

Spis treści

<b>Nomenklatur</b>	<b>15</b>
<b>1 Grundlagen</b>	<b>19</b>
1.1 Elektrische Kreise	19
1.1.1 Kirchhoffsche Maschenregel	20
1.1.2 Kirchhoffsche Knotenregel	21
1.1.3 Zusammenschaltung von Komponenten	21
1.1.4 Elektrischer Widerstand	22
1.1.5 Spule	22
1.1.6 Kondensator	23
1.2 Magnetische Kreise	23
1.2.1 Magnetische Spannung	23
1.2.2 Magnetischer Fluss	24
1.2.3 Flussverkettung	24
1.2.4 Induktionsgesetz	25
1.2.5 Durchflutungssatz	26
1.2.6 Satz vom magnetischen Hüllenfluss	26
1.2.7 Magnetische Ersatzschaltbilder	27
1.2.8 Magnetischer Widerstand	27
1.2.9 Induktivität	27
1.2.10 Ideal gekoppelter Transformator	28
1.2.11 Permanentmagnet	29
1.2.12 Eisenverluste	30
1.3 Thermische Systeme	31
1.3.1 Wärmestrom und Temperatur	31
1.3.2 Thermischer Widerstand	31
1.3.3 Thermischer Kondensator	32
1.3.4 Aufbau thermischer Ersatzschaltbilder	32
1.4 Rotatorische mechanische Systeme	33
1.4.1 Verdrehwinkel und Drehmoment	33
1.4.2 Elektromagnetisches Drehmoment	33
1.4.3 Massenträgheitsmoment	34
<b>2 Modelica</b>	<b>35</b>
2.1 Simulationstools	38
2.1.1 Verfügbare Software	38
2.1.2 Simulation von Modellen	39
2.1.3 Kompatibilität und FMI	39

2.1.4 OpenModelica	40
2.2 Erste Schritte	41
2.2.1 Erste Implementierung	43
2.2.2 Datei-Handling	46
2.2.3 Zweite Implementierung	48
2.2.4 Simulationsergebnisse	49
2.2.5 Dritte Implementierung	51
2.2.6 Grafische Implementierung	51
2.2.7 Implementierung über Vererbung	57
2.3 Variablen und Datentypen	59
2.3.1 Instantiierung von Variablen	59
2.3.2 Konstante und Parameter	59
2.3.3 Komplexe Zahlen	62
2.3.4 Vektoren und Matrizen	62
2.3.5 Attribute von Variablen	66
2.3.6 Initialisierung von Parametern	68
2.4 Klassen und Konzepte	70
2.4.1 Aufbau von Klassen	70
2.4.2 Öffentliche und private Klassen	71
2.4.3 Initialisierung von Variablen	72
2.4.4 Dokumentation	73
2.4.5 partial	73
2.4.6 class	73
2.4.7 type	74
2.4.8 package	75
2.4.9 model	77
2.4.10 connector	78
2.4.11 Vererbung	80
2.4.12 Grafische Verbindungen	83
2.4.13 function	84
2.4.14 block	85
2.4.15 record	87
<b>3 Modellierungskonzepte</b>	<b>89</b>
3.1 Allgemeine Konzepte	89
3.1.1 Signale	89
3.1.2 Tables	91
3.1.3 Erstellung eigener Komponenten	95
3.1.4 Parameter-Records	98
3.1.5 Konditionale Gleichungen	101
3.1.6 Zusammengesetzte funktionale Zusammenhänge	104
3.1.7 Konditionale Komponenten und Verbindungen	105
3.2 Elektrische Systeme	107
3.2.1 Dioden	108
3.2.2 Drei- und mehrphasige Systeme in Stern- und Polygonschaltung	110

3.2.3 Dioden-Gleichrichter	115
3.2.4 Einphasige, quasistationäre Systeme	116
3.2.5 Ortskurve und Bodediagramm	120
3.2.6 Mehrphasige, quasistationäre Systeme	122
3.3 Magnetische Systeme	123
3.3.1 Magnetischer Konnektor	124
3.3.2 Elektromagnetische Kopplung	125
3.3.3 Transformator	126
3.4 Thermische Systeme	132
3.4.1 Thermischer Konnektor	132
3.4.2 Thermisches Netzwerk	133
3.4.3 Diskretisierte Wärmeleitung	134
3.4.4 Temperaturabhängiger Widerstand	137
3.4.5 Elektrisch-thermische Kopplung	140
3.5 Rotierende mechanische Systeme	140
3.5.1 Rotatorischer Konnektor	140
3.5.2 Einfacher mechanischer Antrieb	142
3.5.3 Elektromechanische Kopplung	143
3.5.4 Einfache Gleichstrommaschine	145
<b>4 Drehfeldmaschinen</b>	<b>149</b>
4.1 Voraussetzungen und Bezugssysteme	149
4.1.1 Zählpfeilsysteme	150
4.1.2 Bezugsrichtungen	150
4.1.3 Grundwelle, Pole und Polpaarzahl	151
4.1.4 Räumliche und elektrische Winkel	152
4.2 Magnetische Größen des Grundwellenmodells	153
4.3 Spulen und Wicklungen	157
4.3.1 Spulenindizes im gültigen Wertebereich abbilden	161
4.3.2 Beschreibung einer Spulengruppe in Modelica	162
4.4 Elektromagnetische Kopplung	164
4.4.1 Magnetische Spannung der Spulen	164
4.4.2 Magnetische Spannung und Strangstrom	165
4.4.3 Berechnung komplexer Windungszahlen in Modelica	167
4.4.4 Magnetische Flussverkettung und induzierte Spannung	169
4.4.5 Elektromagnetisches Kopplungsmodell in Modelica	171
4.5 Koordinatensysteme	174
4.6 Luftspaltmodell	175
4.6.1 Magnetische Feldstärke und Flussdichte	175
4.6.2 Kehrwert der Luftspaltfunktion	176
4.6.3 Rotorfestes Luftspaltmodell bezüglich der Grundwelle	177
4.6.4 Reluktanzen des Luftspaltmodells	178
4.6.5 Drehmomentbildung im Luftspaltmodell	180
4.6.6 Luftspaltmodell in Modelica	181
4.7 Eisenverlustmodell	184

4.7.1 Magnetisches Modell der Wirbelstromverluste	184
4.7.2 Vergleich von elektrischem und magnetischem Verlustmodell	186
4.8 Wicklungsmodell	188
4.8.1 Phasenzahlen und Phasensymmetrie	188
4.8.2 Nullinduktivität	189
4.8.3 Wicklungsmodell in Modelica	190
4.9 Käfigmodell	193
4.9.1 Symmetrisches Käfigmodell	193
4.9.2 Achsiges Käfigmodell	194
4.10 Reibungsmodell	195
4.11 Zusatzverluste	196
4.11.1 Zusatzverluste in Anlehnung an DIN EN 60034-2:1998	197
4.11.2 Zusatzverluste in Anlehnung an IEEE Std 112-2004	198
4.11.3 Effektivwert des Zuleitungsstroms	199
4.11.4 Zusatzverluste in Modelica	199
4.12 Permanentmagnet	201
4.13 Bürstenübergangsverluste	203
4.14 Maschinenmodelle	204
<b>5 Asynchronmaschinen</b>	<b>211</b>
5.1 Objektorientierte Modelle	211
5.1.1 Asynchronmaschine mit Schleifringläufer	212
5.1.2 Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer	215
5.2 Raumzeigergleichungen	216
5.2.1 Raumzeiger der magnetischen Spannungen und Flüsse	217
5.2.2 Raumzeiger der elektrischen Spannungen und Ströme	219
5.2.3 Rücktransformation von Raumzeigern auf Stranggrößen	221
5.2.4 Induktivitäten	221
5.2.5 Äquivalente Wicklung des Rotors	222
5.2.6 Drehmoment	223
5.2.7 Quasistationäre Gleichungen bei sinusförmigem Betrieb	224
5.3 Parametrierung	224
5.3.1 Parametrierung des Schleifringläufers	225
5.3.2 Parametrierung des Kurzschlussläufers	225
5.4 Simulation von Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufern	226
5.4.1 Quasistationärer Betrieb am Netz	226
5.4.2 Direktanlauf am Netz	230
5.4.3 Stern-Dreieck-Anlauf am Netz	232
5.4.4 Anlauf mit Transformator am Netz	235
5.4.5 Hochlauf am Inverter	235
5.4.6 Vergleich von Simulations- mit Messdaten	238
5.4.7 Einphasiger Betrieb mit Steinmetz-Schaltung	240
5.5 Simulation von Asynchronmaschinen mit Schleifringläufern	243
5.5.1 Quasistationärer Betrieb am Netz	244
5.5.2 Direktanlauf am Netz mit externen Rotorwiderständen	246

<b>6 Synchronmaschinen</b>	<b>249</b>
6.1 Objektorientierte Modelle	250
6.1.1 Synchronmaschine mit elektrischer Erregung	250
6.1.2 Synchronmaschine mit Permanentmagneten	254
6.1.3 Synchronreluktanzmaschine	256
6.2 Raumzeigergleichungen	256
6.2.1 Herleitung	257
6.2.2 Äquivalenter Dämpferkäfig und äquivalenter Erregerkreis	258
6.2.3 Maschine mit Permanentmagneten	260
6.2.4 Quasistationäre Gleichungen bei sinusförmigem Betrieb	260
6.3 Parametrierung	261
6.3.1 Parametrierung der Hauptfeldinduktivität	262
6.3.2 Parametrierung des Dämpferkäfigs	262
6.3.3 Parametrierung der Erregerwicklung	262
6.3.4 Parametrierung der Permanentmagnet-Erregung	263
6.3.5 Parametrierung aus Kenngrößen eines Datenblatts	263
6.4 Simulation von Synchronmaschinen mit elektrischer Erregung	267
6.4.1 Direktanlauf am Netz	267
6.4.2 Synchronisation mit dem Netz	270
6.4.3 Variabler Polradwinkel am Netz	271
6.4.4 Regulierkennlinien am Netz	276
6.4.5 Belastungskennlinien im Inselbetrieb	278
6.4.6 Lastabwurf im Inselbetrieb mit Spannungsregelung	279
6.4.7 Inselbetrieb mit Gleichrichter und Spannungsregelung	279
6.4.8 Stoßkurzschluss	283
6.5 Simulation von Synchronmaschinen mit Permanentmagneten	284
6.5.1 Betrieb bei variablem Stromwinkel	285
6.5.2 Ideale Speisung mit Stromquelle	289
6.6 Simulation von Synchronreluktanzmaschinen	290
6.6.1 Hochlauf am Umrichter mit Dämpferkäfig	291
6.6.2 Betrieb bei variablem Stromwinkel	294
<b>7 GitHub-Tutorial</b>	<b>295</b>
7.1 Erstellung eines Repositories	296
7.2 GitKraken	300
7.3 Klonen eines Repositories	301
7.4 Entwicklung und Wartung einer Modelica-Library	303
7.4.1 Hinzufügen von Dateien	303
7.4.2 Push und Pull	306
7.4.3 Löschen von Dateien	307
7.4.4 Löschen von Verzeichnissen	308
7.4.5 Wiederherstellen von versehentlich gelöschten Dateien	308
7.4.6 Konsistenz der Commitments	309
7.5 Arbeiten mit Branches	309

7.5.1 Branch erstellen und zusammenführen	310
7.5.2 Entwicklungsstand wiederherstellen	311
7.6 Issue-Tracking	311
7.7 Erstellung einer Release-Version	313
7.7.1 Anpassung der Modelica-Library	314
7.7.2 Version im Repository	315
7.8 Zusammenarbeit und Weiterentwicklung	316
7.8.1 Einladung zur Zusammenarbeit	316
7.8.2 Fork	317
7.8.3 Pull-Request	317
<b>A Modelica Standard Library</b>	<b>319</b>
A.1 Modelica.Blocks	319
A.2 Modelica.Electrical.Analog	320
A.3 Modelica.Electrical.Machines	321
A.4 Modelica.Electrical.MultiPhase	322
A.5 Modelica.Electrical.QuasiStationary	322
A.6 Modelica.Magnetic.FluxTubes	323
A.7 Modelica.Magnetic.FundamentalWave	323
A.8 Modelica.Magnetic.QuasiStatic.FundamentalWave	324
A.9 Modelica.Mechanics.Rotational	324
A.10 Modelica.Mechanics.Translational	325
A.11 Modelica.Thermal.FluidHeatFlow	325
A.12 Modelica.Thermal.HeatTransfer	326
<b>B Formelzeichen</b>	<b>327</b>
B.1 Variablen	327
B.2 Erster Index	329
B.3 Zweiter und dritter Index	330
B.4 Hochgestellte Symbole	331
<b>Literatur</b>	<b>333</b>
<b>Glossar</b>	<b>337</b>
<b>Index</b>	<b>341</b>