

1. Introducción

El motor de inducción es la máquina más extendida en la industria debido a su robustez, precio y reducido mantenimiento. Resulta muy difícil, casi imposible, pensar en alguna factoría que no cuente con motores de inducción. Más de la mitad de la energía eléctrica consumida en el mundo se debe a este tipo de máquina. Número que va en aumento con la llegada de los vehículos eléctricos y la ampliación de las redes ferroviarias. La combinación de la electrónica de potencia y las máquinas de inducción ha conseguido que estas últimas encuentren muchas más aplicaciones ya que permite un gran control sobre su funcionamiento. Ahora bien, este control no puede llevarse a cabo de manera eficiente si no se conocen los parámetros internos del motor de inducción, que componen su modelo matemático y permiten conocer las características de su funcionamiento en cualquier circunstancia de trabajo.



Figura 1.1. Aspecto exterior de un motor de alta tensión refrigerado por agua

En la Figura 1.1 se muestra el aspecto exterior de un motor de inducción moderno de alta tensión refrigerado por agua. El empleo de nuevos sistemas de refrigeración, como son algunos líquidos como el agua o gases como algunos compuestos de nitrógeno, ha permitido el aumento de las potencias nominales hasta límites inalcanzables hace unos años debido al deterioro que los calentamientos excesivos producían en los materiales de los elementos del motor. El control de estos sistemas de refrigeración requiere de un conocimiento exacto de cómo se encuentra el motor en todo momento, así como de sus posibles comportamientos ante anomalías en el funcionamiento de su carga o de la

alimentación. Es decir, se requiere un control predictivo. Para poder conseguir este tipo de control es necesario un conocimiento exacto del modelo del motor de inducción.

Los motores de inducción tradicionalmente han sido alimentados directamente de la red lo que facilitaba su uso pero permitía poco margen de control sobre su funcionamiento, limitándose éste al arranque estrella-triángulo, al empleo de autotransformadores, a la inserción de resistencias rotóricas en el caso de que los devanados del rotor fuesen accesibles o a la variación del número de polos mediante la implementación de devanados, independientes, con distinto número de polos como la conexión Dahlander. La incorporación de la electrónica de potencia y técnicas como el control vectorial, hacen que las aplicaciones de los motores de inducción aumenten enormemente. Se prevé que en la próxima década más del 50% de los motores eléctricos se alimentarán a través de convertidores de potencia y que del 60% al 70% de ellos serán motores de inducción [39]. Gracias a los variadores de velocidad es posible una reducción importante de pérdidas lo que significa mayor productividad y menor consumo de recursos así como un menor impacto ambiental incluyendo una reducción del ruido. Estos variadores de velocidad, comúnmente llamados inversores, requieren para su correcto funcionamiento, disponer de complejos sistemas de control. Estos sistemas de control varían según la aplicación para la que el inversor haya sido diseñado. Por ejemplo no implementan el mismo sistema de control un inversor de un sistema fotovoltaico que el instalado en un vehículo eléctrico. En este último se emplea un motor de inducción, el cuál debe trabajar como una máquina reversible capaz de funcionar tanto como motor como generador (freno regenerativo). Para lograr estos niveles de control y poder realizar simulaciones realistas de las máquinas es necesario tener un modelo lo más exacto posible del sistema para poder predecir su comportamiento. Los parámetros que modelan este sistema son difíciles de obtener, especialmente en las máquinas de inducción ya que varían con las condiciones de funcionamiento. El calentamiento y los efectos superficiales (*skin*) incrementan las resistencias y los flujos elevados tienden a saturar las inductancias.

Generalmente los parámetros del modelo de circuito de las máquinas de inducción se calculan en la fase de diseño por el fabricante y, posteriormente, se confirman en una prueba real en la plataforma de ensayos. Sin embargo la información del fabricante no suele estar disponible para motores nuevos, cuánto menos para motores que llevan un cierto tiempo funcionando. Tradicionalmente los parámetros del modelo se determinan mediante ensayos, ya sean en banco de prueba o in situ. Los ensayos habituales para la determinación de los parámetros del modelo de circuito de los motores de inducción son los de funcionamiento en vacío y con el rotor bloqueado.

Entre los inconvenientes de un ensayo en un banco de pruebas cabe citar que la máquina no se prueba en las condiciones reales de funcionamiento. La determinación de los parámetros internos del motor debería llevarse a cabo con el motor en su puesto de funcionamiento normal, conectado a su carga habitual y a su red habitual. Sin embargo, este tipo de pruebas requiere de bastante tiempo, son relativamente costosas y no

siempre es posible desconectar el motor de su carga. Sólo se logra establecer el comportamiento de la máquina en régimen permanente y no son de gran utilidad cuando se pretende calcular los parámetros de las máquinas de inducción de doble jaula o de ranuras profundas. Además, se requiere personal cualificado y una fuente de tensión y frecuencia variables. Así pues el empleo de los métodos tradicionales no resulta efectivo en este tipo de motores.

Otros métodos para la identificación de parámetros son:

- Métodos de los elementos finitos (*FEM*)
- Utilización de algoritmos de identificación
- Método de respuesta transitoria
- Datos de catálogo

Los dos primeros métodos requieren de un conocimiento de las características constructivas físicas de la máquina, su dimensionamiento, composición y de un software especializado. Se requiere tener amplio conocimiento de este tipo de análisis para interpretar correctamente los resultados. En el caso del método de respuesta transitoria se requieren equipos especiales para la generación de la prueba y por ello es poco utilizado [2].

Otra circunstancia bastante común en la que es necesario conocer el comportamiento de un motor, se produce durante las fases de diseños de muchas instalaciones. En esta situación, la única información disponible, de forma previa a la adquisición de la máquina, es la que proporciona el catálogo del fabricante. De modo que sería muy valioso disponer de un software que con los datos del catálogo del fabricante, permitiese determinar el modelo del motor de inducción con todos sus parámetros. De esta forma sería posible conocer el comportamiento del motor en cualquier situación. Normalmente estos procedimientos requieren la solución de un sistema de ecuaciones no lineales bastante complejo por lo que se resuelve habitualmente de forma numérica.

1.1. Antecedentes

Este proyecto ha sido motivado por un trabajo anterior [1], elaborado por Ismael Morera Alonso. En ese trabajo se empleó un modelo de circuito simplificado del motor de inducción. No se incluía la resistencia del hierro y las pérdidas mecánicas y del hierro se consideraban bajo una magnitud artificial llamada pérdidas constantes. Además este trabajo, partiendo de otras publicaciones anteriores, emplea una serie de expresiones que relacionan las resistencias estática y rotórica, así como otra para las respectivas reactancias, de manera que el modelo se simplifica enormemente, requiriendo, por

tanto, una menor cantidad de información en la determinación de los parámetros internos del motor. Para el cálculo de estos parámetros, se emplearon dos algoritmos diferentes: el método de los Mínimos Cuadrados y los Algoritmos Genéticos.

El método de los mínimos cuadrados se basa en la minimización de la suma de los cuadrados de las desviaciones de la variable respecto a la estimación de algunos de los componentes. Los métodos más usados son el de Newton-Gauss y el de Levenberg-Marquardt. Estos métodos de resolución tienen el inconveniente de que pueden caer en un mínimo local, si no se acota correctamente el espacio de búsqueda. Además, sufren de problemas de convergencia por el mismo motivo.

Los Algoritmos Genéticos son una técnica que surge en los años sesenta y que utiliza los principios que la genética natural en la búsqueda de los parámetros óptimos de sistemas. Utilizan las herramientas de las que la naturaleza se ha valido en su perfeccionamiento, que básicamente son la mutación y el cruce, como se explicará detalladamente más adelante.

Los resultados obtenidos en el trabajo de Ismael Morera Alonso son excelentes.

1.2. Objetivos

El objetivo central de este trabajo consiste en estudiar el comportamiento de determinados algoritmos, que han funcionado bien en las resoluciones de otros problemas, en la resolución del modelo completo de la máquina de inducción. A partir de ahí, se investiga el mejor método a implementar por una herramienta informática, que permita realizar una estimación de los parámetros del modelo de circuito completo de una máquina de inducción, empleando la información que ofrecen los fabricantes en sus catálogos.

Los métodos que se van a investigar son:

- Mínimos Cuadrados.
- Algoritmos Genéticos.
- Sistemas de Partículas.

Mediante las dos últimas se intentan evitar los problemas de los métodos basados en Mínimos Cuadrados en los que, en ciertas circunstancias, no conducen a una estimación óptima de los parámetros.

El estudio de los Sistemas de Partículas está motivado por el excesivo consumo de tiempo que requiere el cálculo de los parámetros internos al emplear Algoritmos Genéticos, así como por el éxito demostrado por estos algoritmos en la resolución de otros problemas de la ciencia moderna. Dentro de los Sistemas de Partículas se estudiarán dos alternativas diferentes, el algoritmo original, pero modificado, combinando las bondades de la búsqueda global y de la local, y una opción más novedosa basada en los clubes sociales.

El trabajo comienza con la descripción en profundidad de los modelos de la máquina de inducción empleados, los algoritmos utilizados, así como el proceso de adquisición de datos partiendo de los catálogos de los fabricantes [35] y [36]. Continuará con una explicación de las ecuaciones empleadas en el proceso de cálculo de los parámetros internos, para proceder a analizar con gran detalle los resultados arrojados por cada uno de los métodos investigados.

Finalmente se compararán los resultados obtenidos por cada algoritmo, llevando a cabo test de velocidad o robustez, entre otros.

Se valorarán otros factores referentes al algoritmo utilizado como puede ser la velocidad de ejecución o la precisión frente al tiempo de cálculo ya que a veces puede ser más interesante una estimación rápida que una estimación mejor pero que necesite un largo tiempo de cálculo.

De igual manera se presentará una comparación de los resultados obtenidos por los métodos estudiados en este trabajo, con los resultados obtenidos por modelos más simples [1].

Para concluir se presentará una tabla de selección del mejor método a emplear para cada tipo de motor, de entre los estudiados en este trabajo, así como una serie de directrices sobre la futura continuación de la investigación iniciada en este proyecto.