

REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES SÍNCRONOS DE IMANES PERMANENTES CON APLICACIONES PARA INDUSTRIA 4.0

REVIEW OF FAULT DETECTION METHODS FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINES WITH APPLICATIONS FOR INDUSTRY 4.0

Rafael Torres Medina

Universidad Politécnica de Aguascalientes
rafael.torres@upa.edu.mx

Víctor Arturo Maldonado Ruelas

Universidad Politécnica de Aguascalientes
victor.maldonado@upa.edu.mx

Raúl Arturo Ortiz Medina

Universidad Politécnica de Aguascalientes
raul.ortiz@upa.edu.mx

Recepción: 21/octubre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

En este trabajo se presenta el estado del arte de la investigación existente en la metodología para el diagnóstico de fallas en motores síncronos de imanes permanentes (PMSM, por sus siglas en inglés) que tienen aplicación en los sistemas de industria 4.0. Los PMSM están incluidos en un conjunto de sistemas que deben tener la capacidad de diagnosticar su estado de operación y tomar decisiones para mantener la integridad de sus elementos en operación, evitando mantenimientos correctivos y paros de producción. Por tanto, se revisan trabajos de investigación, enfatizando aquellos de los últimos 10 años. En ellos se presentan las diferentes metodologías para el diagnóstico de fallas, tipos de fallas, algoritmos y elementos necesarios para los PMSM. Con base en el análisis, queda manifiesta la gran relevancia del PMSM y el estudio de sus fallas para la industria 4.0.

Palabras clave: Diagnóstico de fallas, métodos de detección, PMSM.

Abstract

This paper presents the state of the art of the existing research in the methodology for the diagnosis of faults in permanent magnet synchronous motors (PMSM) with application in industry 4.0 systems. The PMSM are included in a set of systems that must have the ability to diagnose their own operating status and make decisions to maintain the integrity of their elements in operation, avoiding corrective maintenance and production stoppages. Therefore, research works are reviewed, emphasizing those of the last 10 years. Different methodologies for the diagnosis of faults, types of faults, algorithms and elements necessary for this type of electric machine are presented. Based on the analysis, it is evident the great relevance of the PMSM and the study of its faults for the industry 4.0.

Keywords: *Detection methods, fault diagnosis, PMSM.*

1. Introducción

Las industrias han tenido varias transformaciones a lo largo del tiempo. Inicialmente fue el comienzo de la revolución industrial en el siglo XVIII cuando se mecanizaron los trabajos agrarios y artesanales. La segunda revolución se le adjudica a las líneas de producción dentro de las industrias para producción en grandes masas en el siglo XIX. En el siglo XX la industria sufre su tercera revolución con la involucración de sistemas programables con el objetivo de volver automáticas las líneas de producción y sustituir al humano en tareas repetitivas o de gran peligro; esta revolución fue causada por el despliegue de la electrónica [Román, 2016]. En la actualidad, en Alemania, en el año 2011 se acuñó el término de industria 4.0 y desde entonces se está desencadenando la cuarta transformación industrial. A esta revolución se le denomina con el nombre Industrias 4.0 [Erdoğan, 2019], [Manavalan, 2018], [Peralta, 2017]. La industria 4.0 busca obtener fuentes de información sobre los diferentes estados de la fábrica, utilizando datos para comprender la situación en la que la ésta se encuentra. Una fábrica de Industria 4.0 es capaz de ganar auto-conciencia y auto-previsión a través de la implantación de componentes inteligentes dotados de identidades digitales propias, con la intención de facilitar su manejo y reparación a distancia [Tapia, 2014], [Jay, 2014]. Esto

permite a la administración, obtener más información sobre el estado de los procesos, estimar el nivel bienestar y detectar fallas en los componentes y sistemas, para activar un mantenimiento necesario, implementado de una manera óptima y reducir el tiempo que “se pierde” al efectuar un mantenimiento. [Jay, 2014], [Lin, 2016], [Chen 2018], [German, 2019].

Por tanto, esta nueva revolución industrial describe una organización de los procesos de producción y se basa en la tecnología y en dispositivos que se comunican entre sí autónomamente a lo largo de la cadena de valor. Los sistemas informáticos supervisan los procesos físicos, crean una copia virtual del mundo físico y toman decisiones logrando auto-organizarse. [Smit, 2016]. En esta nueva industria, los sensores, máquinas, componentes y sistemas informáticos estarían conectados y podrían interactuar entre ellos utilizando protocolos estándar basados en internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) [Blanco, 2017], [Tapia, 2014], [Román, 2016], [Bassi, 2017], [Ramadan, 2019], [Dalenogare, 2018]. Es evidente, que, al necesitar nuevas características en los sistemas de la cuarta transformación, los componentes del mismo también tienen que cambiar. La tabla 1, presenta una comparativa que existe en los componentes de la industria actual con respecto a la industria 4.0.

Tabla 1 Comparación de elementos: industria actual contra la industria 4.0 [Jay, 2014].

INDUSTRIA ACTUAL			
	Fuente de información	Cualidad de importancia	Tecnología Utilizada
Componentes	Sensor	Precisión	Sensores inteligentes de detección de fallas
Máquina	Controlador	Reproducibilidad, calidad y rendimiento	Monitoreo y diagnóstico basado en condiciones
Sistemas de producción	Redes de sistema de manufactura	Reproducibilidad	Reducción de trabajos y costos
INDUSTRIA 4.0			
Componentes	Sensor	Auto-conciencia Auto-previsión	Monitoreo y previsión de la degradación y vida útil.
Máquina	Controlador	Autoconciencia Auto-previsión Auto-comparación	Control previsor y tolerante a fallas.
Sistemas de producción	Redes de sistema de manufactura	Auto-configuración Auto-mantenimiento Auto-organización	Reproducibilidad.

Las máquinas forman parte de los elementos fundamentales de las industrias ya que son el principal propulsor de los procesos y equipo industrial, por tanto, para los requerimientos de la industria 4.0, es necesario controlar de manera precisa y confiable; así como contar con un sistema de diagnóstico de fallas de la máquina eléctrica [Jay, 2014]. Por tanto, es necesario saber las condiciones deseadas de operación de los motores eléctricos para la industrial 4.0. Este trabajo, por tanto, realiza un estado de arte, de los tipos de fallas que afectan a estas máquinas, y poder con base en eso, generar controles tolerantes a este tipo de fallas, que son condiciones necesarias para operar en régimen de industria 4.0

2. Métodos

Los PMSM, han llamado mucho la atención en numerosas aplicaciones de accionamiento industrial, gracias a sus ventajas en comparación con otros motores, como baja inercia, alta eficiencia y excelente rendimiento dinámico [Abassi, 2016]. Los PMSM son utilizados cada vez más en campos de control y automatización; debido a sus ventajas de densidad de potencia superior, control de movimiento de alto rendimiento con velocidad y mejor precisión, ofrece un buen estado estacionario satisfactorio; así como una respuesta transitoria [Chou, 2013].

En las máquinas de imanes permanentes, las fallas se pueden clasificar principalmente en tres tipos [Flores,R], [Wangguang, 2017], [Ebrahimi, 2019]:

- Magnéticas y mecánicas:
 - ✓ Daño de imanes y desmagnetización
 - ✓ Excentricidad
 - ✓ Atracción magnética desequilibrada.
 - ✓ Rodamientos.
- Eléctricas: Fallos en bobinado del estator.

Daño de Imanes y Desmagnetización

Es uno de los daños más severos, ya que concluye en la disfunción total del motor y es irreversible. La desmagnetización de alguno de los motores puede terminar en una atracción magnética desequilibrada, debido a que los imanes no generan la

misma atracción sobre las bobinas, esto incrementa las vibraciones en el rotor lo que puede llevar a calentamiento del motor, fallas eléctricas, excentricidades o cargas desbalanceadas [Rosero, 2006]. Estas fallas concluyen en un impacto negativo en el desempeño del motor, en su eficiencia y confiabilidad.

Excentricidad

Este problema ocasiona vibraciones sobre la flecha del motor y puede representar diferentes tipos de inconvenientes. En una máquina sin falla de excentricidad, se espera que el centro del rotor esté alineado con el centro del núcleo del estator y que el centro de rotación sea el mismo que el centro del núcleo del estator. La excentricidad se produce debido al espacio no uniforme entre el estator y el rotor [Ebrahimi, 2010]. Se puede clasificar en tres categorías [Ebrahimi, 2009], [Polat, 2015]:

- **Excentricidad estática:** Se produce cuando los ejes de rotación del rotor y el eje del estator no coinciden y el rotor únicamente gira en su propio centro. [Xu, 2017]
- **Excentricidad dinámica:** Se produce cuando los ejes del estator y del rotor sí están alineados pero el rotor no gira alrededor de su propio eje, lo que significa que el entrehierro del rotor es mínimo. [Xu, 2017], [Ebrahimi, 2009].
- **Excentricidad mixta:** Se produce cuando se presentan la excentricidad estática y dinámica. [Xu, 2017].

Cuando la excentricidad es significativa, se genera un movimiento de atracción y se le conoce como fuerza magnética desequilibrada. Esto puede causar roces entre el estator y el rotor, lo que podría causar daños de desmagnetización o daños en el estator y/o rotor [Rosero, 2006], [Xu, 2017].

Atracción Magnética Desequilibrada

Este error puede ser derivado de la excentricidad o la desmagnetización de los imanes, genera ruido y vibraciones destructivas, además de generar desgaste en los cojinetes [Di, 2015].

Las tolerancias de fabricación permiten un porcentaje de excentricidad y de diferencias en la magnetización de los imanes que lo componen, por ello es importante considerar dicha tolerancia tanto en el diseño de la máquina como en la monitorización de su estado [Choi, 2018].

Eléctricas: Corto-Circuitos o Circuitos Abiertos en los Devanados

Las fallas eléctricas de los devanados se presentan principalmente por el desgaste del aislante que existe entre los devanados del estator. Se generan principalmente por movimientos inusuales, excentricidad y contaminación de la máquina. Por lo tanto, al existir un desgaste en el aislante del devanado del estator, se generan corto-circuitos en el mismo devanado, o entre devanados, produciendo desbalances eléctricos en las corrientes de fase del motor. Esto provoca que la falla incipiente crezca de manera exponencial con el tiempo hasta convertirse en un circuito abierto en los devanados [Saavedra, 2014].

Rodamientos

Los rodamientos constan de dos anillos, uno interno y uno externo. También constan de un conjunto de balines colocados en rieles por dentro de estos. Se genera una falla mecánica de rodamiento cuando la fatiga hace que las piezas pequeñas se desprendan del cojinete o cuando alguno de los balines o rieles se rompe [Rosero, 2006]. Las fallas mecánicas generan vibraciones mecánicas [Rosero, 2007].

3. Resultados

Metodología General para la Detección de Fallas

En la industria 4.0 no sólo es importante detectar la falla que se está generando, o que se ha generado, sino que también es importante poder cuantificar la magnitud de la falla (identificación). Esto permitirá tomar decisiones más eficientes, convirtiendo los procesos en más eficaces.

Para poder identificar un tipo de falla en los PMSM, es necesario utilizar dos etapas: La primera se relaciona con el sistema de adquisición de las variables de interés

como se muestra la figura 1. De esta manera relacionarlas por medio de algoritmos que realicen un clasificador, y asegure que existe un estado de falla ante las perturbaciones del sistema naturales y/o anormales.

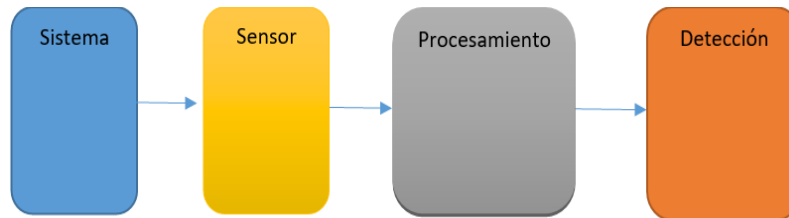


Figura 1 Diagrama de detección de fallas.

Por tanto, un factor importante es la selección del sensor para la adquisición de las variables de interés dependiendo del tipo de falla a identificar. Para detectar una falla de rodamiento, los sensores más utilizados son acelerómetros para detectar vibraciones o sensores de corriente. Para la detección de fallas eléctricas, lo conveniente es utilizar sensores de corriente. Esta etapa es posible únicamente cuando el sistema se lleva a la práctica, por contrario, únicamente se debe de determinar la variable a analizar y elegir el método de procesamiento.

Variables de Medida para la Detección de Fallas

La segunda etapa es seleccionar adecuadamente la forma de procesamiento de señales, dependiendo de la falla que se esté analizando y el tipo de sensor utilizado. Cuando se trata de fallas de rodamiento, el método comúnmente utilizado es el análisis de frecuencias [Çıra, 2018], [Otava, 2017], [Mehrjou, 2001].

Para poder censar una variable determinada, que tenga relación con la falla, se puede hacer a través de las siguientes variables de medición:

- Acústica.
- Corriente del estator.
- Campo electromagnético.
- Velocidad angular instantánea.
- Potencia instantánea.
- Vibraciones.

- Temperatura.
- Condiciones mezcladas.

Procesamiento de Señales para la Detección de Fallas

Existen muchos métodos de procesamiento de señales, ya que pueden ser aplicables para sistemas lineales y no lineales. Esto los hace muy útiles y ampliamente utilizados en el diagnóstico de fallas de motores eléctricos. Entre los principales métodos están [Wangguang, 2017]:

- Método de corriente de secuencia negativa.
- Análisis en frecuencia.
- Método de inyección de señal de alta frecuencia.
- Método de descomposición de potencia.

Existen algunos métodos de detección de fallas en motores eléctricos, basados en el conocimiento, algunos de ellos son [Wangguang, 2017]:

- Diagnóstico basado en un sistema experto.
- Diagnóstico basado en una red neural artificial.
- Lógica difusa.
- Algoritmo de enjambre de partículas.

4. Discusión

Como se mencionó en las secciones anteriores, es de relevancia para un proceso industrial que trabaje con un enfoque de industria 4.0, que sus componentes o elementos trabajen bajo el mismo enfoque. Las máquinas eléctricas, en particular los PMSM, por sus características descritas, son el principal propulsor de maquinarias y elementos industriales. La tabla 2 por tanto, presenta una revisión de los principales métodos de diagnóstico de fallas en estos motores, para poder monitorear el estado actual del motor y acoplarlo de una manera más eficaz y confiable a controladores tolerantes a fallas, que son los utilizados en procesos de industria 4.0.

Tabla 2 Principales métodos de diagnóstico de fallas en PMSM.

Tipos de falla a detectar	Referencia y falla específica a detectar	Variable medida	Técnica(s) de procesamiento utilizada(s)		
Magnéticas y mecánicas.	Fallas magnéticas.	[Nejadi, 2017] Desmagnetización uniforme	Par de acoplamiento mecánico	Método de elementos finitos bidimensionales (2D-FE)	
		[Wang, 2016] Desmagnetización uniforme	Corrientes del estator	Filtro de Vold-Kalman.	
		[Wang, 2015] Desmagnetización permanente.	Efecto de desmagnetización y corrientes del estator	Cálculo de bobinas de detección comparados con un modelo analítico	
		[Ahsanullah, 2017] Fallas en bobinado y desmagnetización	Corriente del motor	Análisis de elementos finitos bidimensional (2-D) Transformada de Hilbert-Huang	
		[Goktas, 2015] Separación de falla de excentricidad estática e imanes rotos	Corriente de fase	Método de elementos finitos bidimensional (2-D) en el tiempo	
		[Zafarani, 2015] Fallas en imanes.	Corrientes del estator	Análisis de elementos finitos (2-D) Transformada rápida de Fourier y la firma de la fuerza contra-electromotriz	
	Fallas mecánicas	[Çıra,2018] Excentricidad estática y dinámica	Vibración	Análisis de espectro bidimensional de elementos finitos (2-D) Tensor de esfuerzo de maxwell	
		[Rosero, 2007] Ruptura de baleros y excentricidad	Corriente del estator	Análisis de la señal de intensidad del motor en el marco d-q	
	Magnéticas y mecánicas.	Fallas mecánicas	[Pacas,2019] Daño en baleros	Vibración	Método de Welch.
			[Mehrijou,2011] Ruptura de balero	Corriente del estator	Transformada rápida de Fourier, distribución de Widgner Ville y Espectro de Gabor
[Allouche, 2018] Mecánica aplicada a par de carga			Estimación de parámetros, midiendo la velocidad angular del motor	PLL(Phase-Locked loop)	
[Park, 2018] Excentricidad y desmagnetización			Vibración y corriente del estator	Análisis de elementos finitos	
Eléctricas	Cortos eléctricos	[Faiz, 2016] Corto en entre vueltas.	Corriente del estator	Modelado por circuito magnético equivalente y Vector de Park extendido	
		[Otava, 2017] Corto en entre vueltas	Torque y temperatura	Filtro de Kalman Extendido	
		[Bochao, 2012] Corto en entrevueltas	Corriente del estator	Análisis de secuencia de corriente negativa, transformada de concordia	
		[Hang 2016] Corto en entre vueltas	Corrientes de estator.	Análisis frecuencial. Algoritmo de seguimiento de frecuencia	
		[Youssef, 2017] Circuito abierto en una fase del estator	Observador de variables.	Estimador de flujo directo	
		[Chuang, 2017] Falla eléctrica en los devanados del estator	Voltajes y corrientes de las fases del motor	Análisis frecuencial	
		[Esteban, 2017] Fallas eléctricas	Monitoreo de señales	Análisis dimensional	

Para el caso en particular del diagnóstico de la máquina, se observa que el tipo de falla magnética más común es la desmagnetización. Para monitorear esta, se realiza a través de la medición de corriente en estator y la técnica más empleada es el análisis de la máquina por medio del método elemento finito combinado con otras metodologías de detección. Para el caso de las fallas mecánicas, el tipo de falla más común es el desgaste o daño en los baleros. La técnica más común es el análisis de frecuencia de la señal de la corriente de estator. Por último, en fallas eléctricas, la más común son los cortos circuitos en los devanados. De igual manera que las fallas mecánicas, la técnica más común es a través de análisis en frecuencia de las corrientes de estator.

Por tanto, con un tipo de técnica y medición de una variable, se puede diagnosticar diversos tipos de fallas y tener un mejor monitoreo del estado de la máquina; al mismo tiempo este tipo de medición puede ser no invasiva y lo cual determina su facilidad de implementación. Esto tiene relevancia para los procesos industriales con enfoque 4.0, ya que contiene información del estado de la máquina, permitiendo la administración de los procesos, la estimación de niveles de bienestar y la detección de fallas en las PMSM y los sistemas. Por tanto, con esta información, se puede hacer el desarrollo de clasificadores tolerantes a fallas, permitiendo atender de manera oportuna el estado de la falla, aislando el tipo y el porcentaje de magnitud de la misma. Así se realizará el mantenimiento necesario, implementado de una manera óptima y reduciendo el tiempo del mismo.

5. Conclusiones

En este trabajo se han presentado investigaciones de los últimos 10 años, en donde se observa que las fallas eléctricas se presentan con menor frecuencia que las fallas mecánicas en los PMSM. El método de detección de fallas usado con mayor frecuencia en los PMSM se centra en el análisis de frecuencias a través de diferentes técnicas como lo son FFT, vector de Park, espectro bidimensional, espectro de Gabor, entre otros. Las variables de medidas más utilizadas para alimentar los métodos de detección son por medio de vibraciones y la adquisición de corrientes en el estator. El conjunto de estas condiciones indica la viabilidad para

trabajar en el diagnóstico de fallas de rodamientos en PMSM con un control tolerante en aplicaciones de industria 4.0.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Abassi, M., Khlaief, A., Saadaoui, O., Chaari, A., & Boussak, M. (2016). Fault tolerant control and reconfiguration for three-phase permanent magnet synchronous motors drive,. 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), (pp. 1-6). Hammamet. doi:10.1109/CEIT.2016.7929053.
- [2] Ahsanullah, K., Jeyasankar, E., Panda, S. K., Shanmukha, R. and Nadarajan, S. (2017) .Detection and analysis of winding and demagnetization faults in PMSM based marine propulsion motors, 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL,pp. 1-7. Doi:10.1109/IEMDC.2017.8002050.
- [3] Allouche, A., Etien, E., Doget, T., Rambault, L., Sakout, A., Cauet, S., & Martin, P. (2018). A PLL based mechanical faults detection in PMSM at variable speed, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 24, pp 1445-1451, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.534.
- [4] Bassi, L. (2017). Industry 4.0: Hope, hype or revolution?., 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), pp. 1-6. doi: 10.1109/RTSI.2017.8065927.
- [5] Blanco, R., Fontodrón, J., & Poveda, C. (2017). La industria 4.0: El estado de la cuestión. *Economía industrial*, p.p. 151-164.
- [6] Chen, B., Wan, J., Shu, Y., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2018) Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges, in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6505-6519, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2783682.
- [7] Choi, S. (2018). Fault Diagnosis Techniques for Permanent Magnet AC Machine and Drives—A Review of Current State of the Art,. in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4, 444-463. doi:10.1109/TTE.2018.2819627.

- [8] Chou, H. H., Kung, Y. S., Quynh, N. V., & Stone, C. (2013). Optimized FPGA design, verification and implementation of a neuro-fuzzy controller for PMSM drives. *Mathematics and Computers in Simulation*, 90, 28-44. Retrieved mayo 13, 2019, from <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2012.07.012>.
- [9] Chuang, C., Wei, Z., Zhifu, W., & Zhi, L. (2017). The Diagnosis Method of Stator Winding Faults in PMSMs Based on SOM Neural Networks, *Energy Procedia*, Volume 105, pp 2295-2301, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.663.
- [10] Çıra, F. (2018). Detection of eccentricity fault based on vibration in the PMSM. *Results in Physics*, 10, 760-765: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.06.044>.
- [11] Di, C., Bao, X. Wang, H., Lv, Q. and He, Y. (2015). Modeling and Analysis of Unbalanced Magnetic Pull in Cage Induction Motors With Curved Dynamic Eccentricity, in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 8, pp. 1-7, Art no. 8106507. Doi: 10.1109/TMAG.2015.2412911
- [12] De Bisschop, J., Vansompel, H., Sergeant, P., & Dupre, L., (2017) Demagnetization Fault Detection in Axial Flux PM Machines by Using Sensing Coils and an Analytical Model, in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4,, doi: 10.1109/TMAG.2017.2669480.
- [13] Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.A. & Frank, A.G. (2018) The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance, *International Journal of Production Economics*, Volume 204, pp 383-394, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.08.019
- [14] Ebrahimi, B. M., Faiz J. & Roshtkhari, M. J. (2009). Static-, Dynamic-, and Mixed-Eccentricity Fault Diagnoses in Permanent-Magnet Synchronous Motors, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4727-4739.
- [15] Ebrahimi, B. M. and Faiz J. (2010). Diagnosis and performance analysis of three-phase permanent magnet synchronous motors with static, dynamic and mixed eccentricity, in *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 1, pp. 53-66.
- [16] Erdoğan, G. (2019). Land selection criteria for lights out factory districts during the industry 4.0 process, *Journal of Urban Management*, doi: 10.1016/j.jum.2019.01.001.

- [17] Esteban, E., Salgado, O., Iturrospe, A., & Isasa, I (2017). Design methodology of a reduced-scale test bench for fault detection and diagnosis, *Mechatronics*, Volume 47, pp 14-23, doi: 10.1016/j.mechatronics.2017.08.005.
- [18] Faiz, J., Exiri, A. H., & Nejadi-Koti, H. (2016). Current-based inter-turn short circuit fault modeling in permanent magnet synchronous machine using magnetic equivalent circuit model. 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), (pp. 265-270). Bydgoszcz. doi:10.1109/CPE.2016.7544197
- [19] Flores, R., & Tomás I., A. (2011). Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias Utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales. *Información Tecnológica*, 73-84.
- [20] German-Sallo, Z., & Strnad, G. (2019), Machinery Fault Diagnosis Using Signal Analysis, *Procedia Manufacturing*, Volume 32, 2019, pp 585-590, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.256.
- [21] Goktas, T., Zafarani, M. and Akin, B. (2015) Separation of broken magnet and static eccentricity failures in PMSM, 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Coeur d'Alene, ID, pp. 1459-1465. Doi: 10.1109/IEMDC.2015.7409254.
- [22] Hang, J., Ding, S., Zhang, J., Cheng, M., Chen, W., & Wang, Q. (2016) Detection of Interturn Short-Circuit Fault for PMSM With Simple Fault Indicator, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 4, pp. 1697-1699, doi: 10.1109/TEC.2016.2583780
- [23] Jay, L., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2014). Recent Advances and Trends of Cyber-Physical Systems and Big Data Analytics in Industrial Informatics. Conference on Industrial Informatics (INDIN). Porto Alegre, Brazil.
- [24] Lin, T., Chen, Y., Yang, D., & Chen, Y. (2016). New Method for Industry 4.0 Machine Status Prediction - A Case Study with the Machine of a Spring Factory, 2016 International Computer Symposium (ICS), pp. 322-326. doi: 10.1109/ICS.2016.0071
- [25] Luo, Y., Qiu, J., & Shi, C. (2018). Fault Detection of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Deep Learning Method. 21st International

- Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), (pp. 699-703). Jeju. doi:10.23919/ICEMS.2018.8549129
- [26] Manavalan, E. & Jayakrishna, K. (2018). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 127, pp 925-953, doi: 10.1016/j.cie.2018.11.030.
- [27] Mehrjou, M. R., Mariun, N., Marhaban, M. H., & Misron, N. (2011). Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine—A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25, 2827-2848.
- [28] Nejadi-Koti, H., Faiz, J., & Demerdash, N. A. (2017). Uniform demagnetization fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors by means of cogging torque analysis. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, (pp. 1-7). Miami. doi:10.1109/IEMDC.2017.8002299
- [29] Otava, L., & Buchta, L. (2017). Implementation and verification of the PMSM stator interturn short fault detection algorithm. *19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*. Warsaw.
- [30] Pacas, M., Villwock, S., & Dietrich, R. (2019). Bearing damage detection in permanent magnet synchronous machines. *EEE Energy Conversion Congress and Exposition*. San Jose, CA.
- [31] Park, Y (2018). Online Detection of Rotor Eccentricity and Demagnetization Faults in PMSMs Based on Hall-Effect Field Sensor Measurements, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 3, pp. 2499-2509, doi: 10.1109/TIA.2018.2886772.
- [32] Peralta, G., Iglesias-Urkia, M., Barcelo, M., Gomez, R., Moran, A., & Bilbao, J. (2017), Fog computing based efficient IoT scheme for the Industry 4.0, *2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, pp. 1-6. doi: 10.1109/ECMSM.2017.7945879.
- [33] Rosero, J. A., Cusido, J., Garcia, A., & Ortega, J. A. (2006). Broken Bearings and Eccentricity Fault Detection for a Permanent Magnet Synchronous Motor. *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. Paris.

- [34] Polat, A., Ertuğrul, Y. D. & Ergene, L. T. (2015), Static, dynamic and mixed eccentricity of induction motor, 2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Guarda, pp. 284-288. doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303703.
- [35] Ramadan, M. (2019). Industry 4.0: Development of Smart Sunroof Ambient Light Manufacturing System for Automotive Industry, 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), pp. 1-5. doi: 10.1109/ICASET.2019.8714236.
- [36] Román, J. L. (2016). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. Facultad de ingeniería de la Universidad de Deusto. España: Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática: <http://coddii.org/wp-content/uploads/2016/10/Informe-CODDII-Industria-4.0.pdf>.
- [37] Rosero, J., Cusido, A., Espinosa, A. G., Ortega, J. A., r, & Romeral, L. (2007). Broken Bearings Fault Detection for a Permanent Magnet Synchronous Motor under non-constant working conditions by means of a Joint Time Frequency Analysis. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Vigo.
- [38] Saavedra, H., Urresty, J. C., Riba, J. R., & Romeral, L. (2014). Detection of interturn faults in PMSMs with different winding configurations. *Energy Conversion and Management*, 79, 534-542: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.059>.
- [39] Smit, J., Industry 4.0. Directorate General for Internal Policies. European Parliament.
- [40] Tapia, V. (2014). Industria 4.0 – Internet de las Cosas. UTCiencia. Ciencia y tecnología al servicio del pueblo, 51-61.
- [41] Wang, C., Delgado Prieto, M., Romeral, L., Chen, Z., Blaabjerg, F., and Liu, X. (2016). Detection of Partial Demagnetization Fault in PMSMs Operating Under Nonstationary Conditions, in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1-4. Doi: 10.1109/TMAG.2015.2511003.
- [42] Wangguang, Z. Wang, D. Wang, Y. Li and M. Li, (2017). A review on fault-tolerant control of PMSM, 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, pp. 3854-3859. Doi: 10.1109/CAC.2017.8243452.

- [43] Xu, C., Qiu, C. & Wu, X. (2017). Eccentricity faults diagnosis based on motor stray magnetic field signature analysis, 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, pp. 5577-5582. Doi: 10.1109/CAC.2017.8243776.
- [44] Youssef, A., Khil, S., & Belkhodja, I. (2017). Open-circuit fault diagnosis and voltage sensor fault tolerant control of a single phase pulsed width modulated rectifier, *Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 131, pp 234-252, doi: 10.1016/j.matcom.2015.10.005.
- [45] Zafarani, M., Goktas, T. and Akin, B. (2015). A comprehensive analysis of magnet defect faults in permanent magnet synchronous motors," 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, NC, pp. 2779-2783. Doi: 10.1109/APEC.2015.7104743.