

Revisión de las Técnicas de Diagnóstico de Fallas en Motores Síncronos de Imanes Permanentes con Capacidad de Arranque en Línea

B. D. Lara^{#1}, E. Mombello^{#2} *member, IEEE*, G. R. Bossio^{*3} *member, IEEE*.

[#]*Instituto de Energía Eléctrica (IEE), Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina*

¹bredydi@gmail.com

²mombello@iee.unsj.edu.ar

^{*}*Grupo de Electrónica Aplicada (GEA), Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), Argentina*

³gbossio@ing.unrc.edu.ar

Abstract— In this paper a review of fault diagnosis techniques for Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM) is carried out. Nowadays, these high efficiency motors are presented as possible replacements for low-power induction motors in industry. The development of techniques for detection and diagnosis of incipient faults in these types of machines will reduce maintenance costs. Due to its recent application in industry, there is a lack of studies addressing this issue. Therefore this investigation includes all existing publications related to fault diagnosis techniques in LSPMSM.

Resumen— En este trabajo se lleva a cabo una revisión de las técnicas de diagnóstico de fallas en Motores Síncronos de Imanes Permanentes con capacidad de Arranque en Línea. Hoy en día, estos motores de alta eficiencia se presentan como posibles sustitutos de los motores de inducción de baja potencia en la industria. El desarrollo de técnicas para la detección y diagnóstico de fallas incipientes en este tipo de máquinas reducirá los costos de mantenimiento. Debido a su reciente aplicación en la industria, hay pocos estudios que abordan esta temática. Por lo tanto, esta investigación incluye todas las publicaciones existentes relacionadas con las técnicas de diagnóstico de fallas en este tipo de motor.

I. INTRODUCCIÓN

LOS motores eléctricos utilizados en aplicaciones industriales consumen entre el 35% al 45% del total de la energía eléctrica generada en todo el mundo. Por tal razón las exigencias de mayor eficiencia energética han provocado en varias aplicaciones industriales la sustitución del tradicional motor de inducción (MI). En particular los motores síncronos de imanes permanentes con capacidad de arranque en línea LSPMSM (por sus siglas en inglés “Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor”) han sido identificados como un prometedor sustituto en aplicaciones de baja potencia (0.75-11KW) [1] [2].

El LSPMSM posee un estator de las mismas característica que un estator de MI y un rotor híbrido que combina la característica de un rotor de motor síncrono de imanes permanentes (MSIP) para su operación en estado estacionario

y las características de un rotor de MI para su operación en arranque y estado transitorio, la Figura 1 muestra la sección transversal de un polo en un LSPMSM trifásico.

Por su rotor híbrido el LSPMSM combina las ventajas del MI (construcción robusta y arranque en línea) y del MSIP (alta eficiencia, elevado factor de potencia, mayor torque y densidad de potencia). En la Figura 2, las variaciones de eficiencia en el rango de bajas potencias es comparado con respecto a un LSPMSM, MI de un constructor particular y la norma IEC6034-30 (Alta eficiencia IE2, Eficiencia Premium IE3 y Eficiencia Súper Premium IE4).

A pesar de las ventajas superiores del LSPMSM, la ocurrencia de fallas debido a diversas condiciones de operación es inevitable. Por este motivo es esencial una correcta planificación de las intervenciones de mantenimiento y la detección de fallas en estado incipiente que permita reducir los costos de mantenimiento e incrementar la confiabilidad del sistema donde opera la máquina.

El trabajo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se señalan los tipos y frecuencias de las diferentes fallas, en la sección 3 se aborda el actual estado del arte del diagnóstico de fallas en LSPMSM, luego este estado se discute en la sección 4 y finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones.

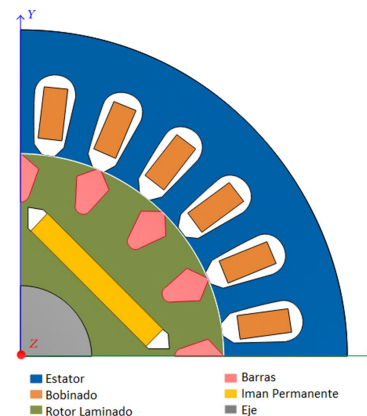


Figura 1. Sección transversal de un LSPMSM trifásico de 4 Polos [3]

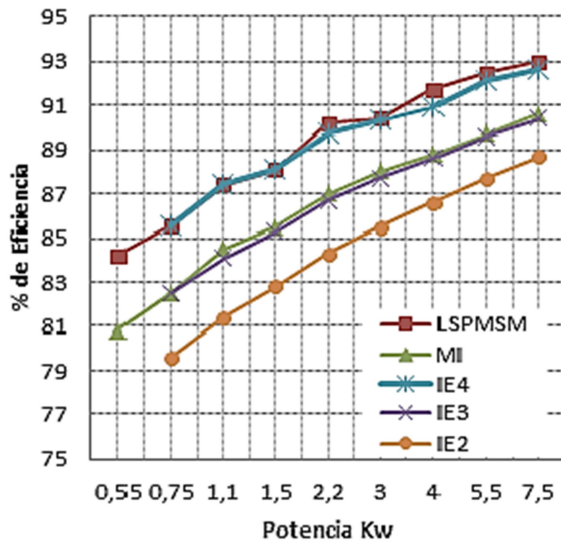


Figura 2. Eficiencia de LSPMSM, MI de 4 polos 50 Hz y norma IEC6034-30 [4].

II. TIPOS Y FRECUENCIAS DE FALLAS EN LSPMSM.

Los tipos de falla en LSPMSM pueden clasificarse en fallas mecánicas, fallas eléctricas y fallas magnéticas, en la Figura 3 aparece un esquema de los tipos de fallas en los LSPMSM. Por otra parte existen también algunas fallas que si bien son externas a los LSPMSM afectan a su funcionamiento, entre estas se pueden mencionar perturbaciones en la carga, tales como oscilaciones o desalineación y problemas en el suministro eléctrico como contactos de alta resistencia o en la calidad de la energía suministrada.

Con respecto a la frecuencia de las diferentes tipos de fallas en LSPMSM no existe hasta el momento ningún estudio que haga referencia a este tema. Aunque debido a las características de este tipo de motores podría esperarse que la frecuencia de fallas sea muy similar a la que se presenta en MI y MSIP.

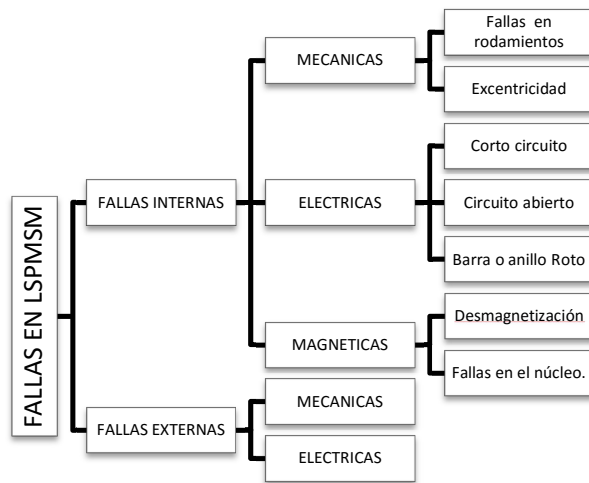


Figura 3. Tipos de fallas en LSPMSM.

III. ESTADO DEL ARTE DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN LSPMSM

A. Fallas Mecánicas.

Entre las fallas mecánicas podemos citar las fallas en rodamientos, la excentricidad.

Las fallas en rodamientos usualmente son el resultado de ensamble inapropiado, mala lubricación, sobrecarga e inclusive puede existir fatiga bajo operación normal con buen alineamiento y carga balanceada [5]. Aunque no existe ningún estudio específico de fallas en rodamientos para LSPMSM, se puede tomar como referencia los estudios hechos para MSIP. La mayoría de estos estudios utiliza el análisis espectral de señales de vibraciones mecánicas, estas señales se transforman matemáticamente (transformadas Fourier, transformadas wavelet) con el fin de encontrar patrones que permitan detectar e identificar las fallas [6-9].

En cuanto a excentricidad en la Figura 4 [10] se describen los diferentes tipos que existen. Son causas comunes de excentricidad imprecisiones en la fabricación, masas desbalanceadas y tolerancia de los rodamientos [11]. En relación con la excentricidad estática (ES), en [3] se utiliza un modelo desarrollado a partir del método de elementos finitos (MEF) para un LSPMSM bajo ES operando en estado estacionario, este modelo estudia el contenido armónico de las corrientes analizándolo en el dominio de la frecuencia aplicando un análisis de densidad espectral de potencia (DEP). A partir de los resultados obtenidos se propone el siguiente indicador:

$$f_{estática} = \left[1 + \frac{m}{p}\right] f, \quad (1)$$

Donde $f_{estática}$ es la componente armónica debida a la ES en el LSPMSM, m es un numero entero impar, p es el número de pares de polos y f es la frecuencia eléctrica. Cuando la excentricidad es alta, esto se refleja en una mayor amplitud de las componentes armónicas, lo que puede ayudar a estimar el grado de excentricidad estática. Además el patrón de frecuencias usado en la expresión (1) es adecuado para la detección de excentricidades estáticas incipientes. Por otra parte no se encuentran estudios que den un aporte sustancial en cuanto al diagnóstico de excentricidad dinámica (ED) y excentricidad mixta (EM).

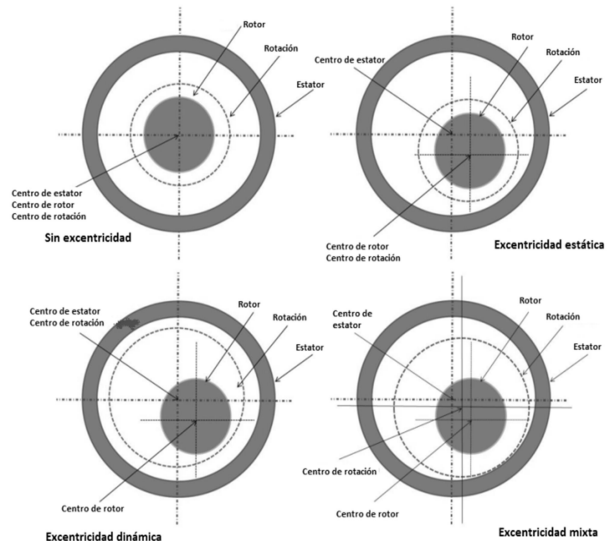


Figura 4. Tipos de excentricidad en un LSPMSM [10].

B. Fallas Eléctricas.

Las fallas eléctricas están estrechamente ligadas con la condición del aislamiento de las bobinas del estator, el deterioro y envejecimiento del aislamiento conduce a cortocircuitos entre los conductores de las bobinas. Éstos a su vez generan sobrecalentamientos que conducen a sobrecorrientes y finalmente a una falla catastrófica del motor (cortocircuitos a tierra y cortocircuitos entre fases). Además las altas corrientes generan flujos magnéticos que se oponen al flujo natural de los imanes permanentes del rotor, bajo estas circunstancias es posible que ocurra desmagnetización parcial o total en los imanes permanentes del rotor [12] [13]. Hay que hacer notar que aún no se encuentran estudios que traten puntualmente el diagnóstico de fallas eléctricas en LSPMSM.

En relación a fallas de barra rota en LSPMSM no hay en la literatura estudios que aborden este tema, cabe destacar que un diagnóstico en línea de este tipo de falla, bajo condiciones ideales, podría llevarse a cabo solo en condiciones de arranque (debido a que la jaula únicamente opera en el arranque o transitorios) complicando de esta manera su análisis.

C. Fallas Magnéticas.

La desmagnetización parcial o total de los imanes permanentes (IP) del rotor puede ocurrir debido a diversas causas entre estas: 1) Durante el arranque la fuerza magnetomotriz (FMM) usualmente es muy grande y gira a diferente velocidad con respecto al rotor, generando una poderosa fuerza magneto motriz desmagnetizante (FMMD) [14]; 2) Debido a funcionamiento anormal, como se mencionó anteriormente, fallas eléctrica pueden conducir a severas FMMD que son capaces de dañar de forma permanente a los imanes; y 3) en condiciones de sobrecarga, la FMM del estator es fuerte y se localiza muy cerca del eje de cuadratura del rotor, resultando en un campo inclinado en el interior de los imanes permanentes y causando desmagnetización parcial en los mismos [15].

Para el caso de desmagnetización durante el arranque en [16] se emplea el MEF para calcular la FMMD y se estudian diversos factores que pueden influir en el proceso de desmagnetización. El análisis de los resultados obtenidos muestra que la desmagnetización de los imanes permanentes es más propensa a ocurrir cuando los tiempos de arranque son más largos debido a factores de carga grandes, factores de inercia elevados, tensión de alimentación baja o a una posición de rotor específica especialmente en arranque con baja carga.

Por otra parte en [17] se propone un esquema para la detección de desmagnetización en LSPMSM a través de redes neuronales artificiales (RNA) basada en polinomios ortogonales de Chevyshev. Para tal propósito primero desarrolla un modelo basado en la transformación de Park donde los ejes " dq " se representan de forma similar a una MSIP con la incorporación adicional de ejes directos y en cuadratura para un rotor de jaula, luego determina los parámetros para un LSPMSM de laboratorio en forma experimental, estos parámetros son validados comparándolos contra el modelo desarrollado. Finalmente se estudia la desmagnetización usando el modelo y contrastando los patrones de una máquina sana con respecto a una máquina bajo condiciones de falla.

En [15] se aborda la desmagnetización considerando el decaimiento de las propiedades de los imanes permanentes después del impacto de la FMMD, para conseguirlo emplea un MEF iterativo, este proceso es señalado en la Figura 5. Después cuatro configuraciones de rotor (Figura 6) son propuestas como medidas contra la desmagnetización, por último estas propuestas son estudiadas y comparadas, llegando a la conclusión de que la configuración que combina barreras magnéticas y jaulas duales presenta la mejor protección para los imanes permanentes.

En [18] a través MEF se calcula el punto mínimo de operación de los imanes (proyección del campo magnético generado por las corrientes en las bobinas a lo largo de la dirección de magnetización de los imanes) durante un proceso de cambio repentino de rotación.

Por su parte, en [19] también se emplea el MEF para calcular el punto mínimo de operación de los imanes para estudiar la desmagnetización durante procesos de arranque, desincronización, cortocircuito trifásico, recierre y fase abierta. En la Figura 7 se compara la coercitividad efectiva en cada IP bajo diferentes condiciones de desmagnetización.

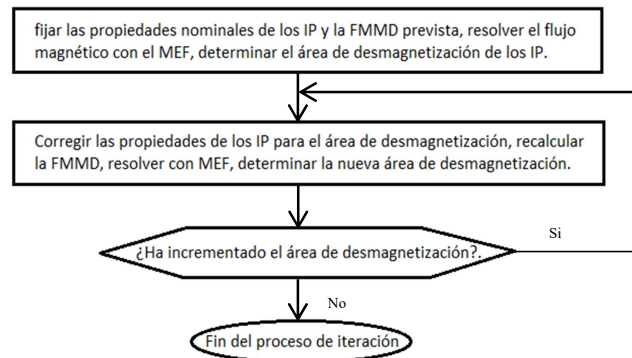


Figura 5. Proceso de iteración para investigar la propagación de desmagnetización parcial [17].

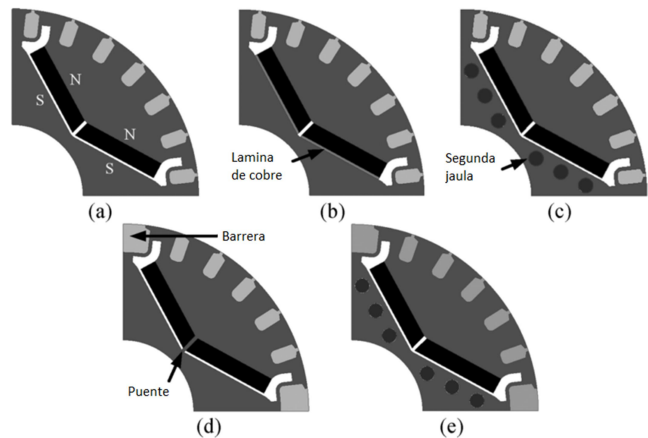


Figura 6. Configuraciones de rotor para contrarrestar desmagnetización: a) Original, b) con láminas de cobre, c) con jaula de ardilla dual, d) con barreras magnéticas y puentes, e) con barreras magnéticas y jaula dual [17].

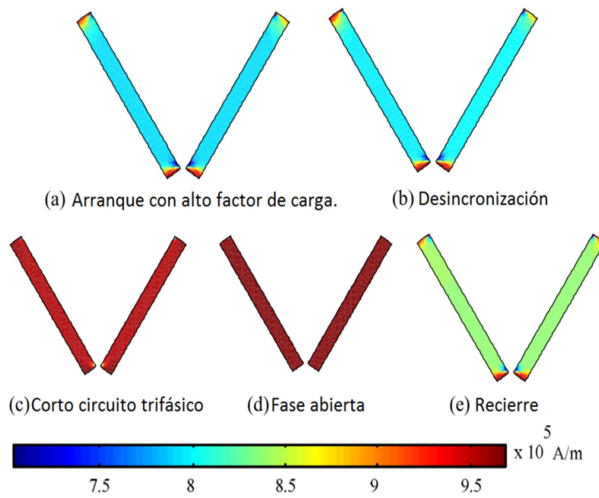


Figura 7. Comparación de la coercitividad efectiva de los IP bajo diferentes condiciones de desmagnetización [19].

IV. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE.

Existen pocos estudios referentes al diagnóstico de fallas en LSPMSM, esto se debe a que aunque es una tecnología relativamente antigua [20] solo hasta los últimos años el desarrollo de los nuevos materiales ha permitido que se vuelva atractiva y rentable. En la actualidad se ha visto un crecimiento en el desarrollo e implementación de este tipo de motores debido al interés en fomentar la eficiencia energética a través de la implementación de normas cada vez más exigentes.

Se debe destacar que existen varios tipos de fallas en las que no existe ningún estudio en particular para este tipo de motores, en la Tabla 1 se muestra un resumen de la cantidad de estudios por fallas que se encuentran en la literatura. Es fácil notar la poca cantidad de aportes realizados en este tema, lo cual lo convierte debido a su relevancia en un atractivo nicho para la elaboración de investigaciones.

El tipo de falla más estudiado es la desmagnetización, esto se debe a que es un tipo de falla muy común y sensible en este tipo de motores, además la experiencia adquirida en estudios de desmagnetización en MSIP ha permitido con unas pocas modificaciones la implementación de técnicas ya desarrolladas. Por otro lado existe solo un estudio en cuanto a fallas de excentricidad y ningún estudio que trate los demás tipos de fallas.

Entre las herramientas utilizadas en el análisis de fallas se destaca el MEF. Hay que hacer notar que aunque existen algunos estudios para el diagnóstico de fallas en LSPMSM prácticamente ninguno de estos respaldan sus aportes con pruebas experimentales de laboratorio por lo que dejan un gran vacío en la comprobación de las técnicas y métodos propuestos.

Por último, debido a la compleja arquitectura del rotor en LSPMSM la determinación de sus parámetros se convierte en todo un reto de ingeniería y por ende complica el estudio del diagnóstico de las fallas en este tipo de motor.

TABLA I
Estudios por tipo de fallas en LSPMSM

Tipo de falla	Numero de estudios	Estudios
Falla de Rodamientos	0	-
Excentricidad Estática	1	[3]
Excentricidad Dinámica	0	-
Excentricidad Mixta	0	-
Barra rota	0	-
Cortocircuitos	0	-
Fallas de aislamiento	0	-
Desmagnetización	5	[15], [16], [17], [18], [19]

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una revisión del estado del arte del diagnóstico de fallas en LSPMSM. Se abordaron los diferentes tipos fallas, detallando los aportes en cuanto a diagnóstico existentes hasta la fecha. En el presente las LSPMSM son una atractiva opción en aplicaciones industriales que exijan una elevada eficiencia, sin embargo existen muy pocos estudios encaminados a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de estos motores. Por tal motivo se requiere una mayor cantidad de estudios que permitan afianzar esta tecnología.

REFERENCIAS

- [1] S. V.-Z. Arash Hassanpour Isfahani, "Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities," *Energy* no. 34, pp. 1755–1763, 2009.
- [2] T. Marcic, B. Stumberger, and G. Stumberger, "Comparison of Induction Motor and Line-Start IPM Synchronous Motor Performance in a Variable-Speed Drive," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 6, pp. 2341–2352, Nov. 2012.
- [3] M. Karami, N. Mariun, M. Rezazadeh Mehrjou, M. Z. A. Ab Kadir, N. Misron, and M. A. Mohd Radzi, "Static Eccentricity Fault Recognition in Three-Phase Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor Using Finite Element Method," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, pp. 1–12, 2014.
- [4] Página web <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-wquattro-african-market-50025946-brochure-english.pdf>
- [5] J. Rosero, L. Romeral, E. Rosero, J. Urresty. Fault Detection in dynamic conditions by means of Discrete Wavelet Decomposition for PMSM running under Bearing Damage [C] II Proceedings of APEC 2009. IEEE Press, 2009: 951-956.
- [6] C. Pezzani, J. Bossio, A. Castellino, G. Bossio, and C. De Angelo, "Bearing Fault Detection in Wind Turbines with Permanent Magnet Synchronous Machines," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 12, no. 7, pp. 1199–1205, Oct. 2014.
- [7] M. Pacas, S. Villwock, and R. Dietrich, "Bearing damage detection in permanent magnet synchronous

- machines,” in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 1098–1103.
- [8] J. Rosero, J. L. Romeral, J. Cusido, J. A. Ortega, and A. Garcia, “Fault detection of eccentricity and bearing damage in a PMSM by means of wavelet transforms decomposition of the stator current,” in *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008, pp. 111–116.
 - [9] J. Rosero, J. Cusido, J. A. Ortega, L. Romeral, and A. Garcia, “PMSM Bearing Fault Detection by means of Fourier and Wavelet transform,” in *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2007, pp. 1163–1168.
 - [10] Mohamed Moustafa Mahmoud Sedky, “Diagnosis of Static, Dynamic and Mixed Eccentricity in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor by Using FEM.”
[Online] Available: <http://waset.org/publications/9997033/diagnosis-of-static-dynamic-and-mixed-eccentricity-in-line-start-permanent-magnet-synchronous-motor-by-using-fem>.
 - [11] B.M. Ebrahimi, J. Faiz. Magnetic field and vibration monitoring in permanent magnet synchronous motors under eccentricity fault [C] II Proceedings of IET Electr. Power Appl. 2012: 35-45.
 - [12] T. Hosoi, H. Watanabe, K. Shima, T. Fukami, R. Hanaoka, and S. Takata, “Demagnetization Analysis of Additional Permanent Magnets in Salient-Pole Synchronous Machines With Damper Bars Under Sudden Short Circuits,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 6, pp. 2448-2456, June 2012.
 - [13] H. K. Kim, J. Hur, B. W. Kim, and G. H. Kang, “Characteristic Analysis of IPM type BLDC Motor Considering the Demagnetization of PM by Stator Turn Fault,” in *ECCE 2010*, Atlanta, America, September 12-16, 2010, pp. 3063-3070.
 - [14] T.H. Kim and J.P. Hong, “A study on the irreversible magnet demagnetization in single-phase line-start permanent magnet motor,” *J. Appl. Phys.*, vol. 105, no. 07, p. 07F108, Feb. 2009.
 - [15] J.-X. Shen, P. Li, M.-J. Jin, and G. Yang, “Investigation and Countermeasures for Demagnetization in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 7, pp. 4068–4071, Jul. 2013.
 - [16] W. Lu, M. Liu, Y. Luo, and Y. Liu, “Influencing factors on the demagnetization of line-start permanent magnet synchronous motor during its starting process,” in *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011, pp. 1–4.
 - [17] X. Lu, K. L. V. Iyer, K. Mukherjee, and N. C. Kar, “Study and detection of demagnetization in line start permanent magnet synchronous machines using artificial neural network,” in *ICEMS 2012 - Proceedings: 15th International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2012.
 - [18] X. Tang and X. Wang, “Research of the demagnetization mechanism of line-start permanent magnet synchronous motor under operating condition of sudden reversal,” in *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014, pp. 1981–1984.
 - [19] W. Lu, H. Zhao, and S. Liu, “Demagnetization conditions comparison for line-start permanent magnet synchronous motors,” in *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014, pp. 48–52.
 - [20] B. N. Chaudhari, R. T. Ugale, and A. Pramanik, “Overview of research evolution in the field of line start permanent magnet synchronous motors,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 8, no. 4, pp. 141–154, Apr. 2014.