

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>Benutzerhinweise</b> .....	7
<b>0 Einführung in das Simulationssystem Portunus</b> .....	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
<b>1 Halbleiter-Ventilbauelemente</b> .....	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
<b>2</b>	<b>Betrieb der Ventile . . . . .</b>	<b>73</b>
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
<b>3</b>	<b>Schaltungs- und Messtechnik . . . . .</b>	<b>99</b>
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

<b>4</b>	<b>Digitale Simulation</b> .....	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
<b>5</b>	<b>Nicht kommutierende Stromrichter</b> .....	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
<b>6</b>	<b>Fremdgeführte Stromrichter</b> .....	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 $\alpha_L$ 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 $\alpha_{\max}$ 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
<b>7</b>	<b>Stromrichter-Rückwirkungen</b>	<b>217</b>
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
<b>8</b>	<b>Selbstgeführte Stromrichter</b>	<b>241</b>
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
<b>9</b>	<b>Stromrichter-Antriebe</b>	<b>289</b>
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