

# Detección de Cortocircuitos entre Vueltas de Devanados de Transformadores por Medio de Técnicas No-Convencionales

C. Paulina Bravo Ortega, R. Hativé Domínguez Adame, Fermín P. Espino Cortés  
Departamento de Ingeniería Eléctrica SEPI ESIME ZAC.  
Instituto Politécnico Nacional  
Ciudad de México, México  
cbravoo1500@alumno.ipn.mx

Rodrigo Ocón Valdez  
Facultad de Estudios Superiores Aragón  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Estado de México, México  
rodrigocon99@aragon.unam.mx

**Resumen**—Los cortocircuitos entre vueltas son una de las fallas eléctricas más comunes y potencialmente destructivas en los transformadores. En el presente trabajo se analiza, mediante simulación, la viabilidad de dos técnicas para detectar fallas entre vueltas de devanados de transformadores. La primera, consiste en la medición del comportamiento del flujo disperso sobre la superficie del devanado cuando ocurre un cortocircuito entre vueltas. La segunda técnica se basa en la medición de las componentes armónicas en la corriente de vacío del transformador. De acuerdo con los resultados, la medición del flujo disperso es un método factible para detectar y localizar fallas entre vueltas. En el caso de la medición de la corriente de vacío, se muestra como la reducción en la relación de las magnitudes de la tercera armónica y de la componente fundamental es una técnica viable para detectar fallas incipientes de aislamiento entre vueltas.

**Palabras Clave** —Corrientes de vacío, cortocircuito entre vueltas, devanado, flujo disperso.

**Abstract**- Short circuits between turns are one of the most common and potentially destructive electrical faults in transformers. In the present work, the feasibility of two techniques to detect faults between turns of transformer windings is analyzed. The first consists of measuring the behavior of the scattered flow on the winding surface when a short circuit occurs between turns. The second technique is based on the measurement of the harmonic components in the no-load current of the transformer. According to the results, dispersed flow measurement is a feasible method to detect and locate faults between turns. In the case of vacuum current measurement, it is shown that the reduction in the ratio of the magnitudes of the third harmonic and the fundamental component is a viable technique for the measurement of the no-load current.

## I. INTRODUCCIÓN

Los cortocircuitos en devanados representan aproximadamente el 19% de las fallas en los transformadores de potencia, 37.69% en el caso de transformadores de subestación, y el 48% de las fallas en transformadores elevadores de centrales generadoras [1]. De este porcentaje una parte significativa se atribuye al cortocircuito entre vueltas de los devanados. Las fallas entre vueltas son una de las fallas eléctricas más comunes

y potencialmente destructivas en los transformadores de potencia [1]. Este tipo de falla suele originarse por el deterioro progresivo del aislamiento en los devanados. Inicialmente, afecta a un número reducido de espiras, pero con el tiempo su gravedad aumenta [2]. Por ello, si se logra identificar en una etapa temprana y se desconecta el transformador a tiempo, se puede evitar que la falla se agrave. Esto permite reparar y reinstalar el equipo con menores costos y tiempos de inactividad [3]. Por esta razón, es de gran importancia contar con pruebas para detectarlas, en este trabajo se proponen dos para esta finalidad.

La primera técnica analizada en este trabajo tiene como propósito detectar fallas durante el proceso de construcción del transformador. Lo anterior es mediante la medición del flujo disperso a lo largo de la superficie exterior de los devanados cuando uno de estos es energizado a tensión reducida. En transformadores, el flujo disperso se puede definir como aquel flujo cuya trayectoria no se cierra completamente a través del circuito magnético definido por el núcleo del transformador. Este flujo disperso se ve incrementado con la corriente de carga en el secundario de un transformador; pero también, por la presencia de cortocircuitos entre vueltas de los devanados.

La segunda técnica evaluada en este trabajo consiste en detectar fallas entre vueltas de transformadores con la medición de la corriente de vacío. Se verifica la sensibilidad de los cambios entre la magnitud de la tercera armónica (3H) y la componente fundamental (1H) de la corriente de vacío para detectar fallas de aislamiento entre vueltas. En algunos casos, el contenido armónico de la corriente sin carga puede determinarse como una solicitud especial de los clientes, principalmente para conocer el contenido armónico que podría requerirse para ajustes de protección [4].

Los resultados muestran como estas técnicas pueden detectar con precisión cortocircuitos entre vueltas, ya sea durante el proceso de construcción de los devanados de un transformador, o al momento de ser energizados en vacío.

## II. TÉCNICAS NO CONVENCIONALES PARA DETECTAR FALLAS ENTRE VUELTAS

En esta sección se describen las dos técnicas investigadas. En el caso de la técnica basada en la medición del flujo disperso, se realizan simulaciones que permiten verificar la sensibilidad de este método. En el caso de la técnica basada en la medición de la corriente de vacío, en esta sección se describe la metodología propuesta.

### A. Modelado del flujo disperso en un transformador trifásico con cortocircuito entre vueltas

Esta técnica se considera inicialmente fuera de línea, y consiste en energizar con una tensión reducida el devanado bajo prueba, midiendo sobre su superficie la densidad de flujo magnético disperso o la tensión inducida por éste. Cualquier alteración significativa del flujo sobre la superficie del devanado puede ser asociada a una falla por cortocircuito entre vueltas, como se verá más adelante.

Inicialmente, se realizaron simulaciones de campo magnético con ayuda del software COMSOL® *Multiphysics*, para el modelo de un transformador trifásico de potencia tipo seco con una capacidad nominal de 15 kVA, clase 1,2 kV, tensión primaria nominal 440/220 V y tensión secundaria 220/127 V. Véase la figura 1a. El problema se resuelve como un fenómeno electromagnético cuasiestacionario utilizando la interfaz de campos magnéticos en el dominio de la frecuencia para la técnica del flujo disperso, y en el dominio del tiempo para simular las corrientes de vacío.

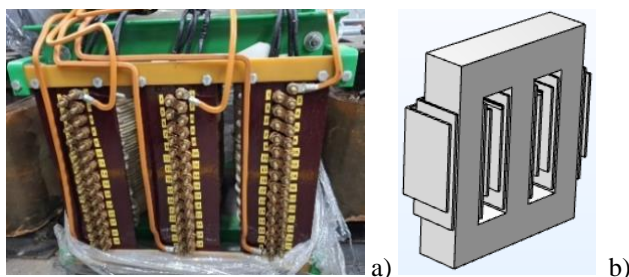


Figura 1.- Transformador trifásico a) parte activa, b) modelo en 3D axial simétrico simulado en COMSOL

### B. Modelado de la corriente de vacío en un transformador trifásico

Además del análisis del flujo disperso como técnica para detectar fallas en los devanados, una segunda opción analizada en este trabajo se basa en la medición de la corriente de vacío. La medición de la magnitud de la corriente de vacío es una prueba ya utilizada para identificar fallas en los devanados de transformadores; sin embargo, solo se mide la magnitud de la corriente, la cual, cuando incrementa por arriba del valor esperado se considera un indicio de la presencia de una falla. En este caso se propone medir la magnitud del tercer armónico de la corriente sin carga y compararla con la magnitud de la componente fundamental. La medición de componentes armónicas en la corriente de vacío es una prueba descrita en la norma IEC 60076-1 de transformadores de potencia, pero no tiene como objetivo detectar fallas [5]. La corriente de vacío

depende en gran medida de la densidad de flujo magnético en el núcleo del transformador. Por el comportamiento no-lineal del material del núcleo, y el punto de operación sin carga (usualmente en la rodilla de la curva), el contenido armónico de componentes impares es característico en las corrientes de vacío.

Mediante simulaciones se busca verificar si un cambio entre la magnitud de la componente de tercer armónico y la componente fundamental puede asociarse a la presencia de una falla incipiente entre vueltas.

El transformador de potencia modelado para verificar la viabilidad de este método es el mismo que se describe en la sección anterior, con la única diferencia que se utiliza  $\frac{1}{4}$  de la geometría el mostrada en la Figura 1b y sólo una de las fases.

## III. RESULTADOS DE SIMULACIÓN CORTOCIRCUITO ENTRE VUELTAS

En la sección anterior se describieron las técnicas a utilizar para detectar cortocircuitos entre espiras de transformadores. A continuación, se muestra mediante simulaciones que con ambas técnicas es posible detectar fallas entre vueltas en el transformador trifásico de 15kVA descrito anteriormente.

### A. Técnica de medición del flujo disperso

Para validar esta técnica se simula un cortocircuito en una vuelta a la mitad del devanado de alta tensión de las 3 fases, ya que es el devanado más cercano al núcleo, y, por tanto, no es tan fácil detectarlo mediante el sensado sobre la superficie del devanado. Se considera el devanado de alta tensión energizado y el devanado de baja tensión abierto. Para visualizar la distribución del flujo disperso se seleccionaron tres trayectorias de medición diferentes: la primera es sobre el devanado de la fase A, la segunda posición es sobre el devanado de la fase B, y el último sobre el devanado de la fase C, todas a una distancia de separación de 2cm desde la bobina y hasta el lugar de medición, las cuales se muestran en color rojo en la Figura 2.

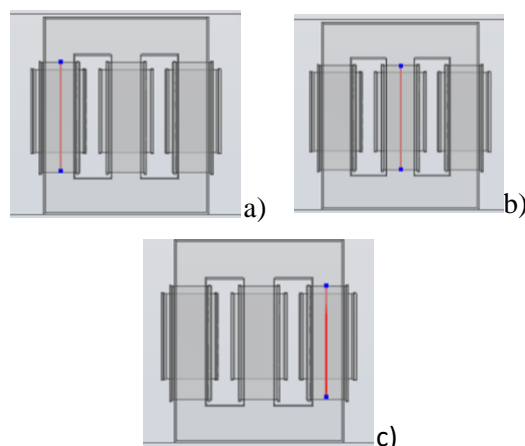


Figura 2.- Líneas de medición de flujo disperso en el transformador trifásico a) sobre la fase A, b) sobre la fase B, y c) sobre la fase C.

En la Figura 3, se muestra en color azul la espira cortocircuitada para las tres fases del devanado de alta tensión del transformador trifásico.

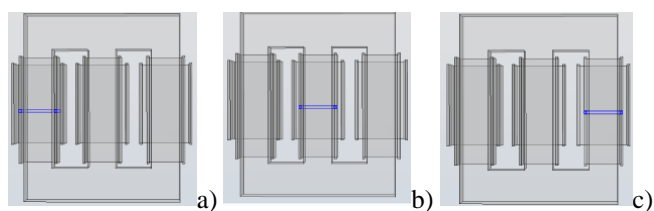


Figura 3.- Cortocircuito de 1 espira en la parte media del devanado de alta tensión en a) la fase A, b) la fase B, y c) la fase C.

Para el primer caso, cuando la falla está en la fase A, se puede observar que la densidad de flujo disperso es mayor en la posición de la línea de sensado que se encuentra más cercana a la fase A, es decir, la mostrada en la gráfica de la Figura 4 en color azul; mientras que en las otras dos posiciones su magnitud es despreciable en comparación.

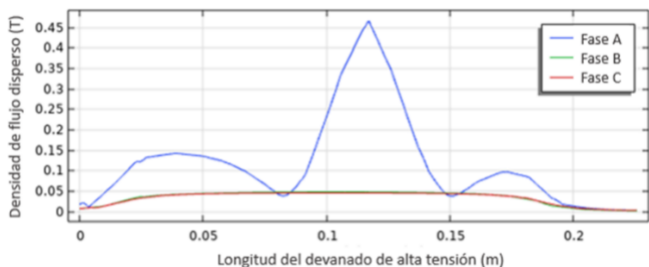


Figura 4.- Gráfica de la densidad de flujo disperso con falla en el devanado de alta tensión fase A.

La Figura 5 ilustra el escenario en el cual la falla se localiza en la fase B (véase Figura 3b). En esta representación, se observa que la posición de sensado correspondiente a la fase B, identificada por la curva de color verde, es la que experimenta un incremento en su magnitud.

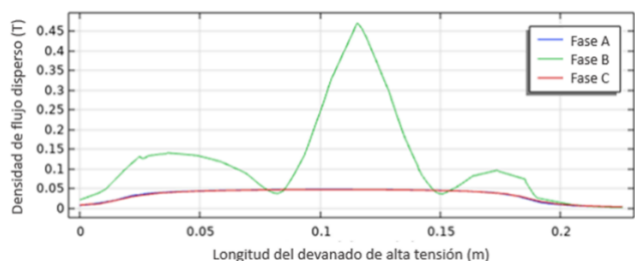


Figura 5.- Gráfica de la densidad de flujo disperso con falla en el devanado de alta tensión fase B.

Finalmente, en el caso donde la falla se encuentra en la fase C (ver Figura 3c) la magnitud de la densidad de flujo disperso también incrementa en la posición más cercana al lugar donde se encuentra la falla. Este comportamiento se observa en la Figura 6. Asimismo, en las tres mediciones realizadas, se

observa un aumento en la magnitud del flujo disperso en la posición donde se localiza el cortocircuito, es decir, en la región central. Esto se debe a que, en las gráficas presentadas, el eje horizontal representa la distancia a lo largo del devanado de alta tensión.

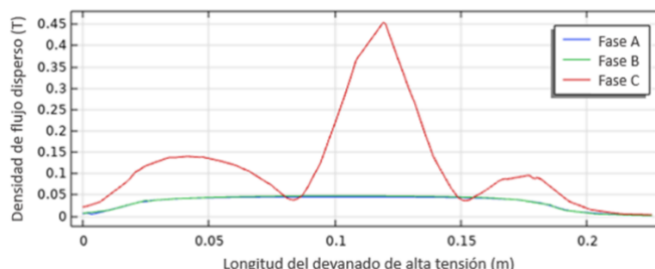


Figura 6.- Gráfica de la densidad de flujo disperso con falla en el devanado de alta tensión fase C.

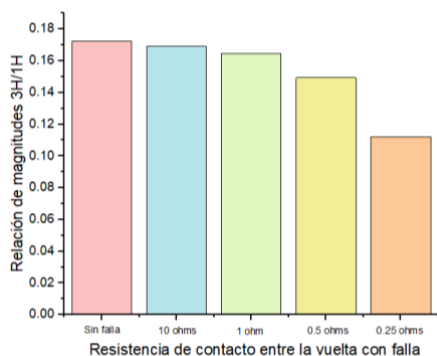
### B. Técnica de medición de armónicos en las corrientes de vacío

En el caso del método de la corriente en vacío, se aprovecharon los planos de simetría en la geometría de 3D, por lo que solo se resolvió un cuarto del modelo del transformador. Lo anterior resulta conveniente para ahorrar recursos computacionales durante la simulación, los cuales resultan elevados por tratarse de un problema no-lineal resuelto en el dominio del tiempo.

Como esta técnica se considera aplicable a un transformador ya completo y energizado a tensión nominal, la presencia de un cortocircuito franco entre vueltas generará una corriente de vacío considerablemente grande, la cual puede incluso ser detectada por las protecciones de sobrecorriente del transformador. No obstante, una condición más interesante para ser detectada con esta técnica es la de considerar una reducción en la capacidad aislante del material entre vueltas en un punto específico, por lo anterior se simuló una falla entre vueltas del devanado de alta tensión, pero colocando una resistencia en el punto de falla que representa un contacto no perfecto entre vueltas.

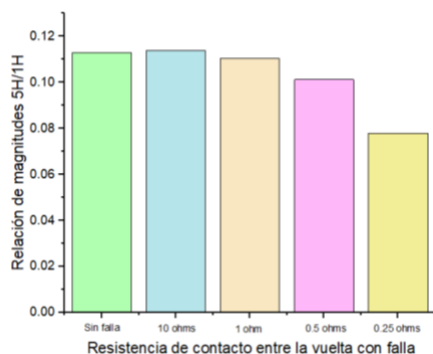
Se realizaron simulaciones para diferentes valores de resistencia (10, 1, 0.5 y 0.25 ohms), determinando que cuando el valor de la resistencia es menor a 10 ohms la relación entre la magnitud del tercer armónico respecto a la magnitud de la componente fundamental comienza a ser menor que el valor obtenido sin falla. La simulación tuvo una duración de 10 ciclos, energizando con una rampa de tensión que permitió no registrar la corriente de energización.

En la Figura 7 se observa la variación de la relación entre el tercer armónico (3H) y el fundamental (1H) a medida que el valor de la resistencia de contacto disminuye. Se puede analizar que la magnitud 3H/1H es menor conforme al valor de la resistencia de contacto reduce, es decir, que mientras más pequeño sea el valor de la resistencia también lo será la magnitud de la relación 3H/1H.



**Figura 7.-** Relación entre la magnitud de la componente de tercer armónico (3H) y la fundamental (1H) para diferentes resistencias de contacto en el punto de falla de la vuelta.

Además, en la Figura 8 se grafican los valores de la relación de magnitudes 5H/1H para los diferentes valores de resistencia de contacto y son comparados con el caso de la corriente de vacío sin falla, lo anterior tiene el propósito de contar con una alternativa para analizar en situaciones donde el tercer armónico reduzca su magnitud, como ocurre en las conexiones en delta. Cabe mencionar que para resistencias de contacto mayores a 10 ohms la relación de magnitudes 3H/1H prácticamente no cambia respecto al caso sin falla.



**Figura 8.-** Relación entre la magnitud de la componente de quinto armónico (5H) y la fundamental (1H) para diferentes resistencias de contacto en el punto de falla de la vuelta.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se verifica la factibilidad de dos técnicas no convencionales para detectar fallas entre vueltas de devanados de transformadores de potencia. En la primera técnica se verificó la factibilidad de medir el comportamiento del flujo disperso sobre la superficie de devanados de transformadores para detectar la presencia de cortocircuitos entre vueltas. Se detecta de manera muy exacta la posición de la falla en cualquiera de las fases del transformador trifásico de potencia, mostrando cómo se puede detectar una falla entre vueltas en el devanado de alta tensión, a pesar de ser el más cercano al núcleo, y, por ende, el menos sensible, aplicando la medición del flujo disperso.

De acuerdo con los resultados, la medición del flujo disperso es un método factible para detectar y localizar fallas entre vueltas en los devanados de un transformador de potencia. La aplicación de esta técnica puede ser considerada durante el proceso de construcción del transformador, aunque su aplicación puede ser también analizada en el transformador ya completo e incluso en operación.

La segunda técnica se basa en el análisis de la corriente de vacío del transformador. Cambios en la relación de la magnitud de la tercera armónica y la magnitud de la componente fundamental se tomaron como referencia para determinar si existe un corto circuito entre vueltas. En este caso se pudo verificar la condición de un contacto no perfecto entre vueltas, es decir la existencia de una resistencia de contacto que simula una degradación incipiente del medio aislante entre vueltas. Se determinó que la relación de magnitudes 3H/1H comienza a ser menor cuando la resistencia de contacto se reduce por debajo de 10 ohms, evidenciando la presencia de una falla.

#### REFERENCIAS

- [1] Krzysztof Solak, Frank Mieske, Sebastian Schneider, "Negative-sequence current integral method for detection of turn-to-turn faults between two parallel conductors in power transformers," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 141, 2022, 108124, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108124>.
- [2] Z. Zhao, C. Yao, C. Li, and S. Islam, "Detection of Power Transformer Winding Deformation Using Improved FRA Based on Binary Morphology and Extreme Point Variation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 4, pp. 3509–3519, 2018.
- [3] Gustavo Leal, Matias Meira, Cristian Ruschetti, "Inter Turn Short Circuit Detection Through Differential Admittance Monitoring in Transformers", *IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, 2022, DOI: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9939953
- [4] "Testing of Power Transformers, Routine tests, Type tests and Special tests", ABB, 2003.
- [5] IEC 60076-1: Power Transformers - Part 1: General, 2006.
- [6] Chen, Si; Sheng, Gehao; Zhang, Lijing. "Experimental Study of Oil-Immersed Transformer Temperature Features Under Incipient Turn-to-Turn Shortcircuit Fault". *IEEE 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. pp. 588-591, 2024.