

Prof. Dr.-Ing. Rainer Jäger
Prof. Dr.-Ing. Edgar Stein

Übungen zur Leistungselektronik

82 Übungsaufgaben mit Lösungen
43 Digitale Simulationen

mit CD-ROM

VDE VERLAG • Berlin • Offenbach

Inhalt

Benutzerhinweis	13
0 Einführung in das Simulationssystem Simplorer	15
0.1 Installation.....	15
0.2 Simplorer Übersicht	16
0.3 SSC Commander.....	21
0.4 Modellieren mit Schematic	23
0.4.1 Modellierung.....	24
0.4.2 Bibliotheken.....	25
0.4.3 Platzieren und Verbinden von Elementen	27
0.5 Simulator und View Tool.....	30
0.5.1 Simulator.....	30
0.5.2 Online-Ausgabe mit dem View Tool	34
0.6 Datenauswertung mit dem Postprozessor DAY	35
0.7 Übungsbeispiele	37
0.7.1 M1-Schaltung als elektrisches Netzwerk	37
0.7.2 Erzeugung eines PWM-Signals mit einem Zustandsgraphen.....	44
0.7.3 Bewegungsgleichung in Blockdiagramm-Darstellung.....	49
1 Halbleiter-Ventilbauelemente	55
1.1 Aufbau und statische Kennlinien	55
1.1.1 Dioden-Struktur.....	55
1.1.2 Bemessung von Ventil-Bauelementen	55
1.1.3 Durchlasseigenschaften.....	56
1.2 Schalteigenschaften.....	56
1.2.1 Transistor-Schalteigenschaften	56
1.2.2 Schaltfrequenz.....	57
1.2.3 Ausschaltvorgang einer Leistungsdiode.....	57
1.2.4 Schaltvorgänge eines IGBT	60
1.3 Thermische Eigenschaften	63
1.3.1 Einfluss erhöhter Temperatur.....	63
1.3.2 Begrenzung der Betriebstemperatur.....	63
1.4 Anwendungsbereiche der Ventilbauelemente	64
1.4.1 Eigenschaften des idealen Ventils.....	64
2 Betrieb der Ventile	65
2.1 Verluste und Erwärmung	65

2.1.1	Thermisches Ersatzschaltbild	65
2.1.2	Thyristor-Durchlass-Verlustleistung	65
2.1.3	Kühlmitteltemperatur	66
2.1.4	Gehäusetemperatur.....	67
2.1.5	Erhöhte Kühlmitteltemperatur.....	67
2.1.6	Kurzzeit- und Impulsbelastbarkeit	68
2.1.7	Sperrschichttemperatur bei einem Einschaltvorgang	68
2.1.8	Dauergrenzstrom eines Thyristors bei Impulsbelastung	71
2.1.9	Sperrschichttemperatur bei Aussetzbetrieb	73
2.1.10	Thyristor-Schaltverluste	76
2.1.11	Höherer Dauergrenzstrom bei reduzierten Schaltverlusten.....	77
2.1.12	Temperaturabhängigkeit des IGBT-Dauergrenzstroms.....	77
2.1.13	Frequenzabhängigkeit des IGBT-Dauergrenzstroms	78
2.1.14	IGBT-Grenzfrequenz	79
2.2	Kühlung.....	81
2.2.1	Kühlmittel	81
2.2.2	Kühlarten.....	81
2.2.3	Vergleich Luft-/ Wasserkühlung	82
2.2.4	Variabler Kühlstrom (Luft)	83
2.3	Zündung und Ansteuerung.....	84
2.3.1	Transistor-Ansteuerung.....	84
2.3.2	Ansteuerung von IGBT und GTO-Thyristoren	84
2.3.3	Lichtzündung	85
2.3.4	Zündimpulse für einen idealisierten Thyristor	85
3	Schaltungs- und Messtechnik	89
3.1	Schutz und Beschaltung	89
3.1.1	TSE-Beschaltung eines Thyristors	89
3.1.2	Bemessung der TSE-Beschaltung einer Leistungsdiode	92
3.1.3	RCD-Beschaltung	93
3.2	Schaltungstechnik	96
3.2.1	Parallelschaltung	96
3.2.2	Folgen eines Zündverzugs.....	97
3.2.3	Stromaufteilung bei Parallelschaltung.....	97
4	Digitale Simulation	101
4.1	Simulationsformen	101
4.1.1	Simulationsmethoden	101
4.1.2	Simulationsziele	101
4.2	Modellierung.....	102
4.2.1	Modellarten	102

4.2.2	Modellierungsebenen	102
4.2.3	Untersuchung eines elektronischen Systems.....	103
4.3	Simulationsverfahren	105
4.3.1	Übertragungsverhalten eines gekoppelten RC-Netzwerks	105
5	Nichtkommutierende Stromrichter	113
5.1	Einpulsstromrichter	113
5.1.1	Einpulsstromrichter mit Freilaufdiode	113
5.1.2	Sättigung des Stromrichter-Transformators	115
5.2	Elektronische Schalter und Steller für Wechselstrom	118
5.2.1	Systemgrößen eines Wechselstromstellers.....	118
5.2.2	Strom eines Wechselstromstellers als Funktion des Steuerwinkels	120
5.2.3	Einpuls-Stromrichterverhalten eines Wechselstromstellers	122
5.3	Steuerblindleistung und Leistungsfaktor	123
5.3.1	Kenngrößen der W1-Schaltung bei ohmscher Belastung	123
5.3.2	Grundschwingungsgehalt der Spannung für W1- und W3-Schaltung..	127
5.3.3	Leistungsgrößen der W1-Schaltung bei ohmscher Belastung	130
5.3.4	Stellbereich und Leistungsfaktor der W1-Schaltung.....	132
5.4	Elektronische Schalter und Steller für Drehstrom.....	133
5.4.1	Drehstromsteller mit Mittelleiter bei ohmsch-induktiver Belastung	133
5.4.2	Ströme der W3-Schaltung mit Mittelleiter	136
5.4.3	W3-Schaltung ohne Mittelleiter	139
5.4.4	Leiterspannungen der W3-Schaltung ohne Mittelleiter.....	141
6	Fremdgeführte Stromrichter	145
6.1	Mittelpunktschaltungen; Stromglättung	145
6.1.1	Systemgrößen einer M2-Schaltung bei rein ohmscher Belastung	145
6.1.2	M2-Schaltung bei gemischt ohmsch-induktiver Belastung.....	147
6.1.3	M2-Schaltung mit rein ohmscher Belastung und bei idealer Glättung.	149
6.1.4	M2-Schaltung mit aktivem Gleichstromkreis	153
6.1.5	Steuerwinkel α_L an der Lückgrenze	156
6.1.6	Bemessung einer Glättungsinduktivität.....	158
6.1.7	Spannungs-Oberschwingungen einer Zweipuls-Schaltung	160
6.1.8	Stromwelligkeit als Funktion der Lastkreis-Zeitkonstanten.....	163
6.2	Kommutierung	165
6.2.1	Kommutierungsvorgang der M2-Schaltung	165
6.2.2	Steuerwinkel α_{\max} an der Wechselrichter-Trittgrenze	167
6.2.3	Simulation des Wechselrichterkippens	168
6.2.4	Einflüsse auf die Wechselrichtertrittgrenze.....	170
6.2.5	Induktive Gleichspannungsänderung	172
6.2.6	Stromsteilheit bei Kommutierung	173

6.3	Brückenschaltungen	174
6.3.1	Zweipuls-Brückenschaltung bei unterschiedlichen Belastungen	174
6.3.2	Systemgrößen der Drehstrom-Brückenschaltung	175
6.3.3	Daten der Brückenschaltungen B2 und B6	178
6.3.4	B6-Schaltung mit verschiedenen Transformatorschaltungen	179
6.3.5	Bemessung eines B6-Stromrichters.....	182
6.3.6	Zwölpuls-Schaltung	185
6.4	Blindleistungsarme Schaltungen	188
6.4.1	Mittelpunktschaltungen mit Freilaufdiode	188
6.4.2	Systemgrößen der halbgesteuerten Brückenschaltung B2HZ	191
6.4.3	Spannungswelligkeit der B2- und B6-Schaltungen.....	193
6.5.	Lastgeführte Stromrichter	196
6.5.1	Kommutierung beim Parallelschwingkreis-Wechselrichter	196
6.5.2	Energiebilanz des Parallelschwingkreis-Wechselrichters	196
6.5.3	Systemgrößen des Parallelschwingkreis-Wechselrichters.....	197
7	Stromrichter-Rückwirkungen.....	199
7.1	Spannungsverzerrungen	199
7.1.1	Fourier-Analyse der Netzstrom-Oberschwingungen.....	199
7.1.2	Kurzschlussleistung und Impedanz des Netzes.....	202
7.1.3	Impedanz eines Reihenschwingkreises	203
7.1.4	Netzurückwirkung einer B6-Schaltung mit kapazitiver Belastung	205
7.1.5	Strom-Oberschwingungskompensation.....	209
7.1.6	Gleichrichter mit sinusförmigen Netzstrom	212
7.2	Blindleistung	215
7.2.1	Zu- und Gegenschaltung	215
7.2.2	Schein- und Blindleistung zweipulsiger Brückenschaltungen	218
7.2.3	Kompensations-Stromrichter	219
8	Selbstgeführte Stromrichter	
8.1	Thyristor-Löschung.....	223
8.1.1	Bemessung der Löschkapazität	223
8.2	Elektronische Schalter und Steller für Gleichstrom	223
8.2.1	Bemessung einer Thyristor-Löscheinrichtung	223
8.2.2	Pulsweiten-modulierte Steuersignale für einen Gleichstromsteller.....	226
8.2.3	Tiefsetzsteller mit ohmsch-induktiver Belastung.....	227
8.2.4	Strom eines Tiefsetzstellers.....	230
8.2.5	Spannungswelligkeit des Tiefsetzstellers	232
8.2.6	Strom-Mittelwerte des Tiefsetzstellers.....	234
8.2.7	Gleichstromsteller beim Betrieb an der Lückgrenze	236
8.2.8	Hochsetzsteller	238

8.2.9	Vierquadrantensteller	241
8.3	Selbstgeführte Wechselrichter.....	244
8.3.1	Wechselrichter-Ausgangsstrom bei verschiedenen Belastungsarten....	244
8.3.2	Ventil-Strombelastung einer Wechselrichter-Mittelpunktschaltung	247
8.3.3	Energiebilanz des freien Wechselrichters	250
8.3.4	Sinusbewertete Pulsweiten-Modulation	253
8.3.5	Wechselrichter in einphasiger Brückenschaltung	255
8.3.6	Ansteuersignale für einen dreiphasigen Wechselrichter	256
8.3.7	Ausgangsgrößen eines dreiphasigen Wechselrichters.....	258
8.4	Umrichter	260
8.4.1	Bemessung des Zwischenkreis-Kondensators für U -Umrichter.....	260
8.4.2	U -Umrichter mit einphasigem Eingang	264
9	Stromrichter-Antriebe	
9.1	Stromrichter in Regelkreisen.....	267
9.1.1	Digitale Systeme	267
9.1.2	Kaskadenregelung	267
9.1.3	Tiefsetzsteller mit Drehzahlregelung	268
9.1.4	Vierquadrantensteller mit Lageregelung	271
9.2	Gleichstromantriebe	274
9.2.1	Gleichstromsteller-Antriebe	274
9.2.2	Stromrichter mit erhöhter Pulszahl.....	274
9.2.3	Steuerverfahren bei Vierquadrantenstellern.....	275
9.2.4	Bemessung der Glättungsinduktivität eines Antriebs.....	275
9.2.5	Wirkung der Glättungsinduktivität.....	278
9.2.6	Kreisstrombehafteter Umkehrstromrichter.....	279
9.3	Drehstromantriebe.....	282
9.3.1	Vergleich von Drehstromantrieben	282
9.3.2	Sanftanlaufschaltung für Asynchronmaschinen	283
9.3.3	Geführter Hochlauf eines Umrichter-Antriebs	287
9.3.4	Sonderfunktionen der Synchronmaschinen.....	291
10	Formelzeichen	293
11	Abkürzungen	297