

CONSIDERACIONES SOBRE EL REBOBINADO EFICIENTE DE LOS MOTORES ASINCRÓNICOS

Dr.C. Percy R. Viego Felipe*, M.Sc. Enrique C. Quispe Oqueña**

*Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente - CEEMA
Universidad de Cienfuegos, Cuba

**Grupo de Investigación en Energía – GIEN. Departamento de Energética y Electrónica. Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia
pviego@fmec.ucf.edu.cu, ecquispe@uao.edu.co

RESUMEN

Para mantener e incrementar la eficiencia de los motores trifásicos asincrónicos durante el proceso de reparación, se han desarrollado procedimientos y tecnologías basados en los principios de la calidad total.

Estos procedimientos y tecnologías, tanto los relacionados con la reparación de los devanados como de otras partes y sistemas de estas máquinas, requieren de pruebas que deben ser realizadas antes, durante y después del proceso de reparación.

Uno de los aspectos determinantes que los autores del presente trabajo han planteado para alcanzar los propósitos anteriores, es lograr un proceso de reparación de los devanados de alta calidad. Pero durante la reparación de los devanados, también se pueden realizar acciones que permitan reducir las pérdidas, aumentar la potencia nominal del motor o su capacidad de sobrecarga.

En este trabajo se presentan procedimientos determinantes en este proceso en los motores trifásicos (de bajo voltaje y de mediana capacidad), como una parte de la práctica recomendada para una reparación eficiente. Se evalúan aspectos que mejoran la eficiencia, entre los que se encuentran el calibre del conductor y la clase de aislamiento. Se analiza lo relacionado con las posibilidades de incrementar la potencia nominal a través de un recálculo del devanado y su influencia sobre la eficiencia y otros parámetros. Así mismo, se valora el efecto de incrementar la clase de aislamiento sobre la capacidad de sobrecarga y sobre la eficiencia.

Palabras Clave:

Eficiencia de Máquinas Asincrónicas, Reparación de Máquinas Eléctricas.

1. Introducción

Para mantener e incrementar la eficiencia de los motores trifásicos asíncronos (de bajo voltaje y de mediana capacidad) durante el proceso de reparación, se han desarrollado procedimientos y tecnologías basados en los principios de la calidad total [3] [7] [11].

Estos procedimientos y tecnologías, tanto los relacionados con la reparación de los devanados como de otras partes y sistemas de estas máquinas, requieren de pruebas que deben ser realizadas antes, durante y después del proceso de reparación [4] [5] [6] [8].

Uno de los aspectos determinantes que los autores del presente trabajo han planteado para alcanzar los propósitos anteriores, es lograr un proceso de reparación de los devanados de alta calidad [11]. Pero durante la reparación de los devanados, también se pueden realizar acciones que permitan reducir las pérdidas, aumentar la potencia nominal del motor o su capacidad de sobrecarga.

La eficiencia se puede aumentar si se disminuye la resistencia del devanado del estator. Esto se logra fundamentalmente acortando la longitud de las cabezas de bobina e incrementando, siempre que sea posible, el área del conductor. Lo último puede obtenerse con un mayor llenado de la ranura. A esta posibilidad contribuye, en los motores más viejos, el menor espesor de los materiales aislantes actuales. Usualmente, el incremento de la sección del conductor no puede ser mayor que el correspondiente a un número AWG (aproximadamente 1,26 veces). Valores menores pueden ser logrados con combinaciones de hilos en paralelo [1][3][10].

Al reducirse las pérdidas en el devanado, la eficiencia aumenta y el incremento de temperatura disminuye (y con ello, aumenta la vida útil de la máquina). El efecto de reducción de las pérdidas por el incremento del área del conductor y el uso de un sistema de aislamiento de una clase superior, pueden también utilizarse para

aumentar la capacidad de sobrecarga del motor. En la condición de sobrecarga, el motor tiene mayor deslizamiento. Esto causa una corriente más elevada, lo que lleva a mayores pérdidas e incremento de temperatura. El límite para la sobrecarga lo determina el momento máximo del motor y la capacidad térmica nominal del aislamiento. Si se reducen las pérdidas y se aumenta la temperatura nominal del aislamiento, el motor puede operar a una mayor sobrecarga. Esto aumenta el factor de servicio, pero no la potencia nominal. (El factor de servicio SF es el porcentaje de sobrecarga que puede tener el motor antes de que su temperatura de operación exceda la temperatura nominal del sistema de aislamiento).

2. Desarrollo

A. Potencia nominal y capacidad de sobrecarga

En algunos talleres de reparación se piensa que a los motores (sobre todo los viejos) se les puede aumentar la potencia nominal rebobinándolos con una sección de conductor mayor que la original, o incrementado la temperatura nominal a través de mejorar la clase del sistema de aislamiento. Esto casi nunca es cierto. Las normas de la NEMA y la IEC, especifican los valores mínimos del momento de arranque y del momento máximo que corresponden a cada potencia de salida y velocidad nominal. Usando una mayor sección de conductor o aumentando la temperatura nominal, no se incrementan estos momentos, por lo que no se puede aumentar la potencia nominal sin un análisis riguroso. Esto se debe a que el momento de arranque y el momento máximo están determinados fundamentalmente por las reactancias del estator y del rotor [2] y éstas se mantienen aproximadamente constantes si las vueltas efectivas no varían, como es el caso.

Así, por ejemplo, si se considera repotenciar un motor Siemens de 100 hp a 125 hp (460 V, 60 Hz, TEFC), el motor repotenciado a 125 hp quedaría con los mismos momentos que a 100 hp (ver datos de catálogo en la Tabla 1): un momento de arranque de 5611 N-m (112 % del nominal) de los 710 N-m de catálogo; y un momento máximo de 842 N-m (168 % del nominal) con respecto a los 1051 N-m de

catálogo. Ambos parámetros están por debajo de los mínimos establecidos por la Norma IEC 34-12 para la Categoría N de diseño a la que corresponde este motor (según también la mencionada norma) que son 120 % y 180 %.

Para aumentar la potencia nominal de un motor, hay que rediseñar el devanado, al mismo tiempo que se incrementa la clase del sistema de aislamiento.

Con las máquinas construidas con anterioridad a 1960 (en Norteamérica esto incluye las carcasas “U” y anteriores), que tienen aislamiento Clase A, la potencia nominal usualmente se puede incrementar hasta el siguiente valor de potencia en las escalas estándar de la NEMA e IEC, rediseñando el devanado y utilizando un aislamiento por lo menos Clase B.

TABLA 1. Datos de catálogo de motores Siemens

Potencia nominal (hp)	Velocidad nominal (rpm)	Momento nominal (N-m)	Momento de arranque (N-m)	Momento máximo (N-m)
100	1775	401	561 (140 %)	842 (210 %)
125	1780	500	701 (140 %)	1051 (210 %)

Para determinar si la potencia puede ser incrementada aún más, se requiere un riguroso cálculo de las inducciones magnéticas. Aún si las inducciones magnéticas indican que ese incremento puede ser realizado desde el punto de vista eléctrico, es posible que existan problemas desde el punto de vista mecánico. Por ejemplo, un aumento muy grande de la potencia nominal puede causar fallas en los ejes o en los rodamientos.

Tales fallos mecánicos son más probables que ocurran en las carcasas más largas para una altura de eje dada, que en una de carcasa más corta. Así, es más probable

la falla en una carcasa 256 que en una 254 o en una 200L que en una 200M (carcasas estándar NEMA).

Si se parte de un motor con aislamiento Clase B que fue construido después de los años 60 (carcasas T en Norteamérica o carcasas IEC en otras partes del mundo), es difícil incrementar la potencia nominal de salida.

Nunca se debe tratar de incrementar más de un valor en la escala de potencia, y debe asegurarse que se use aislamiento Clase H.

En esto hay que considerar que los motores más pequeños operan con muy altas inducciones magnéticas y también con muy alto factor de llenado de ranura, por lo que el incremento de la potencia resulta usualmente imposible.

En cualquiera de estos casos, hay que evaluar la eficiencia resultante (bien utilizando procedimientos de cálculo a partir de las dimensiones [1][10], o bien por métodos experimentales) porque ésta variará en función de las nuevas relaciones entre pérdidas.

B. Incremento de la capacidad de sobrecarga y el problema de la eficiencia

Para evaluar cuantitativamente lo que sucede cuando se desea aumentar la capacidad de sobrecarga, es conveniente auxiliarse de expresiones que relacionen la corriente del estator con el producto de la carga lineal por la densidad de corriente $A_1 D_{COR}$. De [2]:

$$A_1 D_{COR} = \frac{20P_{CU1}}{\rho_m L_M \pi D_1} 10^3 \quad (1)$$

donde: P_{CU1} son las pérdidas de cobre en el estator (W); ρ_m , resistividad del cobre a la temperatura de trabajo ($\Omega\text{-mm}^2/\text{m}$); L_M , longitud media de una vuelta (mm); D_1 , diámetro interior del núcleo del estator (mm).

Dado que la superficie de enfriamiento del devanado del estator se puede considerar proporcional al producto $L_M\pi D_1$, resulta fácil concluir de la Ec. (1) que A_1D_{COR} caracterizará la carga térmica específica del estator con respecto a las pérdidas de cobre en su devanado.

Haciendo las sustituciones convenientes, se puede expresar la corriente del estator [9][10]:

$$I_1 = \sqrt{\frac{\pi D_1 A_{CON} (c) (a_1^2) (A_1 D_{COR})}{10 N_R S}} \quad (2) \quad (2)$$

donde: A_{CON} es la sección del conductor (mm^2); c , número de conductores elementales en uno efectivo; a_1 , número de pasos en paralelo por fase; N_R , número de conductores por ranura; S , número de ranuras del estator.

Este valor de corriente podrá considerarse como la corriente nominal admisible para que la carga térmica específica produzca un calentamiento que se corresponda con la clase del aislamiento. El valor de A_1D_{COR} se obtiene de gráficos empíricos [2] para cada tipo de motor; pero lo que aquí interesa es que si se toma el aislamiento Clase F como base [2], para otras clases de aislamiento se multiplica el valor hallado por:

Clase A:	0,55
Clase E:	0,70
Clase B:	0,75
Clase F:	1,00
Clase H:	1,30

En [9] se demostró la validez de estas consideraciones para una amplia población de motores.

Cuando se aumenta la carga (sobrecarga) con sólo el incremento de la calidad del aislamiento para permitir una mayor carga térmica específica, la eficiencia varía. En los motores de mediana y gran capacidad, la tendencia es a variar ligeramente o incluso a permanecer constante. En los de pequeña potencia, la variación es más marcada. La evaluación de la eficiencia puede hacerse por medios experimentales (vía que resulta complicada frecuentemente) o mediante datos de catálogo, según será visto en los siguientes estudios de caso.

Resulta conveniente recordar que la clase de aislamiento quedará siempre determinada por aquel elemento del sistema que sea de menor calidad. Así, si en un motor se coloca aislamiento de ranuras y entre bobinas Clase F, pero el alambre es clase B, hay que considerar el aislamiento como de clase B.

C. Estudio de casos

Caso 1

Se tiene un motor Leroy Somer con los datos de placa y de catálogo que se muestran en la Tabla 2.

Si este motor (europeo, con FS = 1) se rebobina con aislamiento Clase H, la corriente I_1 permisible (conexión para 440 V) alcanza, a partir de la Ec. (2):

$$I_1 = \sqrt{1,3} \times 51,5 = 1,14 \times 51,5 = 58,71 \quad \text{A}$$

ya que $A_1 D_{\text{COR}}$ se multiplica por 1.3 (aislamiento Clase H) dentro de la raíz.

De los datos de catálogo, haciendo una interpolación lineal (y a partir de considerar que la potencia es casi proporcional a la corriente):

$$\eta = 90,5 \%$$

$$\cos \theta = 0,866$$

O sea, que este motor tiene ahora una capacidad de sobrecarga continua de 14 % (que equivale aproximadamente a un FS de 1,15), con igual eficiencia y un factor de potencia sólo ligeramente mayor. Resulta evidente la conveniencia energética de esta solución para el caso particular de este motor, si la carga que acciona tiene un ciclo de trabajo en que el período de sobrecarga tenga un peso importante.

Caso 2

Contrariamente, véase este caso de un motor Siemens, cuyos datos de placa y de catálogo que se muestran en la Tabla 3.

TABLA 2. Datos del motor Leroy Somer

Datos de placa

<i>Tipo</i>	FLS 180L	<i>Eficiencia</i>	90.5 %
<i>Número de polos</i>	4	<i>Velocidad</i>	1760 rpm
<i>Potencia</i>	30 kW	<i>Régimen</i>	Continuo
<i>Frecuencia</i>	60 Hz	<i>Factor de Potencia</i>	0,85
<i>Voltaje</i>	220/440 V	<i>Protección</i>	IP 55
<i>Conexión</i>	YY/Y	<i>Aislamiento</i>	Clase F
<i>Corriente</i>	103/51.5 A	<i>Tipo de rotor</i>	Jaula A5L

Datos de catálogo

<i>Potencia (p.u.)</i>	0.50	0.75	1.00	1.25
<i>Eficiencia (%)</i>	89.5	90.5	90.5	90.5
<i>cos θ (p.u.)</i>	0.72	0.81	0.85	0.86

TABLA 3. Datos del motor Siemens

Datos de placa

<i>Número de polos</i>	4	<i>Eficiencia</i>	79,8 %
<i>Potencia</i>	3 hp	<i>Velocidad</i>	1725 rpm
<i>Frecuencia</i>	60 Hz	<i>Régimen</i>	Continuo
<i>Voltaje</i>	460 V	<i>Factor de potencia</i>	0,859
<i>Conexión</i>	Y	<i>Protección</i>	IP 55
<i>Corriente</i>	4,1 A	<i>Aislamiento</i>	Clase F

Datos de catálogo

<i>Potencia (p.u.)</i>	0.50	0.75	1.00	1.25
<i>Eficiencia (%)</i>	80,7	81,2	79,8	77,0
<i>cos θ (p.u.)</i>	0,684	0,794	0,859	0,870

Si igualmente se rebobina con aislamiento Clase H, la corriente I_1 permisible asciende a:

$$I_1 = \sqrt{1,3} \times 4,1 = 1,14 \times 4,1 = 4,67 \quad \text{A}$$

y de los datos de catálogo, haciendo el mismo procedimiento de interpolación:

$$\eta = 78,3 \%$$

$$\cos \theta = 0,864$$

En este caso, con una sobrecarga igual a la del motor anterior de 14 %, la eficiencia se reduce en 1,5 puntos porcentuales (el factor de potencia se incrementa en 0,005 puntos) O sea, si la carga que acciona tiene un ciclo de trabajo en que el período de sobrecarga tenga un peso importante, al contrario del caso anterior, energéticamente se tiene una situación desfavorable.

3. Conclusiones

Una de las cuestiones que determinan el mantener e incrementar la eficiencia de los motores trifásicos asíncronos durante su reparación, es el logro de una alta calidad en la parte del proceso concerniente al devanado del estator.

Durante la reparación del devanado, se pueden tomar medidas que lleven a reducir las pérdidas, aumentar la potencia nominal del motor o incrementar su capacidad de sobrecarga.

El incremento del área del conductor y la reducción de la longitud de las cabezas de bobina disminuyen las pérdidas del motor e incrementan la eficiencia; pero esto, junto con el uso de un aislamiento de mayor clase, no permite casi nunca (contrario a algunos criterios que abundan) aumentar la potencia nominal, porque los momentos de arranque y máximo no se incrementan con esas medidas. Por estas razones, para aumentar la capacidad nominal de un motor, se requiere usualmente recalcular el devanado y utilizar una clase superior de aislamiento.

El uso de una clase superior de aislamiento permite aumentar la capacidad continua de sobrecarga, pero en esas condiciones, la eficiencia puede variar favorable o desfavorablemente, en dependencia del diseño del motor.

Referencias

- [1]. "AC Motor Redesign", Electrical Apparatus Service Association (EASA), St. Luis, MO, USA, (1999).
- [2]. O.D.Goldberg et al, "Proyecto de Máquinas Eléctricas (en ruso)", Energoatomizdat, Leningrado (1984).
- [3]. "A Guide to AC Motor Repair and Replacement", Electrical Apparatus Service Association (EASA), St. Lois, MO, USA, (1999).
- [4]. "IEEE Std. 432-1992, Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electrical Machinery (5 hp to less than 10000 hp)", USA, (1992).
- [5]. "IEEE Std. 43-1974, Reaf. 1984. IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery (ANSI)", USA, (1984).
- [6]. "IEEE Std. 112-1996, Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators", USA, (1996).
- [7]. M.H Ramsey and J.K. Armintor, "Recommended Practice for Repair of Electrical Motors", in IEEE Trans. on Industry Applications, 29 (1), pp. 52-59, 1993.
- [8]. P.R. Viego, "Pruebas de Impulso y de Alto Voltaje de CD para la Evaluación de Devanados de Máquinas Rotativas", Editora de la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, (1999), 67 pag.
- [9]. P.R. Viego et al, "Determinación de la Corriente Nominal en el Cálculo de Enrollados de Motores Asincrónicos", en Revista Centro Azúcar, No. 3, Año 25, Sta. Clara, Cuba, sept-dic, 1998.
- [10]. P.R Viego, "Cálculo de Devanados de Motores Asincrónicos", Editora de la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, (1999).

[11]. P.R. Viego et al, " Efficient Induction Machine Repair for Energy Efficiency, in Proceedings of SATIS 2001, Kingston, (2001), pp. 213-220.