



Modelo de estado para el estudio de las descargas parciales en el aislamiento principal de las máquinas eléctricas rotatorias de gran potencia

Santiago A. Dorrbercker

Recibido: Octubre del 2006

Aprobado: Diciembre del 2006

Resumen / Abstract

Se presenta un modelo de estado que caracteriza la tensión de ignición de las descargas parciales (DP) en el aislamiento principal de las máquinas eléctricas rotatorias de gran potencia (MERGP). Los objetivos del modelamiento se dirigieron en dos vertientes: la primera a conocer el comportamiento del menor nivel de tensión que produce DP y la segunda destinada al comportamiento del tamaño de las cavidades, en las que puede aparecer DP, atendiendo al nivel instantáneo de la tensión de corriente alterna (CA) aplicada a las mismas. El presente trabajo se propone, proveer de una herramienta capaz de modelar el comportamiento de algunos parámetros característicos de las DP en el aislamiento principal de las MERGP, cuando el aislamiento principal es sometido a diferentes condiciones de trabajo.

Palabras clave: Aislamiento, diagnóstico, descargas parciales, MERGP

This paper describes a state model for PD inception voltage in main insulation of big rotating machines (BRM). Intends of the present paper were: to show the behaviour of PD inception voltage under different factors; and to know the relationships between the size of cavities and the instantaneous value of AC applied voltage to the insulation. The objective of this paper is offer a computational tool able to model the performance of some PD characteristic parameters when main insulation is under operation conditions.

Key words: Big rotating machines, modeling, partial discharges

INTRODUCCIÓN

La evaluación del estado del aislamiento del estator de las MERGP abarca una serie de ensayos entre los que se encuentran la evaluación de las pérdidas dieléctricas,¹⁻³ la rigidez dieléctrica,^{4, 5} y las DP.⁶⁻¹² Siendo el ensayo de rigidez dieléctrica el que somete a mayor esfuerzo al aislamiento, dicho ensayo se efectúa por lo general atendiendo a la siguiente relación:

$$U_{ENS(CA)} = 1,25 \cdots 1,5E, \quad (kV)^{13} \quad \dots(1)$$

donde:

E : Tensión nominal entre fases de la máquina en kilovolt (kV).

Si se tiene en cuenta que, aún operando en régimen nominal, existe la posibilidad de que el aislamiento de las MERGP esté sometido a DP,¹⁴ es fácil comprender que dicho fenómeno se intensifica al aplicarse tensiones superiores a la nominal, como ocurre en el caso del ensayo de rigidez dieléctrica (1), acelerando el deterioro del aislamiento.

Otro aspecto relativo a las DP es el que se presenta en las MERGP enfriadas por hidrógeno, en las cuales solo se tiene en cuenta la presión de dicho gas para ajustar los regímenes de operación relativos a su curva de cargabilidad, ignorándose la relación inversa que existe entre la presión de hidrógeno y la tensión de ignición de las DP.

El presente trabajo brinda un modelo para valorar el comportamiento de las DP en el seno del aislamiento principal de las MERGP cuando es sometido a diferentes condiciones de presión, tensión y temperatura, considerando la presencia de aire o hidrógeno.

FUNDAMENTOS DEL MODELO

El desarrollo del modelo propuesto se fundamenta en considerar la presencia de cavidades planas en el seno del aislamiento principal de las MERGP, lo cual es aceptado,¹⁵⁻¹⁸ las cavidades esféricas han sido tratadas por otros autores,¹⁹ pero no son aplicables al objeto de estudio. Por otra parte, para el modelamiento de las DP en las cavidades gaseosas, se partió de la ley de Paschen,^{17,20,21} la cual ha sido empleada para el estudio de DP internas.^{22,23}

El modelamiento efectuado parte de la siguiente expresión que establece el nivel de tensión requerido para que aparezcan DP en una cavidad simétrica y homogénea:

$$U_{DP} = \frac{0,1\gamma A\delta + B\sqrt{0,1\gamma\delta}}{k\sqrt{2}} \cdot \frac{H + \delta(\epsilon_{AIS} - 1)}{\delta\epsilon_{AIS}} \quad \dots(2)$$

donde:

U_{op} : Tensión aplicada al aislamiento a la cual existen DP.

γ : Representa la influencia de la temperatura y la presión del gas en la cavidad.

$$\gamma = (pT_0)/(p_0T).$$

$A \wedge B$: Constantes que dependen del tipo de gas en la inclusión.

δ : Longitud equivalente de la cavidad en el sentido del campo eléctrico.²⁴

H : Pared del aislamiento.

ϵ_{AIS} : Permitividad relativa del aislamiento.

k : Coeficiente que tiene en cuenta la influencia de las aristas de los conductores sobre la intensidad de campo eléctrico.

Adicionalmente se tiene en cuenta la relación entre la tensión de extinción y la tensión de ignición de las DP, es decir:

$$0,5 \leq \left(\eta = \frac{U_{EXT}}{U_{IGN}} \right) \leq 0,8 \quad \dots(3)$$

En la tabla 1 se muestran las constantes de los gases empleados.

Para la programación del modelo se empleó Matlab 6.5.

TABLA 1
Constantes de los gases empleados

Constante	Aire	Hidrógeno
A(kV/cm)	24,5	12,6
B (kV/cm ^{1/2})	6,40	4,37

MODELOS DE ESTADO OBTENIDOS

A partir del procesamiento matemático de las expresiones (2) y (3) se llega al modelo que rige el comportamiento de la tensión mínima que produce DP en un aislamiento en condiciones específicas,²⁵ es decir:

$$U_{DP} = \frac{0,1\gamma A\delta_{MIN} + B\sqrt{0,1\gamma\delta_{MIN}}}{k\sqrt{2}} \cdot \frac{H + \delta_{MIN}(\epsilon_{AIS} - 1)}{\delta_{MIN}\epsilon_{AIS}} \quad \dots(4)$$

donde:

$$\delta_{MIN} = \left(2\sqrt{\left| \frac{\epsilon_{AIS} - 1}{3H} \right|} \cdot \cosh \frac{\varphi}{3} \right)^{-2}$$

$$\varphi = \cosh^{-1} \left[\frac{A(\epsilon_{AIS} - 1)\sqrt{0,1k}}{HB} \left/ \left| \frac{(\epsilon_{AIS} - 1)}{3H} \right|^{\frac{3}{2}} \right. \right]$$

Por otra parte, se desarrolló otro en el cual se tiene en cuenta el comportamiento de la longitud equivalente de las cavidades ($\delta_{(u)}$) con DP, en función de la tensión aplicada en condiciones específicas,²⁵ es decir:

$$U_{DP} = \frac{0,1\gamma A\delta_{(u)} + B\sqrt{0,1\gamma\delta_{(u)}}}{k\sqrt{2}} \cdot \frac{H + \delta_{(u)}(\epsilon_{AIS} - 1)}{\delta_{(u)}\epsilon_{AIS}} \quad \dots(5)$$

donde:

$\delta_{(u)}$: Tiene dos posibles soluciones.

$$\delta_{(u)_{(1)}} = \left[\left(-2 \sqrt{\frac{3A(HCA - \varepsilon_{AIS} k \sqrt{2u}) - \Psi B^2}{9C\Psi A^2}} \cos \frac{\pi \pm \varphi_{COS}}{3} \right) - \frac{B\sqrt{C}}{3AC} \right] \quad \dots(6)$$

$$\delta_{(u)_{(2)}} = \left[\left(-2 \sqrt{\frac{3A(HCA - \varepsilon_{AIS} k \sqrt{2u}) - \Psi B^2}{9C\Psi A^2}} \cosh \frac{\varphi_{cosh}}{3} \right) - \frac{B\sqrt{C}}{3AC} \right] \quad \dots(7)$$

donde:

$$\Psi = \varepsilon_{AIS} - 1$$

RESULTADOS OBTENIDOS

Modelamiento de U_{DP} atendiendo al tipo de gas, presión y temperatura

Partiendo de las expresiones (4) y (5), y conociendo las constantes características para el aire y el hidrógeno (tabla 1), elementos seleccionados para la ejemplificación debido a su presencia generalizada como gases de enfriamiento en las MERGP, se efectuó un modelamiento para: $\eta = 0,8$, $H = 6$ (mm), $k = 1$, $\varepsilon_{AIS} = 4$ y $U_{MÁX} = 24$ (kV).^{22, 26} Para el modelamiento en función de la presión se empleó $T = 75$ (°C), mientras que al modelarse en función de la temperatura se empleó $p = 101,325$ (kPa).

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 1 y 2; puede observarse que, para condiciones similares, la cavidad que contiene aire brinda valores de U_{ING} superiores a los de la cavidad con hidrógeno. Ello confirma que para condiciones similares de presión y temperatura el aire tiene mejor comportamiento ante la aparición de DP que el hidrógeno, independientemente de que el efecto de las DP sobre el aislamiento es más perjudicial en presencia de aire que en presencia de hidrógeno.²²

Modelamiento del comportamiento de δ atendiendo a diferentes condiciones de la tensión aplicada, la presión y la temperatura

En este caso se partió de la expresión (5) con los mismos parámetros especificados con anterioridad aunque adicionalmente se incorpora la tensión como elemento para el modelamiento.

El interés de este modelo está dado, entre otros aspectos, por la posibilidad de conocer los riesgos de aparición de DP a tensiones superiores a la tensión de ignición, así como el comportamiento de las longitudes equivalentes de las cavidades,²⁷ a diferentes tensiones y en función de la temperatura y la presión.

Las figuras 3 y 4 muestran los resultados de los modelos de u_{DP} y $\delta_{(u)}$ de un aislamiento sometido a CA, suponiendo cavidades con hidrógeno (figura 3) y con aire (figura 4), respectivamente, en su interior.

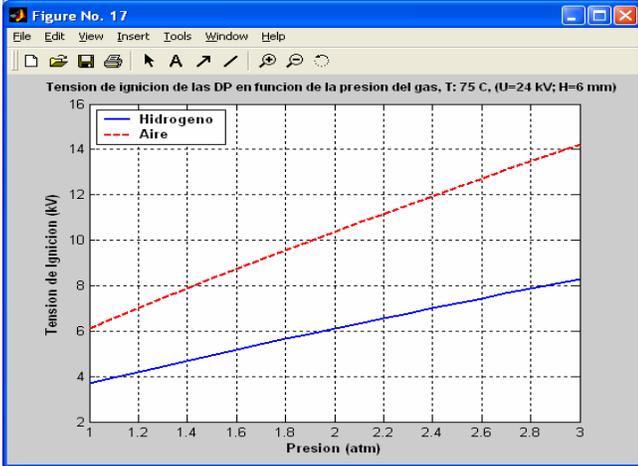
En dichas figuras se observa el comportamiento de la tensión que es capaz de producir DP en el seno del aislamiento; así como el comportamiento, en función de la tensión, de la longitud equivalente de las cavidades en las que pueden aparecer DP.

En la figura 5 se aprecia claramente el comportamiento de las cavidades en función de la tensión y, al igual que en el caso de la tensión de ignición, el aire tiene mucho mejor comportamiento que el hidrógeno ante la aparición de DP.

Modelamiento del comportamiento del campo eléctrico en el aislamiento

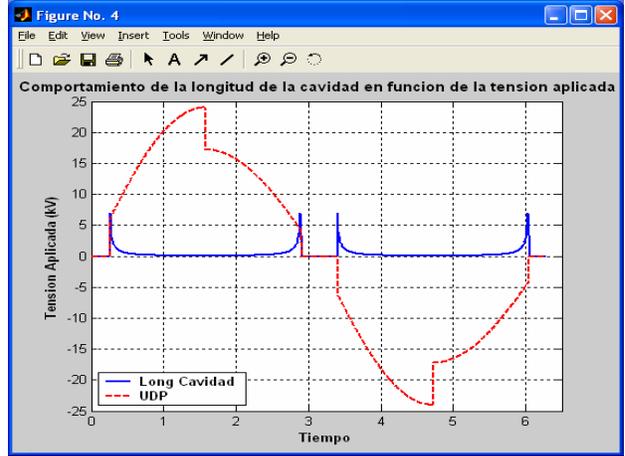
Los resultados del modelo obtenido se compararon además con la simulación mediante elementos finitos.²⁸

En la tabla 2 se ofrecen los resultado de la simulación de una cavidad de sección rectangular ubicada junto a los conductores elementales $U_{DP} = 2,47$ kV.



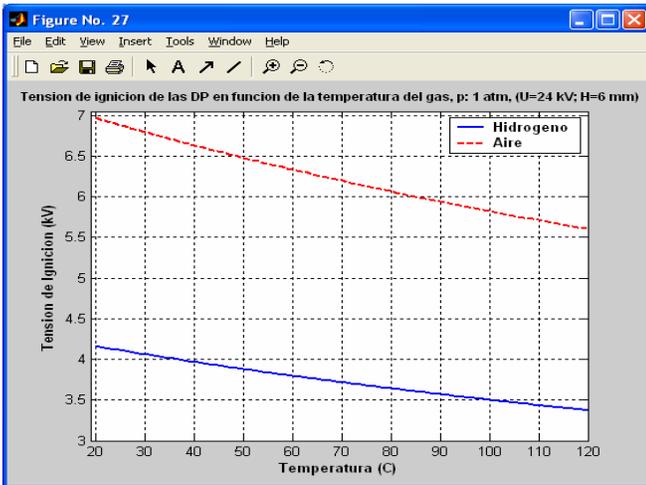
Resultado del modelamiento del comportamiento de la tensión de ignición de DP en función de la presión.

1



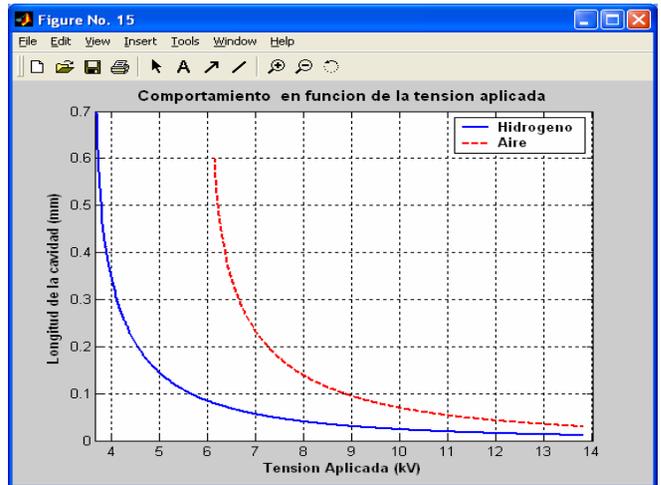
Resultado del modelamiento del comportamiento de la tensión de ignición de DP en función de una tensión sinusoidal suponiendo cavidades con aire en su interior.

4



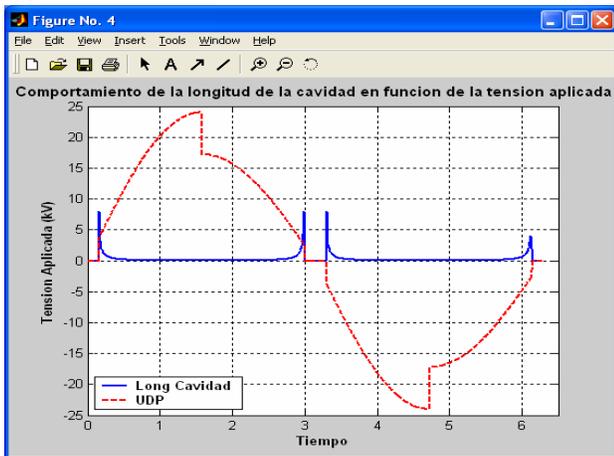
Resultado del modelamiento del comportamiento de la tensión de ignición de DP en función de la temperatura.

2



Resultado del modelamiento del comportamiento de la tensión de ignición de DP en función de la tensión suponiendo cavidades con hidrógeno y aire, en su interior respectivamente.

5



Resultado del modelamiento del comportamiento de la tensión de ignición de DP en función de una tensión sinusoidal, suponiendo cavidades con hidrógeno en su interior.

3

LIMITACIONES DEL MODELO

Independientemente de la validez de los resultados, debido a que el modelo obtenido se sustenta en la ley de Paschen, el mismo solo es válido para $p\delta \geq 1mPa$.

TABLA 2 Intensidad del campo eléctrico (kV/mm)		
Simulación de elementos finitos		
E_{CAV}	Entre	Intensidad media
10 274	9 770 - 10 400	10 085

CONCLUSIONES

Los resultados alcanzados coinciden con el comportamiento teórico esperado. Además, los resultados expuestos ofrecen transparencia sobre los riesgos que se toman al aplicar tensiones de ensayo que pudieran resultar peligrosas para máquinas cuyo aislamiento se encuentra *inmerso* en hidrógeno.

REFERENCIAS

1. "Ensayo de pérdidas dieléctricas al devanado del estator de las máquinas eléctricas rotatorias de gran potencia, in *INA 1.03.14*, p. 7, 2000.
2. "Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip - Up of Rotating Machinery Stator Coil Insulation", in *IEEE Std. 286*, 1975.
3. "Pérdidas dieléctricas del aislamiento principal de las máquinas eléctricas rotatorias de gran potencia", in *GM-PR 6103*, p. 23, 2000.
4. "Ensayo de rigidez dieléctrica con CA al devanado del estator de las máquinas eléctricas rotatorias de gran potencia, in *INA 1.03.15*, p. 7, 2000.
5. "Ensayo de rigidez dieléctrica con corriente alterna al devanado del estator de las MERGP", in *GM-PR 6104*, p. 19, 2000.
6. **Bogh, D. et al.**: "Partial-Discharge-Inception Testing on Low-Voltage Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(1): 148- 154, 2006.
7. **Stone, G.C. and V. Warren**: "Objective Methods to Interpret Partial-Discharge Data on Rotating-Machine Stator Windings", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(1): 195-200, 2006.
8. **Yue, B. et al.**: "Diagnosis of Stator Winding Insulation of Large Generator Based on Partial Discharge Measurement", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2): 387-395, 2006.
9. **Bartnikas, R. and R. Morin**: "Analysis of Multistress-Accelerated Aged Stator Bars Using a Three-Phase Test Arrangement. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(1): 162-170, 2006.
10. **Stone, G. C.**: "Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12(5): 891 - 904, 2006.
11. **Stone, G.C. and V.Warren**: *Objective Methods to Interpret Partial Discharge Data on Rotating Machines*, in *Pulp and Paper Industry Technical Conference, Conference, Record of 2005 Annual*, 2005.
12. DIACS, *Metodicheskie Rekomendatsii Diagnostike, Obemam i Normam Ispitanii Izolyatsii Statomij Obmotok Vraschayuschicya Mashin klasov Napryazheniya 3-24 kV*, ed. Inter, D. Moscú: DIACS Inter. 144, 1999.
13. "56-1977 (Revision of IEEE Std. 56-1958)", *IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10,000 kVA and Larger)*. 1977, Rotating Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society, USA, 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA.
14. **Hutter, W.**: "Partial Discharge - Part XII: Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines",

IEEE Electrical Insulation Magazine, 8(3): 21-32, 1992.

15. **Vakser, N. M.**: *Izolyatsiya Elektricheskij Mashin (Uchebnoe posobie)*, 1 ed., Leningrad, Leningradskii Ordena Lenina Politejnicheskii Institut im. M.I. Kalinina. 83, 1985.
16. **Kulakovskii, V. B.**: *Rabota Izolyatzii v Generatoraj, Voznikovenie i Metodi Viyavleniya Defektov* 11 ed., Energoizdat, 256, Moskva, 1981.
17. **Dmojovskaya, L.F. et al.**: *Tejnika Visokij Napryazhenii*, 1 ed., Moskva: 488, 1976,
18. **Bartnikas, R. and E. J. McMahon**: "Corona Measurement and Interpretation", *Engineering Dielectrics*, Vol. 1, Baltimore: ASTM. 520, 1979.
19. **McAllister, I.W.**: "Partial Discharges en Spheroidal Voids. Void Orientation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 4(4): 456-461, 1979,
20. **Roth, A.; G. de Senarclens y J. Amsler**: Técnica de la alta tensión, 1ra. ed., Editorial LABOR, S.A. 887, 1966.
21. **Alston, L. L.**: *High-Voltage Tecnology*, 1ra. ed., Vol. 1, Oxford: Oxford University, 408, 1968.
22. **Botts, J.C.**: "Corona in High Voltage Rotating Machines", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 4(4): 29-34, 1988.
23. **Hayakawa, N. and H. Okubo**: "Partial Discharge Characteristics of Inverter-Fed Motor Coil Samples Under ac and Surge Voltage Conditions", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 21(1): 5-10, 2005.
24. **Dorrbercker Drake, S.A.**: "Specific Losses. A New Possibility for PD Evaluation", in *CEIDP'98*, 1998.
25. ———: "Detección y evaluación de debilidades en el aislamiento principal de las máquinas eléctricas rotatorias de gran potencia", Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, 1995.
26. **McAllister, I.W. and G.C. Crichton**: "Analysis of the Temporal Electric Fields in Lossy Dielectric Media". *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-26(3): 513-528, 1991.
27. **Dorrbercker Drake, S.A.** Detection and Evaluation on Electric Weaknesses in the Main Insulation of Big High-Power Rotary Machines. in *PSC'96*, Teheran, Iran, 1996.
28. **López Fernández, X. M.; S. A. Dorrbercker Drake and M. Laurentiu, Piper**: Empleo de los elementos finitos en el estudio de las DP en máquinas eléctricas rotatorias, in *II Taller de la Computación Aplicada a la Ingeniería Eléctrica*, Ciudad de La Habana, Cuba, 2002.

AUTOR

Santiago A.Dorrbercker Drake

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