

¿Los ensayos HIPOT dañan el aislante de la máquinas rotativas?

B.K. Gupta
AOK Technologies Inc.
Institute Toronto, Ontario

H.G. Sedding
Kinectrics Inc.
Toronto, Ontario

G.C. Stone
Iris Power Engineering
Mississauga, Ontario

J. Stein
1 Electric Power Research
Palo Alto, California

Resumen: Los ensayos de sobre-potencial o hipot han sido aplicados durante décadas a los devanados de máquinas rotativas para asegurar que el aislamiento eléctrico en los devanados está apto para el servicio. Estos ensayos se utilizan universalmente como pruebas de aceptación para devanados nuevos. Sin embargo, un ingeniero de mantenimiento de máquinas rotativas a menudo se enfrenta a gerentes de planta reacios a aprobar las pruebas hipot. Los gerentes preguntan: '¿Los ensayos dañan el aislamiento de la máquina rotativa?' Este artículo intenta responder a esta pregunta específica. Los autores discuten la experiencia de expertos de la industria a partir de una extensa revisión de literatura realizada bajo un proyecto de EPRI. Algunos argumentos cuasi-teóricos se utilizan para cuantificar el posible daño al sistema de aislamiento por una prueba hipot. Los resultados de recientes experimentos de prueba en un gran número de bobinas de estator realizadas bajo otro proyecto de EPRI se analizan. Surge una conclusión contundente de que las pruebas hipot no parecen causar daños significativos al sistema de aislamiento de un estator de máquina rotativa en condiciones de servicio.

Palabras clave: Máquina rotativa; Aislamiento; Prueba hipot; Daño

I. INTRODUCCIÓN

Pruebas de sobre-potencial o de tensión nominal alta, o hipot, se han aplicado durante casi un siglo a los devanados de máquinas rotativas para probar la integridad de su sistema de aislamiento y para asegurar que el aislamiento eléctrico en los devanados sea apto para el servicio. Las pruebas hipot pueden realizarse usando tres tipos de voltajes: CA a la frecuencia de la red, muy baja frecuencia (VLF) a 0,1 Hz y DC de acuerdo con las normas bien conocidas IEEE, IEC y NEMA [1-5]. Las pruebas hipot se utilizan universalmente como pruebas de aceptación para devanados nuevos o rearmados. Sin embargo, no todas las empresas de servicios públicos utilizan la prueba hipot como prueba de mantenimiento en máquinas en servicio. En una encuesta para un proyecto de EPRI, una sección significativa (25 %) de las empresas que respondieron no especificó ni utilizó ninguna prueba hipot durante el mantenimiento de máquinas en servicio [6]. Esta reticencia a utilizar pruebas hipot para el mantenimiento suele surgir de la percepción de que una prueba hipot puede dañar una máquina en buen estado de funcionamiento. Un ingeniero de mantenimiento de máquinas rotativas a menudo se enfrenta a gerentes de planta reacios a aprobar pruebas hipot. Los gerentes preguntan: "¿Las pruebas hipot dañan el aislamiento de la máquina rotativa?" Se han hecho intentos de responder a esta pregunta en artículos anteriores [6, 7]. Sin embargo, debido a la discusión de varios otros temas importantes relacionados con las pruebas hipot en el mismo artículo, esta pregunta a menudo no recibe la debida relevancia y queda algo velada. Este artículo intenta responder a esta pregunta específica, y solo a esta pregunta, tan clara y definitivamente como sea posible.

Los autores discuten la experiencia de ingenieros expertos de la industria a partir de una extensa revisión de literatura y la encuesta realizada bajo un proyecto EPRI [6]. Algunos argumentos cuasi-teóricos se utilizan para estimar la posible pérdida de vida del sistema de aislamiento en máquinas rotativas por una prueba hipot. Finalmente, se analizan los resultados de pruebas en un gran número de bobinas de estator realizadas bajo otro proyecto EPRI para determinar si se causó algún daño al aislamiento de la máquina por la prueba hipot [7]. Estas tres aproximaciones se utilizan para llegar a una conclusión contundente de que las pruebas no parecen causar ningún daño significativo al sistema de aislamiento de un estator de máquina rotativa en condiciones de servicio.

II. EXPERIENCIA DE INGENIEROS EXPERTOS

Las pruebas hipot en máquinas rotativas han sido realizadas por muchos ingenieros tanto en la fábrica como en estaciones de servicio. El nivel de prueba es $(2E+1)$ kV para la prueba de CA de frecuencia eléctrica [1], $1.63(2E+1)$ kV para la prueba a 0.1 Hz [2], y $1.7(2E+1)$ kV para la prueba de CC [3] para devanados nuevos, siendo E el voltaje nominal entre fases. Para pruebas de mantenimiento en máquinas en servicio, el nivel de la prueba hipot es generalmente el 75 % del valor para máquinas nuevas, es decir $(1.5E+1)$ kV CA o equivalente. Las pruebas hipot se realizan a temperaturas ambiente.

Una máquina, que falla una prueba hipot de mantenimiento, casi siempre está sujeta a investigaciones detalladas adicionales, incluyendo Dissección de varias secciones. Los ingenieros expertos han observado que una máquina que falló en una prueba hipot ha sido siempre encontrada con un sistema de aislamiento pobre o degradado en el examen posterior a la falla. Los expertos también han observado que una máquina que pasó una prueba hipot rara vez falla en servicio [8, 9]. Varios encuestados en nuestra encuesta de servicios públicos bajo el proyecto EPRI [6, 10] también proporcionaron comentarios similares. Por lo tanto, las pruebas hipot pueden fallar en máquinas marginales o pobres, pero no en máquinas buenas en servicio.

III. BASE TEÓRICA

La vida útil esperada L de la aislación de una máquina giratoria se sabe que varía como una potencia inversa n del voltaje V.

$$L = k V^{-n} \quad (1)$$

donde k es una constante, y el exponente n varía de 9 a 12, siendo el valor más utilizado 10. Así, un incremento del 10 % en el esfuerzo eléctrico reduce la vida del aislamiento a la mitad [11 - 13]. El aislamiento en una máquina experimenta voltajes de hasta el voltaje nominal E a la temperatura de operación (digamos 105 °C) durante su vida de servicio esperada (digamos 25 años o 219,000 h).

Usando la ley de potencias inversa anterior, la pérdida estimada de vida en una prueba hipot de mantenimiento a un voltaje $(1.5E + 1)$ kV CA (o equivalente en DC o voltaje de 0,1 Hz) durante 1 minuto será

La vida perdida en la prueba hipot = $(1.5)^{10}$ minutos = 58 minutos (2)

La pérdida de vida en una prueba hipot también puede estimarse de otra manera. Todas las bobinas y barras utilizadas hoy en las máquinas deben tener la capacidad de superar una prueba de resistencia al voltaje [14]. Típicamente, para bobinas de devanado de 13.8 kV bien hechas, la prueba de resistencia al voltaje requiere 250 horas de vida a 35 kV o 400 horas a 30 kV (a aproximadamente 95 - 105 °C) sin fallo [15]. Si una prueba de 400 horas a 30 kV representa 25 años o 219000 h de vida en servicio, entonces usando la ley de potencias inversa una prueba hipot de un minuto a 22 kV $(=1.5E+1)$ kV CA envejece el aislamiento por

$219000 \text{ h} * (22/30)^{10} * (1 \text{ min} / 400 \text{ h}) = 0.41 \text{ h}$ (3)

La pérdida de vida estimada anterior en (2) y (3) anteriores ignora el hecho de que la prueba hipot se aplica a temperatura ambiente (por ejemplo 35 °C o menos) lo cual es mucho más bajo que la temperatura de operación o la temperatura de la prueba de resistencia a voltaje (95-105 °C). La estimación de la pérdida de vida en la prueba hipot será aún más corta si también se tiene en cuenta esta diferencia de temperatura.

Por lo tanto, a partir de las consideraciones teóricas anteriores, el aislamiento en una máquina en buen estado no debería sufrir una degradación significativa durante una prueba hipot de 1 minuto. Como los supuestos detrás de los cálculos anteriores no siempre se consideran cuantitativamente correctos, los argumentos anteriores deben tratarse como cualitativos o cuasi-teóricos por naturaleza.

IV. EVIDENCIA EXPERIMENTAL

En otro proyecto de EPRI, pruebas hipot a 22 kV CA o 37 kV CC (manteniendo durante 1 minuto) se realizaron en un gran número de grupos de bobinas (cada uno con 2 o 3 bobinas) en un generador hidroeléctrico de 13,8 kV, 167 MVA. El bobinado del estator consistía de varios cientos de barras Roebel aisladas con un material de mica rellena con resina sintética. Estos voltajes de prueba hipot representan el 75% del nivel de prueba de fábrica para enrollados nuevos. Sesenta (60) grupos de bobinas se dividieron en seis conjuntos de diez grupos de bobinas cada uno. Un conjunto estuvo sujeto a una hipot de CA única, un segundo conjunto a tres hipot de CA, y el tercero a un total de cinco hipot de CA. De manera similar, el cuarto conjunto estuvo sujeto a una hipot de CC única, el quinto conjunto a tres hipot de CC, y el sexto conjunto a un total de cinco hipot de CC. La selección de los grupos de bobinas en cada conjunto se hizo para que tuvieran un envejecimiento igual basado en su posición eléctrica entre el extremo de la línea y el extremo neutro en el embobinado.

Este proceso de selección fue necesario para evitar posibles efectos debidos a diferente envejecimiento en diferentes sets durante el servicio. Se introdujeron retardos temporales entre las posteriores aplicaciones de hipot para minimizar cualquier efecto de acumulación de carga espacial en aquellos grupos sometidos a múltiples hipots. Los resultados de los hipots se presentan en las Tablas 1 y 2. Las bobinas están numeradas en las Tablas de modo que 1 denota una bobina de extremo de línea y 44 la bobina de extremo neutro.

Grupo de Bobinas	Resultado
T1-1-40, 41, 42	Aprobado
T1-3-1, 2	Fallado (22 kV, 15 s)
T1-3-14, 15	Aprobado
T1-3-16, 17	Aprobado
T1-3-27, 28	Aprobado
T1-1-14, 15	Fallido (22 kV, 10 s)
T1-1-16, 17	Aprobado
T1-1-27, 28	Aprobado
T1-1-29, 30, 31	Aprobado
T3-2-14, 15	Aprobado

Tabla 1(a): Resultados de hipot de CA, aplicación única

Grupo de bobinas	Resultado
T2-3-2, 3	Aprobado
T2-3-25, 16	Aprobado
T1-3-29, 30,31	Aprobado
T1-3-40, 41,42	Aprobado
T2-1-2, 3	Aprobado
T2-1-12, 13	Aprobado
T2-1-17, 18	Aprobado
T2-1-28, 29	Aprobado
T2-1-30, 31	Aprobado
T2-1-41.42	Aprobado

Tabla 1(b): Resultados hipot de CA, tres aplicaciones

Grupo de bobinas	Resultado
T3-2-27, 28	Fallido (14 kV, primer disparo)
T3-2-29, 30	Aprobado
T2-3-17, 18	Aprobado
T3-2-40, 41	Aprobado
T2-3-28, 29	Aprobado
T2-3-30, 31	Aprobado
T1-1-1, 2	Fallido (22 kV, 40 s, primera prueba)
T3-1-38, 39	Aprobado
T3-2-3, 4	Aprobado
T3-2-16, 17	Aprobado

Tabla 1(c): Resultados de hipot de CA, cinco aplicaciones

En grupos de bobinas sometidos a múltiples pruebas hipot de CA, todas las fallas ocurrieron en el primer disparo. Claramente las bobinas que pasaron la prueba inicial no fallaron en los hipots subsecuentes.

(Curiosamente, no ocurrieron fallos cuando se aplicaron tres hipot consecutivos.) Esto parece sugerir que las pruebas de no degradan el aislamiento en buenos grupos de bobinas.

Grupo de bobinas	Resultado
T1-1-34, 35	Aprobado
T1-1-36, 37	Aprobado
T1-3-7, 8, 9	Aprobado
T1-3-10, 11	Fallido (37 kV, 10 s)
T3-1-20, 21, 22	Aprobado
T3-1-23, 24	Aprobado
T1-1-10, 11	Aprobado
T1-1-21, 22	Aprobado
T1-1-23, 24	Aprobado
T3-2-9, 10, 11	Fallado (20 kV)

Tabla 2(a): Resultados de hipot de CC, aplicación única

Grupo de bobinas	Resultado
T2-3-8, 9	Aprobado
T2-3-10, 11	Aprobado
T1-3-34, 35	Aprobado
T1-3-36, 37	Aprobado
T2-1-8, 9	Aprobado
T2-1-10, 11	Aprobado
T2-1-21, 22	Aprobado
T2-1-23, 24, 25	Aprobado
T2-1-34, 35, 36	Aprobado
T2-1-37, 38	Aprobado

Tabla 2(b): resultados de hipot DC, tres aplicaciones

Grupo de bobinas	Resultado
T3-2-34, 35	Aprobado
T3-2-36, 37	Aprobado
T2-3-21, 22	Aprobado
T2-3-23, 24, 25	Aprobado
T2-3-34, 35, 36	Aprobado
T2-3-37, 38	Aprobado
T3-1-18, 19	Aprobado
T3-1-25, 26	Aprobado
T1-1-7, 8, 9	Fallado (37 kV, 50 s, primer disparo)
T3-2-7, 8	Aprobado

Tabla 2(c): Resultados de hipot DC, cinco aplicaciones

Grupo de bobinas	Resultado
T3-2-29, 30	Aprobado
T2-3-17, 18	Aprobado
T3-2-40, 41	Aprobado
T2-3-28, 29	Aprobado
T2-3-30, 31	Aprobado
T3-1-38, 39	Fallado – 39 kV
T3-2-3, 4	Fallido – 27 kV
T3-2-16, 17	Aprobado

Tabla 3: Resultados de la ruptura de CA, barras sobrevivientes previamente expuestas a cinco aplicaciones de hipot de CA

Grupo de bobinas	Resultado
T3-2-34, 35	Aprobado
T3-2-36, 37	Aprobado
T2-3-21, 22	Fallido – 35 kV
T2-3-23, 24, 25	Fallido – 39 kV
T2-3-34, 35, 36	Fallido – 40 kV, 10 s
T2-3-37, 38	Falló – 36 kV
T3-1-18, 19	Aprobado
T3-1-25, 26	Falló – 39 kV
T3-2-7, 8	Aprobado

Tabla 4: Resultados de la ruptura en CA, barras sobrevivientes previamente sometidas a cinco aplicaciones de hipot DC

Grupo de bobinas	Resultado
T3-2-18, 19	Falló – 35 kV
T3-2-25, 26	Falló – 39 kV
T3-2-31, 32, 33	Falló 1 39 kV
T2-3-19, 20	Falló 1 37 kV
T3-2-38, 39	Aprobado
T2-3-26, 27	Aprobado
T2-3-32, 33	Aprobado
T3-2-5, 6	Fallado 1 39 kV
T1-1-5, 6	Fallado 1 32 kV

Tabla 5: Resultados de la ruptura dieléctrica en CA, sin hipots previos

Después de las pruebas de hipot anteriores, se realizaron pruebas de ruptura dieléctrica en CA hasta un nivel de 40 kV en CA en las bobinas supervivientes de los veinte grupos de bobinas que habían sido sometidos anteriormente a cinco aplicaciones de hipot de CA y CC. El valor de voltaje es aproximadamente un 40% superior al nivel de hipot en CA requerido para arrollamientos nuevos de esta clase de voltaje. Por lo tanto, un total de ocho grupos de bobinas previamente sometidos a cinco hipots de CA y nueve grupos de bobinas sometidos a cinco hipots de CC estuvieron disponibles para esta fase del programa de pruebas. Otros nueve grupos de bobinas, que no habían sido sometidos a ningún hipot, fueron sometidos a pruebas de ruptura en CA como control. El número de grupos de bobinas involucrados en este componente de

estudio estuvo limitado por el tiempo disponible para las pruebas en sitio. Originalmente, el plan de pruebas indicaba que se incluyeran aquellos grupos sometidos a una y tres pruebas de hipot. Los resultados de las pruebas se registraron en las Tablas 3, 4 y 5.

La tensión de ruptura mínima para cualquier grupo de bobinas en la Tabla 3 y 4 es de 27 kV, lo que indica una buena condición del aislamiento en estas bobinas tras cinco pruebas hipot de CA o CC. También un examen cercano de los resultados de las Tablas 3, 4 y 5 indica que aquellos grupos de bobinas que no habían experimentado ningún tipo de pruebas hipot (Tabla 5) no tienen una tensión de ruptura significativamente más alta que los grupos de bobinas que sobrevivieron cinco pruebas hipot de CA o cinco pruebas hipot de CC. Así, estos experimentos demuestran claramente que las pruebas hipot no dañan un sistema de aislamiento en buen estado en los conjuntos de bobinas en estatores de máquinas giratorias.

V. CONCLUSIONES

La experiencia de ingenieros expertos, argumentos teóricos y resultados experimentales de pruebas hipot de CA y CC en un gran número de bobinas conducen a una conclusión contundente de que las pruebas hipot no parecen causar daños significativos al sistema de aislamiento del estator de una máquina rotativa cuando está en condiciones de servicio.

REFERENCIAS

1. ANSI C50.10-1990, Requisitos Generales para Máquinas Sincrónicas.
2. IEEE Std. 433-2009, Práctica Recomendada para Pruebas de Aislamiento de Grandes Máquinas Rotatorias de CA con Alto Voltaje a Frecuencia Muy Baja.
3. IEEE 95-2002, Práctica Recomendada para Pruebas de Aislamiento de Maquinaria Eléctrica de CA con Alto Voltaje Directo.
4. IEC 60034-1 (2002), Máquinas Eléctricas Rotatorias – Parte 1: Calificación y Rendimiento.
5. NEMA MG 1-2006, Motores y Generadores.
6. B.K. Gupta, Greg C. Stone y Jan Stein, Prueba de Hipot de bobinado del estator (Alta Potencial), 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, QC, 31 de mayo al 3 de junio de 2009, Publicación IEEE CFP09EEI-PRT o ISBN 978-1-4244-3916-4, pp 409-413.
7. H.G. Sedding, R. Schwabe, J. Stein y B.K. Gupta, El papel de las pruebas hipot AC y DC en el envejecimiento del bobinado del estator, Proceedings de EIC/EMCW2003, Indianapolis, Indiana, 23-25 de septiembre de 2003, Publicación IEEE03CH37480, pp 455-457.
8. J. Timperley, Pruebas de sobrepotencial a frecuencia de potencia en bobinados de estator instalados de máquinas eléctricas rotativas, Sesión de panel sobre “Pruebas de alta tensión de máquinas rotativas”, IEEE/PES Winter Meeting, Nueva York, NY, febrero de 1997, Publicación IEEE 97TP119-0, pp 14-17.
9. R.E. Draper y R.H. Rehder, Prueba de sobrepotencial de aislamiento en hidrogenadores, Sesión de panel sobre “Pruebas de alta tensión de máquinas rotativas”, IEEE/PES Winter Meeting, Nueva York, NY, febrero de 1997, Publicación IEEE97TP119-0, pp 10-13.
10. Guía para la Prueba Hipot de Bobinado de Estator de Máquinas Rotativas: Actualización 2007, Informe final #1014908, EPRI, Palo Alto, CA: 2008.
11. Greg Stone, Edward Boulter, Ian Culbert y Hussein Dhirani, Aislamiento Eléctrico para Máquinas Rotativas, IEEE Press, 2004, página 46.
12. IEEE Std. 930-1987 IEEE Guía para el Análisis Estadístico de Datos de Ruptura del Aislamiento Eléctrico, Cláusula 6.1, página 25
13. IEC 61251-2007, Materiales Aislantes Eléctricos – Evaluación de Resistencia a Voltaje de CA.
14. IEEE Std. 1043-1996, Práctica Recomendada de IEEE para Pruebas de Resistencia a Voltaje de Barras y Bobinas de devanado formado.

15. IEEE 1553-2003, Norma IEEE para Pruebas de Resistencia a Voltaje de Bobinas Form-Wound y Barras para Hidrogeneradores.