

Inhalt

Vorwort	5
Benutzerhinweise	7
0 Einführung in das Simulationssystem Portunus	15
0.1 Installation	15
0.2 Portunus Übersicht	16
0.2.1 Menü und Symbolleiste	19
0.2.2 Kontextmenü	26
0.2.3 Modell-Datenbanken	27
0.3 Grafische Modellierung mit fertigen Elementen	28
0.3.1 Elemente aus der Bibliothek wählen	29
0.3.2 Elemente auf dem Sheet anordnen und verbinden	30
0.3.3 Parameter der Elemente festlegen und Ausgabegrößen wählen	31
0.3.4 Simulationsparameter festlegen und Simulator starten	33
0.4 Modellieren mit eigenen Modellen in VHDL-AMS	34
0.5 Simulator und Online-Ausgabe	43
0.5.1 Simulator	43
0.5.2 Online-Ausgabe mit Displays	45
0.6 Datenauswertung	46
0.7 Übungsbeispiele	47
0.7.1 M1-Schaltung als elektrisches Netzwerk	47
0.7.2 Erzeugung eines PWM-Signals mit einem Zustandsgraphen	53
0.7.3 Bewegungsgleichung in Blockdiagramm-Darstellung	58
1 Halbleiter-Ventilbauelemente	63
1.1 Aufbau und statische Kennlinien	63
1.1.1 Dioden-Struktur	63
1.1.2 Bemessung von Ventil-Bauelementen	63
1.1.3 Durchlasseigenschaften	64
1.2 Schalteigenschaften	64
1.2.1 Transistor-Schalteigenschaften	64
1.2.2 Schaltfrequenz	65
1.2.3 Ausschaltvorgang einer Leistungsdiode	65
1.2.4 Schaltvorgänge eines IGBT	68

1.3	Thermische Eigenschaften	71
1.3.1	Einfluss erhöhter Temperatur	71
1.3.2	Begrenzung der Betriebstemperatur	71
1.4	Anwendungsbereiche der Ventilbauelemente	72
1.4.1	Eigenschaften des idealen Ventils	72
2	Betrieb der Ventile	73
2.1	Verluste und Erwärmung	73
2.1.1	Thermisches Ersatzschaltbild	73
2.1.2	Thyristor-Durchlass-Verlustleistung	74
2.1.3	Kühlmitteltemperatur	75
2.1.4	Gehäusetemperatur	75
2.1.5	Erhöhte Kühlmitteltemperatur	75
2.1.6	Kurzzeit- und Impulsbelastbarkeit	76
2.1.7	Sperrschichttemperatur bei einem Einschaltvorgang	77
2.1.8	Dauergrenzstrom eines Thyristors bei Impulsbelastung	80
2.1.9	Sperrschichttemperatur bei Aussetzbetrieb	82
2.1.10	Thyristor-Schaltverluste	85
2.1.11	Höherer Dauergrenzstrom bei reduzierten Schaltverlusten	86
2.1.12	Temperaturabhängigkeit des IGBT-Dauergrenzstroms	87
2.1.13	Frequenzabhängigkeit des IGBT-Dauergrenzstroms	87
2.1.14	IGBT-Grenzfrequenz	89
2.2	Kühlung	90
2.2.1	Kühlmittel	90
2.2.2	Kühlarten	91
2.2.3	Vergleich Luft-/Wasserkühlung	91
2.2.4	Variabler Kühlstrom (Luft)	92
2.3	Zündung und Ansteuerung	93
2.3.1	Transistor-Ansteuerung	93
2.3.2	Ansteuerung von IGBT und GTO-Thyristoren	93
2.3.3	Lichtzündung	94
2.3.4	Zündimpulse für einen idealisierten Thyristor	94
3	Schaltungs- und Messtechnik	99
3.1	Schutz und Beschaltung	99
3.1.1	TSE-Beschaltung eines Thyristors	99
3.1.2	Bemessung der TSE-Beschaltung einer Leistungsdiode	102
3.1.3	RCD-Beschaltung	104
3.2	Schaltungstechnik	107
3.2.1	Parallelschaltung	107
3.2.2	Folgen eines Zündverzugs	107
3.2.3	Stromaufteilung bei Parallelschaltung	108

4	Digitale Simulation	111
4.1	Simulationsformen	111
4.1.1	Simulationsmethoden	111
4.1.2	Simulationsziele	111
4.2	Modellierung	112
4.2.1	Modellarten	112
4.2.2	Modellierungsebenen	112
4.2.3	Untersuchung eines elektronischen Systems	113
4.3	Simulationsverfahren	116
4.3.1	Übertragungsverhalten eines gekoppelten RC-Netzwerks	116
5	Nicht kommutierende Stromrichter	123
5.1	Einpulsstromrichter	123
5.1.1	Einpulsstromrichter mit Freilaufdiode	123
5.1.2	Sättigung des Stromrichter-Transformators	125
5.2	Elektronische Schalter und Steller für Wechselstrom	129
5.2.1	Systemgrößen eines Wechselstromstellers	129
5.2.2	Strom eines Wechselstromstellers als Funktion des Steuerwinkels	132
5.2.3	Einpuls-Stromrichterverhalten eines Wechselstromstellers	134
5.3	Steuerblindleistung und Leistungsfaktor	135
5.3.1	Kenngrößen der W1-Schaltung bei Ohm'scher Belastung	135
5.3.2	Grundschwingungsgehalt der Spannung für W1- und W3-Schaltung	138
5.3.3	Leistungsgrößen der W1-Schaltung bei Ohm'scher Belastung	141
5.3.4	Stellbereich und Leistungsfaktor der W1-Schaltung	144
5.4	Elektronische Schalter und Steller für Drehstrom	145
5.4.1	Drehstromsteller mit Mittelleiter bei ohmsch-induktiver Belastung	145
5.4.2	Ströme der W3-Schaltung mit Mittelleiter	149
5.4.3	W3-Schaltung ohne Mittelleiter	152
5.4.4	Leiterspannungen der W3-Schaltung ohne Mittelleiter	155
6	Fremdgeführte Stromrichter	159
6.1	Mittelpunktschaltungen; Stromglättung	159
6.1.1	Systemgrößen einer M2-Schaltung bei rein Ohm'scher Belastung	159
6.1.2	M2-Schaltung bei gemischt ohmsch-induktiver Belastung	161
6.1.3	M2-Schaltung mit rein Ohm'scher Belastung und bei idealer Glättung	163
6.1.4	M2-Schaltung mit aktivem Gleichstromkreis	168
6.1.5	Steuerwinkel α_L an der Lückgrenze	171
6.1.6	Bemessung einer Glättungsinduktivität	173
6.1.7	Spannungs-Oberschwingungen einer Zweipuls-Schaltung	175
6.1.8	Stromwelligkeit als Funktion der Lastkreis-Zeitkonstanten	177
6.2	Kommutierung	180
6.2.1	Kommutierungsvorgang der M2-Schaltung	180

6.2.2	Steuerwinkel α_{\max} an der Wechselrichter-Trittgrenze	182
6.2.3	Simulation des Wechselrichterkippens	183
6.2.4	Einflüsse auf die Wechselrichtertrittsgrenze	185
6.2.5	Induktive Gleichspannungsänderung	187
6.2.6	Stromsteilheit bei Kommutierung	188
6.3	Brückenschaltungen	189
6.3.1	Zweipuls-Brückenschaltung bei unterschiedlichen Belastungen	189
6.3.2	Systemgrößen der Drehstrom-Brückenschaltung	190
6.3.3	Daten der Brückenschaltungen B2 und B6	194
6.3.4	B6-Schaltung mit verschiedenen Transformatorschaltungen	195
6.3.5	Bemessung eines B6-Stromrichters	198
6.3.6	Zwölfpuls-Schaltung	201
6.4	Blindleistungsarme Schaltungen	204
6.4.1	Mittelpunktschaltungen mit Freilaufdiode	204
6.4.2	Systemgrößen der halbgesteuerten Brückenschaltung B2HZ	207
6.4.3	Spannungswelligkeit der B2- und B6-Schaltungen	209
6.5	Lastgeführte Stromrichter	213
6.5.1	Kommutierung beim Parallelschwingkreis-Wechselrichter	213
6.5.2	Energiebilanz des Parallelschwingkreis-Wechselrichters	213
6.5.3	Systemgrößen des Parallelschwingkreis-Wechselrichters	214
7	Stromrichter-Rückwirkungen	217
7.1	Spannungsverzerrungen	217
7.1.1	Fourier-Analyse der Netzstrom-Oberschwingungen	217
7.1.2	Kurzschlussleistung und Impedanz des Netzes	220
7.1.3	Impedanz eines Reihenschwingkreises	222
7.1.4	Netzurückwirkung einer B6-Schaltung mit kapazitiver Belastung	223
7.1.5	Strom-Oberschwingungskompensation	227
7.1.6	Gleichrichter mit sinusförmigem Netzstrom	231
7.2	Blindleistung	234
7.2.1	Zu- und Gegenschaltung	234
7.2.2	Schein- und Blindleistung zweipulsiger Brückenschaltungen	237
7.2.3	Kompensations-Stromrichter	238
8	Selbstgeführte Stromrichter	241
8.1	Thyristor-Löschung	241
8.1.1	Bemessung der Löschkapazität	241
8.2	Elektronische Schalter und Steller für Gleichstrom	241
8.2.1	Bemessung einer Thyristor-Löscheinrichtung	241
8.2.2	Pulsweiten-modulierte Steuersignale für einen Gleichstromsteller	244
8.2.3	Tiefsetzsteller mit ohmsch-induktiver Belastung	246
8.2.4	Strom eines Tiefsetzstellers	248
8.2.5	Spannungswelligkeit des Tiefsetzstellers	252

8.2.6	Strom-Mittelwerte des Tiefsetzstellers	254
8.2.7	Gleichstromsteller beim Betrieb an der Lückgrenze	256
8.2.8	Hochsetzsteller	259
8.2.9	Vierquadrantensteller	261
8.3	Selbstgeführte Wechselrichter	264
8.3.1	Wechselrichter-Ausgangsstrom bei verschiedenen Belastungsarten	264
8.3.2	Ventil-Strombelastung einer Wechselrichter-Mittelpunktschaltung	268
8.3.3	Energiebilanz des freien Wechselrichters	271
8.3.4	Sinusbewertete Pulsweiten-Modulation	274
8.3.5	Wechselrichter in einphasiger Brückenschaltung	276
8.3.6	Ansteuersignale für einen dreiphasigen Wechselrichter	277
8.3.7	Ausgangsgrößen eines dreiphasigen Wechselrichters	279
8.4	Umrichter	282
8.4.1	Bemessung des Zwischenkreis-Kondensators für U -Umrichter	282
8.4.2	U -Umrichter mit einphasigem Eingang	285
9	Stromrichter-Antriebe	289
9.1	Stromrichter in Regelkreisen	289
9.1.1	Digitale Systeme	289
9.1.2	Kaskadenregelung	289
9.1.3	Tiefsetzsteller mit Drehzahlregelung	290
9.1.4	Vierquadrantensteller mit Lageregelung	293
9.2	Gleichstromantriebe	297
9.2.1	Gleichstromsteller-Antriebe	297
9.2.2	Stromrichter mit erhöhter Pulszahl	297
9.2.3	Steuerverfahren bei Vierquadrantenstellern	298
9.2.4	Bemessung der Glättungsinduktivität eines Antriebs	298
9.2.5	Wirkung der Glättungsinduktivität	301
9.2.6	Kreisstrombehafteter Umkehrstromrichter	302
9.3	Drehstromantriebe	306
9.3.1	Vergleich von Drehstromantrieben	306
9.3.2	Sanftanlaufschaltung für Asynchronmaschinen	307
9.3.3	Geführter Hochlauf eines Umrichter-Antriebs	311
9.3.4	Sonderfunktionen der Synchronmaschinen	315