



Evaluación de distribuciones de bobinados en máquinas eléctricas rotativas

Ángel G. Garcilazo^a*, Manuel A. Mazzoletti^a, Luis A. Barruffaldi^a, Oriana M. Simonovets^a

Ivo F. M. Lory^{*a*},

^a LIDEE-Facultad de Ingeniería, UNaM

e-mails: ggarcilazofio@gmail.com, amazzoletti@fio.unam.edu.ar, luis.barruffaldi@fio.unam.edu.ar simonovetsoriana@gmail.com, ivoflory@gmail.com

Resumen

En este trabajo se describe una metodología para el diseño y evaluación de las distribuciones de bobinados en Máquinas Eléctricas Rotativas (MER) trifásicas. En primer lugar, se estudiaron las herramientas de cálculo para el diseño de bobinados en MER. Éstas herramientas consideran los parámetros fundamentales en distribuciones espaciales insertas dentro de los núcleos magnéticos del estator. Luego, se analizaron e implementaron distintas distribuciones en función a la estructura física de un motor trifásico de 36 ranuras para analizar la fuerza magnetomotriz resultante y su contenido armónico.

Palabras Claves – Máquinas eléctricas rotativas, Distribución de bobinados, Coil pitch shortening, Coil side shift.

1 Introducción

Los devanados de las máquinas eléctricas rotativas (MER) se denominan distribuidos porque no están enrollados como bobinas simples, sino que están distribuidas espacialmente. En éstas MER, el objetivo es establecer un conjunto de polos norte y sur que giran en el estator, que interactúan con un número igual de polos en el rotor, para producir un par electromagnético uniforme en el entrehierro. Los conceptos para estudiar las MER incluyen bobinados distribuidos, funciones de bobinados, fuerza magnetomotriz (FMM) rotativas e inductancias y resistencias de los bobinados [1,2].

En la bibliografía se pueden encontrar diversos trabajos donde se proponen nuevas distribuciones de bobinados. En [3] se presenta una nueva distribución para motores de inducción trifásicos de corriente alterna. Una FMM no sinusoidal en el entrehierro crea componentes armónicos que aumentan las pérdidas del núcleo, el ruido y las vibraciones. Por lo tanto, el nuevo bobinado de triple capa propuesto elimina componentes armónicos de la forma de onda FMM, mejorando el rendimiento del motor. Para validar el diseño se utilizó el software ANSYS MAXWELL y se evaluaron sus parámetros magnéticos. Se realizaron experimentos prácticos con dos motores trifásicos de 180 W y 2 polos. En [4] se analiza el impacto que produce varios tipos de distribuciones sobre los parámetros de un motor trifásico de 1.5 kW, 36 ranuras, 4 polos, centrándose en los efectos sobre las oscilaciones del par. El primero es un bobinado convencional de doble capa con un paso acortado de 8/9 del paso polar. Luego se propone un bobinado utilizando la técnica "Coil Side Shift" [5], para el mismo paso de bobina. Por ultimo se propone un bobinado usando la técnica "Coil Side Transfer" [5], de igual paso de bobina. Se compara el contenido armónico de la densidad de flujo magnético, la forma de onda del vector de potencial magnético, el voltaje inducido y las oscilaciones de par de los bobinados propuestos. Los resultados del análisis muestran como, para un mismo paso de bobina, las distintas configuraciones obtienen una reducción en el contenido armónico de la FMM y una mejora en las oscilaciones de par. En [6] se analizan las combinaciones factibles de ranura y número de polos en devanados de ranura fraccionaria con paso de bobina de dos ranuras para la eliminación de armónicos espaciales en el FMM del estator. Las soluciones posibles obtenidas comprometen el factor de bobinado el equilibrio entre el menor contenido de armónicos y la mayor magnitud del armónico principal.

En este trabajo se describe una metodología para el diseño y la evaluación de las distribuciones de bobinados en las MER trifásicas. A partir de una herramientas de cálculo se implementaron varias propuestas considerando los parámetros fundamentales en distribuciones espaciales en el núcleo magnético de un estator de 36 ranuras. Estás distribuciones fueron analizadas para determinar el contenido armónico de la fuerza magnetomotriz resultante.

2 Caracterización de las distribuciones de bobinados

Al comenzar el estudio de una determinada MER generalmente se conocen sus principales características, como ser el número de ranuras (N), el numero de fases (m) y el numero de polos P o pares de polos p. Luego, en base a estos datos es posible definir otros parámetros relacionados con la estructura del estator, los cuales se describen a continuación.

2.1 Parámetros fundamentales

• Paso de Ranura τ_u : corresponde al paso o extensión de una ranura, por lo tanto sera igual al perímetro del estator divido por la cantidad de ranuras. Si es medido en metros, se define como:

$$\tau_u = \frac{\pi D}{N} \tag{1}$$

donde D es el diámetro de la periferia del estator medido en metros.

• Ángulo de ranura α_u : es el ángulo correspondiente a una ranura, medido en grados eléctricos. Si se tiene un par de polos (p = 1) los ángulos mecánicos son iguales a los grados eléctricos, es decir, que un ciclo de onda (el paso por un par de polos) equivale a una vuelta del rotor. En caso de que p > 1, el devanado ve al un paso por un par de polos (Ejemplo: De un 'norte' al 'norte' siguiente) como una vuelta mecánica del rotor. Esto significa que por cada par de polos que tenga el devanado, los grados eléctricos recorridos son igual al número de polos del devanado multiplicados por el número de grados mecánicos correspondientes. Entonces, el ángulo de ranura tiene como expresión

$$\alpha_u = p \frac{2\pi}{N} \tag{2}$$

Paso polar τ_p: equivale a un arco el cual cubre 180° eléctricos, es decir, el paso de un polo al siguiente. Por lo tanto, sera igual al perímetro de una circunferencia, dividido por el numero de polos. Si la medición se realiza en metros, el paso polar se define como:

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} \tag{3}$$

En cambio, si el paso polar se mide en ranuras, será igual al número de ranuras dividido la cantidad de polos,

$$\tau_p = \frac{N}{2p} \tag{4}$$

• Zona de fase τ_v : corresponde al arco ocupado por una fase (su lado positivo o negativo),

$$\tau_v = \frac{\tau_p}{m} \tag{5}$$

- Paso de bobina y_c : corresponde al ancho de la bobina medido en número de ranuras. Es decir, a la cantidad de ranuras que separan un lado de bobina del otro.
- Ranuras por polo y por fase: representa el número de ranuras que le corresponde a cada fase dentro de un polo. Éstas ranuras pueden estar ocupadas por conductores o no, en el caso que todas las ranuras estén bobinadas u ocupadas por conductores, el numero de ranuras bobinadas por polo y por fase q, y el numero de ranuras por polo y por fase Q, coinciden. Los mismos se expresan de la siguiente manera:

$$q = \frac{N - n_{es}}{2pm} \tag{6}$$

$$Q = \frac{N}{2pm} \tag{7}$$

donde n_{es} representa el numero de ranuras vacías en el caso de bobinados simple capa (devanados de bobinas muertas, o *dead-coil windings*) y el numero de bobinas sin devanar en el caso de bobinados doble capa [7]. Se observa que si $n_{es} = 0$, es q = Q. Además, si q es un numero entero, el bobinado es llamado "bobinado de ranura integral", mientras que si q es una fracción, el bobinado es llamado "bobinado de ranura fraccionaria".

2.2 Factor de Distribución

Generalmente, tanto en motores como en generadores, se utilizan varios conductores por polo y por fase, es decir, que para dicho bobinado es q > 1. Esto otorga ciertas ventajas, como ser una tensión con una forma de onda sinusoidal, una mejor utilización del espacio disponible en el núcleo magnético, una mejor distribución del calor generado por los conductores, entre otras. Sin embargo, la distribución de las bobinas también trae desventajas, como ser la disminución en la Fuerza Electromotriz (FEM) total, esto debido a que las bobinas no se encuentran en la misma posición angular, haciendo que las tensiones inducidas en las distintas bobinas de cada fase se encuentren levemente desfasadas entre si, resultando la suma vectorial de las tensiones de las bobinas de una determinada fase menor a su suma aritmética. Esta reducción en la FEM total debida a la distribución de las bobinas se cuantifica a través del *Factor de Distribución* k_d , el cual para determinado armónico de orden v se calcula mediante la siguiente expresión [5],

$$k_{\rm dv} = \frac{\operatorname{sen}(v\frac{q\alpha_{\rm u}}{2})}{q\operatorname{sen}(v\frac{\alpha_{\rm u}}{2})} \tag{8}$$

En la Fig.1 se presenta un diagrama radial correspondiente a una MER con una distribución de bobinado de doble capa con N = 36, m = 3, p = 2 y $n_{es} = 0$, y por lo tanto, $\tau_p = 9$ y q = 3.



Fig. 1: Diagrama radial. Devanado de paso completo.

En la figura, las ranuras (color amarillo) se encuentran distribuidas en la estructura del estátor (color rosa). Las fases U, V, y W se identifican en colores rojo, verde y azul, respectivamente. Además, sobre cada ranura el circulo con un punto en su interior representa un conductor saliente a la ranura (en dirección hacia el observador), mientras que una cruz indica que el conductor entra en la ranura.

Otra forma de representar el devanado es a través de un diagrama de ranuras. En la Fig. 2 se muestra el diagrama lineal correspondiente a la configuración mostrada en la Fig.1, pero solo para un par de polos (mitad de la estructura del estator). Cabe mencionar que el devanado mostrado es llamado de paso completo debido a que $\tau_p = y_c$.

2.3 Acortamiento de Paso

En devanados doble capa, con bobinas de tipo "diamante", como suelen llamarse en la bibliografía, la ranura posee dos partes, una superior y una inferior, y cada parte posee un lado de bobina. Se suele decir que el lado de bobina adyacente al entrehierro pertenece a la capa superior, y el lado de bobina situado en el fondo de la ranura pertenece a la capa inferior. Observando el diagrama presentado en



Fig. 2: Diagrama de ranuras para dos polos de la máquina. Devanado de paso completo.

la Fig. 1 se puede observar que hay dos zonas circulares, una mas interna correspondiente a la capa superior y otra mas externa, correspondiente a la capa inferior. La distribución de las zonas de fase no necesariamente deben ser iguales en las capas superior e inferior. La distribución de las zonas puede ser desplazada un cierto número de ranuras. Por ejemplo, para la maquina antes mencionada, si las zonas de fase de una de las capas se desplaza una ranura respecto a la otra capa, se produce la distribución mostrada en la Fig. 3. Luego, en la Fig. 4 se muestra el diagrama lineal con la representación de las ranuras.



Fig. 3: Diagrama radial. Devanado de paso acortado.

Comparando el paso de bobina (y_c) con el de la Fig. 2, se observa que se redujo en una cantidad igual a una ranura. En este caso se dice que el paso ha sido *acortado*. A causa del acortamiento de paso el final de bobina se vuelve más corto, y la cantidad de cobre requerido se reduce. Por otro lado, el flujo enlazado por la bobina disminuye a causa del acortamiento del paso, haciendo necesario incrementar el número de vueltas requeridas para un mismo nivel de voltaje, respecto al devanado de



Fig. 4: Diagrama de ranuras para dos polos. Devanado de paso acortado.

paso completo. Una forma de cuantificar la influencia del acortamiento de paso es a través del *Factor* de Paso k_p , que para un determinado armónico de orden v se define de la siguiente manera:

$$k_{\rm pv} = \operatorname{sen}\left(\upsilon \frac{y_c}{\tau_{\rm p}} \frac{\pi}{2}\right) \tag{9}$$

Otra forma de modificar o acortar el paso de bobina es a través de una técnica denominada Coil Side Shift (CSS) [4,5], que consiste en desplazar un lado de bobina de un grupo de bobinas de cierta fase de la capa superior a la capa inferior en la primera zona de fase y de la capa inferior a la capa superior en la siguiente zona de fase. En la Fig. 5 se muestra el diagrama ranuras para el mismo paso de bobina que el caso anterior, pero obtenido mediante CSS.

Notar como, por ejemplo, el lado de bobina de la fase U en la capa inferior de la ranura 3 se trasladó o desplazó a la siguiente zona de fase (de la fase W), en la capa superior de la ranura 4. Además, el paso de bobina, al igual que en el caso anterior es igual a 8 ranuras, es decir, $y_c/\tau_p = 8/9$.

Tal como en el caso del Factor de Paso k_p , la influencia de la modificación del paso a través de CSS se cuantifica utilizando otro factor de paso denominado k_{pw} , definido para un armónico de orden v como:

$$k_{\mathrm{pw}\upsilon} = \mathrm{sen}\left\{\upsilon\left[1 - \frac{p}{N}(q_1 - q_2)\right]\frac{\pi}{2}\right\}$$
(10)

donde q_1 y q_2 son los números de ranuras por polo y por fase de las diferentes capas.

Cabe mencionar que el paso de bobina resultante de la distribución del devanado a partir de CSS puede o no ser igual al paso polar. Esto depende de como se distribuyan los lados de bobina entre las capas.



Fig. 5: Diagrama de ranuras para dos polos de la máquina. Devanado de paso acortado mediante CSS.

2.4 Factor de Bobinado

Por ultimo, los efectos producidos por la distribución de las bobinas y el acortamiento de paso se unifican en el Factor de Bobinado k_w , donde para cualquier armónico se expresa como:

$$k_{\rm wv} = k_{\rm dv} \cdot k_{\rm pv} \tag{11}$$

3 Distribuciones de bobinados

Para el estudio de la influencia de la distribución del bobinado se utilizó una herramienta de simulación la cual, entre sus funcionalidades, permite la obtención del contenido armónico de la FMM para una cierta configuración del bobinado. A continuación, se muestra el contenido armónico en la FMM del estator para las distintas configuraciones de devanados mostradas en la sección 2.

En la Fig. 6 se muestra el contenido armónico de la FMM del estator correspondiente al devanado de paso completo, mostrado en la Fig.1.



Fig. 6: Contenido armónico de la FMM del estator para un devanado de paso completo.

En la Fig. 7, en cambio, se muestra el contenido armónico correspondiente al devanado de paso acortado ilustrado en la Fig. 2 el cual, según se mencionó anteriormente, posee un paso de bobina de 8/9 del paso polar. Comparando ambas configuraciones es posible observar una notoria disminución del contenido armónico, principalmente de los órdenes v = 3, 5. 7, 9 y 11. Esta disminución puede ser más o menos significativa según se escoja el paso de bobina. También es posible eliminar un determinado armónico a través de la variación del paso de bobina. Nótese que, para un determinado armónico v, si en (9) se escoge y_c de manera que $k_{pv} = 0$, resulta también $k_{wv} = 0$. Por otro lado, la Fig. 8 muestra el contenido armónico correspondiente a la configuración implementada en la Fig. 5.

La diferencia notable respecto a las demás configuraciones es, además de una mayor disminución del contenido armónico, la presencia de armónicos de orden par. Esto ultimo debido a la distribución no uniforme de las bobinas a lo largo de los polos. Al igual que en el caso de acortamiento del paso de bobina, mediante la técnica CSS es posible reducir o eliminar armónicos a partir de la correcta elección de los parámetros.



Fig. 7: Contenido armónico de la FMM del estator para un devanado de 8/9 del paso polar.



Fig. 8: Contenido armónico de la FMM del estator para un devanado de 8/9 del paso polar mediante la técnica Coil Side Shift.

4 Conclusiones

En este trabajo se presentaron los parámetros fundamentales para la caracterización de las distribuciones de bobinados de las Maquinas Eléctricas Rotativas (MERs). Se analizaron cuestiones como la influencia de la distribución de las bobinas a lo largo del estator, el acortamiento del paso de bobina y la manera de cuantificarlas. Se estudió e implementó la técnica denominada Coil Side Shift, mediante la cual también es posible modificar el paso de bobina de un devanado con el fin de modificar el contenido armónico resultante en la fuerza magnetomotriz (FMM). Por ultimo, se analizó el impacto de la modificación de la distribución del devanado, comparandó el contenido armónico de la FMM de dos devanados con igual paso de bobina, pero obtenido de manera diferente, respecto a un devanado estándar o de paso completo. Fue posible observar que, a través de la modificación de la distribución del bobinado del estator se obtuvo una reducción del contenido armónico de FMM, o de manera general, una *modificación* de su contenido armónico.

Como trabajo futuro se propone diseñar una nueva distribución de bobinado con el objetivo de utilizar el contenido armónico obtenido como herramienta de evaluación y diagnóstico de la condición de las MERs.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Investigación PICT 00681 denominado Desarrollo de estrategias para la detección de averías en accionamientos eléctricos basado en WSN para la industria 4.0, financiado por el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT) y acreditado por la Secretaria General de Ciencia y Tecnología (SGCyT) de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM).

Referencias

- [1] *Distributed Windings in ac Machinery*. John Wiley Sons, Ltd, 2013, ch. 2, pp. 53–85. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118524336.ch2
- [2] P. Krause, O. Wasynczuk, s. Sudhoff, and S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 3rd ed. New Jersey, USA: IEEE Press, 2013.
- [3] H. Asgharpour-Alamdari, "Design of a novel distributed winding for improving performance of the induction motors," *Electrical Engineering*, no. 104, pp. 2911–2922, 2022.
- [4] M. Muteba, A. Jimoh, and D. Nicolae, "Torque ripple analysis of three-phase induction machines with non-uniform coil groups distribution," in 2013 International Electric Machines & Drives Conference. IEEE, pp. 1358–1363. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/6556313/
- [5] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, Windings of Electrical Machines, 1st ed. John Wiley Sons, Ltd, 2013, ch. 2, pp. 48–154. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118701591.ch2

- [6] H. Y. Sun and K. Wang, "Space harmonics elimination for fractional-slot windings with two-slot coil pitch," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 106961–106972, 2019.
- M. Caruso, A. O. Di Tommaso, F. Marignetti, R. Miceli, and G. Ricco Galluzzo, "A general mathematical formulation for winding layout arrangement of electrical machines," vol. 11, no. 2, p. 446, number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1996-1073/11/2/446