

Comportamiento de motores trifásicos de inducción con laminaciones y configuraciones diferentes (parte I)

Behavior of three-phase induction motors with different laminations and configurations (part I)

Presentación: 23/10/2024 (Arial 9)

Omar D. Gallo

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional San Francisco
odgallo@gmail.com

Diego M. Ferreyra

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional San Francisco
dferreyra@sanfrancisco.utn.edu.ar

Resumen

Este trabajo incluye tablas de valores constructivos y funcionamiento de dos motores asincrónicos trifásicos de baja tensión de igual tamaño constructivo, uno de ellos de fabricación normal de serie, única velocidad, conectado en estrella y otro especial para dos velocidades, arrollamiento Dahlander, conectado en doble estrella; ambas máquinas tienen distintos circuitos magnéticos de laminaciones y arrollamientos, pero comparten la cantidad de polos, algunas dimensiones, la tensión de alimentación y la frecuencia. Luego de una breve introducción y fundamentación, se comparan los valores de los datos de placa de características, las cotas dimensionales, los arrollamientos, las exigencias electromagnéticas, las curvas de corrientes y los momentos en el eje, resaltando aquellas características que los distinguen. Finalmente, se obtienen conclusiones sobre una posible aplicación alternativa y más ventajosa del motor conectado en doble estrella, respecto al otro.

Palabras clave: motores de inducción, curvas de motores eléctricos, motores de dos velocidades, diseño de laminaciones de motores

Abstract

This work includes tables of construction values and operation for two low-voltage three-phase asynchronous motors of the same size, one of them of standard manufacture, with a single speed and connected in star, and another one special, with two speeds and Dahlander winding, and connected in double star. Both machines have different magnetic sheet metal circuits and windings, but they share the number of poles, some dimensions, the supply voltage, and the frequency. After a brief introduction and rationale, the values of the nameplate data, dimensions, windings, electromagnetic demands, current curves, and axis torques are compared, highlighting those characteristics that distinguish them. Finally, conclusions are obtained about a feasible alternative and more advantageous application of the double-star connected motor, compared to the other.

Keywords: induction motors, electric motor curves, two-speed motors, motor lamination designs

Introducción

Desde la normalización de los motores eléctricos, a mediados del siglo XX, estos experimentaron un proceso extendido de desarrollo electromecánico que involucró, además de tecnologías de fabricación, sus dimensiones físicas, arrollamientos, refrigeración, respuestas en el eje y controles electrónicos. Durante este proceso, se

implementaron diseños de laminaciones que produjeron circuitos magnéticos apropiados, por su respuesta aceptable, para cada cantidad de polos y aplicación.

Entre otros aspectos de diseño de laminaciones ya probados, las formas de las ranuras y los arrollamientos determinan reactancias de dispersión, caídas de tensión y velocidad del eje; las longitudes de los paquetes de laminaciones condicionan resistencias, pérdidas y eficiencias; los diámetros de los rotores y los tipos de jaula de ardilla determinan los momentos en el eje; la refrigeración y temperatura modifican los otros valores y dependen de las superficies externas de evacuación de calor, y los controles electrónicos son los recursos adicionales ligados a su protección o manejo de condiciones de marcha (Fraile Mora, 2008; Juha Pyrhönen et ál. , 2008).

La conexión Dahlander es también muy usada en los casos de motores que producen, con un único devanado, dos velocidades que son una el doble de la otra (Chapman, 2005).

El principal objetivo de este trabajo es identificar las diferencias constructivas y comparar las curvas de respuestas de dos motores de igual tamaño y número de polos, pero con distintas dimensiones de laminaciones y arrollamientos, para obtener conclusiones relacionadas con las aplicaciones de uno de ellos.

En la red, se hallan datos de fabricantes de motores de uno o dos números de polos (WEG, 2024) y publicaciones que comparten algunos aspectos sobre arrollamientos en conexión Dahlander (Van der Giet et ál., 2007; Duran et ál., 2022); esta investigación solo pretende agregar aportes adicionales al conocimiento de la especialidad.

Desarrollo

El estudio utiliza datos constructivos reales y de ensayos de motores asíncronos trifásicos normalizados de baja tensión de 2 polos, eficiencia IE1 actual, de un mismo fabricante, que estuvo presente en el mercado nacional argentino hasta fines del siglo XX.

Los datos mencionados se usan en la resolución de un circuito equivalente convencional de parámetros variables (Fig. 1), mediante un software que produce tablas y curvas (Gallo, Ferreyra, 2021) basadas en experiencias y normalizaciones (Normas IEC, 2014, 2017; EASA, 2003). Los arrollamientos se obtienen mediante la plataforma progebo.com en red (Gallo, Gallo, 2014, 2017).

Estos recursos han sido suficientemente ejercitados, verificados y documentados (Gallo, Ferreyra, 2023).

Tabla 1. Referencias sobre la Figura 1.

Referencias del circuito equivalente convencional por fase	
V_f : tensión aplicada, V	I_{1f} : corriente del primario, A
R_1, jX_1 : resistencia y reactancia (primario), Ω	E_f : caída de tensión en la rama derivada, V
I_{mf} : corriente rama derivada (circ. magnético), A	R_m, jX_m : resistencia y reactancia, rama derivada, Ω
E_c : tensión de salida (carga del rotor) reducida al primario, V	R_2, jX_2 : resistencia y reactancia (rotor) reducidas al primario, Ω
I_{2f} : corriente del rotor reducida al primario; A	R_c : resistencia de carga reducida al primario, Ω

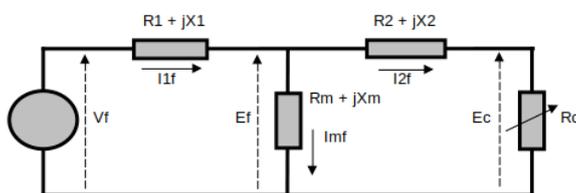


Figura 1. Circuito equivalente convencional por fase. Parámetros variables

Resultados

Comparación de datos de placa de características de los motores

Esta parte del estudio incluye 2 motores de 2 polos: uno de tamaño constructivo 90 S, de 1,50 kW de potencia en conexión estrella normal, y otro de tamaño 90 L42, apto para dos velocidades, de 1,60 kW en conexión doble estrella Dahlander. Ambos tienen el mismo tipo de carcasa e igual sistema de refrigeración y sus datos de placa de características se ven en la Tabla 3 referenciada en la Tabla 2; en esta se agregan además a modo informativo los valores de funcionamiento del motor en conexión Dahlander de 4 polos.

Tabla 2. Referencias sobre la Tabla 3.

Referencias sobre los datos de placa de características	
Tipo: característica particular del motor	Carcasa: altura del eje, tamaño
kW: potencia de salida en el eje, kW	V: tensión de alimentación, V
Con.: arrollamiento en estrella (E), triángulo (T) o doble estrella (EE)	Hz: frecuencia de línea, Hz
Polos: cantidad de polos	1/min: velocidad nominal del eje, min-1
Eff: eficiencia, %	FDP: factor de potencia
A: corriente, A	Ia/In: relación corrientes arranque/nominal
Ma/Mn: relación momentos arranque/nominal	Mm/Mn: relación momentos máximo/nominal
Aisl.: clase de aislación	IP: índice de protección del motor

Tabla 3. Motores tamaño 90 comparados. Datos de placa de características.

Tipo	Carcasa	kW	V	Con.	Hz	Polos	1/min	Eff	FDP	A	Ia/In	Ma/Mn	Mm/Mn	Aisl.	IP
Normal	90 S	1,50	380	E	50	2	2840	71,0	0,92	3,43	6,23	2,00	3,40	B	44
Dahlander	90 L42	1,60	380	EE	50	2	2790	65,8	0,93	4,03	5,08	1,90	3,50	B	44
Dahlander	90 L42	1,25	380	T	50	4	1400	69,7	0,83	3,30	4,80	2,01	2,20	B	44

Dejando de lado los efectos físicos que produce el arrollamiento Dahlander, a partir de aquí este se considera como un arrollamiento trifásico en conexión doble estrella normal, lo cual no ocasiona diferencias en el análisis ni en las conclusiones.

De la Tabla 3, se observa que, en el motor de 1,60 kW en EE, son menores la velocidad, relación de corrientes de arranque, relaciones de momentos de arranque y de momentos máximos, y la eficiencia. Son iguales la altura de eje, tensión, frecuencia, polos, aislación y protección. Son mayores el factor de potencia, la corriente, la potencia en el eje y la relación de momentos máxima. Las causas de estas diferencias se exponen a continuación.

Comparación de aspectos constructivos y exigencias de los motores

La Fig. 2 detalla las cotas dimensionales de estator y rotor de los motores. La Tabla 4 muestra las dimensiones y características del paquete de laminaciones, los datos de arrollamiento, y las exigencias nominales principales.

Las diferencias se dan porque la laminación del motor de 1,50 kW tiene dimensiones aptas para 2 polos, pero el de 1,60 kW usa una para 4 polos. En la columna izquierda de la Tabla, que expone las dimensiones que condicionan la mayoría de las exigencias, son iguales solo los diámetros exterior Dex del estator, el número de ranuras del rotor Nrr y el diámetro del eje Dej; los restantes valores son distintos. Se aprecia que el rotor del motor en EE tiene un volumen bastante mayor, lo cual incide en su tiempo de arranque y su respuesta en el eje.

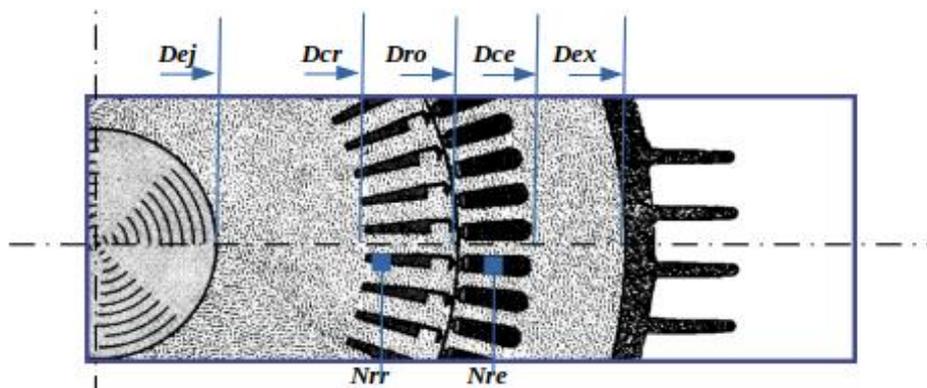


Figura 2. Cotas dimensionales del estor y rotor (extracción del catálogo WEG de motores eléctricos)

Tabla 4. Motores tamaño 90 en 2 polos comparados. Datos constructivos y exigencias nominales.

Tipo dimensión	Valor	Datos arrollamiento	Valor	Tipo exigencia	Valor	kW, con.
Diámetro ext. estator Dex (mm)	130,50	Ángulo (°)/paso bobinas (ranuras)	150/11	Corriente por kW (A/kW)	2,29	1,5 E
Diámetro aprox. rotor Dro (mm)	70,00	Factor de arrollamiento	0,958	Densidad bobinado (A/mm ²)	6,6	1,5 E
Diámetro eje rotor Dej (mm)	30,00	Espiras por bobina (real)	63	Densidad barra rotor (A/mm ²)	5,9	1,5 E
Longitud paquete Lpe (mm)	75,00	Cant. de alambres 1	1	Flujo por polo (Wb)	0,0036	1,5 E
Cant. ranuras estator Nre	95,00	Cant. de alambres 2	1	Flujo por polo (Wb)	0,0040	1,6 EE
Sección ranura estator Sre (mm ²)	24	Diámetro alambre 1 (mm)	0,55	Dens. flujo entrehierro (T)	0,69	1,5 E
Cant. ranuras rotor Nrr	36	Diámetro alambre 2 (mm)	0,35	Dens. corona estator (T)	0,53	1,6 EE
Sección ranura rotor Srr (mm ²)	89,80	Cant. de alambres 2	1	Dens. corona rotor (T)	1,71	1,5 E
	56,00		1	Dens. corona estator (T)	2,00	1,6 EE
	28	Diámetro alambre 2 (mm)	0,60	Dens. corona rotor (T)	1,47	1,5 E
	28		0,40	Dens. corona rotor (T)	1,18	1,6 EE
	30,10	---	---	Sobretemperatura (K)	62,4	1,5 E
	36,30	---	---	Sobretemperatura (K)	72,8	1,6 EE

La columna central de la Tabla 4, referida a los devanados de las Figs. 3.a y 3.b merece un análisis detallado. El del motor en conexión EE tiene ángulo eléctrico, paso de bobinas y factor de arrollamiento menores y es muy distribuido, lo que origina mayor reactancia y menos armónicas en la distribución del flujo en el entrehierro. Respecto a los alambres usados, ambos bobinados están contruidos con 2 alambres en paralelo y distintas secciones. Los restantes valores son diferentes, acordes a potencias y temperaturas nominales. Para el cálculo de las densidades de corrientes en la doble estrella, debe tenerse en cuenta el doble camino en paralelo.

Según la columna derecha de la Tabla 4, en el motor en EE son mayores la corriente por kW y la densidad de corriente en el alambre del estator. La densidad de corriente en las barras del rotor es menor, lo cual origina un comportamiento térmico distinto en cada zona y mayor sobretemperatura del arrollamiento estatórico, consistente con la mayor corriente y menor sección de conductores. El flujo es algo mayor, como la densidad de flujo en la corona del estator (sector periférico del estator). En las otras zonas del circuito magnético, los valores son inferiores, lo cual incide en corrientes magnetizantes, pérdidas en las laminaciones y temperaturas de cada zona. El rotor presenta mayor capacidad y menor exigencia térmica. Si bien aquí no se muestran los valores, el motor en EE acusa una mayor corriente de vacío, también producto de su menor reactancia derivada X_m .

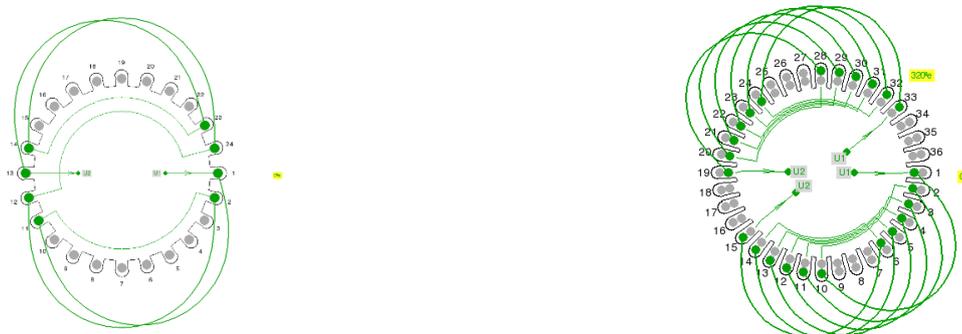


Figura 3. Una fase de bobinado: a) motor de 1,50 kW, 2 polos, con. estrella, 24 ranuras, 2 polos, 1 vía, 1-11, $k_a = 0,958$; b) motor de 1,60 kW, 2 polos, con. doble estrella, 36 ranuras, 2 polos, 1 vía, 1-10, $k_a = 0,676$.

Comparación de curvas de respuesta de los motores

Las Figs. 4.a y 4.b muestran las curvas teóricas de momentos y corrientes. En la Tabla 5, se ven los valores singulares, algunos redondeados, de los momentos de arranque, mínimo, máximo, para carga al 150 % y 100 %, y en vacío. Se observa que el motor en EE presenta una sensible diferencia en formas y valores respecto al otro.

La corriente de arranque es algo menor y la de máximo par, mayor. El valor de I2f, que determina el par en el eje, es algo mayor que I1f aproximadamente entre 750 min⁻¹ y 2700 min⁻¹. La comparación de estas curvas es atractiva por las posibles aplicaciones: el motor en EE tiene momentos de arranque y mínimo similares a los del otro y un máximo mayor a menor velocidad, similar al desempeño de un motor con rotor de alto deslizamiento.

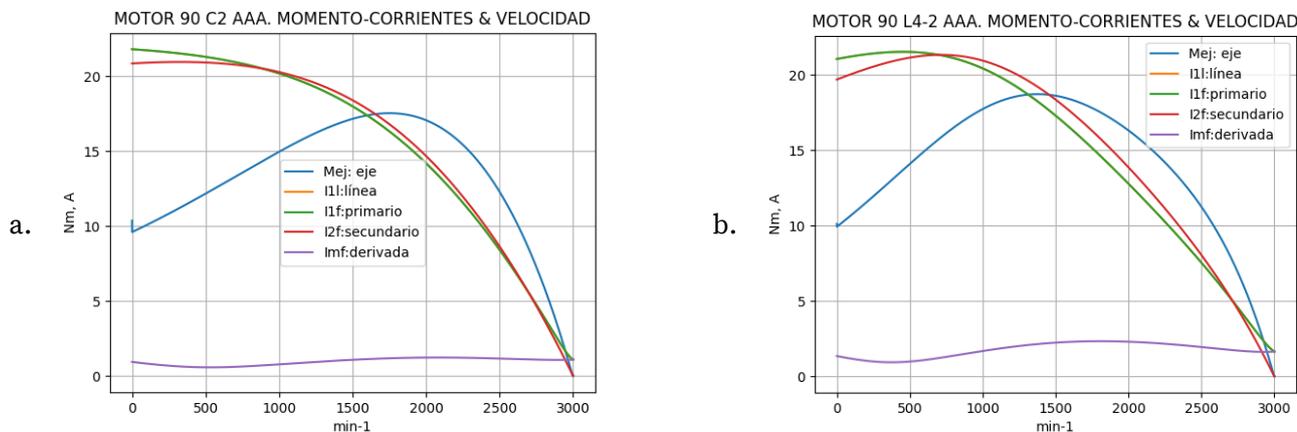


Figura 4. Curvas de momentos y corrientes: a) motor de 1,5 kW, 2 polos, con. estrella, b) motor de 6 kW, 2 polos. con. doble estrella

Comparación de momentos singulares de carga de los motores

En la Tabla 5, la variación con la velocidad de las pérdidas adicionales Pad (W) y mecánicas Pme (W) se determinan por software, según datos de experiencias y normalizaciones. Las velocidades en vacío se aproximan a las sincrónicas. Los momentos de arranque son prácticamente iguales, los mínimos son muy cercanos a ellos en velocidad y valor y los máximos difieren sensiblemente, sobre todo en deslizamiento y pérdidas calóricas; al 150 % de carga, la potencia y el deslizamiento del motor en EE son considerablemente mayores, al igual que la corriente I2f, que origina una respuesta superior en el eje, hasta cerca de la velocidad de vacío.

Tabla 5. Motores comparados tamaño 90 en 2 polos. Momentos singulares de carga.

Momento	1/min	Nm	Eff (%)	P1t (W)	Pej (W)	Pad (W)	Pme (W)	Pfe (W)	Pcu (W)	Ec (V)	Ef (V)	I2f (A)	I1l (A)	kW	Con.
Arranque	0	10,4	0,0	9387	0	0	0	145	9241	0,0	96,5	20,8	21,8	1,5	E
	0	10,1	0,0	10339	0	0	0	215	10124	0,0	88,9	19,7	21,0	1,6	EE
Mínimo	1	9,6	0,0	9387	1	0	0	145	9242	0,0	96,4	20,8	21,8	1,5	E
	1	9,9	0,0	10342	1	0	0	214	10127	0,0	88,8	19,7	21,0	1,6	EE
Máximo	1751	17,5	33,7	9546	3214	257	11	229	5835	69,1	174,4	16,8	16,3	1,5	E
	1377	18,7	23,0	11752	2697	54	2	539	8460	47,8	186,8	19,2	18,2	1,6	EE
150 % carga	2724	7,9	69,4	3246	2251	180	32	199	585	160,6	190,8	5,1	5,2	1,5	E
	2665	8,6	66,0	3635	2398	48	12	374	803	142,7	194,2	5,7	5,6	1,6	EE
100 % carga	2835	5,1	71,8	2088	1500	120	36	190	242	174,5	190,5	3,2	3,4	1,5	E
	2814	5,4	69,5	2302	1600	32	14	325	330	161,4	185,3	3,4	3,7	1,6	EE
Vacío	3000	0,0	0,0	250	0	0	41	193	16	196,6	196,7	0,1	1,1	1,5	E
	3000	0,0	0,0	376	0	0	16	317	43	188,0	188,1	0,0	1,7	1,6	EE

Pad, Pme (W): pérdidas adicionales y mecánicas Pfe, Pcu (W): pérdidas en el hierro y en el cobre
P1t, Pej (W): potencia de entrada y en el eje I1l (A): corriente de entrada, de línea

Conclusiones

Sin considerar el sistema de refrigeración ni los eventuales controles electrónicos, la configuración dimensional de las laminaciones y el arrollamiento producen impedancias internas, caídas de tensión, corrientes, pérdidas y respuestas en el eje particulares. En este caso, el motor en conexión doble estrella tiene un funcionamiento no tan aceptable en 2 polos porque su laminación es más apta para 4 polos. Sin embargo, este alejamiento de la aceptabilidad en aplicaciones estándares podría aprovecharse para aplicar el motor de 2 polos “de laminación anormal”, sin necesidad de rotor especial ni controles electrónicos, en máquinas que requieran altos deslizamientos, como las removedoras o de tracción. Esta es una propuesta preliminar, válida solo en este caso particular. Si se extendiera el concepto, se podría suponer que otros motores con diseños de laminaciones no aptas para su cantidad de polos podrían adaptarse a las mismas o diferentes prestaciones, según su tipo de respuesta en el eje. A los fines de obtener conclusiones generales más fundamentadas, en una segunda parte de la investigación se extenderá el estudio a máquinas de otras potencias y velocidades.

Referencias

- Duran, T., Tvorić, S., & Šimović, V. (2022). “Comparison of Efficiency Level for Induction Motor with Dahlander Winding in Direct on Line and via Frequency Converter Drive Connection.” In 2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO) (pp. 142-146). IEEE.
- Chapman, S. (2005). Máquinas Eléctricas. México: Mc Graw Hill.
- EASA (2003). “El Efecto de la Reparación/Rebobinado en la Eficiencia del Motor y Guía de Buenas Prácticas Para Conservar La Eficiencia del Motor”. USA, 18-19.
- Fraile Mora, J. (2008). Máquinas Eléctricas. Madrid: Mc Graw Hill.
- Gallo, O. y Gallo, J. (2014). “Programa de Gestión de Bobinados (ProGeBo) (Primera parte)”. Revista Iberoamericana de Ingeniería Industrial (Brasil), 6(11), ISSN 2175-8018, 328-348.
- Gallo, O., y Gallo, J. (2017). Programa de Gestión de Bobinados (ProGeBo). Parte II. 46° Congreso JAIIO 2017, Córdoba, Argentina. Disponible en: <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/3359>.
- Gallo, O. D., y Ferreyra, D. M. (2021). Obtención de curvas de motores de inducción usando un circuito equivalente de parámetros variables. Revista Tecnología y Ciencia, (42), 112-134.
- Gallo, O. D. y Ferreyra, D. M. (2023). Motores trifásicos de inducción : aplicación del circuito equivalente. Argentina: edUTecNe. Disponible en: <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/8399>.
- Juha Pyrhönen, J. et ál. (2008). Design of Rotating Electrical Machines. UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Norma IEC 60034-1. (2017). “Rotating electrical machines. Part 1: Rating and performance”.
- Norma IEC 60034-2-1. (2014). “Rotating electrical machines. Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)”.
- van der Giet, M., Hameyer, K., & Risse, S. (2007, May). Induction motor with pole-changing winding for variable supply frequency. In 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (Vol. 2, pp. 1484-1489). IEEE.
- WEG (2024). Motores W22. “Catálogo de productos. Motor W22 Dahlander”.