

# Contenido

<b>Introducción</b>	<b>XIX</b>
<b>PRIMERA PARTE</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Circuitos magnéticos</b>	<b>3</b>
1.1. Problema de diseño . . . . .	4
1.2. Introducción . . . . .	5
1.3. Flujo magnético y ley de Ampère . . . . .	7
1.4. Circuitos magnéticos . . . . .	9
1.4.1. Excitación de núcleos ferromagnéticos con corriente continua . . . . .	9
1.4.2. Ley de Ohm para circuitos magnéticos . . . . .	9
1.4.3. Curva de magnetización y saturación . . . . .	18
1.4.4. Energía magnética almacenada . . . . .	20
1.5. Materiales ferromagnéticos . . . . .	21
1.5.1. Curva de histéresis . . . . .	23
1.6. Ley de inducción de Faraday . . . . .	25
1.6.1. Regla de la mano izquierda . . . . .	28
1.7. Inductancia magnética . . . . .	29
1.7.1. Diseño de bobinas . . . . .	31
1.7.2. Formas de núcleos ferromagnéticos . . . . .	32
1.8. Excitación senoidal en circuitos magnéticos . . . . .	33
1.8.1. Pérdida de energía por corrientes de Foucault . . . . .	36
1.9. Aplicaciones de los circuitos magnéticos . . . . .	39
1.10. Solución del problema de diseño . . . . .	40
1.11. Problemas propuestos . . . . .	42
1.12. Resumen . . . . .	51
1.13. Problemas . . . . .	52

<b>Capítulo 2. Balance de energía electromecánica</b>	<b>55</b>
2.1. Problema de diseño . . . . .	56
2.2. Introducción . . . . .	59
2.3. Transformación de la energía electromecánica . . . . .	62
2.4. Mecánica de los motores y de los generadores de corriente continua . . . . .	63
2.5. Relación de fuerza de Biot y Savat . . . . .	67
2.6. Otras leyes relacionadas . . . . .	68
2.7. Máquinas de corriente alterna . . . . .	69
2.8. Máquinas de inducción . . . . .	72
2.9. Balance de energía . . . . .	77
2.9.1. Energía y fuerza en sistemas de campos magnéticos . . . . .	79
2.10. Determinación de la fuerza magnética (coenergía) . . . . .	82
2.11. Solución del problema de diseño . . . . .	86
2.12. Problemas resueltos . . . . .	100
2.13. Resumen . . . . .	106
2.14. Problemas . . . . .	106
<b>SEGUNDA PARTE</b>	<b>111</b>
<b>Capítulo 3. Teoría del transformador</b>	<b>113</b>
3.1. Problema de diseño . . . . .	114
3.2. Introducción . . . . .	115
3.3. El transformador eléctrico . . . . .	117
3.3.1. Estructura del transformador . . . . .	120
3.3.2. F.E.M inducida . . . . .	128
3.3.3. Relación de transformación . . . . .	130
3.3.4. Polaridad . . . . .	134
3.4. Deducción del circuito equivalente . . . . .	137
3.5. Análisis de comportamiento bajo distintas cargas. . . . .	144
3.5.1. Regulación. . . . .	144
3.5.2. Eficiencia . . . . .	147
3.6. Por ciento y por unidad de impedancia . . . . .	148
3.7. Autotransformadores. . . . .	151
3.7.1. Características de los autotransformadores . . . . .	152
3.8. Solución del problema de diseño . . . . .	154

3.9. Problemas resueltos . . . . .	155
3.10. Resumen . . . . .	164
3.11. Problemas . . . . .	166
<b>Capítulo 4. Operación del transformador en sistemas eléctricos</b>	<b>171</b>
4.1. Problema de diseño inicial . . . . .	172
4.1.1. Diseño de un transformador . . . . .	172
4.2. Introducción . . . . .	173
4.3. Conexión de transformadores . . . . .	174
4.3.1. Requisitos de polaridad, transformación, impedancia, secuencia y desplazamiento angular . . . . .	179
4.4. Transformador trifásico . . . . .	183
4.4.1. Características y ventajas . . . . .	186
4.4.2. Auxiliares: Tanque, boquilla, aceite, etcétera . . . . .	193
4.5. Clasificación y selección de transformadores . . . . .	197
4.6. Solución al problema de diseño . . . . .	200
4.7. Problemas resueltos. . . . .	200
4.8. Resumen . . . . .	212
4.9. Problemas . . . . .	213
<b>Capítulo 5. Transformadores de distribución</b>	<b>219</b>
5.1. Problema de diseño . . . . .	220
5.2. Introducción . . . . .	221
5.3. Conexiones y funcionamientos de los transformadores . . . . .	221
5.3.1. Polaridad . . . . .	255
5.3.2. Conexiones de los transformadores en circuitos monofásicos. . . . .	256
5.3.3. División de la carga entre transformadores en paralelo . . . . .	257
5.4. Transformadores monofásicos en circuitos bifásicos . . . . .	260
5.5. Tres transformadores en circuito trifásico . . . . .	261
5.6. Características del funcionamiento de la conexión Y-Y . . . . .	264
5.7. La conexión en $\Delta$ abierta o en V . . . . .	265
5.8. Funcionamiento en paralelo de transformadores conectados en $\Delta$ abierta y en $\Delta$ cerrada . . . . .	266
5.9. Características de funcionamiento de las conexiones $\Delta - Y$ e $Y - \Delta$ . . . . .	272
5.10. Funcionamiento en paralelo de conexiones en Y-Y, $\Delta - \Delta$ ; $\Delta - Y$ y $Y - \Delta$ . . . . .	272
5.11. Conexión en T en los sistemas trifásicos . . . . .	276

5.12. Protección de transformadores de distribución . . . . .	279
5.13. Autotransformadores . . . . .	281
5.14. Cálculo de pérdidas y su optimización . . . . .	282
5.15. Normas de diseño, pruebas y puesta en servicio . . . . .	292
5.16. Respuesta al problema de diseño . . . . .	295
5.17. Resumen . . . . .	296
5.18. Problemas resueltos . . . . .	297
5.19. Problemas . . . . .	305

## **Capítulo 6. Transformadores de potencia 307**

6.1. Introducción . . . . .	308
6.2. Introducción a los transformadores de potencia . . . . .	309
6.3. Tipo de transformadores de potencia . . . . .	311
6.4. Tipos de aislamiento . . . . .	316
6.5. Curvas teóricas de calentamiento y refrigeración . . . . .	319
6.6. Tipos de refrigeración en los transformadores de potencia . . . . .	321
6.7. Elevación de temperatura debido a cortocircuitos: esfuerzos mecánicos . . . . .	323
6.8. Conexiones de bancos de transformadores monofásicos y trifásicos . . . . .	326
6.9. Cálculo de pérdidas y su optimización . . . . .	329
6.10. Normas de diseño, pruebas, y puesta en servicio . . . . .	330
6.11. Problemas resueltos . . . . .	333
6.12. Resumen . . . . .	349
6.13. Problemas propuestos . . . . .	353

## **TERCERA PARTE 357**

### **Capítulo 7. Motor de inducción polifásico 359**

7.1. Introducción . . . . .	360
7.2. Principios básicos del motor de inducción trifásico . . . . .	361
7.3. Principio de funcionamiento del campo magnético rotatorio trifásico . . . . .	364
7.4. Circuito equivalente para el motor de inducción . . . . .	365
7.5. Circuito equivalente aproximado . . . . .	370
7.6. Diagrama de potencias . . . . .	370
7.7. Ecuación del par electromagnético empleando el circuito aproximado . . . . .	372
7.8. Ecuación del par electromagnético empleando el circuito equivalente . . . . .	373

7.9. Análisis del comportamiento dinámico de un motor de inducción . . . . .	375
7.10. NEMAS y tipos de arranque . . . . .	377
7.11. Arranque estrella - delta . . . . .	378
7.12. Motores de inducción con diferentes características en el rotor . . . . .	380
7.13. Problemas del motor de inducción trifásico . . . . .	381
<b>Capítulo 8. Máquinas síncronas</b>	<b>395</b>
8.1. Introducción . . . . .	396
8.2. Clasificación y construcción física . . . . .	397
8.3. Circuito equivalente de la máquina síncrona . . . . .	399
8.4. Problemas . . . . .	404
<b>Capítulo 9. El generador síncrono</b>	<b>411</b>
9.1. Introducción . . . . .	413
9.2. Tipos de rotores . . . . .	414
9.3. Sistemas de excitación . . . . .	415
9.4. Devanado de estator y de rotor . . . . .	415
9.5. Cálculo del factor de paso . . . . .	416
9.5.1. Bobinas del rotor . . . . .	416
9.6. Cálculo del factor de distribución . . . . .	418
9.7. Velocidad síncrona . . . . .	420
9.8. Flujo rotatorio de reacción de armadura . . . . .	420
9.9. Pruebas a generadores: Curva de saturación y prueba de corto circuito . . . . .	421
9.9.1. Curva de saturación . . . . .	425
9.10. Diagrama fasorial . . . . .	426
9.11. Relación de corto circuito y de reactancia síncrona . . . . .	427
9.12. Operación con carga resistiva y su diagrama fasorial . . . . .	429
9.13. Operación con carga inductiva y su diagrama fasorial . . . . .	430
9.14. Operación con carga capacitiva y su diagrama fasorial . . . . .	430
9.15. Prueba de excitación y de factor de potencia igual a cero ( $F.P. = 0$ ), para la obtención de la reactancia de dispersión por el método del Triángulo de Potier . . . . .	431
9.16. Diagrama fasorial con la reactancia síncrona . . . . .	434
9.17. Límite de estabilidad estática del generador . . . . .	438
9.18. Diagramas circulares y la construcción de la curva de capacidad de un generador . . . . .	440
9.19. Reactancias del generador en cortocircuito trifásico . . . . .	441

9.20. Sistemas de regulación de voltaje . . . . .	442
9.21. Diagrama fasorial . . . . .	442
9.22. Problemas resueltos . . . . .	444
9.23. Resumen . . . . .	452
9.24. Problemas . . . . .	453
<b>Capítulo 10. Operación de generadores síncronos en estado estable</b>	<b>457</b>
10.1. Introducción . . . . .	458
10.2. Operación de generadores . . . . .	459
10.2.1. Características de circuito abierto y de corto circuito . . . . .	462
10.2.2. Análisis del comportamiento bajo diferentes condiciones de carga . . . . .	466
10.2.3. Diagrama de Potier . . . . .	471
10.2.4. Teoría de las dos reactancias. Teoría de Blondel . . . . .	476
10.2.5. Ángulo de potencia . . . . .	479
10.2.6. Diagrama de capacidad . . . . .	480
10.2.7. Operación en paralelo . . . . .	484
10.3. Especificaciones y normas . . . . .	487
10.4. Problemas resueltos . . . . .	488
10.5. Resumen . . . . .	495
10.6. Problemas . . . . .	496
<b>Capítulo 11. Operación de motores y condensadores síncronos</b>	<b>501</b>
11.1. Introducción . . . . .	502
11.2. Motores síncronos . . . . .	502
11.2.1. Principio de operación y características constructivas . . . . .	504
11.2.2. Arranque . . . . .	509
11.2.3. Diagrama fasorial . . . . .	511
11.2.4. Curvas “V” . . . . .	516
11.2.5. Análisis de comportamiento bajo diferentes condiciones de carga . . . . .	517
11.3. Condensadores síncronos . . . . .	518
11.3.1. Control de tensión y de factor de potencia . . . . .	519
11.3.2. Arranque . . . . .	520
11.4. Problemas resueltos . . . . .	521
11.5. Resumen . . . . .	529
11.6. Problemas . . . . .	530

<b>CUARTA PARTE</b>	<b>533</b>
<b>Capítulo 12. Máquinas de corriente continua</b>	<b>535</b>
12.1. Introducción . . . . .	536
12.2. Partes principales de las máquinas de c.c. . . . .	536
12.3. Clasificación de las máquinas de c.c. . . . .	538
12.4. Motor serie . . . . .	538
12.5. Motor paralelo . . . . .	541
12.6. Motor compuesto . . . . .	544
12.7. Generador serie . . . . .	546
12.8. Generador paralelo . . . . .	547
12.9. Generador compuesto . . . . .	549
12.10. Problemas . . . . .	550
<b>Capítulo 13. Accionamientos eléctricos de velocidad variable</b>	<b>557</b>
13.1. Introducción . . . . .	559
13.2. Característica mecánica de los accionamientos eléctricos . . . . .	563
13.2.1. Característica mecánica de las máquinas eléctricas . . . . .	565
13.3. Accionamiento eléctrico de velocidad variable para motores de corriente continua . . . . .	566
13.3.1. Características mecánicas de motor de corriente continua de excitación independiente	566
13.3.2. Característica mecánica del motor serie . . . . .	567
13.3.3. Variables de estado y diagramas de bloques para la representación de la máquina de corriente continua . . . . .	568
13.3.4. Modelado del motor de c.c. en diagrama de bloques . . . . .	576
13.3.5. Modelado empleando diagrama de bloques para el motor de c.c. . . . .	578
13.4. Función de transferencia experimental . . . . .	579
13.5. Control en cascada en motores de corriente continua . . . . .	583
13.6. Elementos básicos de electrónica de potencia que conforman el convertidor . . . . .	584
13.6.1. Convertidor estático de c.c. a c.c. . . . .	587
13.7. Diagrama de bloques simplificado de control de posición de un motor . . . . .	590
13.8. Observador lineal en motores de corriente continua . . . . .	598
13.9. Retroalimentación de estados . . . . .	602
13.10. Pasos básicos para la retroalimentación de estado . . . . .	607
13.11. Accionamiento eléctrico de velocidad variable para motores de inducción . . . . .	611
13.12. Control por variación de la resistencia del rotor . . . . .	612

13.13. Control del voltaje de línea . . . . .	613
13.14. Operación a frecuencia de deslizamiento constante . . . . .	616
13.14.1. Control de velocidad en lazo cerrado . . . . .	616
13.14.2. Control de velocidad por límite de corriente . . . . .	617
13.14.3. Control escalar voltaje/frecuencia . . . . .	617
13.15. Esquema de control general . . . . .	621
13.16. Operación voltaje/frecuencia en diferentes zonas de operación . . . . .	624
13.17. Métodos de control del inversor . . . . .	625
13.17.1. Convertidor estático de frecuencia (c.c/c.a.) como fuente de voltaje . . . . .	625
13.17.2. Topología básica de la etapa de alimentación . . . . .	626
13.17.3. Inversor como fuente de voltaje o fuente de corriente . . . . .	626
13.17.4. Inversor trifásico (como fuente de voltaje) aplicando el método de los seis pasos . . . . .	627
13.18. Inversor PWM senoidal . . . . .	630
13.19. Medición de la distorsión armónica . . . . .	633
13.19.1. Factor de potencia . . . . .	633
13.19.2. Armónicos en un motor de inducción . . . . .	634
13.19.3. Pérdidas por armónicos en el motor de inducción . . . . .	635
13.19.4. Pulsaciones de par . . . . .	636
13.20. Formas de corriente, voltaje y velocidad para un esquema $v/f$ . . . . .	637
13.21. Control en lazo cerrado de velocidad para un motor de inducción utilizando el control de voltaje-frecuencia . . . . .	640
13.21.1. Esquema de lazo cerrado de velocidad . . . . .	641
13.21.2. Resultados experimentales de velocidad . . . . .	643
<b>Capítulo 14. Control vectorial de los motores de inducción</b>	<b>647</b>
14.1. Introducción . . . . .	649
14.2. Principios de control vectorial con orientación del flujo del rotor . . . . .	653
14.3. Localización del vector de flujo del rotor . . . . .	659
14.4. Implementación del control vectorial . . . . .	661
14.5. Método directo de campo orientado . . . . .	662
14.6. Método indirecto de campo orientado . . . . .	664
14.7. Cálculo de la corriente de magnetización modificada . . . . .	666
14.7.1. Bloque de cálculo de las componentes de corrientes de referencia $i^{*ds}$ e $i^{*qs}$ y de la velocidad de deslizamiento de referencia $\omega_2$ . . . . .	668
14.7.2. Cálculo del vector unitario . . . . .	669



14.7.3. Transformación inversa de coordenadas . . . . .	669
14.8. Principios básicos para el desarrollo del control vectorial . . . . .	670
14.8.1. Técnica de modulación de banda de histéresis . . . . .	670
14.8.2. Diagrama de conmutación de un controlador de histéresis . . . . .	673
14.9. Análisis del desempeño del PWM banda de histéresis . . . . .	676
14.10. Estimación del flujo rotórico . . . . .	680
14.11. Estimación de la resistencia del rotor . . . . .	680
14.12. Estimación de la constante de tiempo del rotor mediante un modelo de flujo adaptable del sistema . . . . .	684
14.12.1. Obtención de los modelos fijo y adaptable del flujo del rotor . . . . .	684
14.13. Control de flujo y velocidad . . . . .	688
14.13.1. Control del flujo . . . . .	688
14.13.2. Control de velocidad . . . . .	689
14.13.3. Estabilidad del sistema . . . . .	693
14.14. Respuesta global del control vectorial . . . . .	694
14.15. Eliminación de sensores de velocidad en accionamientos de motores de inducción . . . . .	696
14.15.1. Empleo de observadores y estimadores en el control vectorial . . . . .	696
14.15.2. El filtro de Kalman . . . . .	700
14.15.3. Covarianza del ruido . . . . .	701
14.15.4. Estructura del filtro . . . . .	702
14.15.5. Filtro de Kalman discreto . . . . .	702
14.15.6. Modelo dinámico del motor de inducción . . . . .	707
14.15.7. Modelo de Brunsbach . . . . .	707
14.15.8. Modelo de Vasson . . . . .	708
14.15.9. Modelo discretizado del motor . . . . .	709
14.16. Redes neuronales artificiales (RNA) para la estimación de la velocidad . . . . .	710
14.16.1. Introducción . . . . .	710
14.16.2. Principios básicos de redes neuronales . . . . .	713
<b>Capítulo 15. Control directo del par</b>	<b>717</b>
15.1. Introducción . . . . .	718
15.2. Principios básicos del control directo del par . . . . .	724
15.3. Esquema convencional del control directo del par . . . . .	727
15.4. Inversor fuente de voltaje (VSI) empleado en el DTC . . . . .	729
15.5. Resultados del desempeño dinámico del control directo del par . . . . .	731

15.6. Problema de la distorsión del flujo del estator cuando ocurre un cambio de sector durante la rotación del flujo magnético del estator en el DTC . . . . .	735
15.7. Sectores variables en el control directo del par . . . . .	735
15.8. Lazo cerrado de velocidad en el control directo del par . . . . .	742

## **EN LA PÁGINA WEB DEL LIBRO:**

### **Capítulo 16. Máquinas eléctricas especiales**

- 16.1 Introducción
- 16.2 Energía maremotriz
- 16.3 Energía geotérmica
- 16.4 Usos de la energía geotérmica
- 16.5 Energía nuclear
- 16.6 La energía eólica
- 16.7 Energías renovables
- 16.8 Aplicaciones de las máquinas eléctricas especiales
- 16.9 Nano máquinas
- 16.10 Vehículos híbridos y eléctricos
- 16.11 Bibliografía