



ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCION DE LA TEMPERATURA DEL NUCLEO DE LOS TRANSFORMADORES DE EXCITACION POSITIVA DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA ITAIPU BINACIONAL

**Armando L. Ortiz Torres¹, Nilton S. Ramos Quoirin¹, Waldimir B. Machado¹,
Juan Carlos Henning Schulz¹**

¹SMIE.DT - Div. de Ingeniería de Mantenimiento Eléctrico, ITAIPU BINACIONAL
Hernandarias - Paraguay

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio y análisis de medidas para la solución del problema de elevación de temperatura del núcleo de los Transformadores de Excitación Positiva (TEP) de la Itaipu Binacional. Estos transformadores tipo seco alimentan al sistema de excitación de las unidades generadoras y su refrigeración es realizada por ventilación natural, cuyo flujo de aire proviene de las centrales evaporativas de la central. Fueron registrados altos valores de temperaturas en el núcleo de los transformadores de algunas unidades generadoras. Tres soluciones fueron estudiadas como medidas para reducir la temperatura del núcleo de los TEP's: (a) la instalación de ventiladores externos durante el mantenimiento de la central evaporativa en días muy calurosos; (b) el cambio de tap del conmutador para un valor de tensión mayor en el devanado primario de los transformadores; y (c) la instalación de ventilación forzada en el interior de los transformadores. Posterior al análisis de cada alternativa, se optó por la implementación de la alteración del tap del conmutador del devanado primario. El cambio de tap para un valor mayor de tensión tiende a reducir tanto las pérdidas en el cobre cuanto las pérdidas en el hierro, contribuyendo de esta manera para la disminución de la temperatura en el interior del transformador. Para validar la propuesta de cambio del tap y analizar las grandezas eléctricas relacionadas, fue modelado el sistema de excitación de las unidades generadoras en el programa de transitorios electromagnéticos ATPDraw©. Los resultados obtenidos en las simulaciones fueron considerados satisfactorios, mostrando que la alteración del tap del conmutador primario de los TEP's no altera la operación normal del sistema de excitación y la reducción de tensión en el secundario de los TEP's contribuye para la disminución de pérdidas y consecuentemente la elevación de temperatura en estos transformadores. Además de las simulaciones, mediciones de temperatura en los equipos comprobaron disminuciones de la elevación de temperatura tanto en el devanado cuanto en el núcleo. La implementación de esta solución posibilitará la operación de los transformadores en mejores condiciones térmicas, contribuyendo de esta manera para el aumento de la expectativa de vida útil de los mismos.

PALABRAS CLAVES

Elevación de Temperatura, Transformadores de Potencia tipo Seco, Sistema de Excitación de Unidades Generadoras.

1 INTRODUCCIÓN

La vida útil de un transformador de potencia está dictada esencialmente por la degradación de la aislación de sus devanados. Por su vez, la degradación de la aislación está directamente relacionada con la temperatura de trabajo del núcleo y de los devanados. Con esto, el monitoreo de estas temperaturas se vuelve fundamental para minimizar y controlar la degradación de los materiales aislantes de estos componentes y así prolongar la expectativa de vida útil del equipo.

El sistema de Excitación de las Unidades Generadoras de la Itaipu Binacional posee transformadores monofásicos de excitación positiva (TEP) de 2,5 MVA (sector de 50 Hz) y 3,5 MVA (sector de 60 Hz). Estos transformadores son del tipo seco, con encapsulamiento de resina y clase de aislación F. Los transformadores poseen conmutador de tensión con 5 *taps* de operación, con la peculiaridad de que estos se encuentran en el devanado primario [1]. El tap en que operan actualmente los TEP's de las unidades generadoras es el nominal (*tap* 3 – 10392 V).

En los TEP's, se realiza el monitoreo de las temperaturas del núcleo y del devanado con 2 sensores localizados en puntos diferentes, y 2 niveles de alarma por alta temperatura. Los niveles de alarma adoptados son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1– Alarmas de temperatura en los TEPs de Itaipu

		Alarma 1 (°C)	Alarma 2 (°C)
U01 a U18	Devanado	155	165
	Núcleo	142	150
U09A y U18A	Devanado	150	160
	Núcleo	140	155

Varias alarmas de temperatura alta en el núcleo de los transformadores de excitación fueron señalizadas en los últimos años, principalmente en épocas con temperatura ambiente elevada. En este sentido, fueron sugeridas y implementadas modificaciones en el sistema de ventilación de los equipos (apertura de ventanas y direccionadores de aire en los cubículos de los transformadores). Fue constatada una reducción considerable de la temperatura del núcleo de los transformadores. Entretanto, cuando era necesario desconectar las centrales evaporativas para realizar actividades de mantenimiento en las mismas, fueron nuevamente observados altos valores de temperatura en el núcleo de los transformadores de algunas unidades generadoras, llegando a valores próximos a niveles de alarma. En este sentido, hubo la necesidad de estudiar y proponer alternativas para la solución del problema de la elevación de temperatura del núcleo de los TEP's y así evitar la ocurrencia de alarmas y desconexiones. De esta manera se espera que los equipos operen con temperaturas menores y así aumentar la expectativa de vida útil de los mismos.

1.1 Clases de aislamiento y normas

Los fabricantes especifican sus transformadores de acuerdo con clases de aislamiento. Cada clase es definida por un límite de temperatura y por una máxima elevación de la temperatura media del devanado (con relación a la temperatura ambiente). El respeto a los límites de temperatura de la clase de aislamiento de un transformador garantiza el buen desempeño y el aumento de la expectativa de la vida útil del equipo. De acuerdo con los datos de placa, los transformadores de excitación positiva pertenecen a la clase de aislamiento F de la norma IEC726 [2]. Algunos conceptos son importantes definir para un mejor entendimiento del problema de elevación de temperatura en transformadores. Según [3]:

Temperatura del punto más caliente del devanado (*maximum (hottest-spot) winding temperature*): es la temperatura máxima o punto más caliente del material del devanado del transformador en contacto con el medio aislante. El punto más caliente (*hottest spot*) es un fenómeno que ocurre naturalmente debido a la generación de pérdidas y al fenómeno de transferencia de calor. Es la temperatura más alta dentro del devanado del transformador y es mayor que la temperatura media medida en los conductores del devanado. Todos los transformadores tienen una temperatura de punto más caliente (*hottest-spot temperature*).

En esta definición no es considerada la elevación de temperatura del punto mas caliente debido a defectos de fabricación del devanado.

Elevación máxima de la temperatura del devanado (*maximum winding temperature rise*): es la diferencia aritmética entre la máxima temperatura del devanado (*hottest-spot temperature*) y la temperatura ambiente.

La norma IEC 726 [2] presenta recomendaciones para transformadores tipo seco con tensiones hasta 36kV. De acuerdo con esta norma, la elevación de temperatura en los devanados no debe sobrepasar los 100°C y la máxima temperatura del aislamiento no debe ser mayor a 155 °C, para transformadores de la clase F.

Es importante destacar que no están contemplados en las normas consultadas los valores máximos de elevación de temperatura para el núcleo de transformadores, entretanto, las temperaturas máximas de operación no pueden sobrepasar los valores estipulados para los devanados, considerando que el aislamiento del núcleo y de los devanados pueden sufrir daños con temperaturas superiores.

1.2 Pérdidas en transformadores

Las pérdidas en transformadores son constituidas por 2 componentes: pérdidas en vacío (pérdidas en el núcleo) y pérdidas en carga (pérdidas en los devanados) Las pérdidas en vacío son independientes de la carga y se subdividen en pérdidas por histéresis ($Ph = K_h B^x fV$) y pérdidas por corrientes de Foucault ($Pe = K_1 t^2 B^2 f^2 V$). Las pérdidas en carga se dividen en pérdidas por efecto Joule en los devanados (RI^2) y pérdidas adicionales (*stray load loss*) [4].

Para que el transformador opere en condiciones optimas y sea mejor aprovechado, es esencial que las pérdidas producidas en los devanados y el núcleo sean efectivamente removidas. Los transformadores de excitación positiva (TEP) de las unidades generadoras de la Itaipu son ventilados a partir del aire proveniente de las centrales evaporativas de la central (una central evaporativa por unidad generadora).

2 PROPUESTAS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

2.1 Modificación de la instrucción de mantenimiento de la central evaporativa

La primera alternativa estudiada para la solución de la ocurrencia de alarmas por altas temperaturas en los transformadores de excitación positiva fue la modificación de la instrucción de mantenimiento de las centrales evaporativas. Fue propuesta la instalación provisoria de ventiladores en locales próximos a las aberturas de entrada de aire de los transformadores, siempre que fuere necesario desconectar la central evaporativa para mantenimiento y cuando la

temperatura ambiente fuere superior a 28 °C. De esta manera, se minimizaría una posible parada de máquina por elevación de la temperatura en el núcleo de los TEP's en días calurosos.

Como ventajas, esta propuesta presenta un bajo costo e instalación simple de ventiladores, entretanto, esta medida es una solución provisoria y trae una mayor complejidad operativa en los mantenimientos de las unidades.

2.2 Instalación de Ventilación Forzada

Una medida alternativa para solucionar el problema de sobrecalentamiento en el núcleo y en los devanados de los TEP's es la instalación de un sistema de ventilación forzada. La ventilación forzada de los transformadores tiene 2 grandes ventajas:

- Enfriamiento más eficiente del transformador

Ventiladores instalados dentro de los cubículos de los transformadores permiten una mayor circulación de aire, mejorando la disipación del calor resultante de las pérdidas en los equipos.

- Independencia del funcionamiento de la central evaporativa

La presencia de ventiladores dedicados a los transformadores elimina la ocurrencia de alarmas por temperaturas elevadas cuando sea necesario realizar trabajos de mantenimiento en la central evaporativa. De esta manera, se reduce la posibilidad de eventuales paradas de unidades por sobretemperaturas en los componentes de los TEPs.

Esta propuesta deja a los TEP's totalmente independientes del funcionamiento de la central evaporativa para su enfriamiento. Por otro lado, es la que demanda más recursos financieros para su implementación, además de requerir modificaciones en el circuito para el control de los ventiladores internos.

2.3 Cambio de tap en el conmutador del devanado primario de los transformadores

En esta alternativa, sugiérese alterar la posición del conmutador de tensión del devanado primario de los transformadores de la posición 3 (10392 V) para la posición 1, de mayor tensión (10912 V).

Las pérdidas en el núcleo varían con el cuadrado de la densidad de flujo, que por su vez es proporcional a la tensión en el devanado. Así, es posible reducir las pérdidas en el núcleo disminuyendo la tensión inducida. Al cambiar el tap de la posición 3 a la posición 1, se altera la relación de transformación N_1/N_2 del TEP sin variar la tensión de alimentación del transformador (tensión de salida del generador). Esto puede ser visualizado a través de la relación de transformación:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad (5)$$

Mientras que en el tap 1 la relación de transformación $N_2/N_1 = 0,169$, en el tap 3 la relación de transformación $N_2/N_1 = 0,178$. Esto implica que para la misma tensión de alimentación V_1 (tensión de salida del generador) la tensión secundaria V_2 es menor si el primario se encuentra conmutado en el tap 1. La pequeña reducción de la tensión de salida es resultante de la reducción de la densidad de flujo con consecuente disminución de las pérdidas en el núcleo. Reduciendo las pérdidas en núcleo ocurre una disminución de la temperatura en el mismo. La

reducción de tensión en el secundario tendería a aumentar la corriente en el secundario del transformador, pero como el TEP funciona como una fuente de corriente para el sistema de excitación y la carga es en este caso el devanado de campo, que tiene una impedancia constante, esta corriente de excitación es controlada por el ángulo de disparo de los tiristores y se mantiene en el valor de referencia indicado por el sistema de control del sistema de excitación.

2.3.1 Modelado y simulación del sistema de excitación

Para verificar el análisis teórico de esta propuesta, fue modelado el sistema de excitación de las unidades generadoras (60 Hz) y fue efectuada una simulación usando el programa de transitorios electromagnéticos ATPDraw. El sistema modelado contempla a los transformadores de excitación positiva, el rectificador tiristorizado, la impedancia rotórica del generador y la fuente de tensión de salida del generador. La Figura 1 ilustra el circuito modelado en el programa ATPDraw.

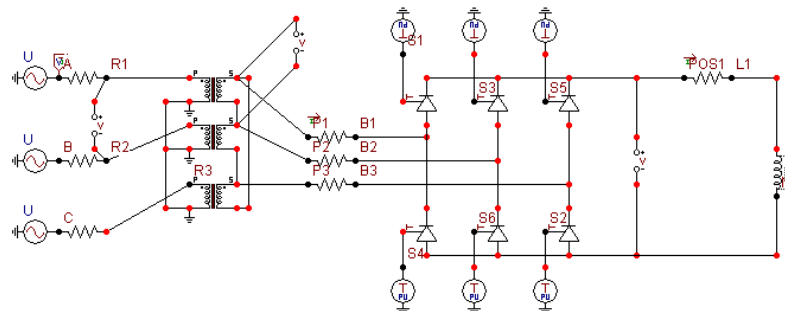


Figura 1– Sistema de excitación de las unidades generadoras (60 Hz)

Primeramente se procedió al cálculo de los parámetros necesarios para modelar los diferentes componentes del sistema (transformadores, fuentes, carga, sincronización de los pulsos de disparo de los tiristores) [4] [5] [6]. En las primeras simulaciones realizadas, los transformadores fueron modelados con el tap en la posición 3 (nominal, 10392 V), con una corriente de excitación de referencia de 3238 A en la carga. Posteriormente el tap fue cambiado a la posición 1 (10912 V) y se varió el ángulo de disparo de los tiristores aproximadamente en 0,5° para restablecer la corriente de excitación al valor de referencia original.

La Figura 2 muestra una comparación de las tensiones en el secundario del TEP con el tap en las posiciones 1 y 3.

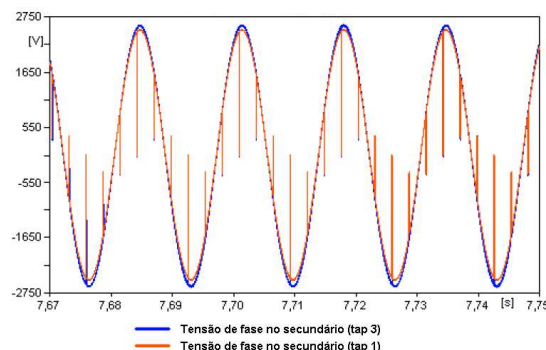


Figura 2– Comparación de las tensiones secundarias con el tap en las posiciones 1 y 3

Para analizar las formas de onda de la tensión en el secundario, fue realizada la descomposición de las tensiones en sus componentes armónicas. Las figuras a seguir ilustran el análisis.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

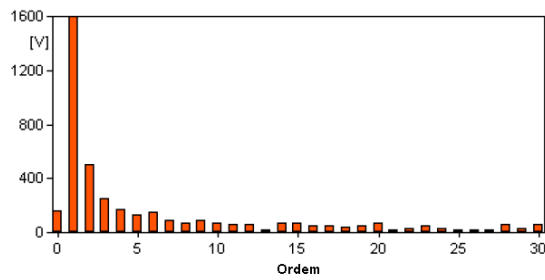


Figura 3– Componentes armónicas de la tensión secundaria - tap en la pos. 3 (10392 V)

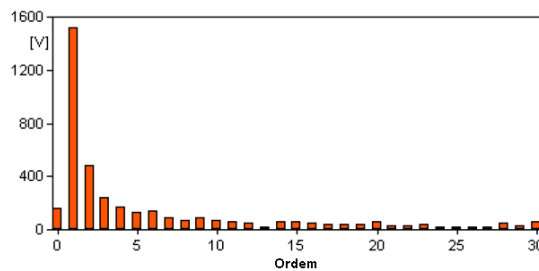


Figura 4 – Componentes armónicas de la tensión secundaria - tap en la pos. 1 (10912 V)

El valor *rms* de la componente fundamental de la onda de tensión secundaria con el tap en la posición 3 es de 1590 V (Figura 3), mientras que la misma componente con el tap en la posición 1 es de 1516 V (Figura 4). Esto corresponde a una reducción de 4,65% de la tensión en el secundario de los transformadores.

Obsérvese en la Figura 5 que las corrientes en el secundario del transformador para ambos *taps* son iguales debido al control de corriente de excitación.

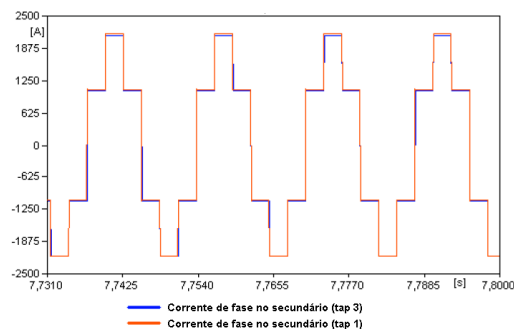


Figura 5– Corriente en el secundario del transformador para los dos *taps*

La Figura 6 ilustra las corrientes en el primario del TEP con los *taps* en las dos posiciones.

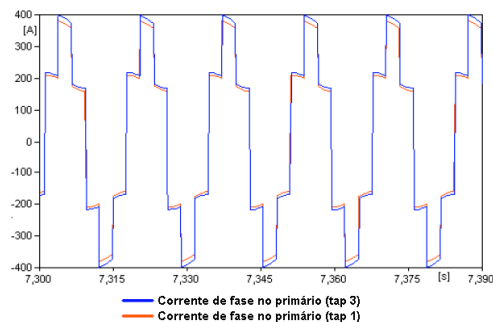


Figura 6– Corriente en el primario del transformador con el tap en las dos posiciones

Así como con la tensión secundaria, fue realizado un análisis de las componentes armónicas de la corriente en el primario del transformador. La Figura 7 y la Figura 8 muestran las componentes armónicas de la corriente en el primario con el tap en las posiciones 3 y 1, respectivamente.

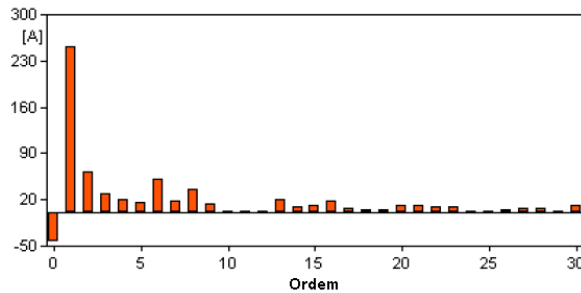


Figura 7– Componentes armónicas de la corriente en el primario con el tap en la pos. 3

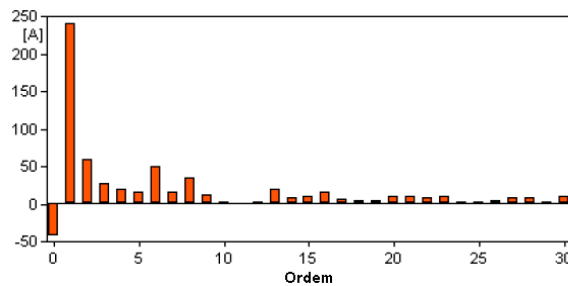


Figura 8- Componentes armónicas de la corriente en el primario con el tap en la pos. 1

Como muestran las figuras arriba ilustradas, el valor *rms* de la componente fundamental de la onda de corriente en el primario con el tap en la posición 3 es de 251,3 A, mientras que la misma corriente para el tap en la posición 1 es de 239,6 A. Esto equivale a una reducción de 4,65% de la corriente.

2.3.2 Mediciones de la elevación de temperatura

El cambio de tap en el primario de los transformadores de excitación positiva ya fue probado en carácter experimental en tiempos anteriores. En esta ocasión, fueron realizadas mediciones de los valores de temperatura de los TEPs de las tres fases de las unidades U17 y U18 con el cambio de tap de la posición 3 para la posición 1. Fueron realizadas las mediciones con características similares de tensión de salida del generador y carga.

La Tabla 2 muestra los valores calculados para la variación de la elevación de temperatura con el cambio del tap de la posición 1 para la posición 3 en las unidades 17 y 18.

Tabla 2- Δt para el cambio del tap 1 para el tap 3 en el conmutador de los TEPs

Fase	Δt Unidad U17			Δt Unidad U18		
	RTD1 núcleo(°C)	RTD2 núcleo(°C)	RTD devana.(°C)	RTD1 núcleo (°C)	RTD2 núcleo (°C)	RTD devana.(°C)
A	9,4	7,5	2,1	7	No disp.	No disp.
B	10,7	7,8	1,9	6	No disp.	No disp.
C	10,1	9,2	4,4	7	No disp.	No disp.

Como observado, la elevación de temperatura es mayor con el tap en la posición 3 (nominal) que en la posición 1.

Como observado en la Tabla 2, los resultados de las mediciones muestran que efectivamente ocurre una reducción de la temperatura si el transformador es conmutado en el tap 1. Esto valida los resultados obtenidos con las simulaciones, que confirmaron la reducción de tensión en el secundario y de la corriente en el primario del transformador.

Esta solución no elimina la dependencia del funcionamiento de la central evaporativa para el enfriamiento de los transformadores de excitación. Entretanto, con la disminución significativa de la temperatura en el núcleo de los TEPs, se reduce considerablemente la posibilidad de alarma por elevación de temperatura en el núcleo de los equipos. Además, la implementación de la propuesta es simple y tiene un costo reducido si comparado con las demás alternativas.

3 CONCLUSIONES

Fue presentado el problema de elevación de temperatura en el núcleo de los TEPs de las unidades generadoras de 60 Hz de la Itaipu. El mismo fue constatado en días calurosos y cuando la central evaporativa de la unidad afectada se encontraba desconectada para mantenimiento. A pesar de no haber ocurrido ninguna señalización de alarma en los últimos tiempos, los valores de temperatura constatados estaban próximos al primer nivel de alarma (142 °C), motivando la realización de un estudio de alternativas para la reducción de la temperatura.

Fueron presentadas tres posibles alternativas de solución del problema de elevación de temperatura en el núcleo de los TEPs para discusión y análisis de ventajas y desventajas. Entre ellas, la propuesta que recomienda el cambio de *tap* de la posición 3 (10392 V) para la posición 1 (10912 V) es la técnicamente más indicada, teniendo en cuenta los buenos resultados obtenidos con las mediciones y simulaciones realizadas que comprueban efectivamente la reducción de la temperatura en el núcleo de los TEPs en el nuevo punto de operación. Se destaca también que esta alternativa es la más rápida y fácil de implementar y requiere menos recursos económicos.

De esta manera, fue sugerida e implementada la alteración del tap de operación de todos los transformadores de excitación positiva de la Itaipu Binacional como medida para reducir la elevación de temperatura en el núcleo de estos equipos. La alternativa elegida es bastante simple de ser implementada y visa aumentar la expectativa de vida útil y reducir la ocurrencia de alarmas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Trasfor – Alstom. Resumen Data Book - Transformadores de Excitación Positiva U18A, Itaipu Binacional., 2005.
- [2] International Electrotechnical Commission. IEC 726: Dry-type power transformers. 1a ed., Ginebra, 1982.
- [3] IEEE Std C57.134-2000, IEEE Guide for Determination of Hottest-Spot Temperature in Dry-Type Transformers, 2000.
- [4] Kosov, Irving L., Máquinas Eléctricas y Transformadores, 15 ed., São Paulo: ed Globo, 2005.
- [5] Datapool Eletrónica, Electrónica Industrial de Potencia – Teoría, Manual.
- [6] ATPDraw for Windows – Users' Manual, versão 3.5, 2002.