

TESIS DOCTORAL

DIAGNÓSTICO DE FALLOS ELECTROMECÁNICOS EN MOTORES ELÉCTRICOS MEDIANTE EL ANÁLISIS AVANZADO DEL FLUJO MAGNÉTICO Y SU IMPLEMENTACIÓN EN HARDWARE

REALIZADA POR: D. ISRAEL ZAMUDIO RAMÍREZ

DIRIGIDA POR:

Dr. D. José Alfonso Antonino Daviu

Dr. D. Roque Alfredo Osornio Ríos

TRIBUNAL CALIFICADOR:

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Valencia, mayo de 2023

Resumen

Los motores eléctricos de inducción son máquinas eléctricas rotativas que permiten realizar la conversión de energía eléctrica en energía mecánica, la cual resulta de gran utilidad en diversos procesos industriales, principalmente para accionar mecanismos y cadenas cinemáticas complejas involucradas en aplicaciones diversas como: sistemas de inyección de plástico, prensas, bandas transportadoras, plantas de tratamiento de aguas residuales, accionamiento de compresores, bombas, entre muchas otras. La amplia utilización de las máquinas de inducción en una gran variedad de procesos industriales se debe principalmente a sus excelentes características y prestaciones, tales como: robustez, fácil control, simplicidad, fiabilidad, y fácil mantenimiento. Sin embargo, a pesar de su elevada robustez, este tipo de máquinas se encuentran sujetas a diversos esfuerzos mecánicos, térmicos, eléctricos y ambientales, los cuales actúan conjuntamente bajo diversas condiciones de operación durante su vida útil, lo que de forma inevitable conduce a la aparición de diversos fallos o averías. Los principales fallos que suelen presentarse en los motores eléctricos de inducción son aquellos relacionados a sus componentes internos como defectos en el rotor, problemas en los rodamientos o fallos en el aislamiento del estator. Adicionalmente, también se pueden presentar problemas relacionados a la carga, así como en los componentes que permiten el acoplamiento entre el motor y la ésta (engranajes, sistemas de poleas y correas, etc...). En la literatura se han reportado diversas investigaciones en las que se concluye que cuando un motor eléctrico se encuentra operando bajo alguna condición de fallo, su rendimiento puede verse afectado, lo que se traduce en consumos de energía más elevados, causando a su vez altos costes en la factura eléctrica. Por otra parte, si el motor continúa operando bajo alguna avería, ésta se puede convertir en un fallo irreversible, lo que puede causar el paro repentino del proceso en el cual esté operando el motor, además de costes elevados de reparación. Adicionalmente, debido en gran parte a los actuales requerimientos en los procesos industriales, es una prioridad mantener en funcionamiento óptimo el ciclo de producción, sin interrupciones, por lo que, a su vez es un aspecto de gran relevancia poder contar con sistemas capaces de monitorear de forma constante el estado de los motores impulsores involucrados en dichos procesos ya que, de esta manera, es posible asumir acciones de mantenimiento adecuadas, lo que evita tiempos de inactividad no programados y reduce los costes de mantenimiento. Por tanto, resulta de gran relevancia estudiar los principales fallos en estos motores, y más aún, es de suma importancia generar metodologías adecuadas para el diagnóstico oportuno de los mismos, a través de la monitorización continua y correspondiente análisis de ciertas magnitudes de máquina, antes de que estos fallos devengan en una avería catastrófica de la máquina.

En la presente tesis se presentan diversas contribuciones enmarcadas en una metodología innovadora, capaz de generar un diagnóstico adecuado y de forma automática de la ocurrencia de los fallos más comunes que pueden aparecer en motores eléctricos de inducción que trabajan bajo diversas condiciones de operación. La metodología se basa en el análisis avanzado del flujo magnético de dispersión (el cual puede ser capturado en la carcasa del propio motor utilizando sensores simples y económicos) a través de la aplicación de herramientas de descomposición tiempo-frecuencia, técnicas de clasificación de datos y parámetros de caracterización de señales. Además, se realiza una optimización de los parámetros de estas herramientas a fin de proporcionar generalidad y flexibilidad a la metodología que se aborda en la presente tesis.

En este contexto, en primer lugar, se proponen tecnologías innovadoras para la medida del flujo, basadas en la utilización de sensores triaxiales que permiten la captura de las diferentes componentes del flujo de dispersión (radial, axial y combinado) en unas condiciones muy ventajosas en cuanto a coste y requerimientos de volumen. Por otro lado, se aplican diversas técnicas de análisis tiempo frecuencia a un amplio espectro de averías (algunas de ellas apenas abordadas en la literatura del área

mediante esta técnica), como son rotura de barras rotóricas, desalineamientos, desgaste gradual de pista exterior en rodamientos metálicos de bolas, desgaste uniforme gradual en engranajes, entre otras. La aplicación de la técnica se efectúa bajo una diversidad de condiciones de trabajo y de suministro, incluyendo motores arrancados tanto con variador de frecuencia, como mediante arranque directo. Además, se valida la técnica en motores con diferentes características constructivas. Asimismo, se abordan casos especialmente complejos, como el análisis de arranques con duración inferior a 1s, caso particular con cierto grado de dificultad debido a la superposición de componentes de fallo y la componente fundamental (de gran amplitud) en su evolución durante el transitorio de arranque. La metodología desarrollada incluye no solamente la aplicación de técnicas tiempo-frecuencia sobre señales de flujo sino también, como se ha apuntado, una etapa ulterior de clasificación y determinación de severidad del fallo, la cual se basa en la detección automática de los patrones de fallo y en la evaluación de los mismos, para lo cual se han empleado técnicas adecuadas de inteligencia artificial. Los resultados obtenidos de las pruebas efectuadas han sido excelentes y muestran el gran potencial de la metodología para el diagnóstico de fallos en motores de inducción.

Visto el éxito conseguido con las pruebas previas, se ha abordado también en la tesis la extrapolación de la aplicación de la técnica basada en el análisis del flujo de dispersión a otras aplicaciones y tipologías de máquinas. De esta forma, se ha hecho uso de la misma para el diagnóstico de desgaste gradual de herramientas de corte en máquinas CNC, con la ventaja e innovación de generar un diagnóstico automático y no invasivo (una restricción de las técnicas convencionales reportadas en la literatura, sobre todo bajo términos prácticos, al emplear sensores invasivos al proceso de mecanizado). Además, se ha aplicado la técnica a máquinas de inducción de rotor bobinado en las que los fallos en el devanado rotórico son mucho más frecuentes y para cuya detección, la metodología propuesta ha dado excelentes prestaciones.

A modo de resumen, pues, se pueden sintetizar las aportaciones de la tesis en los siguientes puntos:

- Utilización y optimización de nuevas tipologías de sensores (sensor triaxial) para la medida simultánea de las diferentes componentes del flujo de dispersión (radial, axial y combinado), bajo premisas de simplicidad, bajo coste y volumen reducido.
- Aplicación y optimización de diversas herramientas de análisis tiempo-frecuencia (MUSIC, STFT, DWT...) a señales de flujo capturadas en régimen transitorio de operación de la máquina, bajo diversas condiciones de fallo.
- Desarrollo de nuevos indicadores de severidad de fallo basados en los resultados de aplicación de las herramientas tiempo-frecuencia aplicadas.
- Presentación de metodologías de diagnóstico complementarias, basadas en la computación de parámetros estadísticos calculados sobre las señales de flujo.
- Desarrollo y aplicación de técnicas para la automatización del proceso de diagnóstico basadas en herramientas de reducción de la dimensionalidad y técnicas de clasificación basadas en herramientas de inteligencia artificial.
- Aplicación de la metodología de diagnóstico basada en análisis de flujo en motores operando en nuevas aplicaciones: máquinas CNC.
- Aplicación de la metodología de diagnóstico a otras tipologías de máquinas: motores de inducción de rotor bobinado.
- Comparación entre la técnica de análisis del flujo en régimen transitorio y otras técnicas de diagnóstico (como análisis de corrientes o termografía infrarroja) y evaluación de la complementariedad entre las mismas.
- Desarrollo de prototipos preliminares de sensores inteligentes que combinan la aplicación de la técnica de análisis del flujo de dispersión y otras técnicas.

La relevancia de la investigación desarrollada en esta tesis queda corroborada por el ingente número de publicaciones que derivan directa o indirectamente de la misma, muchas de las cuales se han publicado en revistas de prestigio, siendo el autor de esta tesis el primer o segundo firmante de muchos de esos trabajos. En concreto, se han publicado 18 artículos en revista y 13 publicaciones a congreso, además de participar en proyectos de envergadura relacionados con el trabajo desarrollado.

Palabras clave: Fallos electromecánicos, flujo magnético de dispersión, procesamiento de señales, motores de inducción, mantenimiento predictivo, Short Time Fourier Transform, análisis transitorio, diagnóstico automático.