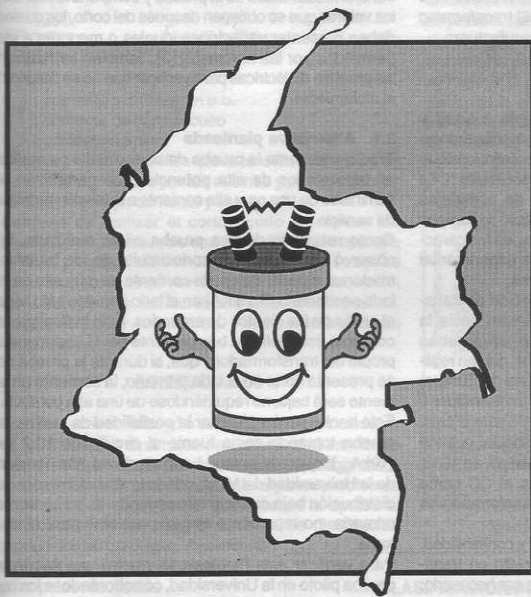


La prueba de cortocircuito y la calidad de los transformadores en Colombia



□ Aponte M. Guillermo, M.Sc.
Ingeniero Electricista
Profesor Titular

□ Cadavid R. Héctor, Ph.D.
Ingeniero Electromecánico
Profesor Titular

□ Castro A. Ferley, M.Sc.
Ingeniero Electricista
Profesor Auxiliar

□ Lozano M. Carlos, M.Sc.
Ingeniero Electricista

Integrantes del Grupo de
Investigación en Alta Tensión -
GRALTA.
Universidad del Valle

RESUMEN

La implementación de un exigente sistema de control de calidad para transformadores de distribución, en el sector eléctrico colombiano, requiere de laboratorios de ensayo adecuados que permitan verificar los requisitos establecidos. Uno de los ensayos es el de cortocircuito franco en transformadores de distribución, que evalúa su aptitud mecánica ante este tipo de fallas, requisito indispensable para que todo fabricante de transformadores, en el país, pueda obtener la homologación de sus productos.

Para que la Universidad del Valle implementara la prueba de cortocircuito, se elaboró un proyecto que permitió desarrollar una alternativa, mediante la cual se tiene, actualmente, en funcionamiento un campo de pruebas de cortocircuito para transformadores.

En este artículo se presentan las etapas del desarrollo de esta investigación, que incluye la concepción y puesta en marcha de un campo de pruebas especializado [1], la confrontación de los resultados teóricos y experimentales y los resultados de ochenta y seis (86) transformadores probados, de dieciséis (16) fabricantes.

ABSTRACT

The implementation of a quality control system in the electrical sector, specially strict for distribution

* Este texto se recibió, para ser publicado, en mayo de 1997

transformer, was demanding to have in Colombia suitable laboratories to verify the established requirements. One of the established test was the distribution transformer short circuit withstand aptitude verification, which is a requirement to obtain the transformer manufacturer homologation in the country.

For implementing the short circuit test, in the Universidad del Valle was carried out a project that permitted to develop an alternative, through which is currently in operation a distribution transformer short circuit field test. In this article are presented the different stages in the development of this investigation topic, that includes the conception and implementation of a specialized test field [1], the confrontation of the theoretical and experimental results of the eighty six (86) transforming tested, form sixteen (16) transformer manufactures.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las maneras de incrementar la calidad y confiabilidad de los transformadores es garantizando su aptitud para soportar los esfuerzos electrodinámicos que se presentan bajo una condición de cortocircuito (CC) brusco. Esta tarea exige la solución de complejos problemas técnico-científicos como el cálculo de campos magnéticos, de fuerzas electrodinámicas, de las características mecánicas y la comprobación experimental de la aptitud al CC de los transformadores.

En la actualidad, en Colombia, la fabricación de transformadores está orientada, principalmente, hacia la distribución. Hasta hace poco tiempo las pruebas dinámicas, en este tipo de transformadores, debían realizarse en Brasil, México, USA, o en países de Europa, lo que incrementaba el costo final del transformador y no aportaba a la transferencia de tecnología para el país. Este problema se tornó muy agudo, en especial, cuando el Comité de Calidad del sector eléctrico exigió, en 1993, la ejecución de las pruebas de aptitud al CC como requisito para la homologación de los transformadores de distribución.

Para solucionar los problemas de calidad y confiabilidad, relacionados con la aptitud al cortocircuito en transformadores de distribución, en Colombia, era necesario: diseñar, montar y poner en marcha un campo de pruebas; elaborar procedimientos propios para la ejecución del ensayo y desarrollar metodologías para el cálculo de campos magnéticos y esfuerzos por C.C. Adicionalmente, era necesario considerar la especificidad de los transformadores producidos. A nivel de distribución los tipos constructivos más difundidos son: en primer lugar, el transformador monofásico y trifásico con núcleo arrollado (Wescor) de devanados rectangulares y, en segundo lugar, el transformador con núcleo apilado y bobinas circulares.

El trabajo incluyó desarrollos prácticos como el montaje del campo de pruebas y teóricos mediante proyectos

de maestría y doctorado en la Universidad del Valle y en el Instituto Energético de Moscú, respectivamente.

2. PRUEBA DE APTITUD AL CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

La prueba de Cortocircuito se realiza con el propósito de verificar la capacidad mecánica del transformador para soportar los esfuerzos electromagnéticos, que se presentan en su interior, debido a las muy altas corrientes que circulan durante un corto en sus bornes secundarios. La comprobación de la aptitud para soportar el corto se hace obteniendo las características constructivas del transformador antes de la prueba y comparándolas con los valores que se obtienen después del corto, los cuales deben presentar variaciones iguales o menores a las permitidas por las normas[2],[3]. También se realizan las pruebas dieléctricas para verificar que no se deterioró el aislamiento.

2.1. Alternativa planteada

Tradicionalmente la prueba de cortocircuito se realiza en laboratorios de alta potencia, que garantizan el suministro de una muy alta corriente a la tensión nominal de servicio.

Como resultado de una prueba piloto realizada, se observó que durante el cortocircuito de los transformadores, a pesar de que la corriente es muy alta en el lado secundario (5 a 8 KA) en el lado primario sólo llega al orden de los cientos de amperios. Esto indica que la corriente está definida básicamente por la impedancia propia del transformador y que, si durante la prueba no se presenta corto en el lado primario, la corriente en la fuente será baja, no requiriéndose de una alta potencia. Este hecho llevó a plantear la posibilidad de realizar la prueba tomando como fuente el circuito de 13.2 kV (10kA_{CC}), que alimenta al Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle, donde un transformador de distribución bajo cortocircuito secundario, su corriente primaria no representa ningún problema para el sistema.

Para verificar esta hipótesis se realizó una segunda prueba piloto en la Universidad, corroborándose los resultados obtenidos de los cálculos [4].

2.2. Procedimiento de la prueba

El procedimiento está definido por las normas ANSI/IEEE C57.12.93 y NTC 532, el cual, después de haber acordado algunos aspectos entre el sector eléctrico y los fabricantes se puede resumir así:

Se realizan las siguientes pruebas antes del cortocircuito:

- Medición de resistencia de los devanados.
- Medición de resistencia de aislamiento.
- Relación de transformación.
- Determinación de pérdidas y corriente sin carga.

- Determinación de pérdidas y voltaje de cortocircuito.
- Un impulso con onda reducida y uno con onda plena.

Luego se llevan a cabo seis pruebas de cortocircuito, las cinco primeras con una duración de 0.250 segundos y con un intervalo de 15 minutos entre ellas. (tres pruebas se hacen en el tap nominal, una en el de máxima tensión y una en el de mínima). La sexta prueba se realiza en el tap de mínima tensión, con una duración dada por:

$$t = \frac{1250}{I_{SYM}^2}, \quad I_{SYM} = \frac{I_{CC}}{I_{nom}}$$

I_{SYM} : corriente simétrica en p.u.

I_{CC} : corriente de cortocircuito

I_{nom} : corriente nominal

En cada prueba se verifica que la tensión esté dentro de los límites permitidos por las normas y se registran los valores de voltaje, corriente y tiempo.

Después de realizar el cortocircuito se repiten las pruebas preliminares, adicionando la de tensión aplicada al 100% y efectuando dos impulsos al 100%. Luego se hace una cuidadosa revisión del núcleo, bobinas, cambiador de taps, salidas de alta y baja tensión, cuñas, bridas, tanque y radiadores. Finalmente se toman fotografías.

3. RESULTADOS

Este proyecto contribuyó a avanzar en el conocimiento de los esfuerzos dinámicos presentes en el interior de los transformadores de distribución durante cortocircuitos bruscos. También permitió detectar algunos problemas en el proceso constructivo que afectan la aptitud al cortocircuito de los transformadores de distribución producidos en Colombia. A continuación se presenta el resumen de los principales resultados.

3.1. Datos de transformadores probados

En la tabla 1 se muestra la cantidad, tipo y potencias de los transformadores que se han probado hasta la fecha (mayo 15 de 1997)

En la figura 1 se muestra la distribución de los transformadores por tipo de núcleo y tipo de devanado, la mayor cantidad de transformadores son del tipo de núcleo enrollado con devanado continuo.

TABLA 1.
TIPO Y POTENCIA DE TRANSFORMADORES PROBADOS

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS					TOTAL
Potencias	10	15	25	37.5	
Cantidad	3	7	17	8	37
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS					TOTAL
Potencias	30	45	75	112.5	
Cantidad	6	7	33	3	49
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS Y TRIFÁSICOS					86

3.2. Principales eventos y anomalías detectadas

En las 86 pruebas de cortocircuito realizadas se han detectado diversos eventos y anomalías. En la tabla 2 se presenta una clasificación de los principales eventos. En la figura 2. se muestra la distribución de estos durante las pruebas.

Al realizar la prueba de cortocircuito existen diversos parámetros que determinan si un transformador pasó exitosamente la misma. Estos parámetros son la variación de la impedancia de cortocircuito (Z_{cc}) la

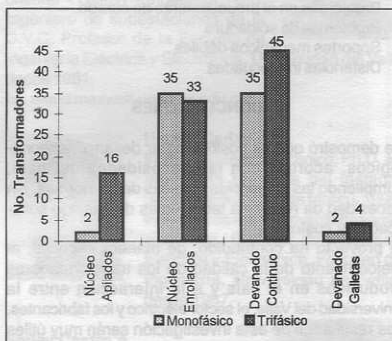


Figura 1. Tipo de núcleo y tipo de devanado

TABLA 2.
CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE EVENTOS

Tipo de Evento	Descripción
1	Desplazamiento radial de los devanados
2	Desplazamiento axial de los devanados
3	Movimiento del Núcleo
4	Ruptura de conexiones
5	Ruptura de radiadores
6	Daño en el tanque
7	Daño en el conmutador de derivaciones
8	Falla en la prueba de impulso
9	Falla en la prueba de tensión aplicada
10	Variación de la Impedancia
11	Variación de la corriente de magnetización

variación de la corriente de excitación (I_{exc}) y las pruebas dieléctricas (tensión aplicada y prueba de impulso). En la figura 3 y figura 4, se muestra la cantidad de transformadores que estuvieron dentro de los límites permitidos de variación de cada uno de estos parámetros, independientemente del cumplimiento de los demás requisitos del ensayo.

Teniendo en cuenta todos los parámetros, se puede elaborar un consolidado para establecer la cantidad de transformadores que han cumplido todos los requisitos del ensayo, establecidos en las normas (figura 5.)

3.3 Resultados prácticos

El principal resultado práctico es la existencia, en el país, del primer campo de pruebas para evaluar la aptitud de soporte al cortocircuito en transformadores de distribución.

La ejecución de la prueba ha permitido, adicionalmente, detectar entre otras anomalías las siguientes:

- Baja calidad del dieléctrico
- Problemas en el procedimiento de curado.
- Problemas de soldadura
- Soportes mecánicos débiles
- Distancias inadecuadas

4. CONCLUSIONES

Se demostró que es posible lograr desarrollos tecnológicos, acordes con las necesidades del país, cumpliendo las exigencias técnicas de las normas, sin necesidad de recurrir a tecnologías demasiado sofisticadas y costosas.

El proyecto ha contribuido, de manera especial, al mejoramiento de la calidad de los transformadores producidos en el país y a la interacción entre la Universidad del Valle, el sector eléctrico y los fabricantes. Los resultados de esta investigación serán muy útiles en proyectos futuros relacionados con: el incremento de la potencia de CC del laboratorio de la Universidad del Valle, el diseño y construcción de nuevos campos de pruebas, el modelamiento y cálculo de campos magnéticos de dispersión, el modelamiento y cálculo de esfuerzos por CC en transformadores de mayor potencia.

El número de ensayos realizados permiten conformar una información estadística muy importante para el análisis de fallas y elaboración de recomendaciones. Del estudio de fallas se logró presentar recomendaciones que fuesen posibles de implementar en las etapas de diseño y construcción del transformador, relacionadas con:

- La altura eléctrica de los devanados
- Organización de los tap's de regulación
- Tipo, forma y organización de las cuñas separadoras.
- Prensado de los devanados

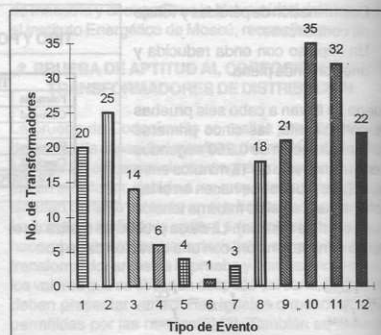


Figura 2. Distribución de eventos

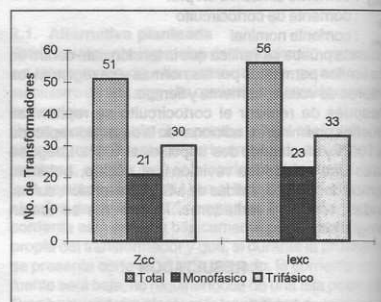


Figura 3. Transformadores dentro de los límites de variaciones de Z_{cc} y I_{exc} permitidos por norma

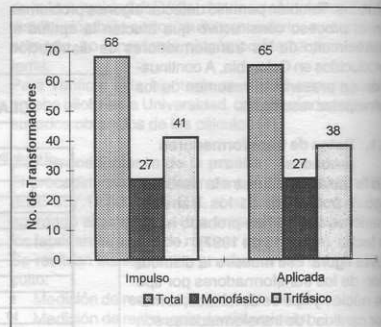


Figura 4. Transformadores que soportaron impulso y tensión aplicada

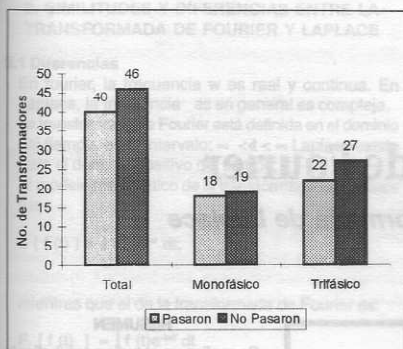


Figura 5. Resultado final de las pruebas

- Distribución de amperios vuelta
- Formas constructivas de los núcleos y devanados
- Amazonas prensadores
- Bidas
- Materiales aislantes, etc.

Es indispensable que los fabricantes incluyan en sus diseños, los cálculos de esfuerzos por cortocircuito, que permitan garantizar durante las pruebas y operación del transformador, una respuesta adecuada a esta condición de falla.

Los resultados de esta investigación serán muy útiles en proyectos futuros relacionados con:

- El incremento de la potencia de CC del Laboratorio de la Universidad del Valle
- El diseño y construcción de nuevos campos de prueba
- El modelamiento y cálculo de campos magnéticos de dispersión
- El modelamiento y cálculo de esfuerzos por CC en transformadores de mayor potencia

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] APONTE, G., CADAVID, H., CASTRO, F., RIVAS, E., GONZÁLEZ, G., «Implementación de la prueba de Cortocircuito en Transformadores de Distribución». Primer Congreso Latinoamericano de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica. Viña del Mar, Chile, Octubre 25 - 29 de 1993.
- [2.] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, INC. Test code for liquid - immersed distribution, power, and regulating transformer and guide for short - circuit testing of distribution and power transformer. New York, ANSI, 1993. (ANSI/IEEE C57.12.90-1993).
- [3.] Aptitud de soportar el cortocircuito. Norma Técnica

Colombiana, 1988. (NTC 532).

- [4.] APONTE, G., CADAVID, H., CASTRO, F., LOZANO, C., «Resultados de la ejecución de la prueba de cortocircuito franco sobre transformadores de distribución». Revista Energía y Computación, Vol. 3, No.2, pag. 49-53, 1994

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración brindada por los fabricantes de transformadores, COLCIENCIAS, CIDET y empresas del sector eléctrico.

AUTORES

Guillermo Aponte M.,
Ingeniero Electricista, Universidad del Valle 1978. Magíster en Ingeniería Eléctrica del Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad de Manchester - UMIST - Inglaterra 1985. Ingeniero de subestaciones de la C.V.C. Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle desde 1981.



ce: alta@maxwell.univalle.edu.co



Héctor Cadavid R.,
Ingeniero Electromecánico; Ph.D. en Ingeniería Eléctrica del Instituto Superior Energético de Moscú, 1996. Ingeniero de mantenimiento de varias empresas. Profesor de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, desde 1987.



Ferley Castro A.,
Ingeniero Electricista, Universidad del Valle 1992. Magíster Sistemas de Generación de Energía Eléctrica, 1995. Ingeniero asistente del Laboratorio Alta Tensión de la Universidad del Valle, desde 1992.



Carlos A. Lozano M.,
Ingeniero Electricista, Universidad del Valle 1992. Magíster Sistemas de Generación de Energía Eléctrica, 1995, Profesor Asistente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle.

ce: alta@maxwell.univalle.edu.co