



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias
Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Eléctrica

APUNTES EL42C

**CONVERSION
ELECTROMECHANICA
DE LA ENERGIA**

VERSION OTOÑO 2003

INDICE

PRESENTACION	11
1. INTRODUCCION	12
1.1. Dispositivos de Conversión Electromecánica	12
1.2. Componentes de un Sistema Eléctrico de Potencia	13
2. ELECTROMAGNETISMO Y CIRCUITOS MAGNETICOS	15
2.1. Conceptos de Electromagnetismo	15
2.1.1. Generalidades.....	15
2.1.2. Campo magnético.....	15
2.1.3. Principios básicos del motor eléctrico.....	18
2.1.4. Principios básicos del generador eléctrico.	20
2.2. CIRCUITOS MAGNETICOS.....	21
2.2.1. Generalidades.....	21
2.2.2. Circuito magnético simple.	23
2.2.3. Circuito eléctrico equivalente.....	24
2.2.4. Corriente-variable en el tiempo.....	26
2.2.5. Inductancias.....	27
2.2.6. Energía en el campo magnético.	30
2.2.7. Circuitos magnéticos con entrehierro.....	33
2.3 Problemas Resueltos	35
3. TRANSFORMADORES	41
3.1. GENERALIDADES.	41
3.1.1. Principio básico de funcionamiento y campos de aplicación.....	41
3.1.2. Aspectos constructivos.....	43
3.2. TRANSFORMADOR MONOFASICO IDEAL.....	46
3.2.1. Definición.....	46
3.2.2. Relación de voltajes.	46
3.2.3. Relación de corrientes.	48
3.2.4. Circuito equivalente referido a uno de los enrollados.....	50
3.3. TRANSFORMADOR MONOFASICO REAL (NO IDEAL).....	51
3.3.1. Permeabilidad magnética finita.....	51
3.3.2. Existencia de flujos de fuga.	54
3.3.3. Efecto de resistencias de enrollados.....	57
3.3.4. Consideración de pérdidas en el fierro.....	57
3.3.5. Determinación experimental de los parámetros del circuito equivalente.	60
3.3.6. Análisis del comportamiento a partir del circuito equivalente.....	63
3.3.7. Conexión en paralelo de transformadores monofásicos.....	68
3.5 Transformadores Trifásicos.....	70
3.5.1 Consideraciones básicas.....	70
3.5.2. Núcleos de Transformadores trifásicos.....	71
3.5.3 Principales características de las conexiones trifásicas de transformadores.	73
3.5.4 Armónicas en las distintas conexiones trifásicas de transformadores.....	80
3.5.5. Designación normalizada de conexiones de transformadores trifásicos.....	85
3.5.6. Conexión en paralelo de transformadores trifásicos.	95
3.6 Transformadores Especiales.....	107
3.6.1. Transformadores de medida.	107
3.6.2 Autotransformadores	111

3.6.3. Transformadores para circuitos de audio.....	115
3.6.4 Transformadores de fuga.....	119
3.6.5 Transformadores de Pulso.....	121
3.6.6 Transformadores de 3 enrollados.....	121
3.6.7 Transformadores para rectificadores de potencia.....	123
4. Principios Básicos de Máquinas Eléctricas.....	125
4.1 Introducción.....	125
4.2 Motor Electrico.....	127
4.2.1 Motor elemental de un enrollado.....	127
4.2.2 Motor de dos enrollados.....	132
4.3 Generador Eléctrico.....	139
5. Maquinas de Corriente Continua.....	145
5.1. Principios de Funcionamiento.....	145
5.1.1. Principio de funcionamiento del generador de C.C. o dínamo.....	145
5.1.2. Principio de funcionamiento del motor de C.C.....	150
5.2. Desempeño de máquinas de C.C. reales.....	151
5.2.1. Saturación del material ferromagnético.....	152
5.2.2. Reacción de armadura.....	154
5.2.3. Pérdidas en máquinas de C.C.....	158
5.3. Aspectos Constructivos de máquinas de C.C.....	160
5.4. Conexiones de máquinas de C.C.....	164
5.4.1. Generadores de C.C.....	164
5.4.2. Motores de C.C.....	177
5.5 Aplicaciones.....	186
5.5.1 Introducción.....	186
5.5.2 Aplicaciones domésticas.....	186
5.5.3 Aplicaciones industriales.....	187
5.5.4 Aplicaciones en transporte.....	188
5.5.5 Ejemplo característico Chileno: La gran industria minera del cobre.....	188
Ejercicios resueltos.....	189
6. Máquinas de Inducción.....	194
6.1 Introducción.....	194
6.2. Principio de Funcionamiento.....	194
6.2.1. Campo Magnético Rotatorio del estator.....	194
6.2.2. Torque motriz.....	198
6.2.3. Deslizamiento.....	200
6.3. Características constructivas.....	201
6.4. Modelo Equivalente monofásico del Motor de Inducción.....	203
6.5. Cálculo de Parámetros.....	208
6.5.1. Prueba en vacío.....	208
6.5.2. Prueba de rotor bloqueado.....	209
6.6. Análisis del motor de inducción a partir del Modelo Equivalente.....	210
6.6.1. Potencia transferida al eje.....	210
6.6.2. Torque electromagnético.....	210
6.6.3. Punto de operación.....	213
6.7. Motor de inducción monofásico.....	214

6.8 APLICACIÓN: UN NUEVO ESQUEMA DE ANÁLISIS DE FALLAS MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE ESTATOR EN MOTORES DE INDUCCIÓN	217
6.8.1 INTRODUCCIÓN	217
6.8.2 LA TRANSFORMADA HILBERT	217
6.8.3 DEMOSTRACIÓN ANALÍTICA DE LA ENVOLVENTE DE UNA SEÑAL	218
6.8.4 FORMAS DE ONDA EN MOTORES DE INDUCCIÓN	220
6.8.5 INTERPRETACION DEL ESPECTRO DE FRECUENCIAS	222
6.8.6 APLICACIÓN DEL ESQUEMA PROPUESTO.....	225
6.8.7 Comentarios	233
7. Máquinas Síncronas	235
7.1 Introducción	235
7.2. Principio de funcionamiento del generador síncrono.....	236
7.2.1. Generador desacoplado de la red.	236
7.2.2. Generador conectado a la red.	237
7.3. Principio de funcionamiento del motor síncrono.	239
7.4. Operación en los cuatro cuadrantes.....	241
7.5. Características constructivas	243
7.5.1. Características del estator.....	243
7.5.2. Características del rotor.....	243
7.5.3. Generadores síncronos.	244
7.5.4. Motores síncronos.	245
7.6. Ejes directo y en cuadratura	246
7.7. Flujos enlazados en las bobinas del rotor y estator	247
7.7.1. inductancias propias del estator.....	249
7.7.2. inductancias mutuas del estator.....	252
7.7.3. inductancias mutuas entre rotor y estator.....	253
7.8. Transformación DQ0.....	255
7.8.1. voltajes en el estator en términos de los ejes d-q	257
7.8.2. Potencia y torque en términos de los ejes d-q	257
7.9. Circuito equivalente de la máquina síncrona	259
8. Control de Máquinas Eléctricas	263
8.1. Introducción a la Electrónica de potencia	263
8.1.1. Interruptores	263
8.1.2. Conversores de potencia.....	267
8.2. Conversión AC-DC: rectificador	268
8.2.1. Calculo de la tensión generada.....	272
8.2.2. Calculo de la corriente generada.	273
8.3. Conversión DC-AC: Inversor.....	276
8.4. Conversión DC-DC: Chopper	277
8.4.1. Conversor DC-DC de bajada (Chopper Buck).....	278
8.4.2. Conversor DC-DC de subida (Chopper Boost).....	279
8.5. Conversión AC-AC: Cicloconvertidor.....	282
8.6. Partidores suaves.....	283
8.7. Aplicación de Electrónica de Potencia al control de motores.....	288
8.7.1. Control de motores de CC.....	288
8.7.2. Control de motores de inducción	293

8.7.3. Control de motores síncronos.....	298
9. Energía Eólica	300
9.1. Introduccion	300
9.1.1. Desarrollo histórico de la generación eólica.	301
9.1.2. Desarrollo en Chile.....	302
9.2 CarActerización del recurso eólico.	303
9.2.1. condiciones del emplazamiento.	303
9.2.2. variabilidad del viento.....	305
9.2.3. Potencia extraíble del viento.	308
9.3. Control de una central eólica	311
9.3.1. Control sobre la operación de los aerogeneradores.....	311
9.3.2. Control sobre la Potencia inyectada a la red	314
9.4 GENERACION EOLICA Y Calidad de suministro	315
9.4.1 Impacto en el voltaje en régimen permanente.....	315
9.4.2 Variaciones dinámicas de voltaje	315
9.4.3 Inyección de reactivos.....	316
9.4.4 Distorsión armónica	316
9.5 Calidad de Suministro para diferentes Tipos de generadores	318
9.5.1 Calidad de suministro en aerogeneradores de velocidad fija	318
9.5.2 Calidad de suministro en aerogeneradores de velocidad variable.....	319
10. CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	327
10.1 INTRODUCCIÓN	327
10.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE TIPO “PEM”	328
10.3. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE	331
10.3.1 Celda de Ácido Fosfórico (PAFC).....	331
10.3.2 Celda de Carbonatos Fundidos (MCFC).....	332
10.3.3 Celdas de Oxido Sólido.....	332
10.3.4 Celda de Membrana de Intercambio Protónico (PEM).....	334
10.3.5 Celdas Alcalinas.....	336
10.3.6 Otras Celdas de Combustible	337
10.3.7 CLASIFICACION DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	338
10.4. APLICACIONES	340
10.4.1 Generación de Electricidad Masiva.....	340
10.4.2 Generación de Electricidad Menor.....	345
10.4.2.1 Celda de Combustible en el Hogar.....	345
10.4.2.2 Celda de Combustible en las Transmisiones.....	346
10.4.2.3 Celda de Combustible Portátil.....	348
10.4.3 Celda de Combustible en la Telefonía Móvil.....	349
10.4.4 Industria Automotriz	349
10.4.5 Industria Aeroespacial.....	353
10.4.6 Aplicaciones Varias.....	353
10.5. Ciclo del Hidrogeno	356
10.6 Almacenamiento del Hidrógeno.....	357
10.6.1 Hidruros de metal	357
10.6.2 Nanotubos de carbon.....	359
10.6.3 Hidrogeno comprimido	360

10.6.4 Almacenamiento químico	361
10.6.5 Almacenamiento líquido	361
10.6.6 Esferas de vidrio.....	362
10.6.7 Transporte líquido	362
10.6.8 Poros atractores de hidrógeno	362
10.7 Formas de Generación Hidrógeno.....	362
10.7.1 Generación Típica	363
10.7.2 Generación Biotecnológica	364
10.7.3 Fotoproducción de hidrógeno	364
10.8. COMENTARIOS	365
11. ENERGÍA DEL MAR	368
11.1 INTRODUCCIÓN	368
11.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MEDIO MARINO	369
11.2.1 TEMPERATURA	369
11.2.2 LUZ	369
11.2.3 DENSIDAD	370
11.2.4 Presión.....	371
11.2.5 EL SUSTRATO	371
11.3 CORTE DE UNA CUENCA OCEÁNICA.....	371
11.4 Características químicas del medio marino.....	373
11.4.1 Salinidad.....	374
11.4.2 Distribución de la salinidad en los mares.....	374
11.4.3 Otras sustancias disueltas.....	375
11.4.4 GASES DISUELTOS	375
11.4.5 VALORES DEL pH.....	376
11.5 MOVIMIENTOS DE LAS AGUAS OCEANICAS.....	377
11.5.1 MAREAS	377
11.5.2 CORRIENTES MARINAS.....	379
11.5.3 ONDAS Y OLAS.....	381
11.6 FORMAS DE ENERGÍA PRESENTE EN AGUAS MARINAS	383
11.7 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA DEL OCEANO.....	384
11.7.1 Ondas.....	384
11.7.2 Olas	385
11.7.3 Temperatura	387
11.7.4 Mareas	388
11.7.5 Corrientes	389
11.7.6 Gradientes de salinidad	391
11.7.7 Efecto osmótico por métodos mecánicos	392
11.8 SISTEMAS DE GENERACIÓN EN operación ACTUAL.....	394
11.8.1 Mareotérmica	394
11.8.2 Mareomotriz	396
11.8.3 Corrientes	397
11.8.4 Ondas y Olas	398
11.9 Ventajas y desventajas de la energía a partir del océano	403
12. Energía Geotérmica.....	404
12.1 Introducción	404
12.2 Tipos de Energía Geotérmica.....	405

12.3 GENERACION ELECTRICA A PARTIR DE GEOTERMIA	407
12.3.1 Explotación Convencional	407
12.3.2 Plantas Tipo Flash	408
12.3.3 Tecnología de Ciclo BInario	408
12.4 Situación Internacional.....	410
13. Anexo: Problemas Resueltos.....	418

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación máquinas eléctricas.....	12
Figura 1.2. Sistema eléctrico de potencia.....	13
Figura 2.1. Campo magnético de imán permanente.....	16
Figura 2.2. Campos magnéticos creado por corriente eléctrica	17
Figura 2.3. Ley de Biot-Savart.....	18
Figura 2.4. Motor elemental.....	19
Figura 2.5. F.e.m. inducida en una espira	20
Figura 2.6. Característica B - H.....	22
Figura 2.7. Circuito magnético simple	23
Figura 2.8. Circuito magnético y su equivalente eléctrico	26
Figura 2.9. Corrientes de Foucault.....	27
Figura 2.10 Característica λ -i.....	28
Figura 2.11. Flujos propios y mutuos.....	29
Figura 2.12. Energía en campo magnético.....	31
Figura 2.13. Energía por unidad de volumen	31
Figura 2.14. Energía perdida en el núcleo.....	32
Figura 2.15. Ciclo de histéresis	33
Figura 2.16. Circuito magnético con entrehierro	34
Figura 3.1. Principio de funcionamiento del transformador.....	41
Figura 3.2. Núcleos de transformadores monofásicos.....	43
Figura 3.3. Núcleos de transformadores trifásicos.....	43
Figura 3.4. Traslapo de chapas y transformador monofásico armado.....	44
Figura 3.5. Enrollados concéntricos con núcleo tipo ventana.....	44
Figura 3.6. Partes esenciales de transformador sumergido en aceite.....	45
Figura 3.7: Transformador ideal.....	46
Figura 3.8. Circuito magnético equivalente	48
Figura 3.9. Marcas de polaridad.....	49
Figura 3.10. Diagrama fasor del transformador ideal.....	50
Figura 3.11. Circuito referido al primario.....	50
Figura 3.12. Circuito equivalente de transformador en vacío.....	52
Figura 3.13 Característica magnética no lineal.....	53
Figura 3.14. Diagrama fasor con carga secundaria.....	54
Figura 3.15. Circuito equivalente con carga en el secundario.....	54
Figura 3.16. Flujos de fuga.....	55
Figura 3.17. Circuito equivalente incluyendo el efecto de flujos de fuga.....	56
Figura 3.18. Circuito equivalente incluyendo resistencia de enrollados.....	57
Figura 3.19. Corriente en vacío para núcleo con pérdidas.....	58
Figura 3.20. Representación fasorial de corriente en vacío para núcleo con pérdidas.....	58
Figura 3.21. Forma de onda de la corriente en vacío	59
Figura 3.22. Circuito equivalente exacto.....	59
Figura 3.23. Circuito equivalente aproximado.....	60
Figura 3.24. Prueba de circuito abierto	61
Figura 3.25. Prueba de corto circuito	62

Figura 3.26. Conexión en instante $v_1 = v_m$.	66
Figura 3.27. Conexión en instante $v_1 = 0$.	67
Figura 3.28. Corriente de inrush.	67
Figura 3.29. Banco de transformadores en paralelo sin carga.	68
Figura 5.1. Generador elemental.	146
Figura 5.2. Sistema de conmutación.	147
Figura 5.3. Voltaje rectificado.	148
Figura 5.4. Generador con 4 delgas.	148
Figura 5.5. Voltaje rectificado con 4 delgas.	149
Figura 5.6. Curva de excitación	152
Figura 5.7. Generador de excitación separada operando en vacío	153
Figura 5.8. Característica de excitación o curva de saturación en vacío.	153
Figura 5.9. Curvas de excitación a distintas velocidades.	154
Figura 5.10. Cambio en la distribución del flujo magnético en el entrehierro.	156
Figura 5.11. Cambio de línea neutra.	157
Figura 5.12. Interpolos.	158
Figura 5.13. Estator de máquina de C.C. de 2 polos.	161
Figura 5.14. Rotor de máquina de C.C.	162
Figura 5.15. Enrollado imbricado	163
Figura 5.16. Diagrama extendido del enrollado imbricado.	164
Figura 5.17. Circuito equivalente de un generador de excitación separada.	165
Figura 5.18. Característica V_L v/s I_L en generador de excitación separada.	167
Figura 5.19. Circuito equivalente de un generador shunt.	167
Figura 5.20. Fenómeno de auto-excitación de un generador shunt.	168
Figura 5.21. Resistencia de campo para generación.	169
Figura 5.22. Característica V_L v/s I_L en generador shunt.	170
Figura 5.23. Circuito equivalente de un generador serie.	171
Figura 5.24. Característica V_L v/s I_L en generador serie.	172
Figura 5.25. Circuito equivalente de un generador compound aditivo.	173
Figura 5.26. Característica V_L v/s I_L en generador compound aditivo ⁰ .	175
Figura 5.27. Circuito equivalente de un generador compound diferencial.	176
Figura 5.28. Característica V_L v/s I_L en generador compound diferencial.	177
Figura 5.29. Circuito equivalente de un motor de excitación separada.	178
Figura 5.30. Circuito equivalente de un motor shunt.	178
Figura 5.31. Curva Torque-velocidad de un motor de excitación separada.	180
Figura 5.32. Curva Torque-velocidad de un motor shunt.	180
Figura 5.33. Circuito equivalente de un motor serie.	182
Figura 5.34. Curva Torque-velocidad de un motor de serie.	183
Figura 5.35. Circuito equivalente de un motor compound aditivo.	184
Figura 5.36. Curva Torque-velocidad de un motor compound aditivo.	185
Figura 6.1. Motor de inducción de un par de polos.	195
Figura 6.2. Motor de inducción con dos pares de polos.	196
Figura 6.3. Grados eléctricos y geométricos según los pares de polos.	197
Figura 6.4. Campos magnéticos rotatorios del estator y rotor.	199
Figura 6.5. Estator con enrollado tipo imbricado.	202
Figura 6.6. Rotor tipo jaula de ardilla.	202
Figura 6.7. Rotor bobinado.	203
Figura 6.8. Relación de transformación.	204

Figura 6.9. Circuito equivalente por fase (general).....	204
Figura 6.10. Circuito equivalente por fase (referido al estator).	207
Figura 6.11. Circuito equivalente por fase (con carga representada).....	207
Figura 6.12. Prueba de en vacío.	208
Figura 6.13. Prueba de corto circuito	209
Figura 6.14. Curva Torque-velocidad	212
Figura 6.15. Curva Torque-velocidad en función de r_r'	212
Figura 6.16. Curva Corriente rotórica-velocidad en función de r_r'	213
Figura 6.17. Curva Torque-velocidad (motor monofásico).	216
Figura 7.1. Generador monofásico desacoplado de la red	236
Figura 7.2. Característica Torque velocidad del motor síncrono	240
Figura 7.3. Operación de la máquina síncrona en el diagrama P-Q.....	241
Figura 7.4. Diagrama de operación de un generador síncrono.....	242
Figura 7.5. Rotores de máquina síncrona.....	244
Figura 7.6. Barras amortiguadoras en motor síncrono	245
Figura 7.7. Ejes directo y en cuadratura.....	246
Figura 7.8. Circuitos de estator y rotor.....	247
Figura 7.9. Descomposición de la fuerza magnetomotriz (fase a).....	250
Figura 7.10. Flujo magnético en el entrehierro (fase a)	250
Figura 7.11. Variación de la inductancia propia de los enrollados del estator.....	252
Figura 7.12. Variación de la inductancia mutua de los enrollados de las fases a y b.	253
Figura 7.13. Circuito equivalente por fase de la máquina síncrona.	259
Figura 7.14. Diagrama fasorial de una máquina síncrona operando como generador.	260
Figura 7.15. Diagrama fasorial de una máquina síncrona operando como motor.	260
Fotografía 9.1.1. Generador de Brush.....	301
Fotografía 9.1.2. Parque eólico de Palm Springs, California	302
Figura 9.1.3: Variabilidad de la velocidad del viento en el corto plazo.....	306
Figura 9.1.4: Variabilidad de la velocidad del viento diurna (Beldringe, Dinamarca).....	306
Figura 9.1.5: Variabilidad de la velocidad del viento estacional	307
Figura 9.1.6: Variaciones anuales de la velocidad del viento	307
Figura 9.1.7: Distribución de Weibull.....	308
Figura 9.1.8: Potencia de entrada, disponible y de salida de un aerogenerador.....	309
Figura 9.1.9: Curva de potencia de un aerogenerador.....	310
Fotografía 9.1.10: Mecanismo de orientación de un aerogenerador	312
Figura 9.1.11: Esquema simplificado de un parque eólico conectado a la red	316
Figura 9.1.12: Aerogenerador de velocidad fija conectado a la red.....	318
Figura 9.1.12: Generador de inducción con convertidor en el rotor	320
Figura 9.1.13: Generador de inducción jaula de ardilla	320
Figura 9.1.14: Generador sincrónico.....	321

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Unidades de ϕ y B.	16
Tabla 2.2. Analogía de variables magnéticas y eléctricas.	25
Tabla 5.1.: Designación de terminales de conexión de acuerdo a la norma.	161