



Matriz de falla de los motores de inducción

Santiago A. Dorrbercker
Sergio J. Fernández
Eugenio R. Barreiro

Luis M. Álvarez
Jorge C. Arce
Yeranis Zurita
Juan M. Palmero

Recibido: Octubre del 2006

Aprobado: Diciembre del 2006

Resumen / Abstract

La matriz de falla es una novedosa herramienta creada que constituye el único modo para la aplicación del diagnóstico integral y tomar las decisiones adecuadas en las instalaciones industriales y su equipamiento. En el presente trabajo se muestra el camino seguido para la obtención de la matriz de fallas correspondiente a los motores de inducción de gran potencia (MIGP). Los resultados obtenidos están soportados en un diagrama de Ishikawa caracterizado por 11 causas principales, 31 subcausas y 36 motivos de falla. Los resultados del presente trabajo constituyen el punto a partir del cual se obtiene la matriz de ensayos de diagnóstico para los MIGP.

Palabras clave: Diagnóstico, diagrama de Ishikawa, matriz de parámetros, motores de inducción de gran potencia

The matrix of failures is a new tool created. It means the only way to take the proper decision and application of integral diagnosis in industrial utilities and equipments. This paper presents the process to obtaining the matrix of failures of big induction rotating machines. In this case results are supported by an ishikawa diagram characterized by 11 main causes, 31 sub-causes and 36 failure roots causes. Results are the starting point to define the matrix of diagnosis test.

Key words: Big induction motors, diagnosis, Ishikawa diagram, matrix of parameters, big rotating machines

INTRODUCCIÓN

Dentro de la familia de las máquinas eléctricas rotatorias se pueden distinguir diversos tipos. Los de más amplia aplicación, y que conciernen a la práctica total de las aplicaciones industriales, se pueden agrupar, atendiendo a sus características en dos categorías bien diferenciadas: Las máquinas pequeñas y las máquinas grandes

Las últimas comprenden a todas las máquinas de tensión y potencia nominal superiores a 2 000 V y 200 kV respectivamente, con bobinas estáticas preformadas.¹ En esta categoría se encuentran los MIGP, objeto de este trabajo.

Existe un gran número de averías capaces de reducir el rendimiento de los motores de inducción de gran potencia (MIGP). Todas ellas se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios: atendiendo a su naturaleza física (mecánicas o eléctricas), atendiendo a su gravedad, y según la parte del proceso o del equipo al que afectan, etcétera.

Para la aplicación del diagnóstico integral son imprescindibles la parte del equipo que se afecta y, en última instancia, el impacto de las mismas sobre el sistema donde se encuentren instaladas. Siendo fundamental disponer de la máxima cantidad de

información posible acerca de su origen, evolución y posibles causas, para el desarrollo de los modelos que posibiliten intervenir en el momento óptimo a los equipos y prevenir las averías.

El diagnóstico integral es una técnica novedosa cuya piedra angular lo constituye la matriz de parámetros óptimos o matriz S ,^{2,3} esta resulta el elemento fundamental para respaldar la introducción del CBM (Condition Base Maintenance).

La obtención de la matriz de parámetros óptimos depende directamente de la matriz de falla⁴⁻⁶ (figura 1). En el caso de los MIGP, independiente de lo reportado para diferentes países,⁷⁻¹⁰ no existe información acerca de la distribución de las fallas ni su impacto para las condiciones de este sistema. Por ello, el objetivo del presente trabajo se ha limitado a la presentación de la matriz de falla de los MIGP, la cual es de aplicación universal.

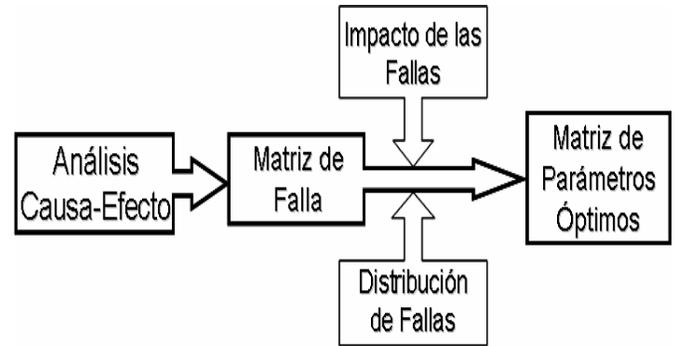
MOTORES DE INDUCCIÓN DE GRAN POTENCIA

Los motores de inducción de gran potencia (MIGP) no se fabrican en serie, sino por encargo, siempre están asociados a las grandes industrias (generación eléctrica, minería, siderúrgica, azúcar, cemento, etc.), en las que su indisponibilidad produce pérdidas cuantiosas. Los fabricantes de MIGP se preocupan por garantizar la calidad óptima del producto, para mantenerse en competencia y facturar ganancias; en tanto, la preocupación de los usuarios de MIGP consiste en mantener un flujo de producción libre de averías o con un costo óptimo de las tareas de mantenimiento.

Con el perfeccionamiento de los sistemas de refrigeración de las máquinas, el aumento de la calidad de los materiales ferromagnéticos, el desarrollo, difusión y éxitos en la química de los polímeros y el empleo de resinas sin solventes, se ha reducido el espacio dedicado al aislamiento a tierra.

Esto ha posibilitado la asignación de más espacio al cobre, lo que permite aumentar la intensidad de la corriente por unidad de área de las ranuras.

Así se ha incrementado su potencia específica haciéndolos más sensibles a los regímenes de explotación. Dichos cambios condujeron a que a partir de la década de los 80 del pasado siglo, se comenzara a manifestar, a nivel mundial, una preocupación especial por el diagnóstico técnico de los MIGP.¹¹⁻¹⁵

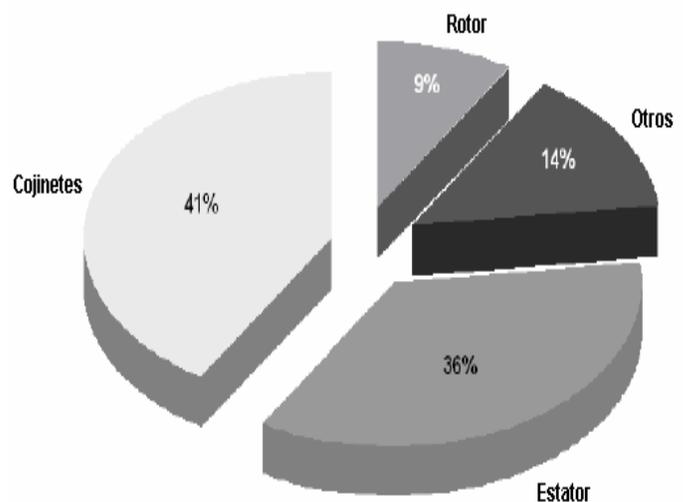


Secuencia básica para la aplicación del diagnóstico integral.

1

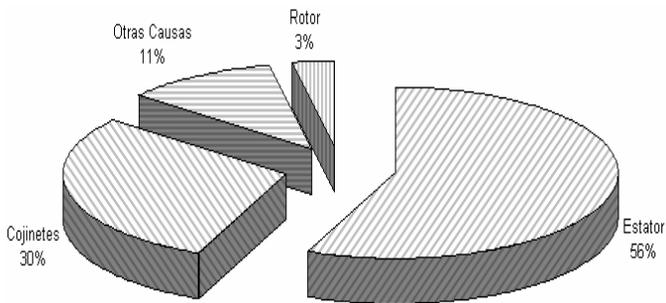
PRINCIPALES FALLAS DE LOS MIGP

Diversos estudios en el extranjero han reportado que la distribución de fallas en los MIGP guarda una proporción similar a la mostrada en el diagrama de la figura 2, sin embargo, extrapolarlo a este sistema puede conducir a la toma de decisiones erróneas las cuales pudieran llevar a pérdidas económicas de consideración, por ejemplo, al menos en una central eléctrica cubana, se reporta que el mayor número de averías en sus MIGP corresponde a fallas en el rotor. No obstante lo anterior, es inobjetable que las fallas en los MIGP se dividen en: Fallas del estator, fallas del rotor y fallas de los cojinetes; a partir de las cuales, es posible, con la participación de expertos, obtener el diagrama causa-efecto correspondiente a las fallas de los MIGP. Ver figura 3.



Comportamiento internacional de la distribución de fallas en las distintas partes de los MIGP.⁹

2



Comportamiento nacional de la distribución de fallas en las distintas partes de los MIGP.

3

Fallas en el estator

Las fallas estatóricas en los MIGP se dividen en: Fallas propias del circuito magnético, fallas propias del aislamiento y fallas por sobrecarga.

Estas fallas pueden ser de origen mecánico, eléctrico, ambiental o una combinación de todas. En cualquier caso son fallas muy costosas pues, por ejemplo, en caso de producirse daños en el núcleo magnético su reparación es difícil y prolongada, pero si además, como normalmente ocurre, la misma abarca al devanado estatórico, esta se hace más costosa aún, pues, por una parte el costo del aislamiento de los MIGP puede importar 50...80 %¹⁶ del costo del resto de los materiales que la componen y además, como es sabido, 90 % de las salidas prolongadas se debe a fallas del aislamiento.⁸

Por otra parte, relativo a las fallas propias del aislamiento, hay que destacar que la causa-raíz de la falla en máquinas *modernas*¹⁷ casi nunca se debe a su envejecimiento normal, es decir, a la resultante de los factores de envejecimiento,¹⁸⁻²⁰ sino a razones puramente mecánicas.¹⁷ De ahí que uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta cuando se diseña un sistema de diagnóstico para MIGP es si la máquina es *moderna* o *antigua*.

Fallas en el rotor

El rotor de los MIGP está constituido por una jaula de ardilla, cuya variedad en el diseño depende principalmente de las características de arranque deseadas para el motor. Por lo general, el aro de cortocircuito no se encuentra en contacto directo con el cuerpo del rotor sino separado de este y las barras se insertan en las ranuras del paquete magnético, sin utilizar ningún material aislante entre las barras y los bordes de las chapas en las caras internas de las ranuras. Debido a ello y las solicitaciones a la que son sometidos, sus partes más críticas son: Las

barras, tanto a la salida del paquete como en la ranura; las soldaduras de unión entre el anillo de cortocircuito y la barra; y el anillo de cortocircuito. Todas ellas, de forma individual o combinadas, pueden conducir a la falla del rotor e introducir *asimetrías rotóricas*. La apertura de las barras puede llevar a daños en el núcleo magnético del rotor.

Otra de las fallas fundamentales asociadas al rotor son las relativas a desbalances mecánicos.

Fallas en los cojinetes

Los cojinetes de los MIGP pueden ser de elementos rodantes o de deslizamiento y sus causas de falla pueden ser tanto de origen mecánico como eléctrico.

Los cojinetes de elementos rodantes, poseen tolerancias muy pequeñas y no permiten movimientos relativos de significación entre el eje y el cojinete. Por lo cual los esfuerzos producidos por el eje son transmitidos a través de los elementos rodantes hasta el anillo exterior del cojinete y de allí hacia su alojamiento (tabla 1).

En la tabla 1 se relacionan las principales causas de fallas en los cojinetes de los MIGP. La matriz de fallas que se ofrece no comprende los fallas de los cojinetes.

TABLA 1
Principales fallas en los cojinetes de los MIGP

Elementos rodantes	Deslizamiento
Sobrecarga estática o dinámica	Sobrecarga
Lubricación inadecuada	Lubricación insuficiente
Error de montaje	Error de montaje
Contaminación externa	Suciedad
Vibraciones en reposo	Corrosión
Corriente a través del cojinete	Cavitación

ANÁLISIS CAUSA-EFECTO DE LAS FALLAS EN LOS MIGP

El análisis causa-efecto es una herramienta que facilita las relaciones que existen entre las fuentes que conducen a un problema determinado.²¹ este puede expresarse como una relación tabulada, sin embargo, su forma más aceptada, debido a la información gráfica que brinda, es el diagrama de Ishikawa.

Inicialmente al aplicar las técnicas para el desarrollo del análisis causa-efecto bastaba con llegar hasta las *fuentes de variación*,²¹ pero en la actualidad, existe la tendencia de abrir el primer nivel, tanto dentro del mismo diagrama principal, como en diagramas causa-efecto de niveles inferiores, teniendo siempre en

cuenta, que en la práctica la profundidad del árbol es de cuatro o cinco niveles como máximo.²¹

En el presente trabajo se adoptó abrir el primer nivel en el mismo diagrama principal, profundizando hasta el quinto nivel. El método recomendado por diagnóstico integral para el desarrollo del diagrama de Ishikawa

pondera el criterio de expertos por encima de la tormenta de ideas, como ocurre habitualmente. Por lo cual, el diagrama obtenido además de nutrirse de los aportes provenientes de la literatura consultada, contiene la experiencia tributada por expertos de casi todo el país. En la figura 3 se muestra el diagrama causa-efecto de las fallas en los MIGP.

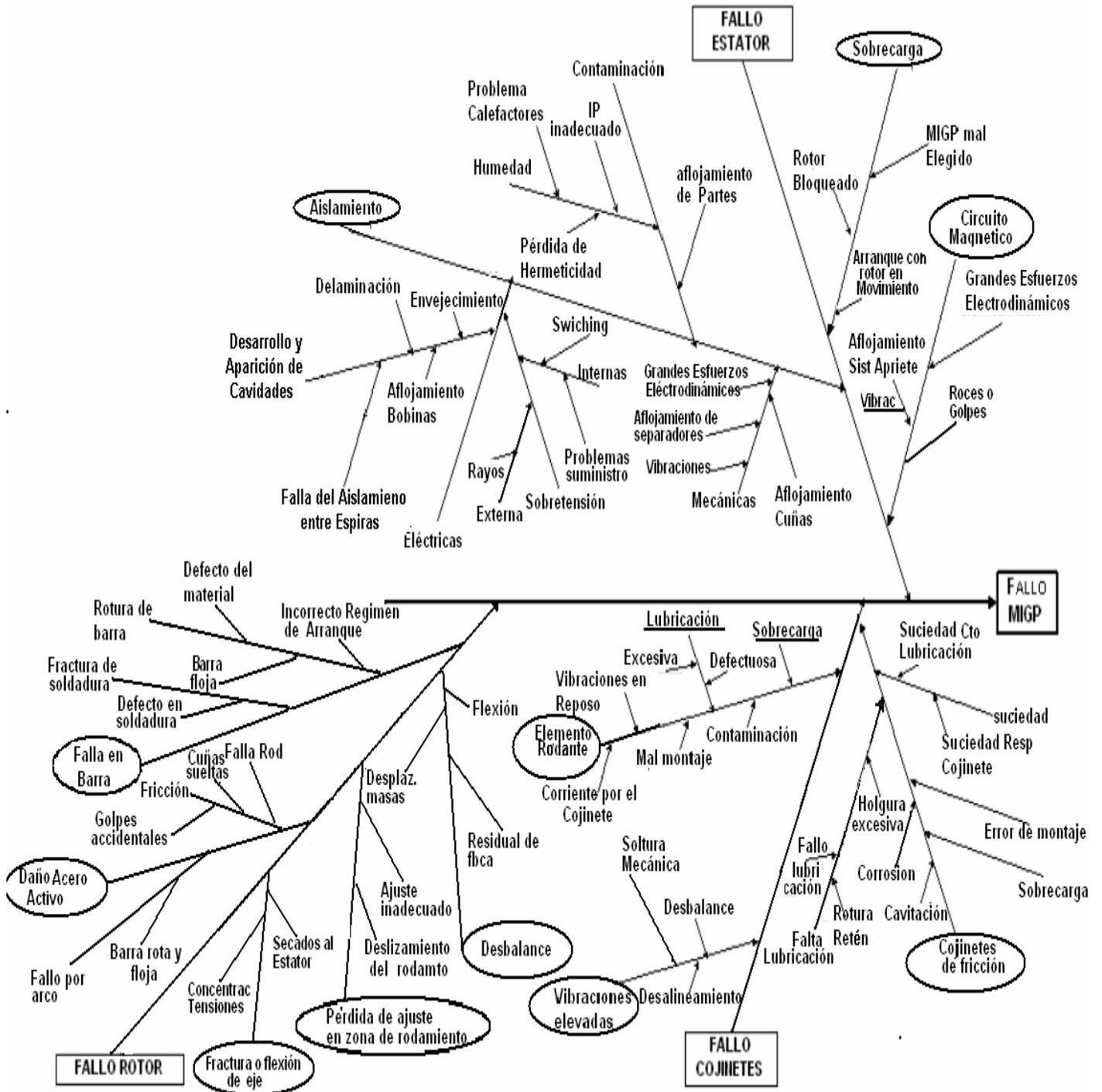


Diagrama causa-efecto de las fallas en los MIGP.

MATRIZ DE FALLAS DE LOS MIGP

A partir de la obtención del diagrama de Ishikawa (figura 3) se procede a la confección de una matriz compuesta por fallas vs. métodos de detección de la falla, denominada *matriz de falla*.³

La matriz de falla se caracteriza por indicar qué método es aplicable a la detección de cada falla, y, si el método corresponde a la medición de algún parámetro, cómo es su comportamiento (tabla 2).

Además, la matriz de falla se complementa con la descripción del comportamiento de cada uno de los parámetros que la componen.

En la figura 4 se muestra la matriz de falla de los fallos del rotor y el estator de los MIGP.

Otros aspectos fundamentales de la matriz de fallas lo constituyen el total de cubrimiento y el factor de cubrimiento de fallas. El primero se refiere al total de fallas posibles a detectar con la aplicación de cada uno de los métodos propuestos, mientras que el factor de cubrimiento indica qué porcentaje del total de fallas identificadas se cubre con cada método, respectivamente.

Un complemento de la matriz de falla lo constituye el análisis de Pareto (figura 5), el que facilita, a partir del criterio de cubrimiento de las fallas, el peso relativo de cada uno de los métodos identificados.

Símbolo en la celda	Descripción
X	El método no es aplicable Se aplica el método
↗	El parámetro medido aumenta su magnitud
↘	El parámetro medido disminuye su magnitud
↔	El parámetro medido varía su magnitud

TIPOS DE FALLAS	Inspección Visual	Descargas Parciales	Vibraciones	Rigidez Dieléctrica	Tangente δ aislamiento	Temperatura	Resistencia aislamiento	Espectro o-mente estator	Corriente de Sec. Negativa	Pérdidas Magnéticas	Resistencia del Devanado	Corriente de vacío	Corriente	Imp. de Sec. Negativa	Corriente de Sec. Cero	FD. Impulsos	ΔT Aire de enfriamiento
Eléctrica, aislamiento del Estator a tierra	X			↗	↗		↗								↗		
Eléctrica, aislamiento del Estator/ espiras						↗		↔	↗					↗		↗	
Eléctrica aislamiento entre Fases	X	↗		↗	↗		↗										
Cubierta Semiconductora	X	↗		↗	↗												
Aflojamiento de cuñas	X	↗	↗														
Aflojamiento de Bobinas en Ramra	X	↗	↗	↘	↗												
Aflojamiento de Bobinas en las Cabezas	X		↗	↘													
Contaminación y Humedad	X	↗		↘	↗		↘										
Aislamiento bushings	X	↗		↘	↗		↘										
Circuito magnético	X		↗			↗			↗	↗							
Asimetría del devanado			↗			↗		↔	↗	↗	↔	↔	↔	↘			
Barras rotas en el rotor	X		↔					↘									
Desbalance Tensiones			↗			↗		↔	↗	↗		↔	↔				
Fallo del enfriamiento		↗				↗					↗						↗
Total de Cubrimiento	10	7	7	7	6	5	4	4	4	3	2	2	2	2	1	1	1
Factor de Cubrimiento	71,4%	50,0%	50,0%	50,0%	42,9%	35,7%	28,6%	28,6%	28,6%	21,4%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%	7,1%	7,1%	7,1%

Matriz de fallas (parcial) de las fallas del rotor y el estator de los MIGD.

El empleo de la matriz de falla como producto terminado para la aplicación del diagnóstico puede conducir a pérdidas económicas, pues pudieran invertirse recursos de consideración en la implantación de una técnica que alivie un grupo de fallas, quizás numerosas pero de impacto despreciable (muchos triviales).

El empleo de la matriz de falla es una técnica más transparente que el de otros métodos propuestos con anterioridad, como por ejemplo, el mostrado en la tabla 3, aplicada en una encuesta efectuada en 1987,²² la cual nominaliza y describe el alcance de una serie de métodos para el diagnóstico de las bobinas del estator de las máquinas eléctricas rotatorias de gran potencia, donde están incluidos los MIGP, pero soslaya el cubrimiento de fallas de los ensayos que propone.

Método	Objetivo
Inspección visual	Detección de defectos visibles, producidos por eventos destructivos. Por ejemplo, pérdidas de partes, señales de descargas parciales, calentamientos excesivos, etcétera
Medición de la resistencia de aislamiento del devanado respecto a tierra	Evaluación de la presencia de humedad y contaminantes del aislamiento
Medición de la corriente de CD en función de la tensión respecto a tierra	Detección de heterogeneidades locales en el aislamiento, tales como: - Fisuras en el aislamiento - Conductividad superficial - Tracking
Ensayo con CA (excepcionalmente con CD)	Detección de debilidades en el aislamiento y evaluación del nivel mínimo de rigidez dieléctrica en el devanado
Medición del factor de pérdidas dieléctricas (tanδ)	Evaluación de las pérdidas dieléctricas de la homogeneidad del aislamiento así como de su capacitancia
Mdición de las DP en función de la tensión	Evaluación de las descargas parciales y de su intensidad
Verificación del acuañamiento de las ranuras	Evaluación desde el punto de vista mecánico de las barras del devanado
Ensayo de tensión de choque con una tensión oscilante a las bobinas	Evaluación del aislamiento y la tensión de rigidez dieléctrica entre las espiras de las bobinas multiespiras

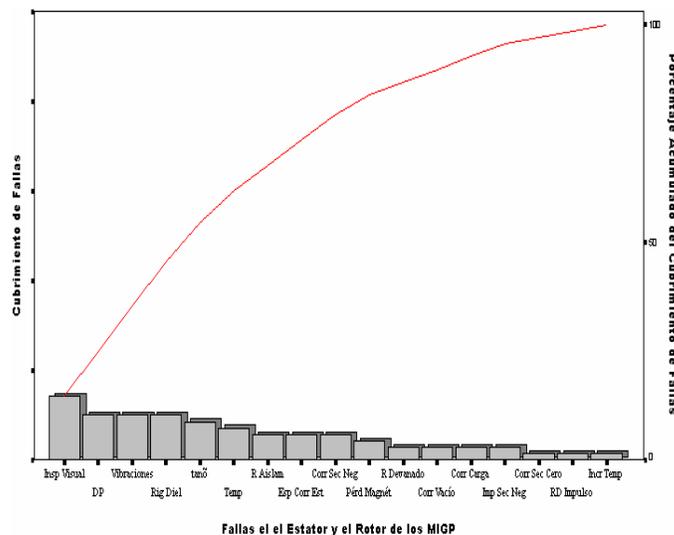


Diagrama de Pareto correspondiente a la fallas del rotor y del estator.

5

CONCLUSIONES

La matriz de falla de los MIGP constituye un método novedoso y de fácil obtención. Cuando la misma es desarrollada con la participación de expertos con pericia y conocimientos demostrados, esta puede ser universal y aplicable a otros sistemas y su *actualización* dependerá de los avances tecnológicos y la existencia de nuevos métodos.

Aunque la aplicación fundamental de la matriz de falla es emplearla en la confección de la matriz de parámetros óptimos, esta pudiera servir como guía en la selección de los métodos a emplear en la detección de las fallas que con mayor frecuencia se presentan en los MIGP. Ello teniendo en cuenta que, en última instancia, el empleo de la matriz de falla como producto terminado para la aplicación del diagnóstico puede conducir a pérdidas económicas, pues pudieran invertirse recursos de consideración en la implantación de una técnica que alivie un grupo de fallos, quizás numerosos pero de impacto despreciable (muchos triviales).

REFERENCIAS

- Dorrbercker Drake, S.A.:** "Detección y evaluación de debilidades en el aislamiento principal de las máquinas eléctricas rotatorias de gran potencia", Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, Cuba, 1995.
- Ramírez Fiallo, O.:** "Modelación físico-matemática para el diagnostico de grandes transformadores en tiempo real", Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, Cuba, 2001.
- Chaviano Bernal, S.:** "Factibilidad técnico-económica de la Introducción del sistema MBC en equipos rotodinámicos", Facultad de Ingeniería Eléctrica, Ciudad de La Habana, Cuba, 2004.

4. **Fernández García, S. J.:** *Diagnóstico en tiempo real, Automatizando*, La Habana, 1998.
5. **Fernández García, S. J.:** "Diagnóstico, táctica y estrategia, *Ingeniería Energética*, XX(4): pp. 47-53, 1999.
6. **Fernández García, S.J. et al.:** "Proyecto de un sistema integral de diagnóstico", *Ingeniería Energética*, XX (4): pp. 73-77, 1999.
7. **Gleichman, R.C.:** Failure Modes and Field Testing of Medium-Voltage Motor Windings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(5): pp. 1473-1476, 2002.
8. **Kotelenets, N. F. and N. L. Kuznetsov:** *Ispitaniya y Nadezhnost Electrichekiskij Mashin*, Visshaya Shkola, Moskva, 1988.
9. **Belmans, R. and K. Hameyer:** *Different Approaches to the Preventive Maintenance of Induction Motors*, in International Conference on Electrical Machines, Vigo, España, 2003.
10. **Fernández Cabanas, M., et al.:** *Técnicas para el mantenimiento predictivo y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*, 1ra. ed., España, 388.
11. **Reynolds, P.H. and S.A. Leszczynski:** "D.C. Insulation Analysis: A New and Better Method", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(1): pp. 1746-1749, 1985.
12. **Thermal Rating IEEE Standards Coordinating Committee 4, U., IEEE Guide for Aging Mechanisms And Diagnostic Procedures in Evaluating Electrical Insulation System**, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. p. 12, 1986.
13. **Yoshida, H. and K. Umemoto:** "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-21: pp. 1021-1025, 1986.
14. **Stone, G.C., et al.:** "The Ability of Diagnostic Tests to Estimate the Remaining life of Stator Insulation", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 3(4): pp. 833 - 841, 1988.
15. **Magallanes, R. L.:** *La medición de descargas parciales. Un recurso para el diagnóstico de las condiciones operativas del aislamiento en máquinas eléctricas rotorias*, TECNOLAB, pp. 11-20, 1988.
16. **Kuchinskii, G. C.; B. E. Kizevter and Yu.S. Pintal:** *Ozolyatsiya Ustanovok Visokogo Napryazheniya*, Energoatomizdat. Moskva, 1987.
17. **Fritsch, T.:** "Aumento de la duración de vida de los alternadores de centrales térmicas", in *Symposium sobre Centrales Térmicas. Alargamiento de Vida residual*, Sevilla, España, 1986.
18. "IEC 60505 Ed. 2.0 s, Evaluación y calificación de los sistemas de aislamiento eléctrico (Versión Oficial en Español)", in *Secondary Evaluación y Calificación de los Sistemas de Aislamiento Eléctrico* (Versión Oficial en Español), Secondary Author, Editor^Editors, 1999.
19. "ANSI/IEEE Std 434-1973, IEEE Guide for Functional Evaluation of Insulation Systems for Large High-Voltage Machines", in *Secondary IEEE Guide*

for *Functional Evaluation of Insulation Systems for Large High-Voltage Machines*, Secondary Author, Editor^Editors. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 20, 1973.

20. **Kulakovskii, V. B.:** *Rabota Izolyatzii v Generatoraj. Voznikovenie i Metodi, Viyavleniya Defektov*, 1 ed., Energoizdat, Moskva, 1981.

21. **Vanderbilt, Ishikawa:** *Diagram*. [cited 2005 Jun. 01, 2005]; Available from: <http://mot.vuse.vanderbilt.edu/mt322/Ishikawa.htm>.

22. **Schuller, R.H.:** "Report on Diagnosis and Monitoring for Evaluating the Condition of Windings of Rotating Electrical Machines", *Electra* (112): pp. 9-16, 1986.

AUTORES

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

Sergio J. Fernández García

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:sfg@electrica.cujae.edu.cu

Eugenio R. Barreiro Chiong

Ingeniero Electricista, Central Termoeléctrica 10 de Octubre, Nuevitas, Camagüey, Cuba,
e-mail:planmtto@ctenue.une.cu

Luis M. Álvarez González

Ingeniero Electricista, Grupos Electrónicos y Sistemas Eléctricos (GEYSEL), Camagüey, Cuba

Jorge C. Arce Miranda

Ingeniero Electricista, Especialista en Diagnóstico CTE Máximo Gómez, Mariel, La Habana, Cuba
e-mai:arce@ctemariel.une.cu

Yeranis Zurita García

Ingeniera Electricista, CTE Carlos M. de Céspedes, Cienfuegos, Cuba
e-mail:zurita@ctecmc.une.cu

Juan M. Palmero Barrios

Ingeniero Electricista, CTE Este Habana, Santa Cruz, La Habana, Cuba
e-mail:miguelpal@ctehabana.minbas.cu