

Estado del arte y nueva variable de estado para diagnosticar la excentricidad en generadores sincrónicos

Pablo Tomás Herrera-Basabe & Oreste Hernández-Areu

*Facultad de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
pablotohe@electrica.cujae.edu.cu, orestesh@electrica.cujae.edu.cu*

Received: December 13th, 2023. Received in revised form: May 15th, 2024. Accepted: June 14th, 2024.

Resumen

La excentricidad en los generadores sincrónicos de polos salientes (GSPS) es un modo de fallo que requiere de una atención particular producto a su posible consecuencia catastrófica. Para diagnosticarla, los especialistas se han centrado en el espectro de frecuencia de la corriente del estator, obtenido por la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Otras técnicas como el análisis de la corriente en transitorios, el flujo y las vibraciones, han probado ser fuentes de información valiosa.

La publicación persigue ilustrar el estado del arte sobre el diagnóstico de la excentricidad en los GSPS y propone una nueva variable de estado para el diagnóstico de este modo de fallo con el activo en servicio. Como resultado del trabajo sobre la tecnología y la investigación teórica realizada, se concluye que es posible diagnosticar la excentricidad del generador eléctrico a partir del comportamiento de la corriente por el neutro de la máquina en operación.

Palabras Claves: diagnóstico a máquinas eléctricas; grupos electrógenos; generador sincrónico.

State of the art and new state variable to diagnose eccentricity in synchronous generators

Abstract

Eccentricity in salient poles synchronous generators (SPSG) is a failure mode that requires particular attention due to its possible catastrophic consequence. To diagnose it, specialists have focused on the frequency spectrum of the stator current, obtained from the Fast Fourier Transform (FFT). Other techniques, such as transient current analysis, flux and vibration have proven to be valuable sources of information.

The paper aims to illustrate the state of the art on the diagnosis of eccentricity in SPSG and proposes a new state variable for the diagnosis of this failure mode with the asset in service. As a result of the work on the technology and the theoretical research carried out, it is concluded that it is possible to diagnose the eccentricity of the electric generator from the behavior of the neutral current of the machine in operation.

Keywords: diagnosis to the electrical machines; generator set; synchronous generator.

1 Introducción

1.1 Actualidad de los sistemas de generación distribuida

El término generación distribuida no tiene un consenso en el campo científico internacional, abarcando diferentes definiciones tales como la planteada por [1], donde expone que es: la generación de electricidad producidas por plantas

pequeñas (menor a 10 MW), con capacidad suficiente para interconectarse al sistema eléctrico, considerando su propósito, ubicación, capacidad nominal, nivel de tensión y características de la zona a servir.

De igual modo, [2] explica que es la generación de energía eléctrica con fines de autoabastecimiento y acoplada a la red de distribución. En cambio, [3] relaciona las definiciones abordadas por instituciones internacionales,

How to cite: Herrera-Basabe, P.T., and Hernández-Areu, O., Estado del arte y nueva variable de estado para diagnosticar la excentricidad en generadores sincrónicos DYNA, 91(232), pp. 159-165, April - June, 2024..

como: IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers por sus siglas en inglés), que la define como las centrales de generación, acopladas al sistema eléctrico a través de un punto de conexión común, mientras que el CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques, por sus siglas en francés), amplía que son centrales generadoras no gestionada su operación centralmente, con capacidades entre 50 y 100 MW. Del mismo modo el US. DOE (United States Department of Energy) y el EPRI (Electric Power Research Institute), sostienen que la Generación Distribuida, está constituida por plantas generadoras con capacidades que varían entre 1 kW hasta 50 MW¹.

En consecuencia, con las definiciones anteriores, se puede definir la generación distribuida como el conjunto de plantas de generación eléctrica descentralizadas, aisladas o interconectadas a un sistema eléctrico, con fines de autoconsumo o públicos, contribuyendo al incremento de la confiabilidad y la eficiencia del sistema y la calidad del servicio al consumidor final, siguiendo las regulaciones establecidas por el país.

1.2 Contexto mundial

El mundo moderno trabaja en la optimización de los recursos técnico, económicos y humanos, así como la reducción del impacto medioambiental, para ello, se diversifican las tecnologías de generación, abandonando, en muchos casos las antiguas, grandes y costosas plantas de generación de electricidad para reorientar los esfuerzos hacia la generación distribuida con vista a disminuir los costos de inversiones y hacer resilientes las decisiones para expandir el servicio eléctrico a una mayoría. Se plantea que con la implementación de la generación distribuida se reducen los costos asociados a las pérdidas por conceptos de transmisión y distribución en un 5 al 10 % de la energía generada [1].

Por otro lado, existen países pobres, donde la generación distribuida es la única forma de disfrute del servicio eléctrico, accediendo a este, unas pocas horas al día durante todo el año para el consumo doméstico y en ocasiones, solo como parte de servicios básicos de vida, como en abastos de agua, y centros de socialización entre otros.

En América Latina, se han expandido las formas flexibles de generación distribuida diversificando las tecnologías de generación, con fuentes convencionales y renovables de energías. Actualmente, el empleo de grupos electrógenos como una de las formas de generación distribuida, ha sido utilizada para incrementar la capacidad generadora, a partir de las bondades de la tecnología como su fácil operación, su bajo costo de inversión y de operación en comparación con las grandes centrales termoeléctricas. Con la implementación de instalaciones generadoras con grupos electrógenos, se ha llevado el servicio eléctrico a lugares remotos, donde las inversiones en infraestructuras eléctricas son un obstáculo para mejorar la calidad de vida de la población.

2 Desarrollo

2.1 Fallas más significativas en los generadores eléctricos de polos salientes

Basado en los reportes técnico emitidos por IEEE y EPRI, los fallos de mayor ocurrencia en los generadores sincrónicos de polos salientes son los de excentricidad, cortocircuitos y circuitos abiertos, siendo los de excentricidad los que más prevalecen al ser un síntoma de daños en los rodamientos de apoyo del eje del rotor.

Por este motivo, minimizar este modo de fallo es un reto vital para garantizar la confiabilidad del activo y la estabilidad en la producción de energía eléctrica de las plantas generadoras y con ello la salud del sistema eléctrico.

2.2 Diagnóstico de excentricidades en máquinas eléctricas rotatorias

Según reportes de IEEE y EPRI; el modo de fallo por excentricidad del conjunto estator-rotor es una de las fallas más críticas porque causa daños irreversibles al generador sincrónico. Provocan alteraciones en las características de operación, tales como: aumento de los armónicos de tensión y corriente, reducción de la eficiencia, aumento de la temperatura, y del par pulsante, entre otras [4].

Se plantea que las excentricidades aparecen cuando el entrehierro no es uniforme, teniendo un origen multifactorial. Además, el incremento en la excentricidad a niveles fuera de los rangos admitidos, puede conllevar al daño catastrófico del conjunto estator – rotor y en consecuencia la parada imprevista de la máquina, conjuntamente con costosas reparaciones [6].

2.3 ¿Qué es la excentricidad del entrehierro?

La bibliografía técnica expone tres tipos principales de excentricidades: las estáticas, las dinámicas y las mixtas [4, 7, 8].

Excentricidad estática. Es la condición en la que la menor distancia entre el rotor y el estator de la máquina permanece fija en el espacio. En este estado, existe una coincidencia entre el eje de giro del rotor y su eje geométrico, no siendo así con el eje geométrico del estator. Las causas más comunes de este modo de fallo son: la ovalidad del núcleo del estator o el desalineamiento del rotor en el estator, como consecuencia de una incorrecta fijación o el deterioro de los rodamientos que soportan el eje del rotor, deformación de sus fijaciones en las tapas que sostienen los rodamientos, tolerancias excesivas, etc.

Excentricidad dinámica. Se produce cuando la longitud de mínimo entrehierro no permanece fija en el espacio. En esta condición, existe coincidencia del eje geométrico del estator y el eje de rotación del rotor, no así con el eje geométrico del rotor. Se destacan como causas fundamentales de este modo de fallo: el desalineamiento en

¹ Ramos, E., La generación distribuida: El camino hacia la producción descentralizada de electricidad y pautas para su reglamentación. Forseti. Revista de derecho, 2020, (p.9).

el montaje de los rodamientos, el desgaste de estos y las resonancias a velocidades críticas, etc.

Excentricidad mixta. Constituye el modo de fallo más común en las máquinas eléctricas rotatorias, donde se combinan ambas excentricidades.

2.4 Métodos actuales utilizados en el diagnóstico de excentricidades

En la actualidad existen varios métodos para el diagnóstico de excentricidades en las máquinas eléctricas rotatorias. Estos se han enfocado más en el diagnóstico de los motores de inducción, no siendo así en los generadores sincrónicos [9]. Entre estos métodos, están los métodos invasivos y los no invasivos. Los invasivos consisten en crear formas de acceso al interior de la máquina, para acceder a los parámetros de comportamiento que intervienen en la excentricidad. Los no invasivos, son aquellos que no requieren del acceso al interior de la máquina para su diagnóstico y, por ende, sacar la máquina de servicio.

Para el diagnóstico de este modo de fallo en la máquina eléctrica rotatoria, los especialistas en la industria habitualmente han centrado la atención en encontrar el espectro de frecuencia de la corriente del estator, mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), identificando el nivel de excentricidad a partir de la amplitud de dichos armónicos. También se destacan como otras técnicas empleadas, el análisis de la corriente en transitorio, el análisis de flujo y el análisis de las vibraciones, los cuales han demostrado ser eficaces. Se recomienda para mejor precisión en el diagnóstico, integrar las diferentes técnicas y métodos entre sí. Los métodos de análisis de las corrientes y flujo de dispersión son técnicas muy versátiles para aplicaciones complejas o de difícil acceso, en donde la instrumentación para realizar la medida de vibraciones u otro aparato de diagnóstico no sea posible emplear [6].

Aunque la mayoría de las investigaciones relacionadas con el diagnóstico de este modo de fallo en las máquinas eléctricas rotatorias, tratan sobre su aplicación en los motores de inducción, la literatura científica actualizada aporta gran volumen de información sobre este modo de fallo en generadores. Como novedad, los diagnósticos modernos requieren, no solo, la discriminación entre un estado de la máquina sana y uno defectuoso, sino también, la identificación confiable y la estimación del nivel de gravedad de la falla, que permita la planificación de las acciones de mantenimiento y del servicio [10].

2.4.1 Monitoreo de la densidad del flujo magnético.

En un generador sano y con el entrehierro simétrico, la densidad de flujo es uniforme. La falla de excentricidad, conduce a un entrehierro asimétrico, trayendo consigo la distorsión en la densidad de flujo magnético. El monitoreo del flujo del entrehierro es uno de los métodos invasivos que se ha utilizado para investigar la ocurrencia de fallas de excentricidad en el generador sincrónico. Para ello, se inserta en la ranura del estator, un sensor llamado sonda de flujo o bobina de búsqueda [4].

Una forma más económica para monitorear la densidad de flujo magnético del entrehierro, es a través de la tensión terminal de la máquina, al no requerir de la introducción de sensores en el estator, ya que esta variable tiene relación directa con la distorsión del patrón de flujo magnético causado por una falla de excentricidad. Sin embargo, existen otros factores que distorsionan el flujo magnético del entrehierro, como son los armónicos debidos a la estructura sincrónica del generador, el cortocircuito de barras del estator o del devanado del rotor y la rotura de la barra de amortiguación de los polos del rotor. En consecuencia, la señal del flujo magnético del entrehierro, no es efectiva para la detección de fallas de excentricidad, debido que no constituye un método ventajoso para distinguir el tipo y la gravedad de la falla de excentricidad en el generador sincrónico [4].

2.4.2 Monitoreos de las corrientes del estator

En la investigación realizada por [4], se exhibe que el 85% de las fallas de excentricidad dinámica en el generador sincrónico de polo saliente, provoca el aumento de la magnitud de los armónicos de corrientes del estator y aunque el incremento en los armónicos 3^{er}, 17^{mo} y 19^{no}, se ha utilizado como índice para la detección del fallo, este indicador no ha sido una herramienta suficiente para la detección de fallos por excentricidad, ya que estos armónicos existen inherentemente en señales de la máquina sincrónica debido a su estructura. También, los componentes de armónicos en los sistemas de potencias causados por cargas no lineales son similares a los armónicos mencionados anteriormente.

El uso de este método se basa en el análisis del espectro de frecuencia de las corrientes de fases del estator, mediante la Transformada Rápida de Fourier. Como inconveniente de este método está que su sensibilidad es bastante baja, y para percibir cambios apreciables, se requiere un alto grado de excentricidad en la máquina [11].

2.4.3 Monitoreo de la tensión del estator

A través de la tensión de fase del estator del generador sincrónico, se puede detectar un fallo de excentricidad, ya que la asimetría estimula armónicos de alto orden en esta variable. El armónico de orden 21^{er}, se ha utilizado como índice para el diagnóstico de fallas de excentricidad y aunque este índice tiene una alta sensibilidad ante fallas de excentricidad, puede verse afectado por el ruido. También los armónicos de tensión de fase como 3^{er}, 5^{to}, 13^{er}, 17^{mo} y 19^{no}, han sido utilizados como índices para el diagnóstico de excentricidad, sin embargo, la forma del estator, las ranuras del rotor, la saliencia del polo del rotor y la conexión en serie o en paralelo del devanado del estator, también tienen efecto sobre los armónicos mencionados [4].

2.4.4 Monitoreo del flujo de eje y tensión de eje

En una máquina ideal, el flujo que interactúa con todos

los pares de polos es idéntico. Cuando el activo se encuentra bajo el efecto de una falla de excentricidad, se pierde la simetría del entrehierro y en consecuencia se afecta el flujo magnético en el rotor. Esta variable se conoce como flujo de eje de la máquina. El rango de tensiones inducidas en el eje varía desde unos mV hasta cientos de mV en correspondencia con la potencia de la máquina.

Los resultados experimentales demuestran, que la falla de excentricidad genera tensión en el eje y su magnitud tiene relación directa con la gravedad de la falla de excentricidad. Aunque los armónicos 5^{to}, 6^{to} y 8^{vo} de tensiones en el eje, se han utilizado como índices de falla de excentricidad, hay muchos factores que conducen a una densidad de flujo magnético desequilibrado del entrehierro y generan tensión en el eje. El flujo magnético del eje existe en una máquina sincrónica sana debido al hueco de soldadura y la forma que hacen que el núcleo del estator se convierta en asimétrico [4].

2.4.5 Crítica a los métodos presentados

En concordancia con lo analizado y resumido en [4], los métodos propuestos presentan desventajas que afectan su uso para la detección de fallos de excentricidad.

- El monitoreo de la densidad del flujo magnético es un método invasivo costoso, que requiere de la existencia de la sonda de flujo insertada dentro de la ranura del estator de la máquina, por lo que no es aplicable al generador que esté funcionando.
- El monitoreo de los armónicos de corriente del estator del generador no resulta eficaz para diagnosticar el fallo de excentricidad cuando se encuentra en presencia de cargas no lineales. Aunque, variaciones temporales del vector espacial de corriente del estator, son una medida apropiada para el reconocimiento del tipo de fallo de excentricidad, la severidad de la falla no puede ser estimada por este indicador.
- El monitoreo a través del contenido de armónicos de la tensión de fase en el generador sincrónico se ve afectado bajo carga no lineal, así como también en condiciones de carga nominal, debido al aumento de los niveles de ruido. Por otro lado, los armónicos pares de la frecuencia fundamental en el devanado del campo del excitador, también aparecen en presencia de otras fallas como cortocircuito y falla de barra rota del amortiguador.
- El monitoreo de la tensión de eje y el flujo de eje son métodos invasivos que requieren para su implementación de equipos sensibles, además, este método no permite reconocer el tipo de fallo por excentricidad ni su severidad.

2.5 Métodos empleados para el modelado de los generadores sincrónicos en general

Los generadores sincrónicos son modelados generalmente mediante el empleo de cuatro métodos: Modelo dq0, Enfoque de función de bobinado (WFA), Modelo de dominio de fase (PDM) y Método de Elementos Finitos (FEM). Siendo el primero el más simple de los métodos,

aplicable solamente para condiciones de simetría y balanceado de la máquina, lo que lo hace una herramienta útil para predecir el comportamiento en un generador sano, no así para la detección de fallas graves que generen condiciones de asimetría en el sistema electromagnético de esta [9].

Debido a las inconveniencias del Modelo dq0 para la modelación de fallas internas en la máquina sincrónica, los modelos de fallas generalmente se derivan en el dominio de fase, donde las ecuaciones de tensión y flujo inducido se desarrollan directamente en la referencia de fase fija sin transformación de coordenadas. Este método centra su clave de éxito en el cálculo preciso de la inductancia del devanado defectuoso para modelar el fallo interno de la máquina sincrónica. La complejidad que implica el cálculo de estas inductancias en las máquinas sincrónicas de polos salientes, fundamentalmente en máquinas con muchas bobinas tanto en el devanado del estator como del rotor, impide la generalización de este modelo [12].

La falla interna en el generador sincrónico, ha sido modelada en [12] basada en la WFA, en esta se brinda un nuevo procedimiento de estimación de la inductancia, la cual integra todos los armónicos espaciales en la modelación de fallas. Con el empleo del método WFA, se pueden modelar las diferentes condiciones de fallos de la máquina eléctrica. Esta técnica requiere para su aplicación, asumir que se desprecia el efecto de las ranuras del estator, la histéresis magnética y además la saturación del hierro [9]. Estos supuestos, simplifican el método, pero se aleja del estado real de máquina.

El método de mayor precisión empleado en la modelación de los fallos en su etapa inicial en la máquina eléctrica es el Método de Elementos Finitos (FEM) [11], el cual requiere de procesos computacionales complejos, pero modela la máquina más próxima a la realidad, por esta razón este método es utilizado para validar otros métodos cuando no es posible realizarlo directamente en la máquina o el costo del experimento es elevado [9]. Independientemente de su exactitud, el mayor inconveniente del método es que demanda información detallada de la geometría constructiva de la máquina [7].

Además de los cuatro métodos fundamentales antes mencionados, son utilizados el Método Híbrido [13] y el Método de Enfoque de Función de Bobinado Modificado (MWFA) [14]. Todos estos métodos poseen ventajas y desventajas en su aplicación [9], los cuales son resumidos en la Tabla 1.

2.6 Modelos más empleados para el caso de generadores sincrónicos de polos salientes

En [5], se plantea que las fallas por excentricidad en los generadores sincrónicos de polos salientes han sido modeladas por diferentes vías, una de ellas es utilizando el Método Función del Devanado (WFM, por sus siglas en inglés de Winding Function Method), para las fallas de excentricidad dinámica. Considera el efecto de la saturación, empleando la modelación para el cálculo del campo magnético del entrehierro, el Método de los Elementos

Tabla 1.
Breve Resumen de Varios Métodos de Modelado de los Generadores Sincrónicos.

Métodos	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
dq0	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas simétricos. Fallos severos del devanado del estator. Fallos de excentricidad. 	<ul style="list-style-type: none"> Simple. Operaciones computacionales rápidas. 	<ul style="list-style-type: none"> No aplicable en condiciones de fallas. Supone distribución sinusoidal de las magnitudes eléctricas. No tiene en cuenta el efecto de los armónicos espaciales. No considera la saturación.
WFA	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas asimétricos. Fallos menores y severos del devanado del estator. 	<ul style="list-style-type: none"> Preciso. Sensible para entrehierro uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo prolongado de operaciones computacionales.
Híbrido	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas simétricos y asimétricos. Condiciones de estados estable. Fallos menores del devanado del estator. 	<ul style="list-style-type: none"> Más preciso que el WFA. Más simple que el WFA. 	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo moderado de operaciones computacionales.
PDM	<ul style="list-style-type: none"> Fallos internos y a tierra del devanado del estator. Condiciones transitorias. 	<ul style="list-style-type: none"> Precisión. Independencia de la distribución del bobinado. Considera el efecto de la saturación. 	<ul style="list-style-type: none"> Más complejo que el dq0. Mayor tiempo de operaciones computacionales.
MWFA	<ul style="list-style-type: none"> WFA extendido. Falla de fase a tierra. Excentricidad dinámica del rotor. Excentricidad mixta. Todo tipo de fallas. 	<ul style="list-style-type: none"> Adecuado para entrehierros no uniformes Predice el funcionamiento del estado transitorio y el estado estable. Independiente de la distribución del bobinado. Considera la saturación. Considera el efecto de todos los armónicos espaciales y temporales. 	<ul style="list-style-type: none"> Complejidad. Alto tiempo computacional.
FEM	<ul style="list-style-type: none"> Optimización de máquinas eléctricas. Validación de métodos de modelado. Comprobación de parámetros eléctricos en diversas condiciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta precisión. Modelación de todas las condiciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo. Necesita computadoras potentes. Complejidad.

Fuente. Traducida por el autor de Mostafaei, M. and Faiz, J. 2021

Finitos, el cual requiere complejas operaciones de cálculos, en comparación con el método analítico, que es menos exacto pero su resultado es aceptado para la estimación del flujo magnético del entrehierro.

Por otro lado, en [15], se dice que, para la simulación de una falla de excentricidad estática en el generador sincrónico de polo saliente, se emplea el Análisis de Elementos Finitos. En la investigación, se consideran diferentes severidades de la falla de excentricidad estática y se muestra su efecto sobre la densidad de flujo, la tensión y la corriente y se compara con el generador saludable. Como resultado se observa un patrón asimétrico del flujo magnético del entrehierro en el generador defectuoso, generando armónicos en las señales de flujo y tensión. Para la detección de la excentricidad estática, se prefiere el índice en función de la señal de tensión sin carga.

Del mismo modo en [16], se modela un generador sincrónico de polo saliente, pero en este caso para el estudio de la falla de excentricidad dinámica, donde son estudiados los estados de funcionamiento del generador desde vacío hasta plena carga bajo la falla de excentricidad dinámica y

comparado con una máquina saludable. El aumento del grado de excentricidad bajo carga lineal en comparación con el caso sin carga se investiga en función del índice total de distorsión de armónico (THD), verificando los resultados experimentalmente.

3 Propuesta de variables de estado para el diagnóstico de la excentricidad

3.1 Corriente por el neutro del generador

La corriente por el neutro del generador puede originarse como consecuencia de anomalías externas, tales como asimetrías en la carga, el rápido aumento de las cargas no lineales e introducción de especificaciones erróneas y/o instalación de la puesta a tierra del neutro de la máquina. También pueden encontrar su origen en causas internas asociadas a las condiciones constructivas del generador como la excentricidad, entrehierros, etc.; fallas eléctricas como los cortocircuitos en los devanados, entre espiras, a tierra, etc.

Esto trae como consecuencia la aparición de corrientes de secuencia positiva, negativa y cero de orden del armónico fundamental, que producen efectos indeseados en la máquina [17].

La forma de onda preponderante de la corriente en el neutro del generador es de tercera armónica, con niveles moderados de la componente fundamental. Además, debido a las diferencias constructivas de las máquinas, aun cuando estas sean de igual capacidad y el mismo fabricante, estos valores son diferentes.

Con el monitoreo del comportamiento de la tendencia en los armónicos de la corriente por el neutro, puede diagnosticarse el desbalance electromagnético de la máquina, ya que variaciones de origen mecánico o eléctrico, repercuten en este indicador [18].

La componente de tercera armónica de la corriente en el neutro del generador, es dependiente de las condiciones de carga de este, por lo que, para carga máxima, alcanza su valor máximo. Debido a ello, esta variable no es efectiva para el diagnóstico de la excentricidad durante la operación del activo, ya que se vería afectada por las fluctuaciones de la carga durante la operación de la máquina complejizando el diagnóstico. En cambio, la componente fundamental de la corriente por el neutro, no se modifica con la carga, manteniéndose invariable durante su operación, esto hace que sea una variable que aporte información del grado de excentricidad de la máquina [18].

En los sistemas ideales, donde la máquina se considera perfectamente balanceada, la corriente que circula por el neutro del generador es cero, no comportándose así en la realidad, donde siempre existe circulando un nivel de corriente por el neutro que se encuentra entre el 5 y el 10% de la corriente nominal de la máquina [19]². La ventaja principal del uso de esta variable para el diagnóstico de la excentricidad del generador, es que no se ve afectada por las variaciones que experimente la carga. Además, si no se manifiestan afectaciones en el balance electromagnético de la máquina, entonces la magnitud de la armónica fundamental de la corriente por el neutro, se mantiene invariable en el tiempo [18]. Por otro lado, constituye un método no invasivo que requiere de costos bajos para su implementación, con un apreciable fin práctico.

3.2 Grado de excentricidad del entrehierro

Este parámetro se verifica como parte de la rutina de mantenimiento del generador eléctrico del grupo electrógeno Hyundai 9H25/33 en el programa de trabajo previsto en las 24000 hora según la matriz de mantenimiento existente en el procedimiento F-PM-11-062 [20]. El proceso de medición está completamente detallado en la instrucción F-IM-11-169³ del manual de procedimientos e instrucciones de la Empresa de Mantenimientos a Grupos electrógenos de Fuel Oil (EMGEF). El objetivo que se persigue, es verificar el estado de simetría del entrehierro con el paso del tiempo de

operación del activo. La medición se realiza con el equipo fuera de servicio, por lo que hay que interrumpir el proceso de producción para su realización.

4 Conclusiones

En la investigación teórica realizada sobre el estado del arte del diagnóstico de la excentricidad en los generadores sincrónicos, se demuestra que los métodos presentados tienen inconvenientes que limitan su uso en las centrales de la generación distribuida en operación.

Para modelar el generador sincrónico más próximo a su desempeño real, es recomendable el empleo del Método de Elementos Finitos, aun cuando demanda un alto nivel de datos característicos de la máquina y trabajo computacional.

Se determina que la componente fundamental de la corriente por el neutro del generador es una variable de estado de diagnóstico que se encuentra directamente relacionada con la deformación del campo electromagnético en la máquina rotatoria y en consecuencias brinda información del grado de excentricidad de esta.

Bibliografía

- [1] Muñoz-Vizhñay, J.P., Rojas-Moncayo, M.V., y Barreto-Calle, C.R., Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador. Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología (19), pp. 60-68, 2018. ISSN: 1390-650X 1390-860X.
- [2] Navarrete, H.G. y García, A.A., Análisis del marco legal de la generación distribuida en América Latina y Nicaragua, para la incorporación de aparatos de medición inteligente. Nexa Revista Científica, 33(01), pp. 51-68, 2020, ISSN-e: 1995-9516.
- [3] Ramos, E., La generación distribuida: el camino hacia la producción descentralizada de electricidad y pautas para su reglamentación. Forseti. Revista de Derecho, 8(11), pp. 07-35, 2020, ISSN: 2312-3583.
- [4] Ehya, H., Sadeghi, I., and Faiz, J., Online condition monitoring of large synchronous generator under eccentricity fault. In: 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2017, ISBN: 1509061614.
- [5] Sadeghi, I., Ehya, H., and Faiz, J., Analytic method for eccentricity fault diagnosis in salient-pole synchronous generators. In: 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), IEEE, 2017., ISBN: 1509044892.
- [6] Castro-Coronado, H., Aplicabilidad de la técnica predictiva de análisis de dispersión de flujo para la detección de fallos electromecánicos en máquinas síncronas, 2020.
- [7] Terron-Santiago, C., Martinez-Roman, J., Puche-Panadero, R., Sapena-Bano, A., Burriel-Valencia, J., and Pineda-Sanchez, M., Analytical model of eccentric induction machines using the conformal winding tensor approach. Sensors, 22(9), art. 3150, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22093150>
- [8] Pal, R.S.C., and Mohanty, A.R., A simplified dynamical model of mixed eccentricity fault in a three-phase induction motor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(5), pp. 4341-4350, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2987274>.
- [9] Mostafaei, M., and Faiz, J., An overview of various faults detection methods in synchronous generators. IET Electric Power Applications, 15(4), pp. 391-404, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2892142>

² (...). What should be borne in mind is that air-gap eccentricity exists even in a healthy motor, but within a permissible limit depending on the motor construction; e.g., 10 % eccentricity is often acceptable for a healthy motor.

There is often an intrinsic static eccentricity. Manufacturers usually try to reduce the eccentricity level as much as possible (to under 5 %).

³ Extraído de la matriz de mantenimiento del procedimiento F-PM-11-062.

- [10] Gyftakis, K.N., et al., Diagnosis of static eccentricity in 3-phase synchronous machines using a pseudo zero-sequence current. *Energies*, 12(13), art. 2476, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132476>
- [11] Ehya, H., et al., Static and dynamic eccentricity fault diagnosis of large salient pole synchronous generators by means of external magnetic field. *IET Electric Power Applications*, 15(7), pp. 890-902, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12068>
- [12] Tu, X., et al., A new model of synchronous machine internal faults based on winding distribution. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 53(6), pp. 1818-1828, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.885125>
- [13] Nadarajan, S., et al., Hybrid model for wound-rotor synchronous generator to detect and diagnose turn-to-turn short-circuit fault in stator windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(3), pp. 1888-1900, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2370931>
- [14] Al-Nuaim, N.A. and Toliyat, H., A novel method for modeling dynamic air-gap eccentricity in synchronous machines based on modified winding function theory. *IEEE Transactions on energy conversion*, 13(2), pp. 156-162, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1109/60.678979>
- [15] Toufighian, S.M., Faiz, J., and Erfani-Nik, A., Static eccentricity fault detection in salient and non-salient synchronous generators using harmonic components. In: *12th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2021. IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDSTC52094.2021.9405971>
- [16] Ehya, H., Faiz, J., and Abu-Elhaija, W., Detailed performance analysis of salient pole synchronous generator under dynamic eccentricity fault. In: *IEEE Conference Jordan*, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2105498>
- [17] Díaz Martínez, H.J., et al., Minimización de los efectos causados por desequilibrio de carga y armónicos, mediante la variación de la puesta a tierra del neutro del devanado del estator en turbogeneradores, 2019.
- [18] Martínez, R.C., et al., Diagnóstico de generadores de potencia a través del Sistema de Monitoreo en Línea, *AnGeL*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000200003>
- [19] Salah, A.A., Dorrell, D.G., and Guo, Y., A review of the monitoring and damping unbalanced magnetic pull in induction machines due to rotor eccentricity. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), pp. 2569-2580, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2892359>
- [20] EMGEF, Procedimiento para la ejecución del mantenimiento preventivo planificado del generador modelo HSR7-719-8P Hyundai 2.5 MW, versión G2 y G3. Revisión de los transformadores de fuerza tipo TMP 25000/115, TMP 12500/34.5 y MT 0292., in *F-PM-11-062*. 2011, 4 P.
- P.T. Herrera-Basabe**, recibió el título en Ingeniería Eléctrica en 1997. Durante su vida laboral se ha desempeñado en áreas del diseño y explotación de los sistemas eléctricos soterrados y centrales de generación con turbinas a gas y grupos electrógenos a fuel oil. De 1997 a 2018 trabajó para empresas de ingeniería y servicios de la Unión Eléctrica de Cuba, Se desempeñó como inspector de pruebas en fábricas para la adquisición de los grupos electrógenos a Fuel Oil de 1.7 MW y 2.5 MW, además de brindar servicios de asesoría técnica en el extranjero en esta tecnología. De 2020 a 2022 trabajó como consultor internacional del proyecto Eléctrico SE4All de PNUD Guinea Ecuatorial. Se encuentra actualmente laborando como profesor de la facultad de ingeniería eléctrica de la Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE) y en proceso de formación doctoral. Sus intereses de investigación incluyen: simulación, modelado y diagnóstico de fallos por excentricidad en generadores sincrónicos de grupos electrógenos. ORCID: 0009-0001-3884-7245
- O. Hernández-Areu**, recibió el título en Ingeniería Eléctrica en 1981, el grado de Dr. en Ciencias Técnicas en 1995. Es director del Centro de Investigaciones Pruebas Electroenergéticas (CIPEL). Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echevarría" CUJAE. Se desempeña como profesor e investigador en Ingeniería Eléctrica en; diseño, pruebas, modelación y diagnóstico de transformadores y máquinas eléctricas. ORCID: 0000-0002-2672-239X