

27

Fecha de presentación: diciembre, 2019

Fecha de aceptación: enero, 2020

Fecha de publicación: marzo, 2020

NUEVOS

MOTORES SINCRÓNICOS DE ALTA EFICIENCIA

NEW SYNCHRONOUS HIGH-EFFICIENCY MOTORS

Percy Rafael Viego Felipe¹

E-mail: pviego@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6396-5737>

Julio Rafael Gómez Sarduy¹

E-mail: jgomez@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3313-6572>

Enrique Arturo Padrón Padrón¹

E-mail: apadron@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9644-0788>

¹ Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” Cuba.

Cita sugerida (APA, séptima edición):

Viego Felipe, P. R., Gómez Sarduy, J. R. & Padrón Padrón, E. A. (2020). Nuevos motores sincrónicos de alta eficiencia. *Universidad y Sociedad*, 12(2), 205-211.

RESUMEN

Se realizó un estudio básico comparativo sobre características constructivas, parámetros fundamentales y algunas aplicaciones de los motores sincrónicos de alta eficiencia sin devanados en el rotor. Estos son, para cargas de velocidad variable accionados por accionamientos de frecuencia variable, los motores sincrónicos de reluctancia y los sincrónicos de reluctancia asistidos por imán permanente. Para cargas constantes con arranque directo a la línea, se desarrollaron los de reluctancia y los de reluctancia asistidos por imán permanente. Este último, se estudió brevemente. Un estudio de caso con análisis económico, se realizó para una empresa cubana, demostrándose el ahorro sustancial en comparación con el uso de un motor asíncrono de alta eficiencia.

Palabras clave: Motores eléctricos de alta eficiencia; motores sincrónicos de reluctancia; arranque directo a la línea; imanes permanentes; tierras raras o ferrita; análisis económico.

ABSTRACT

A basic comparative study on construction characteristics, fundamental parameters and some applications of high efficiency synchronous motors without windings in the rotor was carried out. These are, for variable speed loads driven by variable frequency drives, synchronous reluctance motors and synchronous reluctance assisted by permanent magnet. For constant loads with direct start to the line, reluctance and reluctance assisted by permanent magnet were developed. The latter was studied briefly. A case study with economic analysis was conducted for a Cuban company, demonstrating substantial savings compared to the use of a high efficiency asynchronous motor.

Keywords: High-efficiency electric motors; synchronous reluctance motors; direct-on-line-start; permanent magnets; rare earths or ferrites; economic analysis.

INTRODUCCIÓN

En la industria y en otras esferas, los motores eléctricos consumen una elevada cantidad de energía, por lo que siempre hay una gran necesidad de incrementar la eficiencia de esas máquinas.

En la actualidad, una atención especial se le está prestando al desarrollo y aplicación de nuevos motores sincrónicos de alta eficiencia sin devanados en el rotor, reemplazando los motores asíncronos de alta eficiencia (IM). Esos motores sincrónicos son más eficientes que los IM, fundamentalmente, porque al no tener devanados en el rotor, las pérdidas en el mismo (que alcanzan aproximadamente de un 20% a un 35 %) son eliminadas casi totalmente.

Los nuevos motores de este tipo que se han diseñado son los sincrónicos de reluctancia (SynRM) y los sincrónicos de reluctancia asistidos por imanes permanentes (PMA-SynRM), este último con distintos tipos de imanes. Su uso fundamental es para cargas de velocidad variable accionados por accionamientos de frecuencia variable.

Los estatores de estos motores, suelen estar conformados por el mismo tipo de laminaciones y devanados que los IM y pueden ser idénticos, con lo que los fabricantes ahorran en el proceso productivo.

En el caso de cargas constantes, con el objetivo de no emplear accionamientos de frecuencia variable (AFV) o arrancadores suaves para el arranque, que son equipos costosos, se están desarrollando los motores sincrónicos de arranque directo a la línea, tanto para los SynRM (el DOL Start SynRM) como para los PMA-SynRM (el DOL Start PMA-SynRM).

DESARROLLO

Los motores sincrónicos sin devanados en el rotor (MS) no tienen momento de arranque, por lo que su aplicación fundamental es accionar bombas y ventiladores centrífugos que trabajan a velocidad variable (y como consecuencia, a carga variable) para controlar el flujo, y para lo cual se utilizan accionamientos de frecuencia variable (AFV), que también permiten arrancar estas máquinas (ABB Drives, 2013). Un esquema simplificado se muestra en la Figura 1 (Viego Felipe, Gómez Sarduy & Fuentes Vega, 2016).

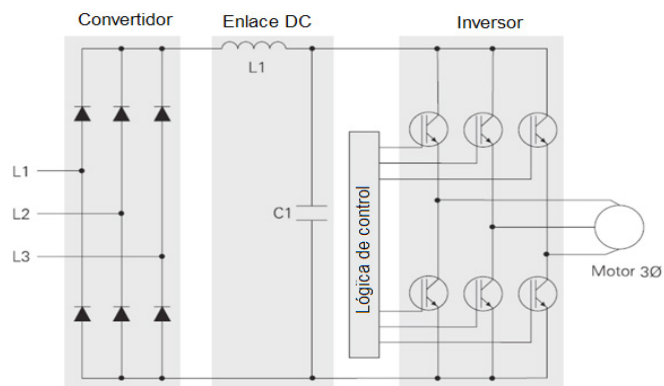


Figura 1. Esquema de AVF tipo PWM accionando un SynRM.

En la Figura 2 se pueden observar dos motores de 4 polos con las laminaciones colocadas: un motor asíncrono convencional de alta eficiencia y un motor sincrónico de reluctancia. Resulta evidente que sólo difieren por el tipo de laminaciones del rotor (ABB Motors and Generators, 2013).



Figura 2. Motores de 4 polos con las laminaciones colocadas.

- a) motor asíncrono
- b) motor sincrónico de reluctancia

En la Figura 3 se muestra una lámina de dos barreras de flujo por polo, para un motor de 4 polos, así como la lámina y la estructura general de un rotor de 4 barreras por polo, para un motor también de 4 polos (Ometto, Parasiliti & Villani, 2015).

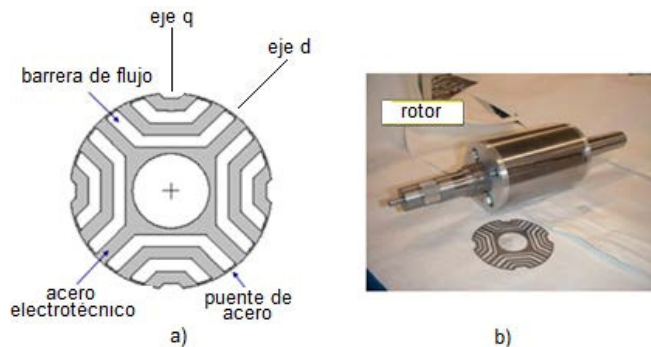


Figura 3. Laminación y estructura general del rotor de un SynRM de 4 polos.

a) lámina de dos barreras; b) lámina y rotor de 4 barreras.

El puente de acero electrotécnico externo en el núcleo del rotor, tiene que ser cuidadosamente dimensionado, debido a que tiene impacto en el comportamiento del rotor y en la robustez del mismo.

El momento del SynRM es un momento de reluctancia. Es producido según el eje d del rotor, que tiene menor reluctancia, tiende a alinearse con el eje del campo magnético rotatorio del estator y ambos rotan a velocidad sincrónica.

La corriente de magnetización en el estator es mayor que la de un IM similar porque, al no haber devanado en el rotor, la componente de flujo de magnetización del rotor es producida también por el estator. Como consecuencia, la corriente de línea es también mayor. Además, se incrementa el costo del AFV, ya que tiene que operar con una corriente más elevada (Moghaddam, Magnussen & Sadarangani, 2010).

En la Tabla 1 se dan los valores de un IM y de un SynRM semejantes, ambos de clase de eficiencia IE4. En esa tabla se muestra que, si bien el SynRM tiene una eficiencia mucho más alta, presenta un factor de potencia notablemente menor, y una corriente nominal marcadamente mayor, con la consecuencia de necesitar un AFV de mayor capacidad y consecuentemente, de un costo superior (Viego & Gómez, 2018).

Tabla 1. Comparación entre los datos nominales de un IM IE4 y de un SynRM IE4.

Datos nominales de un IM IE4	Datos nominales de un SynRM IE4
Potencia de salida: 37 kW	Potencia de salida: 37 kW
Tensión: 460 V	Tensión: 460 V
Frecuencia: 60 Hz	Frecuencia: 60 Hz
Factor de potencia: 0,86	Factor de potencia: 0,64
Eficiencia: 94,5 %	Eficiencia: 96,2 %
Corriente de línea: 57,0 A	Corriente de línea: 75,5 A
Velocidad: 1775 rpm	Velocidad: 1800 rpm

Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por imán permanente

Con el objetivo de mejorar las características operacionales del Syn-RM, se ha desarrollado el PMA-SynRM.

Para esto se añade una cantidad adecuada de imanes permanentes en las barreras de flujo del núcleo del rotor. Los imanes permanentes incluidos en el PMA-SynRM pueden ser de ferrita o imanes basados en tierras raras (Viego Felipe, Gómez Sarduy & Fuentes Vega, 2018).

El tipo ferrita logra menos incremento de la eficiencia y del factor de potencia, menos reducción de la corriente,

aunque tiene un mayor riesgo de desmagnetización debido a su menor fuerza coercitiva (densidad remanente de flujo aproximadamente menor a 0.5 T) que los basados en tierras raras: NdFeB (aleación de neodimio, hierro y boro), SmCo (imán de samario y cobalto), etc. (Barcaro, Bianchi & Magnussen, 2011; Vartanian, et al., 2012; Baka, Sashidhar & Fernandes, 2018).

Los imanes de tierras raras tienen densidades de flujo remanentes de hasta alrededor de 1.3 T. Sin embargo, el tipo ferrita presenta una mayor ventaja en el costo por kg. Normalmente, los imanes de ferrita tienen un costo muy reducido, mientras los imanes a base de NdFeB (que son los imanes más poderosos) ofrecerán mejoras significativas en los parámetros de operación, pero el costo aumenta significativamente, en alrededor de 25 veces (Spargo, 2014).

En la Tabla 2 se muestra una comparación entre dos PMA-SinRM que se diferencian sólo por el tipo de imanes permanentes: uno con imanes de ferrita y otro con imanes de tierras raras (NdFe35H). Los valores que se dan son el resultado de un estudio para motores de pequeña potencia, a corriente constante (Viego & Gómez, 2018).

Tabla 2. Comparación entre dos PMA-SinRM que se diferencian solo por el tipo de imanes permanentes.

Valores nominales	PMA-SinRM (Ferrita)	PMA-SinRM (NdFe35H)
Potencia de salida (W)	603,19	1055,58
Potencia de entrada (W)	704,79	1144,04
Tensión (V)	61,04	69,84
Corriente (A)	6,0	6,0
Velocidad (rpm)	1800	1800
Momento (N-m)	3,2	5,6
Eficiencia (p.u.)	0,86	0,92
Factor de potencia (88888((p.u.))p.(p.u.) (p.u.) p.u.) p(p.u.) (((p.u.))	0,64	0,91

En la tabla puede observarse que la potencia de salida, el momento, la eficiencia y el factor de potencia con el empleo de un imán de tierras raras (en este caso NdFe35H) son marcadamente mejores que con imanes de ferrita. Sin embargo, el problema de los costos de los imanes de tierras raras, hacen que normalmente se utilicen los motores con imanes de ferrita, que dan valores suficientemente satisfactorios en comparación con IM similares.

En la Tabla 3, se hace una comparación de los datos nominales de un IM y de un PMA-SynRM de imanes de ferrita, ambos de clase

de eficiencia IE4. Se observa en el segundo, un mejor factor de potencia, una menor corriente y, sobre todo, una mayor eficiencia, de más de 4 puntos porcentuales.

Si se compra este motor, su mayor costo es recuperado usualmente en un período de tiempo reducido, dado por el marcado incremento de la eficiencia, que lleva a un menor consumo de energía para el mismo tipo de carga y tiempo de operación (Vartanian & Toliyat, 2009; Vartanian, et al., 2012).

Tabla 3. Comparación entre los datos nominales de un IM IE4 y de un PMa-SynRM IE4.

Datos nominales de un IM IE4	Datos nominales de un PMa-SynRM IE4 (Ferrita)
Potencia de salida: 37 kW	Potencia de salida: 37 kW
Tensión: 460 V	Tensión: 460 V
Frecuencia: 60 Hz	Frecuencia: 60 Hz
Factor de potencia: 0,86	Factor de potencia: 0,89
Eficiencia: 94,5 %	Eficiencia: 98,9 %
Corriente de línea: 57,0 A	Corriente de línea: 52,82 A
Velocidad: 1775 rpm	Velocidad: 1800 rpm
Costos de catálogo	
Costo del IM: 3685 USD	Costo del PMa-SynRM: 4904 USD

La cantidad, dimensiones y lugar de colocación de los imanes, varían según la geometría del rotor, las características de operación deseadas y el costo de fabricación (que es una de las restricciones del diseño más importantes). En la Figura 4 a), se muestran dos láminas, que ejemplifican dos tipos de tamaño, número y colocación de las ferritas. En la Figura 4 b) se observa un rotor con los imanes de ferrita colocados (Ometto, et al., 2015).

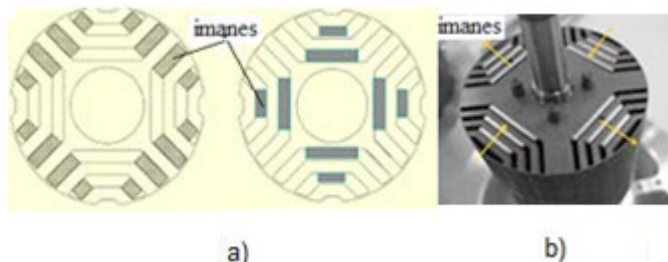


Figura 4. a) Tamaño número y colocación de las ferritas; b) ejemplo de un rotor.

Estas máquinas presentan también desventajas con respecto al SynRM: un costo capital algo mayor, algunas dificultades adicionales en su fabricación; riesgo de desmagnetización de los imanes de ferritas; mayores momentos parásitos, que pueden reducirse igual que para otras máquinas, pero que constituirían un costo añadido (Boazzo, et al., 2015).

Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por imán permanente para arranque directo a la línea con cargas constantes

Con el objetivo de lograr arrancar los SynRM y los PMa-SynRM directo de la línea cuando se opera con cargas constantes (evitando el empleo de AFV o arrancadores suaves que resultan muy costosos), se han desarrollado el DOL Start SynRM (Barcaro, et al., 2011; Gamba, et al., 2013; Abramenko, Petrov, et al., 2017); y el DOL Start PMa-SynRM (Kurihara & Rahman, 2004; Mingardi & Bianchi, 2017; Viego, et al., 2020).

La manera usual de lograr el arranque es añadiendo una jaula de ardilla en el rotor. Así, el motor arranca como un motor asíncronico.

Cuando el motor entra en sincronismo, el deslizamiento es cero. En estado estable, no hay pérdidas en la jaula; ella solo actúa como amortiguador en estados transitorios. Por lo anterior, en estado estable puede considerarse un motor sin devanados en el rotor.

La Figura 5 muestra un ejemplo de laminación de un DOL Start PMa-SynRM (Petrov, et al., 2017).

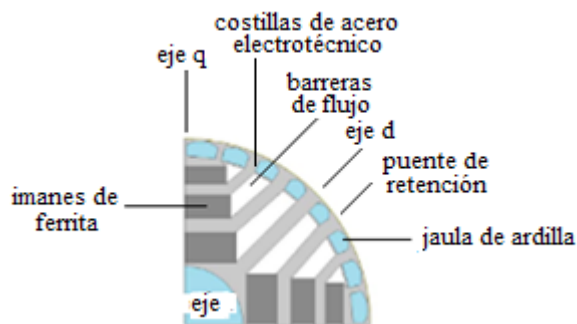


Figura 5. Ejemplo de laminación de un DOL Start PMa-SynRM.

Ciertos parámetros pueden ser ajustados cuando se diseñan las costillas de acero electrotécnico y las barreras de flujo; el número de barreras y su forma; la distancia entre barreras; así como el número, grosor y posición de los puentes externos que retienen la estructura del rotor.

Estudio de caso. Análisis económico

Los motores PMa-SynRM poseen un costo capital superior a los SynRM por los aspectos que se han analizado anteriormente y ambos mayores que el costo de los IM. Sin embargo, como se está analizando su operación en un conjunto con los accionamientos de frecuencia variable, que su costo depende fundamentalmente de la corriente que tienen que manejar, la valoración económica hay que hacerla en función de ambos. Además, hay que considerar la tarifa eléctrica de la organización donde van

a trabajar, los parámetros económicos de que van a depender sus gastos (impuestos, vida útil, inflación, etc.).

De esta forma, es necesario, en cada aplicación en las empresas en que van a operar, realizar un análisis económico estricto para determinar si resulta rentable la inversión. Es imprescindible utilizar para estos estudios métodos de descuento (VAN, TIR, PRI, etc.). Sacar conclusiones empleando métodos simples de recuperación de la inversión (lo que resulta aún muy común) puede conducir a errores significativos.

Un estudio económico se realizó en una empresa cubana, para valorar cuál variante resultaba más ventajosa desde el punto de vista económico: si utilizar un conjunto AFV-IM o AVF-PMa-SynRM para accionar bombas centrífugas (Viego & Gómez, 2018). En esta instalación se trabaja en los tres turnos diarios. Los valores fundamentales para el estudio se muestran en la Tabla 4.

Se utilizó el método del valor actual neto diferencial (VAN diferencial). Este método permite eliminar costos iguales (o casi iguales). Entre estos costos que se eliminan se encuentran los costos de instalación, el costo de mantenimiento, el costo del estator (que en este caso será el mismo), etc. En el caso que nos ocupa, los costos de los AFV se eliminan también, ya que ambos casos requieren accionamientos de la misma capacidad nominal.

Se consideraron las diferencias por distintos costos capitales (costo diferencial), reducción del consumo de energía y reducción de la demanda máxima. A la empresa en cuestión, se le aplica la tarifa eléctrica M1D, según la Resolución 28-2011 del Ministerio de Finanzas y Precios de Cuba.

Tabla 4. Valores fundamentales para el estudio económico comparativo

entre conjuntos AFV-IM y AFV-PMa-SynRM.

Conjunto AFV – IM IE4	Conjunto AFV – PMa-SynRM IE4
Potencia nominal del motor: 37 kW	Potencia nominal del motor: 37 kW
Potencia de entrada del motor: 39,79 kW	Potencia de entrada del motor: 37,41 kW
Tensión nominal del motor: 460 V	Tensión nominal del motor: 460 V
Frecuencia nominal del motor: 60 Hz	Frecuencia nominal del motor: 60 Hz
Factor de potencia del motor: 0,84	Factor de potencia del motor: 0,89
Eficiencia nominal del motor: 93,0 %	Eficiencia del motor: 98,9 %
Corriente nominal del motor: 59,5 A	Corriente nominal del motor: 52,82 A

Velocidad nominal: 1775 rpm	Velocidad nominal: 1800 rpm
Factor de carga (FC) promedio: 0,8	Factor de carga (FC) promedio: 0,8
Eficiencia del conjunto a FC = 0,8: 92,8 %	Eficiencia del conjunto a FC = 0,8: 96,8 %
Tiempo de operación anual: 8040 h	Tiempo de operación anual: 8040 h
Parámetros económicos para el estudio	
Diferencia de costo del conjunto 2 con respecto al 1: 581 USD	Tasa de inflación: 5 %
Tasa de impuestos: 35 %	Vida útil: 10 años
Tasa de descuento: 15 %	Tipo de depreciación: lineal
Margen de riesgo: 3 %	Tarifa eléctrica: M1D
Principales resultados económicos	
Recuperación de la inversión con el conjunto AFV-PMa-SynRM en lugar del de IM: menos de 1 año	
Valor presente neto con el conjunto AFV-PMa-SynRM en lugar del de IM: 6268,60 USD	

Como se puede observar en la tabla, la utilización del conjunto AFV-PMa-SynRM en lugar del conjunto AFV-IM resulta una inversión muy rentable. Esto se debe fundamentalmente a la notable mayor eficiencia del conjunto 2.

CONCLUSIONES

Los motores sincrónicos sin devanados en el rotor, son más eficientes que los motores asincrónicos, fundamentalmente, porque al no tener devanados en el rotor, las pérdidas en el mismo son eliminadas casi totalmente. Los estatores de estos motores, suelen estar conformados por el mismo tipo de laminaciones y devanados que los motores asincrónicos, con lo que se ahorra en el proceso productivo.

El motor sincrónico de reluctancia no posee momento de arranque, por lo que su aplicación más frecuente es en el caso de los ventiladores y bombas centrífugas a velocidad variable, utilizando un accionamiento de frecuencia variable para el arranque y el ajuste de la velocidad. Este motor tiene una eficiencia mucho más alta, presenta un factor de potencia notablemente menor y una corriente nominal marcadamente mayor que su igual asincrónico.

Para mejorar las características operacionales de ese motor, se ha desarrollado el motor sincrónico de reluctancia asistido por imán permanente (de ferrita o de tierras raras). Con el de ferrita, se obtiene un mejor factor de potencia, una menor corriente y, sobre todo, una mayor

eficiencia que con el motor de reluctancia. Si se emplean imanes de tierras raras, el motor presenta aún mejores características, pero se encarece demasiado.

En el caso de las cargas de velocidad constante, se puede lograr un adecuado momento de arranque en los dos motores anteriores, sin necesidad de ningún accionamiento, sólo añadiéndole al rotor una jaula de ardilla.

Un estudio de caso se llevó a efecto en una empresa cubana, para valorar cuál variante resultaba más ventajosa desde el punto de vista económico: si utilizar un conjunto accionamiento-motor asincrónico o accionamiento-motor sincrónico de reluctancia asistido por imán permanente de ferrita (ambos de la misma clase de eficiencia) para accionar bombas centrífugas. El segundo resultó más ventajoso, con una recuperación de la inversión de menos de un año y un valor presente neto elevado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB Drives. (2013). *Synchronous reluctance motor-drive package for machine builders. High performance for ultimate machine design*. ABB. <http://www.sentrige.com/news/abb-drives-and-motors-catalogue-2013/>
- ABB Motors and Generators. (2013). *Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications*. (ABB). <http://www.abb.com/product/seitp322/4c7b92aedbcfd1d6c1257899002d9ecf.aspx?productLanguage=es&country=00>
- Abramenko, V., Petrov, I., & Pyrhönen, J. (2017). Analysis of damper winding designs for direct-on-line synchronous reluctance motor. (Paper). *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China.
- Baka, S., Sashidhar, S., & Fernandes, B.G. (2018). Design and optimization of a two-pole line-start ferrite assisted synchronous reluctance motor. (Paper). *XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli, Greece.
- Barcaro, M., Bianchi, N., & Magnussen, F. (2011). Permanent-magnet optimization in permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor for a wide constant-power speed range. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(6), 2495-2502.
- Boazzo, B., Vagati, G., Pellegrino, G., Armando, E., & Guglielmi, P. (2015). Multipolar ferrite-assisted synchronous reluctance machines: A general design approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2), 832-845.
- Gamba, M., Pellegrino, G., Vagati, A., & Villata, F. (2013). Design of a line-start synchronous reluctance motor. (Paper). *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. Chicago, USA.
- Kurihara, K., & Rahman, M.A. (2004). High-efficiency line-start interior permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Industry Application*, 40(3), 789-796.
- Mingardi, D., & Bianchi, N. (2017). Line-start PM-assisted synchronous motor design, optimization, and tests. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12), 9739-9747.
- Moghaddam, R. R., Magnussen, F., & Sadarangani, C. (2010). Theoretical and experimental reevaluation of synchronous reluctance machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(1), 6-13.
- Ometto, A., Parasiliti, F., & Villani, M. (2015). Permanent magnet-assisted synchronous reluctance motors for electric vehicle applications. (Paper). *9th International Conference, Energy Systems in Motor Driven Systems (EEMODS)*. Helsinki, Finland.
- Petrov, I., Liu, Y., Abramenko, V., Lindh, P. & Pyrhönen, J. (2017). Direct-on-line-start permanent-magnet-assisted synchronous reluctance machine with ferrite magnets. (Paper). *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Beijing, China.
- Spargo, C. M. (2014). *Synchronous reluctance technology-Part II*. School of Electrical and Electronic Engineering, Newcastle University, UK.
- Vartanian, R., & Toliyat, A.H.A. (2009). Design and comparison of an optimized permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMA-SynRM) with an induction motor with identical NEMA Frame stators (Paper). *Electric Ship Technologies Symposium (ESTS 2009)*. Baltimore, USA.
- Vartanian, R., Toliyat, H. A., Akin, B., & Poley, R. (2012). Power factor improvement of synchronous reluctance motors (SynRM) using permanent magnets for drive size reduction (Paper). *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Orlando, USA.
- Viego Felipe, P. R., Gómez Sarduy J. R., & Fuentes Vega, J.R. (2016). Motores sincrónicos para su aplicación en vehículos eléctricos. (Ponencia). *1ª Conferencia Científica Internacional. 8º Taller Internacional de Energía y Medioambiente*. Cienfuegos, Cuba.

Viego, P. R., Sousa, V., Gomez, J. R., & Quispe, E. C. (2020). Direct-on-line-start permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motors with ferrite magnets for driving constant loads. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10(1), 651-659.

Viego, P., & Gómez, J. (2018). Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por imán permanente para accionar cargas centrífugas de velocidad variable. (Ponencia). *2ª Conferencia Científica Internacional. 9º Taller Internacional de Energía y Medioambiente*. Cienfuegos, Cuba.