

Resistencia dieléctrica del aislamiento de la máquina extraída de la prueba de rampa de DC en barras de estator individuales

E. David
ETS
Montréal, Canadá
eric.david@etsmtl.ca

G.C. Stone, M. Sasic
Qualitrol-Iris Power
Toronto, On Canadá

Resumen— La prueba de tensión en rampa de DC se utiliza para evaluar la condición de las bobinas del estator en estatores de generadores de alta tensión. Cuando se usa únicamente para evaluar la capacidad de un sistema de aislamiento para soportar un nivel de voltaje DC predeterminado, el aumento continuo (y normalmente lento, típicamente del orden de 1 kV/min) del voltaje aplicado, combinado con la monitorización continua de la corriente, a menudo permite un mejor control de la prueba para evitar fallos inesperados y daños al aislamiento. Además, también puede usarse como una prueba diagnóstica y puede proporcionar información cuantitativa similar a la prueba IR/PI. Este artículo presenta datos de pruebas de rampa DC de barras individuales, así como las técnicas de cálculo para calcular la respuesta dieléctrica del aislamiento y la compara con los resultados de las pruebas de corriente de polarización-despolarización (PDC).

*Palabras clave—*Pruebas de aislamiento, dieléctrico respuesta, CC tensión rampada de la máquina

I. INTRODUCCIÓN

La prueba de voltaje de CC en rampa, donde se aplica un alto voltaje directo siguiendo una función que aumenta de manera continua, se ha utilizado durante varias décadas para evaluar la condición de las bobinas del estator en una máquina rotativa de alta tensión. El método de prueba de alto voltaje directo con

tensión en rampa se introdujo por primera vez en los años sesenta

[1] y varias utilidades eléctricas desarrollaron sus propias versiones del equipo de prueba, pero esta técnica se hizo más conocida tras el trabajo pionero de la Oficina de Reclamación [2] y de Manitoba-Hydro [3] en los años noventa, que condujo al desarrollo adicional de la técnica y su interpretación. Se introdujo en la norma IEEE-95 por primera vez en 2002 [4] (esta norma ha sido reafirmada desde entonces). Más recientemente, también se reportaron contribuciones adicionales a la interpretación de los resultados de la prueba de tensión en rampa y al desarrollo de la instrumentación por Hydro-Québec y colaboradores [5, 6]. También existen revisiones sobre el desarrollo de la prueba de rampa en la literatura [7, 8]. Todo este desarrollo se motivó principalmente por el hecho de que existen ciertas ventajas prácticas de usar tensión directa en subida para probar máquinas grandes. Además de la relativa compacidad del equipo de prueba,

la eliminación del ajuste manual de la tensión mejora tanto el control de la tensión como la sensibilidad de la prueba en comparación con las pruebas hipot de DC convencionales. De

hecho, en muchos casos, la monitorización continua de la corriente de carga también puede permitir la evaluación de la condición del aislamiento, en lugar de ser una simple prueba de go/no go. Muchos usos exitosos de esta técnica para detectar los defectos de

aislación en las bobinas del estator de la máquina se reportan en la literatura (ver por ejemplo [9, 10]).

Además de su aplicación en el campo, las pruebas de rampa también pueden realizarse en barras o bobinas individuales en el laboratorio o en la fábrica para la evaluación de control de calidad, siempre que la instrumentación esté equipada con un amperímetro lo suficientemente sensible, ya que los niveles de corriente están en nA en lugar de en μ A. Los parámetros IR y PI habituales, tal como se definen en la norma IEEE-43 [11], pueden calcularse a partir de los resultados de la prueba de rampa con un modelado adecuado de la curva I-V. Este artículo presenta datos de pruebas de rampa de CC de barras individuales, así como las técnicas de cálculo para calcular la respuesta dieléctrica del aislamiento y los parámetros PDC habituales (IR y PI).

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El punto de partida del cálculo de la curva teórica resultante de una prueba de rampa de CC es la ecuación general que da la corriente, $I(t)$, medida por un circuito externo cuando un material aislante lineal está sometido a una diferencia de potencial arbitrariamente variable en el tiempo, $U(t)$:

$$I(t) = \frac{C_o \sigma U(t)}{\epsilon_o} + C_o \frac{\partial}{\partial t} \left[\epsilon_\infty U(t) + \int_0^\infty f_s(\tau) U(t-\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

En esta ecuación, C_o , ϵ_o , ϵ_∞ y σ son respectivamente la capacitancia geométrica, la permitividad del vacío, la constante dieléctrica del material aislante y su conductividad. Más detalles sobre esta relación básica se pueden encontrar en la literatura general [12]. El término $f_s(t)$ es la función de respuesta dieléctrica del material que puede calcularse fácilmente a partir de los resultados de una prueba de corriente de polarización-despolarización (PDC). Para los sistemas de aislamiento de bobinado de máquinas, se puede suponer que la función de respuesta dieléctrica en la región de baja frecuencia se comporta aproximadamente de acuerdo con una ley de potencia universal dada por

$$f_s(t) = At^{-n} = K \frac{C_\infty}{C_o} t^{-n} \quad (2)$$

donde C_∞ es la capacitancia de bobinado medida y K y n son parámetros dependientes del material. Se ha mostrado que esta expresión está en buen acuerdo con datos experimentales para diferentes tipos de sistemas de aislamiento de bobinas a temperatura ambiente en el rango de 1 a 1000 s como se muestra en el Anexo C

de la versión más reciente de la IEEE Std-43 por las corrientes de descarga representadas en la Figura C.1. En el caso de una prueba de rampa realizada a una tasa de voltaje α , con algunas aproximaciones (1) y (2) conducen a la siguiente ecuación que puede dividirse en tres componentes: la corriente de fuga, la corriente capacitiva y la corriente de absorción [6]:

$$I(t) = I_L(t) + I_C(t) + I_{abs}(t) = \frac{\alpha}{R_L}t + \alpha C_\infty \left(1 - e^{-t/\tau}\right) + \frac{\alpha K C_\infty}{(1-n)} t^{1-n} \quad (3)$$

Cuando se calculan los valores de K, n y RL, el índice de polarización, PI, y la resistencia de aislamiento, IR (para no confundir con la resistencia de fuga, RL) pueden calcularse utilizando las siguientes ecuaciones [6]:

$$IR = \frac{1}{K C_\infty 60^{-n} + 1/R_L} \quad (4)$$

$$PI = \frac{K C_\infty 60^{-n} + 1/R_L}{K C_\infty 600^{-n} + 1/R_L} \quad (5)$$

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Sistemas de medición

Se utilizaron dos sistemas de medición. Uno de ellos era un equipo disponible comercialmente, el sistema de prueba de rampa Qualitrol DCR-60HVDC que está diseñado principalmente para mediciones de campo y, por lo tanto, opera en modo de prueba de espécimen con toma a tierra (GST). Se ensambló un sistema de rampa hecho en laboratorio para comparar la curva I-V resultante con el sistema comercial Qualitrol. El sistema de laboratorio incluía una fuente de alimentación conmutada analógica controlable (Glassman HighVoltage Inc., modelo ER60), un electrometro de alta sensibilidad (un Keithley 6517B electrometer) y una resistencia externa en serie ajustable. Este montaje fue controlado por una aplicación de LabVIEW y se utilizó tanto una tarjeta DAQ como una tarjeta GPIB para la conexión con la fuente de voltaje de CC y el electrometro. Fue diseñado para usarse únicamente en modo de prueba de espécimen sin toma a tierra (UGT), por lo que es estrictamente para mediciones de laboratorio. Una representación esquemática del montaje de laboratorio se muestra en la Fig. 1.

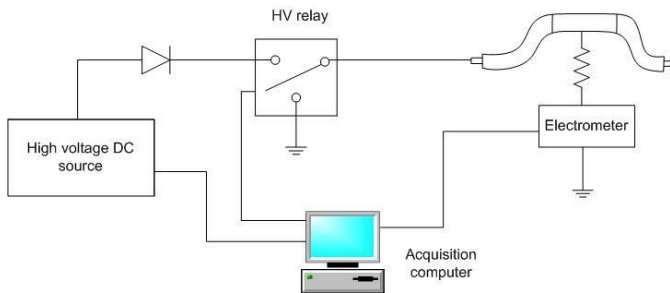


Fig. 1. Montaje de laboratorio para prueba de rampas en modo UGT (adaptado de [6]).

B. Resultados experimentales y modelado

La Fig. 2 muestra el gráfico I-V para un barrido de voltaje de 2 kV/min, hasta 20 kV en una barra de epoxi-mica de 2.0 nF (barra n°1) y una de 4.3 nF (barra n°2) para hidrogenerador. La barra de 2.0 nF era una barra de repuesto y la barra de 4.3 nF era una barra que fue retirada de una máquina debido a valores bajos de IR. Cuando se probó en el laboratorio, la IR de esta barra era aproximadamente tres veces menor que la de una barra de repuesto similar [13].

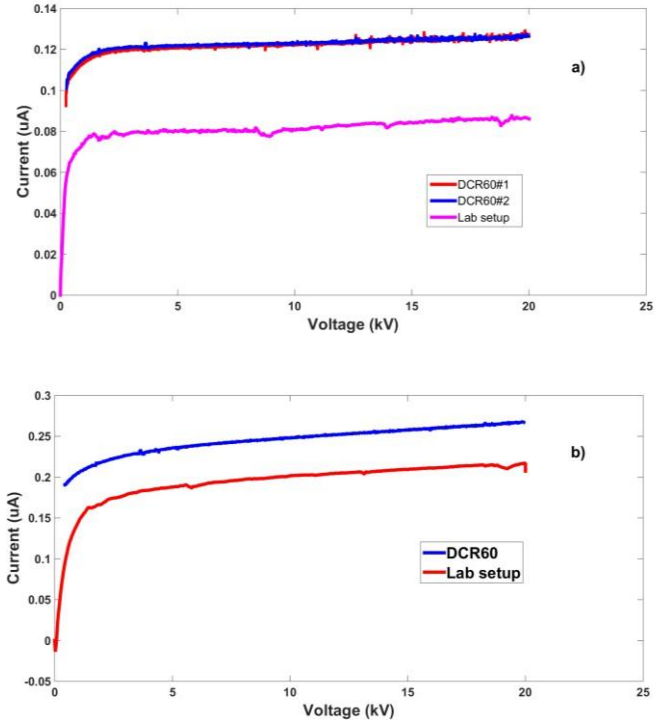


Fig. 2. Curvas I-V a una velocidad de 2 kV/min sobre una) 2.0 nF a) 2.0 nF y b) 4.3 hydro barras de generador obtenidas de la DCR-60 y de un equipo hecho en laboratorio.

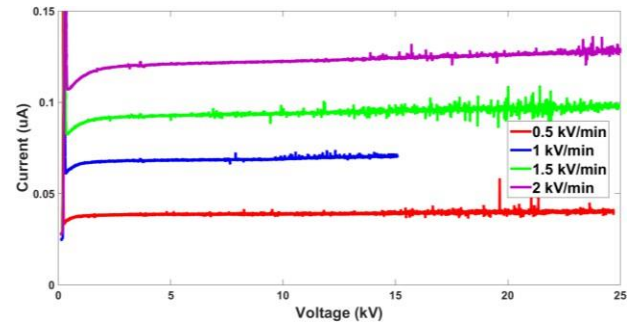


Fig. 3. Curvas I-V en una barra de hidro-generador de 2.0 nF medida por el DCR-60 a diferentes tasas de voltaje.

Las pruebas de rampa se repitieron varias veces con el DCR-60 en la barra de 2.0 nF y los resultados fueron muy reproducibles. Dos curvas típicas se muestran y prácticamente se superponen en la Fig. 2a. Mediciones adicionales se realizaron en la misma barra a diferentes velocidades de voltaje, de 0.5 a 2 kV/min, como se muestra en la Fig. 3. El nivel de corriente disminuye cuando las velocidades de voltaje disminuyen de 2 a 0.5 kV/min, ya que la corriente capacitiva correspondiente disminuye de 66 nA a 16 nA. Se puede ver que la sensibilidad del detector de corriente para el DCR-60

("el equipo GST") es bueno, probablemente menor que unos pocos nanoamperios. Sin embargo, cuando se compararon los resultados del DCR-60 con la curva I-V en la misma barra obtenida con el equipo hecho en el laboratorio, ambos sistemas mostraron un desplazamiento de aproximadamente 30 nA, como se observa en las Figuras 2a y 2b. Esto habría pasado desapercibido para mediciones de campo, pero fue notable para mediciones en barras individuales. Se utilizó la Ecuación (3) para modelar las curvas experimentales, como se muestra en las Figuras 4 y 5. La corriente capacitiva a 2 kV/min es de 66 nA y 144 nA para las barras de 2.0 y 4.3 nF, respectivamente, y está indicada por la línea de puntos y guiones.

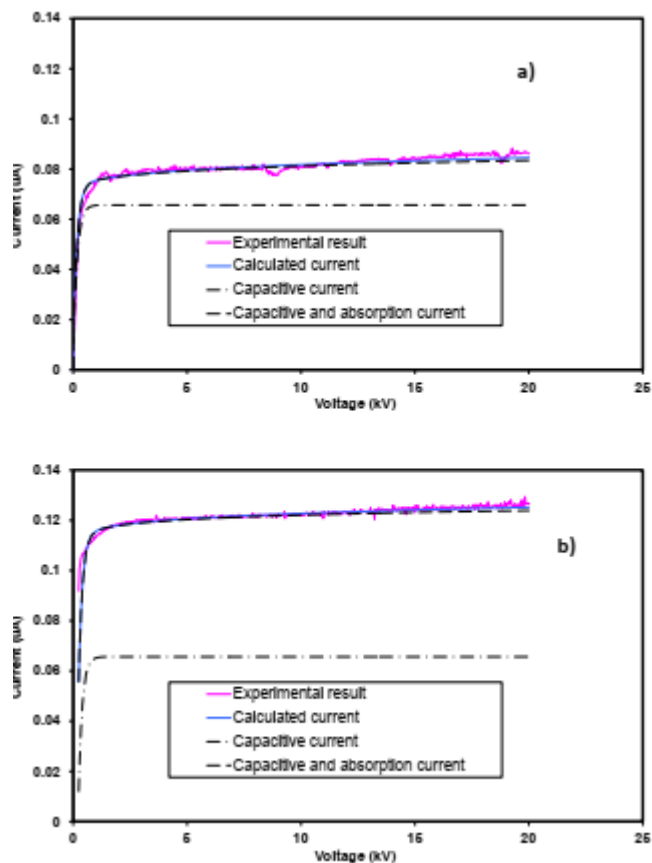


Fig. 4. Modelado (según ecuación 3) de la curva I-V a 2 kV/min en una barra de 2.0 nF: a) DCR-60, b) configuración de laboratorio.

Un mejor ajuste de (3) se calculó para cada resultado experimental y se indica por la curva etiquetada como "corriente calculada" en las Figuras 4 y 5. La diferencia entre esta curva y la curva a trazos etiquetada como "corriente capacitiva y de absorción" corresponde a la contribución de la corriente de fuga. Los parámetros dieléctricos K y n fueron extraídos de este cálculo y reportados en la Tabla 1 para cada una de las cuatro curvas de las Figuras 4 y 5. El índice de polarización (PI) y la resistencia de aislamiento (IR) fueron calculados a partir de (5) y (4) respectivamente usando los valores K y RL calculados a partir de (3). Estos valores también fueron reportados en la Tabla I, así como la resistencia normalizada en carga (RC) y en descarga (RC') como se describe en el anexo C de [11]. Los valores posteriores fueron medidos a temperatura ambiente y tendrían que multiplicarse por aproximadamente 0.8 para reportarlos a

40 °C de acuerdo con el procedimiento recomendado en [11] para resinas termoset. El RC' para la barra de 2,0 nF fue típico de un aislamiento moderno de epoxy-mica de última generación [14], mientras que fue notablemente más bajo para la barra de 4,3 nF. Además, en el caso de la barra de 4,3 nF, se observó una corriente de fuga no despreciable a partir del modelado de ambas curvas I-V del montaje de laboratorio y del equipo comercial. Esta observación estuvo en buena concordancia con los valores más bajos de PI observados para la barra n.º 2 tal como se indica en la Tabla I y también con mediciones PDC anteriores realizadas en la misma barra que han mostrado valores IR bajos [13].

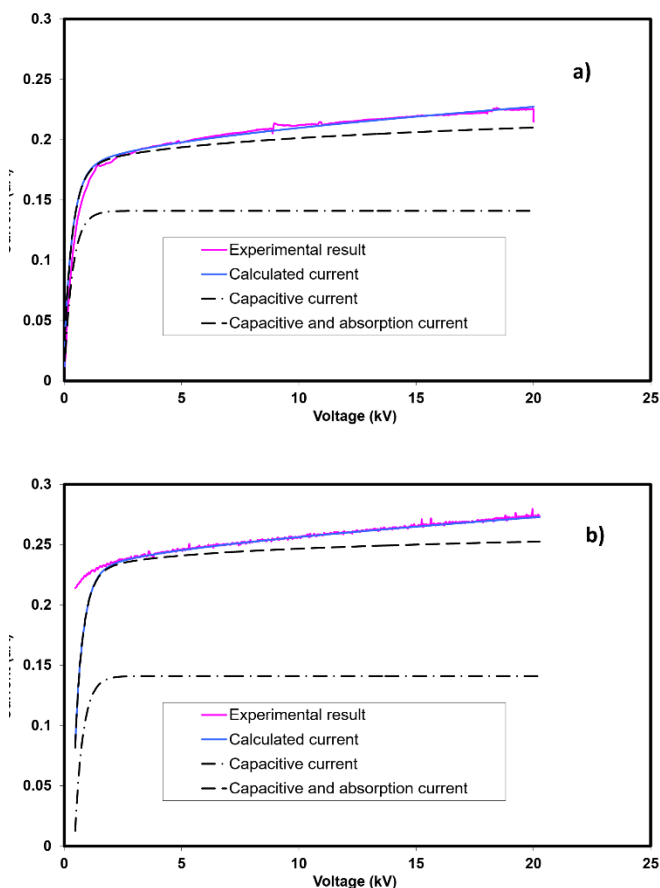


Fig. 5. Modelado (según la ecuación (eq. 3)) de la curva I-V a 2 kV/min en una barra de 4.32nF: a) DCR-60, b) configuración de laboratorio.

TABLA I: PARÁMETROS DIELECTRICOS EXTRAÍDOS DE LAS CURVAS I-V SE MUESTRAN EN LAS FIGS. 4 Y 5.

	$K_{S^{(n-1)}}$	n	PI	RC (s)	RC' (s)
Barra#1-Lab	0.015	0.81	5.07	1700	1780
Barra#1-DCR60	0.030	0.95	6.38	1580	1670
Barra#2-Lab	0.027	0.81	3.34	817	984
Barra#2-DCR60	0.037	0.93	3.13	928	1200

IV. CONCLUSIÓN Se realizaron pruebas de rampa de DC en barras individuales de hidrogenadores aisladas con epoxy- mica con dos sistemas diferentes que operan en modos GST y UST, respectivamente. Las curvas I-V

se modelaron asumiendo un comportamiento de ley de potencia de la función de respuesta dieléctrica. Aunque se observó un desplazamiento de unas pocas decenas de nA entre los dos sistemas, los parámetros dieléctricos básicos (K , n , RL) y los parámetros de diagnóstico (IR , PI) extraídos de la I-V estuvieron en buen acuerdo para ambos sistemas.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer el apoyo financiero del Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC).

REFERENCIAS

- [1] B. L. McHenry, "Prueba de aislamiento del generador mediante la aplicación de una función de tiempo continuo de voltaje directo", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 86, pp. 1329-1333, 1967.
- [2] L.M. Rux, "High-Voltage DC Tests for Evaluating Stator Winding Aislamiento: Métodos de prueba de paso uniforme, paso graduado y escalonado; Informe anual de IEEE 1997 sobre Aislamiento Eléctrico y Fenómenos Dieléctricos, pp. 258-262, 1997.
- [3] W. McDermid, B.G. Solomon, "Significance of defects found during high direct-voltage ramp tests", IEEE Electr. Insul. Conf. and Electr.Manufacturing & Coil Winding Conf., pp. 631-636, 1999.
- [4] IEEE Std 95-2002, "Práctica recomendada de la IEEE para pruebas de aislamiento" de maquinaria eléctrica de corriente alterna (2300 V o más) con alta tensión directa.
- [5] Modelado de la curva IV de un generador a partir del método de voltaje directo escalonado
- [6] E. David, T. Godin, J. Bellemare, L. Lamarre, "Modelado de la Respuesta dieléctrica del aislamiento del bobinado del estator a partir de una prueba de CC escalonada", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.14, pp. 1548-1558, 2007.
- [7] L. Rux, W. McDermid, "Evaluación del estado del aislamiento del bobinado del estator de hidrogeneradores mediante el método de prueba de alta tensión continua escalonada", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 17, No. 6, pp. 27-33, 2001.
- [8] W. McDermid, J.C. Bromley, "La Prueba de Rampa: Sus orígenes, desarrollo y aplicación", IEEE Transactions on Dielectrics and Aislamiento eléctrico, vol. 17, pp. 1470-1478, 2010
- [9] C. Hudon, N. Amyot, M. Levesque, M. Essalihi y C. Millet, "Using" --- Generador Diagnóstico a Realizar Condición Basado "Mantenimiento", 2015 Conferencia de Aislamiento Eléctrico (EIC), pp. 341-345, 2015.
- [10] W. McDermid, R. Gamblin, "Uso de la Prueba de Ramp para acelerar el regreso a Servicio de Bobinado de Estator Dañado", 2007 Aislamiento Eléctrico Conferencia y Exposición de Manufactura Eléctrica, pp. 203-206, 2007.
- [11] IEEE Std 43-2013, "Prácticas recomendadas de la IEEE para la prueba de aislamiento resistencia de maquinaria rotativa
- [12] A.K. Jonscher, Relajación dieléctrica en sólidos, Chelsea Dielectrics Prensa, 1984.
- [13] E. David, resultados no publicados.
- [14] E. David, L. Lamarre, "Progreso en las Pruebas de CC del Estator del Generador" Bobinados: Consideraciones teóricas y pruebas de laboratorio, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 25, p. 49-58, 2010.