

1. Nombre de la asignatura: **MÁQUINAS ELÉCTRICAS.**
2. Créditos: DIEZ (10)
3. Objetivos de la asignatura:

El curso tiene como objetivos principales:

- Dar una formación básica sobre los principios generales de la conversión electromecánica de la energía a través de los dispositivos y máquinas clásicas de campo electromagnético.
- Proporcionar bases sólidas para el modelado de las máquinas eléctricas a partir del cálculo de sus inductancias.
- Realizar el estudio detallado de las máquinas sincrónicas, en régimen permanente, lineal y saturado.
- Dar una introducción al conocimiento de los métodos generales de análisis del comportamiento en régimen transitorios de máquinas eléctricas.

Se estudia con detalle las características del campo giratorio en las máquinas de corriente alterna, y a partir del mismo se calcula las inductancias propias y mutuas en dichas máquinas. A partir de las relaciones del campo giratorio se revisa la deducción del circuito equivalente de la máquina de inducción polifásica en régimen equilibrado permanente, sus modos de funcionamiento y principales características. Se introduce la máquina de inducción monofásica como un caso particular de campo giratorio, y se indica sus principales características. Se realiza un modelado detallado de la máquina sincrónica a partir de sus ecuaciones, con los valores de inductancias deducidos a partir del campo giratorio. Se estudia el régimen permanente como caso particular del modelado general válido para regímenes transitorios, y se estudia algunos regímenes transitorios particulares.

4. Metodología de enseñanza: Comprende un total de 76 horas con 52 horas teóricas y 24 horas de práctico, en un régimen de 6 horas semanales (4 teóricas y 2 de práctico).
5. Temario: En Anexo I se describe en detalle el contenido del curso y la asignación de horas a cada tema.

1. Introducción.
2. Sistemas polifásicos.
3. Revisión de Circuitos Magnéticos y Transformadores.
4. Fundamentos de la conversión electromecánica de la energía.
5. Campo giratorio.
6. Máquinas de inducción polifásicas.
7. Máquinas de inducción monofásicas.
8. Modelado de las máquinas sincrónicas.
9. Transformaciones.
10. Máquinas sincrónicas en ecuaciones transformadas.
11. Máquinas sincrónicas en régimen permanente.
12. Regímenes transitorios de máquinas sincrónicas.

6. Bibliografía: El curso cubre temas clásicos con una larga historia de desarrollo, por lo cual la bibliografía relativa al mismo es muy profusa. En Anexo II se detalla la bibliografía recomendada, con comentarios a la misma.
7. Conocimientos previos exigidos y recomendados: Electromagnetismo. Teoría de circuitos, en especial circuitos trifásicos, manejo de notación vectorial compleja (fasores) y concepto de potencia eléctrica. Introductorios de Transformadores de Potencia y Motor Asíncrono Trifásicos

Corresponde a la carrera INGENIERO ELECTRICISTA y Materia: CONVERTIDORES DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA.

ANEXO I: Temario de la asignatura MÁQUINAS ELÉCTRICAS

- 1.- Introducción. (1T, 0E) Presentación del curso. Breve reseña histórica sobre la evolución de las máquinas eléctricas. Consideraciones generales sobre la energía, sus fuentes, su conversión, y el rol de las máquinas eléctricas en la misma. Importancia de la Normalización.
- 2.- Sistemas polifásicos. (2T, 2E) Sistemas monofásico, trifásico, y polifásicos generales. Resolución de sistemas trifásicos simétricos en régimen desequilibrado. Impedancias directa, inversa y homopolar. Diagonalización de la matriz de inductancias. Autovalores y autovectores de la transformación de Fortescue.
- 3.- Revisión de Circuitos Magnéticos y Transformadores. (3T, 4E) Repaso de circuitos magnéticos. Materiales magnéticos. Pérdidas en el hierro. Imanes permanentes. Revisión de bobinas y transformadores monofásicos. Circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar. Corrientes y tensiones armónicas en los transformadores trifásicos.
- 4.- Fundamentos de la conversión electromecánica de la energía. (4T, 2E) Balance de energía en un convertidor electromecánico de campo magnético. Convertidor ideal. Energía y co-energía almacenadas en el campo magnético. Fuerza y par de origen magnético. Sistemas de simple y doble excitación. Ecuaciones dinámicas de los convertidores. Conceptos básicos de las máquinas giratorias. Convertidor giratorio monofásico de doble excitación. Par de reluctancia y par de inducción mutua. Convertidor giratorio bifásico de doble excitación: condición de existencia de conversión electromecánica.
- 5.- Campo giratorio. (8T, 2E) Fuerza magnetomotriz de entrehierro creada por: espira diametral, bobinado distribuido discreto, y continuo. Campo (f.m.m.) giratorio creado por un sistema trifásico. Teorema de Ferraris. Reducción del contenido armónico con bobinado distribuido. Campo multipolar. Efecto del número de fases. Campo giratorio elíptico. Bobinado monofásico. Campos giratorios armónicos. Nociones sobre la disposición de los bobinados trifásicos: bobinados en dos capas de paso reducido . Flujo de arrollamiento por fase, fem inducida. Coeficiente de distribución del bobinado. Inductancias propias y mutuas en estructuras de entrehierro constante y de entrehierro periódico (polos salientes). Energía y par en el campo giratorio.
- 6.- Máquinas de inducción polifásicas. (4T,4E) Constitución de las máquinas de inducción. Circuito equivalente. Ensayos. Balance energético: curva par-velocidad. Modos de funcionamiento: motor, generador, freno. Diagrama circular. Métodos de arranque. Motores de barras profundas y doble jaula.
- 7.- Máquinas de inducción monofásicas. (2T, 0E) Análisis por doble campo giratorio. Circuito equivalente. Curva par-velocidad. Dispositivos de arranque.
- 8.- Modelado de las máquinas sincrónicas. (4T, 0E) Descripción física de la máquina sincrónica (MS). Modelado de los amortiguadores. Máquina sincrónica ideal. Representación circuital de la MS. Inductancias. Ecuaciones en componentes de fase de la MS de polos salientes.
- 9.- Transformaciones. (4T, 0E) Generalidades sobre las transformaciones. Componentes simétricas y componentes relativas. Condiciones impuestas a las matrices de transformación. Diagonalización de matrices simétricas y circulantes: transformaciones de Fortescue, Clarke y Concordia. Transformación de Park original y normalizada. Interpretación de las transformaciones de Concordia y Park.
- 10.- Máquinas sincrónicas en ecuaciones transformadas. (6T, 0E) Simplificación de las ecuaciones de la MS de polos salientes aplicando la transformación de Park normalizada. Ecuaciones de MS en notación operacional. Potencia eléctrica y par electromagnético. Resultados de la aplicación de la transformación de Park original. Ecuaciones e impedancias operacionales. Reactancias y constantes de tiempo (sincrónica, transitoria y subtransitoria).
- 11.- Máquinas sincrónicas en régimen permanente. (10T, 8E) Régimen permanente a velocidad sincrónica. Funcionamiento en vacío. Funcionamiento con carga simétrica. MS de rotor cilíndrico. Régimen permanente, diagrama vectorial, circuito equivalente. Ensayos. Reactancia sincrónica. Potencia activa y reactiva. Par. Estabilidad. Ecuación de pequeñas oscilaciones. Límites de operación. Funcionamiento como motor sincrónico. Curvas en V o de Mordey. MS de polos lisos con saturación. Método de Potier. MS de polos salientes en régimen lineal. Diagramas vectoriales. X_d y X_q . Circuito equivalente. Ensayo de deslizamiento. Par. Límites de operación. MS de polos salientes en régimen saturado: método de Blondel.
- 12.- Regímenes transitorios de máquinas sincrónicas. (T=4 hs.|P=2 hs.) Estudio de algunos regímenes transitorios particulares. Establecimiento de la tensión en vacío. Cortocircuito trifásico del generador en vacío. Aproximaciones usuales.

ANEXO II: Bibliografía de la asignatura MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Bibliografía.

A.- Libros básicos de referencia. ([*]= Disponibles en Biblioteca IIE.)

- [1] - C.B.Gray - Electrical Machines and Drive Systems. Longman Sci. & Tech. Publications, London, & J.Wiley, New York, 1989. Máquinas Eléctricas y Sistemas Accionadores. Ed. Alfaomega, México, 1993. [*]
- [2] - A.E.Fitzgerald, Ch.Kingsley, A.Kusko. - Electric Machinery (3rd ed.). McGraw-Hill, New York, 1969. Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas. Ed. Hispano Europea, Barcelona, 1975. [*]
- [3] - L.W.Matsch. - Electromagnetic and Electromechanical Machines. International Textbook Co., New York, 1972. Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas. Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería, México, 1974. [*]
- [4] - G.Séguier, F.Notelet. - Electrotechnique Industrielle. Ed. Technique et Documentation, Paris, 1977. [*]
- [5] - J.Chatelain. - Machines Electriques - Traité d'Electricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Vol. X. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1983.
- [6] - M.Liwschitz-Garik, C.C.Whipple. - A.C. Machines. Van Nostrand, New York, 1946. [*] - D.C. Machines. Van Nostrand, New York, 1946. [*] Máquinas de Corriente Alterna. C.E.C.S.A., México, 1970. [*] Máquinas de Corriente Continua. C.E.C.S.A., México, 1970. [*]
- [7] - M.Kostenko, L.Piotrovsky. - Electrical Machines. 1. D.C.Machines, 2.A.C.Machines. Mir, Moscow, 1968/69. [*] (Existe en traducción al español).
- [8] - A.S.Langsdorf. - Principles of Direct Current Machines. McGraw- Hill, New York, 1940. [*] - Theory of Alternating Current Machinery. McGraw-Hill, New York, 1955. [*] (Existe traducciones al español).
- [9] - G.J.Thaler, M.L.Wilcox. - Electric Machines. Dynamics and Steady State. Wiley, New York, 1966. [*] Máquinas Eléctricas - Estado dinámico y permanente. Ed. Limusa, México, 1969.
- [10] - L.V.Bewley. - Alternating Current Machinery. MacMillan, New York 1949. [*]
- [11] - P.C.Krause. - Analysis of Electric Machinery. McGrawHill, New York, 1986. [*]
- [12] - P.C.Krause, O.Wasynczuk. - Electromechanical Motion Devices. McGraw-Hill, New York, 1989.
- [13] - R. Sanjurjo Navarro. - Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill, Madrid, 1989.

B. - Apuntes y Publicaciones universitarias.

- [14] - A.G.Cisa. - Apuntes del curso de Máquinas Eléctricas. Oficina de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, Montevideo, (Fasciculos de fechas diversas).
- [15] - J.L.Alonso, A.Portillo. - Apuntes del curso de Máquinas Eléctricas II. Facultad de Ingeniería, Montevideo, (Curso dictado desde 1987 a 1997).
- [16] - Ph.Barret. - Electrotechnique Générale. Ecole Supérieure d'Electricité, Paris. Tome 1 (Publication No.2272), 1972; Tome 2 (Publ. No.2532), 1976.

C. - Algunas obras complementarias y de profundización

- [17] - J.Lesenne, F.Notelet, G.Séguier. - Introduction à l'Electrotechnique Approfondie. Ed. Technique et Documentation, Paris, 1981. [*]
- [18] - J.Meisel. - Principles of Electromechanical Energy Conversion. McGraw-Hill, New York, 1966.
- [19] - M.Jufer. - Transducteurs Electromécaniques - Traité d'Electricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Vol.IX. Ed.Georgi, Lausanne, 1979.
- [20] - C.G.Veinott. - Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motors. McGraw-Hill, New York, 1975. Motores Eléctricos de Potencia Fraccionaria y Subfraccionaria. Ed. Marcombo-Boixareu, Barcelona, 1978. [*]
- [21] - D.C.White, H.H.Woodson. - Electromechanical Energy Conversion, Wiley, New York, 1959. [*]

Comentarios sobre la Bibliografía

Los libros indicados en la Bibliografía en su mayoría son clásicos y por lo tanto eximidos de comentarios en cuanto a nivel y profundidad. En general exceden el contenido del curso, aunque difieren de éste en la notación empleada y muchas veces también en el enfoque o presentación de algunos temas.

A.- Referencias Básicas-

- [1] Libro moderno, conceptual, con énfasis en el análisis del campo magnético en el interior de las máquinas y en la transmisión de la energía y formación del par. Revisión de nociones básicas de Electromagnetismo y de materiales magnéticos. Incluye el estudio de los convertidores de electrónica de potencia más frecuentemente empleados actualmente para la alimentación de las máquinas.
- [2] Libro clásico, empleado como texto en el Plan 74, menos adaptado a cursos más recientes. Enfoque más bien conceptual, aunque no apoya suficientemente los razonamientos con desarrollos matemáticos. Edición en español con muchos errores de imprenta. Existen ediciones (en inglés y español) más recientes.
- [3],[4] Libros similares entre sí en enfoque y profundidad, algo menos conceptuales que [2], pero de tratamiento matemático más detallado y completo. [4] es referencia para los capítulos 3,5, y 11 del curso.
- [5] Obra mucho más extensa que las anteriores, orientada a la teoría general de las máquinas eléctricas, para el estudio de regímenes transitorios. Excede ampliamente los objetivos del curso, aunque algunas partes de los caps. 4, 5 y 6 del curso están inspiradas de [5].
- [6],[7],[8] Conjunto de libros clásicos y de referencia. Sumamente completos y profundos en la presentación de cada tipo de máquina. Por su detalle de tratamiento exceden los contenidos del curso. A diferencia de obras más recientes, carecen o no explicitan un enfoque unificador de los diversos tipos de máquina. Excepto [6], no presentan ni emplean resultados generales de la conversión electromecánica de energía.
- [9] Orientado al estudio de regímenes transitorios, y el régimen permanente como un caso particular. Ejercicios y problemas interesantes.
- [10] Obra de tipo clásico, como [6],[7],[8], restringida sólo al estudio de máquinas de corriente alterna, de gran concisión y claridad. Falta consideraciones generales acerca de la conversión electromecánica de energía.
- [11],[12] Libros modernos orientados más específicamente a la teoría general y los regímenes transitorios. Los caps. 4, 8, 9, 10 y 12 del curso son los más próximos a este enfoque. [12] es algo así como una versión resumida de [11]. Las referencias [11], [15] y [17] son la bibliografía del curso de Máquinas Eléctricas II.
- [13] Enfoque más bien conceptual, similar a [2], con tratamiento matemático más moderno.

B.- Apuntes de cursos.

- [14] Apuntes universitarios. Referencia básica de todos los cursos de máquinas eléctricas dictados en la Facultad. Tratamientos y enfoques similares a los de [10].
- [15] Apuntes universitarios. Referencia básica para los caps. 4, 8, 9, 10 y 12.
- [16] Apuntes universitarios. Referencia básica para los caps. 4, 5, 6, 7 y 11.

C.- Obras complementarias y de profundización.

- [17] Referencia básica para la teoría general y los regímenes transitorios.
- [18] Obra bastante teórica, una de varias que surgieron luego de [21]. Interesante para el estudio de convertidores distintos de las máquinas convencionales.
- [19] Interesante para el estudio de convertidores distintos de las máquinas convencionales, en particular relés y motores paso a paso.
- [20] Libro más bien técnico. Muy completo panorama de tipos constructivos y principio de funcionamiento de pequeños motores y sus dispositivos de arranque.
- [21] Obra clásica de referencia para la teoría general de las máquinas eléctricas, de las primeras en ser publicada, y probablemente la de mayor profundidad teórica y de tratamiento matemático hasta la fecha.

2) Modalidad del curso y procedimiento de evaluación.

Clases teórico prácticas de asistencia libre con los siguientes procedimientos de evaluación:

- a) Dos pruebas parciales durante el semestre, en cada una de las cuales podrá obtener un máximo de 50 puntos.
- b) De acuerdo a los resultados obtenidos, el estudiante podrá:
 - a) Obtener un mínimo de 12,5 puntos (25%) en la primer prueba para pasar a la segunda, de lo contrario perderá el curso. Se establece un mínimo por parcial debido a que se evalúa un temario diferente.
 - b) Obtener un mínimo de 12,5 puntos (25%) en la segunda prueba, independientemente del resultado de la primera, de lo contrario perderá el curso.
 - c) Ganar el curso si obtiene 25 o mas puntos en la suma de ambas pruebas.
 - d) Si obtiene entre 25 y 50 puntos totales ira a Examen Total (Práctico mas Teórico).
 - e) Si obtiene entre 50 y 75 puntos totales ira a Examen Teórico.
 - f) Si obtiene más de 75 puntos totales exonerará la asignatura.

No corresponde exactamente a ninguno de los regímenes establecidos hasta ahora.

Nota: La forma de codificación para el ACTA DE CURSO es la siguiente:

- 0 a 2 Pierde el curso.
- 20 Examen Total
- 4 Examen parcial
- 6 a 12 Exoneró. En este caso coincide con la NOTA DE APROBACIÓN.

APROBADO POR EL CONSEJO DE FACULTAD DE FECHA 24.07.2000
SEGUN EXP. 92.979