele utilizarse, a manera de aproximación, la relación entre los kVA nominales y estos más las pérdidas [1], [2]:

$$\eta = \frac{P_{SALIDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{P_{SALIDA}}{P_{SALIDA} + \text{Pérdidas}} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{kVA_n}{kVA_n + \text{Pérdidas}} \quad (9)$$

Las pérdidas en los transformadores se clasifican en pérdidas en vacío y pérdidas bajo carga. Las pérdidas en vacío, P_ϕ son debidas a la histéresis en el material y a la circulación de corrientes parásitas en el núcleo del transformador. Dependen fundamentalmente de la tensión y la frecuencia de manera que varían levemente con el estado de la carga y las fluctuaciones del sistema. Para efectos de este trabajo (como en muchos otros), se consideran las pérdidas en vacío constantes e independientes de la carga.

Las pérdidas bajo carga, P_{carga} , son debidas a la circulación de corriente en el transformador y son la suma de las pérdidas en el cobre en ambos devanados; PR más un conjunto de pérdidas menores denominadas pérdidas adicionales debidas a la inducción del flujo disperso y a las corrientes parásitas.

1. Mejor regulación de voltaje.
 2. Mejor comportamiento de los motores durante el arranque.
 3. Se puede asumir mayor confiabilidad en el sistema.
 4. Capacidad adicional para casos de emergencia o incrementos futuros de carga.
 5. No se producen sobrecalentamientos y no se afecta la vida útil.
 6. Mejor comportamiento ante contaminación armónica.
- En conclusión, es importante evaluar la posibilidad de operar el transformador a un índice de carga cercano al ideal.

Como es evidente, cualquiera de las alternativas anteriores debe considerar los costos operativos y de inversión, haciendo más tangible la elección del transformador. Las técnicas a emplear en el análisis económico son las de flujo descontado como lo es el Costo del Ciclo de Vida; CCV. El CCV se determina como:

$$CCV = - \left[I.I. + \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{(1 + D)^i} \right] \quad (13)$$

En la ecuación (13) *I.I.* es la Inversión Inicial en USD; *G_i* son los costos de operación en USD, *n* los años considerados y *D* es la tasa de descuento. En este trabajo la vida útil de un transformador se considera de 12 años y la tasa de descuento del 12 %. El ahorro se determina por la diferencia de los CCV de las alternativas consideradas.

$$Ahorro = CCV_{inicial} - CCV_{Final} \quad (14)$$

$$Ahorro = (I.I._{inicial} - I.I._{final}) + \sum_{i=1}^n \frac{G_{inicial} - G_{final}}{(1 + D)^i} \quad (15)$$

En la ecuación (15) el primer término refleja la diferencia en gastos capitales y el segundo a los operacionales debido a la reducción de pérdidas.

3. MODELACIÓN DEL SISTEMA

En la actualidad, las herramientas de inteligencia artificial están siendo cada vez más empleadas en la solución de problemas relacionados con los sistemas energéticos, [3].

Una de las técnicas que permite encontrar una solución en este escenario, y sobre todo en condiciones de campo, son los algoritmos genéticos, AG.

Los AG están basados en reproducir un proceso evolutivo similar al propuesto para la evolución de las especies, donde una población inicial de individuos, compuesta por un número determinado de soluciones matemáticas y con mayor o menor éxito en aproximarse al valor deseado, evoluciona generación tras generación mediante procedimientos de selección, cruzamiento y mutación hacia nuevas poblaciones con mayor calidad en la solución y por tanto más adaptadas al problema que se desea resolver. El procedimiento se repite sucesivamente hasta que finalmente converge encontrando el individuo que cumple con la ecuación y las restricciones impuestas siendo éste el más exitoso, y para el caso, la solución esperada.

3.1. Implementación del Algoritmo Genético

A partir de las mediciones experimentales efectuadas se conoce el valor de la tensión, la corriente, la potencia activa, reactiva y aparente de la carga en cada uno de los estados de operación del banco o transformador. Con esta información se calculan los vectores simétricos y asimétricos y la magnitud de la carga trifásica y monofásica que predomina en cada instante. El conocimiento pleno de la magnitud de la carga y el tipo de conexión permite determinar fácilmente el índice de carga de cada transformador, sus pérdidas y eficiencia. Estos parámetros constituyen la condición inicial del sistema cuya evaluación se realiza de forma independiente en una subrutina del programa desarrollado. En el caso particular del banco estrella-abierta, que es tomado como caso de estudio en este trabajo, el transformador de alumbrado, lleva la carga monofásica más la carga trifásica dividida raíz de tres, mientras que el transformador de potencia lleva la carga trifásica dividida raíz de tres solamente [4], [5]. En la Figura 5 se ilustra el comportamiento de la carga en el banco de transformadores de la gasolinera “La Calzada”, del municipio de Cienfuegos.

Asimétrica

- Estrella/Delta-aterrizado
- Estrella/Abierta-aterrizado

4) Operadores Genéticos y Criterios de Parada

Los AG permiten varias opciones para los operadores genéticos a emplear, estos son:

- **Operador de selección:** estocástica uniforme.
- **Reproducción:** elitismo = 2
- **Factor de cruzamiento** = 0.8
- **Mutación:** uniforme, razón = 0.01
- **Cruzamiento:** heurístico, razón = 1.5
- **Criterio de parada:** Fitness límite = $1e^{-2}$

Es decir, el AG va obteniendo progresivamente mejores soluciones y detiene la búsqueda cuando la evaluación del mejor individuo está por debajo de este valor. Esto significa convergencia y obtención de las capacidades que garantizan las mínimas pérdidas. También el algoritmo se detiene cuando no hay cambios en el valor de la función de aptitud del mejor individuo durante un número de generaciones igual a 25, especificada por la función *StallGenLimit* o por decisión del usuario. Una vez que el algoritmo converge es decisión del analista adoptar las medidas que se consideren adecuadas.

El programa desarrollado consta entonces de tres subprogramas principales auxiliados por funciones específicas desarrolladas en Matlab. En adición se emplea la herramienta de algoritmos genéticos que este programa brinda. La estructura del programa se presenta en la Figura 6 y su correspondiente diagrama de bloques en la Figura 7.

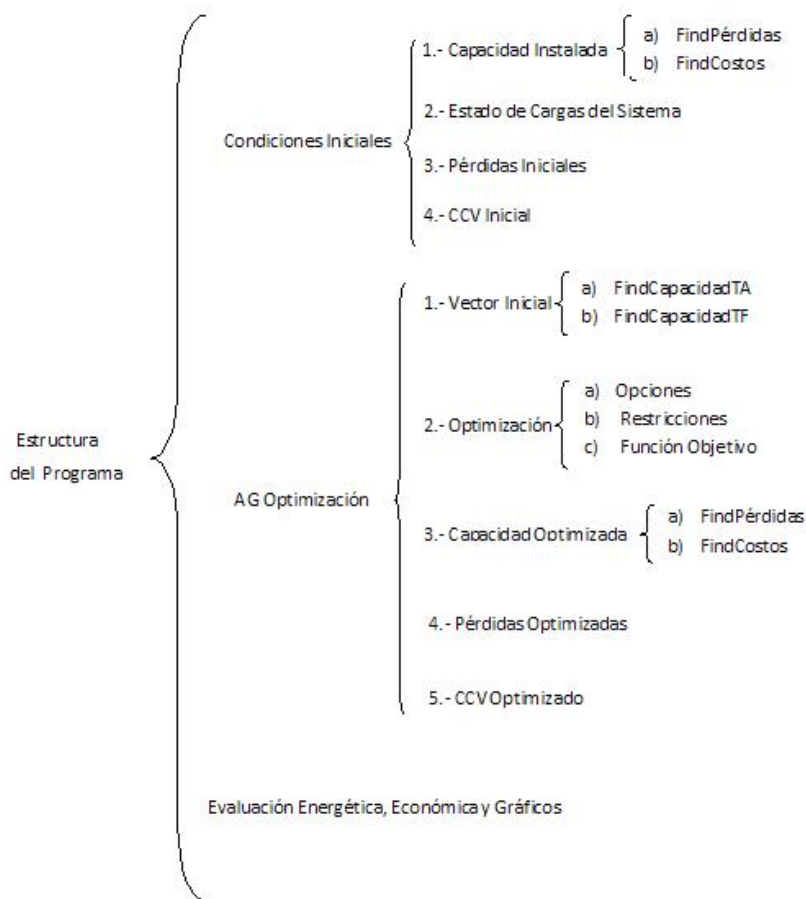


Figura 6. Estructura del programa desarrollado.

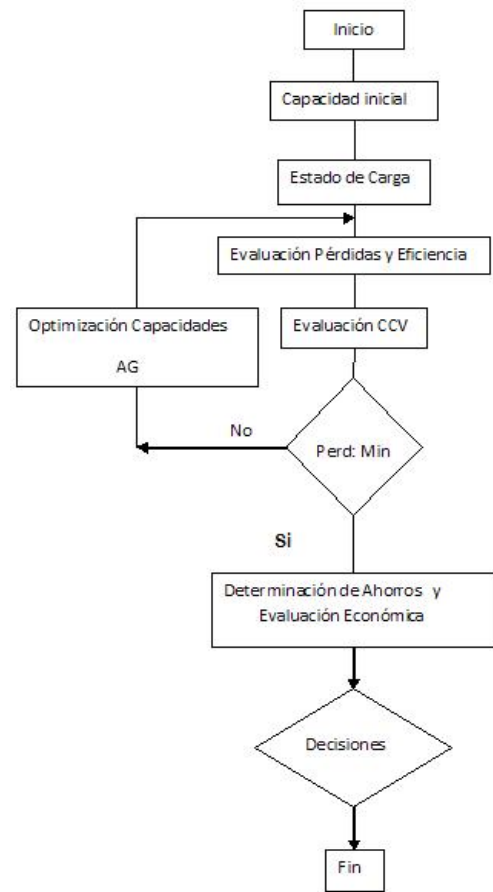


Figura 7. Diagrama de bloques.

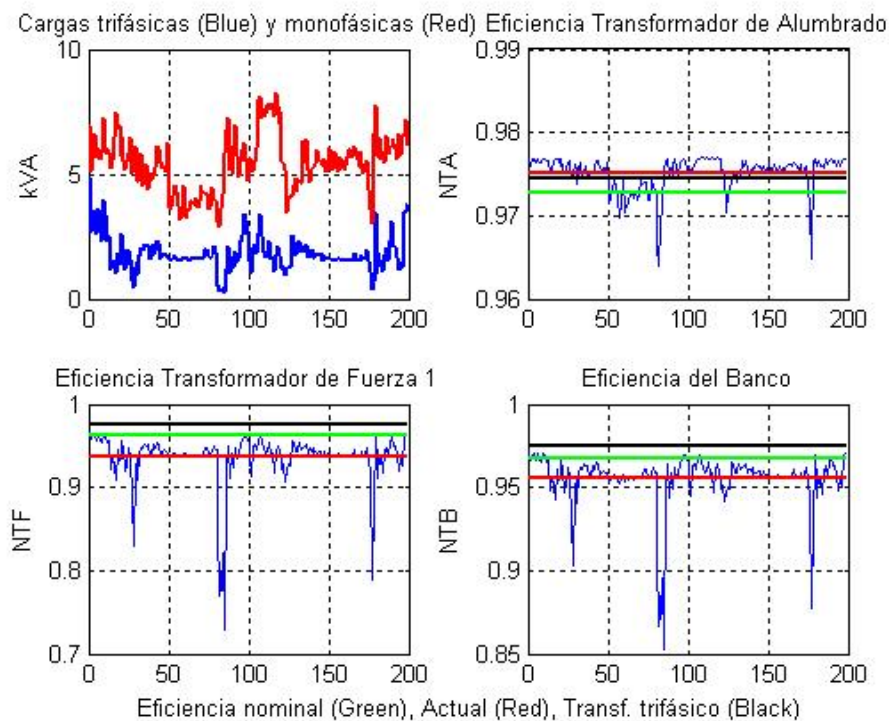


Figura 9. Eficiencia de los transformadores evaluados

Finalmente debe considerarse los siguientes aspectos:

- El banco evaluado es una pequeña muestra de los miles que se emplean en la industria.
- Existe un sinnúmero de configuraciones trifásicas y monofásicas.
- Un porcentaje alto de las industrias continuamente se amplían o se remodelan.
- No es común realizar este tipo de análisis.
- Debería incorporarse la reducción de pérdidas en función de la disminución del consumo de reactivos en el sistema, es decir, corrección del factor de potencia.
- Considerar que la capacidad de transformación en un país puede superar en algo más de tres veces la capacidad de generación en este.

6. CONCLUSIONES

1. El método presentado permite evaluar las prestaciones energéticas de los bancos de transformadores asimétricos en operación con datos

de poca complejidad y generalmente disponibles en las condiciones actuales.

2. El método puede ser aplicado a cualquier tipo de transformador y configuración empleada.
3. Las herramientas de inteligencia artificial arrojan resultados superiores a los que hasta ahora o tradicionalmente han sido empleados en la selección y análisis de bancos transformadores de potencia.
4. Los AG permiten desarrollar proyectos de evaluación, sustitución y/o remodelación y perfeccionamiento energético, además de mejorar la eficiencia energética en bancos y transformadores en operación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido del departamento de mediciones y el área técnica de la Organización Básica Eléctrica Provincial de Cienfuegos por facilitar las mediciones y otros datos necesarios así como por las sugerencias recibidas durante el desarrollo de este trabajo.