

---

## DIAGNÓSTICO DE BOBINAS DE MÁQUINAS ROTANTES POR IMPULSO DE TENSIÓN “SURGE”

**J. RIOS VIELMA \***  
UTFSM  
Chile

**C. A. WALL**  
IITREE-LAT-FI-UNLP  
Argentina

**P. TRINCADO**  
UTFSM  
Chile

**L. J. CATALANO**  
IITREE-LAT-FI-UNLP  
Argentina

**Resumen** – Se presenta un método de diagnóstico del sistema de aislamiento de máquinas rotativas y bobinas de media tensión, mediante la prueba “surge”. La prueba “surge” se presenta desde los criterios de Norma y tradicionales, pero adicionalmente, se presenta un modelo dieléctrico, que permite relacionarla con otros resultados medibles, con pruebas clásicas como factor de pérdidas y capacidad. Los criterios de diagnóstico proveídos por esta prueba, en lo posible deben ser siempre corroborados con otros ensayos que permitan encadenar los sucesos y comportamientos en los parámetros dieléctricos. Junto con mantener un criterio predictivo de mantenimiento, y una data histórica para evaluación.

**Palabras clave:** Máquinas rotantes, Ensayo Surge, Impulso de tensión, Constante de tiempo, factor de pérdidas,  $\text{tg } \delta$ .

### 1 INTRODUCCIÓN

Muchas veces las fallas en máquinas rotantes han tenido un inicio en el aislamiento interno entre espiras de una bobina o de un grupo de éstas, cuyo origen radica en los transitorios de tensión en la red de la cual están siendo alimentadas, como por los arranques propios, vibraciones, transitorios térmicos y el envejecimiento natural del material aislante.

Un método tradicional ocupado tanto por el encargado del mantenimiento, como por el fabricante de bobinas, es el ensayo por impulso de tensión (“surge”), cuyo criterio se basa en la comparación de la respuesta al impulso de tensión de una bobina, grupos de bobinas y fases con las respuestas de otras bobinas, grupos de bobinas y fases, cuyo resultado es sólo “Pasa” o “No Pasa”.

A partir de este ensayo, se presentan en este trabajo criterios de diagnóstico, en base a la comparación de las respuestas a impulso de tensión bajo diferentes tópicos a analizar.

Además se propone un modelo de bobina el cual permite relacionar la constante de tiempo de la respuesta con el factor de pérdidas del aislamiento y por tanto un criterio de calidad y de seguimiento.

Esta herramienta de diagnóstico, se complementa con otras clásicas como la medición del factor de pérdidas, descargas parciales, resistencia de aislamiento e IP.

## 2 GENERALIDADES

### 2.1 Objetivo

Presentar criterios de diagnóstico en base a la comparación de las respuestas a impulso de tensión de bobinas de máquinas rotativas, bajo diferentes tópicos; analizando los parámetros de la señal de respuesta que puedan ser indicativos del estado dieléctrico del aislamiento.

Presentar un modelo de la bobina, que ante la respuesta a impulso de tensión, permita relacionar la constante de tiempo del modelo con el factor de pérdidas del aislamiento y con ello un criterio de calidad y seguimiento.

Proponer un procedimiento para la incorporación de este ensayo en la rutina de mantenimiento de máquinas rotativas.

### 2.2 “TEAM”

Existen muchos mecanismos o agentes de envejecimiento que van alterando de una u otra forma los parámetros dieléctricos de generadores y motores, donde se desean detectar oportunamente para realizar acciones correctivas y planificar los mantenimientos. Estos agentes se suelen agrupar en la sigla “TEAM” aludiendo a efectos Térmicos, Eléctricos, Ambientales-químicos y Mecánicos.

### 2.3 Impulsos de tensión para diagnóstico (“Surge”)

Se denomina “Surge” a impulsos de tensión de magnitud controlada, que se utiliza para detectar posibles daños entre las espiras de una bobina o devanado de una máquina rotante.

Al aplicar un impulso de tensión de pendiente alta se induce, según la Ley de Lenz, una diferencia de tensión entre espiras adyacentes dentro de una bobina. Si el aislamiento entre espiras se encuentra dañado o debilitado, y si la diferencia de tensión entre conductores es suficientemente alta, se producirá un arco entre tales conductores, que se manifestará observando un desplazamiento en la forma de onda registrada. Estos cambios permitirán diagnosticar la falla entre espiras. En la Fig. 1 se aprecia el esquema representativo para un ensayo de “Surge”.

## 3 Respuesta a impulso de tensión “Surge”

### 3.1 Respuesta

Al utilizar un “surge” en una bobina o máquina rotatoria, ésta da por respuesta una señal sinusoidal amortiguada, la cual es única para cada bobina y depende principalmente de su inductancia. La frecuencia de la respuesta queda determinada por la siguiente expresión [1]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \text{ [Hz]} \quad (1)$$

donde:

**f**: Frecuencia de oscilación en [Hz].

**L**: Inductancia de la bobina en [H].

**C**: Capacidad entre el aislamiento y masa en [F].

Esta relación indica que cualquier cambio en la inductancia o en la capacidad, producirá un cambio en la frecuencia de la onda, mientras que el cambio en su amplitud de tensión será principalmente atribuido al cambio en la inductancia, según:

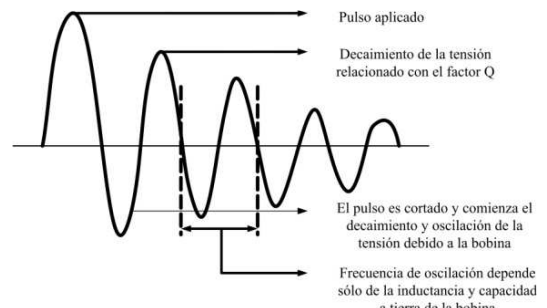
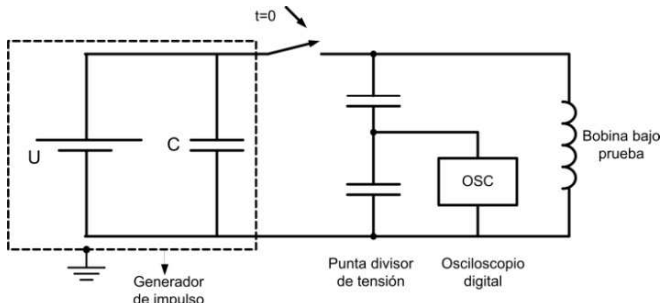
$$v = L \frac{di}{dt}, \text{ [V]} \quad (2)$$

donde:

**v**: Tensión en la bobina en [V].

**i**: Pulso de corriente en [A].

En la Fig. 2 se muestra la respuesta típica del sistema para este tipo de ensayos.



### 3.2 Diagnóstico

Usualmente, un instrumento comercial para ensayos "Surge" permite comparar la respuesta de una bobina o una fase de referencia de una máquina rotaria, que se sabe a priori su estado, con otras. Para lo cual aparecerán diferencias típicas como: cambio en número de vueltas, cortocircuito entre espiras, cambios en el núcleo y descargas corona.

Las diferencias se aprecian principalmente, desde el punto de vista del ensayo, en la razón de decaimiento y el desfase de la señal. Corona se puede reconocer como pequeños pulsos sobre la forma de onda de la respuesta.

A continuación se describen típicos utilizados para realizar una evaluación.

#### 3.2.1 Área

Indica cambios en el área bajo la curva de la onda de respuesta, sin considerar ningún otro tipo de distorsión o desfase al comparar. Es el principal indicador de la razón de decaimiento.

#### 3.2.2 Razón de error de área

Indica el desfase o distorsión de la onda de respuesta, sin considerar cambios en el área de la misma. Es el principal indicador de un cambio de frecuencia

#### 3.2.3 Flutter

Calcula la cantidad de corona, medida en la onda de respuesta, como cambios en la amplitud.

#### 3.2.4 Comparación

Determina cambios en la frecuencia y decaimiento de la tensión entre la onda de referencia y las siguientes.

### 3.3 Modelo simplificado de una bobina

Para encontrar parámetros que sean indicativos del estado dieléctrico de una bobina, ésta se modelará de una manera sencilla según la Fig. 3.

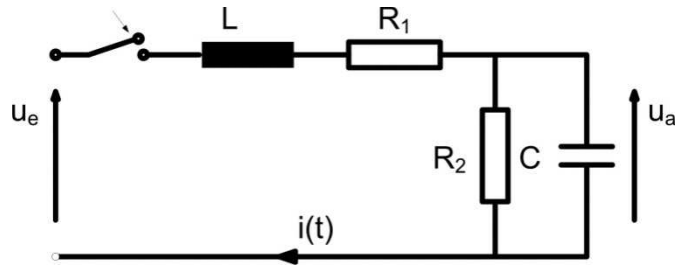


Fig. 3 - Circuito simplificado de bobina para “surge”

Este modelo se propone en la Ref. [2], allí se presenta un modelo de parámetros distribuidos, donde se desprecian los elementos de orden mayor. Para lo cual, es capaz de caracterizar el sistema de buena manera en el rango de frecuencias asociado al “Surge”.

Donde:

- $C$  : es la capacidad a masa o tierra de la bobina en [F],
- $R_2$  : es la resistencia a masa del aislamiento en [ $\Omega$ ],
- $R_1$  : es la resistencia aislamiento interno entre espiras, despreciando la del conductor, en [ $\Omega$ ],
- $L$  : es la inductancia de la bobina en [H].

Se puede apreciar que  $C - R_2$  representa el factor de pérdidas o proporcional a él. Junto con esto, el modelo permite generalizar a varias bobinas haciendo conexiones serie o paralelo según corresponda.

Se puede demostrar [3] que la respuesta del este modelo ante un pulso de tensión es una onda sinusoidal amortiguada cuya frecuencia de oscilación  $\omega$  y cuya razón de decaimiento  $\tau$  están dados por:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \sim \sqrt{\frac{1}{LC}}, \text{ [rad/s]} \quad (3)$$

$$\tau = 2 \left( \frac{R_1}{L} + \frac{1}{CR_2} \right)^{-1} \sim \frac{1}{R_1}, \text{ [s]} \quad (4)$$

Las aproximaciones anteriores son válidas si se cumple que  $R_2 \gg R_1$ , por tanto mantenemos las consideraciones iniciales, más la conclusión que la razón de decaimiento dependerá de las pérdidas internas.

## 4 Resultados

A partir de laboratorio en un set de bobinas de referencia otras con mayor uso y nuevas con fallas creadas artificialmente para el estudio, junto con casos aplicados en generadores y motores en terreno con tensiones de operación entre 5 y 10 kV, donde complementariamente con la prueba “Surge” se realizaron mediciones como: absorción, IP, factor de pérdidas, descargas parciales, resistencia de conductores<sup>1</sup>, se tiene:

### 4.1 Ensayo impulso “surge” valores característicos

Permitió determinar mediante la comparación de formas de onda el estado del aislamiento interno del grupo de bobinas de estudio, el de las fases de generadores y motores, en su grupo respectivo. Donde las bobinas permitieron dar la base de casos para analizar en la práctica casos reales de generadores y motores.

Los indicadores de **Área y Razón de error de área**, son los principales indicadores de diferencias en las formas de onda.

<sup>1</sup> Las mediciones complementarias al “Surge” fueron realizadas bajo normativa internacional respectiva y vigente según el tipo de prueba, pero que aquí no se detalla.

Los indicadores de “Flutter” y Corona, no se pudieron relacionar con resultados obtenidos en ensayos de descargas parciales, donde se recomienda ésta última para la medición de corona.

#### 4.2 Ensayo impulso “surge” modelo de la bobina y otros parámetros de seguimiento

Para efectos prácticos, se establece que a menor razón de decaimiento  $\tau$ , mejor es el estado del aislamiento interno, cuyo valor es del orden de  $\mu$  s, el cual es proporcional al valor del factor de pérdidas o  $\text{tg}\delta$ , solamente hasta la tensión nominal respectiva. Para tensiones mayores se pierde esta relación por el aumento a mayor tasa del factor de pérdidas.

El modelo simplificado, responde a mediciones con perfiles de tensión en ascenso, que producen aumento en las pérdidas, aumento en la razón de decaimiento  $\tau$  y consecuentemente en el factor de pérdidas. Lo anterior se justifica con que a mayor tensión, mayor es el esfuerzo dieléctrico entre espiras, mayor es la conducción de corriente y reducción de la resistencia serie  $R_1$  y con esto el aumento, según la teoría y la práctica de  $\tau$ .

Se verifica, experimentalmente la relación inversa entre la frecuencia de oscilación  $\omega$  y la capacidad  $C$ , por lo que con seguimiento de una máquina se puede notar variaciones de la capacidad del aislamiento, que típicamente presenta variaciones por: contenido de humedad, problemas por pérdida de capa semiconductor y corona en ranura, carbonizaciones internas por elevada actividad de descargas parciales.

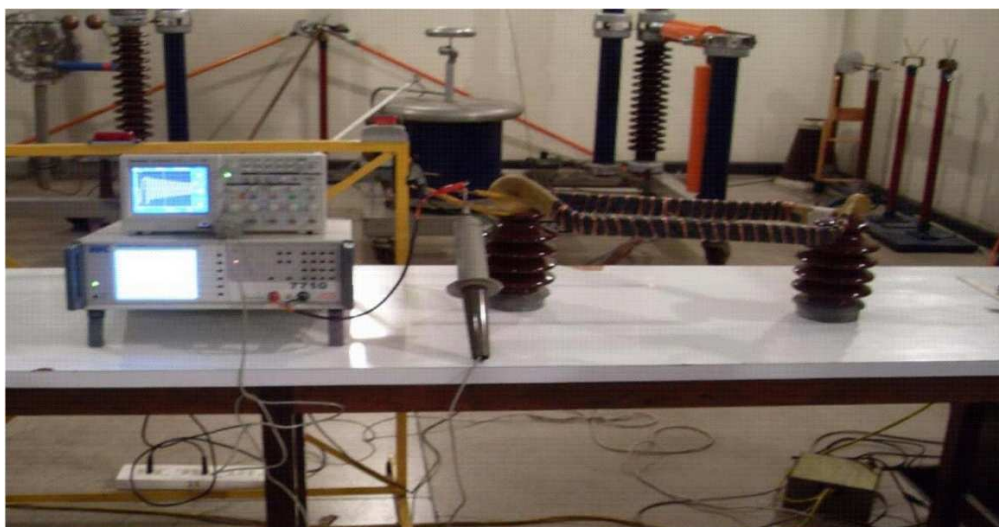
#### 4.3 Procedimientos

Para diagnosticar un problema dieléctrico en generadores o motores, las pruebas eléctricas han mostrado, cada una, una fortaleza respecto a un parámetro específico, por lo que la labor del personal de mantenimiento predictivo y luego correctivo, debe considerar la complementariedad de un set de pruebas, sumado a la experiencia en la interpretación de resultados.

Como set de ensayos no destructivos, para fines de diagnóstico se recomiendan: Absorción, factor de pérdidas, capacidad, descargas parciales y “Surge”.

En la Fig. 4 se aprecia el montaje para un ensayo de Surge en laboratorio de una bobina, en la misma se aprecia esta, el registrador y el instrumento para la aplicación de impulsos.

En las Fig. 5 y Fig. 6 se aprecia el montaje para el ensayo de motor sincrónico de 5.500 HP. En la Fig. 7 se muestran la conexión para el ensayo de un generador de 280 MVA y en la Fig. 8 se presenta la respuesta obtenida para cada una de las fases.



**Fig. 4** - Medición “Surge” en laboratorio a bobina



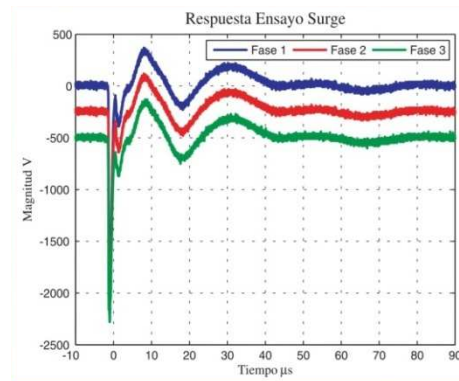
**Fig. 5** - Ensayo "surge" a motor sincrónico 5.500 HP, registro.



**Fig. 6** - Ensayo "surge" a motor sincrónico 5.500 HP, conexión a las bobinas.



**Fig. 7** - Ensayo Surge a generador 280MVA



**Fig. 8** - Ensayo Surge a generador 280MVA

## 5 CONCLUSIONES

La prueba "surge" permite de manera adecuada evaluar por comparación el estado del aislamiento interno de bobinas, grupos de bobinas, fases de generadores y motores. La comparación se hace relevante al considerar los parámetros Área y Razón de error de área, por ser los que indican de mejor manera las diferencias existentes entre las respuestas del ensayo. Su limitación queda encasillada a la comparación entre especímenes, por lo que ver la evaluación y diagnóstico de la progresión del envejecimiento, requeriría guardar mediciones en el tiempo o tener una bobina de referencia "patrón".

Otros parámetros a considerar en la respuesta "Surge" es la razón de decaimiento  $\tau$ , que cuanto menor sea mejor es el estado del aislamiento interno, el cual es proporcional al valor del factor de pérdidas o  $\text{tg}\delta$ , solamente hasta la tensión nominal respectiva. Se muestra un modelo simplificado de la bobina, que permite explicar conceptualmente esta relación.

Igualmente se verifica la relación inversa entre la frecuencia de oscilación  $\omega$  y la capacidad  $C$ , lo cual da otra relación para diagnosticar junto con el factor de pérdidas.

A lo anterior se suma, que un solo tipo de prueba puede ser pobre, por lo que se requiere un set estándar de pruebas tipo, que permitan relacionar los resultados con la fenomenología de las pérdidas dieléctricas y el envejecimiento natural y artificial de los sistemas de aislamiento de bobinas y máquinas rotativas, como medición directa del factor de pérdidas, capacidad, descargas parciales y absorción, entre las más comunes, manteniendo un seguimiento histórico.

## 6 REFERENCIAS

- [1] IEEE Std 522™-2004 "IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines", IEEE Power Engineering Society.

- [2] W. Liut, E. Schaeffer, L. Loront and P. Chanemouga: “High Frecuency Modelling of Stator Windings Dedicated to Machine Insulation Diagnosis by Parametric Identification”, Université de Nantes, Nantes Atlantique Universités, IREENA, 2007.
- [3] Rodrigo Pruneda U “Estudio de Estado del Aislamiento Interno de Bobinas de Máquinas Rotatorias mediante Respuesta a Impulso de Tensión”. Laboratorio de Alta Tensión UTFMS, Chile, 2009.