



Aislador tipo bushing de fabricación nacional para transformadores de 15 kV

Ramón González Guevara
José A. Martínez Barbado

Recibido: Septiembre del 2003
Aprobado: Noviembre del 2003

Resumen / Abstract

El objetivo fundamental del trabajo es la fabricación, validación técnica en condiciones de laboratorio y puesta en operación del aislador tipo *bushing* para transformadores de 15 kV fabricado con materia prima nacional. La metodología de trabajo se basa en la selección de los perfiles de aisladores de acuerdo con los criterios establecidos por el cliente, fabricación de probetas de material cerámico y prototipos de aisladores, comprobación de su competencia técnica mediante la realización de ensayos de laboratorio, procesamiento estadístico de los resultados y su evaluación en condiciones de operación. Las consideraciones económicas demuestran que es posible obtener un efecto económico del orden de los 32 000,00 USD, teniendo como soporte de cálculo la producción de transformadores planificada para el próximo año. Se presentan los resultados obtenidos, hasta estos momentos, relativos a los ensayos eléctricos de la primera serie de prototipos y las recomendaciones para la realización de trabajos futuros
Palabras clave: Aislador eléctrico, transformador, cerámica

The fundamental objective of the work is the fabrication, technical validity in the laboratory conditions and putting into operation of the bushing type insulator for 15 kV transformers manufactured with national raw material. The work methodology is supported in the selection of the insulator profiles taking into account the establish criteria by the costumer, fabrication of ceramic material test piece and insulator prototypes, verification of its technical competence by means of carrying out of laboratory tests, statistical processing of the results and its evaluation in operation conditions. The economic considerations demonstrate that is possible obtain an economic effect in the order of 32 000, 00 USD, taking as calculus support the transformers planed production for the next year. The obtained results, so far, are presented, relative to the electrical test of the first series of the prototypes and the recommendations for performing future works.

Key words: Electric insulator, transformer, ceramic

INTRODUCCIÓN

A solicitud de la Unión Eléctrica (UNE), el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) realiza las gestiones pertinentes para la realización de tareas de investigación, de aplicación práctica, vinculadas al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). Entre estos trabajos, se encuentra el proyecto dirigido a la fabricación de la parte aislante del *bushing* para transformadores de 15 kV con materia prima nacional, el mismo se realiza en colaboración con la

Unidad Básica Económica (UBE), Aisladores Corporación Cerámica del Ministerio de la Construcción (MICONS) y la Fábrica de Transformadores Latinos de la UNE.

En la actualidad, este tipo de aislador se compra a la firma Colombiana GAMMA a 12,00 USD por unidad, cotizándose la parte aislante a un precio aproximado de 9,00 USD.

Un estimado de los indicadores de costo para una tonelada de aisladores fabricados con materia prima nacional muestra que el precio total unitario en moneda libremente convertible es del orden de los 5,00 USD, lo que representa un ahorro, con relación a sus homólogos extranjeros de 4,00 USD.

La demanda pronosticada para el próximo año es de 8 000 unidades, por lo que la introducción del aislador representaría para el país un ahorro del orden de los 32 000,00 USD. El número de transformadores a fabricar cada año aumenta lo que significa que este valor tiende a incrementarse a medida que transcurre el tiempo.

Para la Fábrica de Transformadores Latinos, usuario directo del producto, disponer de un aislador tipo *bushings* de buena calidad y menor precio significa una mejora en su indicador de rentabilidad, así como la posibilidad de aumentar su potencial competitivo.

Por otra parte, aunque la introducción en el plano internacional de las tecnologías de fabricación de este tipo de aislador no es nueva; la posibilidad de fabricar un prototipo nacional es un avance importante en el conocimiento científico y representa la culminación exitosa de esfuerzos conjuntos de especialistas del CIPEL y de la UBE Aisladores.

La UBE Aisladores ha fabricado diferentes tipos de aisladores para bajas tensiones que han sustituido importaciones específicas en el país. Ha obtenido *drop-outs* para tensiones de hasta 15 kV y desarrollado prototipos de aisladores de pedestal para líneas eléctricas de 13 kV con fines investigativos. En la actualidad, esta entidad dispone de la infraestructura técnica y los recursos necesarios para garantizar la ejecución de las tareas planificadas en el proyecto.

Las fuentes abastecedoras de la materia prima a emplear son las siguientes: caolines, feldspatos y arcillas del MICONS; arena sílice geomínera del Ministerio de la Industria Básica (MINBAS) y otros materiales de importación son adquiridos en México.

Por otra parte, fabricar este tipo de aislador, significa disponer de un cliente permanente con una demanda anual considerable que mejora sus ingresos, ofertar un nuevo producto que se encuentra directamente vinculado a la solución de problemas concretos del SEN y la perspectiva de poder competir en el área latinoamericana.

ESTRATEGIA

La investigación fue concebida de forma tal que el CIPEL coordina las actividades a ejecutar, realiza el estudio práctico para comprobar la calidad del material

cerámico, selecciona el perfil de los aisladores de conjunto con las otras entidades, analiza los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y propone las correcciones correspondientes.

La UBE Aisladores es la encargada de aportar la materia prima, las instalaciones y el personal especializado para la fabricación de probetas y prototipos y ejecuta las mejoras propuestas con vistas a lograr la calidad requerida de los aisladores.

La Fábrica de Transformadores Latinos, en coordinación con el CIPEL, realiza la comprobación definitiva de los *bushings* mediante su instalación en condiciones de operación. Además, establece la necesidad anual de la producción de aisladores.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología en términos generales consta de cuatro etapas, en la primera se realiza un estudio práctico para verificar la calidad del material cerámico.

En la segunda etapa se fabrican los prototipos utilizando la técnica de extrusado y torneado. En la misma, entre otros trabajos, se realiza el croquis de los perfiles seleccionados, ajustes del torno para el conformado de los aisladores y los procesos de cocción para obtener el producto terminado.

La tercera etapa se caracteriza por la ejecución de un ciclo de ensayos, en condiciones de laboratorio, que permita comprobar las propiedades dieléctricas, mecánicas y térmicas de los prototipos; teniendo en consideración las exigencias establecidas en las normas internacionales e impuestas por el SEN.¹⁻⁵

Se planifican, con vistas a obtener la calidad técnica requerida, la fabricación de dos series de prototipos en esta etapa; introduciendo en la segunda serie las mejoras propuestas del análisis de los resultados obtenidos en el primer ciclo de ensayos.

En la última etapa se ejecuta el montaje de los prototipos en transformadores de 15 kV y se monitorea su comportamiento con el objetivo de evaluar su factibilidad de instalación en condiciones de operación.

RESULTADOS ESPERADOS

Se espera obtener los resultados siguientes:

- Realización de ensayos a probetas de material cerámico (CIPEL).
- Selección de los perfiles de aisladores de acuerdo con los criterios establecidos por el cliente (CIPEL-Fábrica de Transformadores-UBE Aisladores).

- Realización de ciclos de ensayos en condiciones de laboratorio para certificar la competencia técnica de los prototipos (CIPEL).
- Obtención de una base de datos experimentales que permita mediante la aplicación de herramientas estadísticas, el mejoramiento continuo de los diseños y calidad de los aisladores (CIPEL).
- Evaluación de los prototipos en condiciones de operación (Fábricas de Transformadores-CIPEL).

TAREAS EJECUTADAS

Estudio realizado a primeros prototipos de aisladores. Por recomendación del usuario se selecciona al inicio del estudio un perfil para los prototipos cubanos (ver tabla 1), acorde al perfil de los aisladores de fabricantes extranjeros (chinos y colombianos), que han mostrado buen comportamiento en condiciones de operación en los últimos años.

Este primer estudio se basa en la ejecución del ciclo de ensayos eléctricos siguiente:

- Inspección visual.
- Comprobación de dimensiones.
- Medición de la corriente de fuga total a tensión alterna en condiciones secas, de secado artificial y húmedas (inmersión en agua).
- Tensión sostenida de corriente alterna en condiciones secas y húmedas.
- Tensión de descarga superficial total de corriente alterna en condiciones secas y húmedas.
- Tensión soportada de impulso tipo rayo de polaridades positiva y negativa.

Equipamiento utilizado:

- Generador de impulsos tipo Marx de 200 kJ.
- Fuente de alta tensión de corriente alterna de 620 kV.

- Transformador de corriente alterna de 125 kV.
- Miliamperímetro de corriente directa con puente de diodos.
- Sistema de medición integrado por voltímetro universal MUT9 y divisor capacitivo.

Procesamiento estadístico de resultados.
Interpretación

La inspección visual de los prototipos cubanos mostró deficiencias en lo que se refiere a cambios de coloración e irregularidades del esmalte que perjudican su aspecto superficial.

En la comprobación de dimensiones realizadas se detectó que existen dimensiones no conformes con las tolerancias establecidas en las normas internacionales.

Primeramente, se realiza la comparación entre los prototipos cubanos, de forma tal, que sea posible evaluar la existencia o no de heterogeneidades en el comportamiento de los mismos; y en segundo lugar, se comparan los prototipos cubanos con los chinos y colombianos.

El procesamiento estadístico efectuado tiene como punto de partida la verificación de las premisas del análisis de varianza (ANOVA), las cuales se cumplieron en todos los casos, además, se garantizó la homogeneidad de las condiciones ambientales durante la ejecución de los ensayos. El procedimiento consistió en la contrastación de los valores medios de los parámetros definidos para el estudio (corriente de fuga y tensión de descarga) entre los prototipos cubanos, chinos y colombianos. La contrastación se realizó mediante las hipótesis:

H_0 : No hay diferencias estadísticamente significativas de los parámetros definidos entre los prototipos en estudio.

H_1 : Hay diferencias estadísticamente significativas de los parámetros definidos entre los prototipos en estudio.

A - Pruebas eléctricas en condiciones secas.

A1- Medición de la corriente de fuga total a tensión alterna de frecuencia de potencia.

El resultado que muestra la tabla 2 rechaza la hipótesis H_0 , es decir, se detectan diferencias estadísticamente significativas de los valores medios de corriente de fuga entre los prototipos cubanos. El nivel de significación fijado para el error ($\alpha = 0,05$) es superior a la significación (Sig) del estadístico de Fisher (F).

Tabla 1 Principales parámetros geométricos del prototipo inicial	
Parámetros geométricos	(MM)
Distancia de arco	196
Distancia de fuga	350
Número de campanas	5
Diámetro de la campana	92
Diámetro del núcleo	51
Diámetro del apoyo	85
Longitud de la bota	110

	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	SIG
Entre grupos	192,317	3	64,106	44,4	0,0
Dentro de grupos	51,914	36	1,442		
Total	244,231	39			

GL: Grados de libertad

El estadístico de Fisher solo comprueba la existencia de diferencias, pero no discrimina entre qué prototipos se manifiestan como lo hace la prueba de Duncan, cuyos resultados se muestran en la tabla 3. Se aprecia que el prototipo 1 se comporta diferente al resto, los cuales pueden ubicarse en un mismo grupo infiriéndose características homogéneas.

Para hacer la contrastación con los prototipos de fabricantes extranjeros se aplicó el mismo procedimiento estadístico y se extrajo el prototipo (1) del análisis.

Las tablas 4 y 5 muestran la existencia de diferencias entre los prototipos cubanos, chinos y colombianos. Ambos prototipos extranjeros presentan menor corriente de fuga total.

A2- Medición de la corriente de fuga total a tensión alterna de frecuencia de potencia, después de un proceso de secado de 15 horas.

El proceso de secado homogeneizó los valores de corriente de fuga, permitiendo incluso incluir en un mismo grupo al prototipo 1 que había tenido diferencias con el resto. Las tablas 6 y 7 reflejan lo anterior.

La comparación entre los prototipos cubanos, chinos y colombianos mantuvo la tendencia obtenida en las tablas 4 y 5.

A3- Medición de la tensión alterna de descarga superficial. Prueba sostenida.

En este caso la hipótesis H_0 es aceptada, ya que la significación (SIG) del estadístico de Fisher es mayor a ($\alpha=0,05$). Los resultados de las tablas 8 y 9 verifican lo anterior, por tanto, es posible afirmar que el proceso tecnológico de fabricación garantiza la estabilidad de la repetibilidad de las muestras, ya que se obtiene un perfil del prototipo cubano con características homogéneas para grandes lotes de producción; es decir, parámetros como la distancia de arco, dimensiones de las campanas, etc., se mantienen con un 95 % de confiabilidad.

Factor	N	Subgrupos ($\alpha = 0,05$)	
		1	2
4	10	36,35	
3	10	36,82	
2	10	37,01	
1	10		41,76
SIG		0,254	1,00

N: Número de réplicas

Tabla 4 Prueba de Duncan a los prototipos cubanos y chinos			
Factor	N	Subgrupos ($\alpha=0,05$)	
		1	2
4	10	31,23	
3	10		36,35
2	10		36,82
1	10'		37,01
SIG		1,00	0,332

Tabla 5 Prueba de Duncan a los prototipos cubanos y colombianos			
Factor	N	Subgrupos ($\alpha=0,05$)	
		1	2
4	10	33,30	
3	10		36,35
2	10		36,82
1	10'		37,01
SIG		1,00	0,294

Tabla 6 Análisis de varianza de los prototipos cubanos					
	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	SIG
Entre grupos	9,198	3	3,066	1,4	0,26
Dentro de grupos	79,038	36	2,195		
Total	88,236	39			

Tabla 7 Prueba de Duncan a los prototipos cubanos		
Factor	N	Subgrupos ($\alpha=0,05$)
3	10	26,36
4	10	26,98
1	10	27,11
2	10	27,71
SIG		0,106 9

Tabla 8 Análisis de varianza de los prototipos cubanos					
	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	SIG
Entre grupos	20,418	3	6,827	0,48	0,69
Dentro de grupos	513,037	36	14,251		
Total	533,518	39			

Tabla 9 Prueba de Duncan a los prototipos cubanos		
Factor	N	Subgrupos ($\alpha=0,05$)
2	10	50,04
1	10	51,53
4	10	51,58
3	10	51,88
SIG		0,329

En este ensayo se obtienen resultados interesantes, ya que una comparación entre el prototipo cubano y el chino no detectó diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de descarga. (tabla 10). Por lo tanto, debe esperarse un comportamiento positivo del prototipo cubano ante sobretensiones de corriente alterna tal y como ha demostrado en la práctica el prototipo chino.

Por otra parte, se comprueba que todos los prototipos soportan satisfactoriamente el esfuerzo impuesto por el ensayo de tensión alterna sostenida, no ocurriendo descargas ni calentamientos en su superficie.

A4 - Prueba de tensión soportada de impulso con onda 1,2/ 50 μ S, de polaridad positiva y negativa (95 kV).

Las muestras soportan el esfuerzo impuesto por una onda tipo rayo de un valor de 95 kV de polaridad negativa, pero para polaridad positiva en la muestra número tres ocurren descargas superficiales en las aplicaciones 4, 7 y 10. En este ensayo, no se presentan perforaciones del material cerámico.

B - Pruebas eléctricas en condiciones húmedas.
Este ensayo se refiere a la inmersión en agua de los prototipos durante 24 horas. La capacidad de absorber humedad se pone de manifiesto en la magnitud de la corriente de fuga total cuando se aplica la tensión nominal.

B1- Medición de la corriente de fuga total a tensión alterna de frecuencia de potencia.

El análisis comparativo llevado a cabo sobre los prototipos cubanos detectó diferencias entre ellos (tabla 11), pudiéndose establecer dos grupos según la tabla 12.

En la tabla 13 se muestra que la corriente de fuga promedio menor corresponde al prototipo chino, el mismo se encuentra fuera de los dos grupos de prototipos cubanos

B2- Medición de la tensión alterna de descarga superficial. Prueba sostenida.

Los prototipos fueron sometidos nuevamente a ensayos de determinación de descarga superficial, apreciándose la influencia de la humedad sobre los mismos. El ANOVA reflejado en la tabla 14 verifica la existencia de diferencias significativas, mientras que la prueba de duncan (tabla 15), indica la diferencia del comportamiento entre los cuatro prototipos cubanos.

De lo anterior puede inferirse la necesidad de lograr el mejoramiento de las características que determinan el comportamiento del aislamiento ante condiciones de humedad, ya que las respuestas difieren entre los prototipos.

Factor	N	Subgrupos ($\alpha=0,05$)
2	10	50,04
1	10	51,53
4	10	51,58
3	10	51,88
5	10	52,07
SIG		0,292

	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	SIG
Entre grupos	22,945	3	7,648	5,14	0,005
Dentro de grupos	53,546	36	1,487		
Total	76,491	39			

Además, la comparación con los prototipos chinos mostró la diferencia de comportamientos; aunque los valores de ruptura de los prototipos cubanos se encuentran en un entorno cercano al valor de los aisladores chinos (tabla 16).

Se comprueba, al igual que para las condiciones secas, que todos los prototipos soportan satisfactoriamente el esfuerzo impuesto por el ensayo de tensión alterna sostenida, no ocurriendo descargas ni calentamientos en su superficie.

Tabla 12 Prueba de Duncan a los prototipos cubanos			
Factor	N	Subgrupos ($\alpha=0,05$)	
		1	2
2	10	46,47	
4	10	46,70	
3	10		47,99
1	10		48,18
SIG		0,676	0,730

Tabla 13 Prueba de Duncan a los prototipos cubanos y chinos				
Factor	N	SubgruposS ($\alpha=0,05$)		
		1	2	3
5,00	10	42,76		
2,00	10		46.47	
4,00	10		46.70	
3,00	10			47.99
1,00	10			48.18
SIG		1,00	0,678	0,731

Tabla 14 Análisis de varianza de los prototipos cubanos					
	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	SIG
Entre grupos	890,319	3	296,773	188,0	0,0
Dentro de grupos	56,821	36	1,578		
Total	947,140	39			

Tabla 15 Prueba de Duncan a los prototipos cubanos					
Factor	N	Subgrupos ($\alpha=0,05$)			
		1	2	3	4
2,00	10	33,12	33,12		
1,00	10		35,56		
3,00	10			40,55	
4,00	10				45,38
SIG		1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 16 Prueba de Duncan a los prototipos cubanos y chinos						
Factor	N	Subgrupos ($\alpha=0,5$)				
		1	2	3	4	5
2,00	10	33,12				
1,00	10		35,56			
3,00	10			40,55		
5,00	10				42,56	
4,00	10					45,38
SIG		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

CONCLUSIONES

1. Se ha logrado integrar el trabajo de las entidades ejecutoras del proyecto y elaborar la estrategia y metodología para la realización de las investigaciones adecuadas con vistas a obtener los resultados esperados.

2. Los resultados obtenidos en los ensayos realizados a los primeros prototipos nacionales muestran:

- Que es necesario mejorar su aspecto superficial y cumplir con lo establecido en las normas en cuanto al cumplimiento de las tolerancias de sus dimensiones.
- Influencia de la humedad, sobre todo después de su inmersión 24 horas en agua, manifestada por los altos valores y dispersión de las magnitudes

corriente de fuga total y tensión de descarga superficial.

- Comportamiento satisfactorio ante las exigencias del ensayo de tensión sostenida de corriente alterna, tanto en condiciones secas como húmedas.
- No resisten el esfuerzo impuesto por la prueba de tensión soportada de impulso.

3. Se considera que existe potencialidad en la calidad del material cerámico fabricado con componentes nacionales y que las deficiencias detectadas es posible superarlas con la realización de trabajos futuros.

RECOMENDACIONES

1. Realizar mediciones del nivel de absorción de humedad de la pasta cerámica y garantizar una

distribución uniforme de la temperatura en el proceso de cocción.

2. Analizar la posibilidad de incrementar las dimensiones físicas de los prototipos con el objetivo de lograr un aumento en la capacidad de soporte de los esfuerzos con tensiones de impulso.

REFERENCIAS

1. *IEEE C57.1200-1993. Standard General Requirements for Liquid- Inmersed Distribution, Power and Regulating Transformer.*
2. *IEC 137/1995. Insulated Bushings for Alternating Voltage Above 1000 V.*
3. *UNE-EN 60137. Aisladores pasantes para tensiones alternas superiores a 1 kV.*
4. *IEC 233/1974. Tests on Hollow Insulators for Use in Electric Equipment.*
5. *CEI 60-1: 1989, Técnicas de ensayos de alta tensión. Primera parte: Definiciones y prescripciones generales relativas a los ensayos.*

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los ingenieros Andrés Homero y Armando Acosta, directores de las fábricas de Transformadores Latinos y UBE Aisladores respectivamente y a sus especialistas por el apoyo brindado en la fabricación de prototipos, criterios para la selección de perfiles y experiencia de operación.

AUTORES

Ramón González Guevara

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail: ramon@cipel.cujae.edu.cu

José A. Martínez Barbado

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Agregado, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail: jamb@cipel.cujae.edu.cu

REVISTAS CIENTÍFICAS DE LA CUJAE AHORA EN SU NUEVO FORMATO ELECTRÓNICO



• <http://intranet/ediciones/>