

RESUMEN

El mantenimiento de las máquinas eléctricas es esencial para garantizar la continuidad de los procesos industriales. Gran parte de las investigaciones desarrolladas en los últimos años en el campo de la detección de fallos en las máquinas eléctricas rotativas se han enfocado en la búsqueda de características discriminatorias dentro de las magnitudes medibles (mecánicas y eléctricas) de los motores y generadores instalados en la industria tradicional, así como en sectores emergentes como energía eólica, tracción eléctrica, etc. El objetivo de las técnicas de diagnóstico de fallo es el de determinar el estado del motor, identificar, en su caso, el tipo de fallo que se ha producido, y cuantificar su severidad, con el fin de desarrollar acciones preventivas y correctivas, y planes de contingencia que minimicen el impacto económico de la avería. Una de las opciones más empleadas en los últimos años, junto con el análisis de las vibraciones de la máquina, ha sido el análisis de las corrientes del estator del motor, a fin de detectar en las mismas las perturbaciones características producidas por los fallos de la máquina. Además, la corriente, su valor instantáneo y su evolución con el tiempo, se encuentran disponibles muchas veces en las instalaciones, o incluso en los equipos de control de los motores, y, en caso contrario, resultan fácil de medir de forma no invasiva mediante el uso de una pinza amperimétrica adecuada.

En la literatura técnico-científica, se pueden encontrar diferentes técnicas de análisis y procesamiento de señal que permiten discriminar entre una máquina eléctrica en estado de fallo o en estado sano. Generalmente, cada una de estas técnicas o métodos es válida para una magnitud concreta, un régimen concreto de trabajo, para unos fallos determinados, etc... Por tanto, presentan una limitación intrínseca debido a que cada técnica o método presenta unas características diferentes y por tanto se hace necesario un experto que sea capaz de interpretar los resultados en función de la técnica o método empleado para discernir entre la máquina con fallo o sin él.

Por todo ello, se hace necesaria la automatización de esta labor, mediante el uso de las técnicas de aprendizaje e inteligencia artificial basadas en clasificadores. Por ello, es prioritario investigar y desarrollar nuevos sistemas de detección que maximicen la precisión respecto a las características disponibles. Para mejorar la clasificación de fallos con respecto a los sistemas actuales, se estudian sistemas cada vez más complejos basados en sistemas expertos capaces de aprender a identificar los fallos, como por ejemplo los sistemas de clasificación multidimensionales o los sistemas expertos basados en la simulación de un “cerebro” (red de neuronas).

Dado que mi formación abarca desde el campo de la automática industrial hasta los sistemas expertos e inteligencia artificial, he procurado integrar mis conocimientos adquiridos en estos campos diversos en el desarrollo para esta tesis de investigación de un “suprasistema” automático capaz de generar sistemas óptimos de diagnóstico de fallos. Estos sistemas son adaptables a la tipología de la máquina a la que se les aplica, pudiendo desarrollar mediante este “suprasistema” de forma automática nuevos sistemas óptimos de diagnóstico de fallos cuando se aplican a nuevos tipos de máquinas. Los sistemas de diagnóstico generados son óptimos en cuanto a la maximización de la precisión en la detección del fallo, minimizando los costes de cálculo como objetivo secundario. Además, a partir de las características discriminatorias que se obtienen de los diversos métodos y transformaciones de detección de los fallos, los sistemas expertos de clasificación se han adaptado respecto a la naturaleza de estas características con el fin de obtener el mejor sistema de detección para cada tipo fallo.

El “suprasistema” propuesto se encarga de generar el sistema de diagnóstico óptimo para la detección de fallos en motores asíncronos de inducción. Este sistema de diagnóstico óptimo está compuesto por una técnica de diagnóstico y un sistema experto clasificador. Para ello se han seguido los siguientes pasos:

- **Adquisición de los datos.**

Se ha empleado un banco de ensayos experimental dónde se disponen dos motores acoplados mecánicamente por sus ejes. Uno de ellos, el de estudio, que es un motor asíncrono de inducción

(sano o con fallo) y el otro motor acoplado es un motor síncrono de imanes permanentes, que actúa como carga o par resistente en el sistema. Se han realizado diferentes ensayos en los que se miden las magnitudes eléctricas de las 3 corrientes de fase del motor y la velocidad para los diferentes supuestos de condiciones de trabajo:

- Velocidad del motor constante y par resistente constante.
- Velocidad del motor variable y par resistente constante.
- Velocidad del motor constante y par resistente variable.
- Velocidad del motor variable y par resistente variable.

Todos los ensayos se han repetido con la finalidad de comprobar su correcto funcionamiento. Además, se han realizado diferentes ensayos de cada uno de los cuatro bloques antes mencionados, con diferentes velocidades del motor a ensayar, y con diferentes niveles de carga o par resistente. En total, se han obtenido 735 muestras a las cuales se les aplicarán las siguientes técnicas para que serán analizadas con el suprasistema.

▪ **Aplicación de las técnicas y/o métodos de diagnóstico.**

Para la extracción de las características relevantes desde el punto de vista del diagnóstico se han aplicado diferentes técnicas y/o métodos de diagnóstico según el régimen de funcionamiento. En esta tesis se aportan dos técnicas novedosas, el uso de la ventana Prolate y el empleo de la transformada de Fourier corta en frecuencia (SFFT).

Las señales empleadas para el diagnóstico han sido:

- La corriente de una fase del estator.
- La corriente de una fase del estator multiplicada por una ventana de tipo Hanning (Hann).

Las técnicas empleadas para el régimen estacionario son:

- Análisis de la señal.
- Análisis de la transformada de Hilbert de la señal (módulo de la señal analítica).
- Análisis de la transformada Cepstrum de la señal.
- Análisis de la transformada del módulo de Park de la señal.
- Análisis del orden de armónico (HOTA) de la señal.

La señal se ha analizado en el dominio de la frecuencia mediante:

- Análisis de la transformada de Fourier de la señal.
- Análisis del método de Welch de la señal.

En conclusión, para el régimen estacionario se han explorado 20 métodos diferentes de diagnóstico, resultado de la combinación de las posibilidades anteriormente descritas.

Las técnicas empleadas para el régimen transitorio son:

- Análisis del orden de armónico (HOTA) de la señal mediante el empleo de la Short-Time Fourier Transform y con una ventana Gaussiana.
- Análisis del orden de armónico (HOTA) de la señal mediante el empleo de la Short-Time Fourier Transform y con una ventana Prolate. (***Aportación a la tesis del uso de esta ventana tipo Prolate dentro de la técnica de diagnóstico***).
- Análisis del orden de armónico (HOTA) de la señal mediante el empleo de la Short-Frequency Fourier Transform y con una ventana Gaussiana. (***Aportación a la tesis de la modificación de la STFT mediante el uso de la SFFT***).
- Análisis del orden de armónico (HOTA) de la señal mediante el empleo de la Short-Frequency Fourier Transform y con una ventana de tipo Prolate.

Además, a todas estas técnicas variantes de HOTA también se le han aplicado una serie de mejoras con respecto al algoritmo original presentado recientemente en la literatura técnica. Estas mejoras disminuyen el tiempo de cálculo y el espacio de memoria ocupado, lo que es esencial en el diseño de un sistema experto. Las mejoras propuestas en la presente tesis son:

- *Una nueva etapa de filtrado paso banda para eliminar las altas frecuencias.*
- *La minimización del efecto de borde.*
- *Un nuevo algoritmo más rápido para el ajuste óptimo de la ventana de filtro.*

En conclusión, para el régimen transitorio se exploran 4 métodos diferentes de diagnóstico.

▪ **Extracción de las características relevantes.**

Para cada una de las técnicas empleadas, se obtienen las características relevantes, en este caso una dupla por cada muestra o señal medida del motor. De tal modo se obtiene una matriz de vectores de características de dimensión igual al número de métodos de diagnóstico empleados (20 estacionario más 4 en transitorio), donde cada vector tiene la dimensión del número de ensayos que se han realizado (más de 700 ensayos).

▪ **Obtención de los Clasificadores.**

Para cada uno de los vectores de características obtenido con cada una de las técnicas de diagnóstico empleadas, se generan diferentes tipos de clasificadores basados en:

- Redes Neuronales Artificiales de 1 capa oculta.
- Redes Neuronales Artificiales de 2 capas ocultas.
- Máquina de vectores de soporte que emplean un kernel de función polinomial.
- Máquina de vectores de soporte que emplean un kernel de función de base radial gaussiana.

Dentro de cada tipo de clasificador se generan diferentes clasificadores en función del algoritmo de optimización que se emplea (sistema de validación empleado), generando multitud de clasificadores de diferentes coeficientes hasta obtener el óptimo.

▪ **Selección del sistema experto óptimo.**

Como paso final, se analizan los resultados obtenidos y se realiza la selección del sistema óptimo de diagnóstico compuesto de un clasificador y una técnica de diagnosis. El suprasistema obtenido aporta las siguientes ventajas:

1. Obtiene un sistema de diagnóstico óptimo final.
2. Obtiene varios sistemas de diagnóstico óptimos locales (para la misma técnica y sistema experto) con todos los tiempos obtenidos del proceso de entrenamiento y los tiempos estimados de diagnóstico. De esta forma, el suprasistema no aporta solamente una solución final óptima, sino que además permite al operador usar una de las soluciones alternativas generadas óptimas locales en el caso de que sea necesario ajustarse a alguna limitación en el tiempo de cálculo.
3. El suprasistema es totalmente autónomo. El operador debe aportar solo las muestras del tipo de motor específico y el suprasistema genera el sistema óptimo de diagnóstico sin necesidad de intervención del operario.
4. El suprasistema es adaptable al tipo de motor de inducción, de forma que puede generar un sistema de diagnóstico específico y óptimo para cada tipo de motor.

La tesis doctoral se ha estructurado en los siguientes capítulos:

- En el capítulo 1 se realiza una breve introducción que sirve de punto de partida y se presentan los objetivos principales de esta tesis.
- En el capítulo 2 se presenta una revisión científico-técnica de los fallos presentes en las máquinas eléctricas rotativas, así como de las principales técnicas de análisis de señal aplicadas al diagnóstico de fallos. Por último, se revisan los principales sistemas de inteligencia artificial empleadas.
- En el capítulo 3 se presenta una descripción de los sistemas de clasificación a emplear en el transcurso de la tesis y sus características.
- En el capítulo 4 se describe el banco de ensayos empleado, se describen los ensayos, así como la gestión de dichas señales.
- En el capítulo 5 se describen las características relevantes en régimen estacionario. También el desarrollo del sistema para aplicarse a este régimen de trabajo y se presentan los resultados obtenidos.
- En el capítulo 6 se describen las características relevantes en régimen transitorio. También el desarrollo del sistema para aplicarse a este régimen de trabajo y se presentan los resultados obtenidos.
- Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones y principales aportaciones de esta tesis al campo de la diagnosis de máquinas eléctricas. También se presentan las futuras líneas de investigación que se pretenden abordar en un futuro cercano.