

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

<b>Benutzerhinweis</b> .....	13
<b>0 Einführung in das Simulationssystem Simplorer</b> .....	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
<b>1 Halbleiter-Ventilbauelemente</b> .....	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
<b>2 Betrieb der Ventile</b> .....	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
<b>3</b>	<b>Schaltungs- und Messtechnik</b> .....	<b>89</b>
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
<b>4</b>	<b>Digitale Simulation</b> .....	<b>101</b>
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
<b>5</b>	<b>Nichtkommutierende Stromrichter .....</b>	<b>113</b>
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
<b>6</b>	<b>Fremdgeführte Stromrichter .....</b>	<b>145</b>
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 $\alpha_L$ 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 $\alpha_{\max}$ 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
<b>7</b>	<b>Stromrichter-Rückwirkungen.....</b>	<b>199</b>
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
<b>8</b>	<b>Selbstgeführte Stromrichter</b>	
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
<b>9</b>	<b>Stromrichter-Antriebe</b>	
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
<b>10</b>	<b>Formelzeichen</b> .....	<b>293</b>
<b>11</b>	<b>Abkürzungen</b> .....	<b>297</b>