

EVALUACIÓN ELECTROENERGETICA EN REDES RURALES CON LA ALTERNATIVA DEL MOTOR DE POLOS IMPRESOS

Edgardo G. Vinsón⁽¹⁾, Norberto A. Lemozy⁽¹⁾, Pablo A. Massa⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidad De Buenos Aires, Facultad de Ingeniería.

⁽²⁾ LEDE-SIECIT Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata. 48 y 116 (1900) La Plata.
massa@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: Polos Impresos, Calidad de Energía, Huecos de Tensión, Aceleración, Eficiencia Energética, Factor de Potencia.

Resumen

En el presente trabajo se hace una descripción y un análisis del funcionamiento del recientemente desarrollado “motor de polos impresos”, se analizan sus principales características y se las compara con las de otros motores de inducción monofásicos y trifásicos. En base a esto se hacen análisis comparativos de aplicación de estos motores frente a las opciones convencionales en tres aspectos: su utilización en instalaciones alimentadas por sistemas de distribución rural, su utilización para arrancar cargas de alto par resistente a rotor detenido y/o alta inercia, y su eficiencia energética.

INTRODUCCIÓN

En áreas rurales puede ser necesario disponer de fuerza motriz relevante para alimentar los motores de los sistemas de riego, para el manejo y secado de granos o para algunos procesos productivos. Una característica común a estas áreas es la alta dispersión de los puntos de consumo. Esto da lugar a extensas líneas de media tensión, en general de baja potencia de cortocircuito, para abastecer pocos puntos de consumo.

Como los conductores empleados en esas líneas transportan relativamente poca corriente, el diseño de los mismos responde principalmente a razones mecánicas más que a eléctricas; por lo tanto el costo de una línea normal depende casi exclusivamente de su longitud y cantidad de conductores activos.

Por tal razón siempre que sea posible se utilizan líneas bifásicas, monofásicas bifilares, e incluso monofilares con retorno por tierra, siempre que se cumpla con la carga y las resistencias máximas de puesta a tierra que exigen las Reglamentaciones.

Por lo expuesto, cuando las longitudes de las líneas son importantes, los accionamientos monofásicos reducen los costos totales de la instalación.

Esto hace necesario disponer de accionamientos eléctricos de potencias relevantes que puedan funcionar apropiadamente con alimentación monofásica. Existen al respecto las soluciones tradicionales de motores asincrónicos monofásicos y trifásicos.

No obstante a fines de la década del 90 se desarrolló un tipo de motor, denominado Motor de Polos Impresos (siglas en inglés WPM) que en régimen normal opera como sincrónico de imanes permanentes, pero que arranca como motor asincrónico con jaula de alta resistencia, la que proporciona, en el arranque, una cupla elevada y baja corriente [1] [2].

En el presente trabajo se describen primero brevemente las variantes de accionamientos tradicionales, y luego se describe el motor de polos impresos, y sus características principales constructivas y funcionales. Finalmente se efectúa una comparación económica y de huecos de tensión producidos durante el arranque con motores tradicionales y el WPM.

CARACTERÍSTICAS DE LOS ACCIONAMIENTOS MONOFÁSICOS TRADICIONALES

Motores monofásicos

Los motores monofásicos de potencia fraccionaria (menores de 1 kW) son ampliamente utilizados en multitud de aplicaciones, particularmente en electrodomésticos, pero las aplicaciones de los de potencia entera (mayores de 1 kW) son mucho más específicas, siendo una de ellas, los usos rurales.

Comparando las características de los motores monofásicos convencionales de potencia entera con los trifásicos de la misma potencia y velocidad, estos últimos son mucho más convenientes. Los motores trifásicos tienen: mejor rendimiento y factor de potencia, son más pequeños, menos costosos y más silenciosos.

Respecto a la corriente de arranque a plena tensión los motores trifásicos convencionales absorben de 6 a 7 veces su corriente nominal, mientras que los monofásicos pueden llegar a 10 veces la corriente nominal.

Esto último es la principal limitación que tiene el empleo de los motores monofásicos convencionales en las largas, y generalmente débiles redes de distribución rural. Un arranque puede producir importantes huecos de tensión en la red y afectar a otros dispositivos conectados a la misma como ser, computadoras, lámparas de descarga, contactores y si hay otros motores conectados a esa red, en el momento de la restitución de la tensión, toman un pico de corriente, lo que complica aún más el problema.

Por esos motivos, en algunos países las distribuidoras limitan la máxima potencia de los motores monofásicos que se pueden conectar a sus redes a menos de 10 kW [1], [2].

Motores trifásicos conectados a líneas monofásicas

En algunos casos se puede alimentar motores trifásicos desde redes monofásicas, pero, en general, con alguna disminución de su prestación. Una forma muy simple es colocar un capacitor de arranque C_{arr} en una de las fases del motor, como se muestra en la figura 1, pero este procedimiento implica una importante disminución de la potencia disponible del motor: la que resulta de alrededor del 67% de la nominal trifásica [1].

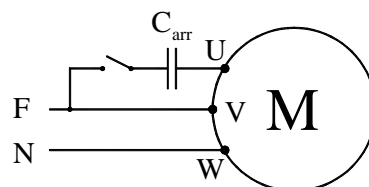


Fig. 1. Alimentación monofásica de pequeños motores trifásicos.

Una forma más elaborada de conexión es con dos capacitores: uno para el arranque C_{arr} y otro para la marcha C_{mar} , como se muestra en la figura 2.

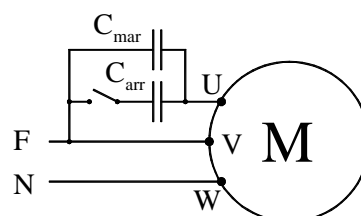


Fig. 2. Alimentación monofásica con dos capacitores.

Estos son métodos de arranque sencillos y ampliamente usados, pero introducen importantes asimetría en las corrientes.

Estas asimetrías se pueden reducir mediante la inserción de un autotransformador elevador alimentado entre fase y neutro, a efectos de modificar la tensión aplicada a los capacitores.

De todas formas, estas soluciones no reducen la corriente de arranque con todos sus inconvenientes, y el conjunto presenta un rendimiento menor [1].

EL MOTOR DE POLOS IMPRESOS

Concepción básica

Ante este panorama, con el auspicio del Electric Power Research Institute (EPRI) y el financiamiento de North American Power Utilities de los Estados Unidos, la empresa Precise Power Corporation, del estado de Florida, desarrolla en la década de 1990, el denominado Motor de Polos Impresos (Written Pole Motor, WPM).

Como este tipo de motor de polos impresos está ampliamente descrito en la literatura, a continuación se lo describe y analiza muy brevemente.

El arranque del motor se efectúa como en un motor asíncrono monofásico con capacitor de arranque, para lo cual el rotor dispone de una jaula de ardillas. Ese rotor dispone de una capa de material magnético duro sobre la que, alcanzada una velocidad próxima a la de sincronismo, se imprimen polos magnéticos mediante un bobinado “grabador” ubicado en el mismo estator. Luego el rotor continúa acelerando, tanto por la cupla asíncrona como por la cupla de excitación entre los polos grabados y el flujo de la máquina, hasta que alcanza la sincronización, operando en adelante como motor sincrónico de imanes permanentes. En la figura 3, extraída de la bibliografía citada, se puede observar un corte esquemático del motor.

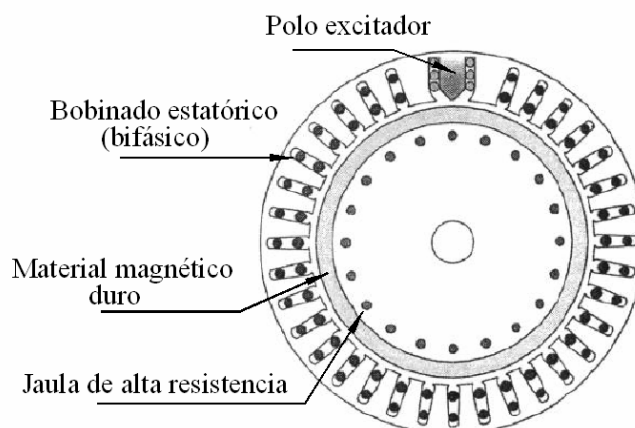


Fig. 3. Esquema de motor de polos impresos con rotor interior.

El bobinado principal del estator es distribuido, bifásico, diseñado para operar con alimentación monofásica directa en una fase y conexión de la otra a través de un capacitor permanente.

El polo excitador (similar a un cabezal “grabador”) es un bobinado concentrado, dispuesto en dos ranuras y con una expansión de forma especial para facilitar la magnetización.

Característica externa

Por la elevada resistencia de rotor durante la operación como asíncrono, y luego al grabar los polos, si bien la cupla media no es muy grande, es relativamente constante, pues depende de la magnetización del núcleo. Por lo tanto aún las cargas de gran momento de inercia son llevadas a sincronismo en un tiempo que puede ser del orden de los minutos, lo que significa un arranque suave, muy indicado para evitar golpes de ariete en sistemas hidráulicos. En la figura 6 se esquematiza una característica externa aproximada.

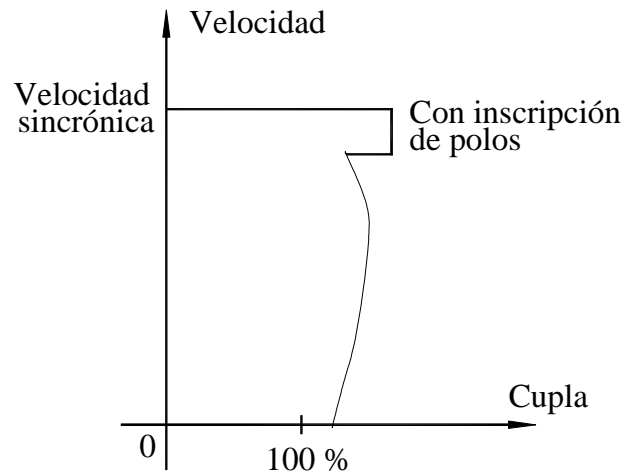


Fig. 6 Característica externa aproximada.

Por otra parte, en el informe antedicho [2], se incluyeron curvas de rendimiento en función de la carga de un motor de polos impresos y de un motor trifásico convencional que se consignan en la figura 7, donde se puede observar claramente el mejor rendimiento a plena carga del primero. Cabe aclarar que en este caso el motor era de rotor externo, para rotor interno el rendimiento resulta aproximadamente un 3% superior.

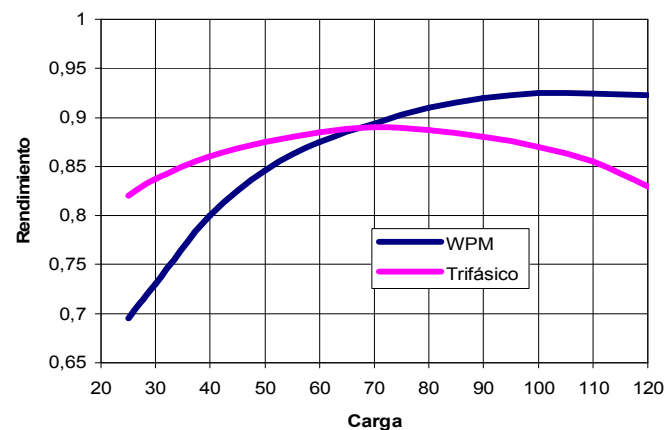


Fig. 7. Curvas de rendimiento del motor de polos impresos [wpm] y del motor asincrónico [Trifásico].

CONVENIENCIA DE APLICACIÓN DE LOS MOTORES DE POLOS IMPRESOS EN ZONAS RURALES

Comparación económica de alternativas para aplicaciones rurales

Conforme se analiza en [2], gran cantidad de aplicaciones en el ámbito rural requieren motores de potencia igual o superior a los 11 kW, tales como bombas para riego, secado o procesamiento de granos, etc.

En la Argentina las líneas rurales más empleadas son las de 13,2/7,6 kV y sus costos aproximados son los indicados en la tabla I, junto al costo de un centro de transformación MT/BT típico de 25 kVA. Los costos de la instalación de transformación MT/BT indicada en esa tabla corresponden a una unidad típica de 25 kVA.

Tabla I. Costo de líneas rurales de conductores de aleación de aluminio de 25 mm² y de centros de transformación de 25 kVA

Centros de Transformación					
Potencia	kVA	25	25	25	25
Fases		1	1	1	3
Pcc	W	600	600	600	650
Pfe	W	85	85	85	140
Costo instalación	\$	12500	12500	12500	20100
Tensión nominal BT	V	231	231	231	400
Corriente nominal BT	A	108,2	108,2	108,2	36,1
Corriente de carga	A	67,6	96,6	86,8	27,0

Líneas aéreas MT con conductores AIAI 25 mm²

Tensión AT		7620	7620	7620	13200
fases		1	1	1	3
Resistencia/km		1,5	1,5	1,5	1,4
Costo instalación \$/km		29700	29700	29700	39000

No obstante para evaluar la alternativa más conveniente es necesario efectuar un análisis de costos que incluya los de instalación y los de pérdidas de energía.

A partir de los datos disponibles en diversas referencias [3], [4] a [1], se construyó la siguiente tabla.

Tabla II. Costos y Características de las variantes de motores.

Concepto	Unidad	Tipo Motor			
		Polos escritos monofásico rotor interno	Asincrónico monofásico de capacitor permanente (*)	Asincrónico trifásico con convertidor de fase	Asincrónico trifásico
Motor					
Potencia nominal	kW	15	15	15	15
Fases alimentación motor	-	1	1	3	3
Tensión nominal	V	220	220	380	380
Corriente nominal	A	71	101	30	28
Rendimiento total (motor y convertidor si corresponde)	%	96%	84%	83%	89%
Corriente de arranque típica	p.u.	1,9	7,7	7,0	6,0
Costo adquisición motor	\$	29250	8188	6840	6840
Costo adquisición convertidor	\$	0	0	8685	0

(*) Datos extrapolados de motor de 7,5 kW

Con estos datos, y con los datos característicos de las líneas y transformadores, se elaboró una comparación económica de las distintas variantes de red y accionamientos, con alimentación monofásica, frente a la opción trifásica para una misma potencia de motor de 15 kW.

Para los cálculos se consideraron líneas monofásicas con retorno por neutro, y transformador de potencia adaptado al motor (25 kVA). Se adoptó un tiempo de conexión

anual de 5.000 horas, una tasa de descuento del 11,5 % y un período de análisis de 20 años.

Los resultados se adjuntan en la tabla III.

Concepto de costo	U	Polos escritos monofásico rotor interno	Asincrónico monofásico de capacitor permanente (*)	Asincrónico trifásico con convertidor de fase	Asincrónico trifásico
Costo adquisición motor y conversor	\$	29250	8188	15525	6840
Costo capitalizado pérdidas motor	\$	4404	20134	21459	13065
Costo instalación transformador MT/BT	\$	12500	12500	12500	20100
Costo capitalizado pérdidas transf.	\$	2701	4420	3769	4299
Subtotal	\$	48855	45242	53253	44303

Línea de MT rural

Tipo de línea		Monofásica c/neutro	Monofásica c/neutro	Monofásica c/neutro	Trifásica s/neutro
Costo instalación/km	\$	29700	29700	29700	39000
Costo capitalizado pérdidas/km	\$	356	726	585	159

(suponiendo 4 puestos con fuerza motriz distribuidos)

Costo total en función de la extensión de red MT

Longitud de red MT (km)	0	48855	45242	53253	44303
1	78911	75668	83538	83462	
3	139022	136519	144109	161780	
5	199133	197370	204680	240098	
10	349411	349498	356108	435892	
15	499689	501627	507535	631686	
20	649967	653755	658963	827481	

Si bien descontando el costo de línea aérea resulta más conveniente la utilización del motor trifásico, para extensiones de línea desde 1 km son más convenientes las variantes monofásicas.

De éstas, y hasta 10 km, es levemente más conveniente el motor monofásico asincrónico, seguido por el motor de polos impresos, el que resulta más económico a partir de 15 km. Pero el motor monofásico asincrónico presenta la desventaja de la gran corriente de arranque que requiere y los huecos de tensión resultantes, sumado a que en esta potencia no son fácilmente disponibles.

No obstante es de notar que la conveniencia del WPM se observa en tanto su tiempo de utilización sea lo suficientemente grande como para que pese el ahorro de pérdidas. Su elevado costo inicial lo hace antieconómico en aplicaciones con bajos tiempos de uso.

Reducción de huecos de tensión frente a motores convencionales

A partir de los datos de las distintas variantes de motor de 15 kW analizadas en el punto anterior, se efectuaron cálculos de la caída de tensión durante el arranque, en bornes del propio transformador MT/BT, y en la línea aérea de MT (LAMT), en función de la longitud de ésta. Se consideraron líneas monofásicas con retorno por neutro y con retorno tierra.

La potencia del transformador se mantuvo en el mismo valor empleado en las evaluaciones económicas.

Para los parámetros de línea se aplicaron los datos de [5], y las resistencias de puesta a tierra para líneas con retorno por tierra, son los allí indicados, que corresponden con las exigencias reglamentarias actuales en la Argentina.

De tales cálculos se infiere que el motor de polos impresos alimentado desde un transformador de potencia adaptado, presenta una caída de tensión en bornes de BT que no alcanza el 10%, valor límite aceptado para no provocar problemas de funcionamiento en otras aplicaciones que puedan estar conectadas al mismo punto. Por otra parte, la caída de tensión provocada en la línea es reducida, y se podría incluso efectuar arranques frecuentes sin que se provoque un flicker inadmisibles.

Por otra parte los cálculos demuestran que no hay una diferencia importante en los huecos de tensión para líneas rurales con retorno por neutro y con retorno por tierra, siempre que las resistencias de puesta a tierra de retorno no superen los valores actualmente establecidos en las Reglamentaciones de la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA).

CONCLUSIONES

Este documento presenta un motor bastante novedoso, no obstante su esencia proyectiva es la evaluación electroenergética, que se ha aplicado a un caso donde dicho motor posee además otras ventajas que lo hacen conveniente para los emprendimientos rurales.

Si se tiene en cuenta que del consumo de energía eléctrica en la industria en los países industrializados (Comunidad Europea por ejemplo) el 60% a 65% corresponde a los motores eléctricos [6], mientras que en nuestro país si bien es algo menor [7], particularmente es de destacar que los motores asincrónicos representan dentro del sector industrial más del 50% del consumo. Se convierte así en el uso final de energía más importante.

Por ello en aplicaciones que requieren de motores eléctricos: industriales, rurales residenciales, todo esfuerzo para desarrollar accionamientos de la mayor eficiencia posible compatible con una apropiada vida útil y adecuado mantenimiento redundará en una mejor calidad de vida.

REFERENCIAS

- [1] PDHengineer.com: *“Written-Pole motors”*, Course N° E-3023.
- [2] Roger Lawrence, Jacobs Serrine: *“Aplicaciones and Markets for written pole single-phase motors to 100 HP”*, ISBN# 0-7803-2639-3.
- [3] Alan Hannah: *“Electrical field measurements on an EPRI two-pole, 20 HP written pole motor”*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.33, N°2, March-Apr.1997.
- [4] Prado Iratchet, Susana, Pinzón, Andrea; Massa, Pablo Antonio: *“Análisis del Motor Monofásico de Polos Impresos para Aplicaciones industriales”*, CLAGTEE 2011.
- [5] Ing Walter Simon: *“El sistema SWER. Un interesante método para la Electrificación Rural”*, Revista Electrotécnica, Setiembre-Diciembre 1972.
- [6] Alberto Berset, Carlos Tanides, Enrique Grünhut: *“Etiquetado en eficiencia energética en motores eléctricos industriales y ahorro de energía”*. 5° Jornadas de Desarrollo e Innovación. INTI. Noviembre de 2004.
- [7] Heinz Lendenmann, Reza R. Moghaddam, Ari Tammi, Lars-Erik Thand: *“Los motores que vienen”*. Revista ABB, 1| 11.