

Comportamiento de máquinas eléctricas con la tecnología de polos impresos

Maximiliano Exequiel Véliz; Susana Prado Iratchet y Pablo Antonio Massa

Facultad de Ingeniería de la UNNE.

Email: jpilar @ing.unne.edu.ar

Resumen

Se presenta una máquina eléctrica con un diseño innovador denominado Tecnología de Polos Impresos (Written-Pole®) que emplea un material magnético especial en el rotor que puede ser re-magnetizado en cada giro con alto valor de campo, además cuenta con una bobina adicional colocada en el estator conectada a la frecuencia de red que se enciende a una velocidad proyectada imprimiendo un patrón magnético de polos en el rotor, cuyo número es función de la velocidad y de la frecuencia. Se analizarán las características de calidad de energía eléctrica que tienen las máquinas monofásicas y trifásicas.

Palabras clave: Polos Impresos, Máquinas eléctricas, Calidad Eléctrica.

Abstract

It presents a new type design of electric machines Technology Written-Pole® consists of a rotor that has a layer of special magnetic material that can be changed magnetically to any desired pole pattern while the machine is operating, also has an additional coil placed in the stator connected to the mains frequency is switched to a projected speed printing a magnetic pattern on the rotor poles, which number is a function of speed and frequency. We will analyze the characteristics of electric power quality with single and three phase machines.

Introducción

La crisis energética a nivel mundial y el agotamiento previsible de combustibles fósiles, con el impacto negativo de éstos sobre el medio ambiente hace que el estudio de la eficiencia energética y el uso de energías renovables sea una alternativa real para encaminar a la sociedad hacia un desarrollo energético sostenible, lo que implica prestar atención a la eficiencia energética de equipos consumidores de energía, motores eléctricos en particular; tomar acciones que lleven a reducir el consumo de energía y a aumentar los beneficios finales con un menor impacto sobre el medio ambiente, e implementar medidas que permitan reducir el consumo de energía eléctrica.

Las máquinas eléctricas se encuentran en el ámbito industrial como parte fundamental de los procesos productivos y en los hogares como parte de los electrodomésticos, realizando en todas las aplicaciones trabajo mecánico, por lo tanto enfocarse a

mejorar su performance tiene impacto directo sobre el ahorro energético.

Según B.C. Mecrow y A.G. Jack la mitad de la energía generada se consume en las pérdidas de las máquinas eléctricas, teniendo en cuenta esto, tiene sentido estudiar la mejora de la eficiencia de las máquinas eléctricas.

Las tecnologías se han enfocado en tres áreas para aumentar la eficiencia de las máquinas eléctricas: a) bajando los costos y mejorando los dispositivos de control, b) mejorando la eficiencia del conjunto drive- máquina, c) empleando nuevos materiales y diseños innovadores en máquinas eléctricas.

Actualmente son cada vez más las empresas que exigen altos niveles de calidad de suministro eléctrica como los centros de datos, la fabricación de microcontroladores, los hospitales, bancos, etc donde una interrupción en el suministro de energía es crítica para sus procesos. Incluso los retrasos momentáneos debido a microcortes ocasionan pérdidas en la productividad. Es importante que el suministro de energía no sufra cortes ni haya deformaciones de la calidad de la onda.

La máquina de Polos Impresos presenta un diseño innovador que quiebra el paradigma de construcción de máquinas, con un desempeño notable: baja corriente de arranque, alta eficiencia, confiable, sincrónico, arranca cargas de gran inercia, se restablece luego de breves interrupciones de potencia, re-arranca en breve tiempo, bajas armónicas en la entrada, factor de potencia alto durante el arranque, alto par de arranque por Ampere, diseño simple sin bobinas rotantes, cupla constante con arranques suaves, opera en todo el rango de tensiones y tolera desequilibrio de tensión de fase.

En la Universidad Nacional de General Sarmiento se inició un proyecto de nuevas tecnologías empleadas para mejorar la eficiencia de la conversión electromecánica en conjunto con la Universidad Nacional de La Plata, para estudiar la máquina Written-Pole® (Polos Impresos) por sus características de diseño, para analizar su comportamiento, profundizar en su modelado dinámico y generar conocimiento para asesorar en los nuevos diseños.

Nomenclatura

f_s [Hz]= Frecuencia del estator

P = Número de polos.

p = Par de polos.

n_r [r.p.m.] = Velocidad mecánica del rotor.

T_e [N*m]= Cupla electromagnética resultante de la acción entre Φ_{sr} y F .

F [Av]= Valor eficaz de la componente fundamental de la onda de FMM del inductor.

Φ_{sr} [Wb]= Valor eficaz del flujo neto por polo que atraviesa el entrehierro.

δ [rad]= Ángulo eléctrico entre el flujo y la FMM de la armadura.

ω_r [rad/s]= Velocidad angular de rotación mecánica del eje de la máquina.

ω_s [rad/s]= Velocidad sincrónica eléctrica de rotación del campo magnético en el entrehierro.

ω_t [rad/s]= Velocidad de transición eléctrica a partir de la cual se excita la bobina encargada de la impresión de los polos en la tecnología de polos impresos.

Tecnología de polos impresos

En la década de 1990, el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI: Electric Power Research Institute) de los Estados Unidos le solicita a la empresa Precise Power Corporation [1] (PPC) que desarrolle una máquina monofásica de baja corriente de arranque. La empresa PPC desarrolla la Tecnología de Polos Impresos (Written-Pole®) [2] que fue nominada en 1994 por R&D 100 Award from R&D Magazine como uno de los 100 productos tecnológicamente más importantes de ese año.

La máquina de polos impresos, que se comporta en el arranque como máquina asincrónica con gran torque y en condiciones nominales pasa a comportarse como una máquina sincrónica, presenta algunas propiedades que la convierten en una alternativa

interesante para aquellos emprendimientos rurales que necesiten una potencia mayor a los 10 HP y como motor-generador para reemplazar UPS en procesos industriales críticos. Entre sus características se destacan la baja corriente de arranque (1.7 a 3 veces la nominal) lo que reduce significativamente los huecos de tensión en la línea de distribución, la buena eficiencia en operación (del 91% al 95%), el factor de potencia unitario, menores pérdidas eléctricas, la alta inercia de arranque, la capacidad de re arranque instantáneo luego de una interrupción de potencia momentánea (del orden de los 15 seg), la capacidad de continuar soportando una carga por algún tiempo cuando se produce una interrupción de potencia.

La impresión del polo cuando la máquina está funcionando como generador producir una onda senoidal de bajo contenido armónico y frecuencia constante aún con velocidad variable a la salida. El rotor opera como un dispositivo de almacenamiento de energía en el volante. Trabajando como grupo motor-generador mejora la calidad de la energía, dado que cualquier armónico generado en la carga no se retroalimenta a la red de distribución, y a su vez problemas de la red como transitorios, caídas de tensión (de 15 segundos o más), descargas atmosféricas, sobretensiones, etc., no llegan a afectar a los dispositivos electrónicos sensibles. La energía del rotor es usada, eliminando así la necesidad de baterías. El generador puede funcionar con alta tasa de distorsión armónica de la tensión de red.

Este diseño abre las puertas para la construcción de máquinas con nuevos enfoques, con ventajas relevantes como máquina monofásica (Written-Pole) para potencias mayores a los 10 hp y como trifásica (Roesel) en la generación distribuida, impactando directamente en el ahorro energético y en la calidad de energía. [2]

Descripción de la máquina

Rotor

El rotor es tipo jaula de ardilla donde las barras son de acero laminado de alta resistencia que reduce la corriente de arranque a 1/6 de las máquinas convencionales. Está recubierta por una capa continua de material magnético (Figura 1) de alta anisotropía en la dirección orientada del campo necesitando para magnetizar o re-magnetizar el campo magnético (B) valores muy pequeños de intensidad del campo magnético (H) (por ende de la corriente) [3].

Como en el diseño de los motores de Polos Impresos (Written-Pole®) el rotor puede estar dispuesto

externamente girando alrededor de un estator interior (Figura 2), opuesto a los motores convencionales, esta estructura invertida crea un efecto de inercia en el volante que le permite soportar perturbaciones de la calidad de la energía por interrupciones momentáneas de la tensión de hasta 15 segundos [2].

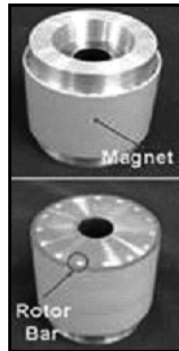


Figura 1. Rotor interno máquina de Polos Impresos.

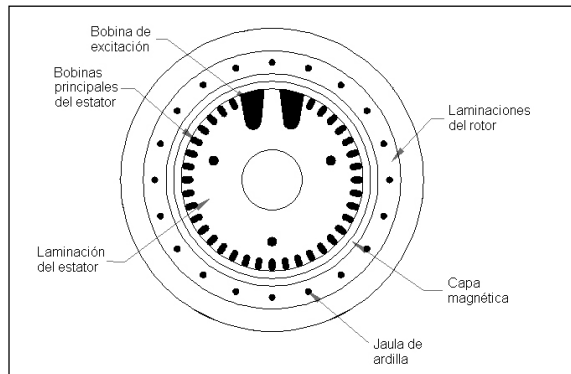


Figura 2. Diagrama del motor de polos impresos con rotor externo.

Estator

El estator de este motor es muy similar a un motor de inducción típico formado por chapas laminadas. Estas chapas son de acero de bajas pérdidas eléctricas. Los bobinados son similares tanto en diseño como en función a los utilizados en un motor de inducción o síncrono convencional. La característica distintiva del motor de Polos Impresos (Written-Pole®) es el uso de una bobina de excitación concentrada ubicada entre las bobinas principales del estator (figura 3). La bobina de excitación se diseña para producir un campo magnético potente lo suficientemente grande como para magnetizar totalmente la parte magnética del rotor a la frecuencia de red [4]. Se enciende electrónicamente imprimiendo o destellando polos temporales sobre la capa de imanes semipermeables dispuestos en el rotor a medida que el rotor gira, como la velocidad de la máquina va variando, el número de polos no es

constante pudiendo ser impar e incluso fraccionario.

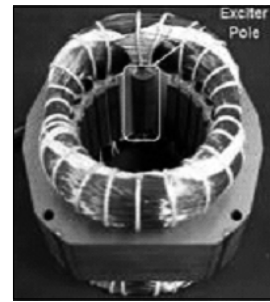


Figura 3. Estator con la bobina adicional (polo excitador).

Funcionamiento

En la teoría clásica el requisito para obtener salidas equilibradas en las máquinas es que “el número de pares de polos magnéticos debe ser igual para el rotor y el estator”, la desviación de este principio produce una máquina inestable. La máquina con la Tecnología de Polos Impresos (Written-Pole®), parece contradecir este principio, el número de polos que se imprimen en el rotor se correlacionan con su velocidad mecánica pudiendo en una vuelta ser impar e incluso fraccionario siempre que se cumpla la Ec. (1), como se muestra en la Tabla 1. Esta máquina es estable porque los polos temporales que se imprimen en el rotor le permiten al motor desarrollar una cupla síncrona, Ec. (2).

$$f_s = \frac{P \cdot n_r}{120} [\text{Hz}], \quad (1)$$

Donde f_s = frecuencia del estator [Hz], P = número de polos, n_r = velocidad mecánica del rotor [r.p.m].

$$T_e = K \cdot \Phi_{sr} \cdot F \cdot \text{sen} \delta [\text{N} \cdot \text{m}], \quad (2)$$

Donde T_e = cupla electromagnética [$\text{N} \cdot \text{m}$], F = valor eficaz de la componente fundamental de la onda de FMM del inductor [Av], Φ_{sr} = valor eficaz del flujo neto por polo que atraviesa el entrehierro [Wb], δ = ángulo eléctrico entre el flujo y la FMM de la armadura [rad], $K = (2^{1/2}) \cdot (\pi/2) p^2$.

Cuando el motor de Polos Impresos (Written-Pole®) alcanza aproximadamente el 80% de su velocidad síncrona, se conecta la bobina de excitación adicional en el estator imprimiendo o centelleando polos en la capa de imanes semipermeables del rotor [5]. Estos polos impresos temporales le permiten al motor desarrollar un más alto par cuando se aproxima a su velocidad síncrona. Al alcanzar la velo-

idad nominal, se desactiva la bobina de excitación quedando la máquina funcionando como máquina sincrónica. Si por alguna contingencia, debida a fluctuaciones en la energía de alimentación o a variaciones en la carga, la velocidad retórica decae, el sistema automáticamente reinicia la impresión para mantener la salida constante [2].

Dada su baja corriente de arranque este motor arranca a tensión plena y con carga máxima sin ocasionar calentamiento. Además ante una falla momentánea que lo saca de servicio puede re-arrancar fácilmente conectándose solamente el capacitor de arranque necesario para producir la cupla de arranque.

Un motor de Polos Impresos (Written-Pole®) presenta tres modos de funcionamiento basados en la velocidad de rotación de la máquina. Ellos son: el modo arranque, modo de transición, y modo de operación [6].

Modo arranque ($\omega \geq \omega_r \leq \omega_s$)

Es el modo de operación del motor desde que está parado hasta la velocidad denominada de transición. El motor se comporta como un motor de inducción convencional con el aditamento de una capa de ferrita siendo la velocidad del rotor (ω_r) menor que la velocidad de transición (ω_t). Esta velocidad de transición se puede elegir entre 70 a 90% de la velocidad de sincronismo (ω_s) siendo un valor usual el 80%. El par que acelera la máquina a su velocidad nominal, como se muestra en la Figura 4, se produce por el efecto de histéresis y de inducción. El par de histéresis es producido cuando las corrientes del estator magnetizan la ferrita, el par de inducción está dado por la alta resistencia de la jaula y los capacitores.

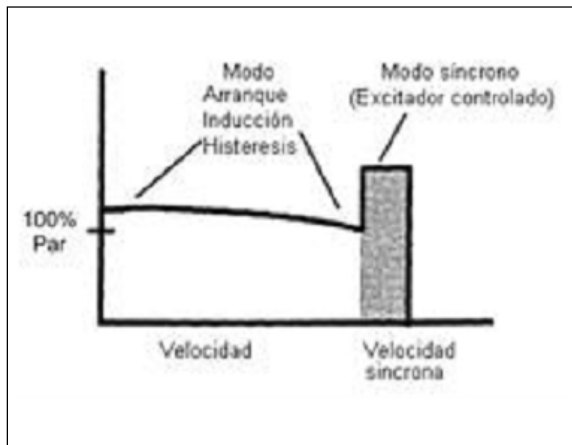


Figura 4. Características de par del motor de Polos Impresos (Written-Pole®).

Modo de transición ($\omega_t \leq \omega_r \leq \omega_s$)

Es el modo de funcionamiento que se produce desde que la velocidad del rotor coincide con la velocidad de transición elegida hasta cuando la máquina llega a la velocidad de sincronismo. Al llegar a la velocidad de transición deseada se desconecta el capacitor de arranque y se energiza la bobina concentrada adicional que se encuentra en el estator, encargada de imprimir los polos en el rotor que se ve en la Fig. 1. Comienza a imprimir en la capa magnética de ferrita polos magnéticos cuyo número es función de la frecuencia del estator y de la velocidad de transición del rotor manteniéndose siempre la igualdad de (1).

Los polos se reimprimen en el rotor en diferente lugar físico mientras la velocidad se va incrementando. En el rotor se producen dos campos durante esta transición, uno creado por las corrientes inducidas y otro producido por los polos impresos.

El circuito de la bobina excitadora se diseña de forma tal que los campos magnéticos de los polos impresos por ella se encuentren en fase con el campo magnético principal del estator para que se produzca un par máximo (τ_{max}) similar al par de un motor síncrono, mientras la velocidad del rotor va creciendo para llegar a la velocidad sincrónica (ω_s). Se puede concluir aquí que el motor de polos impresos trabaja como un motor síncrono en una franja de velocidades que van desde ω_t a ω_s .

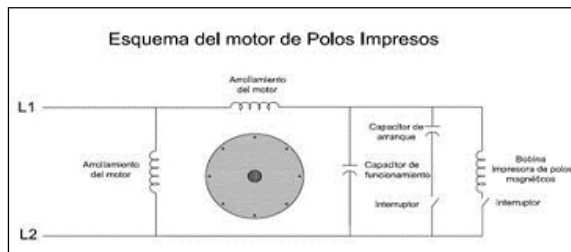


Figura 5. Circuito de arranque y operación del motor de Polos Impresos (Written-Pole®).

Modo síncrono ω_s

Cuando el motor alcanza la velocidad de régimen (ω_s) se apaga la bobina excitadora quedando impresa en la capa de ferrita el último patrón de polos, funcionando como un motor síncrono convencional de imanes permanentes.

Características de calidad de energía de las máquinas de polos impresos (written pole®) monofásicos

La máquina Polos impresos (Written-Pole®) tiene las siguientes características de calidad:

Baja corriente de arranque

Necesita sólo un tercio o un cuarto de la corriente de arranque de los motores de inducción monofásicos convencionales de igual potencia. Al disminuir 2 a 3 veces la corriente de arranque no provoca un hueco de tensión que afecten a los demás usuarios. De esta manera es posible aumentar notablemente la potencia instalada, ver tabla N° 1 donde se pueden observar las características de las máquinas monofásicas de Polos impresos (Written-Pole®) para 60 Hz según la potencia [7].

observa el comportamiento de esta máquina durante el arranque.

Factor de potencia unitario y buena eficiencia energética en rango amplio de velocidad

La alta eficiencia de operación de un motor de Polos impresos (Written-Pole®) monofásico se hace posible por el hecho de que su modo síncrono de operación elimina pérdidas comúnmente asociadas con el deslizamiento en motores de inducción convencionales. Por la eliminación de las pérdidas

Tabla 1. Características de los motores de Polos Impresos (Written-Pole®) monofásicos de 15 a 60 hp.

Potencia [h.p.]	15	20	25	30	40	50	60
Corriente de carga máxima (Amp) (240V)	52	67	84	100	133	166	198
Corriente de arranque	100	125	164	196	210	300	350
Corte de red a máxima carga:							
a. RPM después de 5 seg.	3300	3450	3400	3350	3300	3400	3400
b. RPM después de 10 seg.	3000	3250	3200	3150	3000	3050	3000
Torque (N m) a máxima carga	28,35	39,15	48,6	58,05	78,3	98,55	117,45
Torque (N m) de arranque	32,4	44,55	54	64,8	87,75	110,7	130,95
Torque de re arranque (después de un corte)	36,45	51,3	63,45	78,3	101,25	128,25	151,2
Eficiencia %	90	91	92	93	93.5	94.0	94.5
Rango de Temp ambiente	Temp ambiente 4°C a 40°C						

Este diseño no sacrifica el torque de arranque y no necesita dispositivos de reducción de tensión en el arranque para reducir la corriente. Al ser menor su corriente de arranque no produce calentamiento por lo que se puede emplear mayor tiempo para el arranque evitándose el penduleo tan característico de los motores monofásicos [6]. En las figuras 6 se

resultantes en el rotor, los motores de Polos impresos (Written-Pole®) monofásicos son capaces de reducir sustancialmente las pérdidas totales, mejorando la eficiencia de operación, que se ve reflejada en la reducción de la facturación mientras que la menor corriente se refleja en la disminución de la sección de los cables, en los transformadores y en los contactores, por lo que se puede aumentar la potencia disponible sin variar los requisitos de corriente y potencia, ver tabla 1.

El modo síncrono de operación de un motor de Polos impresos (Written-Pole®) monofásico permite eficiencias de operación muy altas comparables a las de los motores trifásicos de alta eficiencia con características similares como se muestra en la figura 7.

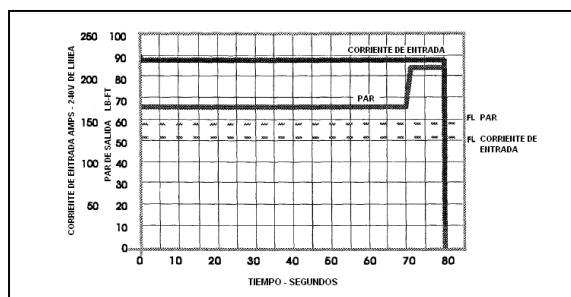


Figura 6. Corriente de arranque y par de arranque del motor de polos impresos monofásico de 40 HP de rotor externo vs. Tiempo de Arranque normal.

Diseño robusto y simple

Elimina la necesidad de arrancar con tensión reducida y al no emplear convertidores de fase (para

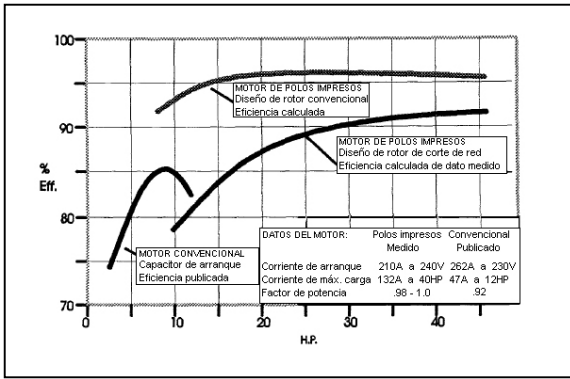


Figura 7. Rendimiento de un motor de inducción convencional monofásico vs. Datos preliminares de un motor monofásico de Polos impresos (Written-Pole®) de 40 hp.

el caso monofásico) no se introducen armónicas en la red reduciendo la complejidad de la instalación y disminuyendo las necesidades de mantenimiento. Los sistemas electrónicos basados en microprocesador, que se utilizan actualmente en distintos dispositivos de uso cotidiano exigen una mayor calidad de suministro de energía. Los centros de datos, las plantas de fabricación, los servidores Web y los centros financieros dependen de la calidad del servicio, requiriendo una confiabilidad cercana al 99.99%. Incluso los retrasos debidos a paradas momentáneas ocasionan pérdidas en la productividad. En la gráfica de la figura 8 se observa el contenido de armónicas para el motor sin carga (ésta es la situación más desfavorable pues el contenido de armónicas se reduce al cargarse el motor).

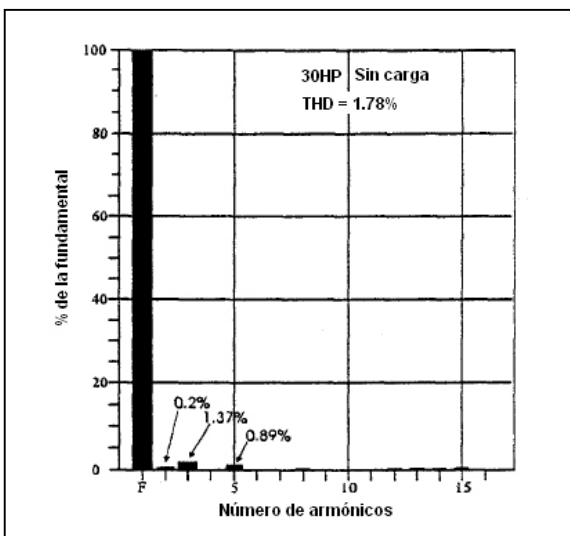


Figura 8. Contenido de armónicas de la tensión de entrada de un motor de Polos impresos (Written-Pole®) de 30 hp con rotor externo (sin carga).

Capacidad de arrancar cargas de alta inercia

Al generarse menos calor puede prolongarse el tiempo para alcanzar el estado de régimen, por lo que se pueden arrancar cargas 10 veces mayores que las que podría arrancar un motor de inducción convencional de igual potencia. Un funcionamiento más suave disminuye el desgaste del sistema. Este efecto es aún más importante en las máquinas con rotor externo, cuya capacidad es reforzada porque esta máquina sincroniza mientras cambia su velocidad estando bajo carga. A modo de ejemplo, en la figura 9 se presenta la evolución de la corriente cuando un motor opera a un compresor.

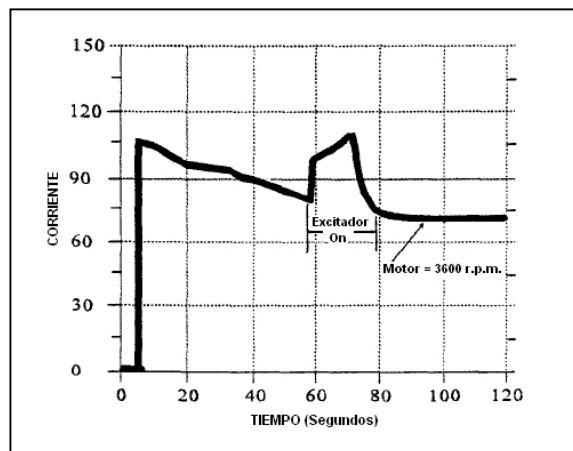


Figura 9. Corriente de arranque de un motor de Polos impresos (Written-Pole®) de 20 hp con rotor externo operando un compresor. (Carga = 17 hp).

Capacidad de re-arranque instantáneo

Las características de arranque de estos motores les permiten un re-arranque instantáneo después de una interrupción momentánea de energía sin producir los transitorios con alto contenido de armónicas comunes en los motores de inducción monofásicos y trifásicos cuando salen de servicio. Este motor puede soportar cortes de energía de hasta 15 segundos sin desengancharse y puede re arrancar inmediatamente una vez restaurada la energía eléctrica sin provocar grandes transitorios que dañen al motor o a la máquina accionada. En un generador convencional, el rotor gira a una velocidad fija, por ejemplo 1800 rpm (60 Hz). Cuando se produce una interrupción de energía la velocidad cae a 1260 rpm después de 2 segundos. Como la posición de los polos magnéticos en una máquina convencional es permanente, cuando la velocidad cae también lo hace la frecuencia a 42Hz, valor suficiente para que se interrumpa el funcionamiento. En la máquina de Polos impresos (Written-Pole®) la velocidad del rotor

también se reduce después de una interrupción de energía pero la bobina del estator vuelve a imprimir los polos norte y sur sobre la capa magnetizable del rotor 60 veces por segundo. Esencialmente la bobina posiciona los polos para mantener una frecuencia de 60 Hz evitando así la interrupción del funcionamiento de la carga. Debido a su capacidad de alterar la ubicación de los polos en el rotor para que coincida con la velocidad mecánica, el motor no dejará de funcionar inmediatamente después de la pérdida de potencia, en su lugar, funciona durante 15 segundos o más antes de pararse. Cuando el rotor del motor de Polos impresos (Written-Pole®) monofásico tiene una configuración externa es posible realizar una integración creando un efecto de volante que le permite al motor continuar arrastrando la carga por más tiempo después de una interrupción de potencia (a una velocidad ligeramente reducida). Este volante suaviza el arranque y las paradas del motor reduciendo los golpes de ariete en los sistemas de riego, bombas de agua, ventiladores y sistemas de transporte. El rango de potencia de los motores monofásicos de Polos impresos (Written-Pole®), actualmente, va desde 15 hp hasta 100 hp.

Características de calidad de energía de las máquinas de polos impresos (written-pole®) trifásicas

Actualmente los microprocesador, exigen una mayor calidad al suministro de energía porque los creciente de centros de datos, las plantas de fabricación, servidores Web y los centros financieros exigen una ultra-confiabilidad del 99.99% porque aún los retrasos momentáneos debido a interrupciones breves ocasionan pérdidas en la productividad. Es importante que la alimentación de energía no sufra cortes ni haya deformaciones de la calidad de la onda tanto para la fabricación de chips semiconductores como en el proceso de mezclar ingredientes para alimentos y bebidas porque si durante el proceso de fabricación un motor pierde potencia por una fracción de segundo debido a las fluctuaciones de la señal de tensión o a cambios en la carga, el resultado es generalmente un lote destruido.

El conjunto trifásico desarrollado por PPC forma un solo bloque integrado, donde el motor trifásico y el generador están fabricados con tecnología de Polos Impresos (Written-Pole®) y se acoplan a través de un rotor externo compartido. Al conjunto se denomina ROESEL® o MGR. En la figura 10 se aprecia la zona de generador y la de motor con sus devanados y sus capas de material magnético. El conjunto

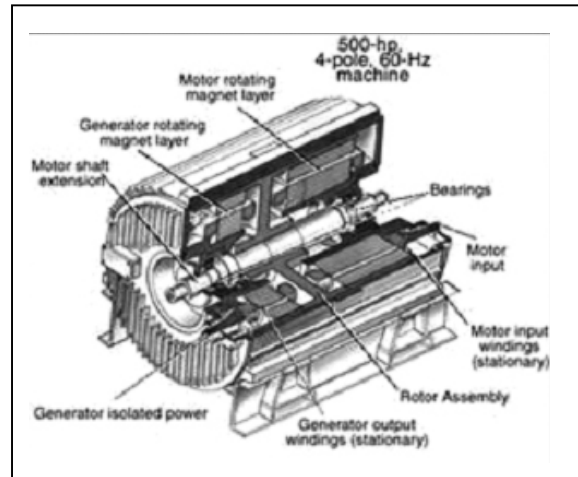


Figura 10. Motor Generador Roesel de 500 hp. Meridium Power Inc.

ROESEL® o MGR es una tecnología madura que se emplea para la conversión de tensión, frecuencia y fase. Se lo usa instalado a la entrada de alimentación de una industria utilizando el motor para impulsar mecánicamente al generador. El generador produce una señal de salida de calidad a frecuencia constante con velocidad variable del rotor, el motor opera de manera eficiente al tener un rotor de alta inercia que le permite almacenar energía en el volante. El conjunto aísla permanentemente al sistema de distribución de la carga suministrando la tensión a frecuencia nominal cuando se producen interrupciones de energía de hasta 15 segundos. Con el agregado de que el generador del MGR actúa como un filtro para las armónicas por lo que no produce disturbios en el sistema de distribución.

A continuación, en la tabla 2 se mencionan las características del grupo motor-generador trifásico con la tecnología de polos impresos:

Conclusiones

Este diseño de máquinas eléctricas que consiste en emplear una capa de material magnético de alta permeabilidad en el rotor y una bobina concentrada comandada electrónicamente en el estator presenta unas bondades que hacen interesantes continuar profundizando esta tecnología constructiva para poder realizar desarrollos en nuestro país.

Es relevante que incursionemos en la fabricación de máquinas eléctricas innovadoras que partiendo de una conversión electromecánica que emplee energías primarias limpias y que además disminuya los disturbios momentáneos y la contaminación de armónicos en la red.

Tabla Nº2. Características del grupo Motor Generador ROESEL® de 35 a 60 kVA.

Potencia[kVA]	35 kVA	40 kVA	50 kVA	60 kVA
Tensión C.A.[V] (+10% - 15%) de entrada 3 fases, 4 hilos	208	208 / 480	208	480
Corriente nominal[A]	100A	105A / 45A	130A	67A
Corriente de arranque	250A	263A / 113A	239A,	168A
Factor de potencia para carga asignada	0.95 (MIn)			
Potencia de salida [kW]	28	32	40	48
Factor de potencia de carga	0.9 adelanto a 0.8 atraso			
Transitorio (0-50 msec) < 50% variación de la carga	-15% to +10%			
Transitorio (50 msec – 500 msec) < 50% variación de la carga	± 8%			
Tasa de distorsión armónica (Cargas lineales)	≤ 3%			

La tecnología Written-Pole más que una gran solución, es un inductor de conciencia y de cómo se tiene que estudiar las máquinas eléctricas variando el enfoque tradicional hacia uno que mire desde la calidad, sustentabilidad, eficiencia energética.

Bibliografía

- [1] John F. Roesel Jr. (1995) "introduction and Overview of "Witten-Pole"™ Technology. IEEE Conference. 10.1109/NORTH.485026.1995.
- [2] Susana Prado Iratchet, Fabiana Ferreira Aycardi, Andrea Pinzón Montes, Maximiliano Veliz. (2012) "La tecnología de Polos Impresos: una alternativa para mejorar la Calidad de la Energía". II Congreso Latinoamericano de Distribución Eléctrica CLADE 2012, Rosario, Santa Fe, Argentina. ISBN: 978-987-97399-5-2.
- [3] Byung-Taek Kim, Dae-Kyong Kim, Se-Hyun Rhu and Byung Il Kwon,(2007): "A Study on the Ferromagnetic Layer of a Single-phase Writtenpole Motor in Consideration of Demagnetizing Field Intensity". Prodeeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea.
- [4] Byung-Taek Kim, Dae-Kyong Kim, Se-Hyun Rhyu, Duck-Shick Shin, and Byung-II Kwon (2009). "Exciter Design and Characteristic Analysis of a Written-Pole Motor", IEEE trans. On Mag.,Vol 45 N°3. pp 1768-1771.).

[5] Jae-Hak Choi, Sung-Ho Lee (2009). "The rewritable effects of bonded magnet for large starting par and high efficiency in the small power single-phase written pole motor". Journal of Applied Physics 105, 07F117.. American Institute of Physics. (DOI: 10.1063/1.3076418). (2009).

[6] Susana Prado Iratchet, Andrea Pinzón Montes, Maximiliano Veliz, Pablo Massa, (2012) "Modelando la máquina eléctrica de Polos Impresos- Written Pole®" I Congreso Argentino de Ingeniería CADI 2012, Mar del Plata, Argentina. ISBN 978-987-1312-46-7.