

Comportamiento Dinámico del Sistema de Contención de Fuerzas de Corto Circuito para Transformadores de Potencia

* David A. Guerra Zubiaga, Rodrigo Salmón F., José E. Contreras de León, Sergio Soriano, *Prolec GE, Apodaca, Nuevo León, México.*
Alberto Díaz Díaz, Rubén Castañeda Balderas, *CIMAV, Chihuahua, México.*

Resumen--La confiabilidad es un parámetro clave para mejorar la competitividad de los transformadores de potencia. Actualmente algunos problemas en el cálculo de diseño del sistema de contención de dichos transformadores impactan directamente la confiabilidad de su comportamiento en campo. Tal es el caso del cálculo de diseño contra fallas por corto circuito, ya que de cada cinco, una se debe a este fenómeno. Por esto es importante desarrollar nuevas herramientas de diseño que permitan determinar los esfuerzos dinámicos en los sistemas de contención. El objetivo de este trabajo es comprender los efectos dinámicos del corto-circuito sobre los esfuerzos en el sistema de contención mediante una herramienta de diseño desarrollada y publicada en un trabajo previo.

Palabras Clave--Corto circuito, sistema de contención, herraje, herramienta de diseño, esfuerzo dinámico.

I. INTRODUCCIÓN

Durante una falla de corto circuito, el sistema de contención de un transformador de potencia experimenta un cambio en su nivel de esfuerzos. El presente estudio está enfocado en el análisis de dichos esfuerzos en los herrajes horizontales y los tirantes verticales que contienen a las bobinas de un transformador. Un estudio previo fue reportado en [1] teniendo como resultado el desarrollo de un software llamado CODI++ (Comportamiento Dinámico del sistema de contención). Los resultados obtenidos presentan un avance respecto al estado del arte actual basado en análisis casiestáticos (que no toman en cuenta la velocidad de las deformaciones). CODI++ emplea métodos numéricos y algoritmos adaptados al fenómeno de manera simplificada para una solución a la ecuación de cada modelo con rápida convergencia. Además da resultados indicativos de las partes críticas con mayor esfuerzo y permite el análisis de vibraciones mecánicas y eventuales resonancias. CODI++ fue programado en lenguaje computacional C++ Builder y presenta una interfaz gráfica amigable, con herramientas de ingreso fácil de datos (ventanas) como son la geometría total, propiedades de los materiales y características del transformador. La visualización de resultados es bastante versátil y útil y permite hacer animaciones de las

deformaciones del sistema de contención. En la literatura, pocos trabajos se han publicado referentes al desarrollo de software para el análisis de corto-circuitos en transformadores de potencia. En [2,3], Tsili *et al* desarrollaron un software para el análisis de densidad de corriente y campo magnético en transformadores de potencia durante un corto-circuito. Este software no va más allá del cálculo de densidad de fuerzas electromagnéticas ejercidas sobre cada conductor y no se plantea el problema dinámico del cálculo de esfuerzos en el sistema de contención. En [4], Liang *et al* proponen un modelo y un método numérico similar al de CODI++ para calcular las vibraciones en un devanado pero nuevamente no se estudian los esfuerzos en el sistema de contención. El único trabajo encontrado que propone una resolución del problema dinámico en el sistema de contención es el realizado por Patel [5] en el cual modela los herrajes por vigas (al igual que CODI) y calcula los esfuerzos sin tomar en cuenta la interacción entre los herrajes y los tirantes.

El presente documento está estructurado de la siguiente manera: en la siguiente Sección II se hace un breve resumen de los modelos matemáticos y el desarrollo de la herramienta CODI++ utilizados para tomar en cuenta el efecto dinámico sobre los esfuerzos en el sistema de contención (una descripción más detallada se encuentra en [1]). En la Sección III se presentan ejemplos del uso de esta herramienta CODI++ en herrajes que pueden ser modelados como vigas. La Sección IV incluye Conclusiones y Recomendaciones para trabajo a futuro.

II. DESARROLLO MATEMÁTICO Y DE CODI++

Esta sección habla de los fundamentos de la herramienta de diseño a describir.

A. Desarrollo del Modelo Matemático

El software consta de dos módulos. El primer módulo calcula las fuerzas que ejercen los devanados sobre los herrajes al ser excitados por las fuerzas electromagnéticas ocasionadas por el corto circuito. Estas fuerzas electromagnéticas son las fuerzas balanceadas (fuerzas compresivas) y las fuerzas no balanceadas (debidas a la excentricidad de los centros electromagnéticos de los devanados de baja y de alta). El software supone por el

* D. Guerra Zubiaga trabaja para la Dirección de Tecnología de Prolec GE (e-mail: david.guerra@ge.com).

momento que el usuario conoce la magnitud de las fuerzas de excitación en cada conductor. En un futuro se contempla realizar un cálculo electromagnético por medio de elementos finitos como lo realizan Tsili *et al* en [2,3] para determinar el campo electromagnético y la densidad de corriente en cada sección. El segundo módulo calcula el comportamiento del sistema de contención sometido a estas fuerzas ejercidas por los devanados. Las ecuaciones en este módulo son descritas un poco más en detalle en esta sección.

La ecuación de equilibrio dinámico para un herraje en flexión modelado por una viga es [6]:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4}(x,t) - f(x,t) + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}(x,t) = 0 \quad (1)$$

Donde:

E = módulo de Young

m = densidad lineal de masa

I = momento de inercia

t = tiempo

f = densidad lineal de fuerzas externas

v = desplazamiento vertical

El suponer un comportamiento elástico del material permite replazar el momento de flexión M por

$$M = EI \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

En este caso, la ecuación de equilibrio local se reescribe

$$\frac{d^2 M}{dx^2}(x,t) - f(x,t) = 0 \quad (3)$$

En el caso estático, si se impone la densidad lineal de fuerzas f , entonces el momento debe de equilibrar esta fuerza para que se cumpla el equilibrio local. De esta manera, en el caso estático, las fuerzas exteriores aplicadas generan exclusivamente deformaciones (y esfuerzos internos que están ligados a estas deformaciones por el comportamiento del material). Si el material no es capaz de desarrollar el nivel de esfuerzos que equilibre las acciones exteriores entonces puede haber ruptura. En cambio, en el caso dinámico, la densidad de fuerzas genera no solo deformaciones sino también aceleraciones. De esta manera, si el material en el caso estático no es capaz de soportar un nivel de esfuerzos que la densidad de fuerzas le exigiría, en el caso dinámico el excedente de densidad de fuerzas generaría aceleraciones y si los esfuerzos llegasen a rebasar la cedencia del material entonces habría plasticidad del material y mayores aceleraciones.

Estas ecuaciones diferenciales en el tiempo se resuelven mediante la técnica de diferencias finitas, donde las fuerzas exteriores son datos del problema en esta resolución y su valor es determinado mediante el estudio del comportamiento de los otros componentes del sistema de contención. Para lograr convergencia se eligen pasos de tiempo menores a la constante de tiempo del transformador.

B. Desarrollo de la herramienta de cálculo CODI++

La herramienta de cálculo de los esfuerzos en el sistema de contención, es un software sustentado en el lenguaje C++ que permite analizar el comportamiento dinámico en un corto circuito, el cual cuenta con una interfaz gráfica amigable, que permite ingresar fácilmente los datos de entrada y visualizar los resultados con comodidad. A partir de los resultados del sistema, es posible calcular los esfuerzos dinámicos promedio utilizando el Teorema del Valor Promedio y sumatorias de Riemann, a partir de las gráficas de fuerzas en función del tiempo de la señal de excitación por fases del transformador.

El algoritmo completo de solución involucra diversos pasos iterativos para calcular los desplazamientos, momentos y esfuerzos en diversos puntos de la viga (eje x) para varios instantes de tiempo, siendo el instante de interés aquél en el cual se alcanza el valor máximo.

Este estudio demuestra que las frecuencias naturales del sistema de contención tienen un gran impacto en el nivel de esfuerzos dinámicos instantáneos, debido a que durante un corto circuito es la bobina quien ejerce una fuerza sobre los herrajes y esta fuerza varía en el tiempo con velocidades significativas, como se demuestra en los resultados de la sección siguiente.

III. EJEMPLOS DE USO DE LA HERRAMIENTA DE DISEÑO

El desempeño del software CODI++ fue comparado con un método analítico de cálculo de esfuerzos estáticos, con modelos de elemento finito obtenidos por el software comercial COMSOL®.

Se tomaron 5 ejemplos de transformadores de potencia para lo cual CODI++ contempla la determinación de fuerzas balanceadas diferenciadas para los devanados de Alta Tensión y Baja Tensión y un desfase de 120 grados entre los 3 paquetes Alta Tensión-Baja Tensión de cada transformador, con los siguientes resultados en cuanto a las fuerzas electromagnéticas compresivas (balanceadas) y axiales por excentricidad (no balanceadas).

La Tabla I resume los datos de entrada de los cinco ejemplos considerados (fuerzas balanceadas y no balanceadas).

TABLA I
RESULTADOS EN CORTO CIRCUITO PARA TRANSFORMADORES DE 2 BOBINAS
COAXIALES SEGÚN SIMULACIÓN CODI++

Orden	Paso de tiempo	Fuerza Balanceada (Kg)		Fuerza No Balanceada
		Alta	Baja	
T1	0.29	34.259	35.089	22.159
T2	0.15	45.037	40.082	36.054
T3	0.21	114.132	103.602	83.162
T4	0.31	101.694	91.634	77.762
T5	0.18	60.807	55.695	46.469

En la Tabla II se presentan el nivel de esfuerzos normales obtenidos por el método analítico tradicional o llamado

estático, este se compara con el método dinámico obtenido a través del software bajo estudio.

TABLA II
CÁLCULO DE ESFUERZOS NORMALES EN HERRAJES USANDO DIFERENTES MÉTODOS

Id.	Método estático @ tiempo cero (MPa)	Método dinámico CODI++ @ tiempo cero (MPa)	Método dinámico @ instante de interés (MPa)	Instante de interés (seg)
T1	31.8	30.3	164	0.08330
T2	37.4	37	258	0.039271
T3	28.3	25	254	0.05238
T4	18.5	15.8	166	0.019956
T5	31.4	31.4	222	0.039048

Es importante hacer notar que el Método dinámico (CODI++) es capaz de obtener un valor máximo de esfuerzo que sufre el sistema de contención durante una falla de corto circuito. Este nivel de esfuerzos máximo es un número mayor al obtenido por el Método estático. Esto se debe a que los fenómenos dinámicos son considerables ya que las frecuencias de excitación son cercanas a las frecuencias naturales de los transformadores, tal y como se verá más adelante.

Además, es posible realizar un análisis similar en cada punto relevante del sistema de contención, tales como los tirantes, los herrajes inferior y superior, con el fin de conocer cuál de todas las zonas será la más crítica debido a un esfuerzo más elevado.

Por otra parte, se realizó un análisis frecuencial para las 5 órdenes de transformadores del estudio, primero calculando las frecuencias propias de cada sistema de contención y después se analizó el contenido de frecuencias de la señal de fuerzas ejercidas por los devanados sobre el herraje superior, para luego comparar dichas frecuencias propias con las frecuencias contenidas en la señal de excitación, con lo que se puede determinar cualitativamente qué tan significativos son los efectos dinámicos de cada transformador. Los valores de las 4 primeras frecuencias naturales de los transformadores analizados se presentan en la siguiente Tabla III, donde los aspectos de la geometría deformada correspondientes a cada modo de vibración son similares para todos los transformadores:

TABLA III
RESULTADOS DE PRUEBAS. FRECUENCIAS PROPIAS EN HERTZ DE LOS CINCO TRANSFORMADORES ESTUDIADOS.

Frecuencia	Transformador				
	T1	T2	T3	T4	T5
1	167	160	136	93	173
2	280	270	287	147	318
3	542	521	588	277	624
4	927	887	974	473	1048

Contando con estos valores de las frecuencias propias se realizó un análisis frecuencial de la señal de excitación (Fig.1) a partir de las gráficas de la fuerza ejercida por los devanados sobre el herraje superior en función del tiempo, observando

que los picos de intensidad mayores a 0.005 corresponden a componentes importantes de frecuencia, por lo que se aplicó una transformada rápida de Fourier a la señal de excitación y a los valores obtenidos (números complejos) se les calculó el módulo al cuadrado, llamado la potencia del espectro de frecuencia; para comparar los resultados anteriores entre transformadores, se normalizaron dichas potencias tomando como base la potencia de la componente a cero Hertz (valor promedio de la señal de fuerzas), mostrándose en las siguientes figuras las gráficas de potencias normalizadas de los espectros de frecuencia para cada transformador (Fig. 2).

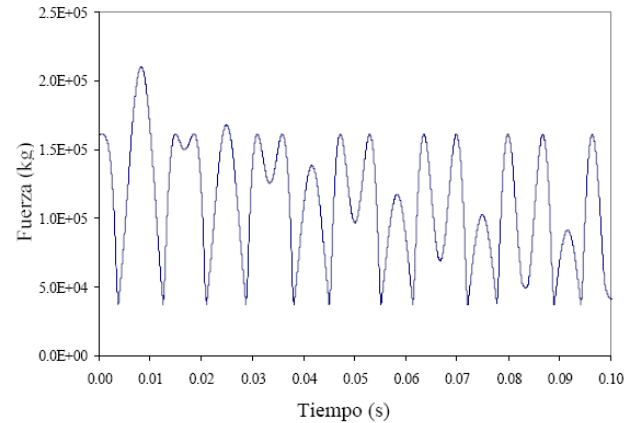


Fig. 1. Resultados de pruebas. Fuerzas contra tiempo (de una sola fase) de la señal de excitación del transformador T1.

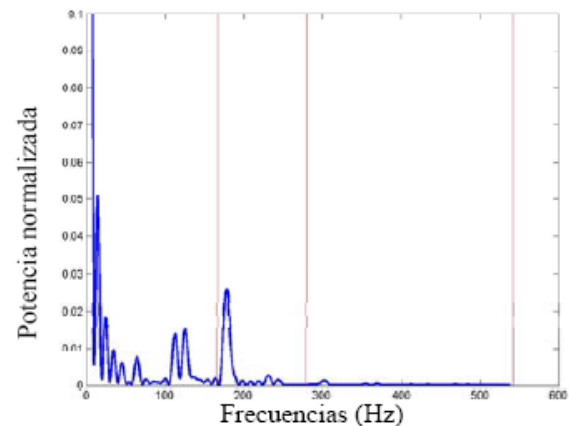


Fig. 2. Resultados de pruebas. Potencias normalizadas del espectro de la señal del transformador T1.

Aquí las líneas verticales corresponden a las tres primeras frecuencias naturales del sistema deducidas anteriormente (Tabla III), donde se puede apreciar que algunas de las frecuencias naturales están cerca de una componente importante de frecuencia (pico de frecuencia), lo que implica que para los casos estudiados los resultados del cálculo de esfuerzos dinámicos serán diferentes a los de un análisis casiestático. Es importante remarcar que la fuerza tiene dos componentes unidireccionales (una constante y la otra decreciente exponencialmente con el tiempo) y dos componentes alternas (una frecuencia fundamental decreciente en tiempo y otra de frecuencia doble pero con mayor amplitud

constante), por lo que existe la posibilidad de resonancia para el sistema mecánico al cual son aplicadas estas fuerzas.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha demostrado a través de algunos ejemplos de transformadores que la consideración de los efectos dinámicos es indispensable para predecir con precisión la resistencia del sistema de contención puesto que los efectos de resonancia pueden ser considerables. El cálculo dinámico mediante CODI++, representa un avance muy importante especialmente en cuanto a:

- El cálculo de fuerzas ejercidas durante un corto circuito por los devanados sobre los herrajes (se desconocían antes del proyecto), dejándonos a un paso de predecir con precisión los esfuerzos que en realidad se desarrollan en cualquier punto de la configuración del sistema de contención (geometría total).
- Mejor conocimiento del comportamiento dinámico de los sistemas de contención, en cuanto a los modos naturales de vibración del sistema de contención, que son excitados por la señal de fuerza ejercida por los devanados sobre los herrajes, abriendo un amplio campo de estudio sobre dichos modos tanto respecto de las frecuencias de la señal de fuerzas como de los puntos de aplicación de carga (posición de opresores).

Específicamente el estudio permitió ver que las frecuencias de la señal de excitación juegan un papel muy importante en cuanto al comportamiento del sistema de contención; esto es, en qué momento aparecen las frecuencias, en qué tirante se esta ejerciendo, y qué armónicos se excitan de acuerdo a la propagación (vibración) y la reflexión (interferencia) de ondas.

Para un trabajo futuro, será importante considerar modelos de cascarones en lugar de modelos de viga para evaluar con mayor precisión los esfuerzos en el sistema de contención. Esto sería otro gran progreso para la optimización del diseño de sistemas de contención confiables.

V. REFERENCIAS

- [1] H. Parra Guerrero, J. E. Contreras de León, A. Díaz Díaz y R. Castañeda Balderas, "Software de Cálculo de Esfuerzos en Sistemas de Contención de Transformadores de Potencia," en *Proc. 2007 IEEE Reunión de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial*, pp. 4-10.
- [2] M. Tsili, A. Kladas, P. Georgilakis. "Computer aided analysis and design of power transformers". *Computers in Industry*, vol. 59, pp. 338-350, April 2008
- [3] M. Tsili, A. Kladas, P. Georgilakis, A. Souflaris, D. Paparigas. "Numerical techniques for design and modeling of distribution transformers". *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 161, pp. 320-326, April 2005.
- [4] Zhenguang Liang; Jishun Li; Renyuan Tang.. "Axial vibrations of transformer windings under short-circuit conditions", en *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2003. ICEMS 2003. pp. 332 – 335, November 2003.
- [5] M.R. Patel, *Dynamic response of power transformer windings and clamps under axial short circuit forces*. Tesis de doctorado, Facultad de "Rensselaer Polytechnique Institute", 1973.
- [6] C.F. Beards. "Structural vibration: Analysis and damping". New York-Toronto, Elsevier, 1996.

VI. BIOGRAFÍAS

David A. Guerra Zubiaga nació en Tampico, Tamaulipas, el 5 de Abril de 1966. Se graduó de Ingeniero Mecánico en el Instituto Tecnológico de Cd. Madero en 1989. Tiene dos grados de maestría del ITESM Campus Monterrey, Maestría en Ingeniería Mecánica en 1992, Maestría en Sistemas de Manufactura en 1996. En 2004 concluyó el Doctorado en Ingeniería de Manufactura en Loughborough University, Inglaterra. Tiene 8 años de experiencia como investigador-catedrático en el ITESM siendo autor de 16 capítulos de libro y 40 artículos internacionales. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Laborando en áreas de desarrollo de tecnología, cuenta con 10 años de experiencia industrial en empresas internacionalmente reconocidas: CEMEX S.A., VITRO S.A. y Prolec GE, donde actualmente se desempeña como Líder de Tecnología Mecánica.

Alberto Díaz Díaz nació en México D.F, el 26 de Febrero de 1973. Se graduó de ingeniero civil en la Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de París, Francia. Realizó la maestría y el doctorado en la misma escuela en el área de resistencia mecánica de materiales compuestos. Recibió el premio Daniel Valentin 2002 otorgado por la Association pour les Matériaux Composites (Asociación francesa de materiales compuestos). Desde Agosto de 2002, es investigador en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. donde realiza investigaciones acerca de mecánica de materiales y estructuras, integridad mecánica y materiales compuestos.

Rubén Castañeda Balderas, nació en Gómez Palacio Durango, el 14 de mayo de 1981. Se graduó de ingeniero en sistemas computacionales en el Instituto Tecnológico de Chihuahua II en el 2004. Actualmente es técnico en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. donde apoya a los investigadores en el desarrollo de softwares, cálculos por elemento finito y dispositivos electro-mecánicos para la caracterización de materiales.