



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO, EN BAJA TENSIÓN, MEDIANTE NORMAS UNE

Alumno: Juan Miguel Jiménez Ordóñez

Tutor: Prof. D. Ignacio Pérez Guerrero
Dpto: Ingeniería Eléctrica

Junio, 2016



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Electricidad

Don IGNACIO PÉREZ GUERRERO , tutor del Proyecto Fin de Carrera
titulado: ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL
MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO, EN BAJA TENSIÓN, MEDIANTE NORMAS
UNE, que presenta JUAN MIGUEL JIMÉNEZ ORDÓÑEZ, autoriza su presentación
para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, JUNIO de 2016

El alumno:

JUAN MIGUEL JIMÉNEZ ORDÓÑEZ

Los tutores:

IGNACIO PÉREZ GUERRERO

ÍNDICE

Nomenclatura.....	VI
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	X

Capítulos:

Capítulo nº 1. Objetivos y planteamiento del Trabajo Fin de Grado

1.1. Introducción	2
1.2. Objetivos y planteamiento del Trabajo Fin de Grado	2
1.3. Estructura del Trabajo Fin de Grado.....	4

Capítulo nº 2. Máquina de inducción trifásica

2.1. Introducción al motor de inducción	7
2.1.1 Características principales.	8
2.1.1.1. Deslizamiento.	8
2.1.1.2. Factor de Potencia	10
2.1.1.3. Corriente de arranque	11
2.1.1.4. Momento de Inercia.....	11
2.1.1.5. Par de arranque y Par máximo.....	12
2.1.1.6. Rendimiento.....	12
2.1.1.7. Pérdidas y diagrama de flujo de potencias	13
2.1.1.7.1. Balance de potencias	13
2.1.1.7.2. Ecuaciones de las potencias en el circuito.....	14
2.2. Modelo matemático de la máquina de inducción trifásica según Krause	16
2.2.1. Ecuaciones de tensión en máquinas variables	16
2.2.2. Ecuaciones de par en máquinas variables	20

Capítulo nº 3. Normativa

3.1. Obtención de los parámetros del circuito equivalente en los motores de inducción de jaula de ardilla trifásicos de baja tensión.....	24
3.2. Introducción	24
3.1.2. Equipos de medida utilizados.....	24
3.1.3. Ensayos realizados	28

3.1.3.1. Ensayo a rotor libre	28
3.1.3.2. Ensayo a rotor bloqueado	29
3.1.3.3. Ensayo a plena carga.....	31

(Se mantiene la numeración original de las normas para facilitar su comprensión)

UNE-EN 60034-28 (Diciembre 2013) “Métodos de ensayo para determinar las magnitudes de los esquemas del circuito equivalente para motores de inducción de jaula de ardilla de baja tensión”

3.3. Símbolos	33
4.3. Instrumentación.....	36
4.3.1. Aparatos de medida para magnitudes eléctricas, velocidad y frecuencia.....	36
4.3.2. Transformadores de medida.....	36
4.3.3. Medición de la temperatura	36
6. Procedimientos de ensayo.....	37
6.2. Medición de la resistencia entre fases del estátor en corriente continua	37
6.3. Ensayos de carga a la carga asignada.....	37
6.5. Ensayo en vacío.....	37
6.6.3. Ensayo de rotor bloqueado.....	38
7. Determinación de las magnitudes del motor	39
7.1. Generalidades.....	39
7.2. Resistencia del devanado del estátor R_s	39
7.3. Inductancia total del estátor $L_{ts} = L_m + L_s$	40
7.4. Resistencia equivalente de pérdidas en el hierro R_{fe}	41
7.4.1. Pérdidas constantes	41
7.4.2. Pérdidas de ventilación y de rozamiento.....	42
7.4.3. Pérdidas en el hierro.....	42
7.5. Inductancia de dispersión total L_σ	43
7.5.2. Corrección del desplazamiento de la corriente mediante cálculos	44
7.6.1. Inductancia de magnetización L_m y tensión U_m	45
7.7.1. Inductancias de dispersión del estátor y del rotor L_s y L'_r	46
7.8. Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada)	46
7.9. Resistencia de la jaula del rotor R'_r referida al devanado estatórico.....	47
7.10. Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro R_{fe}	50
Ejemplo de cálculo suministrado por la norma UNE EN 60034-28.....	51

UNE-EN 60034-2-1:2007. "Máquinas Eléctricas Rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos "

Introducción	55
5.7. Resistencia	56
5.7.1. Resistencia de ensayo.....	56
5.7.2. Temperatura del devanado.....	57
5.7.3. Corrección a la temperatura del fluido refrigerante de referencia.....	58
6.4.2.3. Pérdidas de rozamiento y de ventilación, pérdidas en el hierro	58
6.4.4.4. Método del circuito equivalente (máquinas de inducción).....	59
6.4.4.4.1. Generalidades.....	59
6.4.4.4.3. Ensayos a la frecuencia asignada.....	60
8.2.2.3. Pérdidas constantes.....	60
8.2.2.3.1. Generalidades.....	60
8.2.2.3.2. Pérdidas de rozamiento y ventilación	61
8.2.2.3.3. Pérdidas en el hierro	61
8.2.2.4.3. Pérdidas a partir del método del circuito equivalente	62
8.2.2.4.3.1. Valores que provienen de mediciones	62
8.2.2.4.3.2. Parámetros del circuito equivalente	63
8.2.2.4.3.3. Corrientes y pérdidas.....	66
Determinación del circuito equivalente.....	67

Capítulo nº 4. Resultados

4.1. Tablas resumen de datos obtenidos según norma UNE-EN 60034-28 70

4.1.1. Motor de 1,5 kW	70
4.1.1.1. Datos del motor	70
4.1.1.2. Datos del ensayo a rotor libre.....	70
4.1.1.3. Datos del ensayo a rotor bloqueado.....	71
4.1.1.4. Obtención de los parámetros del circuito equivalente.....	73
▪ Valores asignados	73
▪ Medida de la resistencia del estátor entre fases $R_{11,m}$	73
▪ Resistencia del devanado del estátor	73
▪ Inductancia total del estátor L_{ts}	73
▪ Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro	75
▪ Inductancia de dispersión total a partir del ensayo con rotor bloqueado	75
▪ Inductancia y tensión de magnetización, inductancia de dispersión del estátor y del rotor a partir de un ensayo con rotor bloqueado	76

▪ Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada) a partir de un ensayo con rotor bloqueado.....	78
▪ Resistencia de la jaula del rotor a partir de un ensayo de rotor bloqueado	78
▪ Resistencia de pérdidas en el hierro a partir de un ensayo con rotor bloqueado	78
4.1.2. Motor de 2,2 kW	80
4.1.2.1. Datos del motor	80
4.1.2.2. Datos del ensayo a rotor libre.....	80
4.1.2.3. Datos del ensayo a rotor bloqueado.....	81
4.1.2.4. Obtención de los parámetros del circuito equivalente.....	83
▪ Valores asignados	83
▪ Medida de la resistencia del estátor entre fases $R_{11,m}$	83
▪ Resistencia del devanado del estátor	83
▪ Inductancia total del estátor L_{ts}	83
▪ Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro	85
▪ Inductancia de dispersión total a partir del ensayo con rotor bloqueado	85
▪ Inductancia y tensión de magnetización, inductancia de dispersión del estátor y del rotor a partir de un ensayo con rotor bloqueado	86
▪ Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada) a partir de un ensayo con rotor bloqueado.....	88
▪ Resistencia de la jaula del rotor a partir de un ensayo de rotor bloqueado	88
▪ Resistencia de pérdidas en el hierro a partir de un ensayo con rotor bloqueado	88
4.1.3. Motor de 3 kW	90
4.1.3.1. Datos del motor	90
4.1.3.2. Datos del ensayo a rotor libre.....	90
4.1.3.3. Datos del ensayo a rotor bloqueado.....	91
4.1.3.4. Obtención de los parámetros del circuito equivalente.....	93
▪ Valores asignados	93
▪ Medida de la resistencia del estátor entre fases $R_{11,m}$	93
▪ Resistencia del devanado del estátor	93
▪ Inductancia total del estátor L_{ts}	93
▪ Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro	95
▪ Inductancia de dispersión total a partir del ensayo con rotor bloqueado	95
▪ Inductancia y tensión de magnetización, inductancia de dispersión del estátor y del rotor a partir de un ensayo con rotor bloqueado	96
▪ Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada) a partir de un ensayo con rotor bloqueado.....	98
▪ Resistencia de la jaula del rotor a partir de un ensayo de rotor bloqueado	98
▪ Resistencia de pérdidas en el hierro a partir de un ensayo con rotor bloqueado	98
4.2. Tablas resumen de datos obtenidos según UNE-EN 60034-2-1	100
4.2.1. Motor 1,5 KW.....	100
4.2.1.1. Datos del ensayo a rotor libre a tensión asignada (230 V)	100
4.2.1.2. Datos del ensayo a rotor bloqueado a intensidad asignada (3,3 A)	100
4.2.1.3. Parámetros del circuito equivalente	100
4.2.2. Motor 2,2 kW	101
4.2.2.1. Datos del ensayo a rotor libre a tensión asignada (230 V)	101
4.2.2.2. Datos del ensayo a rotor bloqueado a intensidad asignada (4,6 A)	101
4.2.2.3. Parámetros del circuito equivalente	101
4.2.3. Motor 3 kW	102

4.2.3.1.	Datos del ensayo a rotor libre a tensión asignada (230 V)	102
4.2.3.2.	Datos del ensayo a rotor bloqueado a intensidad asignada (6,3 A)	102
4.2.3.3.	Parámetros del circuito equivalente	102

Capítulo nº 5. Conclusiones

5.1.	<i>Comparación de datos entre las dos normas usadas</i>	<i>104</i>
5.1.1.	Motor de 1,5 kW	104
5.1.1.1.	Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-28	104
5.1.1.2.	Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-2-1	105
5.1.2.	Motor 2,2 kW	105
5.1.2.1.	Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-28	105
5.1.2.2.	Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-2-1	106
5.1.3.	Motor de 3 kW	106
5.1.3.1.	Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-28	106
5.1.3.2.	Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-2-1	107
5.2.	<i>Estimación de parámetros según Jesús Fraile Mora</i>	<i>107</i>
5.2.1.	Formulas según ensayo a rotor libre	107
5.2.2.	Formulas según ensayo a rotor bloqueado	109
5.2.3.	Resultados obtenidos	110
5.3.	<i>Evaluación de errores en la estimación de los parámetros</i>	<i>110</i>
5.4.	<i>Comparación entre el par producido y el indicado por el fabricante</i>	<i>112</i>
	<i>Bibliografía</i>	<i>114</i>

Nomenclatura

Nomenclatura capítulo nº 2

adc	Ejes ortogonales
$dq0$	Ejes de referencia
e_r	Fem inducida en la bobina del rotor (V)
e_s	Fem inducida en la bobina del estátor (V)
$E-$	Vector de campo eléctrico
$f'_r -$	Función general en el rotor referida al estátor
f_a-	Función general en el estátor
$f_{abc}-$	Función general en los ejes abc
f_{dq0}	Función general en los ejes dq0
f_r	Función general en el rotor
g	Espesor del entrehierro
i'_{ra}	Intensidad en el devanado del rotor referida al estátor (A)
i_{ra}	Intensidad de fase del rotor (A)
i_{sa}	Intensidad de fase del estátor (A)
L	Longitud del rotor (m)
J	Inercia ($kg \cdot m^2$)
L_{ra}	Inductancia del rotor (H)
L_{rarb}	Inductancia mutua del rotor (H)
L_{rl}	Inductancia de dispersión de la bobina del rotor (H)
L_{rm}	Inductancia magnetizante de la bobina del rotor (H)
L_{sa}	Inductancia del estátor (H)
L_{sarb}	Inductancia mutua del estátor-rotor (H)
L_{sasb}	Inductancia mutua del estátor (H)
L_{sl}	Inductancia de dispersión de la bobina del estátor (H)
L_{sm}	Inductancia magnetizante de la bobina del estátor (H)
L'	Inductancia referida al estátor (H)

N_r	Nº de espiras de la fase del rotor
n_s	Nº de espiras de la fase del estátor
r	Radio del rotor (m)
R_{ra}	Resistencia de fase del rotor (Ω)
R_{sa}	Resistencia de fase del estátor (Ω)
T_{res}	Par resistente (N*m)
T_e	Par electromagnético (N*m)
W_f	Energía almacenada en el campo magnético (W*h)
W_m	Energía mecánica (W*h)
β	Inducción electromagnética (T)
λ	Enlaces de flujo (Wb)
λ'	Enlaces de flujo del rotor referidos al estátor (Wb)
ω	Pulsación
ω_r	Velocidad angular del rotor (rad/s)
θ	Angulo de desfase
θ_{rm}	Desplazamiento angular del rotor
θ_r	Angulo eléctrico del rotor
ϕ_s	Flujo devanados del estátor
ϕ	Flujo devanados del rotor
ϵ_o	Constante permeabilidad (F/m)

Índice de Figuras

Figuras del Capítulo 2		Pág.
Figura nº 2.1.	Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción	14
Figura nº 2.2.	Esquema máquina de inducción trifásica	17
Figura nº 2.3	Circuito equivalente máquina de inducción trifásica	18
 Figuras del Capítulo 3		 Pág.
Figura nº 3.1.	Fuente de alimentación con tensión regulable	25
Figura nº 3.2.	Multímetro AMPROBE 33XR-A	25
Figura nº 3.3.	Vatímetro digital metrix PX110	26
Figura nº 3.4.	Multímetro Fluke 41B	26
Figura nº 3.5.	Conexión de montaje con transformador de intensidad	27
Figura nº 3.6.	Esquema de conexión ensayo a rotor libre	28
Figura nº 3.7.	Montaje del ensayo a rotor libre en el laboratorio de máquinas eléctricas	29
Figura nº 3.8.	Esquema de conexión ensayo a rotor bloqueado	30
Figura nº 3.9.	Montaje para ensayo a rotor bloqueado	31
Figura nº 3.10.	Detalle de la sargenta utilizada para bloquear el motor	31
Figura nº 3.11.	Dinamo-freno usada para el ensayo a plena carga	32
 Figuras del Capítulo 4		 Pág.
Figura nº 4.1.	Características típicas de la inductancia L en función de la intensidad I en el motor de 1,5 kW	74
Figura nº 4.2.	Características típicas de la inductancia L_{ts} en función de la tensión $U_{i,s=0}$ en el motor de 1,5 kW	74
Figura nº 4.3.	Características típicas de la inductancia $L_{t\sigma}$ en función de la intensidad I_s en el motor de 1,5 kW	76
Figura nº 4.4.	Características típicas de la inductancia L_m en función de la tensión U_m en el motor de 1,5 kW	77

Figura nº 4.5.	Características típicas de la inductancia $L_{\sigma s}$ en función de la intensidad I_m en el motor de 1,5 kW	77
Figura nº 4.6.	Características típicas de la inductancia $L'_{\sigma r}$ en función de la intensidad I_m en el motor de 1,5 kW	77
Figura nº 4.6.1	Impresión de pantalla hoja de cálculo utilizada en el TFG	79
Figura nº 4.7.	Características típicas de la inductancia L en función de la 84 intensidad I en el motor de 2,2 kW	
Figura nº 4.8.	Características típicas de la inductancia L_{ts} en función de la tensión $U_{i,s=0}$ en el motor de 2,2 kW	84
Figura nº 4.9.	Características típicas de la inductancia $L_{t\sigma}$ en función de la intensidad I_s en el motor de 2,2 kW	86
Figura nº 4.10.	Características típicas de la inductancia L_m en función de la tensión U_m en el motor de 2,2 kW	87
Figura nº 4.11.	Características típicas de la inductancia $L_{\sigma s}$ en función de la intensidad I_m en el motor de 2,2 kW	87
Figura nº 4.12.	Características típicas de la inductancia $L'_{\sigma r}$ en función de la intensidad I_m en el motor de 2,2 kW	87
Figura nº 4.12.1	Impresión de pantalla hoja de cálculo utilizada en el TFG	89
Figura nº 4.13.	Características típicas de la inductancia L en función de la 94 intensidad I en el motor de 3 kW	
Figura nº 4.14.	Características típicas de la inductancia L_{ts} en función de la tensión $U_{i,s=0}$ en el motor de 3 kW	94
Figura nº 4.15.	Características típicas de la inductancia $L_{t\sigma}$ en función de la intensidad I_s en el motor de 3 kW	96
Figura nº 4.16.	Características típicas de la inductancia L_m en función de la tensión U_m en el motor de 3 kW	97
Figura nº 4.17.	Características típicas de la inductancia $L_{\sigma s}$ en función de la intensidad I_m en el motor de 3 kW	97
Figura nº 4.18.	Características típicas de la inductancia $L'_{\sigma r}$ en función de la intensidad I_m en el motor de 3 kW	97
Figura nº 4.18.1	Impresión de pantalla hoja de cálculo utilizada en el TFG	99

Figuras del Capítulo 5	Pág.
Figura nº 5. Circuito equivalente en T	104
Figura nº 5.1. Circuito equivalente motor 1,5 kW según UNE EN 60034-28	104
Figura nº 5.2. Circuito equivalente motor 1,5 kW según UNE EN 60034-2-1	105
Figura nº 5.3. Circuito equivalente motor 2,2 kW según UNE EN 60034-28	105
Figura nº 5.4. Circuito equivalente motor 2,2 kW según UNE EN 60034-2-1	106
Figura nº 5.5. Circuito equivalente motor 3 kW según UNE EN 60034-28	106
Figura nº 5.6. Circuito equivalente motor 3 kW según UNE EN 60034-2-1	107

Índice de tablas

Lista de tablas Capítulo 3	Pág.
Tabla nº 4. Temperatura de referencia	57

Listas de tablas Capítulo 5	Pág.
Tabla nº 5.1. Tabla resumen parámetros según norma UNE EN 60034-28 del motor 1,5 kW	104
Tabla nº 5.2. Tabla resumen parámetros según norma UNE EN 60034-2-1 del motor 1,5 kW	105
Tabla nº 5.3. Tabla resumen parámetros según norma UNE EN 60034-28 del motor 2,2 kW	105
Tabla nº 5.4. Tabla resumen parámetros según norma UNE EN 60034-2-1 del motor 2,2 kW	106
Tabla nº 5.5. Tabla resumen parámetros según norma UNE EN 60034-28 del motor 3 kW	106
Tabla nº 5.6. Tabla resumen parámetros según norma UNE EN 60034-2-1 del motor 3 kW	107
Tabla nº 5.7. Estimación de parámetros para el motor de 1,5 kW según Jesús Fraile Mora	110
Tabla nº 5.8. Estimación de parámetros para el motor de 2,2 kW según Jesús Fraile Mora	110

Tabla nº 5.9.	Estimación de parámetros para el motor de 3 kW según Jesús Fraile Mora	110
Tabla nº 5.10.	Errores en los parámetros del motor de 1,5 kW	110
Tabla nº 5.11.	Errores en los parámetros del motor de 2,2 kW	111
Tabla nº 5.12.	Errores en los parámetros del motor de 3 kW	111
Tabla nº 5.13.	Par asignado para cada motor según ensayo de carga	113
Tabla nº 5.14.	Par asignado para cada motor según datos del fabricante	113

Capítulo nº 1

Objetivos y planteamiento del trabajo fin de grado

1.1. Introducción

El motor de inducción ha sido en estos últimos años la máquina rotativa más empleada a nivel industrial debido principalmente a su versatilidad. Su amplia utilización en una gran variedad de aplicaciones conlleva a que las investigaciones centren sus conocimientos en el control de la velocidad, el control del par, programación para ciclos de trabajo y la determinación de parámetros.

Gran cantidad de modelos de máquinas de inducción están disponibles y son utilizados para comprobar estrategias de control. Generalmente estos modelos son clasificados como estáticos y dinámicos, lineales y no lineales, parciales o integrales. La utilización de cada modelo está determinada por el tipo de análisis que se efectúa y por el tipo de respuesta esperada.

El clásico circuito del motor de inducción en régimen permanente es modelado con las resistencias y reactancias del rotor y del estátor, la rama de magnetización se modela solamente con su reactancia de magnetización. Dicho circuito es ampliamente utilizado en estado estacionario para determinar las características de la máquina.

En este trabajo fin de grado se modela la máquina de inducción trifásica obteniendo los parámetros del circuito equivalente mediante la aplicación de las normas (UNE, IEEE, CEI)

1.2. Objetivos y planteamiento del Trabajo Fin de Grado

El objetivo del presente trabajo es obtener los parámetros del circuito equivalente de varios motores de inducción trifásicos para ello haciendo uso de normas (UNE, IEE, CEI).

Para el estudio se ha obtenido en primer lugar el modelo matemático que responde al comportamiento de la máquina de inducción y sus respectivos sistemas de ecuaciones según el modelo de Krauser. Estas ecuaciones responden a aspectos físicos del estátor y rotor. Para trabajar con mayor comodidad todos los parámetros se refieren a uno de los devanados (normalmente el estátor), y se realiza la conversión del devanado rotórico al estátor. Esta conversión da lugar al circuito equivalente del motor referido al estátor.

Dado que el modelo equivalente de la máquina de inducción se puede obtener mediante técnicas tradicionales: ensayos, medidas de potencia o par entre otros. Nos permite tener una primera aproximación en los parámetros de la máquina de inducción mediante la resolución de las ecuaciones de comportamiento. En este trabajo se han obtenido los parámetros del circuito de la máquina de inducción trifásica mediante normas (UNE EN 60034-28, UNE EN 60034-2-1, IEEE std 112-2004) con la única diferencia que en la norma hace todos los cálculos con valores de línea y en el presente proyecto se ha llevado a cabo los cálculos por fase.

Diferentes autores determinan los parámetros de la maquina mediante diferentes técnicas, se citan algunas:

- Método de los elementos finitos: este método requiere de un conocimiento de las características constructivas físicas de la máquina, su dimensionado, composición y de un software especializado. Se requiere tener un amplio conocimiento para lograr interpretar correctamente los resultados.
- Método de respuesta transitoria: Este método es poco utilizado ya que requiere equipos especiales para la generación de la prueba.
- Datos de catálogo: Cuando se tienen los datos de catálogo del motor de inducción, se debe contar con metodologías que permitan la solución de un sistema de ecuaciones no lineales dada la complejidad del mismo.
- Utilización de algoritmos de identificación: Se resuelve con un método numérico que permita obtener varias ecuaciones no lineales partiendo de varias restricciones

El problema básico radica en que no existe una única técnica de estimación de parámetros ni un modelo único que represente el comportamiento de la máquina. Sin embargo, en el método utilizado en este trabajo se han obtenido valores bastante coherentes y el error cometido entre los valores de cada norma no son significativos.

Los ensayos se han realizado en tres motores de diferentes potencias asignadas: 1,5; 2,2 y 3 kW respectivamente, de acuerdo con las normas descritas anteriormente UNE EN 60034-28 “Ensayos para determinar las magnitudes de los esquemas del

circuito equivalente para motores de inducción de jaula de ardilla de baja tensión” y UNE EN 60034-2-1 “Métodos normalizados para la determinación de pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos”.

1.3. Estructura del Trabajo Fin de Grado

El presente trabajo final de grado se estructura en los siguientes capítulos:

Capítulo nº 1. Objetivos y planteamiento del Trabajo Fin de Grado. Pequeña introducción de la máquina de inducción y descripción de la base de estudio del presente trabajo.

Capítulo nº 2. Máquina de inducción trifásica. Pequeña introducción de las características principales de la máquina de inducción trifásica, así como el modelo matemático según Krauser que define la teoría electromagnética y adopta un modelo de circuito equivalente, a partir de una serie de ecuaciones según el sistema de referencia usado.

Capítulo nº 3. Normativa. Para este trabajo se han seguido las Normas UNE EN 60034-28 y la UNE EN 60034-2-1 que obtiene los parámetros del circuito equivalente según una serie de ensayos como es el ensayo a rotor libre o el ensayo a rotor bloqueado, para que al finalizar tengamos nuestro circuito equivalente en T.

Capítulo nº 4. Resultados. Se han ensayado tres motores con diferentes potencias asignadas: 1,5; 2,2 y 3 kW respectivamente, en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Superior de Jaén, cumpliendo con los requisitos descritos en las normas. Los ensayos realizados fueron: a rotor libre, a rotor bloqueado y en carga.

Capítulo nº 5. Conclusiones. Se han comparado los datos obtenidos para comprobar el error cometido entre ellos, para ello se ha tomado como referencia los datos obtenidos en la norma UNE EN 60034-28 y se ha calculado el error cometido con los datos calculados de la otra norma. También se han calculado los parámetros del circuito equivalente según Jesús Fraile Mora para cual es el error. Para finalizar

se ha comparado el par producido por los motores cuando se ensayó a plena carga con respecto al par indicado por el fabricante.

Capítulo nº 2

Máquina de inducción trifásica

2.1. Introducción al motor de inducción

Los motores asíncronos o de inducción son un tipo de motor de corriente alterna en el que la corriente eléctrica del rotor, necesaria para producir torsión, es inducida por inducción electromagnética del campo magnético de la bobina del estátor. Por lo tanto un motor de inducción no requiere una conmutación mecánica aparte de su misma excitación como en los universales, DC y motores grandes síncronos. El primer prototipo de motor eléctrico capaz de funcionar con corriente alterna fué desarrollado y construido por el ingeniero Nikola Tesla.

El motor asíncrono trifásico está formado por un rotor, que puede ser de dos tipos (jaula de ardilla o bobinado), y un estátor, en el que se encuentran las bobinas inductoras. Estas bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120° en el espacio. Según el Teorema de Ferraris, cuando por estas bobinas circula un sistema de corrientes trifásicas equilibradas, cuyo desfase en el tiempo es también de 120° , se induce un campo magnético giratorio que envuelve al rotor. Este campo magnético variable va a inducir una tensión en el rotor según la Ley de inducción de Faraday. La diferencia entre el motor a inducción y el motor universal es que en el motor a inducción el devanado del rotor no está conectado al circuito de excitación del motor sino que está eléctricamente aislado. Tiene barras de conducción en todo su largo, incrustadas en ranuras a distancias uniformes alrededor de la periferia. Las barras están conectadas con anillos a cada extremidad del rotor.

Entonces se da el efecto Laplace (o efecto motor): todo conductor por el que circula una corriente eléctrica, inmerso en un campo magnético experimenta una fuerza que lo tiende a poner en movimiento. Simultáneamente se da el efecto Faraday (o efecto generador): en todo conductor que se mueva en el seno de un campo magnético se induce una tensión.

El campo magnético giratorio, a velocidad de sincronismo, creado por el bobinado del estátor, corta los conductores del rotor, por lo que se genera una fuerza electromotriz de inducción.

La acción mutua del campo giratorio y las corrientes existentes en los conductores del rotor, originan una fuerza electrodinámica sobre dichos conductores del rotor, las cuales hacen girar el rotor del motor.

La diferencia entre las velocidades del rotor y el campo magnético se denomina deslizamiento o resbalamiento.

2.1.1 Características principales.

2.1.1.1. Deslizamiento.

Hay dos términos que se usan para definir el movimiento relativo del rotor y los campos magnéticos. Uno es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m$$

Donde:

n_{des} = velocidad de deslizamiento de la máquina

n_{sinc} = velocidad del campo magnético giratorio

n_m = velocidad mecánica del eje del motor

El otro concepto utilizado es el deslizamiento, que es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje, es decir que se define así:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} * 100$$

Al poner en funcionamiento el motor, el rotor está en estado estacionario, así que la velocidad es $n=0$ y el deslizamiento es unitario $s=1$, en cambio, cuando el rotor gira a una velocidad nominal $s=0$, todas las velocidades normales del motor caen dentro de estos dos límites.

Dependiendo del valor del deslizamiento, se distinguen tres zonas distintas que caracterizan tres modos de funcionamiento: motor, generador y freno.

El modo de funcionamiento más característico es el de motor y corresponde al rango de deslizamiento comprendido entre 0 y 1. Si se tiene en cuenta el campo de variación de s en el régimen motor se tiene:

- La potencia mecánica interna es positiva. Es decir, se transmite energía mecánica al eje.
- La potencia en el entrehierro es positiva, lo que indica un par electromagnético positivo.
- Si la potencia de entrehierro es positiva, quiere decir que se transfiere energía en el sentido estátor-rotor.

Cuando trabaja como generador corresponde a las velocidades superiores a la de sincronismo lo que comporta deslizamientos negativos. El motor de inducción funciona como generador recibiendo energía mecánica de un motor externo que gira a una velocidad superior a la del sincronismo, y entregando energía eléctrica a la red por el estátor.

En el régimen generador, al ser el deslizamiento negativo, se tiene:

- La potencia mecánica interna se hace negativa. La máquina absorbe potencia mecánica por el eje.
- La potencia en el entrehierro se hace negativa, por lo que el par electromagnético cambia de signo respecto al comportamiento como motor.
- Si la potencia en el entrehierro se hace negativa, la transferencia de energía se hace de rotor a estátor.

El régimen de frenado de una máquina asíncrona se produce para deslizamientos superiores a la unidad, lo que corresponde a velocidades negativas. En esta situación el rotor gira en sentido contrario al campo giratorio, de tal forma que la máquina recibe energía de la red y energía mecánica por el eje. Cuando s es mayor a 1 resulta:

- La resistencia de carga se hace negativa y por tanto también es negativa la potencia mecánica interna. La máquina recibe energía mecánica por el eje.
- La potencia de entrehierro es el cociente de dos cantidades negativas; por consiguiente la potencia es positiva y el par electromagnético es positivo.
- Si la potencia de entrehierro es positiva, quiere decir que se transfiere la energía en el sentido estátor-rotor. Por ello la potencia que se absorbe de la red es positiva.

Durante el período de frenado la máquina recibe energía mecánica por el eje y también energía eléctrica de la red. Este régimen de frenado se utiliza en la práctica cuando se desea parar rápidamente un motor. La maniobra se realiza invirtiendo dos fases de la alimentación, de forma que el campo giratorio pase súbitamente a girar en sentido contrario al del rotor.

2.1.1.2. Factor de Potencia

La ecuación para el factor de potencia sería:

$$\cos \varphi = \frac{P_L}{\sqrt{3} * V_L}$$

En la curva característica par- velocidad hay tres zonas diferenciadas donde el factor de potencia actúa de forma diferente.

En la primera zona que es la región de bajo deslizamiento, donde la reactancia del rotor es despreciable, el factor de potencia del rotor es aproximadamente unitario. En la segunda región de deslizamiento moderado, donde la reactancia del rotor tiene el mismo orden de magnitud que la resistencia del rotor, el factor de potencia comienza a disminuir. En la tercera región que se llama de alto deslizamiento, la carga aumenta y el aumento en la corriente del rotor no se percibe debido a la disminución en el factor de potencia en el rotor.

2.1.1.3. Corriente de arranque

Los motores de inducción se pueden poner en funcionamiento conectándolos a la línea de potencia. Pero no es lo más recomendado ya que la corriente de arranque requerida acusa un pico importante, que puede ser entre 5 y 7 veces la corriente nominal del motor, por lo que debe utilizarse en la práctica algún método para disminuir este pico, como aplicar una tensión reducida mediante arranque estrella-triángulo o mediante convertidores estáticos.

La corriente de arranque puede variar en forma amplia, depende de la potencia nominal del motor y de la efectividad de la resistencia del rotor en condiciones de arranque.

La corriente de arranque de un motor de inducción se puede reducir con un circuito de arranque, pero también reducirá el par de arranque del motor.

Cuando se reduce la corriente de arranque en proporción directa a la disminución del voltaje en los terminales, el par de arranque disminuye con el cuadrado del voltaje aplicado. Sólo se puede lograr una cierta reducción de la cantidad de corriente si el motor debe arrancar con una carga en su eje.

2.1.1.4. Momento de Inercia

El momento de inercia afecta directamente al arranque de la máquina, el cual es vencido gracias al gran par de arranque de los motores de inducción, dicho par es superior al par nominal en varias unidades. Pero cuanto mayor sea el momento de inercia, mayor será el par de arranque necesario y más tiempo tardará la máquina en alcanzar la velocidad nominal asignada y por tanto la corriente será elevada durante más tiempo.

Como el momento de inercia depende del peso del rotor, podemos decir que cuanto mayor sea el motor más elevado será el momento de inercia, la relación peso/momento de inercia es prácticamente una relación lineal.

2.1.1.5. Par de arranque y Par máximo

Hay un par máximo posible que el motor puede desarrollar. Este par, llamado par máximo o par de desviación, es dos o tres veces el par nominal a plena carga del motor. El par máximo se obtiene cuando la potencia en el entrehierro es máxima. Ya que cuando la potencia en el entrehierro es igual a la potencia consumida por el resistor R_2/s , el par máximo inducido se produce cuando la potencia consumida por este resistor sea máxima.

El deslizamiento del rotor para el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor.

Este par es proporcional al cuadrado del voltaje suministrado e inversamente al tamaño de las impedancias del estátor y de la reactancia del rotor, a pesar que el deslizamiento en el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor, el par máximo es independiente del valor de la resistencia del rotor.

El par de arranque del motor es un poco mayor al par a plena carga, por lo que este motor puede arrancar con cualquier carga que pueda alimentar a plena potencia.

En un motor de inducción, el par máximo en la curva será de 200% a 250% del par nominal a plena carga de máquina y el par de arranque (el par a velocidad cero) será de aproximadamente entre 1,1 y 1,5 veces el par nominal del motor.

2.1.1.6. Rendimiento

Como en cualquier otro dispositivo de transformación de la energía, existen unas pérdidas, de tal forma que solamente se entrega a la salida una parte de la energía absorbida en la entrada. El rendimiento o la eficacia de un motor vienen determinados por las pérdidas que se producen en la máquina. El rendimiento se define como el cociente entre la potencia útil y la potencia absorbida o total, de acuerdo con la expresión:

$$\eta = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia total}} = \frac{P_u}{P_T}$$

La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida de una máquina son las pérdidas que se presentan dentro de ella. Por lo tanto la ecuación se puede representar así:

$$\eta = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia útil} + \text{Potencia perdida}} = \frac{P_u}{P_u + P_p}$$

Las primeras pérdidas que se observan son las pérdidas I^2R en los devanados del estátor también llamadas las pérdidas en el cobre del estátor P_{cu} . Luego se pierde cierta cantidad de potencia por los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas de Foucault que aparecen en el material ferromagnético del núcleo, que conforman las pérdidas en el hierro.

La potencia restante pasa a través del entrehierro entre el estátor y el rotor. Una vez transferida dicha potencia una parte de ella se pierde I^2R a esta se le llama pérdidas en el cobre del rotor. Por último las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire P_{FVR} . La potencia restante es la salida del motor es decir la potencia de salida P_{sal} .

Mientras mayor sea la velocidad del motor de inducción, mayores serán las pérdidas por fricción o por rozamiento con el aire por lo tanto serán más pequeñas las pérdidas en el núcleo.

2.1.1.7. Pérdidas y diagrama de flujo de potencias

2.1.1.7.1. Balance de potencias

El circuito equivalente del motor de inducción presenta grandes similitudes con el circuito equivalente del transformador (asociando primario a estátor y secundario a rotor). La diferencia principal radica en que el rotor siempre está en cortocircuito para que el motor funcione (aparición de corrientes inducidas en el rotor de forma automática al disponer de un bobinado cerrado) y que el consumo en la resistencia de carga es, en realidad, la potencia mecánica desarrollada por el motor.

La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida del motor se muestra en el diagrama de flujo de potencia:

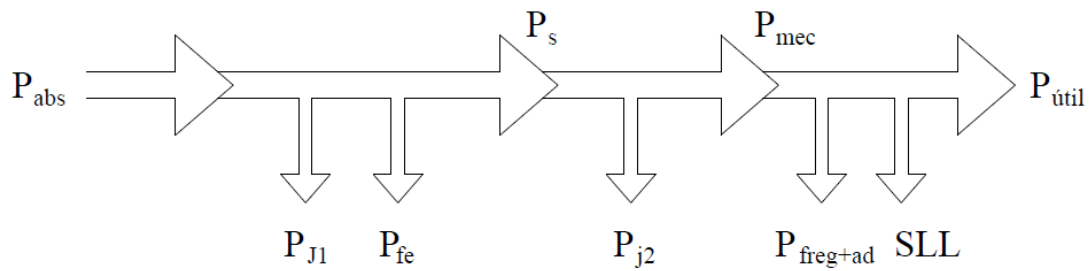


Figura nº 2.1. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción

Donde:

P_{abs} = Potencia absorbida por el motor (W)

P_{J1} = Pérdidas por efecto Joule en el estátor (W)

P_{fe} = Pérdidas en el hierro en el circuito magnético (W)

P_s =Potencia síncrona (W)

P_{j2} = Pérdidas por efecto Joule en el rotor (W)

P_{mec} = Potencia mecánica (W)

$P_{freg+ad}$ =Pérdidas por rozamiento+Pérdidas adicionales (W)

SLL = Pérdidas adicionales en carga (W)

$P_{útil}$ =Potencia útil en el eje del motor (W)

2.1.1.7.2. Ecuaciones de las potencias en el circuito

En un motor de inducción existe una transformación de energía eléctrica en mecánica, que se transmite desde el estátor al rotor, a través del entrehierro, y el proceso de conversión está ligado con unas pérdidas. La potencia que la máquina absorbe de la red, si U_f es la tensión aplicada por fase, I_f la corriente por fase y φ es el ángulo de factor de potencia, entre ambas magnitudes, tenemos la fórmula:

$$P_L = 3 * U_f * I_f * \cos \varphi$$

Hay una parte que se transforma en calor por efecto Joule en el estátor:

$$P_{cu} = 3 * R_1 * I_1^2$$

Y otra parte se pierde en el hierro. La suma de ambas pérdidas representa la disipación total en el estátor P_{P1} :

$$P_{P1} = P_{cu} + P_{Fe}$$

Las pérdidas en el hierro en el circuito magnético son:

$$P = 3 * \frac{U^2}{R_{fe}}$$

La potencia síncrona es:

$$P_s = 3 * \frac{R'_2}{s} * I_2'^2$$

La potencia mecánica es:

$$P_m = P_s * (1 - s)$$

La potencia de las pérdidas por rozamiento más adicionales:

$$P_{pr+adicionales} = P_{mec} + P_{\text{útil}}$$

A partir de estas fórmulas obtenemos la del rendimiento:

$$\eta = \frac{P_u}{P_T} = \frac{P_u}{P_u + P_{cu} + P_{Fe} + P_m}$$

2.2. Modelo matemático de la máquina de inducción trifásica según Krause

2.2.1. Ecuaciones de tensión en máquinas variables

En la distribución de los bobinados de dos polos de la máquina de inducción simétrica que se muestra en la Figura nº 2.1, los devanados del estátor son idénticos, distribuidos sinusoidalmente, desplazados 120° , con N_s vueltas equivalentes y resistencia R_s . Por otra parte, los devanados del rotor también serán considerados como tres devanados idénticos sinusoidalmente distribuidos, desplazados 120° , con N_r vueltas equivalentes y r_r resistencia. La dirección positiva del eje magnético de cada devanado se muestra en la Figura nº 2.1. Es importante señalar que la dirección positiva de los ejes magnéticos del devanado del estátor coincide con la dirección de f_{as} , f_{bs} , y f_{cs} .

Las ecuaciones de tensión en variables de la máquina se pueden expresar como:

$$v_{abcs} = r_s * i_{abcs} + p\lambda_{abcs} \quad (2.2.1-1)$$

$$v_{abcr} = r_r * i_{abcr} + p\lambda_{abcr} \quad (2.2.1-2)$$

Donde:

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (2.2.1-3)$$

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} \quad f_{br} \quad f_{cr}] \quad (2.2.1-4)$$

En las ecuaciones anteriores el subíndice s denota variables y parámetros asociados con los circuitos del estátor, y el subíndice r denota variables y parámetros asociados con los circuitos del rotor. Ambos R_s y R_r son matrices diagonales, cada uno con igual elementos distintos de cero. Para un sistema magnéticamente lineal, los vínculos de flujo pueden estar expresado como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.2.1-5)$$

Las inductancias del bobinado del estátor se definen como:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.2.1-6)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.2.1-7)$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.2.1-8)$$

En las ecuaciones de inductancia anteriores, L_{ls} y L_{ms} son, respectivamente, las inductancias de fuga y de magnetización de los devanados del estátor; L_{lr} y L_{mr} son para el devanado del rotor.

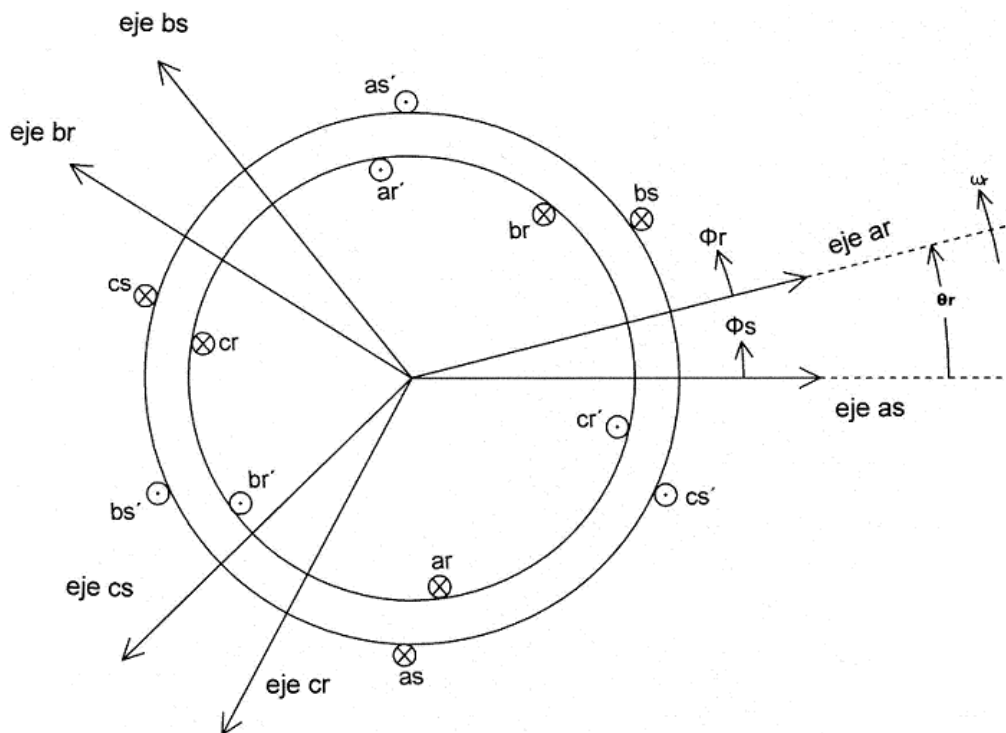


Figura nº 2.2 Esquema máquina de inducción trifásica

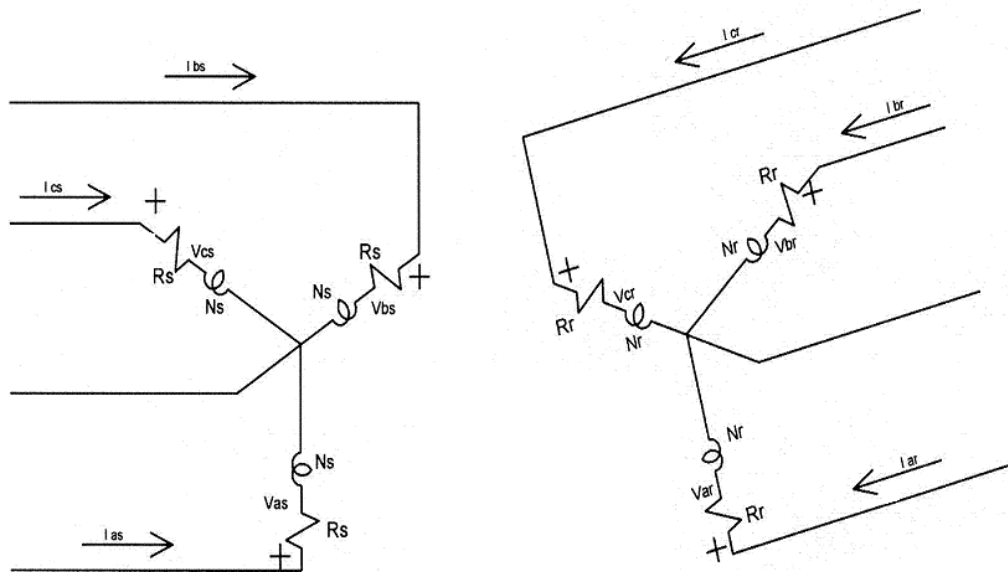


Figura nº 2.3 Circuito equivalente máquina de inducción trifásica

La inductancia L_{sr} es la amplitud de las inductancias mutuas entre bobinados del estátor y del rotor.

La mayoría de las máquinas de inducción no están equipadas con el bobinado del rotor enrollado. En cambio, la corriente fluye por las barras de cobre o de aluminio que están uniformemente distribuidas y que están incrustadas en un material ferromagnético con todos los finales de las barras en un anillo común para cada extremo del rotor. Este tipo de configuración de rotor se conoce como un rotor de jaula de ardilla. Puede parecer a primera vista que la inductancia mutua entre un rotor bobinado uniformemente y uno bobinado sinusoidalmente en el estátor no sería de la forma dada por (2.2.1-8). Sin embargo, en la mayoría de los casos, un devanado distribuido uniformemente está debidamente descrita por su componente sinusoidal fundamental y está representado por el equivalente a un arrollamiento trifásico. En general, esta representación consta de un bobinado equivalente por fase; sin embargo, la construcción de rotor de algunas máquinas es tal que su rendimiento es más preciso si se describe mediante la representación de cada fase con dos devanados equivalentes conectados en paralelo. Este tipo de máquina se refiere comúnmente como una máquina con rotor de doble jaula.

Otra consideración, es que en la máquina, los conductores del rotor están normalmente curvados. Es decir, los conductores no se colocan en el plano del eje de rotación del rotor. En lugar de ello, los conductores están doblados ligeramente con el eje de rotación. Al expresar las ecuaciones de tensión de la máquina de forma variable, es conveniente referirse a todas las variables del rotor para los devanados del estátor por sus relaciones de transformación apropiadas:

$$i'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} i_{abcr} \quad (2.2.1-9)$$

$$v'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} v_{abcr} \quad (2.2.1-10)$$

$$\lambda'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abcr} \quad (2.2.1-11)$$

Las inductancias de magnetización y las mutuas están asociadas con el mismo flujo magnético; Por lo tanto, L_{ms} , L_{mr} , y L_{sr} están relacionados. En particular:

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (2.2.1-12)$$

Por lo tanto, vamos a definir:

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.2.1-13)$$

También L_{mr} puede expresarse como:

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2 L_{ms} \quad (2.2.1-14)$$

y si sustituimos:

$$L'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_r \quad (2.2.1-15)$$

Entonces a partir de (2.2.1-7) obtenemos:

$$L'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.2.1-16)$$

Donde:

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{lr} \quad (2.2.1-17)$$

Las uniones de flujo ahora pueden ser expresados como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.2.1-18)$$

Las ecuaciones de voltaje expresadas en términos de variables de la máquina referidas al devanado del estátor ahora se pueden escribir como:

$$\begin{bmatrix} v_{abcs} \\ v'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ p(L'_{sr})^T & r'_r + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.2.1-19)$$

Donde:

$$r'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 r_r \quad (2.2.1-20)$$

2.2.2. Ecuaciones de par en máquinas variables

La evaluación de la energía almacenada en el campo de acoplamiento produce la expresión para la energía almacenada en un sistema magnético lineal. Está claro que la energía almacenada en las inductancias de fuga no es una parte de la energía almacenada en el campo de acoplamiento. Así, la energía almacenada en el campo de acoplamiento puede ser escrito como:

$$\begin{aligned} W_f = & \frac{1}{2} (i_{abcs})^T (L_s - L_{ls} I) i_{abcs} + (i_{abcs})^T L'_{sr} i'_{abcr} \\ & + \frac{1}{2} (i'_{abcr})^T (L'_r - L'_{lr} I) i'_{abcr} \end{aligned} \quad (2.2.2-1)$$

Donde I es la matriz identidad. Antes de expresar el par electromagnético, es necesario modificar las expresiones dadas en una máquina de P polos. El cambio de energía mecánica en un sistema de rotación con una entrada mecánica puede ser escrito como:

$$dW_m = -T_e d\theta_{rm} \quad (2.2.2-2)$$

Donde T_e es el par electromagnético positivo por acción del motor (par de salida) y θ_{rm} es el desplazamiento angular real del rotor. El flujo, corrientes, W_f , W_c se expresan como funciones del desplazamiento angular θ_r . Porque:

$$\theta_r = \left(\frac{P}{2}\right) \theta_{rm} \quad (2.2.2-3)$$

Donde P es el número de polos de la máquina, entonces:

$$dW_m = -T_e \left(\frac{2}{P}\right) d\theta_r \quad (2.2.2-4)$$

Por lo tanto para tener en cuenta una máquina P polos todos los términos en el lado derecho debe ser multiplicado por $P/2$. Debido $W_f = W_c$, el par electromagnético puede ser evaluado a partir de:

$$T_e(i_j, \theta_r) = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{\partial W_c(i_j, \theta_r)}{\partial \theta_r} \quad (2.2.2-5)$$

La forma abreviada, también se utiliza aquí para las corrientes. Porque L_s y L_r no son funciones de θ_r , sustituyendo W_f a partir de (2.2.2-1) en (2.2.2-5) se obtiene el par electromagnético en Newton • metros ($N \cdot m$):

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) (i_{abcs})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{sr}] i'_{abcr} \quad (2.2.2-6)$$

En forma expandida, (2.2.2-6) se convierte en:

$$T_e = -\left(\frac{P}{2}\right) L_{ms} \left\{ \left[i_{as} \left(i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{cr} \right) + i_{bs} \left(i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{cr} \right) + i_{cs} \left(i'_{cr} - \frac{1}{2} i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{ar} \right) \right] \sin \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} [i_{as} (i'_{br} - i'_{cr}) + i_{bs} (i'_{ar} - i'_{br})] \cos \theta_r \right\} \quad (2.2.2-7)$$

El par y la velocidad del rotor están relacionados por:

$$T_e = J \left(\frac{2}{p} \right) p \omega_r + T_L \quad (2.2.2-8)$$

Donde J es la inercia del rotor y en algunos casos la carga conectada. El primer término en el lado derecho es el par de inercia. En (2.2.2-8) las unidades de J son (kg • m²) o (J • s²). A menudo se da la inercia como una cantidad llamada W_{R2} expresa en unidades de (lbm - ft²). El par de carga T_L es positiva para una carga de par en el eje de la máquina de inducción.

Capítulo nº 3

NORMATIVA

3.1. Obtención de los parámetros del circuito equivalente, en los motores de inducción de jaula de ardilla trifásicos de baja tensión.

3.2. Introducción

Para obtener los parámetros característicos del circuito equivalente en motores de jaula de ardilla trifásicos, se han llevado a cabo los ensayos descritos en la norma UNE-EN 60034-28 de Diciembre del 2013 (Máquinas eléctricas rotativas. Parte 28: Métodos de ensayo para determinar las magnitudes de los esquemas del circuito equivalente para motores de inducción de jaula de ardilla trifásicos de baja tensión. Correspondencia con la norma internacional IEC 60034-28:2012) y la norma UNE-EN 60034-2-1 de Octubre del 2009 (Máquinas eléctricas rotativas: Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos).

Se ha realizado el ensayo a tres motores trifásicos de inducción con diferentes potencias asignadas: 1,5 kW, 2.2 kW y 3 kW respectivamente. En todos los ensayos descritos en el presente proyecto se han tomado valores por fase y así como valores de tensión, intensidad, potencia y factor de potencia.

3.1.2. Equipos de medida utilizados

Para la realización de los diferentes ensayos descritos en las normas anteriormente citadas, se ha dispuesto de los siguientes equipos de medida:

Fuente de alimentación trifásica con tensión regulable:

Para la alimentación de los distintos motores de inducción trifásicos se ha utilizado esta fuente de tensión regulable con las siguientes características:

Tensiones:

- Variable de CA: 3 x 0 - 430 V, 5 A

3 x 0 - 240 V, 8 A

- Fija de CA: 3 x 380 V + N, 16 A

3 x 220 V, 8 A

- Variable de CC: 0 - 240 V, 10 A

0 - 225 V, 1 A

- Fija de CC: 220 V, 10 A

Alimentación: 3 x 380 V + N, 50/60 Hz

Disponibile también para tensión de alimentación de tres fases de 220 V



Figura nº 3.1. Fuente de tensión regulable

Multímetro:



Utilizado para la medición de intensidades y tensiones.
Con rango de tensión hasta 1000 V y rango de intensidad
hasta 10 A

Figura nº 3.2. Multímetro AMPROBE 33XR-A

Vatímetro digital:



Utilizado para obtener los valores de potencia y factor de potencia para cada ensayo. El vatímetro tiene un rango de tensiones hasta 600 V y una intensidad de hasta 10 A

Figura nº 3.3. Vatímetro digital metrix PX110

Multímetro Fluke 41B:



Utilizado para los ensayos que superaban los 10 A y como consecuencia no se podía utilizar el multímetro descrito anteriormente, por ello se usaba este multímetro que cuenta con una pinza amperimétrica con un rango de intensidad de hasta 1000 A

Figura nº 3.4. Multímetro Fluke 41B

Termómetro de contacto y sonda de temperatura:

Utilizados para controlar la temperatura del motor después de cada ensayo y para medir la temperatura ambiente del laboratorio

Transformador trifásico:

Este transformador se ha utilizado para realizar un ensayo que requería suministrar una intensidad de más de 8 A, que es lo que nos suministraba la fuente de tensión regulable, con lo cual se colocó este transformador entre la fuente de tensión y el motor, y gracias a la intensidad que circulaba por el secundario del transformador se consiguió llegar a la intensidad requerida. Sus características son; Potencia: 5 KVA. Primario: 400 V – 7.19 A. Secundario: 230 V - 12.55 A

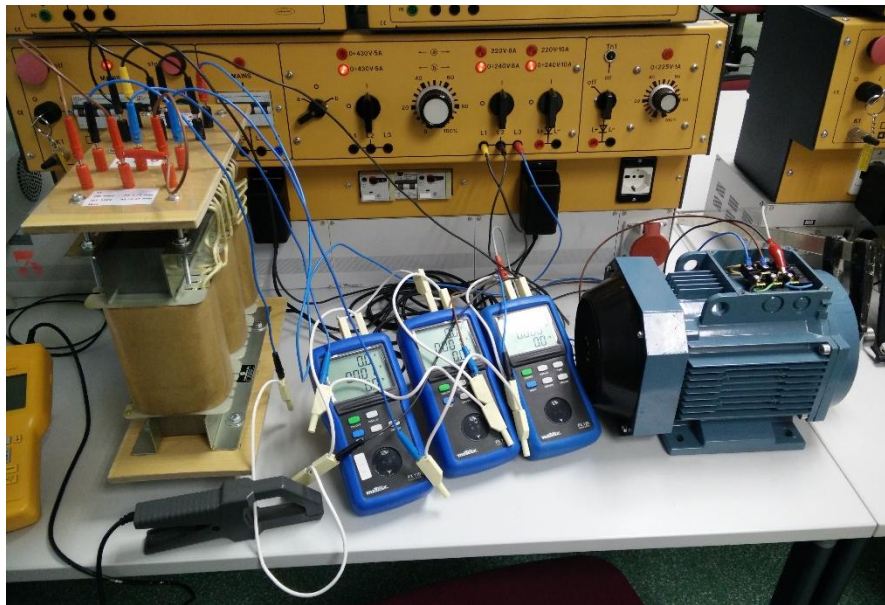


Figura nº 3.5. Conexión de montaje con transformador de intensidad

3.1.3. Ensayos realizados

Para la elaboración del presente proyecto han sido necesarios realizar una serie de ensayos tal y como se indica en las normas citadas más adelante. Los ensayos se han realizado en el laboratorio de máquinas eléctricas del edificio A3 de la universidad de Jaén. Son los siguientes:

3.1.3.1. Ensayo a rotor libre

Para la elaboración de este ensayo se ha conectado el rotor del motor en estrella (el neutro accesible se ha usado para la conexión de los vatímetros) y tres vatímetros para medir los valores de tensión, intensidad, potencias y factor de potencia, teniendo en cuenta que como estamos a rotor libre, el motor tiene que estar desacoplado a cualquier carga, y con un deslizamiento lo mas próximo posible a 0 (sin juntas ni dispositivos que causen rozamientos adicionales), para ello seguiremos el siguiente esquema de conexión.

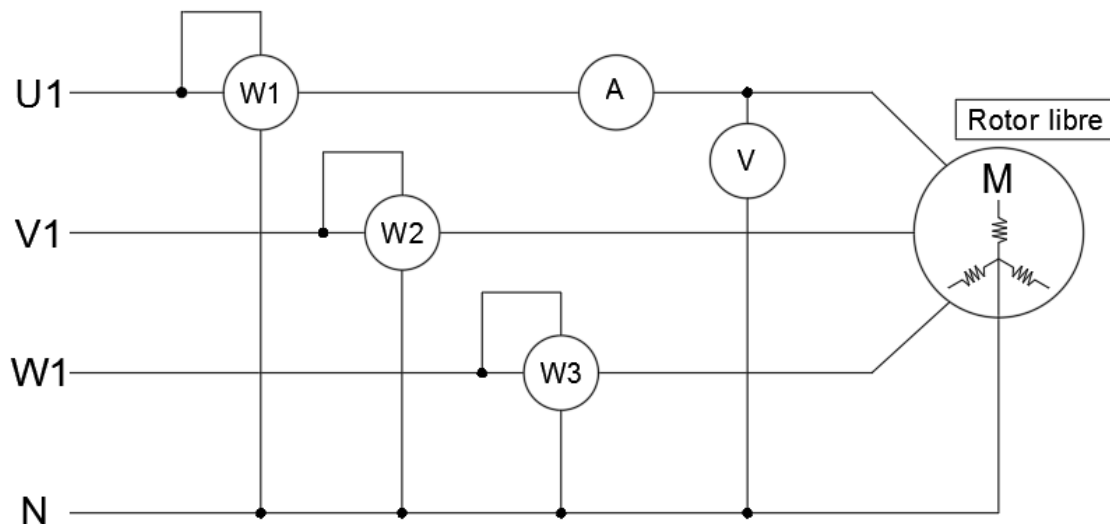


Figura nº 3.6. Esquema de conexión ensayo a rotor libre

Una vez todo conectado se procede a conectar la fuente de tensión de frecuencia asignada y de forma ascendente se le van dando valores de tensión equidistantes entre unos valores y otros, teniendo en cuenta que como máximo debe ser un 110%

de la tensión asignada del motor y sin superar la tensión que daría lugar a una intensidad en vacío mayor al 150 %, y la tensión mínima deberá ser un 20% de la tensión asignada. Tomando 10 valores de tensión diferentes y teniendo en cuenta que uno de los valores registrados tiene que ser el de la tensión asignada del motor. Una vez realizado el ensayo se medirá la temperatura del devanado.

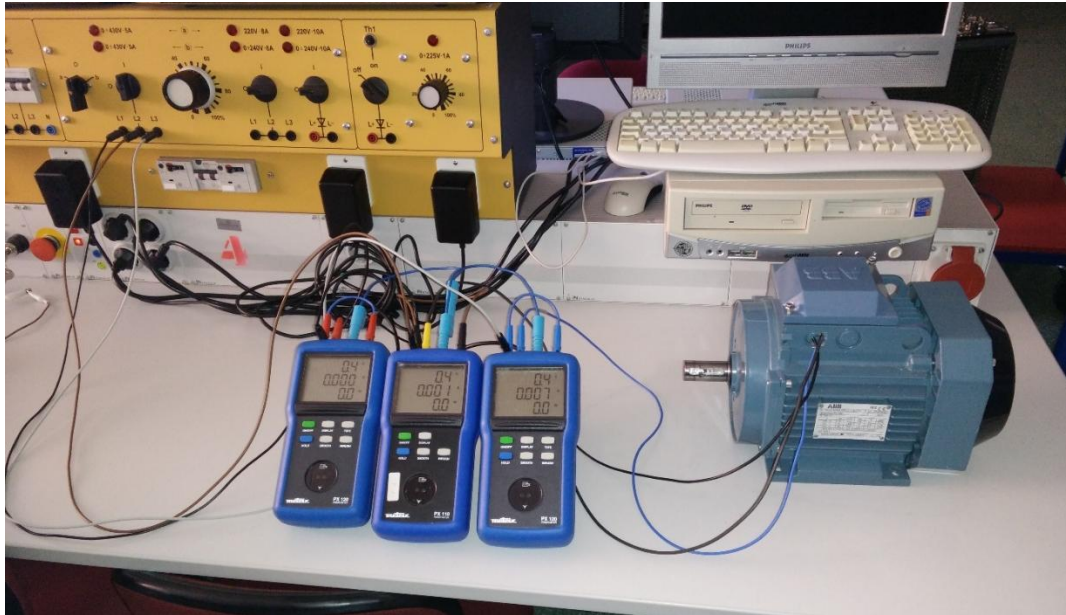


Figura nº 3.7. Montaje del ensayo a rotor libre en el laboratorio de máquinas eléctricas

3.1.3.2. Ensayo a rotor bloqueado

Para la elaboración de este ensayo se ha conectado el rotor del motor en estrella y tres vatímetros para medir los valores de tensión, intensidad, potencia y factor de potencia, igual que en el caso anterior, pero esta vez el rotor tiene que estar bloqueado. Para ello se ha usado una sargenta de forma que el rotor no se movía (figura nº 3.10), de esta forma tendremos que nuestro deslizamiento es 1. Para ello seguiremos el siguiente esquema de conexión.

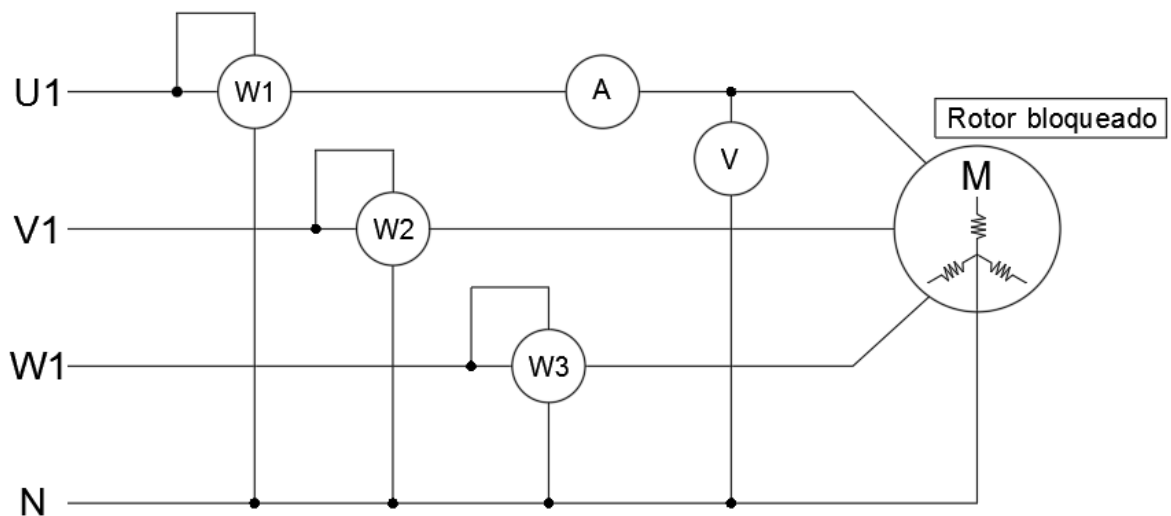


Figura nº 3.8. Esquema de conexión ensayo a rotor bloqueado

Una vez todo conectado se procede a conectar la fuente de tensión de frecuencia asignada y de forma ascendente se le van dando valores de tensión equidistantes entre unos valores y otros, teniendo en cuenta que vamos incrementando la tensión hasta que la intensidad sea 1.5 veces la intensidad asignada. Con el motor de 3 kW cuya intensidad asignada de 6.3 A, se necesitaba una intensidad de 9.45 A, como la fuente de tensión regulable solo podía suministrar hasta 8 A, se decidió acoplar un transformador para sacar de su secundario una intensidad mayor y así poder realizar el ensayo. No obstante, como no se sabía el error cometido en la medida ya que en el transformador se producirían unas pérdidas, se extrapolaron estos últimos datos según los obtenidos con la fuente de tensión regulable para comprobar el error cometido y este era muy bajo con lo cual se dejó el valor obtenido gracias al acoplamiento del transformador.

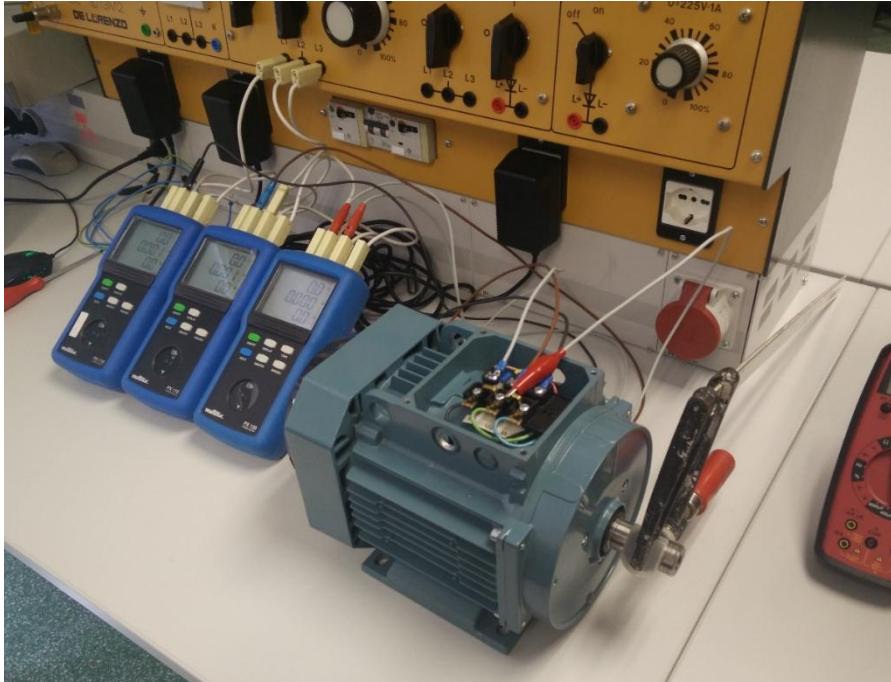


Figura nº 3.9. Montaje para ensayo a rotor bloqueado

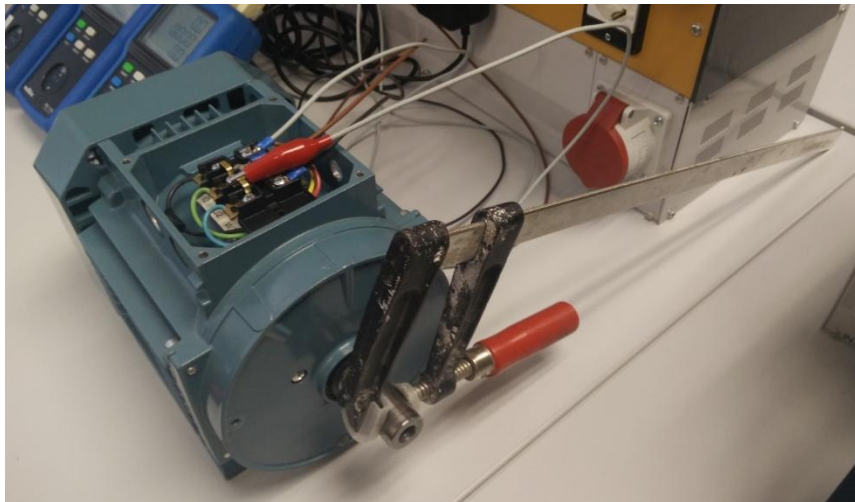


Figura nº 3.10. Detalle de la sargenta utilizada para bloquear el rotor

3.1.3.3. Ensayo a plena carga

En el ensayo en carga se acoplaron los motores a una dinamo freno de potencia 5 kW, de forma que se pudo analizar bajo diferentes condiciones de carga. Fruto de los ensayos realizados en diferentes condiciones y repetidos un amplio número de veces, se comprobó como los datos que daban eran practicamente similares a los parámetros que el fabricante nos da en el catálogo, las pequeñas fluctuaciones

pueden ser producidas por el tipo de banco usado. Con lo cual se registró un valor de tensión, de intensidad, de potencia, de factor de potencia y de velocidad de sincronismo, que son las de plena carga.



Figura nº 3.11. Dinamo-freno usada para el ensayo a plena carga

UNE-EN 60034-28 “Métodos de ensayo para determinar las magnitudes de los esquemas del circuito equivalente para motores de inducción de jaula de ardilla de baja tensión” (se mantiene la numeración de la norma original).

3.3. Símbolos

$\cos \phi$ es el factor de potencia

$\cos \phi_N$ es el factor de potencia asignado

f es la frecuencia de alimentación del estátor, Hz

f_N es la frecuencia asignada, s^{-1}

h es la altura de la barra de los conductores del rotor, m

H es el tamaño de la carcasa de acuerdo con la Norma IEC 60072-1 (altura de eje mm)

I_s es la intensidad de fase del estátor, A

I_r' es la intensidad del rotor, A

I_m es la intensidad de magnetización, A

I_N es la intensidad asignada del estátor, A

k_i es el factor de efecto pelicular para las inductancias

k_r es la inversa del coeficiente de temperatura de la resistencia a 0 °C del material conductor del rotor

k_s es la inversa del coeficiente de temperatura de la resistencia a 0 °C del material conductor del estátor

k_σ es la relación entre las inductancias de dispersión del estátor y del rotor

L_m es la inductancia magnetizante, H

$L_{\sigma s}$ es la inductancia de dispersión del estátor, H

$L'_{\sigma r}$ es la inductancia de dispersión del rotor, H

$L_{t\sigma}$ es la inductancia de dispersión total, $(= L_s + L'_r)$, H

$L_{\sigma a}$ es la inductancia de dispersión total sin considerar el efecto pelicular, H

L_{ts} es la inductancia total del estátor, $(= L_m + L_s)$, H

L'_{tr} es la inductancia total del rotor, $(= L_m + L'_r)$, H

n es la velocidad de funcionamiento, s^{-1}

n_N es la velocidad asignada, s^{-1}

n_{syn} es la velocidad síncrona asignada, min^{-1}

p es el número de pares de polos

P_s es la potencia eléctrica de entrada, W

P_{2N} es la potencia mecánica de salida, W

P_k son las pérdidas constantes, W

P_{fw} son las pérdidas por rozamiento y por ventilación, W

P_{fe} son las pérdidas en el hierro, W

R es la resistencia de línea, Ω

R_{fe} es la resistencia de pérdidas en el hierro del circuito equivalente, Ω

$R_{ll,m}$ es la resistencia entre fases del estátor a la temperatura inicial de los devanados, Ω

$R_{s,25}$ resistencia de fase del estátor corregida a una temperatura de 25° C, Ω

R'_r es la resistencia de la jaula del rotor, Ω

$R'_{r,25}$ resistencia del rotor corregida a una temperatura ambiente de 25° C, Ω

$R'_{r,m}$ es la resistencia del rotor a la temperatura inicial del devanado, Ω

s es el deslizamiento, en valores por unidad respecto a la velocidad síncrona

s_N es el deslizamiento asignado

U es la tensión en los bornes del estátor, V

U_s es la tensión de fase del estátor, V

U_m es la caída de tensión en la inductancia de magnetización, V

U_N es la tensión en bornes asignada, V

X_m es la reactancia magnetizante ($= 2\pi f_1 \cdot L_m$), Ω

$X_{\sigma s}$ es la reactancia de dispersión del estátor ($= 2\pi f_1 \cdot L_s$), Ω

$X'_{\sigma r}$ es la reactancia de dispersión del rotor ($= 2\pi f_1 \cdot L'_r$), Ω

X_{σ} es la reactancia total de dispersión ($= 2\pi f_1 \cdot L_{\sigma}$), Ω

$X_{\sigma a}$ reactancia total de dispersión sin efecto pelicular ($= 2\pi f_1 \cdot L_{\sigma a}$), Ω

X_{ts} es la reactancia total del estátor ($= 2\pi f_1 \cdot L_{ts}$), Ω

X'_{tr} es la reactancia total del rotor ($= 2\pi f_1 \cdot L'_{tr}$), Ω

Z es la impedancia del motor, Ω

γ_r es la conductividad de los conductores del rotor, S/m (para las barras del rotor de cobre utilizar $56 \cdot 10^6$ S/m, para las barras del rotor de aluminio utilizar $33 \cdot 10^6$ S/m excepto si se especifica otra cosa)

θ_0 es la temperatura del devanado frío en la medición de la resistencia inicial, °C

θ_L es la temperatura del devanado al final del ensayo térmico en carga, °C

θ_{NL} es la temperatura del devanado al final del ensayo térmico en vacío, °C

ξ es el factor de desplazamiento de corriente de los conductores del rotor

4.3. Instrumentación

4.3.1. Aparatos de medida para magnitudes eléctricas, velocidad y frecuencia

Los aparatos de medida deben ser de clase de precisión 0,5 o mejor de acuerdo con la Norma IEC 60051-1. Sin embargo, la clase de precisión para las medidas de resistencia debe ser 0,1.

Puesto que la precisión de los aparatos suele expresarse generalmente como un porcentaje del fondo de escala, el alcance de la medida del aparato elegido debe ser tan bajo como sea posible.

4.3.2. Transformadores de medida

Los transformadores de medida debe en ser de clase de precisión 0,2 de acuerdo con la Norma IEC 60044.

4.3.3. Medición de la temperatura

La precisión de los aparatos de medida utilizados para la medición de temperaturas debe ser ± 1 °C.

6. Procedimientos de ensayo

6.2. Medición de la resistencia entre fases del estátor en corriente continúa

Cuando se mide la resistencia, la temperatura del devanado no debe diferir de la del refrigerante en más de 2 K.

Se mide y se registra la R_{llm} . La resistencia se debe tomar como el valor medio de las mediciones de las tres fases. Se mide y se registra la temperatura del devanado θ_0 de acuerdo con el apartado 8.6.2 de la Norma IEC 60034-1:2010.

6.3. Ensayos de carga a la carga asignada

Antes de comenzar a registrar datos para este ensayo, la temperatura del devanado del estátor debe estar dentro de un margen de 2 K de la temperatura obtenida en un ensayo térmico a la carga asignada (véase la Norma IEC 60034-1).

Se aplica la tensión asignada a la frecuencia asignada en los bornes. Se incrementa la carga hasta que la intensidad I sea igual a la intensidad asignada I_N .

Se miden y registran U , I , P_s y n . Se mide y registra la temperatura del devanado θ_L de acuerdo con el apartado 8.6.2 de la Norma IEC 60034-1:2010. La primera lectura de la resistencia se debe realizar dentro del tiempo especificado en la tabla 5 de la Norma IEC 60034-1:2010.

6.5. Ensayo en vacío

El ensayo en vacío debe realizarse después del ensayo en carga. Desacoplar el motor de cualquier carga o de otra máquina. Hacer funcionar el motor sin carga hasta que las pérdidas en vacío se hayan estabilizado.

Este ensayo debería realizarse con un deslizamiento lo más próximo posible a cero. Por tanto, deberían retirarse, en su caso, juntas u otros dispositivos que causen rozamientos adicionales.

Mediante el ajuste de la tensión de alimentación a la frecuencia asignada, se miden y registran U , I y P_s para al menos 10 valores de tensión.

La tensión más elevada debe seleccionarse de acuerdo con las posibilidades del laboratorio. Sin embargo, debe ser al menos un 110% de la tensión asignada del motor y no superar la tensión que daría lugar a una intensidad en vacío mayor del 150% de la intensidad asignada.

La tensión más baja debe ser aproximadamente un 20% de la tensión asignada. Sin embargo no debe bajar del valor para el cual una nueva reducción de tensión produce un aumento de la intensidad.

Una de las tensiones de ensayo debe ser la tensión asignada de la máquina.

El ensayo se debe realizar lo más rápidamente posible tomando las lecturas en orden decreciente de la tensión.

Después del ensayo, se mide y se registra la temperatura del devanado θ_{NL} de acuerdo con el apartado 8.6.2 de la Norma IEC 60034-1:2010. La primera lectura de resistencia debe tomarse dentro del tiempo especificado en la tabla 5 de la Norma IEC 60034-1:2010.

6.6.3. Ensayo de rotor bloqueado

Se bloquea el rotor y se aplica una tensión reducida de frecuencia asignada $f=f_N$ en los bornes del motor. El deslizamiento es entonces 1. Se incrementa la tensión hasta que la intensidad I sea 1,5 veces la intensidad asignada I_N , como máximo.

El ritmo de calentamiento de las barras del rotor de las máquinas de 2 polos puede ser muy elevado. En estos casos, para evitar la destrucción del rotor, se recomienda que la máxima intensidad sea 1.25 veces la intensidad asignada.

Se miden y registran U , I y P_s para al menos 10 valores de intensidad aproximadamente equidistantes entre el 150% y el 10% de la intensidad asignada I_N , incluyendo una lectura a la intensidad asignada.

Se recomienda que las intensidades utilizadas en este ensayo coincidan lo mejor posible con los valores utilizados en (6.5). El ensayo debe realizarse tan rápidamente como sea posible con las lecturas hechas en orden decreciente de la tensión y la intensidad.

7. Determinación de las magnitudes del motor

7.1. Generalidades

El diagrama del circuito equivalente en T es normativo para los motores a los que se refiere esta norma.

Las resistencias están corregidas a una temperatura ambiente de 25 °C. Estas resistencias deben convertirse a la temperatura real del motor, antes de la aplicación de los valores.

Sin embargo, la resistencia equivalente de pérdidas en el hierro R_{fe} no debe corregirse por temperatura, pero sí por frecuencia cuando se apliquen frecuencias distintas de la frecuencia asignada.

7.2. Resistencia del devanado del estátor R_s

La resistencia del devanado del estátor R_s se determina mediante la resistencia entre fases medida $R_{ll,m}$ (véase en 6.2), corregida a la temperatura del devanado de 25 °C.

- Devanados conectados en estrella:

$$R_{s,25} = \frac{1}{2} \cdot R_{ll,m} \cdot \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_o}$$

- Devanados conectados en triángulo:

$$R_{s,25} = \frac{3}{2} \cdot R_{ll,m} \cdot \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_o}$$

7.3. Inductancia total del estátor $L_{ts} = L_m + L_s$

Con $s = 0$, la resistencia equivalente del rotor R_r/s se hace infinita y por tanto la parte reactiva de la impedancia medida es debida únicamente a la conexión serie de las dos inductancias.

En este caso, la intensidad de línea I es igual a la intensidad de magnetización I_m .

Para cada una de los puntos medidos en vacío (6.5).

Se determinan la impedancia del motor y el factor de potencia:

- En el caso de devanados conectados en estrella:

$$Z_{s=0} = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

- En el caso de devanados conectados en triángulo:

$$Z_{s=0} = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Se determina el factor de potencia:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Se determina la resistencia:

$$R_{s=0} = Z_{s=0} \cdot \cos \varphi$$

Se determina la intensidad de magnetización:

- En el caso de devanados conectados en estrella:

$$I_m = I$$

- en el caso de devanados conectados en triángulo:

$$I_m = I / \sqrt{3}$$

Se determina la reactancia total del estátor:

$$X_{ts} = \sqrt{Z_{s=0}^2 - R_{s=0}^2}$$

Se determina la inductancia total del estátor:

$$L_{ts} = \frac{X_{ts}}{2\pi \cdot f_N}$$

Se representan los valores de L_{ts} en función de los valores de I_m .

Determinar la tensión interna de la máquina:

- En el caso de devanados en estrella:

$$U_{i,s=0} = \sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{3}} - R_{s=0} * I_m * \cos \varphi\right)^2 + \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} * R_{s=0} * I_m\right)^2}$$

- En el caso de devanados en triángulo:

$$U_{i,s=0} = \sqrt{(U - R_{s=0} * I_m * \cos \varphi)^2 + \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} * R_{s=0} * I_m\right)^2}$$

Trazar los valores de L_{ts} en función de los valores de $U_{i,s=0}$

7.4. Resistencia equivalente de pérdidas en el hierro R_{fe}

7.4.1. Pérdidas constantes

Restando las pérdidas del devanado del estátor en vacío de la potencia de entrada en vacío se obtienen las pérdidas constantes P_k que son la suma de las pérdidas por rozamiento, ventilación y las pérdidas en el hierro.

Para cada valor de tensión registrado en el apartado 6.5, se restan las pérdidas del devanado del estátor en vacío de la potencia de entrada para obtener las pérdidas constantes.

$$P_k = P_1 - 3 \cdot I_s^2 \cdot R_{s,25} \cdot \frac{k_s + \theta_{NL}}{k_s + 25}$$

Donde:

$I_s = I$ Para devanados conectados en estrella;

$I_s = I/\sqrt{3}$ Para devanados conectados en triángulo.

7.4.2. Pérdidas de ventilación y de rozamiento

Para cada una de las tensiones registradas con un 50% o menos de la tensión asignada durante el ensayo en vacío. Se representan gráficamente las pérdidas constantes P_k , calculadas según el apartado 7.4.1, en función de la tensión al cuadrado U^2 . Extrapolando una línea recta hasta la tensión cero, la intersección con el eje de tensión cero corresponde a las pérdidas por rozamiento y ventilación P_{fw} .

Las pérdidas por rozamiento y ventilación se consideran independientes de la carga. No se incluyen en el esquema del circuito equivalente pero se pueden tener en cuenta reduciendo la potencia mecánica de salida calculada.

Las pérdidas por rozamiento son linealmente dependientes de la velocidad del motor n . Las pérdidas por ventilación dependen del cubo de la velocidad n^3 .

7.4.3. Pérdidas en el hierro

Se determinan las pérdidas en el hierro según la expresión: $P_{fe} = P_k - P_{fw}$

Se determina la resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro:

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot U_{i,s=0}^2}{P_{fe}}$$

Donde:

$U_{i,s=0}$ que es la tensión interna determinada en el apartado 7.3 en el punto de ensayo a la tensión asignada.

7.5. Inductancia de dispersión total L_σ

Si se conocen los detalles de diseño, se utiliza la relación calculada $k_\sigma = L_s / L_r$. En cualquier otro caso, por definición se debe utilizar la relación $k_\sigma = 0,67$ para motores de diseño especial (como los de doble jaula o los de rotor de barra profunda) y la relación $k_\sigma = 1$ para motores de jaula simple.

Para cada una de las intensidades de línea medidas I (6.6.3).

Se determinan la impedancia del motor y el factor de potencia

- En el caso de devanados conectados en estrella:

$$Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

- En el caso de devanados conectados en triángulo:

$$Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Se determina el factor de potencia:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Se determina la resistencia del estátor:

$$R = Z \cdot \cos \varphi$$

Se determina la intensidad del estátor

- En el caso de devanados conectados en estrella

$$I_s = I$$

- En el caso de devanados conectados en triángulo:

$$I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Se determina la reactancia de dispersión total:

$$X_{\sigma a} = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Se determina la inductancia de dispersión total:

$$L_{\sigma a} = \frac{X_{\sigma a}}{2 \pi \cdot f_N}$$

7.5.2. Corrección del desplazamiento de la corriente mediante cálculos

Los cálculos se basan en el supuesto de que las barras del rotor tienen forma rectangular. Para la mayoría de los casos prácticos la exactitud de este procedimiento es suficiente.

Se determina la altura estimada de la barra del rotor:

$$h = \left(0,21 - \frac{2p}{100}\right) \cdot \frac{H}{1000}$$

Donde:

p es el número de pares de polos.

El tamaño de carcasa del motor H es la altura del eje en milímetros.

Se determina h' :

$$h' = h \cdot \sqrt{\pi \cdot 2f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r} \text{ para los ensayos conforme al apartado 6.6.2.}$$

ó:

$$h' = h \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r} \text{ para los ensayos conforme al apartado 6.6.3.}$$

Donde γ_r es la conductividad de las barras del rotor en S/m.

Se determina el factor de efecto pelicular:

$$k_i = \frac{3}{2h'} \cdot \frac{\sinh(2h') - \sin(2h')}{\cosh(2h') - \cos(2h')}$$

Se determina la inductancia de dispersión total:

$$L_\sigma = L_{\sigma a} \frac{k_\sigma + 1}{k_\sigma + k_i}$$

Se representan los valores de L_σ en función de los valores de I_s .

7.6.1. Inductancia de magnetización L_m y tensión U_m

Para cada uno de los valores determinador de inductancia total del estátor L_{ts} y de intensidad magnetizante I_m (7.3). Se calcula la inductancia de dispersión total correspondiente L_σ , a partir de (7.5.3), por interpolación lineal, utilizando la intensidad magnetizante I_m (7.3) con relación a la intensidad del estátor I_s (7.5.3).

Se determina la inductancia de magnetización:

$$L_m = L_{ts} - L_\sigma = L_{ts} - \frac{L_\sigma}{1 + 1/k_\sigma}$$

Se determina la tensión de magnetización:

$$U_m = 2\pi \cdot f_N \cdot L_m \cdot I_m$$

Se representan los valores de L_m en función de los valores de U_m .

7.7.1. Inductancias de dispersión del estátor y del rotor L_s y L'_r

Para cada uno de los valores determinados de la inductancia total del estátor L_{ts} (7.3), de la inductancia de dispersión total L_σ (7.5.3) y de la inductancia magnetizante L_m (7.6.1), las inductancias de dispersión resultan:

$$L_s = L_{ts} - L_m ; \quad L'_r = L_\sigma - L_s$$

Se representan los valores de L_s y L'_r en función de I_m .

7.8. Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada)

Se determina la intensidad del estátor en condiciones asignadas:

- En el caso de devanados conectados en estrella:

$$I_s = I_N$$

- En el caso de devanados conectados en triángulo:

$$I_s = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$$

Se determina la inductancia L_s según el apartado 7.7 mediante interpolación lineal con la intensidad del estátor I_s .

Se determina la tensión del estátor:

- En el caso de devanados conectados en estrella:

$$U_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

- En el caso de devanados conectados en triángulo:

$$U_s = U_N$$

Se determina la tensión de magnetización:

$$U_{ma} = U_s - I_s \cdot \left(\cos \varphi_N \cdot R_{s,25} + \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right)$$

$$U_{mb} = I_s \cdot \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot R_{s,25} - \cos \varphi_N \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right)$$

$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$$

Se determina la inductancia L_m según el apartado 7.6 mediante interpolación lineal con la tensión de magnetización U_m .

Se determina la corriente a través de la inductancia de dispersión del rotor L'_r :

$$I'_r = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} - I_s \cdot \cos \varphi_N \right)^2 + \left(I_s \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} \right)^2}$$

Se determina la inductancia L'_r según el apartado 7.7 mediante interpolación lineal con la intensidad del rotor I'_r .

7.9. Resistencia de la jaula del rotor R'_r referida al devanado estático

A partir del ensayo en carga se determina el deslizamiento:

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}}$$

Se determina la tensión e intensidad del estátor:

- En el caso de devanados conectados en estrella:

$$U_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad ; \quad I_s = I$$

- En el caso de devanados conectados en triángulo:

$$U_s = U \quad ; \quad I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Se determina el factor de potencia:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Se determina la inductancia de dispersión del estátor L_s según el apartado 7.7 mediante interpolación lineal con la intensidad del estátor I_s .

Se determina la tensión de magnetización:

$$U_{ma} = U_s - I_s \cdot \left(\cos \varphi_N \cdot R_{s,25} \cdot \frac{k_s + \theta_L}{k_s + 25} + \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right)$$

$$U_{mb} = I_s \cdot \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot R_{s,25} \cdot \frac{k_s + \theta_L}{k_s + 25} - \cos \varphi_N \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right)$$

$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$$

Se determina la inductancia de magnetización L_m según el apartado 7.6 mediante interpolación lineal con la tensión de magnetización U_m .

Se determina la intensidad del rotor:

$$I'_r = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} - I_s \cdot \cos \varphi_N \right)^2 + \left(I_s \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} \right)^2}$$

Se determina la inductancia de dispersión del rotor L'_r según el apartado 7.7 mediante interpolación lineal con la intensidad del rotor I'_r .

Se determina la impedancia del motor

- En el caso de devanados conectados en estrella:

$$Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

- En el caso de devanados conectados en triángulo:

$$Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Se determina la reactancia del motor:

$$X = Z \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}$$

Se determinan las reactancias:

$$X'_r = 2 \pi \cdot f_N \cdot L'_r$$

$$X_s = 2 \pi \cdot f_N \cdot L_s$$

$$X_m = 2 \pi \cdot f_N \cdot L_m$$

Se determina la resistencia del rotor referida al devanado estatórico y corregido a una temperatura de referencia de 25 °C:

$$R'_{r,25} = s \cdot (X'_r + X_m) \sqrt{\frac{X_m \cdot X'_r}{X_m + X'_r} - (X - X_s)} \cdot \frac{k_r + 25}{k_r + \theta_L}$$

7.10. Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro R_{fe}

Se determina la resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro para el esquema del circuito equivalente de tipo T, para la tensión asignada U_N y la frecuencia asignada f_N :

$$R_{fe} = R_{fe} * \frac{1}{\left(1 + \frac{X_s}{X_m}\right)^2}$$

Ejemplo de cálculo suministrado por la norma UNE EN 60034-28

Datos asignados			
Tipo =	IEC 60034-28	Altura del eje =	132 mm
P_{2N} =	5 500 W	k_s =	235 °C
Conexión =	Y ('Y' or 'D')	k_r =	225 °C
f_N =	50 Hz	g_r =	3,00E+07 S/m conductividad de las barras del rotor
2p =	4		
U_N =	417 V (tensión de línea)	U_s =	241 V (tensión de fase)
I_N =	10,67 A (intensidad de línea)	I_s =	10,67 A (intensidad de fase)
cos φ_N =	0,81		
η =	85,7 %		

(6.2) Medición de la resistencia entre fases del estator en c.c.

R_{L,m} =	1,736 Ohm
Θ₀ =	23,4 °C

(6.3) Ensayo de carga a la carga asignada

U	I	P₁	n	Θ_L
V	A	W	1/min	°C
417,8	10,89	6411	1445	105,1

(6.4) Ensayo de la curva de carga (alternativa al 6.6)

P₁ Objetivo	P₁	U	I	n	Θ_w	R	R
W	W	V	A	1/min	°C	Ohm	Ohm
antes del ensayo						2,306	(solo necesario si no se mide Θ _w)
8022	8670,0	417,1	14,21	1421,5	108,1	—	2,305
7060	7220,0	417,6	12,04	1436,9	110,0	—	2,318
6418	6310,0	417,5	10,74	1446,0	109,8	—	2,316
5776	5810,0	417,6	10,05	1451,0	108,2	—	2,306
5134	4990,0	417,7	8,96	1458,8	107,0	—	2,298
4492	4540,0	417,9	8,39	1463,0	104,4	—	2,280
3851	3710,0	417,7	7,39	1470,5	102,5	—	2,267
3209	3280,0	417,9	6,92	1474,3	99,7	—	2,249
2567	2560,0	417,9	6,20	1480,5	97,7	—	2,235
1604	1990,0	418,0	5,75	1485,3	95,9	—	2,223
después del ensayo						2,224	(solo necesario si no se mide Θ _w)

(6.5) Ensayo en vacío

U Objetivo	U	I	P₁	Θ_L
V	V	A	W	°C
459	460,0	8,50	450,0	
417	417,4	4,99	250,0	
375	375,8	3,27	170,0	
334	334,0	2,55	130,0	
292	292,4	2,14	110,0	
250	250,7	1,79	90,0	
209	208,8	1,47	70,0	
167	166,8	1,18	60,0	
125	125,2	0,90	49,0	
83	104,1	0,78	45,0	29,1

(6.6) Ensayo de rotación inversa o con rotor bloqueado (alternativa al 6.4)

I Objetivo	I	U	P_1	deslizamiento $s =$
A	A	V	W	1
15,5	16,09	135,5	1170,0	(utilizar 1 para rotor bloqueado y 2 para rotación inversa)
13,9	13,36	120,2	830,0	
12,3	10,59	102,3	530,0	
10,7	8,02	83,7	300,0	
9,1	5,33	62,6	140,0	
7,5	4,84	58,6	110,0	
5,9	3,73	49,4	70,0	
4,3	2,72	40,8	40,0	
2,7	2,10	35,3	20,0	
1,1	0,99	24,9	10,0	

(7.2) Resistencia del devanado del estator

$R_{s,25^\circ} = 0,873 \text{ Ohm}@25^\circ\text{C}$

(7.3) Inductancia total del estator

$Z_{s=0}$	$\cos \varphi$	$R_{s=0}$	I_m	X_{ts}	L_{ts}	$U_{ts=0}$	ψ_{ts}
Ohm		Ohm	A	Ohm	H	V	Wb
31,24	0,07	2,08	8,50	31,2	0,0992	265,0	0,844
48,32	0,07	3,35	4,99	48,2	0,1534	240,4	0,765
66,28	0,08	5,29	3,27	66,1	0,2103	216,3	0,688
75,73	0,09	6,68	2,55	75,4	0,2401	192,1	0,611
79,00	0,10	8,03	2,14	78,6	0,2502	167,9	0,535
80,70	0,12	9,33	1,79	80,2	0,2552	143,8	0,458
82,21	0,13	10,85	1,47	81,5	0,2594	119,5	0,380
81,63	0,18	14,36	1,18	80,4	0,2558	94,8	0,302
80,32	0,25	20,16	0,90	77,7	0,2475	70,0	0,223
77,03	0,32	24,65	0,78	73,0	0,2323	56,9	0,181

(7.4) Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro

I_s	P_k	$(U_{ts=0})^2$	P_{fe}	
A	W	V ²	W	
8,50	257,7	70222	221,4	
4,99	183,8	57786	147,5	
3,27	141,5	46776	105,2	
2,55	112,7	36903	76,4	$U_{ts=0} = 240,3 \text{ V}$
2,14	97,8	28198	61,5	
1,79	81,4	20665	45,1	
1,47	64,3	14284	28,0	$\text{Correlación} = 0,9957$
1,18	56,3	8990	20,0	$P_{fw} = 36,3 \text{ W}$
0,90	46,8	4896	10,5	$P_{fe} = 147,0 \text{ W}$
0,78	43,4	3240	7,1	$R_{fe} = 1179 \text{ Ohm}$

(7.5.3) Inductancia de dispersión total a partir de un ensayo de rotación inversa o con rotor bloqueado

$k_{\sigma} = 0,67$		$h = 0,02244 \text{ m}$		$h' = 1,727$		$k_i = 0,834$	
Z	$\cos \varphi$	R	I_{σ}	$X_{\sigma a}$	$L_{\sigma a}$	L_{σ}	ψ_{σ}
Ohm		Ohm	A	Ohm	H	H	Wb
4,86	0,31	1,51	16,09	4,6	0,0147	0,0163	0,263
5,19	0,30	1,55	13,36	5,0	0,0158	0,0175	0,234
5,58	0,28	1,58	10,59	5,3	0,0170	0,0189	0,200
6,03	0,26	1,55	8,02	5,8	0,0185	0,0206	0,165
6,78	0,24	1,64	5,33	6,6	0,0209	0,0233	0,124
6,99	0,22	1,57	4,84	6,8	0,0217	0,0241	0,117
7,64	0,22	1,68	3,73	7,5	0,0237	0,0264	0,098
8,67	0,21	1,80	2,72	8,5	0,0270	0,0300	0,082
9,71	0,16	1,51	2,10	9,6	0,0305	0,0339	0,071
14,52	0,23	3,40	0,99	14,1	0,0449	0,0499	0,049

(7.5.4) Inductancia de dispersión total a partir de un ensayo de curva de carga

$\cos \varphi$	s	I_s	I_{sa}	I_{sb}	U_{ia}	U_{ib}	U_i	L_{ts}
		A	A	A	V	V	V	H
0,84	0,052	14,21	12,00	-7,60	227,0	8,8	227,2	0,1846
0,83	0,042	12,04	9,98	-6,73	229,5	7,8	229,6	0,1788
0,81	0,036	10,74	8,73	-6,26	231,0	7,2	231,1	0,1754
0,80	0,033	10,05	8,03	-6,04	231,8	7,0	231,9	0,1734
0,77	0,027	8,96	6,90	-5,71	233,3	6,6	233,3	0,1700
0,75	0,025	8,39	6,27	-5,57	234,1	6,4	234,2	0,1681
0,69	0,020	7,39	5,13	-5,33	235,3	6,0	235,4	0,1652
0,65	0,017	6,92	4,53	-5,23	236,2	5,9	236,2	0,1632
0,57	0,013	6,20	3,54	-5,10	237,3	5,7	237,4	0,1605
0,48	0,010	5,75	2,75	-5,05	238,3	5,6	238,3	0,1583

X_{ts}	R_{fe}'	I_{ma}	I_{mb}	I_m	X_{σ}'	X_{σ}''	L_{σ}''	L_{σ}	ψ_{σ}
Ohm	Ohm	A	A	A	Ohm	Ohm	H	H	Wb
58,0	1053	0,4	-3,9	3,9	6,32	6,32	0,0201	0,0181	0,258
56,2	1076	0,4	-4,1	4,1	6,85	6,85	0,0218	0,0194	0,234
55,1	1090	0,3	-4,2	4,2	7,24	7,24	0,0230	0,0204	0,219
54,5	1098	0,3	-4,3	4,3	7,51	7,51	0,0239	0,0210	0,211
53,4	1111	0,3	-4,4	4,4	7,99	7,99	0,0254	0,0221	0,198
52,8	1119	0,3	-4,4	4,4	8,34	8,34	0,0265	0,0229	0,192
51,9	1131	0,3	-4,5	4,5	9,12	9,12	0,0290	0,0247	0,183
51,3	1139	0,3	-4,6	4,6	9,57	9,57	0,0305	0,0257	0,178
50,4	1150	0,3	-4,7	4,7	10,63	10,63	0,0338	0,0280	0,173
49,7	1159	0,3	-4,8	4,8	12,83	12,83	0,0408	0,0325	0,187

(7.6.1) y (7.7.1) Inductancia y tensión de magnetización, inductancias de dispersión del estátor y del rotor. A partir de un ensayo de rotación inversa o de un ensayo con rotor bloqueado

I_m	L_{ts}	L_{σ}	L_m	ψ_m	U_m	$L_{\sigma s}$	L_{σ}'
A	H	H	H	Wb	V	H	H
8,50	0,0992	0,0203	0,0911	0,774	243,3	0,0081	0,0121
4,99	0,1534	0,0238	0,1439	0,717	225,4	0,0096	0,0143
3,27	0,2103	0,0280	0,1991	0,652	204,7	0,0112	0,0168
2,55	0,2401	0,0311	0,2276	0,580	182,1	0,0125	0,0186
2,14	0,2502	0,0337	0,2367	0,506	158,9	0,0135	0,0202
1,79	0,2552	0,0383	0,2398	0,430	135,1	0,0154	0,0229
1,47	0,2594	0,0430	0,2421	0,355	111,6	0,0173	0,0258
1,18	0,2558	0,0472	0,2369	0,279	87,8	0,0189	0,0282
0,90	0,2475	0,0512	0,2269	0,204	64,2	0,0205	0,0306
0,78	0,2323	0,0529	0,2111	0,165	51,7	0,0212	0,0317

(7.6.2) y (7.7.2) Inductancia y tensión de magnetización, inductancias de dispersión del estátor y del rotor. A partir de un ensayo de curva de carga

I_s A	L_{ts} H	L_σ H	L_m H	ψ_m WB	$L_{\sigma s}$ H	$L_{\sigma r}'$ H	U_{ma} V	U_{mb} V	U_m V
14,21	0,1846	0,0181	0,1773	0,696	0,0073	0,0109	209,6	-18,7	210,4
12,04	0,1788	0,0194	0,1710	0,700	0,0078	0,0116	213,0	-16,7	213,7
10,74	0,1754	0,0204	0,1673	0,702	0,0082	0,0122	214,9	-15,1	215,4
10,05	0,1734	0,0210	0,1649	0,703	0,0084	0,0126	215,9	-14,3	216,3
8,96	0,1700	0,0221	0,1612	0,705	0,0089	0,0133	217,3	-12,7	217,7
8,39	0,1681	0,0229	0,1589	0,705	0,0092	0,0137	218,0	-11,8	218,3
7,39	0,1652	0,0247	0,1552	0,705	0,0099	0,0148	218,8	-9,9	219,0
6,92	0,1632	0,0257	0,1529	0,705	0,0103	0,0154	219,2	-8,8	219,4
6,20	0,1605	0,0280	0,1493	0,704	0,0112	0,0167	219,4	-6,8	219,5
5,75	0,1583	0,0325	0,1453	0,697	0,0130	0,0194	217,6	-5,6	217,7

(7.8) Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada) a partir de un ensayo de rotación inversa o de un ensayo con rotor bloqueado

$I_s =$ 10,67 A	$U_{ma} =$ 219,0 V		
$L_{\sigma s} =$ 0,0073 H	$U_{mb} =$ -14,2 V		
$U_s =$ 240,8 V	$U_m =$ 219,4 V	$I_r' =$ 9,13 A	
	$L_m =$ 0,1599 H	$L_{\sigma r}' =$ 0,0118 H	

(7.8) Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada) a partir de un ensayo de curva de carga

$I_s =$ 10,67 A	$U_{ma} =$ 217,1 V		
$L_{\sigma s} =$ 0,0082 H	$U_{mb} =$ -16,8 V		
$U_s =$ 240,8 V	$U_m =$ 217,7 V	$I_r' =$ 9,19 A	
	$L_m =$ 0,1629 H	$L_{\sigma r}' =$ 0,0131 H	

(7.9) Resistencia de la jaula del rotor a partir de un ensayo de rotación inversa o de un ensayo de rotor bloqueado

$n_{syn} =$ 1500 1/min			
$s =$ 0,037			
$U_s =$ 241,2 V	$U_{ma} =$ 216,8 V		
$I_s =$ 10,89 A	$U_{mb} =$ -12,7 V		
$\cos \varphi =$ 0,81	$U_m =$ 217,2 V	$I_r' =$ 9,36 A	
$L_{\sigma s} =$ 0,0072 H	$L_m =$ 0,1657 H	$L_{\sigma r}' =$ 0,0116 H	
$X_{\sigma s} =$ 2,25 Ohm	$X_m =$ 52,07 Ohm	$X_{\sigma r}' =$ 3,65 Ohm	
$Z =$ 22,15 Ohm			
$X =$ 12,88 Ohm			
$R_{r,25^\circ} =$ 0,65 Ohm			

(7.9) Resistencia de la jaula del rotor a partir de un ensayo de curva de carga

$n_{syn} =$ 1500 1/min			
$s =$ 0,037			
$U_s =$ 241,2 V	$U_{ma} =$ 214,9 V		
$I_s =$ 10,89 A	$U_{mb} =$ -15,4 V		
$\cos \varphi =$ 0,81	$U_m =$ 215,5 V	$I_r' =$ 9,32 A	
$L_{\sigma s} =$ 0,0081 H	$L_m =$ 0,1405 H	$L_{\sigma r}' =$ 0,0130 H	
$X_{\sigma s} =$ 2,55 Ohm	$X_m =$ 44,15 Ohm	$X_{\sigma r}' =$ 4,09 Ohm	
$Z =$ 22,15 Ohm			
$X =$ 12,88 Ohm			
$R_{r,25^\circ} =$ 0,59 Ohm			

(7.10) Resistencia de pérdidas en el hierro a partir de un ensayo de rotación inversa o de un ensayo con rotor bloqueado

$R_{fe} =$ 1083 Ohm

(7.10) Resistencia de pérdidas en el hierro a partir de un ensayo de la curva de carga

$R_{fe} =$ 1054 Ohm

Estas son unas capturas del anexo informativo que incluye la norma UNE EN 60034-28 en el que se calcula un ejemplo de un motor de 5500 W, para el presente trabajo fin de grado se a tenido en cuenta este ejemplo a la hora de seguir un diseño.

UNE-EN 60034-2-1:2007. Máquinas Eléctricas Rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción). (Se mantiene numeración de la norma original)

Introducción

Título original: Rotating electrical machines.

Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from teste.

Editor: International Electrotechnical Commission.

Edición: 2007.

El procedimiento para la determinación del circuito equivalente es muy similar al descrito por la norma americana IEEE Std 112 (2004): Standard test procedure for polyphase induction motors and generators.

Consideraciones respecto a las medidas a realizar.

Con respecto a las mediciones:

- Tensión aplicada: se toma la media aritmética de las tensiones de línea medidas.
- Corriente absorbida: se toma la media aritmética de las corrientes de línea medidas.

Resistencia: se toma la media aritmética de las resistencias medidas.

Frecuencia: se admite una tolerancia del 0,3% respecto a la frecuencia nominal.

Respecto a los aparatos de medida:

- Precisión de los aparatos de medida: 0,2 %.
- Precisión de los transformadores de medida: 0,3%.

- Precisión en las medidas de par: 0,2 %.
- Precisión en las medidas de frecuencia: 0,2 %.
- Precisión en las medidas de resistencia: 0,2 %.
- Precisión en las medidas de velocidad: 0,1% o 1 rpm.
- Precisión en Las medidas de temperatura: 1°C.

5.7. Resistencia

5.7.1. Resistencia de ensayo

La resistencia del devanado r es el valor óhmico, determinado por los métodos apropiados.

Para las máquinas de corriente alterna polifásicas $R = R_{II}$ es la resistencia entre fases del estátor o del devanado inducido de acuerdo con el apartado 3.5.3. En el caso de máquinas de inducción de rotor bobinado, $R_{r,II}$ es la resistencia entre fases del rotor. La resistencia en el ensayo al final del ensayo térmico debe determinarse de la misma manera que el procedimiento de extrapolación descrito en el apartado 8.6.2.3.3 de la Norma IEC 60034-1, utilizando el tiempo más corto posible en vez del intervalo de tiempo especificado en la tabla 5 de la Norma IEC 60034-1, y extrapolando a cero.

La temperatura de ensayo de los devanados debe determinarse de acuerdo con el apartado 5.7.2.

Cuando la resistencia del devanado (en carga) no puede medirse directamente, el valor de la resistencia de ensayo debe ajustarse mediante la diferencia entre la temperatura de la resistencia medida y la temperatura obtenida de acuerdo con el apartado 5.7.2 métodos a) a e).

5.7.2. Temperatura del devanado

La temperatura de ensayo del devanado debe determinarse mediante uno de los siguientes métodos (mostrados en orden de preferencia):

- a) temperatura determinada a partir de la resistencia R_N del ensayo con la carga asignada obtenida mediante el procedimiento de extrapolación descrito en el apartado 5.7.1;
- b) temperatura medida directamente mediante ETD o termopar;
- c) temperatura determinada de acuerdo con el punto a) sobre una máquina duplicada de la misma construcción y diseño eléctrico;
- d) cuando la capacidad de carga no está disponible, determinar la temperatura de funcionamiento de acuerdo con la Norma IEC 61986;

cuando la resistencia R_N del ensayo con la carga asignada no puede medirse directamente, la temperatura del devanado debe suponerse igual a la temperatura de referencia de la clase térmica asignada dada en la tabla 4.

Clase térmica del sistema de aislamiento	Temperatura de referencia °C
130 (B)	95
155 (F)	115
180 (H)	135

Tabla 4- Temperatura de referencia

Si el calentamiento o la temperatura asignados se especifican como los de una clase térmica inferior a la utilizada en la construcción, la temperatura de referencia debe ser el de clase térmica inferior.

5.7.3. Corrección a la temperatura del fluido refrigerante de referencia

Los valores de resistencia del devanado registrados durante el ensayo deben referirse a una temperatura de referencia normalizada de 25 °C. El factor de corrección para ajustar la resistencia del devanado (y el deslizamiento en el caso de máquinas de inducción de jaula) a una temperatura de referencia normalizada de 25 °C del fluido refrigerante, debe determinarse por

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w}$$

Donde:

- k_{θ} es el factor de corrección de temperatura para los devanados;
- θ_c es la temperatura de entrada del fluido refrigerante durante el ensayo;
- θ_w es la temperatura del devanado de acuerdo con el apartado 5.7.2.

La constante de temperatura es 235 para el cobre; 225 para el aluminio.

6.4.2.3. Pérdidas de rozamiento y de ventilación, pérdidas en el hierro

Ensayar un número mínimo de siete valores de tensión, incluyendo la tensión asignada, de manera que:

- Cuatro o más valores se lean aproximadamente equidistantes entre el 125% y el 60% de la tensión asignada;
- Tres o mas valores se lean aproximadamente equidistantes entre el 50% y aproximadamente el 20% de la tensión asignada, o (para una máquina funcionando desacoplada) hasta un punto donde la corriente no disminuya más.

El ensayo debe realizarse tan rápidamente como sea posible tomando las lecturas en orden descendente de tensiones. Registrar en cada uno de los valores de tensión: U_0 , I_0 , P_0 , R_0 .

Donde

R_0 se determina midiendo la resistencia después de las lecturas a la tensión más baja.

NOTA: Para las máquinas de corriente alterna, R_0 es $R_{i,0}$.

6.4.4.4. Método del circuito equivalente (máquinas de inducción)

6.4.4.4.1. Generalidades

Este método puede aplicarse cuando no es posible realizar un ensayo en carga. Se basa en el modelo en T convencional del circuito por fase de una máquina de inducción, incluyendo una resistencia equivalente para las pérdidas en el hierro en paralelo con la reactancia de campo principal. Los parámetros y magnitudes del lado del rotor se refieren al lado del estátor; esto se indica mediante la presencia del apóstrofe (') en los símbolos.

La aplicación del método a las máquinas de inducción de jaula requiere que los siguientes valores designados estén disponibles.

- X_{os}/X'_{or} relación éntrela reactancia de dispersión del estátor y la reactancia de dispersión del rotor referida al estátor.
- α_r coeficiente de temperatura de los devanados del rotor (conductividad referida a 0°C)
- X_{os} , X_m reactancia de dispersión del estátor y reactancia de magnetización.

NOTA 1 Cuando se utiliza el método del circuito equivalente, todas las tensiones, corrientes e impedancias son valores por fase para una máquina trifásica en conexión Y; las potencias y potencias reactivas son para la máquina completa.

NOTA 2 Para cobre, $\alpha_r = 1/235$ y para el aluminio $\alpha_r = 1/225$.

NOTA 3 En el apartado 8.2.2.4.3 se da un método para obtener los parámetros del modelo.

6.4.4.4.3. Ensayos a la frecuencia asignada

Los valores de impedancia pueden determinarse también a partir de los ensayos siguientes.

- a) Reactancia a partir del ensayo de rotor bloqueado a la frecuencia asignada, tensión reducida y la intensidad asignada: registrar tensión, corriente, potencia, frecuencia y temperaturas.
- b) Resistencia con el rotor girando:
 - 1) a partir de un ensayo con carga reducida a la frecuencia asignada estabilizada y la tensión asignada. Registrar tensión, potencia, corriente, deslizamiento y temperaturas para el punto de carga;
 - 2) a partir de un ensayo en circuito abierto, tras un funcionamiento en vacío a la frecuencia asignada estabilizada y la tensión asignada. Registrar la tensión de circuito abierto y la temperatura del devanado en función del tiempo, después de que el motor se desconectó tras el ensayo en vacío.

8.2.2.3. Pérdidas constantes

8.2.2.3.1. Generalidades

Restando las pérdidas del devanado en vacío (a la temperatura durante el ensayo en vacío) de la potencia de entrada en vacío se obtienen las pérdidas constantes que son la suma de las pérdidas de rozamiento, de ventilación y en el hierro. Determinar las pérdidas constantes para cada uno de los valores de tensión registrados en el apartado 6.4.2.3.

$$P_k = P_0 - P_S = P_{fe} + P_{fw}$$

Donde:

$$P_S = 1,5 \cdot I_0^2 \cdot R_{l0} \text{ (véase 6.4.2.3)}$$

8.2.2.3.2. Pérdidas de rozamiento y ventilación

A partir de los puntos de pérdidas en vacío determinados anteriormente, utilizar todos aquellos que no muestran un efecto de saturación significativo y dibujar una curva de pérdidas constantes (P_k) frente a la tensión al cuadrado (U_0^2). Extrapolar una línea recta hasta la tensión cero. La intersección con el eje de tensión cero son las pérdidas de rozamiento y ventilación P_{fw} .

NOTA Las pérdidas de rozamiento y de ventilación se consideran independientes de la carga y puede utilizarse el mismo valor para cada uno de los puntos de carga.

8.2.2.3.3. Pérdidas en el hierro

A partir de los valores de la tensión entre el 60% y 125% de la tensión asignada, trazar una curva de $P_{fe} = P_k - P_{fw}$ en función de la tensión U_0 . Las pérdidas en el hierro del punto de carga deseado se toman de la curva a tensión U_r que tiene en cuenta la caída de tensión resistiva en el devanado primario:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \sin \varphi\right)^2}$$

Donde

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad ; \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$$

U , P_1 , I , y R según el apartado 6.4.4.2 (ensayo en carga)

8.2.2.4.3. Pérdidas a partir del método del circuito equivalente

8.2.2.4.3.1. Valores que provienen de mediciones

El método se basa en el circuito de modelo en T.

El procedimiento descrito en este apartado se basa en el método del apartado 6.4.4.4.2. (Ensayos a frecuencia reducida). Cuando se utiliza el método del apartado 6.4.4.4.3 obsérvense las siguientes desviaciones:

- a) las reactancias se calculan de la misma manera que en el apartado 8.2.2.4.3.2;
- b) la resistencia del rotor en funcionamiento se determina:
 - utilizando el ensayo descrito en el punto 6.4.4.4.3 a por cálculo inverso utilizando el circuito equivalente, suponiendo un valor para R'_r . Ajustar el valor de R'_r hasta que la potencia calculada esté dentro del 0,1% de la potencia medida, o la corriente calculada esté dentro del 0,1% de la corriente medida;
 - utilizando el ensayo descrito en el punto 6.4.4.4.3 b) mediante la determinación de la constante de tiempo a partir de la pendiente de la gráfica de la tensión decreciente y el tiempo en el ensayo de circuito abierto. Determinar R'_r a partir de la ecuación:

$$R'_r = \frac{(X_m + X'_{\sigma r})}{2\pi f \tau_0}$$

Donde

- X_m es la reactancia magnetizante
- $X_{\sigma r}$ es la reactancia de dispersión del rotor
- f es la frecuencia de línea
- τ_0 es la constante de tiempo en circuito abierto

Corregir el valor de R'_r a la temperatura de funcionamiento a partir de la temperatura de ensayo.

Determinar las potencias reactivas:

- A partir del ensayo en vacío a la tensión asignada $U_0 = U_N$ y frecuencia asignada (6.4.2.2)

$$P_{Q,0} = \sqrt{(3U_0 I_0)^2 - P_0^2}$$

- A partir del ensayo de rotor bloqueado a frecuencia reducida (6.4.4.2)

$$P_{Q,1r} = \sqrt{(3U I)^2 - P_1^2}$$

Donde

U_0 , I_0 y P_0 son la tensión de fase, la corriente de fase y la potencia suministrada a partir del ensayo en vacío con la tensión asignada en los bornes.

U , I , P_1 son la tensión de fase, la corriente de fase y la potencia suministrada, a partir del ensayo de impedancia con rotor bloqueado (6.4.4.3) a las frecuencias f de este ensayo.

8.2.2.4.3.2. Parámetros del circuito equivalente

Los parámetros del circuito equivalente se determinan en los siguientes pasos:

- Reactancias

Calcular las reactancias X_m a partir del ensayo en vacío y $X_{\sigma s,lr}$ a partir del ensayo de rotor bloqueado a un 25% de la frecuencia asignada.

$$X_m = \frac{3 \cdot U_0^2}{P_{Q,0} - 3 \cdot X_{\sigma s} \cdot I_{10}^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2}$$

$$X_{\sigma s,lr} = \frac{P_{Q,lr}}{3 I^2 \left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)} \cdot \left(\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)$$

$$X_{\sigma s} = \frac{f_N}{f_{lr}} X_{\sigma s,lr}$$

$$X'_{\sigma r} = \frac{X_{\sigma s}}{X_{\sigma s}/X'_{\sigma r}}$$

Calcular, utilizando los valores designados como valores de partida (6.4.4.4.1):

$$X_{\sigma s}, X_m \text{ y } \frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}}$$

Recalcular hasta que X_m y $X_{\sigma s}$ se desvíen menos del 0,1% de los valores del paso anterior.

- Resistencia de pérdidas en el hierro

Determinar la resistencia por fase, equivalente a las pérdidas en el hierro a la tensión asignada según

$$R_{fe} = \frac{3 U_{N,ph}^2}{P_{fe}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2}$$

P_{fe} son las pérdidas en el hierro de acuerdo con el apartado 8.2.2.3.3 a partir de P_0 a la tensión asignada.

- Resistencia del rotor

Determinar la resistencia del rotor corregida, para cada punto del ensayo de impedancia con el rotor bloqueado:

$$R'_{r,lr} = \left(\frac{P_1}{3 \cdot I^2} - R_s \right) \cdot \left(1 + \frac{X'_{\sigma}}{X_m} \right)^2 - \left(\frac{X'_{\sigma r}}{X_{\sigma s}} \right)^2 \cdot \left(\frac{X_{\sigma s,lr}^2}{R_{fe}} \right)$$

R_s es la resistencia por fase del devanado del estátor a la temperatura correspondiente θ_w .

NOTA Si la temperatura del devanado del rotor se desvía mucho de la temperatura del devanado del estátor el método será inexacto.

La resistencia del rotor corregida a la temperatura de referencia (5.7.2 y tabla 4) viene dada, para cada frecuencia del ensayo de impedancia con el rotor bloqueado, por:

$$R''_{r,1r} = R'_{r,1r} \cdot \frac{1 + \alpha_r \theta_{ref}}{1 + \alpha_r \theta_w}$$

Trazar una curva de los valores de $R''_{r,1r}$ en función de la frecuencia f_{1r} ; la intersección con $f_{1r} = 0$ da la resistencia del rotor referida al estátor R'_r .

- Impedancias dependientes de la carga

Para cada punto de carga intermedio deseado, calcular los valores de la impedancia y la admitancia dependientes del deslizamiento:

$$Z_r = \sqrt{(R'_r/s)^2 + X'^2_{\sigma r}}$$

$$Y_g = \sqrt{\left(\frac{R'_r/s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{fe}}\right)^2 + \left(\frac{X'_{\sigma r}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}\right)^2}$$

$$R_g = \frac{\frac{R'_r/s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{fe}}}{Y_g^2} \quad X_g = \frac{\frac{X'_{\sigma r}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}}{Y_g^2}$$

Calcular la impedancia resultante vista desde los bornes:

$$R = R_s + R_g \quad X = X_{\sigma s} + X_g \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Donde:

- s es el deslizamiento estimado;
- R_s es la resistencia por fase del devanado del estátor a la temperatura de referencia θ_{ref} .

8.2.2.4.3.3. Corrientes y pérdidas

Los valores de funcionamiento se determinan en los siguientes pasos.

Determinar:

- Corriente de fase del estátor;

$$I_s = \frac{U_N}{Z}$$

- Corriente de fase del rotor;

$$I'_r = I_s \frac{1}{Y_g Z_r}$$

- Potencia en el entrehierro transferida al rotor;

$$P_\delta = 3 I'^2_r \frac{R'_r}{s}$$

- Pérdidas en el hierro:

$$P_{fe} = 3 I_s^2 \frac{1}{Y_g^2 R_{fe}}$$

- Pérdidas en los devanados del estátor y el rotor;

$$P_s = 3 I_s^2 R_s \quad P_r = 3 I'^2_r R'_r$$

- Pérdidas adicionales en carga;

$$P_{LL} = P_{LL,N} \left(\frac{I'_r}{I'_{r,N}} \right)^2$$

A partir de un valor de $P_{LL,N}$ a la carga asignada, ya sea atribuido (8.2.2.5.3), medido (8.2.2.5.2) o determinado de acuerdo con el apartado (8.2.2.5.4).

Las pérdidas totales son:

$$P_T = P_S + P_{fe} + P_r + P_{LL} + P_{fw}$$

Dado que la potencia de entrada y la potencia en el eje son:

$$P_1 = 3 I_s^2 R \quad P_2 = P_1 - P_T$$

El deslizamiento se debe corregir, y los cálculos de las corrientes y las pérdidas se deben repetir hasta que P_2 para el funcionamiento como motor, o P_1 para el funcionamiento como generador, estén suficientemente cercanas al valor deseado.

El rendimiento (funcionamiento como motor) viene dado por:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Determinación del circuito equivalente.

Requiere la realización del ensayo de vacío para determinar las pérdidas en el hierro y las pérdidas por rozamiento y ventilación. Requiere el ensayo a rotor bloqueado para determinar los parámetros de la rama serie del circuito equivalente.

Se calculan los diferentes parámetros del circuito equivalente por fase, según la denominación siguiente:

- $R_{s,1s}$ resistencia del estátor;
- $R'_{r,1r}$ resistencia del rotor referida al estátor;
- X_{os} reactancia de dispersión del estátor;
- X'_{or} reactancia de dispersión del rotor referida al estátor;
- R_{fe} resistencia de pérdidas en el hierro;
- X_m reactancia magnetizante;

Deben asumirse inicialmente los valores de $X_{\sigma s} / X'_{\sigma r}$ (según la clase de motor) y para $X_{\sigma s} / X_m$ (normalmente entre 0,04 y 0,08).

- $X_{\sigma s} / X'_{\sigma r}$ para clase A y D: 1,0.
- $X_{\sigma s} / X'_{\sigma r}$ para clase B: 0,67.
- $X_{\sigma s} / X'_{\sigma r}$ para clase C: 0,43.

Las clases A, B, C y D se definen en la norma NEMA MG-1-2003(B3)

Capítulo nº 4

RESULTADOS

4.1. Tablas resumen de datos obtenidos según norma UNE-EN 60034-28

4.1.1. Motor de 1,5 kW

4.1.1.1. Datos del motor

Potencia: 1,5 kW
Tensiones: 400/230 V (estrella/triángulo)
Intensidades: 3,3/5,7 A (estrella/triángulo)
Frecuencia: 50 Hz
Cos ϕ_N : 0,76

4.1.1.2. Datos del ensayo a rotor libre:

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos ϕ_N
110% de la tensión nominal (253 V)				
U	253,9	3,06	52,2	0,07
V	255,1	2,82	30,8	0,04
W	254,8	2,88	93,0	0,13
100% de la tensión nominal (230 V) asignada				
U	230,8	2,39	37,5	0,07
V	231,6	2,27	32,0	0,06
W	231,6	2,33	63,8	0,12
90% de la tensión nominal (207 V)				
U	206,1	1,97	28,8	0,07
V	206,3	1,88	25,0	0,06
W	206,8	1,93	47,5	0,12
80% de la tensión nominal (184 V)				
U	184,2	1,68	19,4	0,06
V	184,6	1,62	26,8	0,09
W	185,0	1,69	35,2	0,11
70% de la tensión nominal (161 V)				
U	161,4	1,42	14,8	0,06
V	161,7	1,38	21,7	0,10
W	162,3	1,45	28,0	0,12
60% de la tensión nominal (138 V)				
U	138,1	1,18	13,5	0,08
V	138,5	1,17	16,9	0,10
W	138,5	1,20	19,2	0,12
50% de la tensión nominal (115 V)				
U	114,5	0,96	8,2	0,07
V	114,9	0,95	14,1	0,13
W	115,1	1,01	15,0	0,13

40% de la tensión nominal (92 V)				
U	92,3	0,78	4,8	0,07
V	92,5	0,72	9,7	0,14
W	93,0	0,81	13,5	0,18
30% de la tensión nominal (69 V)				
U	69,8	0,59	4,7	0,11
V	70,1	0,56	7,4	0,19
W	70,2	0,61	8,3	0,19
20% de la tensión nominal (46 V)				
U	46,4	0,38	3,8	0,22
V	47,0	0,40	6,0	0,32
W	46,9	0,43	4,7	0,23

Realizamos una media aritmética entre los valores de las tres fases y los resultados son:

TENSIÓN (V)	INTENSIDAD (A)	POTENCIA (W)	Cos φ_N
254,60	2,92	58,67	0,08
231,33	2,33	44,43	0,08
206,40	1,93	33,77	0,08
184,60	1,66	27,13	0,09
161,80	1,42	21,50	0,09
138,37	1,19	16,53	0,10
114,83	0,97	12,43	0,11
92,60	0,77	9,33	0,13
70,03	0,59	6,80	0,16
46,77	0,40	4,83	0,26

4.1.1.3. Datos del ensayo a rotor bloqueado:

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ_N
150% de la intensidad nominal (4,95 A)				
U	51,9	4,90	161,1	0,63
V	51,5	4,87	157,9	0,63
W	51,4	4,87	160,0	0,64
135% de la intensidad nominal (4,46 A)				
U	47,6	4,51	135,0	0,63
V	46,9	4,44	129,8	0,62
W	47,1	4,48	133,4	0,63

120% de la intensidad nominal (3,96 A)				
U	41,9	3,99	104,4	0,62
V	41,5	3,95	101,5	0,62
W	41,5	3,96	103,5	0,63
105% de la intensidad nominal (3,3 A) asignada				
U	35,2	3,36	73,5	0,62
V	35,1	3,54	75,3	0,62
W	35,0	3,35	73,3	0,63
90% de la intensidad nominal (2,97 A)				
U	31,6	3,42	59,0	0,62
V	31,3	2,98	57,0	0,61
W	31,2	2,98	58,2	0,62
75% de la intensidad nominal (2,48 A)				
U	25,4	2,42	37,9	0,62
V	25,3	2,42	37,4	0,61
W	25,2	2,42	37,8	0,62
60% de la intensidad nominal (1,98 A)				
U	20,6	1,97	24,9	0,61
V	20,2	1,93	23,9	0,61
W	20,5	1,96	24,9	0,62
45% de la intensidad nominal (1,49 A)				
U	15,7	1,51	14,5	0,61
V	15,6	1,49	14,1	0,61
W	15,3	1,47	13,9	0,62
30% de la intensidad nominal (0,99 A)				
U	10,4	1,00	6,4	0,62
V	10,4	0,99	6,3	0,61
W	10,3	1,00	6,3	0,61
10% de la intensidad nominal (0,33 A)				
U	3,2	0,31	0,6	0,63
V	3,2	0,31	0,6	0,62
W	3,2	0,32	0,6	0,62

Realizamos una media aritmética entre los valores de las tres fases y los resultados son:

TENSIÓN (V)	INTENSIDAD (A)	POTENCIA (W)	Cos φ_N
51,60	4,88	159,67	0,63
47,20	4,48	132,73	0,63
41,63	3,97	103,13	0,62
35,10	3,42	74,03	0,62
31,37	3,13	58,07	0,62
25,30	2,42	37,70	0,62

20,43	1,95	24,57	0,61
15,53	1,49	14,17	0,61
10,37	1,00	6,33	0,61
3,20	0,31	0,60	0,62

4.1.1.4. Obtención de los parámetros del circuito equivalente

- Valores asignados

TIPO	M3AA090LD-4
P_{2N}	1500 W
Conexión	Y (estrella)
f_N	50 Hz
2p	4
U_N	400 V (línea)
I_N	3,3 A (fase)
Cos φ_N	0,76

Altura de eje	90 mm
k_s	235 °C
k_r	235 °C
γ_r	33*10 ⁶ S/m
U_s	230,94 V (fase)

- Medida de la resistencia del estátor entre fases R_{11,m} (6.2)

R_{U-X} (Ω)	5,9
R_{V-Y} (Ω)	6,1
R_{W-Z} (Ω)	6

R_{11,m} (Ω)	6
-----------------------------	---

- Resistencia del devanado del estátor (7.2)

R_{s,25} (Ω)	3,012
-----------------------------	-------

- Inductancia total del estátor L_{ts}

Apartado 6,5 (s=0)			Apartado 7,3						
U (V)	I (A)	P1 (W)	Z_{s=0} (Ω)	Cos φ	R_{s=0} (Ω)	I_m (A)	X_{ts} (Ω)	L_{ts} (H)	U_{i,s=0} (V)
254,60	2,92	58,67	87,19	0,0789	6,88	2,92	86,92	0,2767	253,8
231,33	2,33	44,43	99,28	0,0824	8,18	2,33	98,95	0,3150	230,5
206,40	1,93	33,77	107,05	0,0849	9,08	1,93	106,67	0,3395	205,7
184,60	1,66	27,13	111,03	0,0884	9,82	1,66	110,59	0,3520	183,9
161,80	1,42	21,50	114,16	0,0938	10,70	1,42	113,66	0,3618	161,1
138,37	1,19	16,53	116,77	0,1008	11,77	1,19	116,17	0,3698	137,7
114,83	0,97	12,43	118,47	0,1117	13,23	0,97	117,72	0,3747	114,1
92,60	0,77	9,33	119,79	0,1304	15,62	0,77	118,77	0,3781	91,8
70,03	0,59	6,80	119,44	0,1656	19,78	0,59	117,79	0,3749	69,1
46,77	0,40	4,83	115,76	0,2558	29,61	0,40	111,91	0,3562	45,2

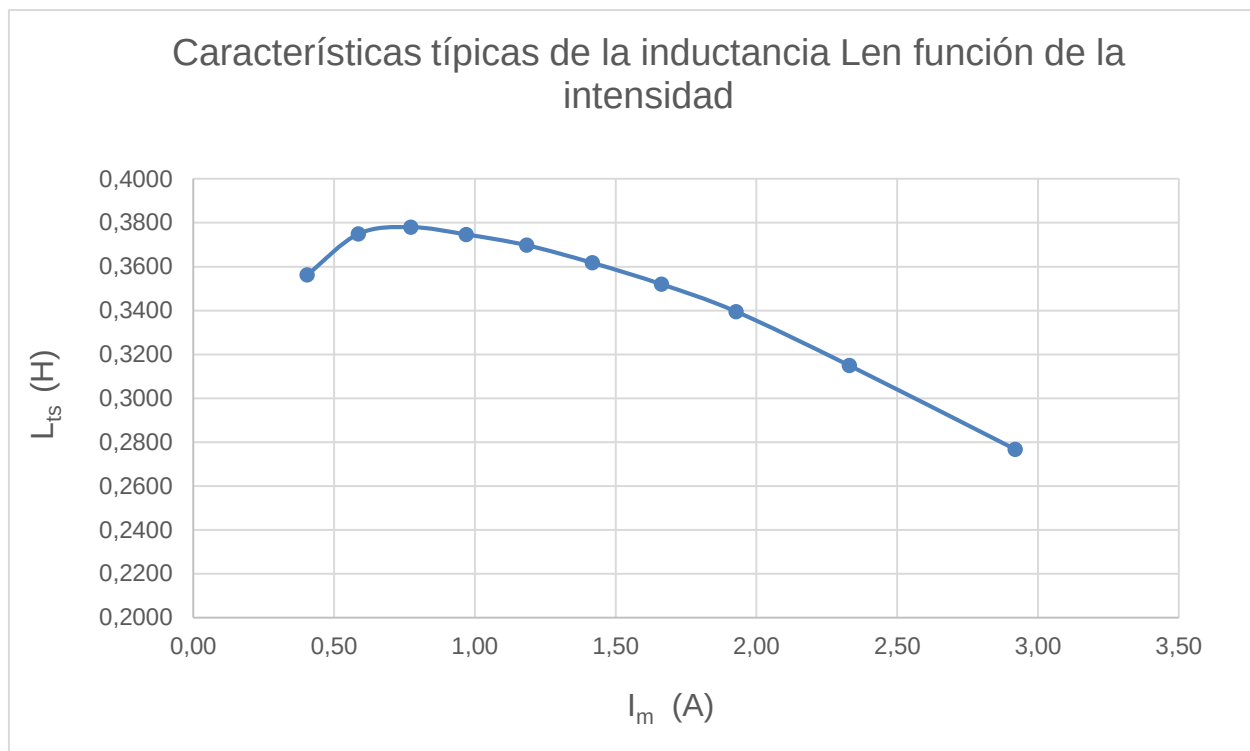


Figura nº 4.1 Características típicas de la inductancia L en función de la intensidad I

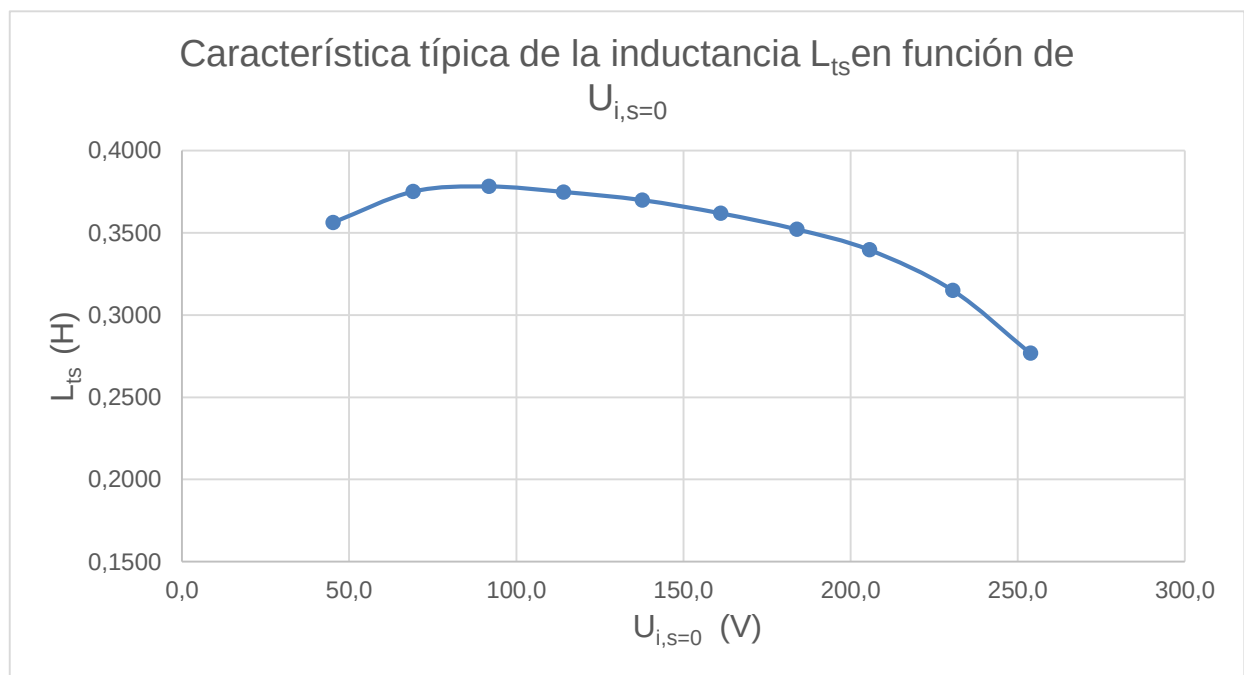


Figura nº 4.2 Características típicas de la inductancia L_{ts} en función de la tensión $U_{i,s=0}$

- Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro

Apartado 6,5 ($s=0$)			Apartado 7,4				
U (V)	I (A)	P ₁ (W)	I _s (A)	P _K (W)	U _{i,s=0} (V)	(U _{i,s=0}) ² (V ²)	P _{fe} (W)
254,60	2,92	58,67	2,92	33,09	253,81	64417,50	29,53
231,33	2,33	44,43	2,33	28,15	230,55	53151,44	24,59
206,40	1,93	33,77	1,93	22,62	205,66	42294,23	19,06
184,60	1,66	27,13	1,66	18,84	183,88	33810,84	15,29
161,80	1,42	21,50	1,42	15,47	161,09	25949,13	11,92
138,37	1,19	16,53	1,19	12,32	137,66	18950,67	8,77
114,83	0,97	12,43	0,97	9,61	114,11	13022,17	6,06
92,60	0,77	9,33	0,77	7,54	91,81	8428,97	3,99
70,03	0,59	6,80	0,59	5,77	69,07	4770,17	2,22
46,77	0,40	4,83	0,40	4,34	45,21	2043,99	0,79

P _{fw} (W)	P _{fe} (W)	R _{fe} (Ω)
3,5531	24,59	2161,1958

- Inductancia de dispersión total a partir del ensayo con rotor bloqueado

H (mm)	90
γ _r (S/m)	33000000
k _σ	1

h (m)	ξ	k _i
0,0153	1,2348	0,946

Apartado 6,6			Apartado 7,5,3						
U (V)	I (A)	P ₁ (W)	Z (Ω)	Cos φ	R (Ω)	I _σ (A)	X _{σa} (Ω)	L _{σa} (H)	L _{tσ} (H)
51,60	4,88	159,67	10,5738	0,6341	6,7046	4,88	8,1763	0,02603	0,0267
47,20	4,48	132,73	10,5436	0,6282	6,6232	4,48	8,2036	0,02611	0,0268
41,63	3,97	103,13	10,4958	0,6245	6,5546	3,97	8,1975	0,02609	0,0268
35,10	3,42	74,03	10,2732	0,6173	6,3419	3,42	8,0819	0,02573	0,0264
31,37	3,13	58,07	10,0320	0,5921	5,9397	3,13	8,0846	0,02573	0,0264
25,30	2,42	37,70	10,4545	0,6158	6,4374	2,42	8,2376	0,02622	0,0269
20,43	1,95	24,57	10,4608	0,6155	6,4386	1,95	8,2445	0,02624	0,0270
15,53	1,49	14,17	10,4204	0,6118	6,3754	1,49	8,2425	0,02624	0,0270
10,37	1,00	6,33	10,4118	0,6136	6,3886	1,00	8,2214	0,02617	0,0269
3,20	0,31	0,60	10,2674	0,6016	6,1769	0,31	8,2015	0,02611	0,0268

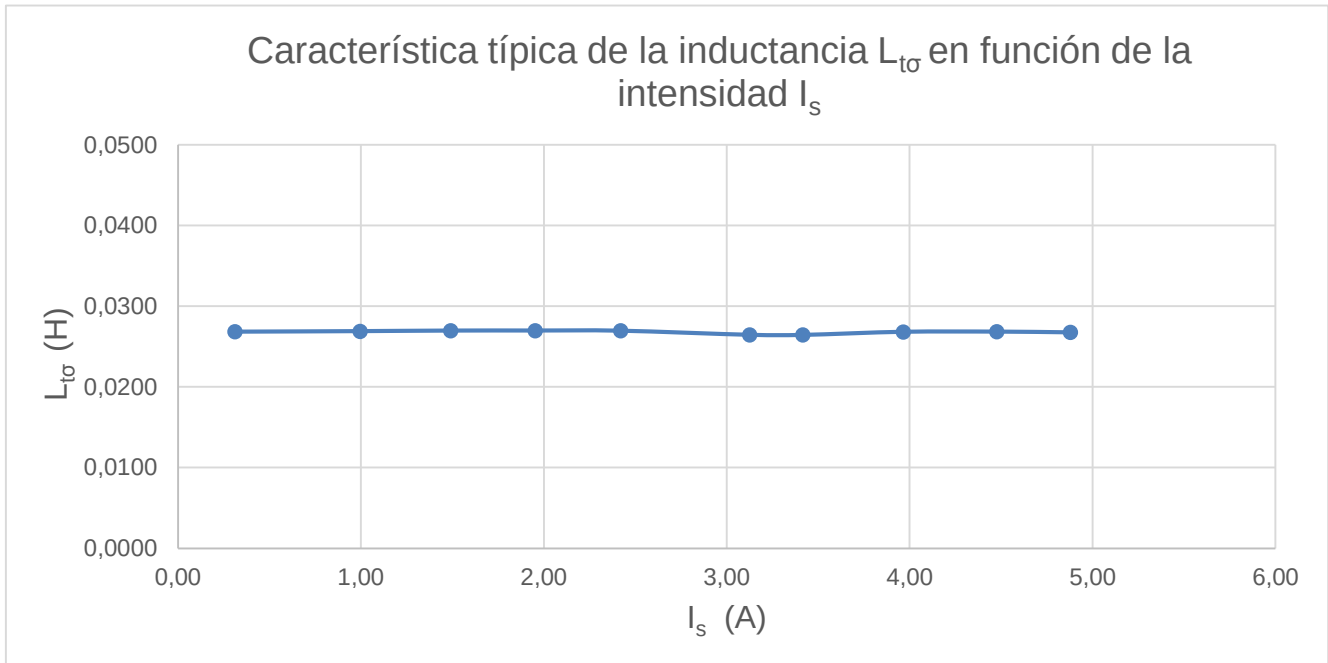


Figura nº 4.3 Características típicas de la inductancia L_{σ} en función de la intensidad I_s

- Inductancia y tensión de magnetización, inductancia de dispersión del estátor y del rotor. A partir de un ensayo con rotor bloqueado

Apartado 7,3		Apartado 7,6,1			Apartado 7,7,1	
I_m (A)	L_{ts} (H)	L_{σ} (H)	L_m (A)	U_m (V)	$L_{\sigma s}$ (H)	$L_{\sigma r}'$ (H)
2,9200	0,2767	0,0266	0,2634	241,6079	0,013297	0,013451
2,3300	0,3150	0,0270	0,3015	220,6814	0,013476	0,013361
1,9280	0,3395	0,0270	0,3260	197,4875	0,013485	0,013332
1,6627	0,3520	0,0270	0,3385	176,8343	0,013483	0,012956
1,4173	0,3618	0,0270	0,3483	155,0864	0,013477	0,012971
1,1850	0,3698	0,0269	0,3563	132,6502	0,013461	0,013487
0,9693	0,3747	0,0269	0,3613	110,0199	0,013447	0,013525
0,7730	0,3781	0,0269	0,3646	88,5463	0,013437	0,013527
0,5863	0,3749	0,0269	0,3615	66,5929	0,013428	0,013467
0,4040	0,3562	0,0268	0,3428	43,5073	0,013420	0,013411

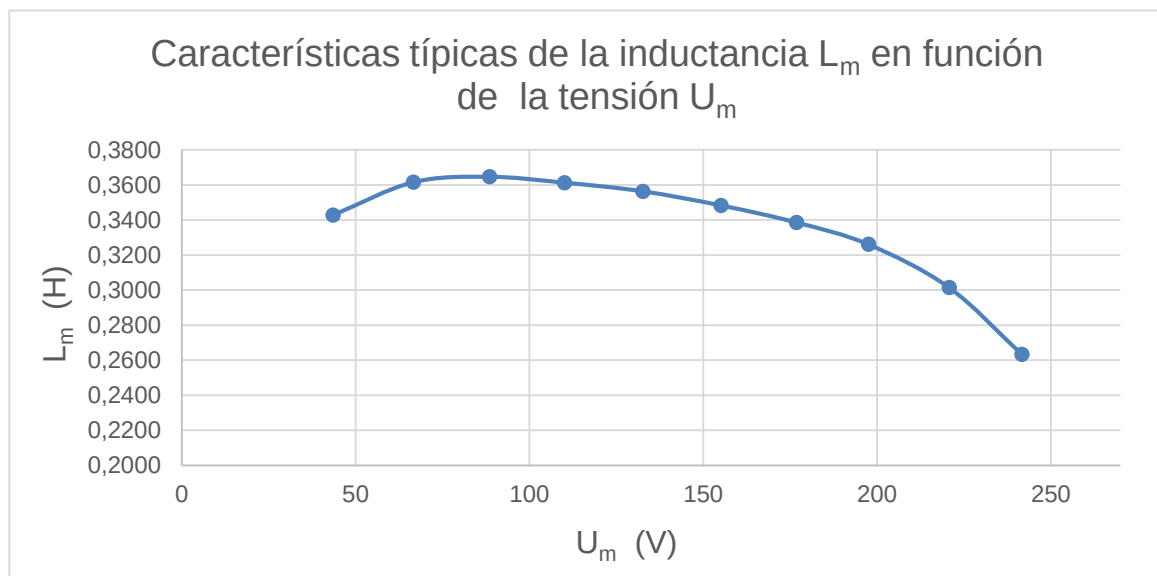


Figura nº 4.4 Características típicas de la inductancia L_m en función de la tensión U_m

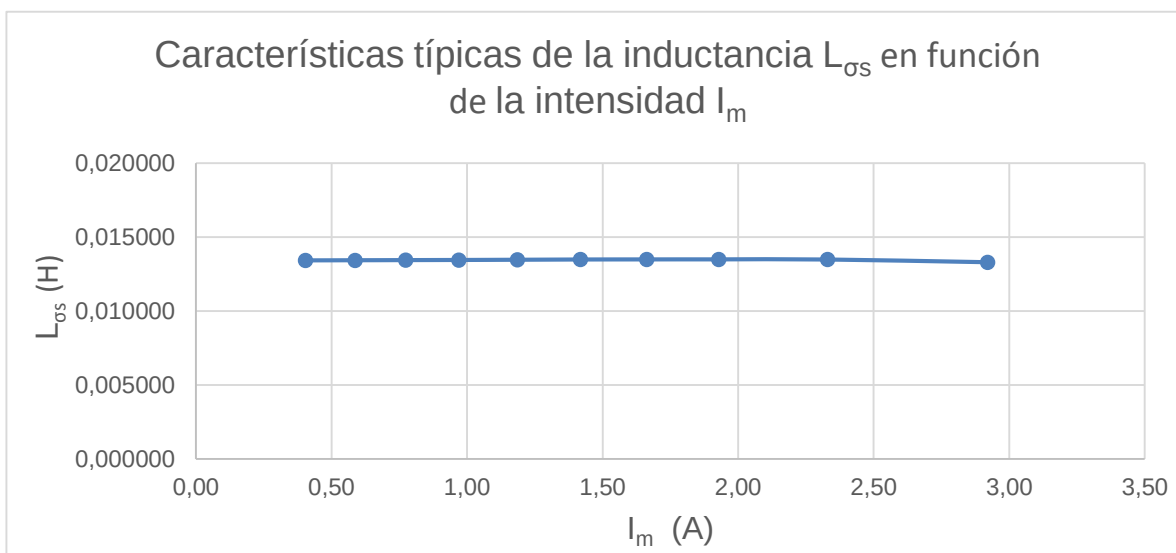


Figura nº 4.5 Características típicas de la inductancia $L_{\sigma s}$ en función de la intensidad I_m

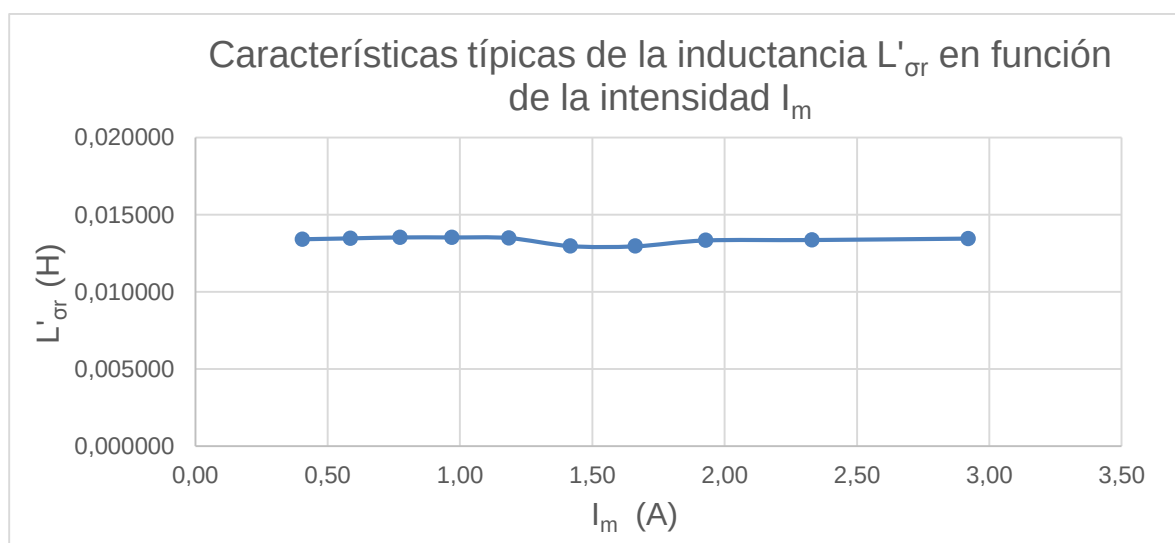


Figura nº 4.6 Características típicas de la inductancia $L'_{\sigma r}$ en función de la intensidad I_m

- Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada) a partir de un ensayo con rotor bloqueado

I_s (A)	3,3
L_s (H)	0,0131
U_s (V)	230,9401

U_{ma} (V)	214,5052
U_{mb} (V)	-3,9269
U_m (V)	214,5412
L_m (H)	0,3080

I'_r (A)	2,5496
L'_r (H)	0,01339

- Resistencia de la jaula del rotor a partir de un ensayo de rotor bloqueado

Apartado 6,3			
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	n (rpm)
233,8	3,11	476,2	1444

n_{syn} (rpm)	1500
s	0,0373
U_s (V)	233,80
I_s (A)	3,11
$\cos\varphi$	0,77
L_s (H)	0,0132
X_s (Ω)	4,1593

U_{ma} (V)	217,9852
U_{mb} (V)	-3,6947
U_m (V)	218,0166
L_m (H)	0,3043
X_m (Ω)	95,5997

I'_r (A)	2,4512
L'_r (H)	0,0134
X'_r (Ω)	4,2032

Z (Ω)	75,1768
X (Ω)	47,9661
$R_{r,25'}$ (Ω)	3,1144

- Resistencia de pérdidas en el hierro a partir de un ensayo con rotor bloqueado

R_{fe} (Ω)	2157,1126
-----------------------	-----------

motor 1.5KW - BUENO - Excel

Juan Miguel Jiménez Ordóñez

ARCHIVOINICIOINSERTARDISEÑO DE PÁGINAFÓRMULASDATOSREVISARVISTA

Calibri11A⁺A⁻

General

Formato condicionalDar formato como tablaEstilos de celdaInsertarEliminarFormato

AutosumaRellenarBorrarOrdenar y filtrarBuscar y seleccionar

Modificar

Portapapeles

Fuente

Alineación

Número

B7

RESISTENCIA DEL DEVANADO DEL ESTATOR R_s

Conexión del devanado

Estrella

$R_{s,25}$ (Ω)

3,012

RESISTENCIA EQUIVALENTE DE PERDIDAS EN EL HIERRO R_{fe}

(Para cada valor de tensión registrado en el ensayo de vacío)

PERDIDAS CONSTANTES

(Valores del ensayo de vacío)

Apartado 6.5 (s=0)

Apartado 7.4

U (V)

I (A)

P₁ (W)

I_s (A)

P_k (W)

U_{L=0} (V)

(U_{L=0})² (V²)

P_{fe} (W)

254,60

2,92

58,67

2,92

33,09

253,81

64417,50

29,53

231,33

2,33

44,43

2,33

28,15

230,55

53151,44

24,59

206,40

1,93

33,77

1,93

22,62

205,66

42294,23

19,06

184,60

1,66

27,13

1,66

18,84

183,88

33810,84

15,29

161,80

1,42

21,50

1,42

15,47

161,09

25949,13

11,92

138,37

1,19

16,53

1,19

12,32

137,66

18950,67

8,77

114,83

0,97

12,43

0,97

9,61

114,11

13022,17

6,06

92,60

0,77

9,33

0,77

7,54

91,81

8428,97

3,99

70,03

0,59

6,80

0,59

5,77

69,07

4770,17

2,22

46,77

0,40

4,83

0,40

4,34

45,21

2043,99

0,79

DatosENSAYOSInductancia total estatorRs y RfeInduc disper total rotor bloquInductancia a flujo constanteResit. jaula del rotorRfe a pa ...

LISTO

Figura nº 4.6.1 Impresión de pantalla hoja de cálculo utilizada en el TFG

4.1.2. Motor de 2,2 kW**4.1.2.1. Datos del motor**

Potencia: 2,2 kW
Tensiones: 400/230 V (estrella/triángulo)
Intensidades: 4,6/7,9 A (estrella/triángulo)
Frecuencia: 50 Hz
Cos ϕ_N : 0,76

4.1.2.2. Datos del ensayo a rotor libre

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos ϕ_N
110% de la tensión nominal (253 V)				
U	251,8	3,22	33,1	0,04
V	251,7	3,24	101,8	0,12
W	253,8	3,48	66,9	0,08
100% de la tensión nominal (230 V) asignada				
U	230,0	2,63	32,1	0,05
V	230,5	2,62	74,0	0,12
W	232,0	2,79	56,9	0,09
90% de la tensión nominal (207 V)				
U	206,5	2,25	33,8	0,07
V	207,0	2,19	48,6	0,11
W	208,2	2,28	50,2	0,11
80% de la tensión nominal (184 V)				
U	183,5	1,92	28,8	0,08
V	183,7	1,87	39,1	0,11
W	185,0	1,96	44,4	0,12
70% de la tensión nominal (161 V)				
U	160,7	1,67	19,2	0,07
V	160,6	1,56	32,9	0,13
W	162,0	1,72	42,7	0,15
60% de la tensión nominal (138 V)				
U	138,1	1,43	15,3	0,08
V	137,9	1,29	27,4	0,15
W	139,5	1,47	38,1	0,19
50% de la tensión nominal (115 V)				
U	114,8	1,15	16,6	0,13
V	115,0	1,10	23,3	0,18
W	115,9	1,19	25,9	0,19
40% de la tensión nominal (92 V)				
U	92,1	0,93	15,9	0,18
V	92,4	0,89	20,4	0,25
W	93,2	0,97	22,7	0,25

30% de la tensión nominal (69 V)				
U	68,8	0,74	14,3	0,28
V	68,9	0,68	16,8	0,36
W	69,5	0,76	19,9	0,38
20% de la tensión nominal (46 V)				
U	45,6	0,55	14,2	0,56
V	45,9	0,58	16,2	0,60
W	46,1	0,59	15,3	0,55

Realizamos una media aritmética entre los valores de las tres fases y los resultados son:

Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ_N
252,43	3,31	67,27	0,08
230,83	2,68	54,33	0,09
207,23	2,24	44,20	0,10
184,07	1,92	37,43	0,10
161,10	1,65	31,60	0,12
138,50	1,40	26,93	0,14
115,23	1,15	21,93	0,17
92,57	0,93	19,67	0,23
69,07	0,73	17,00	0,34
45,87	0,58	15,23	0,57

4.1.2.3. Datos del ensayo a rotor bloqueado

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ_N
150% de la intensidad nominal (6,9 A)				
U	53,4	6,92	191,5	0,52
V	52,9	6,79	189,9	0,53
W	52,7	6,91	197,6	0,54
135% de la intensidad nominal (6,21 A)				
U	48,5	6,27	155,3	0,51
V	47,8	6,13	153,4	0,52
W	47,8	6,26	160,5	0,54
120% de la intensidad nominal (5,52 A)				
U	43,0	5,54	121,0	0,51
V	42,5	5,42	119,6	0,52
W	46,6	5,56	126,0	0,53

105% de la intensidad nominal (4,6 A) asignada				
U	36,0	4,62	83,8	0,50
V	35,6	4,53	83,1	0,52
W	35,5	4,61	86,3	0,53
90% de la intensidad nominal (4,14 A)				
U	32,3	4,14	67,0	0,50
V	32,0	4,08	67,0	0,51
W	32,0	4,15	69,7	0,53
75% de la intensidad nominal (3,45 A)				
U	26,9	3,46	46,5	0,50
V	26,7	3,40	46,3	0,51
W	26,6	3,45	47,9	0,52
60% de la intensidad nominal (2,76 A)				
U	21,4	2,75	29,3	0,50
V	21,2	2,70	29,1	0,51
W	21,3	2,76	30,6	0,52
45% de la intensidad nominal (2,07 A)				
U	16,0	2,05	16,2	0,50
V	15,6	2,00	15,8	0,51
W	15,8	2,05	16,8	0,52
30% de la intensidad nominal (1,38 A)				
U	10,8	1,40	7,5	0,50
V	10,7	1,37	7,4	0,50
W	10,7	1,40	7,8	0,52
10% de la intensidad nominal (0,46 A)				
U	3,8	0,50	0,9	0,50
V	3,6	0,46	0,8	0,50
W	3,8	0,50	1,0	0,50

Realizamos una media aritmética entre los valores de las tres fases y los resultados son:

Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ_N
53,00	6,87	193,0	0,53
48,03	6,22	156,4	0,52
44,03	5,51	122,2	0,52
35,70	4,59	84,4	0,52
32,10	4,12	67,9	0,51
26,73	3,44	46,9	0,51
21,30	2,74	29,6	0,51
15,80	2,03	16,2	0,51
10,73	1,39	7,5	0,51
3,73	0,49	0,9	0,50

4.1.2.4. Obtención de los parámetros del circuito equivalente

- Valores asignados

TIPO	M3AA100LC-4
P_{2N}	2200 W
Conexión	Y (estrella)
f_N	50 Hz
2p	4
U_N	400 V (línea)
I_N	4,6 A (fase)
Cos φ_N	0,79

Altura de eje	100 mm
k_s	235 °C
k_r	235 °C
γ_r	33*10 ⁶ S/m
U_s	230,94 V (fase)

- Medida de la resistencia del estátor entre fases R_{11,m} (6.2)

R_{U-X} (Ω)	4,2
R_{V-Y} (Ω)	4,2
R_{W-Z} (Ω)	4,2

R_{11,m} (Ω)	4,2
-----------------------------	-----

- Resistencia del devanado del estátor (7.2)

R_{S,25} (Ω)	2,113
-----------------------------	-------

- Inductancia total del estátor L_{ts}

Apartado 6,5 (s=0)			Apartado 7,3						
U (V)	I (A)	P1 (W)	Z_{s=0} (Ω)	Cos φ	R_{s=0} (Ω)	I_m (A)	X_{ts} (Ω)	L_{ts} (H)	U_{i,s=0} (V)
252,43	3,31	67,27	76,19	0,080	6,13	3,31	75,94	0,2417	251,6
230,83	2,68	54,33	86,13	0,088	7,56	2,68	85,80	0,2731	229,9
207,23	2,24	44,20	92,51	0,095	8,81	2,24	92,09	0,2931	206,3
184,07	1,92	37,43	96,10	0,106	10,20	1,92	95,56	0,3042	183,0
161,10	1,65	31,60	97,58	0,119	11,59	1,65	96,89	0,3084	160,0
138,50	1,40	26,93	99,12	0,139	13,79	1,40	98,15	0,3124	137,2
115,23	1,15	21,93	100,58	0,166	16,71	1,15	99,18	0,3157	113,6
92,57	0,93	19,67	99,53	0,228	22,74	0,93	96,90	0,3084	90,1
69,07	0,73	17,00	95,18	0,339	32,28	0,73	89,53	0,2850	65,0
45,87	0,58	15,23	79,22	0,574	45,44	0,58	64,89	0,2065	37,6

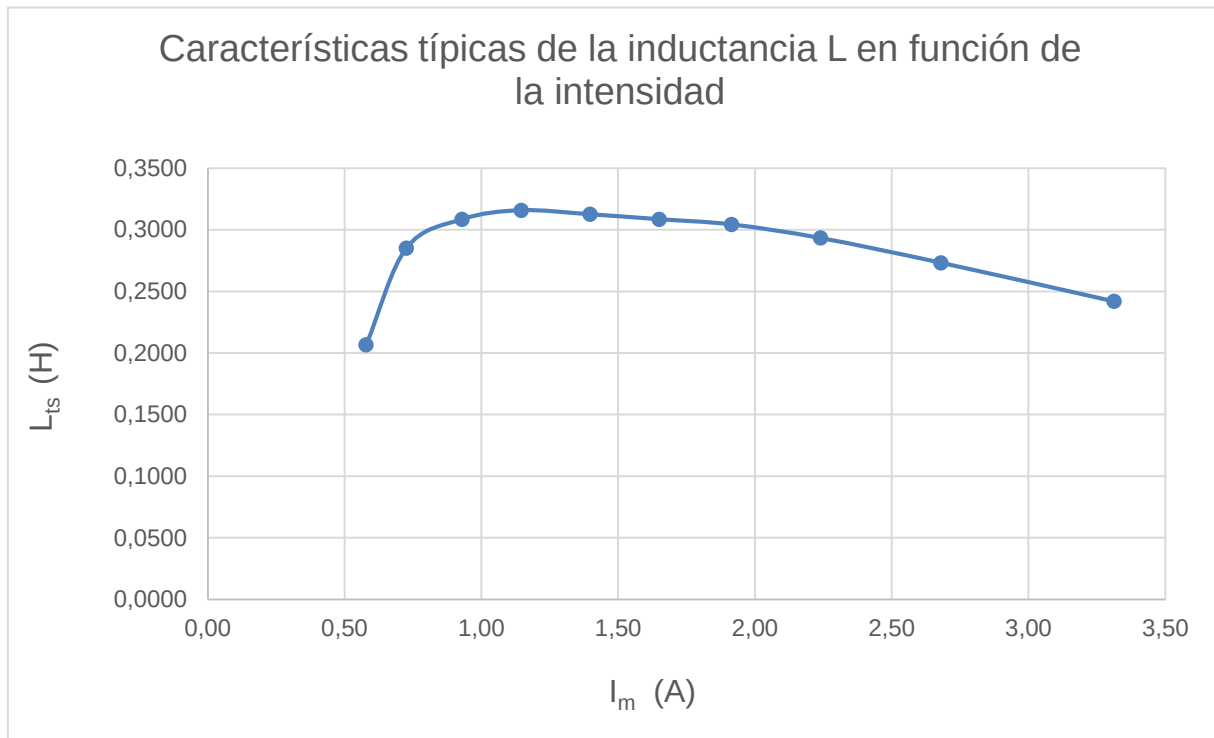


Figura nº 4.7 Características típicas de la inductancia L en función de la intensidad I

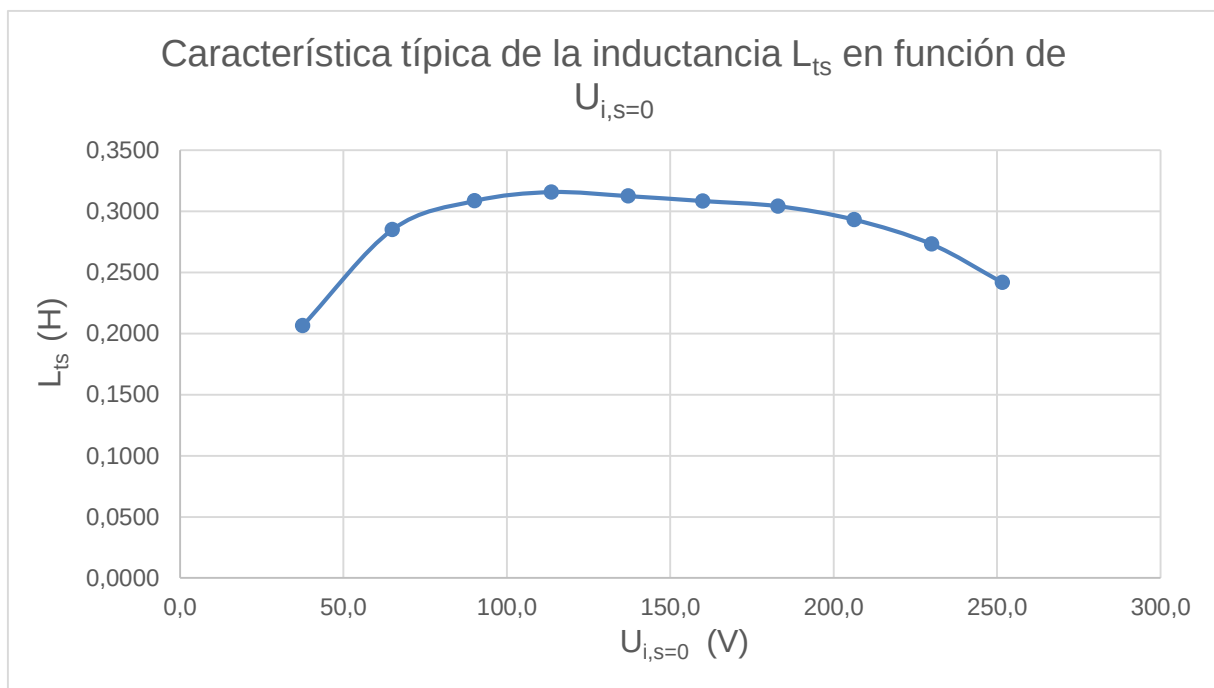


Figura nº 4.8 Características típicas de la inductancia L_{ts} en función de la tensión $U_{i,s=0}$

- Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro

Apartado 6,5 (s=0)			Apartado 7,4				
U (V)	I (A)	P ₁ (W)	I _s (A)	P _K (W)	U _{i,s=0} (V)	(U _{i,s=0}) ² (V ²)	P _{fe} (W)
252,43	3,31	67,267	3,313	44,16	251,62	63310,42	30,47
230,83	2,68	54,33	2,680	39,22	229,94	52873,01	25,53
207,23	2,24	44,20	2,240	33,64	206,29	42556,30	19,95
184,07	1,92	37,43	1,915	29,71	183,03	33498,57	16,03
161,10	1,65	31,60	1,651	25,86	159,96	25586,87	12,18
138,50	1,40	26,93	1,397	22,82	137,15	18810,73	9,14
115,23	1,15	21,93	1,146	19,17	113,63	12912,21	5,49
92,57	0,93	19,67	0,930	17,85	90,12	8121,39	4,16
69,07	0,73	17,00	0,726	15,89	64,97	4221,39	2,21
45,87	0,58	15,23	0,579	14,53	37,57	1411,55	0,84

P _{fw} (W)	P _{fe} (W)	R _{fe} (Ω)
13,684	25,53	2070,9117

- Inductancia de dispersión total a partir del ensayo con rotor bloqueado

H (mm)	100
γ _r (S/m)	33000000
k _σ	1

h (m)	ξ	k _i
0,017	1,3721	0,921

Apartado 6,6			Apartado 7,5,3						
U (V)	I (A)	P ₁ (W)	Z (Ω)	Cos φ	R (Ω)	I _σ (A)	X _{σa} (Ω)	L _{σa} (H)	L _{tσ} (H)
53,00	6,87	193,00	7,7110	0,5298	4,0853	6,873	6,5398	0,02082	0,021670
48,03	6,22	156,40	7,7224	0,5235	4,0426	6,220	6,5798	0,02094	0,021803
44,03	5,51	122,20	7,9964	0,5040	4,0299	5,507	6,9067	0,02198	0,022886
35,70	4,59	84,40	7,7834	0,5154	4,0119	4,587	6,6698	0,02123	0,022101
32,10	4,12	67,90	7,7850	0,5130	3,9937	4,123	6,6825	0,02127	0,022143
26,73	3,44	46,90	7,7789	0,5105	3,9710	3,437	6,6889	0,02129	0,022164
21,30	2,74	29,67	7,7832	0,5089	3,9612	2,737	6,6998	0,02133	0,022200
15,80	2,03	16,27	7,7743	0,5066	3,9383	2,032	6,7030	0,02134	0,022211
10,73	1,39	7,57	7,7218	0,5072	3,9163	1,390	6,6550	0,02118	0,022052
3,73	0,49	0,90	7,6607	0,4947	3,7896	0,487	6,6578	0,02119	0,022061

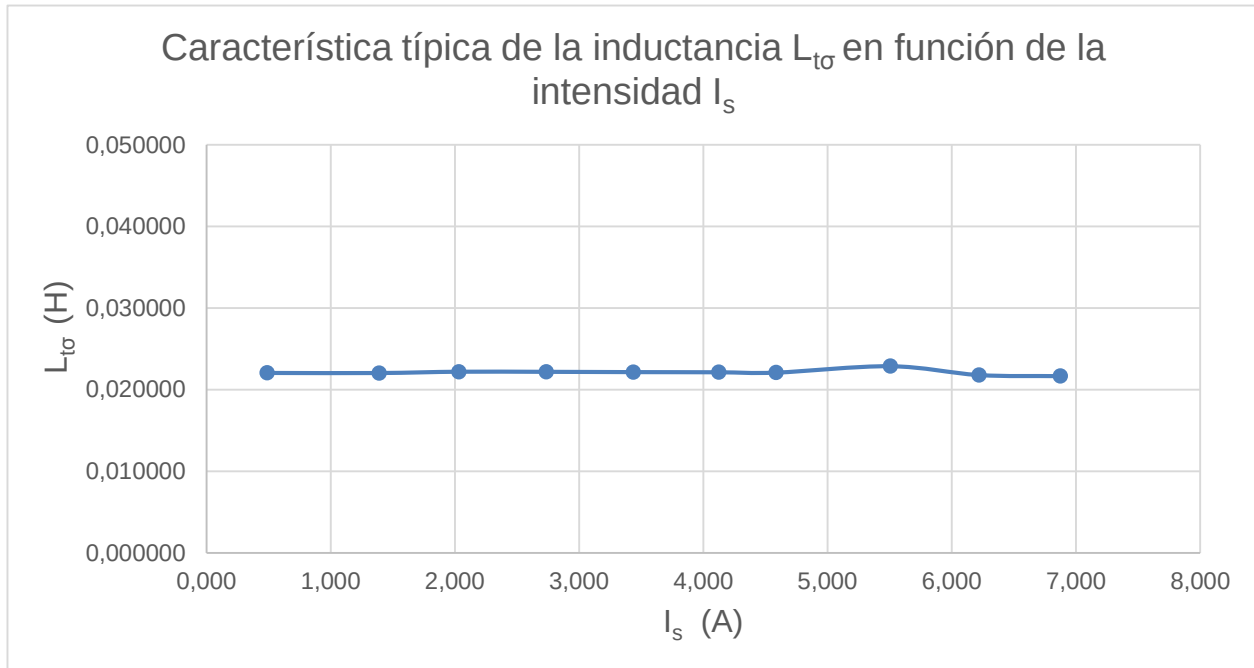


Figura nº 4.9 Características típicas de la inductancia L_{σ} en función de la intensidad I_s

- Inductancia y tensión de magnetización, inductancia de dispersión del estátor y del rotor. A partir de un ensayo con rotor bloqueado

Apartado 7,3		Apartado 7,6,1			Apartado 7,7,1	
I_m (A)	L_{ts} (H)	L_{σ} (H)	L_m (A)	U_m (V)	$L_{\sigma s}$ (H)	$L_{\sigma r'}$ (H)
3,3133	0,2417	0,0222	0,2306	240,0768	0,011085	0,010585
2,6800	0,2731	0,0222	0,2620	220,5952	0,011101	0,010702
2,2400	0,2931	0,0222	0,2820	198,4778	0,011104	0,011782
1,9153	0,3042	0,0222	0,2931	176,3525	0,011091	0,011010
1,6510	0,3084	0,0221	0,2973	154,2233	0,011058	0,011085
1,3973	0,3124	0,0221	0,3014	132,3116	0,011027	0,011137
1,1457	0,3157	0,0221	0,3047	109,6630	0,011027	0,011173
0,9300	0,3084	0,0221	0,2974	86,8967	0,011028	0,011183
0,7257	0,2850	0,0221	0,2740	62,4578	0,011029	0,011023
0,5790	0,2065	0,0221	0,1955	35,5642	0,011030	0,011031

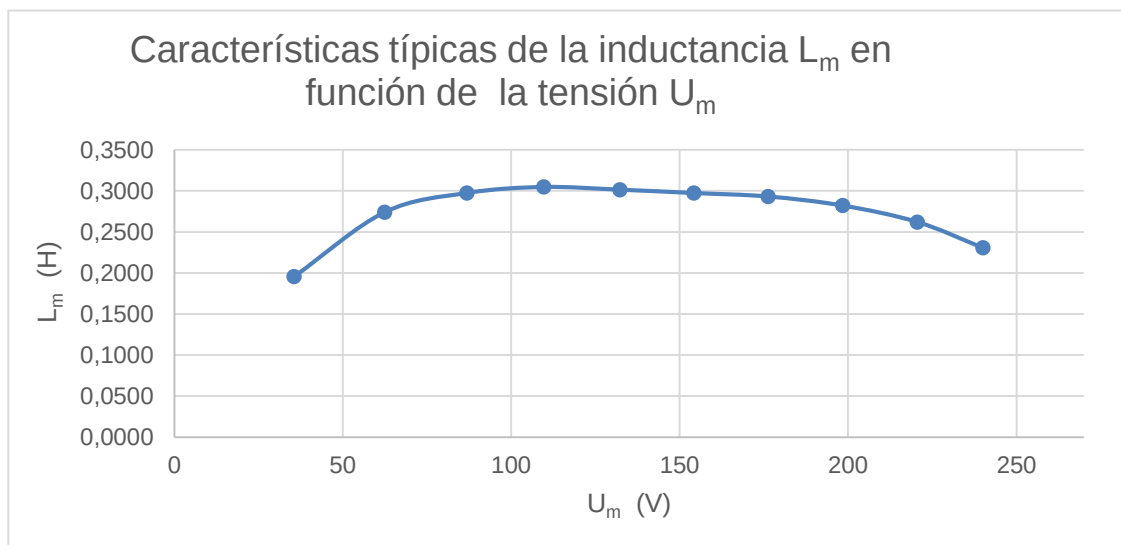


Figura nº 4.10 Características típicas de la inductancia L_m en función de la tensión U_m

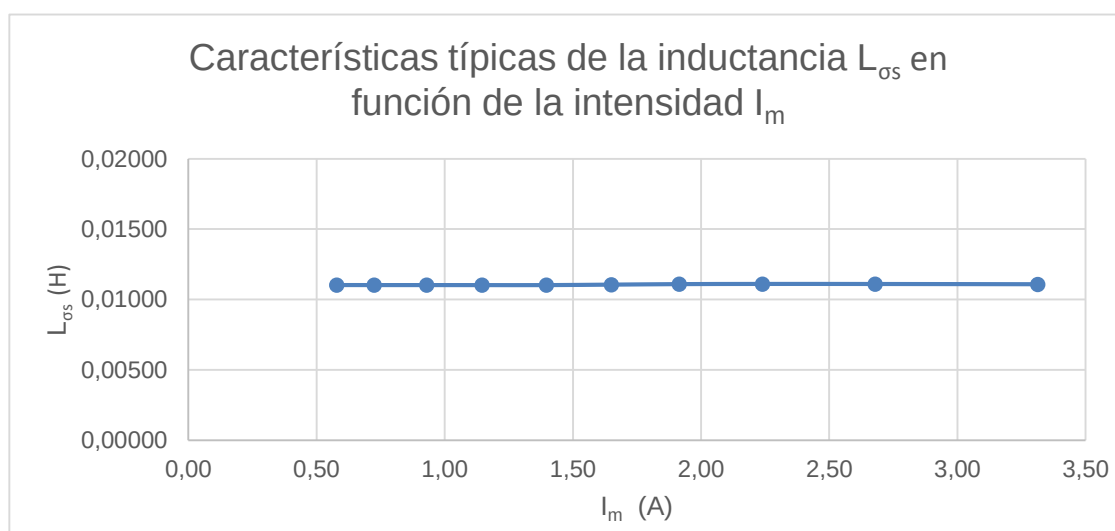


Figura nº 4.11 Características típicas de la inductancia $L_{\sigma s}$ en función de la intensidad I_m

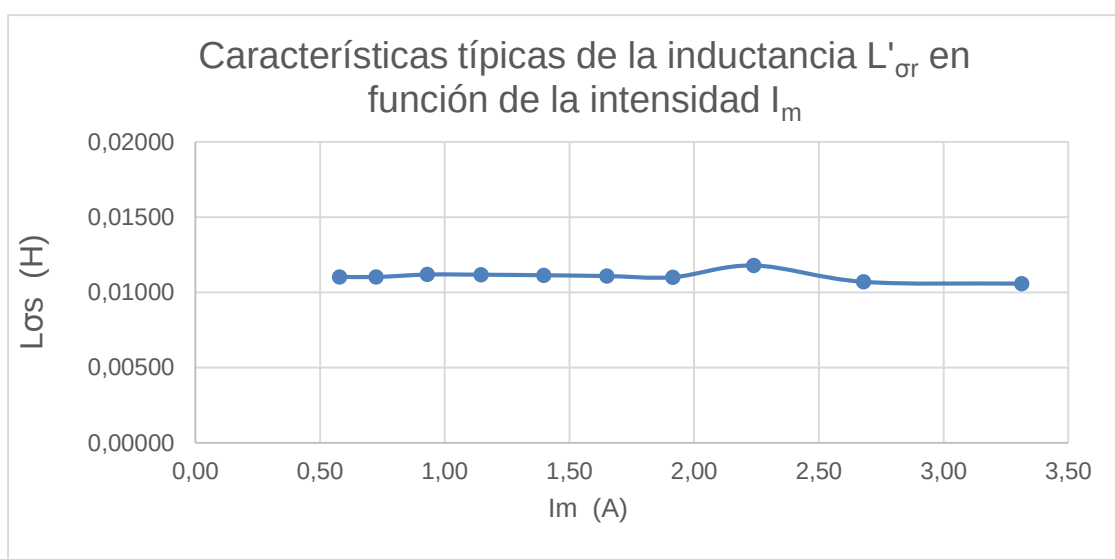


Figura nº 4.12 Características típicas de la inductancia $L'_{\sigma r}$ en función de la intensidad I_m

- Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada) a partir de un ensayo con rotor bloqueado

I_s (A)	4,6
L_s (H)	0,0110
U_s (V)	230,9401

U_{ma} (V)	213,4670
U_{mb} (V)	-6,6609
U_m (V)	213,5709
L_m (H)	0,2684

I'_r (A)	3,7241
L'_r (H)	0,01050

- Resistencia de la jaula del rotor a partir de un ensayo de rotor bloqueado

Apartado 6,3			
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	n (rpm)
230	4,6	809,1242	1450

n_{syn} (rpm)	1500
S	0,0333
U_s (V)	230,00
I_s (A)	4,6
$\cos\varphi$	0,790
L_s (H)	0,0110
X_s (Ω)	3,4728

U_{ma} (V)	212,1548
U_{mb} (V)	-6,3722
U_m (V)	212,2504
L_m (H)	0,2695
X_m (Ω)	84,6865

I'_r (A)	3,7226
L'_r (H)	0,0105
X'_r (Ω)	3,3015

Z (Ω)	50
X (Ω)	30,6553
$R_{r,2s}'$ (Ω)	1,8074

- Resistencia de pérdidas en el hierro a partir de un ensayo con rotor bloqueado

R_{fe} (Ω)	2067,4349
-----------------------	-----------

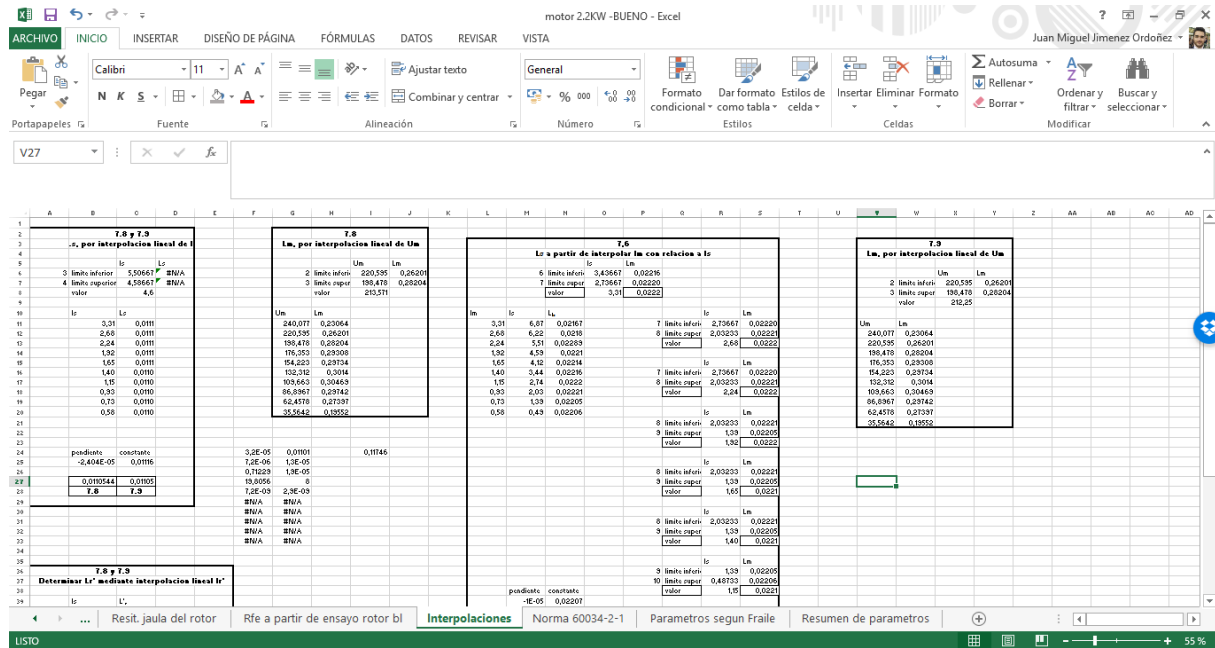


Figura nº 4.12.1 Impresión de pantalla hoja de cálculo utilizada en el TFG

4.1.3. Motor de 3 kW**4.1.3.1. Datos del motor**

Potencia: 3 kW
Tensiones: 400/230 V (estrella/triángulo)
Intensidades: 6,3/10,9 A (estrella/triángulo)
Frecuencia: 50 Hz
Cos ϕ_N : 0,79

4.1.3.2. Datos del ensayo a rotor libre

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos ϕ_N
110% de la tensión nominal (253 V)				
U	253,2	4,09	83,8	0,08
V	252,8	4,44	122,5	0,11
W	255,9	4,35	30,4	0,03
100% de la tensión nominal (230 V) asignada				
U	229,8	3,21	48,5	0,07
V	229,8	3,23	71,3	0,10
W	232,1	3,30	57,9	0,08
90% de la tensión nominal (207 V)				
U	207,0	2,67	33,2	0,06
V	207,4	2,61	51,4	0,09
W	209,0	2,71	54,7	0,10
80% de la tensión nominal (184 V)				
U	184,1	2,29	23,9	0,06
V	184,0	2,14	39,0	0,10
W	185,9	2,31	56,0	0,13
70% de la tensión nominal (161 V)				
U	160,4	1,92	19,0	0,06
V	160,1	1,79	32,5	0,11
W	161,7	1,95	45,8	0,15
60% de la tensión nominal (138 V)				
U	138,1	1,61	21,8	0,10
V	138,2	1,55	27,1	0,13
W	139,1	1,62	31,6	0,14
50% de la tensión nominal (115 V)				
U	114,4	1,29	16,7	0,11
V	114,5	1,27	22,9	0,16
W	115,4	1,34	25,2	0,16

40% de la tensión nominal (92 V)				
U	91,8	1,03	16,9	0,18
V	92,2	1,02	18,3	0,19
W	92,8	1,04	18,8	0,19
30% de la tensión nominal (69 V)				
U	68,5	0,78	13,4	0,25
V	68,8	0,76	15,1	0,29
W	69,1	0,80	15,7	0,28
20% de la tensión nominal (46 V)				
U	46,1	0,58	11,6	0,43
V	46,2	0,57	13,5	0,52
W	46,6	0,63	14,1	0,48

Realizamos una media aritmética entre los valores de las tres fases y los resultados son:

Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ_N
253,97	4,29	78,9	0,07
230,57	3,25	59,2	0,08
207,80	2,66	46,4	0,08
184,67	2,25	39,6	0,10
160,73	1,89	32,4	0,11
138,47	1,59	26,8	0,12
114,77	1,30	21,6	0,14
92,27	1,03	18,0	0,19
68,80	0,78	14,7	0,27
46,30	0,59	13,0	0,48

4.1.3.3. Datos del ensayo a rotor bloqueado

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ_N
150% de la intensidad nominal (9,45 A)				
Valor de línea	59,6	9,45	287,6	0,51
135% de la intensidad nominal (8,51 A)				
U	53,4	8,49	231,4	0,51
V	52,4	8,36	218,8	0,50
W	52,3	8,35	229,3	0,53
120% de la intensidad nominal (7,56 A)				
U	47,3	7,47	177,4	0,50
V	46,4	7,38	168,6	0,49
W	46,4	7,38	177,6	0,52

105% de la intensidad nominal (6,3 A) asignada				
U	39,8	6,23	122,8	0,50
V	39,0	6,17	116,7	0,49
W	39,1	6,18	123,6	0,51
90% de la intensidad nominal (5,67 A)				
U	32,0	5,00	78,5	0,49
V	31,4	4,94	74,1	0,48
W	31,4	4,95	78,7	0,51
75% de la intensidad nominal (4,73 A)				
U	28,4	4,61	65,0	0,49
V	28,7	4,61	66,1	0,00
W	29,0	4,63	68,2	0,00
60% de la intensidad nominal (3,78 A)				
U	24,3	3,79	44,7	0,49
V	24,0	3,77	42,9	0,47
W	24,0	3,77	45,5	0,50
45% de la intensidad nominal (2,84 A)				
U	16,1	2,51	19,6	0,48
V	15,8	2,48	18,6	0,47
W	16,0	2,51	20,1	0,50
30% de la intensidad nominal (1,89 A)				
U	10,5	1,63	8,3	0,48
V	10,4	1,65	8,5	0,47
W	10,4	1,66	8,6	0,48
10% de la intensidad nominal (0,63 A)				
U	5,2	0,82	2,1	0,47
V	5,1	0,82	2,0	0,47
W	5,3	0,84	2,2	0,47

Realizamos una media aritmética entre los valores de las tres fases y los resultados son:

Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ_N
59,69	9,45	287,68	0,51
52,70	8,40	226,50	0,51
46,70	7,41	174,53	0,50
39,30	6,19	121,03	0,50
31,60	4,96	77,10	0,49
28,70	4,62	66,43	0,49
24,10	3,78	44,37	0,49
15,97	2,50	19,43	0,48
10,43	1,65	8,47	0,48
5,20	0,83	2,10	0,47

4.1.3.4. Obtención de los parámetros del circuito equivalente

- Valores asignados

TIPO	M3AA100LD-4
P_{2N}	3000 W
Conexión	Y (estrella)
f_N	50 Hz
2p	4
U_N	400 V (línea)
I_N	6,3 A (fase)
Cos φ_N	0,79

Altura de eje	100 mm
k_s	235 °C
k_r	235 °C
γ_r	33*10 ⁶ S/m
U_s	230,94 V (fase)

- Medida de la resistencia del estátor entre fases R_{11,m} (6.2)

R_{U-X} (Ω)	3,4
R_{V-Y} (Ω)	3,4
R_{W-Z} (Ω)	3,4

R_{11,m} (Ω)	3,4
-----------------------------	-----

- Resistencia del devanado del estátor (7.2)

R_{S,25} (Ω)	1,7105
-----------------------------	--------

- Inductancia total del estátor L_{ts}

Apartado 6,5 (s=0)			Apartado 7,3						
U (V)	I (A)	P1 (W)	Z _{s=0} (Ω)	Cos φ	R _{s=0} (Ω)	I _m (A)	X _{ts} (Ω)	L _{ts} (H)	U _{i,s=0} (V)
253,97	4,29	78,90	59,15	0,07	4,28	4,29	59,00	0,1878	253,3
230,57	3,25	59,23	71,02	0,08	5,62	3,25	70,79	0,2253	229,8
207,80	2,66	46,43	78,02	0,08	6,55	2,66	77,75	0,2475	207,1
184,67	2,25	39,63	82,20	0,10	7,85	2,25	81,82	0,2604	183,8
160,73	1,89	32,43	85,27	0,11	9,13	1,89	84,78	0,2699	159,8
138,47	1,59	26,83	87,05	0,12	10,61	1,59	86,40	0,2750	137,4
114,77	1,30	21,60	88,53	0,15	12,85	1,30	87,59	0,2788	113,6
92,27	1,03	18,00	89,55	0,19	16,96	1,03	87,93	0,2799	90,6
68,80	0,78	14,73	87,90	0,27	24,05	0,78	84,55	0,2691	66,2
46,30	0,59	13,07	78,21	0,48	37,28	0,59	68,75	0,2188	40,7

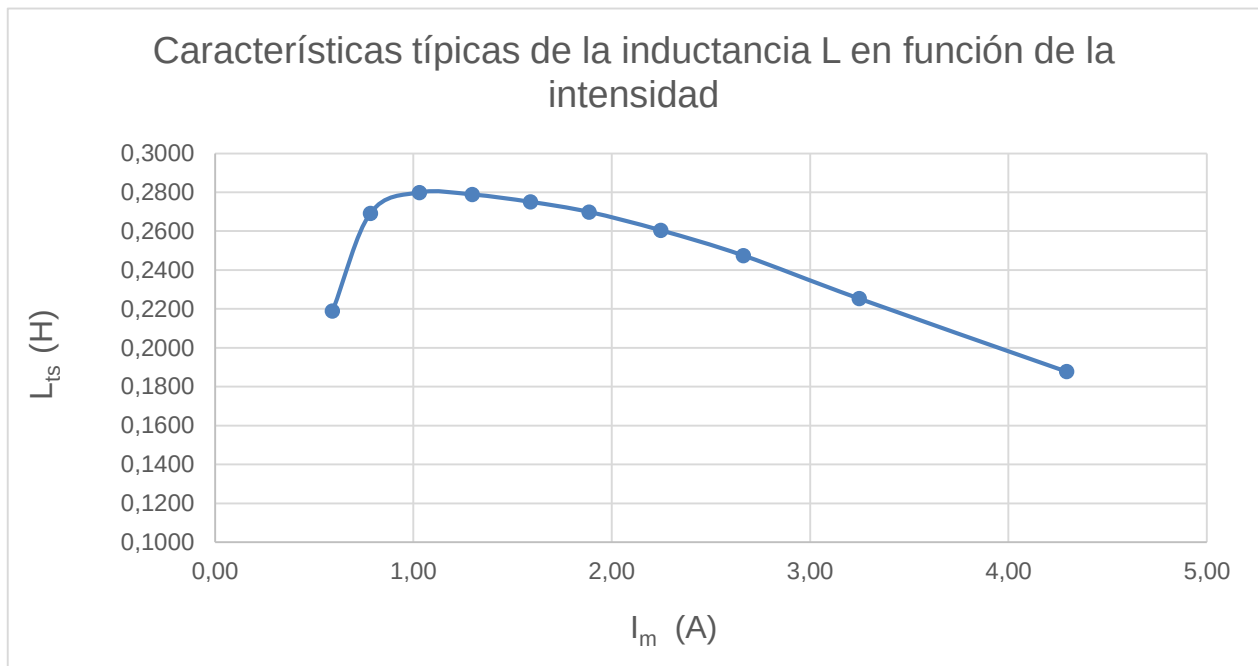


Figura nº 4.13 Características típicas de la inductancia L en función de la intensidad I

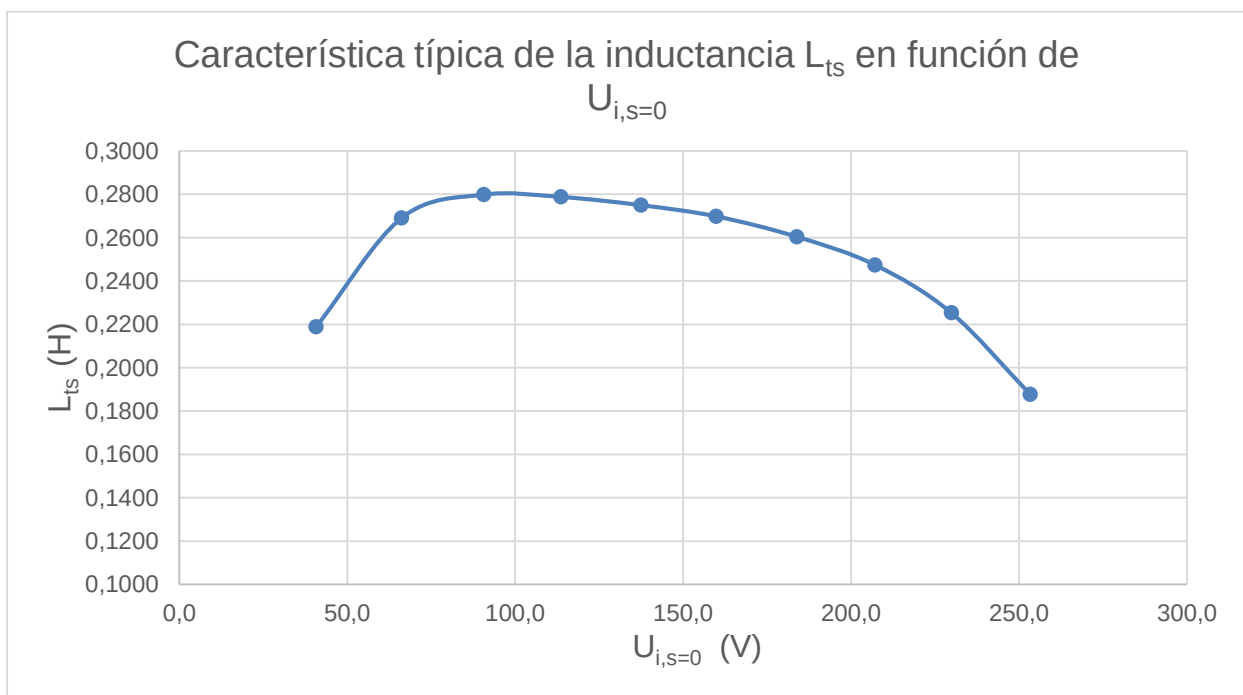


Figura nº 4.14 Características típicas de la inductancia L_{ts} en función de la tensión $U_{i,s=0}$

- Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro

Apartado 6,5 (s=0)			Apartado 7,4				
U (V)	I (A)	P ₁ (W)	I _s (A)	P _K (W)	U _{i,s=0} (V)	(U _{i,s=0}) ² (V ²)	P _{fe} (W)
253,97	4,29	78,90	4,293	47,492	253,30	64161,34	35,88
230,57	3,25	59,23	3,247	41,272	229,84	52828,13	41,27
207,80	2,66	46,43	2,663	34,347	207,07	42876,89	34,35
184,67	2,25	39,63	2,247	31,033	183,82	33790,57	31,03
160,73	1,89	32,43	1,885	26,379	159,81	25539,16	26,38
138,47	1,59	26,83	1,591	22,522	137,44	18888,45	22,52
114,77	1,30	21,60	1,296	18,737	113,55	12893,75	18,74
92,27	1,03	18,00	1,030	16,191	90,60	8207,93	16,19
68,80	0,78	14,73	0,783	13,690	66,17	4379,08	13,69
46,30	0,59	13,07	0,592	12,469	40,70	1656,51	12,47

P _{fw} (W)	P _{fe} (W)	R _{fe} (Ω)
11,615	29,66	1781,2865

- Inductancia de dispersión total a partir del ensayo con rotor bloqueado

H (mm)	100
γ _r (S/m)	33000000
k _σ	1

h (m)	ξ	k _i
0,017	1,3721	0,921

Apartado 6,6			Apartado 7,5,3						
U (V)	I (A)	P ₁ (W)	Z (Ω)	Cos φ	R (Ω)	I _σ (A)	X _{σa} (Ω)	L _{σa} (H)	L _{tσ} (H)
59,69	9,45	287,68	6,3161	0,5100	3,2214	9,45	5,4328	0,01729	0,018002
52,70	8,40	226,50	6,2738	0,5117	3,2100	8,40	5,3904	0,01716	0,017861
46,70	7,41	174,53	6,3023	0,5044	3,1786	7,41	5,4420	0,01732	0,018032
39,30	6,19	121,03	6,3455	0,4973	3,1554	6,19	5,5054	0,01752	0,018242
31,60	4,96	77,10	6,3667	0,4916	3,1297	4,96	5,5443	0,01765	0,018372
28,70	4,62	66,43	6,2166	0,5014	3,1169	4,62	5,3787	0,01712	0,017823
24,10	3,78	44,37	6,3813	0,4875	3,1106	3,78	5,5718	0,01774	0,018463
15,97	2,50	19,43	6,3867	0,4868	3,1093	2,50	5,5787	0,01776	0,018485
10,43	1,65	8,47	6,3348	0,4927	3,1212	1,65	5,5124	0,01755	0,018266
5,20	0,83	2,10	6,2954	0,4889	3,0779	0,83	5,4917	0,01748	0,018197

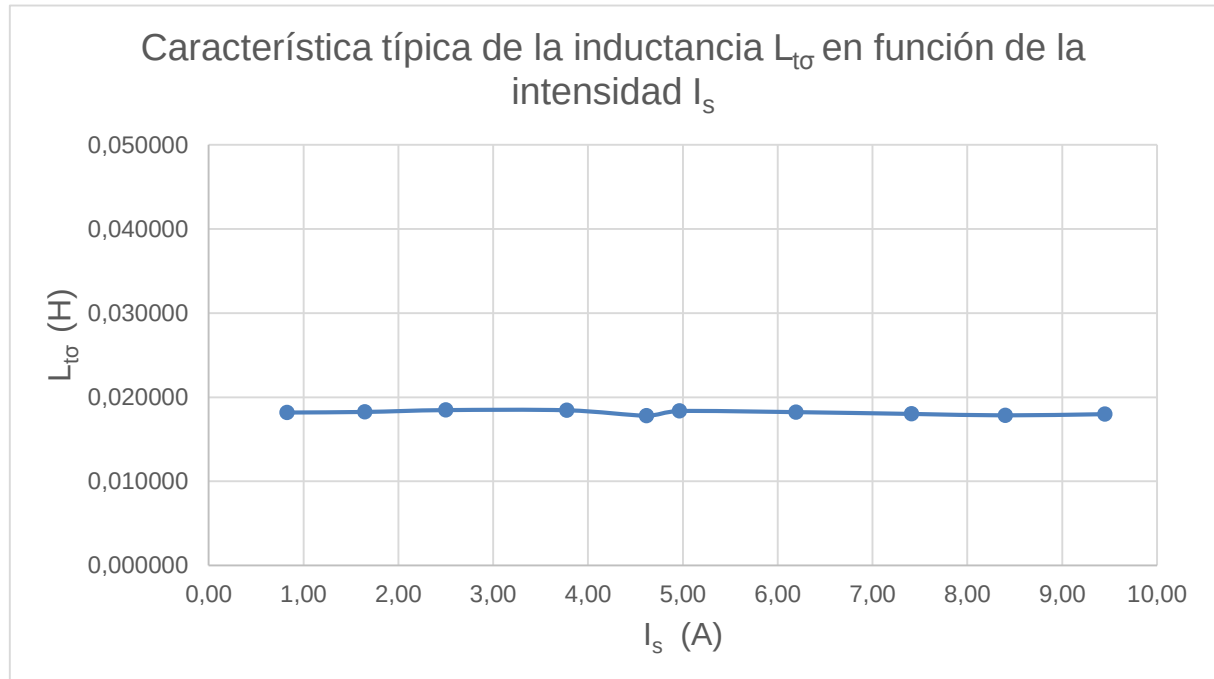


Figura nº 4.15 Características típicas de la inductancia L_{σ} en función de la intensidad I_s

- Inductancia y tensión de magnetización, inductancia de dispersión del estátor y del rotor. A partir de un ensayo con rotor bloqueado

Apartado 7,3		Apartado 7,6,1			Apartado 7,7,1	
I_m (A)	L_{ts} (H)	L_{σ} (H)	L_m (A)	U_m (V)	$L_{\sigma s}$ (H)	$L_{or'}$ (H)
4,2933	0,1878	0,0181	0,1788	241,1152	0,009035	0,008968
3,2467	0,2253	0,0185	0,2161	220,4232	0,009236	0,008625
2,6633	0,2475	0,0185	0,2382	199,3351	0,009241	0,008791
2,2467	0,2604	0,0184	0,2512	177,3215	0,009210	0,009032
1,8850	0,2699	0,0183	0,2607	154,3832	0,009164	0,009208
1,5907	0,2750	0,0183	0,2659	132,8725	0,009131	0,008692
1,2963	0,2788	0,0182	0,2697	109,8372	0,009118	0,009344
1,0303	0,2799	0,0182	0,2708	87,6498	0,009107	0,009378
0,7827	0,2691	0,0182	0,2600	63,9379	0,009097	0,009169
0,5920	0,2188	0,0182	0,2098	39,0100	0,009089	0,009108

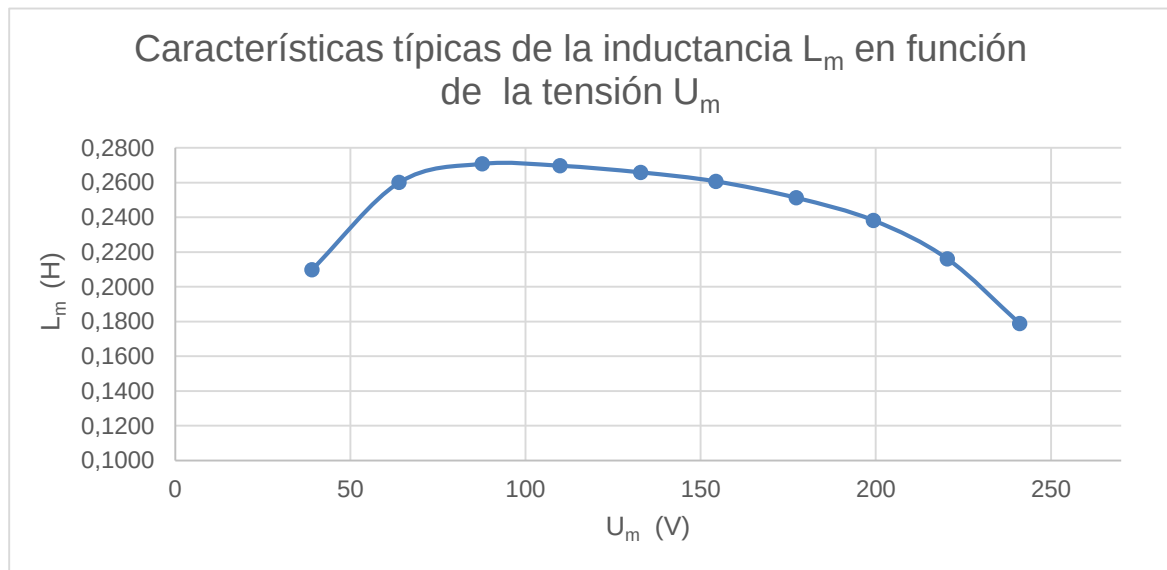


Figura nº 4.16 Características típicas de la inductancia L_m en función de la tensión U_m

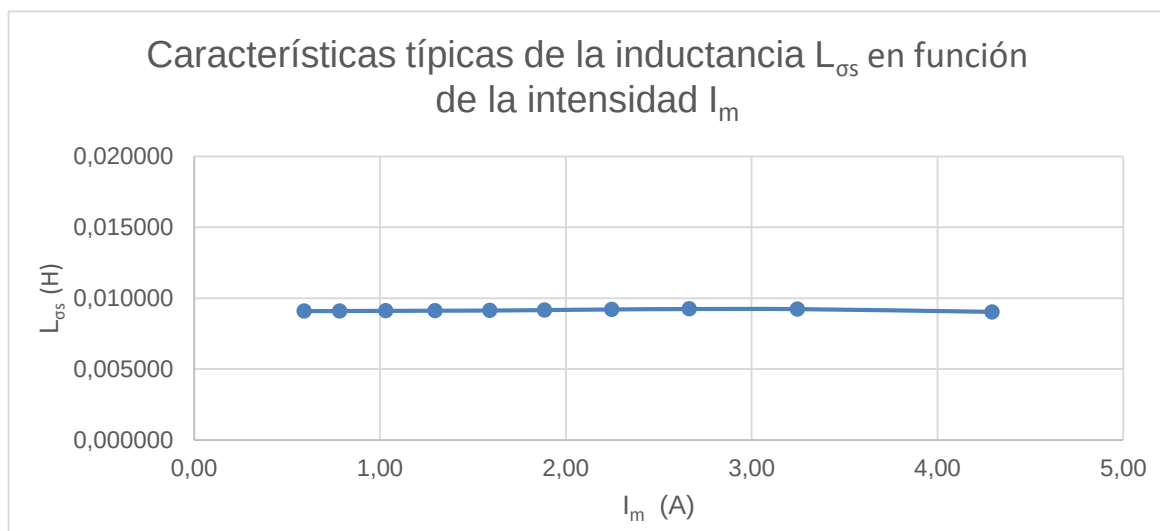


Figura nº 4.17 Características típicas de la inductancia $L_{\sigma s}$ en función de la intensidad I_m

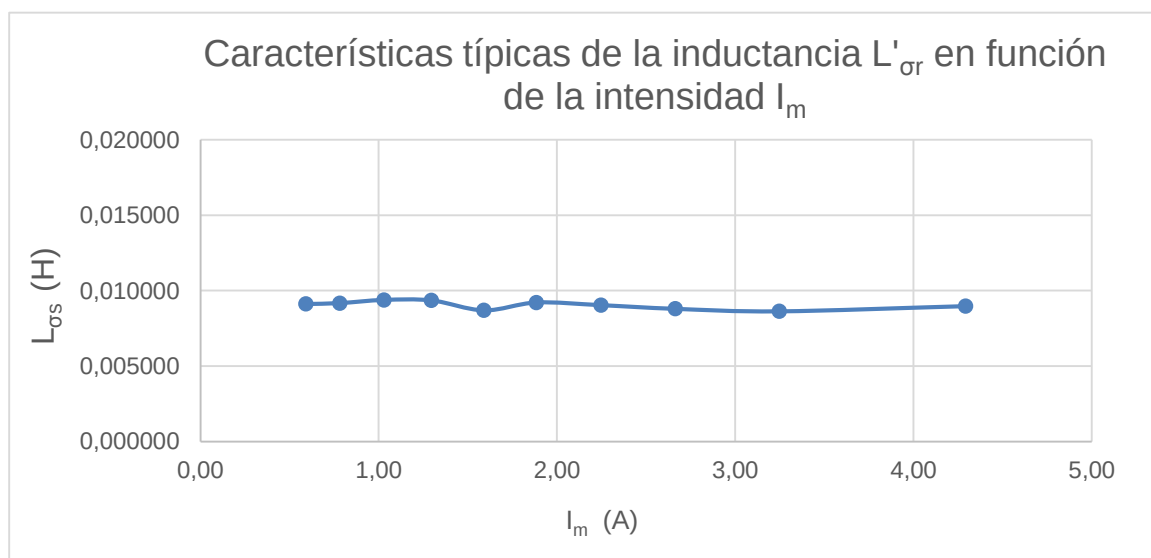


Figura nº 4.18 Características típicas de la inductancia $L'_{\sigma r}$ en función de la intensidad I_m

- Inductancias para cálculos a flujo constante (carga asignada) a partir de un ensayo con rotor bloqueado

I_s (A)	6,3
L_s (H)	0,0086
U_s (V)	230,9401

U_{ma} (V)	211,9324
U_{mb} (V)	-6,9152
U_m (V)	212,0452
L_m (H)	0,2249

I'_r (A)	5,1477
L'_r (H)	0,0092

- Resistencia de la jaula del rotor a partir de un ensayo de rotor bloqueado

Apartado 6,3			
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	n (rpm)
230	6,3	1159,7993	1445

n_{syn} (rpm)	1500
s	0,0367
U_s (V)	230
I_s (A)	6,3
$\cos\varphi$	0,79 (MG-1, 2003)
L_s (H)	0,0086
X_s (Ω)	2,7169

U_{ma} (V)	210,5797
U_{mb} (V)	-6,5950
U_m (V)	210,6829
L_m (H)	0,2263
X_m (Ω)	71,1032

I'_r (A)	5,1491
L'_r (H)	0,0092
X'_r (Ω)	2,9051

Z (Ω)	36,5079
X (Ω)	22,3832
$R_{r,25'}$ (Ω)	1,4824

- Resistencia de pérdidas en el hierro a partir de un ensayo con rotor bloqueado

R_{fe} (Ω)	1778,6895
-----------------------	-----------

motor 3KW - BUENO - Excel

Juan Miguel Jimenez Ordóñez

Motor 3 kW	
U (V)	230
I (A)	6,3
P1 (W)	1159,7993
n (rpm)	1445
n_{syn} (rpm)	1500
s	0,0367
U_s (V)	230,00
I_s (A)	6,3
$\cos\phi$	0,790
L_s (H)	0,00864831
X_s (Ω)	2,71694544
U_{mag} (V)	210,579743
U_{ms} (V)	-6,5950175
U_m (V)	210,68299
L_m (H)	0,22632852
X_m (Ω)	71,1032019
Z (Ω)	36,5079365
X (Ω)	22,3832657
R_{eqs} (Ω)	1,48247386
I_r (A)	5,14918759
L_r (H)	0,00924732
X_r (Ω)	2,90513211

Resit. jaula del rotor

Rfe a partir de ensayo rotor bl

Interpolaciones

Norma 60034-2-1

Parametros segun Fraile

Resumen de parametros

LISTO

85 %

Figura nº 4.18.1. Impresión de pantalla hoja de cálculo utilizada para el TFG

4.2. Tablas resumen de datos obtenidos según la norma UNE-EN 60034-2-1

4.2.1. Motor 1,5 KW

TIPO	M3AA090LD-4
P_{2N}	1500 W
Conexión	Y (estrella)
f_N	50 Hz
2p	4
U_N	400 V (línea)
I_N	3,3 A (fase)
Cos φ_N	0,76

Altura de eje	90 mm
k_s	235 °C
k_r	235 °C
γ_r	33*10 ⁶ S/m
U_s	230,94 V (fase)

4.2.1.1. Datos del ensayo a rotor libre a tensión asignada (230 V)

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ _N
U	230,8	2,39	37,5	0,07
V	231,6	2,27	32,0	0,06
W	231,6	2,33	63,8	0,12

4.2.1.2. Datos del ensayo a rotor bloqueado a intensidad asignada (3.3 A)

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ _N
U	35,2	3,36	73,5	0,62
V	35,1	3,54	75,3	0,62
W	35,0	3,35	73,3	0,63

4.2.1.3. Parámetros del circuito equivalente

X _s (Ω)	X' _r (Ω)	X _m (Ω)	R _{fe} (Ω)	R' _s (Ω)	R' _r (Ω)
4,2902	6,3847	94,9868	1904,0238	3,0115	3,0542

4.2.2. Motor 2,2 kW

TIPO	M3AA100Lc-4
P_{2N}	2200 W
Conexión	Y (estrella)
f_N	50 Hz
2p	4
U_N	400 V (línea)
I_N	4,6 A (fase)
Cos φ_N	0,79

Altura de eje	100 mm
k_s	235 °C
k_r	235 °C
γ_r	33*10 ⁶ S/m
U_s	230,94 V (fase)

4.2.2.1. Datos del ensayo a rotor libre a tensión asignada (230 V)

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ _N
U	230,0	2,63	32,1	0,05
V	230,5	2,62	74,0	0,12
W	232,0	2,79	56,9	0,09

4.2.2.2. Datos del ensayo a rotor bloqueado a intensidad asignada (4,6 A)

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ _N
U	36,0	4,62	83,8	0,50
V	35,6	4,53	83,1	0,52
W	35,5	4,61	86,3	0,53

4.2.2.3. Parámetros del circuito equivalente

X _s (Ω)	X' _r (Ω)	X _m (Ω)	R _{fe} (Ω)	R' _s (Ω)	R' _r (Ω)
3,2218	4,8274	82,9173	1850,2532	2,1130	1,7117

4.2.3. Motor 3 kW

TIPO	M3AA100LD-4
P_{2N}	3000 W
Conexión	Y (estrella)
f_N	50 Hz
2p	4
U_N	400 V (línea)
I_N	6,3 A (fase)
Cos φ_N	0,79

Altura de eje	100 mm
k_s	235 °C
k_r	235 °C
γ_r	33*10 ⁶ S/m
U_s	230,94 V (fase)

4.2.3.1. Datos del ensayo a rotor libre a tensión asignada (230 V)

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ _N
U	229,8	3,21	48,5	0,07
V	229,8	3,23	71,3	0,10
W	232,1	3,3	57,9	0,08

4.2.3.2. Datos del ensayo a rotor bloqueado a intensidad asignada (6,3 A)

Fases	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Cos φ _N
U	39,8	6,23	122,80	0,50
V	39,0	6,17	116,70	0,49
W	39,1	6,18	123,60	0,51

4.2.3.3. Parámetros del circuito equivalente

X _s (Ω)	X' _r (Ω)	X _m (Ω)	R _{fe} (Ω)	R' _s (Ω)	R' _r (Ω)
2,6319	3,9265	68,3839	1608,3203	1,7105	1,3005

Capítulo nº 5

CONCLUSIONES

5.1. Comparación de datos entre las dos normas usadas

Para comparar los resultados obtenidos entre la norma UNE EN 60034-28 y la norma UNE EN 60034-2-1, se va a presentar el circuito equivalente en T como en la figura nº 5. En él estarán reflejados los parámetros de cada elemento del circuito.

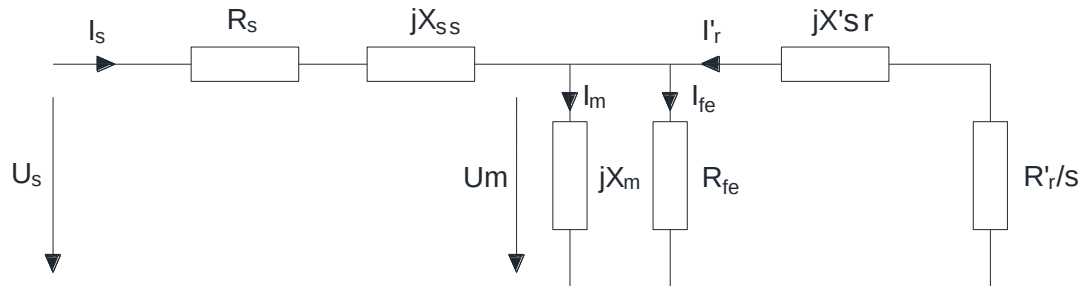


Figura nº 5. Circuito equivalente en T

5.1.1. Motor de 1.5 kW

5.1.1.1. Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-28

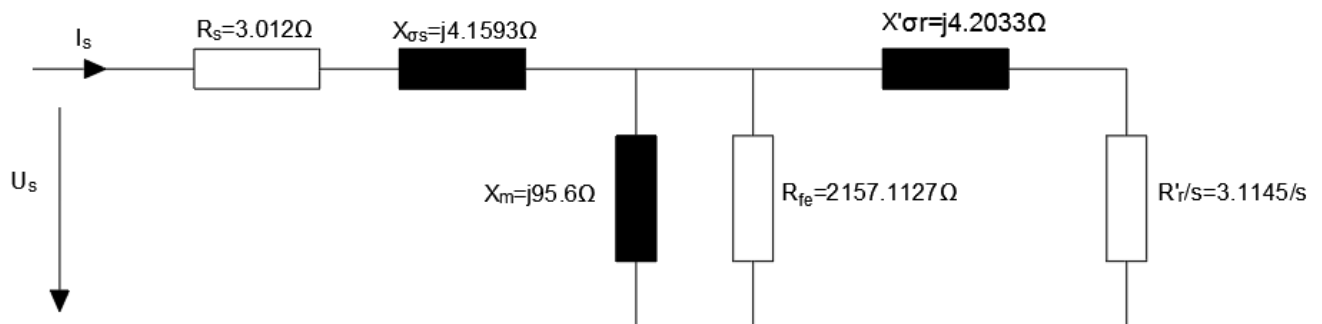


Figura nº 5.1. Circuito equivalente motor 1,5 kW según norma UNE EN 60034-28

$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R'_r (\Omega)$	$X'_r (\Omega)$	$X_m (\Omega)$	$R_{fe} (\Omega)$
3,012	4,1593	3,1145	4,2033	95,6	2157,1127

Tabla nº 5.1. Estimación de parámetros según norma UNE EN 60034-28 del motor 1,5 kW

5.1.1.2. Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-2-1

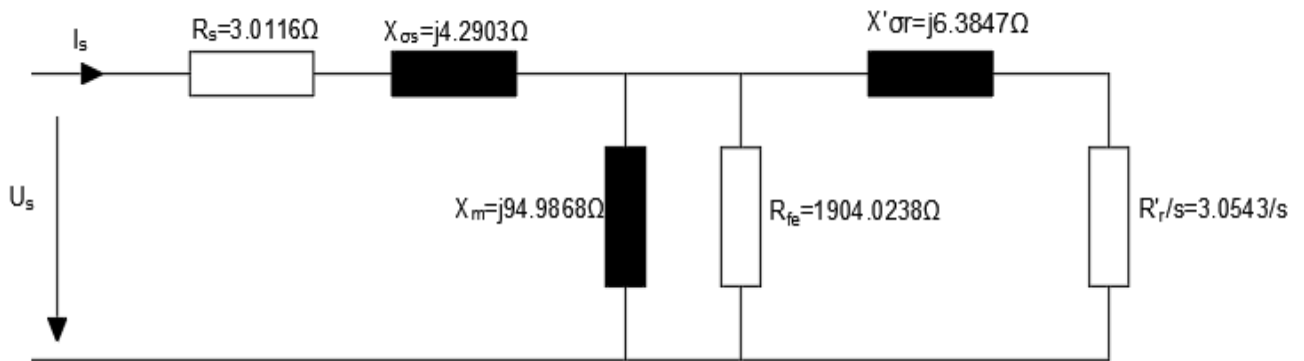


Figura nº 5.2. Circuito equivalente motor 1,5 kW según norma UNE EN 60034-2-1

R_s (Ω)	X_s (Ω)	R'_r (Ω)	X'_r (Ω)	X_m (Ω)	R_{fe} (Ω)
3,0116	4,2903	3,0543	6,3847	94,9868	1904,0238

Tabla nº 5.2. Estimación de parámetros según norma UNE EN 60034-2-1 del motor 1,5 kW

5.1.2. Motor 2,2 kW

5.1.2.1. Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-28

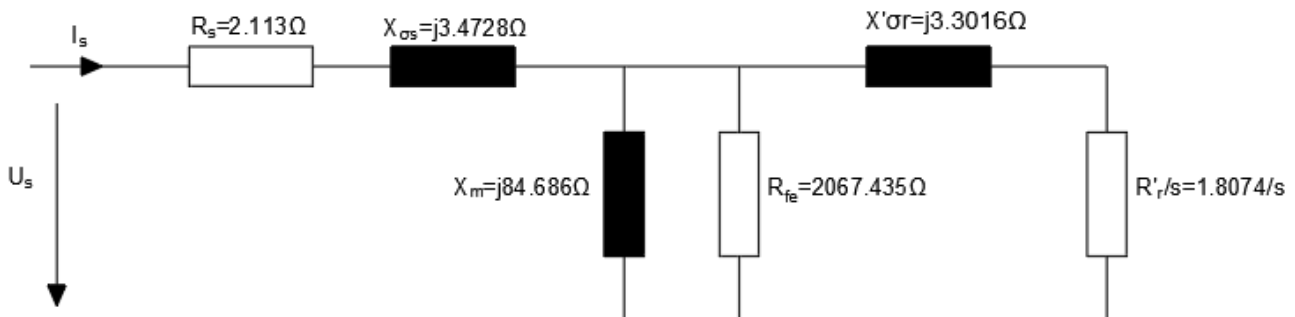


Figura nº 5.3. Circuito equivalente motor 2,2 kW según norma UNE EN 60034-28

R_s (Ω)	X_s (Ω)	R'_r (Ω)	X'_r (Ω)	X_m (Ω)	R_{fe} (Ω)
2,1130	3,4728	1,8074	3,3016	84,6860	2067,4350

Tabla nº 5.3. Estimación de parámetros según norma UNE EN 60034-28 del motor 2,2 kW

5.1.2.2. Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-2-1

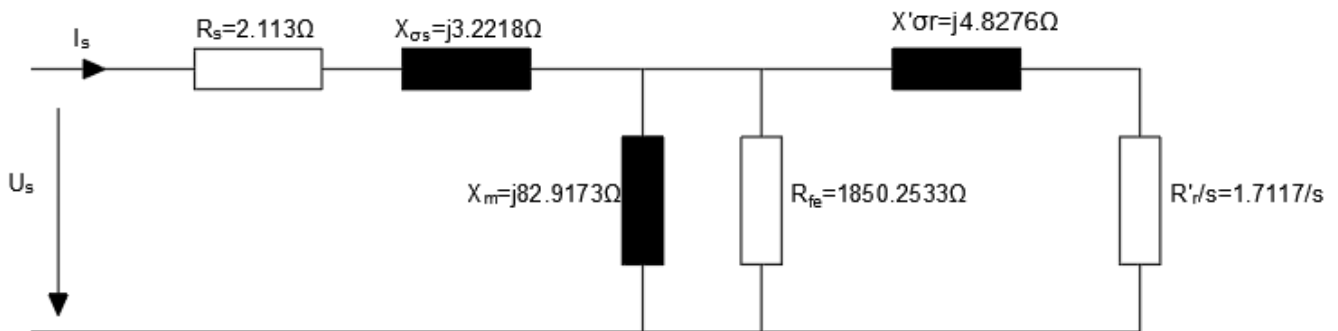


Figura nº 5.4. Circuito equivalente motor 2,2 kW según norma UNE EN 60034-2-1

R_s (Ω)	X_s (Ω)	R'_r (Ω)	X'_r (Ω)	X_m (Ω)	R_{fe} (Ω)
2,1130	3,2218	1,7117	4,8276	82,9173	1850,2533

Tabla nº 5.4. Estimación de parámetros según norma UNE EN 60034-2-1 del motor 2,2 kW

5.1.3. Motor de 3 kW

5.1.3.1. Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-28

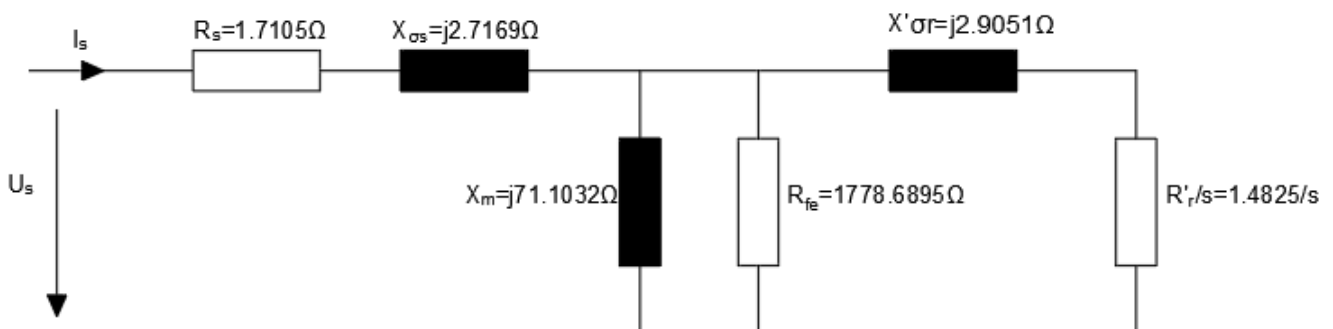


Figura nº 5.5. Circuito equivalente motor 3 kW según norma UNE EN 60034-28

R_s (Ω)	X_s (Ω)	R'_r (Ω)	X'_r (Ω)	X_m (Ω)	R_{fe} (Ω)
1,7105	2,7169	1,4825	2,9051	71,1032	1778,6895

Tabla nº 5.5. Estimación de parámetros según norma UNE EN 60034-28 del motor 3 kW

5.1.3.2. Estimación de parámetros obtenidos según norma UNE EN 60034-2-1

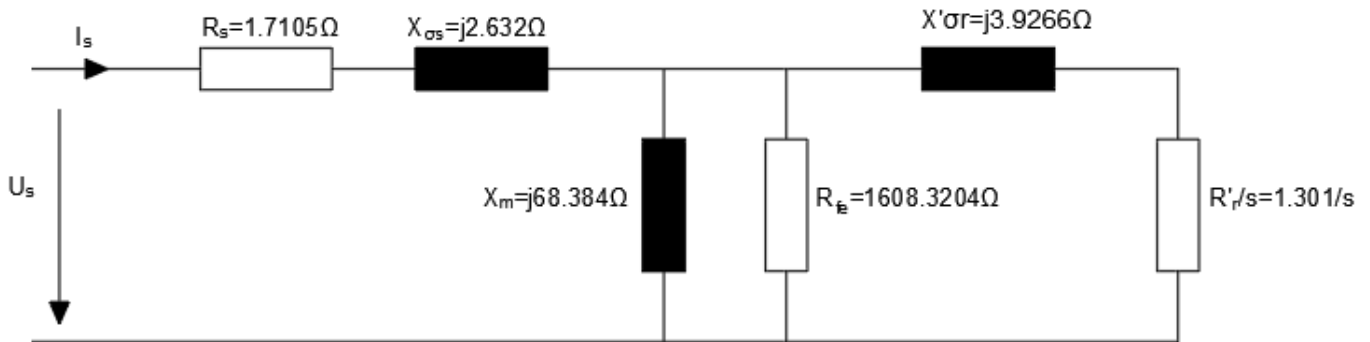


Figura nº 5.6. Circuito equivalente motor 3 kW según norma UNE EN 60034-2-1

$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R'_r (\Omega)$	$X'_r (\Omega)$	$X_m (\Omega)$	$R_{fe} (\Omega)$
1,7105	2,6320	1,3005	3,9266	68,3840	1608,3204

Tabla nº 5.6. Estimación de parámetros según norma UNE EN 60034-2-1 del motor 3 kW

5.2. Estimación de parámetros según Jesús Fraile Mora

En este apartado se van a estimar los parámetros del circuito equivalente de los tres motores descritos con anterioridad, para ello se va a hacer uso del método según Jesús Fraile Mora. Se van a necesitar los datos obtenidos en el ensayo a rotor libre y a rotor bloqueado.

5.2.1. Formulas según ensayo a rotor libre

Teniendo los datos del ensayo de vacío podemos calcular una serie de parámetros, pero en el único valor en el que nos vamos a basar es en el ensayo a tensión asignada (230 V). Las formulas para calcular los parámetros son las siguientes:

- Resistencia del estátor R_s : este valor se obtiene midiendo la resistencia por fase en el estátor.

- Pérdidas del cobre P_{cu} :

$$P_{cu} = I_0 * R_s \quad (5.2.-1)$$

Donde:

P_{cu} =Pérdidas en el cobre (W)

I_0 =Intensidad de vacío (A)

R_s =Resistencia del estátor (Ω)

- Pérdidas de la máquina:

$$P_0 = P_{Fe} + P_m + P_{cu1} \quad (5.2.-2)$$

Donde:

P_0 =Pérdidas de vacío

P_{Fe} =Pérdidas en el hierro

P_m =Pérdidas mecánicas

$$P_{Fe} + P_m = P_0 - P_{cu1} = P_0 - m_1 * R_s * I_0^2 \quad (5.2.-3)$$

- Factor de potencia:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{m_1 * V_{1n} * I_0} \quad (5.2.-4)$$

- Intensidad de pérdidas en el hierro:

$$I_{Fe} = I_0 * \cos \varphi_0 \quad (5.2.-5)$$

- Intensidad de magnetización:

$$I_\mu = I_0 * \sin \varphi_0 \quad (5.2.-6)$$

- Resistencia del hierro

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}} \quad (5.2.-7)$$

- Reactancia de magnetización:

$$X_{\mu} = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}} \quad (5.2.-8)$$

5.2.2. Formulas según ensayo a rotor bloqueado

Realizando este ensayo podemos calcular todos los parámetros de la rama de cortocircuito, para ello cogeremos el ensayo en el que la intensidad es la asignada. Se usaran las formulas:

- Factor de potencia:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{m_1 * V_{1cc} * I_{1n}} \quad (5.2.-9)$$

- Resistencia de cortocircuito:

$$R_{cc} = R_s + R'_r = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} * \cos \varphi_{cc} \quad (5.2.-10)$$

- Reactancia de cortocircuito:

$$X_{cc} = X_s + X'_r = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} * \sin \varphi_{cc} \quad (5.2.-11)$$

5.2.3. Resultados obtenidos

$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R'_r (\Omega)$	$X'_r (\Omega)$	$X_m (\Omega)$	$R_{fe} (\Omega)$
3,0000	4,0166	3,4036	4,0166	99,3898	2159,6497

Tabla nº 5.7. Estimación de parámetros para el motor de 1,5 kW según Jesús Fraile Mora

$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R'_r (\Omega)$	$X'_r (\Omega)$	$X_m (\Omega)$	$R_{fe} (\Omega)$
2,1000	3,3320	1,9214	3,3320	99,3898	2159,6497

Tabla nº 5.8. Estimación de parámetros para el motor de 2,2 kW según Jesús Fraile Mora

$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R'_r (\Omega)$	$X'_r (\Omega)$	$X_m (\Omega)$	$R_{fe} (\Omega)$
1,7000	2,7477	1,0728	2,7477	71,1078	1400,9348

Tabla nº 5.9. Estimación de parámetros para el motor de 3 kW según Jesús Fraile Mora

5.3. Evaluación de errores en la estimación de los parámetros

Se van a comprobar los errores cometidos entre los datos, para ello vamos a tomar como referencia los datos calculados según la norma UNE EN 60034-28, ya que esta norma realiza unos cálculos mas complejos y sus resultados son mucho mas aproximados que en la norma UNE EN 60034-2-1, que solo necesita unos pocos datos de entrada para calcula todos los parámetros.

	Valores según norma UNE EN 60034-2-1	Error %
$R_s (\Omega)$	3,0116	0
$X_s (\Omega)$	4,2903	3,149
$R'_r (\Omega)$	3,0543	1,934
$X'_r (\Omega)$	6,3847	51,89
$X_m (\Omega)$	94,9868	0,641
$R_{fe} (\Omega)$	1904,0238	11,732

	Valores según Jesús Fraile Mora	Error %
$R_s (\Omega)$	3,0000	0,385
$X_s (\Omega)$	4,0166	3,431
$R'_r (\Omega)$	3,4036	9,283
$X'_r (\Omega)$	4,0166	4,442
$X_m (\Omega)$	99,3898	3,964
$R_{fe} (\Omega)$	2159,6497	0,118

Tabla nº 5.10. Errores en los parámetros del motor de 1,5 kW

	Valores según norma UNE EN 60034-2-1	Error %
$R_s (\Omega)$	2,1130	0
$X_s (\Omega)$	3,2219	7,226
$R'_r (\Omega)$	1,7117	5,292
$X'_r (\Omega)$	4,8275	46,217
$X_m (\Omega)$	82,9173	2,089
$R_{fe} (\Omega)$	1850,2533	10,505

Tabla nº 5.11. Errores en los parámetros del motor de 2,2 kW

	Valores según Jesús Fraile Mora	Error %
$R_s (\Omega)$	2,1000	0,615
$X_s (\Omega)$	3,3320	4,054
$R'_r (\Omega)$	1,9214	6,311
$X'_r (\Omega)$	3,3320	0,923
$X_m (\Omega)$	99,3898	17,362
$R_{fe} (\Omega)$	2159,6497	4,460

	Valores según norma UNE EN 60034-2-1	Error %
$R_s (\Omega)$	1,7105	0
$X_s (\Omega)$	2,6320	3,127
$R'_r (\Omega)$	1,3005	12,275
$X'_r (\Omega)$	3,9266	35,160
$X_m (\Omega)$	68,3840	3,824
$R_{fe} (\Omega)$	1608,3203	9,578

Tabla nº 5.12. Errores en los parámetros del motor de 3 kW

	Valores según Jesús Fraile Mora	Error %
$R_s (\Omega)$	1,7000	0,615
$X_s (\Omega)$	2,7477	1,132
$R'_r (\Omega)$	1,0728	27,637
$X'_r (\Omega)$	2,7477	5,419
$X_m (\Omega)$	71,1078	0,007
$R_{fe} (\Omega)$	1400,9348	21,238

Como se puede observar entre todos los valores existe un error pequeño, como se ha comentado anteriormente, en la norma UNE EN 60034-2-1 los valores difieren mas y son mucho menos exactos, sobre todo el valor de la reactancia del rotor X'_r . Este error es debido a que según esta norma la relación que tiene que haber entre X_s/X'_r debe de ser de 0,67 segun la norma NEMA MG-1-2003(B3) por ser estos motores de clase B, y segun la norma UNE EN 60034-28 la relacion entre estos parámetros debe de ser de 1.

Y los valores obtenidos segun Jesus Fraile Mora, se aproximas bastante a los parámetros de referencia que hemos tomado, viendo los resultados podriamos decir que este metodo es bastante mas exacto que el seguido por la norma UNE EN 60034-2-1.

5.4. Comparación entre el par producido y el indicado por el fabricante.

Se ha medido el motor a plena carga con la dinamo-freno y todos los datos que hemos obtenido son muy similares a los indicados por el fabricante, respecto a tensión, intensidad, potencia, factor de potencia y velocidad de sincronismo. Con respecto al par, las variaciones que se han obtenido tienen un cierto nivel de fluctuación debido a que no era un acoplamiento perfecto.

El valor del ensayo a plena carga para los diferentes motores ensayados es el siguiente:

Motor 1,5 kW			
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	n (rpm)
233,8	3,11	476,2	1444

Motor 2,2 kW			
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	n (rpm)
230	4,6	809,1242	1450

Motor 3 kW			
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	n (rpm)
230	6,3	1159,7993	1445

Calculamos el par asignado por el motor según la formula

$$T_N = \frac{P_a}{2\pi \cdot \frac{n}{60}} \quad (5.2.-12)$$

	Motor 1,5 kW	Motor 2,2 kW	Motor 3 kW
T_N (N*m)	9,4475	15,8675	22,9936

Tabla nº 5.13 Par asignado para cada motor según ensayo de carga

	Motor 1,5 kW	Motor 2,2 kW	Motor 3 kW
T_N (N*m)	9,9	14,4	19,8

Tabla nº 5.14 Par asignado para cada motor según datos del fabricante

Como se puede observar, existe una variación entre el par asignado mediante el ensayo de plena carga y el proporcionado por el fabricante, como se ha dicho anteriormente esto es debido a que el acoplamiento no es perfecto y existen pequeñas vibraciones y demás factores que hacen que los valores no sean del todo exactos.

Bibliografía

- UNE-EN 60034-1(2010). Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento.
- UNE-EN 60034-2-1. (Octubre de 2009). Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos.
- UNE-EN 60034-28. (Diciembre de 2013). Máquinas eléctricas rotativas . Parte 28. Métodos de ensayo para determinar las magnitudes de los esquemas del circuito equivalente para motores de inducción de jaula trifásicos de baja tensión.
- IEC 60044-1. (1996). Transformadores de medida. Parte 1: Transformadores de intensidad.
- IEC 60051-1. (Enero de 2000). Instrumentos de medida eléctricos con indicación analógica por acción directa y sus accesorios.
- UNE-EN 61986. (2003). Máquinas eléctricas rotativas. Carga equivalente y técnicas de superposición. Ensayos indirectos para determinar el calentamiento.
- ABB. *Catalogo para motores de inducción trifásicos en baja tensión*.
- Chapman, S. (2012). *Máquinas Eléctricas* (5 ed.). McGraw-Hill.
- Fitzgerald, A. (1992). *Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas*. McGraw-Hill.
- Fraile Mora, J. (2015). *Máquinas eléctricas* (7 ed.). Garceta.
- IEEE 112-2004. Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
- Krause, P. (2002). *Analysis of Electrical Machinery* (2 ed.). New York: McGraw-Hill.
- Leonhard, W. (2001). *Control of Electrical Drives*. Springer.
- Máquinas Asíncronas*. Obtenido de <http://www.tuveras.com/máquinasca/máquinasca.htm>
- Meisel, J. (1984). Principles of Electromechanical Energy Conversion.
- MG-1, N. (2003). *Motors and Generators*.
- Motor asíncrono*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_as%C3%ADncrono
- Motor síncrono*. (4 de Diciembre de 2009). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_s%C3%ADncrono
- Ong, C. M. (1997). *Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab-Simulink*.
- Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova. (1984). Polyphase motors: a direct approach to their design.
- Salon, S. (1995). *Finite Element Analysis of Electrical Machines*. Springer.

Sánchez P., I. *Motores sincronicos*. Obtenido de
<http://www.monografias.com/trabajos88/motores-sincronicos/motores-sincronicos.shtml>

Sanz Feito, J. (2002). *Máquinas Eléctricas*. Pearson.

Teorema de Ferraris. Obtenido de <http://www.tuveras.com/motorsincrono/motorsincrono.htm>

Wildi, T. (2006). *Máquinas Electricas y Sistemas de Potencia*. Prentice Hall Mexico.