

4. Adquisición de datos

4.1. Introducción

El problema de la determinación de los parámetros de un modelo de circuito del motor de inducción puede resolverse de diferentes formas. Por una parte, es posible la determinación de los parámetros del modelo de circuito mediante ensayos sobre la máquina en estudio. Como ya se ha comentado, esto requiere de personal cualificado, instrumentos especiales y tener la máquina fuera de funcionamiento durante el ensayo. Por tanto, no es un método viable en muchos casos. Debido a esto, a menudo se necesita un método que haga uso de la información que puede ser obtenida de otras fuentes como puede ser la placa de características o un catálogo del fabricante del motor. Esta última fuente de información proporciona datos sobre las características de los motores en los puntos más importantes de su funcionamiento como son el arranque, el punto de par máximo y el punto de par nominal. Utilizando esta información es posible modelar un circuito que reproduzca las características del motor. Para ello se hace uso de las ecuaciones eléctricas del motor de inducción para calcular las mismas magnitudes que proporciona el catálogo y poder extraer los parámetros que hacen que la diferencia entre las magnitudes del catálogo y las calculadas sea la menor posible. Dependiendo de la información proporcionada por el catálogo y del modelo de circuito utilizado, el sistema de ecuaciones a resolver será más o menos complejo.

4.2. Placas de características

Además de los catálogos disponibles, otra fuente de información puede ser la placa de características del motor. Por norma [32], todas las máquinas deben estar provistas de una o varias placas de características, (Figura 4.1 y Figura 4.2). Las placas deben ser realizadas con materiales duraderos y tener una posición segura. La o las placas de características deben fijarse preferentemente sobre la carcasa de la máquina y, estar situadas de forma que sean fácilmente legibles en la posición de utilización determinada por la forma de construcción y la disposición de montaje de la máquina.

ABB Oy, Machines						
Induction Machines, Helsinki, Finland						
CLASS I DIVISION 2 GROUP ABCD T3						
3 PHASE M3GM 587 LKC 4 B3						
FRAME 587 TECF						
CODE H		SF 1.15		SER 4574949		
MAX AMB TEMP 40°C				INS F		IP 55
V	Hz	HP	RPM	FLA	PF	TIME
2300	60	400	1789	106	0.84	CONT
Product code: 3GGM982830-AWA						
HEATER 160 W			CERTIFICATE NUMBER 172504			
Year of manufacture 2004				MAX RPM 2160		
6322/C3		6316/C3		WT 4097LB		
				NEMA MG 1,PART 20 -2003		

Figura 4.1. Placa de características de un motor tipo NEMA

○ SIEMENS			UL CE ○		
3~Mot. 1PH7 186-2HF230EA9-Z			NoN- U11170812010001 / 2006		
IMB5	IP 55		Th.Cl. F		Gew./WT. 480 kg
V	A	kW	cosφ	Hz	1/min
330 Y	170	74	0.81	51	1500
385 Y	169	85	0.80	59	1750
445 Y	165	94	0.78	67	2000
EN / EC 60034-1			max 3000 1/min		
KTY84					
ENCODER_H01_1024_SR					
○ MADE IN GERMANY D-90441 Nürnberg ○					

DEW0244

Figura 4.2. Placa de características de un motor tipo IEC

Las máquinas de inducción de potencias asignadas iguales superiores a 3 kW, (o kVA), deben ser marcadas como mínimo con la siguiente información:

- 1) Nombre o marca del fabricante.
- 2) Número de serie del fabricante, o marca de identificación.
- 3) Año de fabricación.
- 4) El código del fabricante para la máquina.
- 5) Número de fases.
- 6) Norma aplicable para las características asignadas.
- 7) Grado de protección proporcionada por el diseño global de las envolventes de las máquinas eléctricas rotativas, (código IP).
- 8) Clase térmica y límite de temperatura o de calentamiento.
- 9) Potencia asignada.

- 10) Tensión asignada.
- 11) Frecuencia asignada.
- 12) Intensidad asignada.
- 13) Velocidad asignada.
- 14) Factor de potencia asignado.
- 15) Temperatura máxima del aire ambiente si es diferente de 40°.
- 16) Altitud para la que ha sido diseñado (si es mayor de 1000 m).
- 17) Masa aproximada total de la máquina (si es superior a 30 kg)
- 18) Diagrama de conexión

Si la máquina tiene una potencia asignada inferior a 3 kW (o kVA), la información mínima que debe aparecer en la placa de características es la correspondiente a los puntos: 1, 2, 10, 11 y 18.

En caso de que la máquina tuviese una potencia asignada igual o inferior a 750 W (o VA), la placa deberá ser marcada con la información, como mínimo, de los puntos: 1, 2, 10 y 18.

Si el fabricante proporciona más informaciones, no es necesario que éstas se marquen en la placa de características. El orden en el que aparecen los datos en las placas no está normalizado.

4.3. Catálogos de fabricantes

La información disponible en los catálogos de los fabricantes de motores eléctricos es la fuente de datos elegida en este trabajo. Respecto a esta información cabe destacar un aspecto esencial en la ulterior utilización de los datos que contienen. La información sobre consumos, rendimientos, potencias y pares generados en distintos puntos de funcionamiento, no corresponde exactamente a la máquina a la que están referidos. Esta información procede de datos promedios medidos en los ensayos de varias máquinas, supuestamente idénticas. Todos estos valores están afectados de unas tolerancias [32]. Es decir, el conjunto de datos dado, seguramente, no corresponde a ninguna máquina. Es más, lo más probable es que dicho conjunto no sea posible físicamente, ya que cada magnitud estará afectada por una tolerancia diferente, que en algunos casos se toma aleatoria (siempre dentro de la norma). Esto puede hacer casi imposible que unos mismos parámetros internos del motor produzcan unas magnitudes con error nulo respecto a las contenidas en el catálogo para la misma máquina.

A continuación se presenta una tabla con las tolerancias indicadas en la norma [32].

Punto	Magnitud	Tolerancia
1	Rendimiento η Por suma de pérdidas: $P_N \leq 150 \text{ kW}$ o $S_N \leq 150 \text{ kVA}$ $P_N > 150 \text{ kW}$ o $S_N > 150 \text{ kVA}$	-15% de $(1 - \eta)$ -10% de $(1 - \eta)$
2	Pérdidas totales (aplicable a las máquinas de potencia asignada superior a 150 kW (o kVA))	+10% de las pérdidas totales
3	Factor de potencia, $\cos\phi$, para las máquinas de inducción	$-1/6(1 - \cos\phi)$ Valor absoluto mínimo 0,02 Valor absoluto máximo 0,07
4	Deslizamiento de los motores de inducción (a plena carga y a la temperatura de funcionamiento) $P_N < 1 \text{ kW}$ $P_N \geq 1 \text{ kW}$	$\pm 30\%$ del deslizamiento garantizado $\pm 20\%$ del deslizamiento garantizado
5	Intensidad con rotor bloqueado de los motores de inducción con rotor de jaula, con cualquier dispositivo de arranque especificado	+ 20% de la intensidad garantizada
6	Par con rotor bloqueado de los motores de inducción de jaula	+25% / -15% del par garantizado
7	Par mínimo durante el arranque de los motores de inducción de jaula	-15% del par garantizado
8	Par máximo de los motores de inducción	-10% del par garantizado, pero con la reserva de que después de aplicar dicha tolerancia, el par debe ser igual o superior a 1,6 ó 1,5 veces el par asignado
9	Momento de inercia	$\pm 20\%$ del valor garantizado

Tabla 4.1. Relación de tolerancias sobre los valores de las magnitudes según UNE-EN 60034-1

Para validar el método, los algoritmos han sido probados en una gran multitud de motores. En los catálogos de los fabricantes figura gran cantidad de información que supone miles de datos a procesar. Se ha buscado automatizar en cierta medida el proceso de cálculo haciendo que el programa calcule los parámetros de forma automática para todos los motores. Para ello, el programa adquiere los datos de una hoja de Excel en la que previamente han sido introducidos a partir de los catálogos. Por dar

un orden de magnitud, uno de los catálogos utilizados contenía 20 características de cada uno de los 356 motores que contenía, lo que da un total de más de 7000 datos. Los catálogos utilizados para las pruebas se obtuvieron de las páginas web de los fabricantes [35], [36] y [37]. Todos los algoritmos han sido probados en todos los catálogos y en ambos modelos, jaula simple y doble. Se han empleado catálogos de los tipos NEMA e IEC. Así como catálogos de motores de eficiencia premium, IE3, y estándar, IE2. La tensión nominal de los motores analizados va desde 400 V a 10 kV. La potencia varía desde 0.55 kW a 750 kW (Figura 4.3). En total se han probado 1001 motores. No todos los catálogos tienen la misma información, como se verá al final del capítulo.

En la siguiente gráfica se muestra un histograma que presenta el número de motores estudiado para cada potencia.

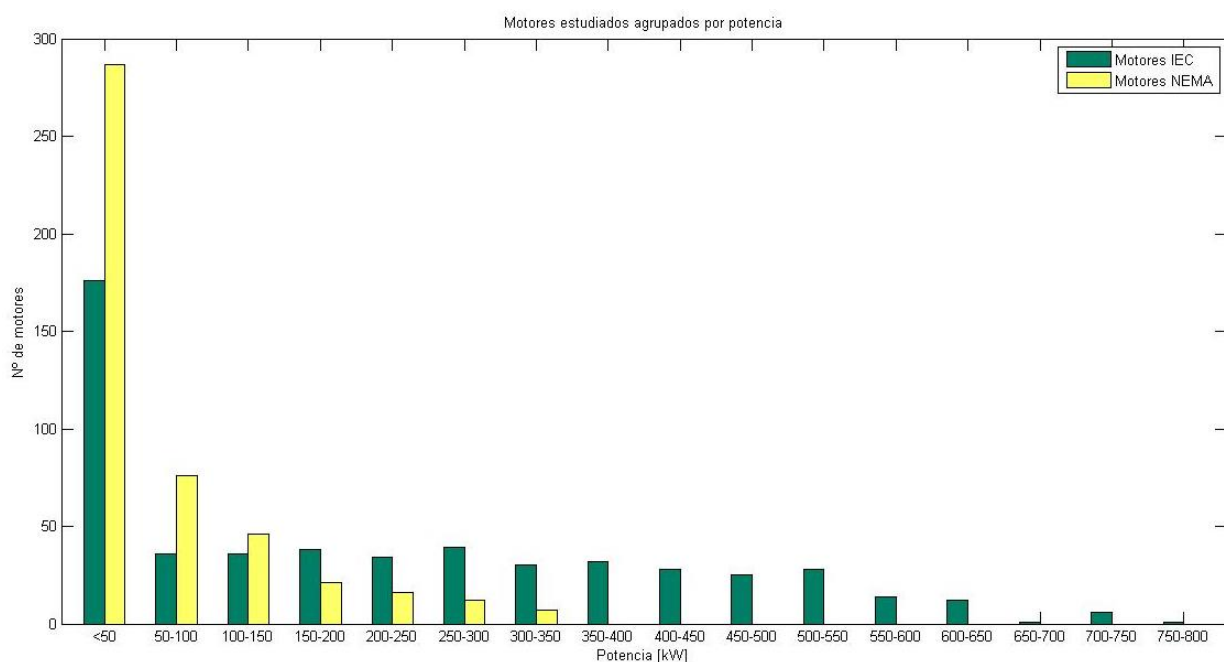


Figura 4.3. Rangos de potencia de los motores analizados

Como se aprecia en la figura anterior, se han estudiado motores que comprenden todos los rangos de potencia. Si bien en baja potencia hay más motores del tipo NEMA y en alta potencia de tipo IEC, se han estudiado muchos motores de ambos tipos para todo el rango de potencia.

La mayoría de los fabricantes ofrecen sus catálogos en formato PDF (*portable document format*), ideado para documentos susceptibles de ser impresos, ya que especifica toda la información necesaria para la presentación final del documento, determinando todos los detalles de cómo va a quedar, no requiriéndose procesos anteriores de ajuste ni de maquetación. Sin embargo, este formato no permite ser leído por Matlab y por ello resulta inútil para la obtención de los datos que contiene. Por tanto, para el procesamiento de la información y su conversión al formato Excel, compatible con Matlab, se ha recurrido a un programa de reconocimiento óptico de

caracteres (OCR) [33]. Una vez que los datos se tienen en una hoja de Excel se uniformiza el formato para permitir a Matlab reconocer los valores. Mediante la función ‘xlsread’, incluida en el *toolbox* de Matlab [34], los datos en formato Excel son convertidos en una matriz. La ordenación de datos por columnas es importante ya que Matlab actúa sistemáticamente creando una matriz en la que cada columna corresponde a un parámetro distinto. Los valores se almacenan en una matriz llamada “DATOS” que es la fuente de información del algoritmo.

A continuación se presentan algunos ejemplos de los catálogos empleados.

- Fabricante: General Electric (Tipos IEC y NEMA)

GE
Power Conversion

Section 4 – IEC Premium and Standard Efficiency Motors

X\$D Ultra® 841 IEC
TEFC—Extra Severe Duty
IE3 Efficiency
Typical Performance Data



Volts: 400
Frequency: 50Hz
kW: 0.55 - 220

Output kW	Frame	FL RPM	NP Amps I _N (A)	Start/ Full Load Amps I _s /I _N	Start/ Full Load Torque T _s /T _N	Full Load Torque T _N (Nm)	Starting Torque T _s (Nm)	Breakdown Torque T _{max} (Nm)	NP Eff. Full Load	Guar. Eff. Full Load	75% Load Eff.	50% Load Eff.	NP PF Full Load	75% Load Power Factor	50% Load Power Factor	Max. KVAR	Notes
0.55	90S	2930	1.3	7.8	2.8	1.8	5.0	6.5	80.7	77.8	82.3	79	78.5	71	59	0.4	
0.55	90S	1435	1.2	6.7	3.0	3.7	11.0	13.2	82.9	80.3	85.2	84	79	71.5	58.6	0.4	
0.55	90S	945	1.5	5.0	2.5	5.6	14.0	17.2	79.1	76.0	81.1	79.5	68	59	46	0.6	
0.55	90L	700	2.3	3.7	2.8	7.5	20.6	24.9	67	62.1	66.6	60.8	50.5	42	32.3	1.1	
0.75	90S	2910	1.7	7.0	2.4	2.5	6.0	7.7	84.0	81.6	85.5	84.5	77.5	69.7	56.2	0.5	
0.75	90S	1425	1.6	6.4	2.8	5.0	13.8	16.4	84.0	81.6	86.6	86.4	83	77.2	65.7	0.4	
0.75	90S	940	2.0	5.2	2.7	7.6	20.3	24.5	80.6	77.7	81.7	80.3	68	58.8	45.7	0.7	
0.75	112S	725	2.7	4.6	2.0	9.9	19.5	29.8	75	71.3	76.3	71.9	53.5	44.9	34.2	1.2	
1.1	90S	2920	2.4	8.9	3.3	3.6	11.8	14.1	83.8	81.4	89	88.4	80.5	73.6	60.9	0.6	
1.1	90L	1425	2.2	6.7	3.0	7.4	22.1	25.5	85.3	83.1	87.1	87.1	83	76.5	64.5	0.6	
1.1	112S	970	2.7	7.2	2.3	10.8	24.5	42.4	85.5	83.3	87.5	86.1	68.5	60.1	47	1	
1.1	112M	715	3.5	4.4	1.9	14.7	27.3	38.8	77.6	74.2	77.6	74.6	58	49.2	37.6	1.5	
1.5	90L	2915	3.2	8.0	3.1	4.9	15.5	18.0	85.0	82.8	86.6	85.3	78.5	71.1	58.2	0.9	
1.5	90L	1435	3.4	7.5	3.9	10.0	38.8	43.0	85.8	83.7	86.4	85.4	75	66.1	52.3	1.2	79
1.5	112S	1465	3.3	6.8	2.5	9.8	24.0	32.8	87.5	85.6	89.1	87.8	74.5	66.8	54.1	1.1	80
1.5	112M	965	3.8	6.9	2.4	14.8	35.1	57.6	85.5	83.3	86.1	84.5	67.5	58.5	45.4	1.4	

Figura 4.4. Datos de motores tipo IEC de General Electric

GE
Power Conversion

Section 2 – X\$D Ultra® Motors

X\$D Ultra® TEFC—Extra Severe Duty

Typical Performance Data

a product of
ecomagination™



Volts: 460
HP: 0.75 – 300

HP	FL RPM	NP FLA	Design LRA	NEMA B LRA	Code	Code KVA/HP	FLT (lb-ft)	LRT (lb-ft)	BDT (lb-ft)	NP Eff. Full Load	Guar. Eff. Full Load	75% Load Eff.	50% Load Eff.	NP PF Full Load	75% Load Power Factor	50% Load Power Factor	Max. KVAR
0.75	1150	1.4	7.5	12.5	P		3.4	9.5	12.3	80	78.5	81.1	78.3	63.5	54.4	42	0.6
0.75	855	1.9	7.2	12.5	P		4.6	11.5	14.8	72	70	72.4	67.5	52	43.1	32.9	1
1	3540	1.3	12.8	25	N		1.5	4.9	6.6	87.5	86.5	89.1	87.3	80	73	60.7	0.4
1	1750	1.4	11.9	15	N		3	11.5	14	86.5	85.5	86.9	84.8	76	68	55.1	0.5
1	1155	1.8	10.8	15	N		4.5	14.3	18.1	82.5	81.5	83.2	80.7	62.5	53.5	41.1	0.8
1	875	2.2	10.4	15	N		6	11	18.9	80	78.5	79.3	75.3	52.5	43.8	33.2	1.2
1.5	3530	2	18.6	20	M		2.2	7.4	9.6	87.5	86.5	89.6	88.5	80.5	73.7	61.3	0.6
1.5	1740	2.1	16.9	20	M		4.5	16.7	19.8	86.5	85.5	87.5	86.1	77.5	69.8	56.8	0.8
1.5	1175	2.4	17.4	20	M		6.7	14.7	27.8	87.5	86.5	88.4	86.6	68	59.5	46.7	1
1.5	870	3.2	14.7	20	M		9	16.7	26.1	80	78.5	80	76.7	55.5	46.7	35.6	1.6
2	3515	2.7	23.1	25	L		3	9.2	11.9	86.5	85.5	89	88.2	80	72.7	59.9	0.8
2	1735	2.7	21	25	L		6.1	21.2	24.8	86.5	85.5	88	87.2	80	72.8	60.2	0.9
2	1170	3	22.6	25	L		9	19.6	36.1	88.5	87.5	88.9	87.5	69.5	61.3	48.4	1.2
2	880	3.8	20.5	25	L		11.9	20.1	38.4	86.5	85.5	85.9	83.3	57	48.6	37.2	1.9
3	3530	3.8	25.8	32	K		4.5	8.1	14	89.5	88.5	91.3	90.8	82	76.4	65.1	1
3	1760	4.2	29.2	32	K		8.9	23.1	30.2	89.5	88.5	89.8	88.8	75.5	68.4	55.9	1.5
3	1175	4.3	29.9	32	K		13.4	26.5	41.4	89.5	88.5	89.7	88.5	73	66	53.8	1.7
3	875	5.4	27.8	32	K		18	29.1	51.2	86.5	85.5	86.6	84.9	60.5	52.8	41	2.5

Figura 4.5. Datos de motores tipo NEMA de General Electric

- Fabricante: ABB

Selection and ordering data													
The 1LA4 data also apply to explosion-proof 1MG4 (Ex px) and 1MS4 (Ex nA) motors.													
Rated power	High voltage motor H-compact	Speed	Rated current	Efficiency	Power factor	Torque	Break-down torque	Locked-rotor torque	Locked-rotor current	Moment of inertia			
IEC			I_{rated} at 6 kV	4/4 load	3/4 load	4/4 load	3/4 load		T_B/T_{rated}	T_L/T_{rated}	I_L/I_{rated}	Motor	External, max. ¹⁾
kW	Order No.	rpm	A	%	%	cos φ	cos φ	Nm	[-]	[-]	[-]	kgm ²	kgm ²
2.0 ... 6.6 kV, 50 Hz													
2-pole													
200	1LA4 310-2AN	2970	23.5	94.7	94.9	0.87	0.86	643	2.30	0.90	5.0	2.2	28
236	1LA4 312-2AN	2967	27.5	94.5	94.8	0.87	0.85	760	2.30	0.90	5.0	2.2	26
300	1LA4 314-2AN	2972	34.5	95.2	95.4	0.88	0.86	964	2.40	1.05	5.2	2.7	30
355	1LA4 316-2AN	2974	40.5	95.7	95.8	0.88	0.87	1140	2.50	1.10	5.3	3.1	35
400	1LA4 350-2AN	2978	45.5	95.6	95.8	0.88	0.86	1283	2.30	1.05	5.2	4.3	38
450	1LA4 352-2AN	2978	51.0	95.9	96.0	0.88	0.87	1443	2.50	1.20	5.5	4.8	43
500	1LA4 354-2AN	2980	57.0	96.1	96.3	0.88	0.87	1602	2.50	1.20	5.5	5.2	46
560	1LA4 400-2AN	2984	64.0	96.0	96.0	0.88	0.86	1792	2.50	0.85	5.4	7.8	26
650	1LA4 402-2AN	2985	74.0	96.3	96.3	0.88	0.87	2079	2.60	0.90	5.6	8.7	27
750	1LA4 404-2AN	2985	84.0	96.5	96.5	0.89	0.88	2399	2.60	0.95	5.6	9.9	30
820	1LA4 450-2CN	2983	92.0	96.2	96.2	0.89	0.87	2625	2.40	0.80	5.5	17.0	68
940	1LA4 452-2CN	2984	106.0	96.5	96.4	0.89	0.87	3008	2.50	0.80	5.8	19.0	76
1030	1LA4 454-2CN	2984	114.0	96.6	96.6	0.90	0.89	3296	2.40	0.75	5.7	21.0	79
1200	1LA4 500-2CN	2985	132.0	96.7	96.6	0.90	0.89	3839	2.30	0.65	5.3	29.0	93
1300	1LA4 502-2CN	2986	144.0	96.8	96.7	0.90	0.89	4157	2.30	0.65	5.3	32.0	98
1420 ²⁾	1LA4 504-2CN	2986	154.0	96.9	96.9	0.91	0.90	4541	2.40	0.70	5.5	35.0	125
1680 ²⁾	1LA4 560-2CN	2990	184.0	96.9	96.7	0.91	0.90	5365	2.50	0.45	5.4	53.0	104
1900 ²⁾	1LA4 562-2CN	2991	205.0	97.0	96.9	0.91	0.90	6066	2.60	0.50	5.7	58.0	131
2000 ²⁾	1LA4 564-2CN	2990	220.0	97.2	97.1	0.91	0.90	6387	2.50	0.45	5.0	64.0	136

Figura 4.6. Datos de motores tipo IEC de ABB

En los distintos catálogos empleados no siempre se ha dispuesto de la misma cantidad de datos. De este modo se han hecho 3 divisiones atendiendo al número de datos independientes disponibles¹:

- 9 datos: información sobre el punto nominal ($P_n, \eta_{100\%}, \cos\varphi_{100\%}$), al 75% de la carga ($P_{n,75\%}, \eta_{75\%}, \cos\varphi_{75\%}$), par e intensidad de arranque (T_{st} e I_{st}) y par máximo (T_{max}).
- 11 datos: a la información anterior se le suma la disponible para el punto de funcionamiento al 50% de la carga ($P_{n,50\%}, \eta_{50\%}, \cos\varphi_{50\%}$), pero sin información acerca de la intensidad estática en el arranque (I_{st} no disponible).
- 12 datos: información completa. Incluye todas las anteriores.

Como dato mecánico de cada punto de funcionamiento se ha tomado la potencia suministrada por el eje. Así $P_{n,75\%} = 0.75 \cdot P_n$. De igual modo para el punto de funcionamiento al 50% de la carga nominal. Se ha elegido la potencia frente al par debido a que en todos los catálogos no estaba disponible el par nominal.

Es importante exponer que todos los datos han sido transformados a sus respectivas unidades del Sistema Internacional, si el catálogo no suministraba la información en unidad del mismo. Además los valores de rendimientos y factores de potencia han sido transformados a valores en por unidad (pu). Las conversiones realizadas han sido las siguientes:

- Par: ft-lb $\rightarrow$ x1.35582 $\rightarrow$ Nm
- Potencia: Hp $\rightarrow$ x0.7457 $\rightarrow$ W

¹ En cada punto se dispone de 3 datos independientes: dos de ellos se obtienen a partir de ecuaciones eléctricas, y el tercero se toma de la ecuación mecánica.