

Javier Andrés Martínez Román
Juan Pérez Cruz
Manuel Pineda Sánchez

Ensayos de máquinas eléctricas

2ªed

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Los contenidos de esta publicación han sido revisados por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPV

Colección Académica

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: MARTÍNEZ ROMÁN, J. A., [et al] (2016)(2ªed) *Ensayos de máquinas eléctricas*. Valencia: Universitat Politècnica de València

© Javier Andrés Martínez Román
Juan Pérez Cruz
Manuel Pineda Sánchez

© 2016, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València
distribución: Telf. 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es / Ref.: 4109_02_02_01

Imprime: Byprint Percom, sl

ISBN: 978-84-9048-488-3
Impreso bajo demanda

Queda prohibida la reproducción, la distribución, la comercialización, la transformación y, en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de la totalidad o de cualquier parte de esta obra sin autorización expresa y por escrito de los autores.

Impreso en España

Índice

0. INTRODUCCIÓN	9
0.1 NORMAS BÁSICAS DE SEGURIDAD VÁLIDAS PARA CUALQUIER INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y/O LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.	11
0.2 EQUIPOS DE MEDIDA.....	12
0.2.1 <i>Polímetro</i>	13
0.2.2 <i>Pinza amperimétrica</i>	15
0.2.3 <i>Analizador de energía</i>	16
0.2.4 <i>Osciloscopios y/o equipos de adquisición de datos</i>	19
0.2.5 <i>Tacómetro o medidor de velocidad</i>	20
0.2.6 <i>Otros auxiliares de medida de reciente utilización</i>	21
PRÁCTICA 1: CIRCUITOS MAGNÉTICOS	25
1.1 OBJETIVOS.....	25
1.2 INTRODUCCIÓN Y EXPRESIONES MÁS RELEVANTES.....	26
1.3 CARACTERÍSTICA DE LA CHAPA FERROMAGNÉTICA: SATURACIÓN Y PÉRDIDAS EN EL HIERRO.....	27
1.3.1 <i>Saturación: característica ϕ/NI</i>	28
1.3.2 <i>Saturación y pérdidas: onda de corriente para f.e.m. senoidal</i>	29
1.3.3 <i>Cuestiones</i>	33

1.4 RELUCTANCIA DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS. EFECTO SOBRE LA INDUCTANCIA.....	34
1.4.1 Circuito magnético serie-paralelo I.....	37
1.4.2 Circuito magnético serie-paralelo II.	39
1.4.3 Circuito magnético serie.....	41
1.4.4 Circuito abierto.	42
1.4.5 Cuestiones.....	44

PRÁCTICA 2: ENSAYOS DE TRANSFORMADORES, VACÍO, CORTOCIRCUITO, CARGA Y DE MEDIDA DE RESISTENCIAS CON C.C.

2.1 OBJETIVOS.....	45
2.2 NOTAS RELATIVAS A LOS EQUIPOS A ENSAYAR Y A LOS APARATOS DE MEDIDA	46
2.3 ENSAYOS Y SUS OBJETIVOS.....	49
2.4 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO.....	51
2.5 ENSAYO DE VACÍO	54
2.6 ENSAYOS EN CARGA.....	57
2.7 MEDIDA DE RESISTENCIAS EN CONTINUA.....	65
2.8 CUESTIONES.....	67

PRÁCTICA 3: CIRCUITO EQUIVALENTE Y CURVA PAR-VELOCIDAD DE MOTORES ASÍNCRONOS

3.1. OBJETIVOS.....	69
3.2 REPRESENTACIÓN PRÁCTICA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO EN LOS MOTORES ASINCRONOS.....	70
3.2.1. Alimentación de una única bobina diametral mediante corriente continua o corriente alterna	71
3.2.2. Alimentación de las fases mediante corriente continua o alterna	72
3.2.3. Alimentación a los devanados del estator mediante un sistema trifásico de corrientes	72

3.3. NOTAS RELATIVAS A LOS EQUIPOS A ENSAYAR Y A LOS APARATOS DE MEDIDA	73
3.4. INTRODUCCIÓN	75
3.4.1. <i>Expresiones más relevantes a tener en cuenta</i>	76
3.5. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE.....	76
3.5.1. <i>Medida de resistencias en continua</i>	77
3.5.2. <i>Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado</i>	79
3.5.3. <i>Ensayo de vacío</i>	81
3.6. COMPROBACIÓN DEL CIRCUITO EQUIVALENTE: ENSAYOS A CARGAS PARCIALES Y CURVA PAR-VELOCIDAD DE VACÍO A PLENA CARGA	85
PRÁCTICA 4: ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE TIPOS DE ARRANQUES DE MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS	89
4.1. OBJETIVO	89
4.2. INTRODUCCIÓN.....	90
4.2.1. <i>Comportamiento de la corriente en el transitorio de arranque</i>	90
4.2.2. <i>Análisis del par durante el arranque</i>	92
4.3. REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.	93
4.3.1. <i>Arranque directo</i>	97
4.3.2. <i>Arranque estrella triángulo</i>	99
4.3.3. <i>Arranque con resistencias en el devanado estático</i>	102
4.3.4. <i>Arranque con sistemas electrónicos</i>	105
4.3.5. <i>Otros arranques</i>	109
4.4. REALIZACIÓN PRÁCTICA	112
4.4.1. <i>Comprobación de la maniobra</i>	113
4.4.2. <i>Realización de los arranques</i>	113
4.4.3. <i>Ejecución y orden de los arranques</i>	113
4.4.3.1. <i>Arranque directo</i>	113

4.4.3.2. Arranque Estrella - Triángulo.....	114
4.4.3.3. Arranque mediante resistencias estatóricas.....	115
4.4.3.4. Arranque estático (electrónico).....	115
4.5. CUESTIONES.....	117
5. MÁQUINAS ENSAYADAS Y EQUIPOS AUXILIARES.....	119
5.1. TRANSFORMADORES.....	119
5.2. MOTORES ASÍNCRONOS DE JAULA DE ARDILLA DE 1,1 kW.....	123
5.3. MOTORES ASÍNCRONOS DE JAULA DE ARDILLA DE 7,5 kW.....	125
5.4. AUTOTRANSFORMADOR AUXILIAR.....	125
5.5. REOSTATO.....	126
5.6. VARIADOR DE FRECUENCIA.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	131

Introducción

En este texto se presentan cuatro prácticas: una primera dedicada a los circuitos magnéticos de máquinas eléctricas, las dos siguientes dedicadas respectivamente a transformadores y a máquinas asíncronas incluyendo los ensayos para obtener el circuito equivalente y comprobar las estimaciones que dicho circuito equivalente proporciona sobre el funcionamiento de unos y otras y, por último una cuarta práctica en la que se plantea la problemática que supone el arranque del motor asíncrono y las alternativas que actualmente se utilizan en las instalaciones en las que el arranque directo esté contraindicado.

Las prácticas propuestas en este texto tienen como principal finalidad complementar los conocimientos teóricos que convencionalmente se adquieren en el estudio de estas máquinas, bien de forma autónoma estudiando cualquiera de los textos propuestos en la bibliografía o bien siguiendo las clases en cualquier centro educativo especializado, tal es el caso de los alumnos que cursan de la asignatura de Máquinas Eléctricas impartida en los Grados de Ingeniero en Tecnologías Industriales, de Energía y de Organización Industrial de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universitat Politècnica de València. Con el desarrollo de los ejercicios prácticos propuestos se completan y refuerzan los contenidos y objetivos de los textos teóricos y/o de los tratados en las asignaturas antes comentadas. En este sentido proporcionan una introducción práctica a las máquinas eléctricas altamente integrada e interrelacionada con el desarrollo teórico que se analiza en la bibliografía y/o en las clases antes relacionadas. Para los planteamientos teóricos complementarios se remite al lector a los textos específicos de estudio de estas dos máquinas.

La finalidad de la primera práctica es facilitar la comprensión de los circuitos magnéticos, relacionando las magnitudes propias del magnetismo (flujo, reluctancia, fuerza magnetomotriz) con las magnitudes eléctricas, normalmente estas segundas más conocidas y mejor asimiladas por parte del alumnado (corriente, impedancia, tensión, f.e.m.). Para ello se trabaja con un transformador trifásico en el cual el lector debe configurar diferentes circuitos magnéticos alimentando unas bobinas y cortocircuitando otras. De esta forma se podrá apreciar tanto la posibilidad de conducir el flujo magnético por el camino deseado como la relación entre la inductancia y reactancia de la bobina alimentada y las características del circuito magnético establecido. También dentro de esta práctica se aprecia claramente una de las principales diferencias entre los circuitos magnéticos y eléctricos, ya que en los magnéticos no hay linealidad. Se miden las curvas de vacío de dos transformadores distintos, de modo que se puedan comparar las diferencias de comportamiento de distintos materiales ferromagnéticos. Asimismo se obtienen las ondas de corriente de magnetización y de f.e.m. inducida del transformador a diferentes tensiones de modo que refuercen los conceptos de no linealidad y pérdidas de potencia en el hierro.

En la segunda práctica se realizan varios ensayos a una máquina eléctrica estática (un transformador trifásico), dos de ellos son realizados bajo las características que la normativa actual determina (el ensayo de vacío y el de cortocircuito). Mediante un tercer ensayo (aplicando corriente continua) se pretende separar y determinar algunos de los valores del circuito equivalente. Se termina con un último grupo de ensayos en carga mediante los cuales se obtienen datos de funcionamiento del transformador para comprobar la validez del circuito equivalente obtenido con los ensayos anteriores. El valor de las potencias de las cargas, así como el tipo de carga, en cada punto será diferente de forma que las comprobaciones sobre el circuito equivalente puedan ser lo más significativas posibles y correspondientes a las diferentes alternativas que se podrían presentar en la industria. Con todo ello, se pretende analizar y llevar a la práctica el desarrollo teórico completo del modelo del transformador, al tiempo que se enseña la metodología práctica a seguir en este tipo de ensayos.

En la tercera práctica se plantean los mismos requerimientos que en la segunda, pero en este caso la máquina eléctrica a estudiar es el motor asíncrono de jaula de ardilla (que sin duda es el más extendido en la industria). Los ensayos y planteamiento son los mismos que en la práctica anterior: los ensayos de vacío y de cortocircuito (para el cálculo del circuito equivalente), el de corriente continua para determinar parámetros del devanado del estator, y el grupo de ensayos en carga, mediante los cuales se pueda comprobar la validez del circuito equivalente de la máquina asíncrona ensayada. Además de la obtención práctica del circuito equivalente del motor, se pretende que se aprenda a plantear y ejecutar los principales ensayos normalizados de máquinas asíncronas, así como la identificación de la caja de bornes, el tipo de conexionado de los devanados, los valores representado y marcados en la placa de características, etc. Como resultado de dicha práctica se puede

obtener el circuito equivalente, y a partir de éste comparar la curva par - velocidad y otras características obtenidas a partir del circuito equivalente por un lado, y de las medidas en los ensayos en carga por otro. En esta práctica se introduce también el funcionamiento y la operación de los variadores de frecuencia para la alimentación de máquinas eléctricas rotativas, aspectos muy interesantes en opinión de los autores dada su extensa y, aun así, creciente utilización industrial de estos equipos.

Se plantea por último una cuarta práctica, también sobre la máquina rotativa (motor de asíncrono o de inducción), pero ahora desde la óptica de uno de los momentos críticos pero obligatorios (el arranque) en cualquiera de sus usos y/o de aplicación industrial. Mediante esta práctica se presenta y resuelve por las diferentes alternativas industriales habituales el problema que representa el arranque de este tipo de motores. Se experimenta y analiza una extensa selección de métodos de arranque, todos ellos tal como son utilizados hoy en día en la industria. Además se visualizan y analizan las ondas de tensión y corriente tanto de fase como de línea, de modo que el usuario comprenda en profundidad tanto el problema a resolver como los métodos disponibles para ello y su implementación y ajustes prácticos.

En esta introducción se tratan además las normas de seguridad cuya observación permite reducir al mínimo el riesgo de un accidente y se describen los diferentes equipos de medida a utilizar en las prácticas.

0.1. NORMAS BÁSICAS DE SEGURIDAD VÁLIDAS PARA CUALQUIER INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y/O LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Los valores de tensión y corriente usados normalmente en las instalaciones eléctricas convencionales, y por tanto, también en los ensayos a realizar en el laboratorio a las máquinas eléctricas, suelen ser tales, que puede resultar peligroso su manejo por parte del personal que ejecuta dichos ensayos. Si además se tiene en cuenta que puede tratarse de personal en cierta medida inexperto puede resultar doblemente peligroso. Por ello es fundamental tener en cuenta una serie de recomendaciones que reduzcan al mínimo el riesgo. Así:

1. SOLO SE TOCARÁN LOS CONDUCTORES Y CONEXIONADO DE LOS EQUIPOS CUANDO NO SE ESTÉ APLICANDO TENSIÓN. PARA ELLO:
 - Lo último que se ha de conectar son los cables al cuadro de protecciones, con los interruptores de paso siempre desconectados.
 - Una vez realizados los ensayos en primer lugar se reduce todo lo posible la corriente en el circuito a ensayar, a continuación se desconectan los interruptores de paso, posteriormente se desconectan del cuadro los cables y por último se desmontan los circuitos.

- Cualquier modificación del circuito de ensayo se efectuará sin tensión, para ello, se desconectan los cables de alimentación del cuadro.
2. LAS CONEXIONES SE REALIZARÁN DE FORMA QUE LOS CONDUCTORES NO SE PUEDAN SOLTAR ACCIDENTALMENTE: EVITAR CONEXIONES DEMASIADO CORTAS O QUE ESTÉN FLOJAS O INSUFICIENTEMENTE APRETADAS.
 3. AL ENSAYAR MOTORES SE COLOCARÁN ESTOS DE FORMA QUE LOS EJES NO SE PUEDAN TOCAR NI ENGANCHEN CABLES, ROPA, ETC. DE FORMA ACCIDENTAL.
 4. SI SURGE ALGUNA DUDA SOBRE LA REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA CONSULTAR AL PROFESOR Y/O RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE LAS PRÁCTICAS
 5. SI SE OBSERVA ALGUNA ANOMALÍA O SE PRODUCE ALGUNA AVERÍA **DIGALO Y NO LO OCULTE**. Piense en el riesgo innecesario (a veces grave) que puede obligar a sufrir a los demás.
 6. AL FINALIZAR LOS TRABAJOS, DEJAR EL PUESTO DE PRÁCTICAS EN ORDEN (CABLES RECOGIDOS, ALIMENTACIONES DESCONECTADAS,...) PARA QUE SU MANIPULACIÓN RESULTE SEGURA PARA EL PRÓXIMO USUARIO Y/O COMPAÑERO O PARA EL PROPIO PERSONAL DEL LABORATORIO.

0.2. EQUIPOS DE MEDIDA

Dada la entidad de los ensayos propuestos, que fundamentalmente son para la caracterización de las máquinas eléctricas, los equipos de medida que se pueden utilizar en el desarrollo de las distintas prácticas pueden ser diferentes, tanto en el número como en el tipo de parámetros a medir, por lo que puede ser necesario utilizar uno o varios polímetros digitales convencionales, o bien pinzas amperimétricas, analizadores de energía e incluso equipos de adquisición de datos. En todo caso, y siempre que sea posible, se manejarán aparatos de medida comerciales e industriales, de forma que los usuarios se pueda ir familiarizando con los equipos de uso industrial, y que posteriormente se encontrará en su trabajo profesional.

Casi todos los equipos de medida suelen llevar, para su funcionamiento una pila o batería. La duración de esta fuente de energía suele ser bastante limitada. Los equipos pueden disponer de “autoapagado”, por lo que al dejar de utilizarlos se suelen desconectar automáticamente para ahorrar energía, pero algunos no disponen de esta característica. En estos caso el usuario debe de ser precavido y apagar el equipo al no ser necesaria su utilización. Decir también que cuando la reserva de energía es pequeña, suele aparecer algún mensaje indicativo de pila baja o similar, en estos

casos puede ocurrir que las medidas sean incorrectas, por lo que por precaución, deben ser reemplazadas las pilas o baterías.

0.2.1 Polímetro

Estos equipos permiten medir tensiones, corrientes e incluso resistencias de forma aproximada. Se usarán de forma regular a lo largo de las prácticas como voltímetro o incluso como amperímetro. Los equipos a emplear pueden ser diferentes marcas y/o modelo a los aquí representados (ver dos ejemplos en la Figura 0.1), ya que los expuestos podrán ser sustituidos por otros, bien por avería o por motivos de innovación tecnológica, pero todos muy similares.

Para la conexión de cualquiera de estos polímetros, se disponen de varios puntos de conexión (normalmente suelen llevar 3 o 4 puntos de conexión), en uno de ellos, denominado común (COM), se conectará **SIEMPRE** uno de los conductores de entrada al equipo de medida. Para elegir el otro conector se debe tener en cuenta la medida a realizar. Para medir tensión o resistencia se conectará al borne de entrada del equipo serigrafiada con (V/ Ω) y posteriormente se debe seleccionar con el conmutador y/o varios botones (que llevarán para tal fin) tanto el parámetro (tensión “V” o resistencia “ Ω ”) como el valor del fondo escala adecuado que **siempre debe ser el inmediato superior al máximo valor esperado del parámetro a medir.** Si lo que se pretende medir, con este equipo, es la corriente, se puede disponer (además del borne común) de 2 entradas en el polímetro para esta medida. Si se dispone de más de un borne de entrada de corriente, es porque se tienen que utilizar cada borne para valor de corriente determinado, el límite de este valor es el que aparece serigrafiado en la entrada, lógicamente se utilizará la borna identificada con el valor inmediato superior al que se pretenda medir, por ejemplo si el valor de corriente a medir es inferior a 2 A, el borne de entrada será el marcado con la indicación 2 A, pero para valores de corriente mayores de 2A y menores de 10A, se utiliza la borna serigrafiada con 10 A, al menos en el equipo de la derecha de la Figura 0.1. Además, se deberá elegir con el conmutador la escala adecuada (corriente alterna “ca” “~” o corriente continua “cc” “=”). Con los botones y/o conmutador se selecciona además el fondo escala con el mismo criterio que lo comentado anteriormente para la borna: **el de valor inmediato superior.** Si solo se dispone de una única borna para corriente, esta será la utilizada ajustando también el valor del fondo escala y el tipo de parámetro (cc o ca.), teniendo en cuenta el valor a medir. Cuando se desconoce el valor de cualquier parámetro a medir se empleará la escala mayor y se irá reduciendo progresivamente hasta encontrar la más adecuada. En la Fig. 0.1 se presenta una fotografía de 2 polímetros, uno con 3 entradas y otro con 4.



Fig. 0.1. Fotografía de 2 polímetros

Pueden llevar otros botones para aplicaciones diferenciadas y de nula utilidad en las prácticas de laboratorio, por lo que no se estima necesario describir su aplicación. Sí que se quiere resaltar que de forma convencional los bornes de la conexión de medida de corriente suelen estar protegidas ante un mal uso con fusibles. Así, se tiene que:

- a) En la entrada de 2 A, como protección, el equipo tiene instalado internamente un fusible de 2 A. que por seguridad incluso puede haber sido sustituido por uno de menor amperaje.
- b) En la entrada de 10 A, se tiene instalado un fusible de 10 A en algunos equipos, mientras que en otros esta entrada esta desprotegida frente a sobrecorrientes (unfused). Nuevamente, si hay fusible, puede estar sustituido por uno de menor intensidad por motivos de seguridad.

Si el equipo se encuentra correctamente instalado pero no circula corriente por el circuito puede ser debido a que estos fusibles se hayan fundido, normalmente por un mal uso del equipo. Debe ser sustituido por un fusible de valor adecuado al uso del equipo de medida.

0.2.2 Pinza amperimétrica

Se podría entender este equipo como un polímetro convencional, salvo en la forma de intercalarlo en el circuito para las medidas de corriente, ya que en este caso no se necesita interrumpir el conductor de la línea en la que se desea medir la corriente. Su funcionamiento (en la medida de corriente) está basado en el empleo de transformadores de corriente, es decir dispone de un primario (por el cual pasa la corriente a medir, y que es el propio conductor en el que se mide la corriente) y un secundario que proporciona una corriente proporcional a la que circula por el primario. La peculiaridad de estos equipos industriales es que poseen una “mordaza abatible” o pinza que permite (al presionar sobre un dispositivo) abrir y abrazar cualquier conductor sin necesidad de desconectarlo. En la Fig. 0.2 se puede ver una fotografía de dos tipos de pinzas



Fig. 0.2. Fotografía de 2 pinzas amperimétricas

Para seguir leyendo haga click aquí