

# CONTENIDO

Prefacio XI

Acerca del autor XIV

## Capítulo 1

### Introducción 1

- 1.1 Qué 1
- 1.2 Cuándo 2
- 1.3 Dónde 2
- 1.4 Cómo 3

## Capítulo 2

### Circuitos en estado estable senoidal 5

- 2.1 Introducción 5
- 2.2 Principios de fasores y de impedancia 5
- 2.3 Análisis de redes monofásicas 10
- 2.4 Redes trifásicas 14
  - 2.4.1 Arreglos de conexiones 15
  - 2.4.2 Condiciones balanceadas 16
  - 2.4.3 Transformaciones de conexiones 21
  - 2.4.4 Análisis 23
- 2.5 Flujo de potencia 28
  - 2.5.1 Circuitos monofásicos 28
  - 2.5.2 Circuitos trifásicos 32
  - 2.5.3 Medición de potencia 34
  - 2.5.4 Corrección del factor de potencia 35
- 2.6 Circuitos con frecuencias múltiples 38
- 2.7 Código para el análisis computacional 39
- Resumen 43
- Problemas 44

## Capítulo 3

### Circuitos magnéticos y conversión de energía 49

- 3.1 Introducción 49
- 3.2 Leyes y reglas 49

3.3 Ferromagnetismo 54

- 3.3.1 Saturación 54
- 3.3.2 Histéresis 57
- 3.3.3 Temperatura de Curie y magnetostricción 57

3.4 Circuitos magnéticos 57

- 3.4.1 Metodología de análisis 58
- 3.4.2 Efecto de los bordes en el entrehierro 59
- 3.4.3 Flujo de fuga 61
- 3.4.4 Circuitos magnéticos en serie 61
- 3.4.5 Circuitos magnéticos en paralelo 69

3.5 Energía e inductancia 76

- 3.5.1 Inductancia 76
- 3.5.2 Energía 80

3.6 Excitación senoidal 81

3.7 Imanes permanentes 83

- 3.7.1 Clasificación y características 84
- 3.7.2 Desempeño 85

3.8 Conversión de energía 90

- 3.8.1 Formulación de modelos 90
- 3.8.2 Fuerza y energía 92
- 3.8.3 Fuerza y coenergía 98
- 3.8.4 Sistemas con doble excitación 102

3.9 Diseño de solenoides 103

- 3.9.1 Dimensionamiento burdo 104
- 3.9.2 Circuito magnético 106
- 3.9.3 Diseño prueba 108

3.10 Código para análisis computacional 113

Resumen 126

Problemas 127

Referencias 130

## Capítulo 4

### Transformadores 131

- 4.1 Introducción 131
- 4.2 Construcción física 132
- 4.3 El transformador ideal 133
  - 4.3.1 Diagramas de circuito 137

4.3.2	Relaciones de tensión y de corriente	137
4.3.3	Relaciones de potencia e impedancia	139
4.4	El transformador real	141
4.4.1	Transformador con núcleo sin pérdidas	141
4.4.2	Propiedades del núcleo ferromagnético	143
4.4.3	Utilidad de las implicaciones de desempeño	152
4.4.4	Placa de datos y polaridad de los devanados	155
4.5	Determinación experimental de los parámetros	156
4.5.1	Pruebas preliminares	157
4.5.2	Prueba de cortocircuito	157
4.5.3	Prueba de circuito abierto	158
4.6	Evaluación del desempeño	161
4.6.1	Análisis voltaje-corriente	161
4.6.2	Circuito equivalente aproximado	163
4.6.3	Eficiencia	166
4.6.4	Regulación de tensión	171
4.6.5	Corriente arrastre	173
4.7	Transformadores de distribución residencial	175
4.8	Autotransformadores	176
4.8.1	Autotransformador ideal	176
4.8.2	Flujo de potencia	178
4.9	Transformadores trifásicos	179
4.9.1	Esquemas de conexión	180
4.9.2	Análisis del desempeño del transformador	183
4.10	Transformador con embobinados en derivación	185
4.10.1	Ajuste fijo de las derivaciones	185
4.10.2	Cambio de puntos de derivación bajo carga	187
4.11	Transformadores de instrumentación	188
4.11.1	Transformadores de potencial	188
4.11.2	Transformadores de corriente	188
4.12	Diseño de transformadores	189
4.12.1	Dimensionamiento del volumen del núcleo	189
4.12.2	Análisis del circuito magnético	192

4.12.3	Parámetros del circuito equivalente	194
--------	-------------------------------------	-----

4.12.4	Ejemplo de diseño	198
--------	-------------------	-----

4.13	Código para análisis computacional	203
------	------------------------------------	-----

Resumen	221
---------	-----

Problemas	222
-----------	-----

Referencias	227
-------------	-----

## Capítulo 5

### Máquinas de cd 229

5.1	Introducción	229
-----	--------------	-----

5.2	Construcción física	229
-----	---------------------	-----

5.3	Principios de tensión y de par	232
-----	--------------------------------	-----

5.3.1	Campo magnético sin carga	232
-------	---------------------------	-----

5.3.2	Tensión inducida en el devanado de la armadura	234
-------	--	-----

5.3.3	Par electromagnético desarrollado	239
-------	-----------------------------------	-----

5.4	Clasificación por devanado de campo	241
-----	-------------------------------------	-----

5.4.1	Devanados de campo básicos	241
-------	----------------------------	-----

5.4.2	Arreglos de conexión del campo	242
-------	--------------------------------	-----

5.5	Naturaleza e interacción de los campos magnéticos	243
-----	---	-----

5.5.1	Circuito magnético principal	243
-------	------------------------------	-----

5.5.2	Interacción de los campos magnéticos	245
-------	--------------------------------------	-----

5.6	Desempeño del generador	251
-----	-------------------------	-----

5.6.1	Generador de cd excitado separadamente	252
-------	--	-----

5.6.2	Generador de cd en paralelo (shunt)	254
-------	-------------------------------------	-----

5.6.3	Generador de cd con excitación en serie	256
-------	---	-----

5.6.4	Generador de cd compuesto acumulativo (aditivo)	256
-------	---	-----

5.6.5	Generador compuesto diferencial de cd	258
-------	---------------------------------------	-----

5.7	Desempeño de motores	259
-----	----------------------	-----

5.7.1	Motor de cd con excitación en paralelo	261
-------	--	-----

5.7.2	Motor de cd con excitación en serie	263
-------	-------------------------------------	-----

5.7.3	Motor compuesto acumulativo de cd	266
-------	-----------------------------------	-----

5.7.4	Motor de excitación compuesta sustractiva de cd	269
-------	---	-----

- 5.8 Control de motores 271
    - 5.8.1 Control de arranque 271
    - 5.8.2 Control de velocidad 272
  - 5.9 Diseño de motores de cd 275
    - 5.9.1 Clasificaciones y estandarizaciones 276
    - 5.9.2 Dimensionamiento del volumen y del diámetro interior 277
    - 5.9.3 Diseño de la armadura 279
    - 5.9.4 Diseño de polos de campo 286
    - 5.9.5 Análisis del circuito magnético 288
    - 5.9.6 Diseño del devanado de campo 290
    - 5.9.7 Refinamiento del diseño 291
    - 5.9.8 Diseño muestra 291
  - 5.10 Códigos para el análisis computacional 299
  - Resumen 310
  - Problemas 311
  - Referencias 316
- Capítulo 6**
- Motores de inducción 317**
- 6.1 Introducción 317
  - 6.2 Clasificación y construcción física 317
  - 6.3 Devanado y fmm del estator 319
    - 6.3.1 Devanados de estator 319
    - 6.3.2 Fmm del devanado 319
    - 6.3.3 Onda viajera del entrehierro del estator 326
    - 6.3.4 Velocidad síncrona 327
  - 6.4 Acción y deslizamiento del rotor 328
    - 6.4.1 Tensiones inducidas en el devanado del rotor 328
    - 6.4.2 Onda viajera del entrehierro del rotor 331
  - 6.5 Circuito equivalente 333
  - 6.6 Determinación experimental de los parámetros 335
    - 6.6.1 Prueba con rotor bloqueado 336
    - 6.6.2 Prueba en vacío 337
  - 6.7 Naturaleza y cálculos del desempeño 340
    - 6.7.1 Flujo de potencia en el motor de inducción 340
    - 6.7.2 Determinación del par desarrollado 341
    - 6.7.3 Naturaleza del par desarrollado 348
    - 6.7.4 Sensibilidad a la frecuencia de los parámetros del rotor 352
    - 6.7.5 Evaluación del desempeño de la máquina 353
  - 6.8 Arranque a tensión reducida 355
    - 6.8.1 Arranque por autotransformador 357
    - 6.8.2 Arrancador de estado sólido 358
  - 6.9 Control de la velocidad 358
    - 6.9.1 Control de la resistencia del rotor 359
    - 6.9.2 Control de tensión 359
    - 6.9.3 Cambio de polos 360
    - 6.9.4 Control por frecuencia 361
  - 6.10 Motores monofásicos 366
    - 6.10.1 Campo en el entrehierro 367
    - 6.10.2 Circuito equivalente 368
    - 6.10.3 Naturaleza del desempeño 370
    - 6.10.4 Devanado auxiliar de arranque 373
  - 6.11 Diseño de motores de inducción 375
    - 6.11.1 Clasificaciones y estandarizaciones 375
    - 6.11.2 Dimensionamiento del volumen y del diámetro interior 377
    - 6.11.3 Diseño del estator 379
    - 6.11.4 Diseño del rotor 385
    - 6.11.5 Parámetros de circuito equivalente 389
    - 6.11.6 Refinamiento del diseño 395
    - 6.11.7 Ejemplo de diseño 396
  - 6.12 Código para el análisis computacional 404
  - Resumen 417
  - Problemas 417
  - Referencias 420
- Capítulo 7**
- Máquinas síncronas 421**
- 7.1 Introducción 421
  - 7.2 Clasificación y construcción física 422
    - 7.2.1 Devanado y fmm del estator 422
    - 7.2.2 Devanados del rotor y campos del entrehierro 425
  - 7.3 Tensiones generadas y circuito equivalente 428
    - 7.3.1 Flujos y voltajes de los devanados 429

- 7.3.2 Circuito equivalente por fase: caso de rotor redondo (cilíndrico) 43 1
  - 7.3.3 Linealización** magnética 434
  - 7.4** Parámetros del circuito equivalente a partir de los datos de prueba 437
  - 7.5** Desempeño del generador 44 1
    - 7.5.1 Diagrama fasorial del generador síncrono 44 1
    - 7.5.2 Par electromecánico desarrollado 443
    - 7.5.3** Generadores síncronos aislados 445
    - 7.5.4 Generadores síncronos interconectados 449
  - 7.6** Desempeño del motor 455
  - 7.7** Desempeño de la máquina de polos salientes 458
  - 7.8** Motores autosíncronos 465
    - 7.8.1 Motores de **cd** sin escobillas 465
    - 7.8.2 Motores de reluctancia conmutada 470
  - 7.9** Diseño de máquinas síncronas 476
    - 7.9.1 Estándares y clasificaciones 476
    - 7.9.2** Dimensionamiento del volumen y diámetro interior 477
    - 7.9.3** Diseño del estator 479
    - 7.9.4 Dimensionamiento del entrehierro 483
    - 7.9.5** Diseño del rotor 483
    - 7.9.6 Parámetros de circuito equivalente 49 1
    - 7.9.7** Refinamiento del diseño 492
    - 7.9.8** Ejemplo de diseño 492
  - 7.10 Código para análisis computacional 499
  - Resumen 5 11
  - Problemas 5 12
  - Referencias 5 15
- Apéndice A
- Factores de devanado 517**
- A.1 Factor de distribución 5 17
  - A.2 Factor de paso 520
  - A.3 Factor de devanado 521
- Apéndice B
- Factores de conversión 523**
- Apéndice C
- Tablas de alambre magneto 525**
- C.1 Alambre redondo con película de aislante 525
  - C.2 Alambre cuadrado con película de aislante 526
- índice **527**