

	<u>Páginas</u>
7. Métodos de cálculo de entrehierros cortos.	67
8. Ejemplo de cálculo para un circuito ferromagnético sencillo con entrehierro corto.	73
9. Ejemplos de cálculos para caminos serie-paralelo de material ferromagnético y entrehierros cortos.	77
10. Cálculos para entrehierros largos y para caminos del flujo de pérdidas.	79
11. Ejemplo de cálculo del flujo de pérdidas del circuito magnético de un oscilógrafo.	80
12. Cálculo de la curva de imanación de una dinamo	82
Problemas.	91

CAPÍTULO IV

IMANES PERMANENTES Y ENERGÍA DEL CAMPO MAGNÉTICO.	95
1. Circuitos magnéticos que contienen imanes permanentes.	96
2. Diseño para emplear la mínima cantidad de material magnético	99
3. Dispersión y pérdida.	101
4. Estabilización de imanes permanentes.	108
5. Energía del campo magnético	110
6. Fuerza atractiva magnética.	114
Problemas.	118

CAPÍTULO V

PÉRDIDAS EN NÚCLEOS MAGNÉTICOS QUE CONTENGAN FLUJOS VARIABLES CON EL TIEMPO.	121
1. Pérdida por histeresis.	121
2. Corrientes de Foucault y efecto cortical.	128
3. Pérdida total en el núcleo.	134
4. Reducción de la pérdida total en el núcleo; consideraciones de diseño	137
5. Medida de la pérdida total en el núcleo.	140
6. Curvas de pérdida experimentales, coeficientes experimentales.	143
7. Separación de las pérdidas por histeresis y por corrientes de Foucault	146
Problemas.	149

CAPÍTULO VI

CARACTERÍSTICAS DE EXCITACIÓN POR CORRIENTE ALTERNA DE LAS BOBINAS CON NÚCLEO DE HIERRO Y DE LOS TRANSFORMADORES.	151
1. Propiedades generales de las bobinas con núcleo de hierro.	151
2. Núcleos de hierro en los transformadores.	152
3. Hipótesis.	153
3a. Capacidad.	153
3b. Resistencia.	153
4. Relaciones entre la tensión inducida, el flujo y la intensidad de la corriente.	154

	Páginas
5. Tensión alterna aplicada.	155
6. Corriente de excitación sinusoidal.	159
7. Tensión inducida por un flujo sinusoidal.	161
8. Forma de onda de la corriente de excitación para flujo sinusoidal	163
9. Propiedades generales de las series de Fourier.	167
9a. Término constante.	168
9b. Funciones pares e impares.	168
9c. Armónicos pares e impares.	169
9d. Potencia.	170
9e. Valores eficaces.	173
10. Análisis de Fourier de la corriente de excitación para flujo sinusoidal.	174
10a. Efecto de un entrehierro	177
11. Representación vectorial de la corriente de excitación.	179
12. Características de la excitación en corriente alterna.	181
12a. Ejemplo de diseño de una bobina con núcleo de hierro	186
13. Circuitos equivalentes.	187
14. Características del hierro sometido a un campo magnético alterno superpuesto a otro continuo.	190
15. Bobinas con núcleo de hierro con excitaciones continua y alterna superpuestas.	194
15a. Ejemplo de cálculo de una autoinducción aparente	195
Problemas.	199

CAPÍTULO VII

TEORÍA DE MODELOS Y DISEÑOS DE BOBINAS CON NÚCLEO DE HIERRO.	204
1. Relaciones generales.	204
2. Efectos de los cambios en el devanado.	208
3. Efecto de los cambios en las dimensiones lineales.	210
4. Consideraciones energéticas.	213
5. Efectos de un entrehierro.	220
5a. Reducción de los efectos no lineales por medio de un entrehierro.	220
5b. Efectos de un entrehierro sobre el factor de calidad.	222
6. Teoría de modelos aplicada a redes.	224
6a. Relaciones entre las variables.	225
6b. Relaciones entre los parámetros lineales correspondientes.	226
6c. Relaciones entre las bobinas prototipo y derivada.	227
Problemas.	230

CAPÍTULO VIII

PROPIEDADES TÉRMICAS Y CIRCULACIÓN DEL CALOR.	233
1. Efectos del calor sobre los materiales.	233
2. Conducción del calor.	235
3. Radiación del calor.	237

4.	Convección del calor.	240
5.	Refrigeración de los aparatos eléctricos	241
	5a. Transformadores.	242
	5b. Máquinas giratorias.	242
6.	Calentamiento transitorio.	243

PARTE II. TRANSFORMADORES

CAPÍTULO IX

CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO Y COSTO.	249
1. Maquinaria eléctrica.	249
2. Sistemas de potencia.	251
3. Dispositivos electrónicos.	251
4. Circuitos electrónicos y de otros tipos.	253

CAPÍTULO X

TRANSFORMADORES: PRINCIPIOS GENERALES.	254
1. Teoría elemental del transformador.	254
2. Transformador ideal.	257
3. Usos de los transformadores.	260
4. Evolución de los transformadores.	267
5. Problemas de los transformadores	268
5a. Pérdidas.	268
5b. Refrigeración.	268
5c. Fugas magnéticas.	268
5d. Corriente de excitación.	269
5e. Campo eléctrico.	270
5f. Problemas de fabricación.	270
5g. Otras consideraciones.	270
Problemas.	270

CAPÍTULO XI

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS TRANSFORMADORES.	274
1. Núcleos.	274
2. Devanados.	280
3. Refrigeración y aislamiento.	285
3a. Refrigeración por aire	285
3b. Refrigeración por corriente de aire.	285
3c. Aceite para transformadores.	287
3d. Inmersión en aceite, autorrefrigeración.	287
3e. Inmersión en aceite, refrigeración por aire forzado.	287
3f. Inmersión en aceite, refrigeración por agua.	287
3g. Refrigeración por aceite forzado.	287
3h. Pyranol, Inerteen o Chlorextol	289

4. Tanques.	289
5. Pasatapas.	290
6. Dispositivos de protección.	291
7. Blindaje.	297

CAPÍTULO XII

FUGAS MAGNÉTICAS EN LOS TRANSFORMADORES.	300
1. Fugas magnéticas en vacío.	300
2. Ecuaciones de tensiones y distribución de flujo bajo carga.	304
2a. Flujos componentes.	305
2b. Distribución resultante del flujo.	306
3. Inductancias de fuga.	310
4. Componentes de excitación y de carga de la corriente del primario.	312
5. Circuito equivalente.	313
6. Efectos del núcleo de hierro y aproximaciones simplificativas.	314
Problemas.	315

CAPÍTULO XIII

INDUCTANCIAS DE FUGA.	318
1. Diagramas vectoriales y un circuito equivalente.	318
2. Transformador con igual número de espiras en primario y en secundario.	323
3. Razón de transformación.	324
4. Transformador equivalente de razón uno es a uno.	325
5. Ejemplo ilustrativo de las relaciones vectoriales «exactas».	330
6. Circuitos equivalentes simplificados; impedancia equivalente.	333
7. Ejemplo ilustrativo de las relaciones vectoriales simplificadas.	335
8. Determinación de los parámetros mediante ensayos.	337
8a. Ensayos en circuito abierto.	337
8b. Ensayos en corto circuito.	338
8c. Circuito equivalente «exacto» determinado a partir de ensayos.	340
9. Determinación de los parámetros a partir de las dimensiones.	341
Problemas.	346

CAPÍTULO XIV

REGULACIÓN DE TENSIÓN, RENDIMIENTO Y VALORES NOMINALES.	352
1. Regulación de tensión.	352
2. Rendimiento.	356
2a. Pérdida en el núcleo.	357
2b. Pérdida en la carga.	357
3. Rendimiento convencional.	358
3a. Pérdida en el núcleo.	358
3b. Pérdida en la carga.	359

4.	Ejemplo de cálculo de la regulación y del rendimiento	361
5.	Rendimiento energético; ejemplo	362
6.	Tantos por ciento y por uno	364
7.	Ejemplo ilustrativo del sistema de tantos por uno.	368
8.	Valores nominales de los transformadores de potencia y de distribución. Problemas.	370 374

CAPÍTULO XV

AUTOTRANSFORMADORES.	378
1. Relaciones de tensiones y corrientes.	378
2. Valores nominales.	380
3. Pérdidas y rendimiento.	382
4. Corriente de excitación.	383
5. Circuitos equivalentes y fenómenos de impedancia.	384
6. Conclusiones.	388
Problemas.	388

CAPÍTULO XVI

ECONOMÍA EN LAS APLICACIONES DE LOS TRANSFORMADORES DE SISTEMAS DE POTENCIA.	391
1. Elementos de los costos de transformadores.	392
2. Costos directos fijos.	393
3. Costos directos de funcionamiento.	395
4. Ejemplo: Comparación de transformadores usados y nuevos.	400
5. Costos indirectos.	405
6. Costos de mantenimiento.	406
7. Determinación de la razón de pérdida más económica.	407
8. Determinación del producto de pérdida más económico.	411
9. Resumen del estudio del costo de un transformador.	413
Problemas.	414

CAPÍTULO XVII

AUTOINDUCCIONES E INDUCCIONES MUTUAS.	417
1. Ecuaciones para circuitos acoplados.	419
2. Coeficiente de acoplo y coeficiente de fuga.	422
3. Medida de los parámetros.	425
3a. Medida de autoinducciones.	427
3b. Medida de inducciones mutuas.	429
3c. Ensayos en corto circuito.	431
3d. Conclusiones referentes a las medidas de los parámetros.	435
4. Inductancia de fuga.	436
5. Circuitos equivalentes para transformadores de dos devanados.	437
6. Resumen.	445
Problemas.	445

CAPÍTULO XVIII

Páginas

CARACTERÍSTICAS DE FRECUENCIA.	449
1. Relaciones de potencia.	450
2. Características de frecuencia y fase de los transformadores de salida.	453
3. Características de frecuencia y fase de los transformadores de entrada e interetapa.	466
Problemas.	474

CAPÍTULO XIX

APLICACIONES DE LOS TRANSFORMADORES EN SISTEMAS DE POTENCIA.	476
1. Transformadores para instrumentos.	476
1a. Transformador de potencia.	476
1b. Transformador de intensidad.	477
1c. Conexiones trifásicas.	479
2. Transformador de intensidad constante.	481
3. Transformador de razón ajustable o con cambio de tomas.	485
4. Transformadores reguladores de tensión.	487
4a. Regulador por etapas.	487
4b. Regulador por inducción.	489
Problemas.	492

CAPÍTULO XX

APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES EN SISTEMAS TELEFÓNICOS.	496
1. Bobina de inducción.	496
2. Bobina repetidora.	498
3. Bobina híbrida o transformadora de tres devanados.	500

CAPÍTULO XXI

CONEXIONES TRIFÁSICAS; CONSIDERACIONES GENERALES.	502
1. Conexión triángulo-triángulo.	503
1a. Relaciones de tensiones y corrientes en circuitos triángulo equilibrados.	504
1b. Resumen; conexión triángulo.	506
2. Conexión estrella-estrella.	507
2a. Neutro de los primarios conectados al neutro del generador.	508
2b. Neutro primario aislado.	511
2c. Resumen; conexión estrella.	513
3. Comparación de las conexiones estrella y triángulo.	513
4. Conexiones triángulo-estrella y estrella-triángulo	515
5. Conexión en V o triángulo abierto.	518
6. Funcionamiento de emergencia de bancos triángulo-estrella y estrella-triángulo.	521
Problemas.	522

CAPÍTULO XXII

Páginas

EFFECTOS DE LAS IMPEDANCIAS DE LOS TRANSFORMADORES EN LOS CIRCUITOS TRIFÁSICOS.	526
1. Circuitos equivalentes.	526
2. Circuitos equivalentes monofásicos para condiciones de equilibrio.	529
2a. Ejemplo de circuito equilibrado.	531
2b. Ejemplo resuelto con cantidades expresadas en tanto por uno.	534
Problemas.	537

CAPÍTULO XXIII

FENÓMENOS DE ARMÓNICOS EN LOS CIRCUITOS TRIFÁSICOS.	540
1. Primarios conectados en triángulo.	540
1a. Terceros armónicos.	541
1b. Quintos armónicos.	542
1c. Resumen de los defasajes entre armónicos.	543
1d. Intensidades eficaces de las corrientes en el triángulo y en la línea.	544
1e. Conexiones triángulo-estrella y triángulo-triángulo.	545
2. Primarios conectados en estrella.	546
2a. Conexión estrella-estrella: neutro de primarios conectado al neutro del generador.	546
2b. Interferencia inductiva ocasionada por el tercer armónico de las corrientes de excitación.	547
2c. Conexión estrella-triángulo.	549
2d. Conexión estrella-estrella con neutros aislados.	551
3. Igualación de las tensiones de los neutros en los bancos estrella-estrella.	555
3a. Transformadores de puesta a tierra en estrella-triángulo.	555
3b. Conexión estrella-estrella-triángulo.	557
4. Resumen de los fenómenos debidos a los armónicos.	558
Problemas.	559

CAPÍTULO XXIV

BANCOS TRIFÁSICOS DE TRANSFORMADORES DESEQUILIBRADOS.	561
1. Condiciones de desequilibrio en bancos triángulo-triángulo	563
1a. Corrientes circulantes en bancos triángulo-triángulo, debidas a razones de transformación desiguales.	563
1b. Ecuaciones generales para bancos triángulo-triángulo; razones de transformación iguales.	563
2. Corrientes monofásicas en bancos trifásicos	566
3. Avería de línea a tierra en el lado de primarios de un banco estrella-triángulo con neutro a tierra.	570
4. Análisis de componentes simétricas.	571
Problemas.	575

CAPÍTULO XXV

Páginas

CONEXIONES TRIFÁSICAS DE AUTOTRANSFORMADORES.	578
1. Conexión en estrella de autotransformadores.	578
2. Conexión en triángulo de autotransformadores.	579
3. Conexión de autotransformadores en triángulo abierto.	580
3a. Compensadores de arranque.	580
4. Conexión en zigzag.	581
4a. Transformadores de puesta a tierra conectados en zigzag.	583
Problemas.	583

CAPÍTULO XXVI

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.	585
1. Tipo acorazado.	585
2. Tipo de núcleo con tres ramas.	587
2a. Fenómenos de excitación en los transformadores trifásicos del tipo de núcleo de tres ramas conectados en estrella-estrella.	589
2b. Corrientes de secuencia cero en los transformadores del tipo de núcleo de tres ramas.	591
3. Conexión en triángulo abierto de transformadores trifásicos.	592
4. Comparación de los transformadores trifásicos y monofásicos.	592
Problemas.	594

CAPÍTULO XXVII

TRANSFORMADORES MULTICIRCUITO.	596
1. Teoría general de los transformadores multicircuito.	597
1a. Ecuaciones para las tensiones en las mallas.	598
1b. Admitancias de entrada y de transferencia en corto circuito	600
1c. Ecuaciones para las corrientes en los nudos	601
1d. Comparación de las ecuaciones para las mallas y para los nudos	602
1e. Intensidades, tensiones y parámetros del circuito referidos a una base común.	603
2. Circuitos equivalentes.	604
2a. Circuito equivalente para corriente de excitación despreciable.	606
2b. Relaciones entre el circuito equivalente y las ecuaciones intensidad-tensión.	607
3. Medida de las admitancias.	608
3a. Relaciones de las admitancias con la teoría del transformador de dos circuitos.	612

	Páginas
4. Resumen de la teoría del transformador multicircuito.	614
5. Transformadores de tres circuitos.	615
5a. A partir de la teoría del transformador multicircuito	615
5b. El transformador de tres circuitos como red de tres terminales.	616
5c. Determinación de los parámetros del circuito equivalente.	618
5d. Circuitos equivalentes que incluyen a la corriente de excitación.	620
5e. Resumen de la teoría del transformador de tres circuitos.	621
5f. Ejemplo de cálculo de un transformador de tres circuitos.	622
Problemas.	625

CAPÍTULO XXVIII

CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE FASES.	628
1. Conexión trifásica a hexafásica simétricas.	628
1a. Conexión en estrella hexafásica.	629
1b. Conexión diametral.	630
1c. Conexión en doble estrella.	632
1d. Conexión en doble triángulo.	632
1e. Efectos de las conexiones de los primarios.	632
2. Transformación de fases con secundarios conectados en cruz.	634
2a. Conexión en doble zigzag.	635
2b. Conexión en cuádruple zigzag.	636
3. Transformación de tres a dos fases.	636
3a. Trifásico de cuatro hilos a bifásico.	637
3b. Conexión Scott.	638
3c. Conexión en T.	639
4. Resumen.	640
Problemas.	641

CAPÍTULO XXIX

FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES EN PARALELO.	644
1. Funcionamiento en paralelo en circuitos monofásicos.	644
1a. Razones de transformación iguales.	645
1b. Razones de transformación desiguales.	649
2. Funcionamiento de grupos trifásicos en paralelo.	652
2a. Montajes simétricos en circuitos equilibrados.	652
2b. Grupos triángulo-triángulo asimétricos.	653
Problemas.	654

APÉNDICES

Páginas

A. VALORES NOMINALES PREFERIDOS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA Y DISTRIBUCIÓN.	657
B. MARCAS NORMALIZADAS PARA LOS TERMINALES DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA Y DISTRIBUCIÓN.	660
BIBLIOGRAFÍA.	663
ÍNDICE ALFABÉTICO.	679