



## APLICACIONES INDUSTRIALES

# Cambio de bobinados en motores de inducción a partir del análisis dimensional.

Florentino Sesma.  
Pedro Bermúdez.

**RESUMEN / ABSTRACT**

En el trabajo se amplía la metodología desarrollada por los autores para el cálculo de los devanados del estator de los motores de inducción sometidos a reparación, incluyendo el cálculo para motores alimentados de fuentes de voltaje no sinusoidales y para el uso de devanados simple - doble capa.

**Palabras clave:** devanados, motor de inducción, maquinas eléctricas

*This work enlarge of methodology developed for authors to calculus of windings stator of induction motor subjected to repair ,include of calculus to motor fired source voltage wave no sinusoidal for use windings single-double layer*

**Key words :** winding, induction motor, electrical machines

## INTRODUCCIÓN

La historia del desarrollo tecnológico demuestra que múltiples equipos fueron contruidos mucho antes de haber desarrollado sus cálculos tomando en parte la experiencia de otros equipos ya contruidos, resaltando en estos casos la alta valoración que se le otorga a la experiencia.

El diseño de un motor presenta determinadas exigencias, entre las que resaltan el poder desarrollar la potencia requerida sin que el calentamiento provoque temperaturas en las partes de la máquina superiores a la permisible, además el sistema de aislamiento debe poseer la protección adecuada para conservar su tiempo de vida útil sin dañarse por la acción del voltaje aplicado y que sus características satisfagan las exigencias técnicas.

El devanado del estator se calcula a partir de los parámetros electromagnéticos de la máquina. El trabajo se limita a motores de inducción de uso industrial general menores de 100 KW. Sometidos a reparación y que por la pérdida de sus datos, por la necesidad de variar sus características o por reubicarlos para ser utilizados con convertidores de potencia con voltaje no sinusoidal requieren de nuevos cálculos del devanado del estator a partir de las dimensiones del núcleo.

### Devanados simple - doble capa

Los devanados simple doble capa son utilizados con frecuencia en diferentes equipos como los de refrigeración industrial. Los mismos se construyen con " B " bobinas grandes que ocupan toda el área de la ranura formando la sección simple capa y " b " bobinas pequeñas que ocupan la mitad del área de la ranura, estando ocupada la otra mitad por otra bobina pequeña perteneciente a otra fase. Las bobinas grandes ocupan las ranuras que ocuparían las bobinas pertenecientes a una misma fase sí el devanado fuera de doble capa

convencional.

Estos devanados solo son posibles de efectuar para el caso en que q sea mayor de 2. Generalmente se tiene una bobina grande y (q-2) pequeñas dando un total de (q-1) bobinas en cada grupo. Si q es mayor de 4, se pueden tener 2 bobinas grandes en cada grupo.

Utilizando la metodología señalada en [4] es posible la determinación de un paso promedio en este tipo de devanado, lo que permite la aplicación de los métodos de cálculo utilizados en el doble capa. Para ello el paso promedio será:

### CÁLCULO PRIMARIO

Como base de cálculo se utiliza la dependencia dimensional que compara la potencia desarrollada por la máquina sobre la base del volumen del entrehierro

$$P = \frac{P}{2(1 + k_A)} k_N k_I k_P h B_g A_s \frac{f}{p} D_i^2 L$$

.....(1)

P -representa la potencia de salida del motor.

- razón entre la carga eléctrica lineal del rotor al estator.

- coeficiente que incluye el efecto del coeficiente del devanado y la fem.

- razón entre la corriente pico y la efectiva, dependiendo esta última del valor de la carga lineal del estator.

- factor de la forma de onda de la potencia.

- Eficiencia del motor (Se obtiene por la base de datos.

- inducción magnética en el entrehierro.

f - frecuencia del voltaje de alimentación.

p- pares de polos.

- diámetro interno del estator.

L- longitud del paquete de acero del estator.

En el caso de alimentar al motor del sistema electroenergético (voltaje sinusoidal), el coeficiente  $k_p$  y el coeficiente  $k_L$ , donde  $k_p$  es el factor de potencia (se obtiene por la base de datos).

El producto  $k_p k_L$  representa la carga electromagnética del motor y de su valor en lo fundamental depende el volumen de material activo, ya que  $k_p$  varían en límites muy pequeños. A mayor valor del producto, mayor utilización de la máquina y menores dimensiones del motor, pero se alcanzan mayores temperaturas, por lo que la clase del aislamiento limita los valores permisibles, además la relación  $k_p k_L$  debe encontrarse dentro de ciertos límites, por su influencia en los indicadores técnico-económicos, como la masa del motor, la eficiencia, el par de arranque y el factor de potencia.

La ecuación (1) puede ser representada en función del diámetro interior solamente si se introduce el término. Esta relación influye en el valor de la masa, el momento de inercia, el factor de potencia y en la eficiencia, así para aumentos de  $k_p$  disminuye el momento de inercia y se acelera el proceso de arranque, disminuyendo las correspondientes pérdidas en ese proceso, disminuyendo además la masa de las partes frontales y aumentando la eficiencia. En [1] se ofrecen valores de  $k_p$  para motores de inducción convencionales que se encuentran en rangos de utilización óptimos.

Los motores de pequeña y mediana potencia referidos en este estudio utilizan ranuras semicerradas en el núcleo del estator. En las ranuras semicerradas el orificio de entrada a la ranura tiene dimensiones menores que el ancho de la misma, por lo que los conductores entran en ella sin uniformidad, ocupando gran espacio, lo que realza la importancia de efectuar sus mediciones de manera cuidadosa.

A partir de la ecuación (1) se puede plantear:

$$P = C_p n D_i^2 L \dots\dots(2)$$

También:

$$P = C_p n k_L D_i^3 \dots\dots(3)$$

En estas ecuaciones se denominó  $C_p$  al coeficiente de potencia que relaciona a la potencia de salida del motor con las dimensiones y la velocidad sincrónica ( $n$ ) del mismo.

La propuesta incluye la utilización de valores del coeficiente de potencia, el factor de potencia y la eficiencia obtenidos mediante la utilización de una base de datos desarrollada en Microsoft Access que trabaja con la información de más de 300 motores de diferentes marcas conectados a fuentes de voltaje sinusoidales y se muestran en las tablas 1,2 y 3 respectivamente del anexo1.

Si el motor se alimenta con un voltaje de salida no sinusoidal, se utilizarán los valores de  $k_p$  y  $k_L$  propuestos en [2]. A modo de ejemplo se señalan los valores cuando la fuente de voltaje tiene una forma de onda triangular.

$$k_L = \sqrt{3} ;$$

$$k_p = 0,33 .$$

A continuación se calculan las secciones transversales correspondientes al paso polar, paso dental y del cuerpo del núcleo del estator, necesarias para determinar el flujo magnético en cada una de estas partes y con el valor rectificado de la inducción en el entrehierro, calcular el número

#### DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS Y LA CONFIGURACIÓN DEL DEVANADO.

Establecidos los lineamientos de base para bobinar el estator, se encuentran:

- Ranuras por fase y por polo

- Ángulo eléctrico entre ranuras
- Paso del devanado
- Coeficiente del devanado
- Vueltas en serie por fase
- Conductores por Ranura
- Espacio ocupado por el cobre en las ranuras
- Sección de los conductores rectificada
- Determinación del conductor normalizado que se usará
- Corriente que circulará por cada fase del motor a carga nominal

El número de vueltas está expresado en función de una constante determinada para las magnitudes del devanado deseado y el flujo magnético pero este último no se conoce por lo que se llega a una indeterminación. En la práctica existe un rango de valores límites para el flujo magnético que proporcionan un trabajo permisible en una máquina determinada, lo que da la posibilidad de obtener varias variantes de utilización, entre las cuales será necesario elegir la que brinde mejores características según la experiencia acumulada. Para que se obtenga un valor adecuado en el cálculo del número de vueltas, es necesario referirse a las condiciones de existencia del flujo magnético en las diferentes partes del circuito magnético. En la metodología propuesta se parte de la elección del valor de la inducción magnética en el entrehierro. Para ello se tiene en cuenta que los motores a reparar pueden estar contruidos con aceros electrotécnicos de diferentes calidades, por lo que la inducción en el entrehierro puede variar en un rango muy amplio, los valores propuestos son desde 0,76 hasta 0,95 Tesla.

A continuación se comprueba que la solución no sature las otras partes del circuito magnético, siendo el elemento crítico la zona de los dientes, para ello se utilizan los valores de inducción en los dientes máxima recomendados en la tabla 3 de [2].

Los conductores totales en la ranura serán:

$$C = N_1 a_i q_1 p \dots\dots\dots(4)$$

Aquí:

- Vueltas en serie del devanado del estator por fase.
- ramas en paralelo del devanado del estator.
- bobinas por fase y por polo del devanado del estator.

Para el cálculo del calibre de los conductores circulares en ranuras semicerradas se utiliza el valor del coeficiente de llenado de la ranura basado en datos experimentales [3], que demuestran la parte de la sección de la ranura que puede ser utilizada por los conductores. En la práctica para los motores de pequeña potencia, el devanado con su aislamiento ocupa aproximadamente algo menos de la mitad de la sección de la ranura, debido al desorden en la colocación de los conductores. En las ranuras ovaladas por la ausencia de ángulos se obtiene un mejor aprovechamiento de la sección de la ranura.

El diámetro del conductor con aislamiento se obtiene por la expresión:

$$D = \sqrt{\frac{K_s * Q_s}{0.785 * C}} \dots\dots\dots(5)$$

D - Diámetro del conductor con aislamiento

$Q_s$  - Sección transversal de la ranura

$K_s$  - Coeficiente de llenado de la ranura

C- Conductores totales en la ranura

La potencia que puede desarrollar el motor viene limitada por la sección de cobre disponible para transmitir la corriente eléctrica y por la sección transversal de hierro disponible para conducir el flujo magnético. Una vez obtenida la sección del conductor y el número de conductores en la ranura, se comprueba si la carga electromagnética del motor se encuentra dentro de los límites

permisibles que permite controlar la correcta elección de la densidad de corriente [3].

En un motor eléctrico determinado, el mayor nivel permisible de carga electromagnética está determinado por el calentamiento permitido a las partes activas. El nivel de la carga térmica específica del estator es el factor fundamental que caracteriza el calentamiento del devanado y viene determinado por el producto que no puede sobrepasar al valor permisible determinado por la clase de aislamiento, la velocidad y el tipo de ejecución del motor. representa a la densidad de corriente en el devanado del estator.

La corriente nominal por fase será:

$$I_1 = \frac{P}{3V_f h \cos j} \dots\dots\dots(6)$$

#### APLICACIÓN Y RESULTADOS.

Para la comprobación de los resultados, se utilizaron los núcleos de 2 motores de los que se conocen todos los datos de sus devanados originales, obteniéndose resultados totalmente satisfactorios.

Motor 4A 112 M4 de 4 polos 5,5 kW, de fabricación rusa.

Motor TY 160 M2B de 2 polos, 15 Kw., de la fábrica TAUBA Cubana.

#### Referencias:

- 1- T. A. Lipo. Introduction to AC machine design. Power electronics Research center, University of Wisconsin. 1996.
- 2- Surong Huang y otros. A General Approach to Sising and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines. IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 34 Num.1 1998.
- 3- Kokorev. Manual del bobinador de Máquinas Eléctricas. Editorial Escuela Superior, Moscú 1985.
- 4- Goriagin V. F. Cálculo de los parámetros de devanados simple - doble capa de máquinas eléctricas. Electrotécnica. No.7, 1985.

#### Autores:

Florentino Sesma Zaragoza, Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, CIPEL, ISPAJE, Ciudad de La Habana.

e-mail :sesma@cipel.ispjae.edu.cu

Pedro Bermúdez Cartaya, Ingeniero Electricista, Profesor, Asistente, CIPEL, ISPAJE, Ciudad de La Habana.

e-mail:pbermudez@cipel.ispjae.edu.cu

### ANEXO 1: Valores del *coeficiente de potencia*, el *factor de potencia* y la *eficiencia*

Tabla No.1

COEFICIENTES DE POTENCIA				
	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
<i>Paso Polar</i>				
0.02-0.07		0,677	0,541	0,512
0.07-0.12	0,503	0,433	0,721	0,867
0.12-0.17	0,247	1,046	0,885	1,072
0.17-0.21	0,241	0,858	1,068	1,081
0.21-0.28	0,439	0,897	0,754	
0.28-0.38	0,477	0,783		
0.38-0.60	0,460			

Tabla No.2

FACTOR DE POTENCIA				
	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
<i>Paso Polar</i>				
0.02-0.07			0,718	0,696
0.07-0.12		0,781	0,769	0,759
0.12-0.17	0,810	0,830	0,813	0,807
0.17-0.21	0,847	0,852	0,810	0,847
0.21-0.28	0,863	0,872	0,871	
0.28-0.38	0,861	0,880		
0.38-0.60	0,891			

Tabla No.3

EFICIENCIA				
	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
<i>Paso Polar</i>				
0.02-0.07			0,629	0,633
0.07-0.12		0,697	0,781	0,817
0.12-0.17	0,662	0,837	0,885	0,891
0.17-0.21	0,738	0,888	0,917	0,925
0.21-0.28	0,822	0,918	0,926	
0.28-0.38	0,856	0,939		
0.38-0.60	0,900			