

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**▪ Aportaciones al diagnóstico de averías en motores eléctricos basados en el análisis avanzado de corrientes ▪**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada por: D. Jesús Ángel Corral Hernández

Director: Dr. D. José Alfonso Antonino Daviu

- Valencia, Abril de 2018 -

## **Agradecimientos:**

En primer lugar me gustaría agradecer al Dr. José Alfonso Antonino Daviu el incontable tiempo e interés dedicados al asesoramiento y orientación de la presente tesis, pero ante todo el ejemplo como profesional recibido, tanto en el aspecto científico como en el personal.

Así mismo, agradecer a mis padres y hermanos, pero principalmente a mis padres, los valores que me han transmitido en la vida, y que son la base para conseguir las cosas que realmente importan.

Y finalmente a Ana, que cuanto más la conozco, veo con más claridad que la Ciencia no lo puede explicar todo.

## **Resumen:**

Se estima que actualmente existen más de 300 millones de motores eléctricos a nivel mundial, los cuales consumen cerca del 40% de la energía generada en el planeta. Los motores eléctricos participan en multitud de procesos industriales de muy diversa naturaleza y en todo tipo de sectores (industrias cementeras, petroquímicas, papeleras, textiles, alimentación, siderúrgicas...). Se hace difícil encontrar una aplicación industrial en la que estas máquinas no ejerzan un papel clave. Por si fuera poco, su uso es común también en otros sectores críticos, como las centrales de generación (incluyendo centrales de generación de energía renovable), hospitales, tracción eléctrica o incluso aeronáutica y robótica.

Dentro de los motores eléctricos industriales, los más extendidos son los motores de inducción o asíncronos y, dentro de ellos, los motores con rotor de jaula. Se trata de los motores más simples y económicos y, al mismo tiempo, son los más robustos y fiables, siendo su mantenimiento más reducido. Estos motores suponen más de 90% de las máquinas eléctricas rotativas industriales y su uso se extiende a innumerables aplicaciones, en las que tienen regímenes y condiciones de operación de muy diversa naturaleza (motores alimentados desde la red vs. motores alimentados a través de variador de frecuencia, motores operando en regímenes estables vs. motores con frecuentes transitorios, motores arrancados de forma directa vs. motores arrancados con sistemas auxiliares como arrancadores estáticos, motores con carga elevada vs. motores con carga reducida...).

A pesar de su robustez y fiabilidad, los motores de inducción están sujetos a posibles fallos o averías en sus diferentes partes o componentes. La ocurrencia de estas averías de forma inesperada puede acarrear consecuencias nefastas para la compañía involucrada: paradas de producción no planificadas, costes elevados de reparación de los motores averiados, tiempos de espera de repuestos o recambios, daño en la imagen de la empresa por incumplimiento de plazos de suministro a clientes, e incluso peligro para la seguridad de usuarios y procesos. Especialmente relevante es el caso de los motores de elevada potencia (de orden de cientos de kW o incluso MW). El coste de un motor con potencias en el rango de MW puede ascender a más de un millón de euros; inspecciones de los mismos que impliquen desmontaje y traslado al taller pueden suponer costes que ascienden a varias decenas de miles de euros y, lo que es todavía peor, fallos inesperados en estas máquinas pueden acarrear pérdidas de producción valoradas hasta en varios millones de euros (dependiendo, lógicamente, de la aplicación y proceso industrial en cuestión). Es por ello que resulta especialmente crítico para el mundo industrial la elaboración de técnicas avanzadas que permitan diagnosticar de forma fiable el estado de las diferentes partes de estos motores, evitando falsos diagnósticos que pudieran conllevar pérdidas millonarias.

A este respecto, según diversos estudios, los fallos más comunes en motores de inducción son los fallos en rodamientos, los fallos en el aislamiento del devanado estatórico y, en menor medida, los fallos en el rotor. Este último tipo de fallo incluye la rotura, agrietamiento o deformación de las barras o de los anillos de cortocircuito de la jaula rotórica. A pesar de que el porcentaje de fallos relacionados con el rotor pueda parecer no demasiado elevado (algunos autores lo sitúan en torno al 15-20% del total de averías), se trata de un fallo especialmente peligroso debido a una variedad de factores: Por un lado, el rotor es una parte interna de la máquina y los protocolos de mantenimiento del mismo son habitualmente reducidos, cuando no directamente inexistentes, con lo que con frecuencia su estado para inadvertido en muchas aplicaciones industriales. Por otro lado, aunque los fallos en el rotor no devienen habitualmente en consecuencias catastróficas inminentes (hay máquinas que pueden operar durante largos intervalos de tiempo con barras rotas), se han reportado casos en los que la avería sí ha conducido a fallos catastróficos inmediatos, como situaciones de protrusión de barras o de desprendimiento de fragmentos de barras rotas que han acabado dañando el aislamiento del estator. Estas averías han provocado pérdidas millonarias para las compañías involucradas. Finalmente, este tipo de fallo es más frecuente en motores de gran potencia, en los que las jaulas rotóricas se fabrican en base a barras o pletinas, usualmente de cobre, soldadas a los anillos de cortocircuito. Son estos motores los más caros, los más costosos de reparar y, usualmente, los más críticos en las aplicaciones en las que operan. Por todo ello, está plenamente justificado el estudio de esta avería, así como el esfuerzo que se ha venido dedicando durante estos últimos años al desarrollo de tecnologías robustas que permitan un diagnóstico fiable del estado del rotor y que sean capaces de detectar posibles averías en el mismo, cuando éstas se encuentran en estado todavía incipiente, de forma que se puedan planificar acciones efectivas de mantenimiento con suficiente antelación.

Dentro de las tecnologías utilizadas para el diagnóstico de la condición del rotor, las técnicas basadas en el análisis de la corriente demandada por el motor son las más extendidas. El método más utilizado se denomina *Motor Current Signature Analysis* (MCSA) y se basa en capturar la señal de corriente de una fase del motor mientras éste opera en régimen permanente y analizarla posteriormente mediante la transformada de Fourier; en el caso en que haya un fallo en el rotor, se amplifican las amplitudes de ciertos armónicos en el espectro de Fourier. La evaluación de las amplitudes de dichos armónicos permite determinar la salud del rotor. Si bien este método ha venido proporcionando resultados satisfactorios durante años, se han reportado multitud de casos en los que el método MCSA puede no ofrecer un diagnóstico concluyente, así como situaciones en las que dicho método conduce a diagnósticos erróneos (falsos positivos/falsos negativos).

Debido a estos inconvenientes, durante esta última década ha surgido una nueva variante de la técnica de análisis de corrientes que se basa en analizar la señal de corriente, ya no durante régimen de funcionamiento estable, sino bajo cualquier régimen de operación, incluyendo regímenes transitorios.

En este contexto, se ha demostrado que el análisis de la señal de corriente demandada por el motor durante el arranque proporciona información muy útil sobre el estado del rotor, evitando muchos de los inconvenientes del método MCSA. El objetivo de este nuevo enfoque es capturar la corriente de arranque y analizarla mediante herramientas especiales de análisis de señal (transformadas tiempo-frecuencia) con el objeto de detectar ‘patrones’ provocados por la avería en el rotor en los mapas tiempo-frecuencia resultantes de la aplicación de dichas transformadas. Se ha demostrado que esta nueva variante proporciona resultados muy satisfactorios en multitud de aplicaciones en las que la aplicación de MCSA no resulta adecuada (aplicaciones a velocidad variable) o en las que puede conllevar falsos diagnósticos (presencia de pares de carga oscilantes, motores con carga reducida, motores con conductos axiales de refrigeración, rotores de doble jaula, etc...).

A pesar de los avances en esta reciente metodología para el diagnóstico del rotor, existen algunos retos que continúan pendientes. Uno de estos retos es el que se ha abordado en la presente tesis y consiste en la aplicación y validación generalizada de la metodología basada en el análisis de la corriente de arranque para el caso de motores arrancados mediante arrancadores estáticos (también llamados arrancadores electrónicos o arrancadores suaves). A este respecto, se ha constatado el uso creciente de arrancadores estáticos en multitud de aplicaciones industriales. Éstos se emplean para arrancar el motor, suavizando las altas corrientes de arranque y mitigando con ello los efectos negativos que éstas pueden acarrear. A pesar de que puede pensarse que los arrancadores estáticos reducen la probabilidad de daños en el rotor (al ser el arranque más suave y las corrientes menos elevadas), se vienen reportando casos industriales de fallos en el rotor en motores arrancados mediante arrancadores estáticos, especialmente en motores de cierta potencia. Surge, por tanto un gran interés en comprobar si la nueva metodología de diagnóstico, basada en el análisis de la corriente de arranque, puede proporcionar diagnósticos satisfactorios de la condición del rotor en el caso de motores arrancados mediante estos accionamientos. En caso de que así fuera, se abriría un amplio espectro industrial para la aplicación de estas nuevas metodologías transitorias, que podría incluso sentar las bases para la incorporación futura de estas técnicas de diagnóstico dentro del propio arrancador electrónico.

La presente tesis aborda por primera vez esta problemática de forma rigurosa. La tesis se centra en la validación de una variante concreta de diagnóstico transitorio, la cual se basa en el análisis de la señal de corriente de arranque mediante la transformada wavelet discreta (Discrete Wavelet Transform, DWT). Se trata ésta de una transformada tiempo-frecuencia que cuenta con importantes ventajas a la hora de emplear la metodología de diagnóstico transitorio, dado que esta transformada resulta rápida de aplicar, la interpretación de sus resultados es simple y está disponible en paquetes comerciales convencionales como Matlab, con lo que cualquier usuario con un mínimo entrenamiento podría hacer uso de ella. Adicionalmente, esta transformada permite la introducción sencilla de indicadores para determinar el grado de severidad de la posible avería en el rotor, cuestión ésta que no resulta trivial con otras alternativas.

El objetivo principal de la tesis radica en validar de forma masiva la aplicabilidad de la técnica, haciendo uso de una gran cantidad de señales obtenidas a partir tanto de ensayos de laboratorio como de medidas con motores industriales. La idea subyacente ha sido comprobar la validez de la técnica en una amplia gama de situaciones, de forma que ello permitiera garantizar la generalidad de la misma. A tal efecto, se procede inicialmente a caracterizar de forma teórica los armónicos presentes en la señal de corriente, tanto en estado sano como en estado averiado, para el caso de motores arrancados mediante arrancador estático. Esto resulta crucial para poder interpretar posteriormente los análisis DWT que se efectuarán posteriormente sobre las señales de corriente de arranque capturadas. Posteriormente, se aborda la parte experimental, uno de los puntos fuertes de la presente tesis, dado que se han obtenido más de 900 señales de corriente de arranque en motores de laboratorio, utilizando hasta cinco modelos diferentes de arrancadores de distintos fabricantes y con variadas topologías y características. Para cada arrancador se han obtenido múltiples señales correspondientes a diferentes niveles de fallo en el rotor (motor sano, motor con una barra rota y motor con dos barras rotas). Para cada nivel de fallo, se han obtenido una variedad de señales mediante la variación de los parámetros de arranque (tensión inicial, duración de rampa...), así como de otras características operativas del motor (nivel de carga, tensión de suministro). El proceso experimental para obtener las citadas señales ha sido ingente, pero a la vez necesario para garantizar la generalidad de los resultados obtenidos posteriormente. Adicionalmente, se han obtenido múltiples señales en motores industriales accionados mediante arrancador, que operaban en industrias de sectores muy diversos (alimentación, plantas de depuración), con el fin de ratificar la validez de los resultados obtenidos con los motores de laboratorio. Se ha analizado, una por una, cada señal de corriente capturada, mediante la aplicación de la DWT, interpretando las señales wavelet resultantes y calculando el valor de un indicador de severidad de fallo propuesto en la presente tesis, el cual se basa en la computación de la energía de una señal wavelet concreta. En base a los resultados obtenidos, se ha efectuado un análisis riguroso de la influencia de diferentes factores sobre los resultados de la técnica, incluyendo parámetros como la topología del arrancador empleado, parámetros de arranque, nivel de tensión, etc...a objeto de determinar en qué grado de técnica se ve afectada por estos parámetros. Asimismo, se ha incluido un epígrafe final que ahonda en la automatización a la hora de aplicar la metodología propuesta, de forma que se evite, en la medida de lo posible, la necesidad de intervención de usuarios expertos para su aplicación. Este epígrafe se ha basado en una investigación conjunta con otros grupos internacionales.

Las conclusiones del trabajo resultan innovadoras, ya que nunca antes estos aspectos se han abordado en la literatura relativa al diagnóstico de la condición de motores eléctricos. Muchas de estas conclusiones son de gran interés para elaborar recomendaciones prácticas para la aplicación de la técnica a nivel industrial, como las relativas a la influencia del número de fases controladas, la elección de la fase monitorizada o la influencia del modelo de arrancador.

Al mismo tiempo, los resultados son prometedores, por cuanto prueban la validez de la metodología para detectar, no solamente la presencia de la avería, sino también para determinar la severidad del fallo en el rotor. Especialmente interesante es el hecho de que los resultados son más concluyentes si cabe en el caso de motores con arrancadores con control en las tres fases, que son los que normalmente se utilizan para mayores potencias.

La tesis se sustenta en dos artículos publicados en revistas internacionales indexadas (una de ellas de primer cuartil), así como en los diez artículos publicados en congresos internacionales de relevancia en el área, todos ellos esponsorizados por la institución IEEE.

La presente tesis doctoral se ha desarrollado en el contexto del proyecto de investigación “Combinación de Técnicas no Invasivas de Monitorización del Estado para el Desarrollo de Motores Eléctricos Inteligentes” financiado por el ‘Ministerio de Economía y Competitividad’ (MINECO) y del programa FEDER en el contexto de los ‘Proyectos I+D del Subprograma de Generación de Conocimiento, Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia’ (ref: DPI2014-52842-P).”