



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i5.1603>

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de revisión

Modelamiento del comportamiento de máquinas eléctricas

Modeling the behavior of electrical machines

Modelando o comportamiento de máquinas elétricas

Jimmy Arturo Zambrano-Loor ^I
jimmyzambanolor@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4149-6685>

Edison Reneiro Vélez-Solórzano ^{II}
nosidere@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8539-080X>

Correspondencia: jimmyzambanolor@hotmail.com

***Recibido:** 9 de noviembre de 2020 ***Aceptado:** 16 de noviembre de 2020 *** Publicado:** 16 de diciembre de 2020

- I. Ingeniero Eléctrico, Estudiante Investigador de Posgrado de la Maestría de Investigación en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Ingeniero Eléctrico, Estudiante Investigador de Posgrado de la Maestría de Investigación en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Resumen

Actualmente el empleo de las máquinas eléctricas como los generadores, motores, transformadores, máquinas síncronas o asíncronas se desarrollan por los distintos sectores y procesos industriales conocidos, por lo que es indispensable realizar modelamientos de éstas para el correcto funcionamiento, así como la detección de fallas a tiempo, entre otras aplicaciones. Esto se hace con el fin de procurar que una máquina eléctrica pueda fallar y provocar cuantiosas pérdidas económicas a las empresas. Es por ello que esta investigación de tipo documental tiene el objetivo del estudio de la modelación de máquinas eléctricas, a través de su diseño y de la utilización de un programa adecuado para ello, destacando su versatilidad y su bajo costo en el mercado, permitiendo reducir en gran medida el número de ensayos destructivos en los laboratorios y obtener a su vez de forma fiable diferentes niveles de confianza ante cada una de las situaciones que se puedan presentar en una máquina eléctrica. Este artículo se ha explicado el análisis de diseño de máquinas eléctricas para su correcto modelado. Para la implementación de modelación de éstas máquinas hay que fundamentarlas matemáticamente. Para realizar esta modelación es necesario el uso de software siendo el más adecuado Simulink/Matlab.

Palabras Claves: Máquinas eléctricas; modelación; generadores; motores; software.

Abstract

Currently the use of electrical machines such as generators, motors, transformers, synchronous or asynchronous machines are developed by the different sectors and known industrial processes, so it is essential to carry out modeling of these for correct operation, as well as the detection of faults on time, among other applications. This is done in order to ensure that an electrical machine can fail and cause large economic losses to companies. That is why this documentary-type research has the objective of studying the modeling of electrical machines, through its design and the use of a suitable program for it, highlighting its versatility and low cost in the market, allowing to reduce to a large extent the number of destructive tests in laboratories and in turn reliably obtain different levels of confidence in each of the situations that may arise in an electrical machine. This article has explained the design analysis of electrical machines for their correct modeling. For the implementation of modeling of these machines it is necessary to substantiate them mathematically. To carry out this modeling it is necessary to use software, the most appropriate being Simulink /

Matlab.

Keywords: Electrical machines; modeling; generators; motors; software.

Resumo

Atualmente a utilização de máquinas elétricas como geradores, motores, transformadores, máquinas síncronas ou assíncronas é desenvolvida pelos diversos setores e processos industriais conhecidos, sendo imprescindível a realização de modelagens destes para o correto funcionamento, bem como a detecção de falhas. na hora certa, entre outras aplicações. Isso é feito para garantir que uma máquina elétrica possa falhar e causar grandes perdas econômicas às empresas. É por isso que esta pesquisa do tipo documental tem como objetivo estudar a modelagem de máquinas elétricas, através do seu projeto e da utilização de um programa adequado a ela, destacando sua versatilidade e baixo custo no mercado, permitindo sua redução. em grande medida o número de testes destrutivos em laboratórios e por sua vez, obtêm de forma confiável diferentes níveis de confiança em cada uma das situações que podem surgir em uma máquina elétrica. Este artigo explicou a análise de projeto de máquinas elétricas para sua modelagem correta. Para a implementação da modelagem dessas máquinas é necessário substanciá-las matematicamente. Para realizar esta modelagem é necessário utilizar um software, sendo o mais adequado o Simulink / Matlab.

Palavras-chave: Máquinas elétricas; modelagem; geradores; motores; software.

Introducción

En pleno siglo XXI, se ha intensificado el uso de disciplinas tecnológicas como la electrónica, la mecatrónica, el control aplicado, entre otras. Y por supuesto los procesos de modelamiento del comportamiento de máquinas eléctricas no pueden quedar atrás. Las máquinas eléctricas son imprescindibles en el ámbito industrial. Todos ellos relacionados con la automatización industrial, robótica, domótica, etc. Actualmente existen en el mercado gran variedad de máquinas eléctricas en diversas versiones, que necesitan conocer el modelo de comportamiento para diseñar distintos sistemas, por lo tanto, los parámetros que caracterizan a las máquinas eléctricas en general, resultan de mucha utilidad.

El objetivo principal de esta investigación es el estudio de la modelación de máquinas eléctricas. Un modelado de acuerdo a Córdoba & Plaza (2017) es una herramienta que permite responder

interrogantes sin tener que recurrir a la experimentación sobre el mismo, también puede definirse como una representación simplificada de la realidad. Por lo tanto, en este artículo se describirá la importancia del modelamiento de máquinas eléctricas para determinar su comportamiento a través de la fundamentación matemática.

Por consiguiente, una máquina eléctrica de acuerdo a Rojas (2014) es “un dispositivo que transforma la energía cinética en otra energía, o bien, en energía potencial, pero con una presentación distinta, pasando esta energía por una etapa de almacenamiento en un campo magnético” (p.12). Las máquinas eléctricas se pueden dividir en generadores, motores y transformadores. Donde los generadores son aquellos que transforman la energía mecánica en eléctrica; los motores eléctricos son máquinas que transforman la energía eléctrica en energía mecánica que absorben por sus bornes. Dependiendo del tipo de corriente utilizada para su alimentación se clasifican en motores de corriente continua y motores de corriente alterna y los transformadores conservan la forma de la energía transformando sus características.

Hoy día, para el estudio y análisis del comportamiento de máquinas eléctricas es muy ventajoso el uso de modeladores informáticos. García y Ramírez (2017), afirman que con estos simuladores “se ha demostrado su utilidad y una relación costo/beneficio muy importante, ya que contribuyen fuerte y efectivamente a lograr ahorros considerables a las empresas eléctricas” (p.1), es decir, los ahorros se obtienen por el buen desempeño de operadores entrenados en apoyar a aumentar la disponibilidad de los grupos de producción, en prolongar la vida útil de sus equipos eléctricos y en aumentar la eficiencia energética.

Cada día, los investigadores han estado interesados en desarrollar modelamientos de máquinas eléctricas para estudiar su funcionamiento más óptimo y con ello predecir cómo va a trabajar e incluso cuando va a fallar. Por su parte, Báez et al, (2018), opinan que “en la práctica ingenieril el modelado es un apartado muy importante” (p.102). Hoy día con el uso de computadoras y poderosos software, sistemas reales sumamente complejos pueden ser simulados y puede predecirse su comportamiento en el mundo real, gracias a la existencia de diversos tipos de software de modelación que ofrece el mercado actualmente.

Báez et al, (2018) pronuncian que “la simulación virtual en modelos de estas mediciones con software adecuados reviste gran importancia” (p.103). Por su parte, Montangud (2019) indica que “el modelado virtual supone una herramienta perfecta para el ensayo y verificación de los sistemas

de control y de su integración en el proceso industrial a analizar, reduciendo enormemente la necesidad de utilizar costosos y arriesgados montajes de laboratorio” (p.5).

A través de la modelación en tiempo real se cuenta con una manera sencilla y versátil de analizar diferentes situaciones a presentarse durante el funcionamiento de una máquina eléctrica sin la necesidad de ensayos destructivos. Herold (2012) dice que “durante el proceso de diseño de una máquina eléctrica, se deben combinar diferentes herramientas de cálculo de acuerdo con los requisitos específicos de la máquina, los objetivos de diseño y los requisitos de solicitud” (p.2). Por otra parte, Chiasson (2005), expresa que las máquinas eléctricas son una aplicación particularmente fascinante de la electricidad y el magnetismo básico, es decir, son el resultado de una aplicación inteligente de los principios del electromagnetismo y en particular de la ley de inducción de Faraday.

Por otro lado, Aliprantis (2003), expresa que al “diseñar sistemas de energía eléctrica de alta complejidad e importancia, se debe hacer mediante el uso de simulaciones en un programa de computadora es una condición sine qua non” (p.6). Es necesario recalcar que esta investigación no es el principio ni el fin de los estudios de modelamiento de motores, sino que es un avance, bien sea errado o asertivo, lo importante es que aporte nuevos conocimientos que se deben de tomar en cuenta y valorar futuros trabajos, es decir, este artículo va a contribuir con la formación de nuevas definiciones y a futuras innovaciones en relación al modelado de máquinas eléctricas relacionadas con el tema.

Los estudiantes y profesionales en los distintos niveles de experiencia de la ingeniería en electricidad, se deben preparar arduamente en relación al diseño y modelamiento de máquinas eléctricas en general, ya que es un beneficio conocer sobre la fundamentación matemática de éstas.

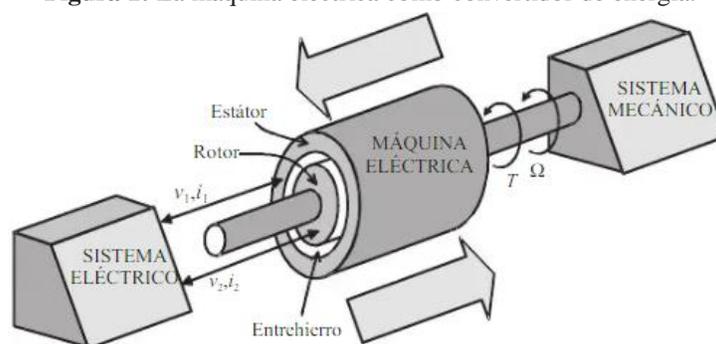
Metodología, Materiales y Métodos

La metodología a implementar en este artículo es de revisión de documentos relacionados con la modelación de máquinas eléctricas en general, para ello se investigó todo lo relacionados a ella, definiciones, clasificaciones, ventajas e importancia. A continuación, se muestra un poco de la investigación documental.

Las máquinas eléctricas de acuerdo a Lei et al (2017) “son el corazón de muchos aparatos, equipos y sistemas industriales” (p. 1), por lo que deben cumplir con varias exigencias en el contexto de

sostenibilidad global, esto se refiere que deben acatar requisitos ambientales y no solamente debe estar bien física y tecnológicamente. Estos mismos autores expresan que en el proceso optimización de diseño de una máquina eléctrica, para su adecuado modelado es complejo, ya que se involucran más de una disciplina, así como dominios de las diversas ingenierías. En términos generales, se puede decir que una máquina eléctrica es un convertidor de energía y se compone de dos partes, como se indica esquemáticamente en la Figura 1:

Figura 1: La máquina eléctrica como convertidor de energía.

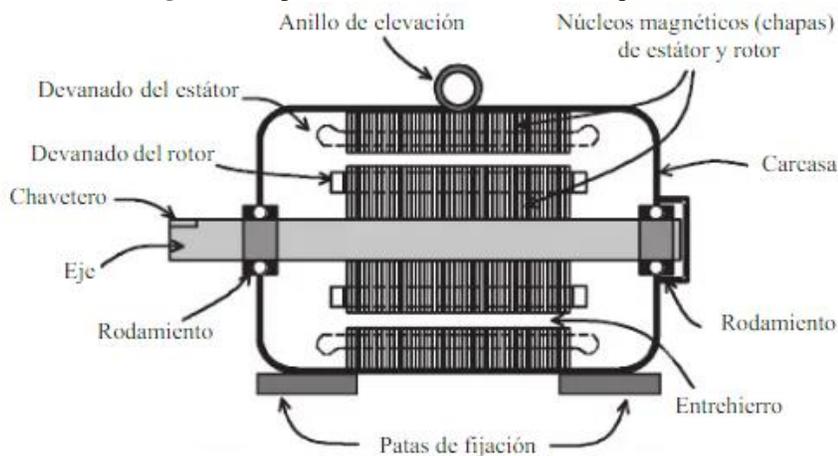


Fuente: Fraile (2008).

Entre los elementos básicos de las máquinas eléctricas de acuerdo a Fraile (2008), se encuentra el estátor, la cual tiene forma cilíndrica, a su vez en la cavidad del estátor se ubica el rotor, que es la parte giratoria de la máquina. El espacio de aire que separa el estátor del rotor, fundamental para que pueda girar la máquina, se designa entrehierro, siendo el campo magnético existente en el mismo el que constituye el acoplamiento entre los sistemas eléctrico y mecánico. Regularmente tanto en el estátor como en el rotor existen devanados formados con conductores de cobre por los que circulan corrientes suministradas o cedidas a un circuito exterior que constituye el sistema eléctrico y es uno de los devanados tiene por misión crear un flujo en el entrehierro y por ello se denomina inductor.

Así mismo, el otro devanado recibe el flujo del primero y se inducen en él corrientes que se cierran por el circuito exterior y se nombra inducido. Lo mismo puede ubicarse el inductor en el estátor y el inducido en el rotor o viceversa. Desde el punto de vista de la construcción, el estátor tiene su parte exterior recubierta por la carcasa o culata, estando constituida por un cilindro hueco al que se unen los pies y los dispositivos de fijación de la máquina como se puede observar en la figura 2.

Figura 2: Aspectos constructivos de una máquina eléctrica.



Fuente: Fraile (2008).

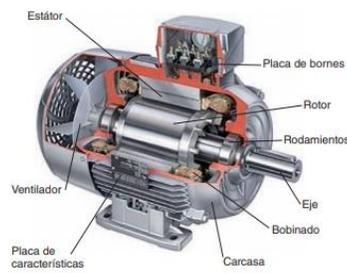
Desde un punto de vista energético se clasifican las máquinas eléctricas en tres tipos fundamentales como lo indica Herrera (2014), en generador, la cual transforma la energía mecánica en eléctrica. En motor, que acuerdo a WEG Motor (2020) el motor eléctrico es “una máquina capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica” (p.6). De acuerdo a este mismo autor el motor de inducción es el tipo de motor más utilizado porque combina todas las ventajas que ofrece la energía eléctrica como bajo costo, fácil suministro y distribución, manejo limpio y controles simple, junto con los de construcción simple y su gran versatilidad para adaptarse a amplios rangos de cargas y eficiencias mejoradas, como se puede observar en la figura 3 y 4; y por ultima clasificación el transformador, que convierte la energía eléctrica de entrada con determinadas magnitudes de tensión y corriente en otra energía eléctrica de salida con magnitudes diferentes.

Figura 3: Motor Eléctrico.



Fuente: Castillo, J. y Marrufo, E. (2010).

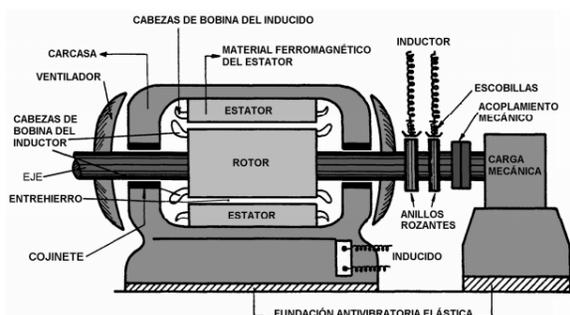
Figura 4: Sección de Motor Eléctrico.



Fuente: Castillo, J. y Marrufo, E. (2010).

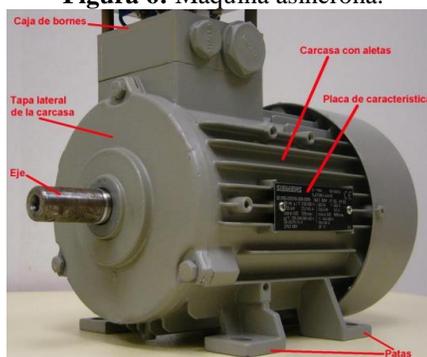
Como otra clasificación de las máquinas eléctricas, se podría hacer tomando en consideración la velocidad, y ésta se divide en máquinas síncronas y asíncronas. Donde las máquinas síncronas según Pernía (2011), son aquellas capaces de operar sólo a la velocidad sincrónica, esto es, a la velocidad mecánica equivalente a la velocidad de rotación de CMG producido por las corrientes del estator; y las máquinas eléctricas asíncronas según Rodríguez (2008) “tienen un circuito magnético sin polos salientes estando ranurados tanto el estator como el rotor, los cuáles van a estar sometidos a la acción de campos magnéticos giratorios que darán lugar a pérdidas magnéticas” (p.1). La máquina síncrona se puede observar en la figura 5 y la máquina asíncrona en la figura 6.

Figura 5: Máquina síncrona.



Fuente: Rodríguez, M. (2018).

Figura 6: Máquina asíncrona.



Fuente: Rodríguez, M. (2008).

Por última clasificación, considerada como la clasificación más frecuente, es de acuerdo con la fuente de energía que emplean, se encuentran las máquinas de corriente continua y máquinas de corriente alterna. Las máquinas de corriente continua son “un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica”, así lo dice Electronics Projects Focus (2020), mientras que las máquinas eléctricas de corriente alterna, son las síncronas y asíncronas.

Análisis de diseño de máquinas eléctricas para su correcto modelado y discusión de resultados.

Las máquinas eléctricas tienen más de un siglo de historia. Hay muchos tipos y clasificaciones, como máquinas de corriente continua (CC) y corriente alterna (CA), síncronas y asíncronas (también llamadas de inducción). Lei et al (2017) indican que cada máquina eléctrica tiene sus

principios de diseño específico. Mientras tanto, existen algunos métodos de diseño generales, que se pueden esbozar en términos de diferentes disciplinas y dominios.

Entre algunos principios de diseño específico de las máquinas eléctricas son:

- **Diseño electromagnético:** este diseño es fundamental, ya que el principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas se fundamenta en la teoría electromagnética. Zhang (2011) explica que “el diseño electromagnético determina los perfiles de fuerzas radiales y de par del generador que dan para el diseño mecánico de la turbina” (p.378). El objetivo principal de este diseño es calcular ciertos parámetros electromagnéticos básicos incluyendo la inductancia del devanado a través del cálculo del campo magnético y su distribución en las máquinas eléctricas, y para evaluar los rendimientos, como fuerza electromagnética, pérdida de potencia y eficiencia basada en ellos. A partir de este diseño se puede calcular en una máquina eléctrica el rendimiento como la eficiencia y las pérdidas.
- **Diseño térmico y diseño estructural:** según Lei et al (2017) estos diseños de una máquina eléctrica se pueden realizar después de la finalización del diseño anteriormente descrito. El diseño térmico, tiene como finalidad calcular la distribución de temperatura en la máquina eléctrica basada en el calor obtenido del análisis electromagnético, mientras que el diseño estructural su objetivo principal es considerar la tensión y la deformación de la máquina bajo el efecto electromagnético.
- **Diseño multifísico:** en una máquina eléctrica tiene como objeto calcular las características electromagnéticas, la distribución de temperatura, estrés estructural, ruido de vibración y rendimiento acoplado de máquinas eléctricas. Con el desarrollo de software dirigidos al modelamiento de máquinas eléctricas, fundamentados matemáticamente como es el caso del método de elementos finitos ha sido ampliamente utilizada como una herramienta eficaz para el diseño y análisis multifísico de máquinas eléctricas.
- **Diseño de materiales de las máquinas eléctricas:** es crucial para los diseños anteriores, lo expresan Lei et al (2017), ya que depende para la fabricación de nuevas topologías, mayor eficiencia y económicos costos de fabricación. Así mismo, es importante el diseño de procesos de fabricación en la etapa de sistemas eléctricos, lo que influirá en su calidad de fabricación y rendimiento real en funcionamiento.

Luego de describir brevemente los principios de diseño de los motores eléctricos los cuales contribuyen en la ingeniería básica y la ingeniería de detalles para el correcto modelamiento de

éstos, se procede a explicar las técnicas de modelado. Para conseguir un modelado de máquinas eléctricas precisa, Lei et al (2017) exponen que hay varios pasos para el desarrollo de un modelo sustituto, incluida la generación de muestras, mediante el uso de técnicas de construcción y verificación de modelos.

En primer lugar, hay que generar algunas muestras utilizando una técnica de Diseño de Experimentos (DE). Existen dos tipos principales de DE como son las técnicas en Estadística, diseño factorial completo y diseño factorial parcial. En segundo lugar, desarrollar una especie de modelo sustituto basado en las muestras obtenidas. Diversas técnicas de DE y modelos sustitutos se han integrado en el software, tales como MATLAB/Simulink. Lei et al (2017) aseguran que para que el modelo construido sea preciso, “se debe realizar un análisis de errores basado en algunas muestras nuevas y diferentes” (p.11). también expresan estos autores que “se pueden aplicar varios criterios para este propósito, como root error cuadrático medio y error relativo medio. Si el modelo tiene buena precisión, se puede utilizar para optimización posterior, y los resultados de optimización obtenidos son fiables” (p.11).

Aalto University (2020) expresa que “la simulación proporciona una manera fácil de comprender y describir la modelación de máquinas eléctricas” (p.2). Este mismo autor indica que “Matlab – Simulink es uno de los entornos de simulación más populares disponibles. Utilizando Simulink requiere algo de trabajo, pero vale la pena”.

Modelación de máquinas eléctricas

Para la implementación de modelación de máquinas eléctricas el primer paso es de acuerdo a Riaz (2015) es el modelado matemático de máquinas eléctricas hay que “detallarlas como Circuitos polifásicos acoplados de estator y rotor en términos de las llamadas variables de fase” (p.1). Este mismo autor indica que es necesario el uso de software para la modelación y expresa que:

“La implementación de Simulink/Matlab es adoptado debido a su integración inherente de representaciones de sistemas vectorizados en forma de diagrama de bloques, de métodos de análisis numérico, de representación gráfica del tiempo evoluciones de señales combinadas con la implementación simple de la funcionalidad de controladores y electrónica de potencia” (p.1).

Así mismo indica Riaz (2015), que el desarrollo del programa Simulink es relativamente tarea sencilla que consiste en combinar la representación del bloque de entrada y salida de los distintos

componentes que componen el sistema. Esta modelación proporciona una poderosa herramienta de diseño debido a la facilidad de observar los efectos de modificaciones de parámetros y de cambios en configuraciones y control del sistema de estrategias.

Hieb (2020), enuncia que, con un modelamiento de máquinas eléctricas bien formulado, “los ingenieros pueden verificar la funcionalidad de su sistema de control, realizar pruebas de modelo en circuito cerrado, ajustar ganancias mediante simulación, optimizar el diseño y ejecutar análisis hipotéticos que serían difíciles o arriesgado de hacer en la planta real” (p.1). Los ingenieros han verificado que con al usar el modelamiento para el funcionamiento de motores permite ahorrar tiempo y abaratar los costos de producción para probar cada uno de los diseños realizados. Para realizar las simulaciones del modelamiento debe hacerse con personal calificado con conocimiento de dominio para aplicarlo.

A través de los programas de modelación de máquinas eléctricas en este caso, el Simulink es uno de los programas que se puede usar ya que en estos son procesos lineales o no lineales dependientes del tiempo, y MatLab-Simulink es ideal para simulación de con ecuaciones diferenciales (tiempo continuo) o ecuaciones en diferencia (tiempo discreto).

Por tanto, Báez et al. (2018) expresan que Simulink es una extensión de MatLab que utiliza una interface manejada mediante iconos para la construcción de un diagrama de bloques que es la representación gráfica de un proceso.

Sus grandes ventajas es un paquete de programas para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos, motivando a los usuarios que se pruebe construir diagramas de bloques y simulen el comportamiento de máquinas eléctricas.

Para finalizar Ingalalli y Bapiraju (2020) explican que el “propósito de una simulación en tiempo real es proporcionar un sistema de circuito cerrado necesario para validar el firmware o la aplicación de control” (p.1). es decir, que se debe a su vez certificar las modelaciones que se realicen en cada una de las máquinas eléctricas.

Conclusiones

La modelación de máquinas eléctricas, es una herramienta que se usa para evaluar el desempeño de un sistema, ya sea existente o propuesto, bajo diversas configuraciones de interés y sobre largos periodos de tiempo real.

La modelación de una máquina eléctrica en general (generadores, motores, transformadores) puede ser reconfigurado y experimentado. Por consiguiente, la fundamentación matemática de la modelación puede ser estudiada para deducir algunos detalles sobre el comportamiento de ellas. Con la modelación de máquinas eléctricas permite adquirir experiencia a estudiantes y profesionales de forma rápida con un bajo costo, sin poner en riesgo la productividad. Con una modelación permite realizar estudios sistemáticos de alternativas ya sea durante el diseño o la producción de las máquinas eléctricas, planteando opciones para el mejoramiento del mismo.

Referencias

1. Aliprantis, D. (2003). Advances in electric machine modeling and evolutionary parameter identification. UMI Number: 3122814. <https://acortar.link/FZ9uU>
2. Aalto University (2020, 12 de agosto). Modelling a DC-Motor in Matlab. <https://acortar.link/J5O3z>
3. Báez, J., Jiménez, R. y Gutiérrez, D. (2018). Matlab/Simulink: Modelos para simular mediciones eléctricas en circuitos r, rl y rlc monofásicos. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6759655>
4. Castillo, J. y Marrufo, E. (2010). Instalaciones Eléctricas básicas. 84-481-7310-4. McGraw-Hill/Interamericana De España, S. <https://acortar.link/HVLcQ>
5. Córdova, D. y Plaza, D. (2016). Modelamiento y simulación de un motor/generador eléctrico de corriente continua controlado por campo/armadura y con carga variable. <https://acortar.link/zQBeI>
6. Chiasson, J. (2005). Modeling and control of electric machines. ISBN 0-47 1 -68449-X (cloth). <https://acortar.link/VZ6C3>
7. Electronics Projects Focus. (2020, 12 de agosto). DC MOTOR – Basics, Types & Application. <https://www.elprocus.com/dc-motor-basics-types-application/>
8. Fraile, J. (2008). Máquinas eléctricas. 6ta edición. ISBN: 978-84-481-6112-5. McGraw-Hill/Interamericana De España, S. A. U. https://www.academia.edu/42010234/Maquinas_electricas_6a_ed_Fraile_Mora_Jesus

9. García, J. y Ramírez J. (2017). Concepción de un simulador para el entrenamiento de operadores de centrales hidroeléctricas y desarrollo del arranque de un generador. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5537/553757146011/html/index.html>
10. Herold T. (2012). The art of modelling Electrical Machines. <https://acortar.link/3I7ql>
11. Herrera, J. (2014). Importancia del conocimiento sobre maquina eléctrica para el mantenimiento industrial. <https://acortar.link/X2aXQ>
12. Hieb, B. (2020). Creating a High-Fidelity Model of an Electric Motor for Control System Design and Verification. MathWorks. <https://acortar.link/bkOFJ>
13. Ingalalli, A. y Bapiraju, J. (2020). Analytical model for real time simulation of low voltage induction motor drive. <https://acortar.link/aoqM4>
14. Lei, G.; Zhu, J.; Guo Y.; Liu, C. and Ma, B. (2017). A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines. <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/1962>
15. Montagud, M. (2019). Modelado del sistema de control de máquinas eléctricas rotativas y su implementación en sistemas de simulación tipo “Hardware-in-the-Loop” para el desarrollo de técnicas de diagnóstico. <https://acortar.link/xp5et>
16. Pernía M. (2011). Conceptos Básicos de Máquinas Síncronas. Universidad Nacional Experimental del Táchira. Venezuela. <https://acortar.link/HAcuB>
17. Ríaz, M. (2015). Simulation of electric machine and drive systems using matlab and simulink. <http://people.ece.umn.edu/users/riaz/macsim/info.pdf>
18. Rodríguez, M. (2008). Máquinas Eléctricas II. Tema 4. Máquinas asíncronas o de inducción. <https://acortar.link/K8Elh>
19. Rodríguez, M. (2018). Máquinas Eléctricas II. Tema 3. Máquinas síncronas. <https://acortar.link/6ts5V>
20. Rojas, R. (2014). Importancia del conocimiento sobre maquina eléctrica para el mantenimiento industrial. <https://acortar.link/X2aXQ>
21. Veltman, A. (1991). A universal method for modelling electrical machines. <https://acortar.link/CjOJw>
22. WEG Motor (2020). Specification Guide Electric Motors. Cod: 50039409 | Rev: 07 | Date (m/a): 03/2020. <https://acortar.link/OQZ2X>

23. Zhang, Z.; Matveev, A.; Nilssen, R. and Nysveen, A. (2017). Review of modeling methods in electromagnetic and thermal design of permanent magnet generators for wind turbines.: <https://www.researchgate.net/publication/241192231>

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).