

Resumen

A lo largo de los años, las máquinas eléctricas rotativas se han convertido en componentes clave en aplicaciones industriales tanto como fuentes de energía mecánica (funcionando como motores) como fuentes de energía eléctrica (funcionando como generadores). Las averías inesperadas en estos componentes pueden provocar tiempos de inactividad no programados, que pueden tener como consecuencia grandes pérdidas económicas. Esto aplica a las máquinas eléctricas rotativas en general y en particular a los aerogeneradores eólicos, cuya instalación y necesidades de mantenimiento han experimentado un gran crecimiento en los últimos años. Su mantenimiento predictivo evitaría las averías inesperadas y el aumento de costes que se pueden derivar de un mantenimiento preventivo, mediante la medida continua, on-line, de las variables que indican el estado del aerogenerador. Junto con ello, es necesario el desarrollo de técnicas de diagnóstico fiables que necesitan del testeo en aerogeneradores trabajando bajo diferentes condiciones de fallo.

Como los ensayos destructivos para el estudio de defectos o fallos no es económicamente factible, se han desarrollado modelos de máquinas eléctricas rotativas trabajando en condiciones de fallo. Así, estos modelos permiten extraer las características de las corrientes de las máquinas bajo condiciones de fallo reduciendo el número de pruebas destructivas. Los modelos analíticos asumen simplificaciones que impiden representar de forma precisa las no idealidades y no linealidades características de las máquinas con defectos. Por otra parte, los modelos basados en métodos numéricos como los elementos finitos simulan las máquinas trabajando en condiciones de fallo con gran precisión pero suponen grandes tiempo de simulación y requerimientos de memoria. Actual-

mente, existen técnicas de simulación basadas en métodos avanzados de cálculo numérico, que se están aplicando o se ha aplicado a otros problemas electromagnéticos con grandes resultados en cuanto a precisión y tiempo de cómputo de la simulación. De la misma manera, el uso de sistemas de prototipado rápido, como los sistemas hardware in the loop (HIL), se emplean cada vez más en diferentes áreas de investigación como una solución al modelado on-line de los sistemas reales, por lo que el uso de estas dos técnicas es idóneo para el diagnóstico de fallos.

A partir del compendio de artículos científicos y presentaciones en congreso de esta tesis doctoral se han desarrollado las diferentes etapas de implementación del banco de ensayos. En primer lugar se exploran las diferentes técnicas de modelado de las máquinas eléctricas rotativas mediante una revisión exhaustiva de la literatura técnica disponible hasta el momento. Por otro lado, se pretenden desarrollar técnicas de modelado para ser implementadas en sistemas de prototipado rápido para realizar el diagnóstico online de la máquina. En este caso, la primera técnica de modelado desarrollada en la tesis se basa en métodos analíticos, obteniéndose un modelo muy rápido que simplifica enormemente el proceso de cálculo de los parámetros del modelo de la máquina eléctrica y es capaz de representar cualquier tipo y número de fallos de asimetría del rotor.

Sin embargo, los modelos analíticos como el presentado, debido a las simplificaciones que se asumen, no pueden modelar con precisión las no idealidades y las no idealidades propias de las máquinas de inducción defectuosas. Los modelos basados en métodos numéricos son más completos, pero requieren una gran capacidad computacional y largos tiempos de simulación. Además, su implementación en sistemas de prototipado rápido, resulta en una tarea muy compleja hasta el momento. Por esta razón, se opta por desarrollar un método de modelado basado en un enfoque híbrido analítico-numérico, que puede ayudar en el desarrollo de pruebas de técnicas de diagnóstico de fallos para ser implementados en dispositivos embebidos, así como para entrenar a sistemas expertos para evaluar la condición de la máquina. No obstante, este modelo desarrollado todavía requiere de importantes capacidades de memoria y tiempos de cómputo, por lo que se aporta un método para optimizar el cálculo de las inductancias de la máquina eléctrica. El estudio de esta técnica, además de una publicación en revista, ha resultado en dos presentaciones en congreso. En concreto, la correcta implementación de la técnica para poder obtener un diagnóstico de fallo fiable y también realizando una comparativa con otro método de reducción de los parámetros que se propone en la literatura. Por otro lado, se ha optimizado el modelo analítico, aportando un nuevo método

basado en el álgebra tensorial que además permite adaptar el modelo híbrido a diferentes tipos de defectos.

Finalmente, como alternativa a las técnicas de diagnóstico tradicionales que se basan en el análisis de corriente a través de la transformada de Fourier (FFT), cuyo uso está limitado al diagnóstico en régimen estacionario, así como a las técnicas tiempo-frecuencia que permiten el diagnóstico de fallos bajo condiciones de régimen transitorio pero a un elevado coste computacional, este trabajo presenta una combinación de técnicas de diagnóstico que proporciona alta resolución espectral en todo el rango de carga de la máquina a bajo coste computacional y requisitos de memoria. Para la validación de las técnicas de modelado y la técnica de diagnóstico presentadas se ha implementado un banco de ensayos versátil con la capacidad de reproducir cualquier condición de funcionamiento que pueda operar la máquina.

De este modo, la tesis doctoral se ha estructurado en los siguientes capítulos:

- En primer lugar (Capítulo 1) se realiza una breve introducción como punto de partida de la tesis y se presentan los objetivos que se persiguen con el trabajo desarrollado.
- En el Capítulo 2 se presentan los diferentes tipos de fallos que pueden aparecer en máquinas eléctricas rotativas y las magnitudes físicas que se pueden utilizar para su detección. Por otro lado, se realiza una revisión de las diferentes técnicas disponibles para el modelado de máquinas eléctricas rotativas y de las técnicas de diagnóstico de fallos.
- En el Capítulo 3 se presenta la discusión de los resultados de la implementación del banco de ensayos.
- El Capítulo 4 muestra la primera publicación de la que se compone la tesis **A Review of Techniques Used for Induction Machine Fault Modelling**, publicada en la revista **Sensors** del grupo Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). En correspondencia con Journal Citation Reports (JCR) 2020, esta revista tiene un factor de impacto de 3.576, encontrándose en el cuartil **Q1** de la categoría Instruments & Instrumentation (14/72).
- El Capítulo 5 se corresponde con la publicación **Low Computational Cost Hybrid FEM-Analytical Induction Machine Model for the Diagnosis of Rotor Eccentricity, based on Sparse Identification Techniques and Trigonometric Interpolation**, publicada en la revista **Sensors** del grupo MDPI. En correspondencia con JCR 2020, esta

revista tiene un factor de impacto de 3.576, encontrándose en el cuartil **Q1** de la categoría Instruments & Instrumentation (14/72).

- En el Capítulo 6 se muestra la publicación **Analytical Model of Induction Machines with Multiple Cage Faults Using the Winding Tensor Approach**, publicada en la revista **Sensors** del grupo MDPI. En correspondencia con JCR 2020, esta revista tiene un factor de impacto de 3.576, encontrándose en el cuartil **Q1** de la categoría Instruments & Instrumentation (14/72).
- El Capítulo 7 corresponde a la última publicación incluida en este trabajo **Low-Cost Diagnosis of Rotor Asymmetries of Induction Machines at Very Low Slip with the Goertzel Algorithm Applied to the Rectified Current**, publicada en la revista **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement** del grupo IEEE. En correspondencia con JCR 2020, esta revista tiene un factor de impacto de 4.06, encontrándose en el cuartil **Q1** de la categoría Instruments & Instrumentation (11/64).
- Finalmente en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones y principales aportaciones de la presente tesis, así como algunas de las posibles futuras líneas de investigación que abre este trabajo.