

1. Identificación del proyecto:

1.1.Código del proyecto:2659
1.2.Nombre del proyecto: Implementación de un Banco para Pruebas de Envejecimiento Acelerado a Barras del Estator de Máquinas Rotativas
1.3.Nombre del investigador principal: José Luis Oslinger
1.4.Nombre de los coinvestigadores: Luis Carlos Castro
1.5.Fecha de presentación del informe: Septiembre 12 de 2012
Fecha de inicio: Septiembre 12 de 2011
Fecha de terminación: Septiembre 12 de 2012

1. Resumen:

La operación continua y confiable de los sistemas de generación eléctrica de alta tensión depende del desempeño del sistema de aislamiento del estator. Durante la operación de la máquina, el aislamiento de las barras o bobinas del estator está sometido a esfuerzos del tipo eléctrico, térmico, mecánico y ambiental, los cuales se han incrementado a lo largo del tiempo significativamente con el fin de producir máquinas de mayor potencia y menor tamaño. Como consecuencia, entre 50-60% de las fallas ocurridas en máquinas eléctricas están relacionadas con su sistema de aislamiento. Las pruebas de envejecimiento acelerado constituyen una herramienta para la investigación y entendimiento de la evolución de los mecanismos de degradación del aislamiento en una fracción de tiempo.

Este proyecto de investigación diseño, construyó e implementó en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad del Valle un banco para envejecimiento acelerado por esfuerzos termoeléctricos y de ciclado térmico a barras estatóricas. Es importante mencionar que el ciclado térmico se llevará a cabo mediante la inyección de corriente por medio de un grupo motor-generator de 500Adc/30V en régimen continuo con el que se cuenta en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas. El área de las bobinas bajo prueba se redujo conectando los strands en serie lo que permitió obtener densidades de corriente de 6.4 A/mm² y así elevar la temperatura del cobre disipando mucho menos potencia que si se utilizaba el área total de las bobinas. Para aplicar el esfuerzo termoeléctrico se construyeron placas calentadoras que a su vez simulan las ranuras del estator. Por tratarse de pruebas de larga duración, ambos sistemas se automatizaron para no requerir supervisión del personal.

La implementación de este banco de pruebas está enmarcada dentro de una investigación más amplia a nivel de doctorado.

Adicionalmente, la ejecución de este proyecto involucró a cuatro estudiantes de pregrado de Ingeniería Eléctrica a través de la realización de dos trabajos de grado.

La cátedra de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica ahora cuenta con un banco controlado para la aplicación de esfuerzos termoelectrónicos y ciclado térmico a bobinas de generadores hasta 13.8kV. Este mismo banco de pruebas complementará los cursos de Laboratorio de Máquinas Eléctricas y Diagnósticos de Máquinas Eléctricas. Los resultados obtenidos utilizando este banco de pruebas arrojaron como resultado la divulgación de un artículo en la Conferencia Internacional de Máquinas Eléctricas y Electrónica de Potencia, ICEMPE 2012.

The continuous and reliable operation of electric generators depends mostly on the performance of the stator bar insulation system. In service, the stator bar insulation is subjected to electrical, thermal, mechanical and ambient stresses, which were increased significantly with time in order to build smaller electric generators of larger output power. As a result, 50-60% of unscheduled outages of hydrogenerators were associated with their insulation system. Accelerated ageing tests are a tool for the investigation and understanding of the insulation system degradation processes in a portion of time.

This research project designed and built an accelerated ageing test bench at the Electrical Machines Laboratory of the Universidad del Valle, which is able to subject stator bars to thermoelectric stress and to thermal cycling. It is noteworthy that thermal cycling process is achieved by injecting current supplied from a 500Adc/30V electric generator. The cross section area of bars was decreased by connecting strands in series in order to increase the current density up to 6.4 A/mm² and thus, raise the bar temperature with less power consumption than required if the current is driven through the entire area of the bars. Heating plates were built to apply thermoelectrical stress and in turn, to simulate the stator slots. Due to the long time involved in tests, both systems were automated for needing for no personnel supervision.

The implementation of this test bench is one of the objectives of a wider research at doctoral level.

In addition, this project involved four electrical engineering students throughout the achievement of two final works as a partial fulfillment of the requirements for the degree of electrical engineer.

The School of Electrical and Electronic Engineering counts now with a controlled test bench for subjecting stator bars up to 13.8kV to thermoelectrical stresses and to thermal cycling. This test bench will be used in educational courses as Electrical Machines Laboratory and Diagnosis of Electrical Machines. The test results allowed to publish a technical paper in the International Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ICEMPE 2012 held in Madrid-Spain.

2. Informe de resultados tomando como referencia los objetivos propuestos:

- Adecuación del grupo motor-generator DC de 500A para su funcionamiento en régimen continuo.

Al inicio del proyecto, en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas se contaba con un grupo motor-generator de 500Adc/30V completamente fuera de servicio. El jefe del laboratorio, el Profesor Jairo Palacios, reportó que el equipo iba a ser dado de baja aproximadamente 7 años atrás, pero teniendo en cuenta que esta es una máquina especial se evitó que la dieran de baja aun cuando no estaba en funcionamiento. De esta forma con el personal vinculado al proyecto y bajo la asesoría del Profesor Jose Luis Oslinger se recuperó la máquina, dejándola completamente funcional y entregando su potencia nominal.

- Diseño e implementación de un banco de prueba en el cual se sujetarán las barras de prueba, que simulará las ranuras del estator y donde se dispondrán los equipos de potencia y de alta tensión.

El área de pruebas se ubicó dentro del Laboratorio de Máquinas Eléctricas. Esta área se demarcó y limitó para restringir el paso de personal por medio de vallas de seguridad. Los equipos energizados se dispusieron dentro de esta área de pruebas. El espacio utilizado fue concertado con el jefe del laboratorio para uso exclusivo del banco de pruebas. Esto requirió reubicar equipos ya existentes y desalojar espacio utilizado por materiales y equipos fuera de servicio.

Dentro del área de pruebas se construyó un banco para pruebas y un sistema de platinas de aluminio las cuales soportan las resistencias calentadoras y sujetan las bobinas firmemente sobre el banco de pruebas. El sistema está diseñado para interrumpir la energía del banco cuando cualquier persona ingrese al área de pruebas y de esta forma garantizar la seguridad del personal.

- Diseño e implementación de una etapa de control y monitoreo para mantener las variables eléctricas y de temperatura dentro de los límites requeridos para cada prueba de envejecimiento basados en las prácticas recomendadas por las normas IEEE-275, IEEE 1043 e IEEE-1310.

Tanto el sistema de aplicación de esfuerzos termoeléctricos y el sistema de ciclado térmico quedaron provistos de un cofre de control independiente cada uno los cuales permiten las siguientes funciones:

- Mantener constante la temperatura de las platinas calefactoras de acuerdo a un set introducido por el operario mediante software
- Mantener constante la corriente de armadura del grupo motor-generator independiente de los disturbios de la red de potencia, de la variación de la velocidad del

primo motor o de la variación de la resistencia del cobre con el incremento de la temperatura

- Registro de las variables controladas de temperatura
- Implementación de los sistemas de medición y equipos de maniobra para ejecutar las pruebas de envejecimiento.

Los sistemas implementados permiten la medición de las siguientes variables:

- Voltaje en el lado de alta tensión del transformador principal
- Voltaje en el lado de baja del transformador principal
- Voltaje de la red de alimentación
- Corriente de línea consumida por las resistencias calefactoras
- Corriente de armadura del generador DC
- 8 canales de temperatura por RTD

Los sistemas implementados permiten las siguientes maniobras principales:

- Alimentación del transformador principal desde 0 V hasta 220 V por medio de un inductor variable
- Incremento/decremento de la corriente de armadura del generador de DC
- Incremento/decremento de la temperatura de las platinas calefactoras
- Desenergización de los sistemas por falla eléctrica o por ingreso de personal al área de pruebas
- Análisis de la evolución de los defectos internos en el aislamiento debido a la aplicación de ciclos de envejecimiento acelerado mediante los cambios en los parámetros dieléctricos.

La información sobre los productos se debe relacionar considerando el siguiente esquema:

Tipo de producto:	Prototipo Industrial
Nombre General:	Banco de pruebas
Nombre Particular:	Banco para la aplicación de esfuerzos termoeléctricos y ciclado térmico a barras del estator hasta 13.2kV
Ciudad y fechas:	Cali, Diciembre 2012
Participantes:	José Luis Oslinger, Luis Carlos Castro



Sitio de información.:	Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad del Valle
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía - CONVERGIA

Tipo de producto:	Formación de recurso humano: Estudiante de doctorado
Nombre General:	
Nombre Particular:	
Ciudad y fechas:	Cali, Fecha de vinculación: 12-09-2011
Participantes:	Luis Carlos Castro
Sitio de información.:	Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía - CONVERGIA

Tipo de producto:	Proyectos de grado Formación de recurso humano
Nombre General:	Implementación de un banco de pruebas de envejecimiento acelerado de bobinas estáticas de grandes generadores eléctricos
Nombre Particular:	
Ciudad y fechas:	Cali, Proyecto en ejecución. Anteproyecto aprobado 23-04-2012
Participantes:	Cesar Ramos Diego Ulloa (Vinculado al programa de semilleros de investigación)
Sitio de información.:	Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía - CONVERGIA
-----------------------	---

Tipo de producto:	Proyectos de grado Formación de recurso humano
Nombre General:	Gestión técnico-administrativa para la certificación de un banco para pruebas de envejecimiento acelerado de barras del estator de máquinas rotativas
Nombre Particular:	
Ciudad y fechas:	Cali, Proyecto en ejecución. Anteproyecto aprobado 20-04-2012
Participantes:	Angi Pardo – Ángela Ramírez
Sitio de información.:	Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía - CONVERGIA

Tipo de producto:	Ponencia en conferencia internacional
Nombre General:	Conferencia Internacional de Máquinas Eléctricas y Electrónica de Potencia, ICEMPE 2012
Nombre Particular:	Correlation between Capacitance and dissipation Factor Used for Assessment of Stator Insulation
Ciudad y fechas:	Madrid, Marzo 28-29 de 2012
Participantes:	Luis Carlos Castro
Sitio de información.:	Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Power Electronics, issue 63, p. 365-371.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía - CONVERGIA

Tipo de producto:	Propuestas para ser presentadas a convocatorias externas 2012-2013
Nombre General:	Convocatoria 536 para conformar un banco de proyectos elegibles de investigación, desarrollo tecnológico e innovación, en la modalidad de cofinanciación, en el marco del convenio colciencias-codensa-emgesa
Nombre Particular:	Mantenimiento contra condición y estimación de vida útil residual de los principales generadores de codensa-emgesa correlacionando parámetros dieléctricos y pruebas físico-químicas del devanado del estator
Ciudad y fechas:	Cali, Fecha de envío propuesta: 16-09-2011
Participantes:	Prof. Jose Luis Oslinger - Luis Carlos Castro
Sitio de información.:	
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía - CONVERGIA

Tipo de producto:	Propuestas para ser presentadas a convocatorias externas 2012-2013
Nombre General:	Convocatoria 569 – Banco de proyectos elegibles de Ctel
Nombre Particular:	Evaluación de la descomposición fisicoquímica del aislamiento eléctrico de bobinas, de generadores eléctricos de gran potencia, sometidas a envejecimiento
Ciudad y fechas:	Cali, Fecha de envío propuesta: 01-06-2012
Participantes:	Prof. Jose Luis Oslinger – Prof. Hector Zuluaga - Prof. Rubén Antonio Vargas - Luis Carlos Castro
Sitio de información.:	Proyecto registrado en la plataforma SICOP
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía – CONVERGIA Grupo de Investigación en Síntesis y Mecanismos de Reacción en Química Orgánica – SIMERQO Grupo de Investigación en Transiciones de Fase en Sistemas no Metálicos

Tipo de producto:	Propuestas para ser presentadas a convocatorias externas 2012-2013
Nombre General:	convocatoria permanente fundación para la promoción de la investigación y la tecnología del banco de la república - fpit
Nombre Particular:	Implementación de un banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas rotativas. fase II: evaluación de cambios fisico-químicos del aislamiento
Ciudad y fechas:	Cali, Fecha de envío propuesta: 17-05-2012
Participantes:	Prof. Jose Luis Oslinger – Luis Carlos Castro
Sitio de información.:	Proyecto registrado en la plataforma SICOP
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Conversión de Energía – CONVERGIA

3. Equipos:

En su totalidad, los equipos que se describen a continuación están ubicados en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, edificio 353-1005 de la Universidad del Valle, sede Melendez.

Equipo	Uso en Docencia	Uso en Investigación	Extensión	Disponibilidad
Banco para pruebas de envejecimiento acelerado	Uso en el curso de Diagnóstico de Máquinas Eléctricas	Envejecimiento de barras estáticas hasta 13.8kV por esfuerzos termoeléctricos y por ciclado térmico	Pruebas destructivas a barras nuevas, pruebas de recepción y pruebas de diagnóstico	Según programación
Punta de alta tensión Fluke 80k	N.A	Medición de alto voltaje en pruebas dieléctricas	Medición de alto voltaje en sistemas de baja energía	Según programación

Módulo industrial de adquisición de variables eléctricas Datalogger	N.A	Adquisición, registro y control de las variables eléctricas resultantes en pruebas de envejecimiento	N.A	Exclusiva para pruebas de envejecimiento
Sistema de platinas calefactoras	N.A	Incremento de la temperatura de barras o bobinas de prueba de forma controlada	Aplicación de esfuerzos eléctricos a barras estáticas hasta 13.8kV (clase F)	Según programación
Sistema de vallas de seguridad	N.A	N.A	N.A	Exclusiva para uso en el banco de pruebas
Recuperación del inductor variable monofásico 0-220V	Uso en el curso de Laboratorio de Máquinas I y II	Alimentación variable del transformador elevador	N.A	Según programación
Recuperación del grupo motor-generator 500Adc/30V	Uso en el curso de Laboratorio de Máquinas I y II y en el curso de Máquinas Eléctricas I	Aplicación de ciclado térmico a barras estáticas hasta 13.8kV	Pruebas de calentamiento a diferentes materiales usados en la industria eléctrica	Según programación
Cofre de control de esfuerzos termoeléctricos	N.A	Control de la temperatura de prueba dentro de límites establecidos	Control de procesos industriales. 8 canales de entrada. Salida 220V/11kW	Exclusiva para uso en el banco de pruebas

Cofre de control de ciclado térmico	Uso en los cursos de Accionamientos Eléctricos y Máquinas Eléctricas I	Control de corriente de armadura en lazo cerrado para máquinas de DC con excitación independiente	Control de procesos industriales. 8 canales de entrada. Salida 220V/11kW	Según programación
-------------------------------------	--	---	--	--------------------

4. Impactos:

El banco de pruebas implementado en este proyecto impacta tanto el ámbito académico como el productivo por cuanto:

Impactos Académicos

- El banco de pruebas constituye la base y la infraestructura para la experimentación dentro de una investigación de doctorado que en la actualidad está en su fase de ejecución. Luego, la utilización del banco de pruebas permitirá obtener y divulgar resultados de investigación.
- Fortalece la línea de investigación de Máquinas Eléctricas Rotativas del grupo de investigación CONVERGIA al ampliar el alcance del curso de Diagnóstico de Máquinas Eléctricas y Laboratorio de Máquinas I permitiendo que los estudiantes, quienes toman el curso puedan desarrollar prácticas de laboratorio en el banco de pruebas implementado.
- La formación de recurso humano también es un impacto directo de este proyecto de investigación. Durante su desarrollo se iniciaron 3 trabajos de grado, incluyendo 6 estudiantes de pregrado. Dos de los trabajos de grado ya fueron aprobados. El restante se espera lo aprueben en el semestre agosto-diciembre de 2012.
- La implementación del banco de pruebas en este proyecto estuvo pensado hacia el desarrollo de investigación de carácter multidisciplinar. De aquí que se presentaron varios proyectos a convocatorias externas con el fin de estudiar la degradación del aislamiento de barras del estator tanto a nivel dieléctrico como a nivel fisicoquímico. Así, grupos de investigación del Departamento de Física y Química junto al grupo CONVERGIA desarrollarían investigación en conjuntamente.

Impactos a Nivel Productivo

- Las relaciones con la industria del sector eléctrico han permitido conocer de primera mano que en el país son muy pocos los laboratorios con la capacidad de realizar pruebas de envejecimiento acelerado. Entre ellos están el laboratorio de Empresas Públicas de Medellín y el laboratorio de la Universidad Nacional sede Bogotá. El banco de pruebas desarrollado en este proyecto incrementa la competitividad e impulsa la investigación nacional en este tema, la cual aun es muy escasa.
- La infraestructura construida en este proyecto tiene el potencial de ofrecer servicios de extensión a las compañías del sector eléctrico del suroccidente colombiano.
- Con una acreditación futura del banco de pruebas se estaría en la capacidad de realizar pruebas de recepción y pruebas destructivas de bobinados nuevos, reduciendo costos para los dueños de los generadores.