

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Anwendungen der Leistungselektronik .....	3
1.2	Begriffe und Kenngrößen der Leistungselektronik.....	4
1.2.1	Klassifizierung von Stromrichtern .....	4
1.2.2	Steuerverfahren .....	5
1.2.3	Kenngrößen .....	6
1.2.3.1	Arithmetischer Mittelwert und Effektivwert .....	6
1.2.3.2	Gleich-, Wechsel- und Mischgrößen .....	7
1.2.4	Energiespeicher .....	9
1.2.5	Netzurückwirkungen .....	11
1.2.6	Leistung bei nicht-sinusförmigen Größen.....	12
1.2.6.1	Zweileiter-Stromkreise .....	12
1.2.6.2	Mehrleiter-Stromkreise .....	13
1.2.7	Betriebsquadranten von Stromrichtern.....	14
1.2.7.1	Betriebsquadranten bei Gleichgrößen .....	14
1.2.7.2	Betriebsquadranten bei Wechselgrößen.....	15
1.3	Simulation leistungselektronischer Systeme .....	16
1.3.1	Ziele der Simulation .....	16
1.3.2	Modellierung .....	17
1.3.3	Klassifizierung von Simulationen .....	17
1.3.4	Mathematische Beschreibung des Modells.....	18
1.3.5	Numerische Integration .....	19
1.3.6	Unstetigkeitsstellen ( <i>zero crossings</i> ) .....	21
1.3.7	Auswahl des Solvers.....	22
1.3.8	Fehlerüberwachung .....	23
1.3.9	Troubleshooting .....	23

<b>2</b>	<b>Leistungshalbleiter</b> .....	<b>27</b>
2.1	Überblick über Leistungshalbleiter .....	27
2.2	Eigenschaften eines idealen Schalters .....	29
2.3	Physikalische Grundlagen der Leistungshalbleiter .....	33
2.3.1	Halbleiter .....	33
2.3.1.1	Eigenleitung von Halbleitern.....	33
2.3.1.2	Störstellenleitung und Dotierung von Halbleitern .....	34
2.3.2	pn-Übergang.....	35
2.3.2.1	Ungestörter pn-Übergang .....	35
2.3.2.2	pn-Übergang mit äußerer Spannung .....	36
2.3.2.3	Sperrschichtkapazität .....	37
2.3.2.4	pin-Übergang für hohe Sperrspannungen .....	38
2.4	Diode .....	39
2.4.1	Aufbau von Dioden .....	39
2.4.2	Stationäres Verhalten einer idealen Diode .....	40
2.4.3	Stationäres Verhalten einer realen Diode .....	40
2.4.4	Schaltverhalten einer Diode .....	41
2.4.5	Schottky-Dioden .....	42
2.5	Thyristor .....	43
2.5.1	Aufbau und Funktion eines Thyristors .....	43
2.5.2	Stationäres Verhalten eines idealen Thyristors .....	45
2.5.3	Stationäres Verhalten eines realen Thyristors .....	46
2.5.4	Schaltverhalten eines Thyristors .....	47
2.6	Leistungstransistoren .....	48
2.6.1	MOSFET .....	48
2.6.1.1	Aufbau und Funktion eines MOSFETs .....	49
2.6.1.2	Stationäres Verhalten eines idealen MOSFETs.....	51
2.6.1.3	Stationäres Verhalten eines realen MOSFETs .....	52
2.6.1.4	Schaltverhalten eines MOSFETs .....	53
2.6.2	IGBT.....	53
2.6.2.1	Aufbau und Funktion eines IGBTs.....	53
2.6.2.2	Stationäres Verhalten eines idealen IGBTs .....	56
2.6.2.3	Stationäres Verhalten eines realen IGBTs.....	57
2.6.2.4	Schaltverhalten eines IGBTs.....	58
2.7	Verluste und Kühlung von Leistungshalbleitern .....	63
2.7.1	Verluste .....	63
2.7.2	Wärmetransport und thermisches Ersatzschaltbild.....	64
2.8	Modellierung von Leistungshalbleitern .....	67

2.8.1	Modellierung mittels idealen Schaltern.....	67
2.8.2	Modellierung mittels linearer Widerstände .....	68
2.8.2.1	Modellierung von Dioden .....	68
2.8.2.2	Modellierung von Thyristoren .....	69
2.8.2.3	Modellierung von MOSFETs und IGBTs .....	69
2.8.3	Ansteuerung von steuerbaren Leistungshalbleitern .....	70
2.8.3.1	Ansteuerung von Thyristoren .....	70
2.8.3.2	Ansteuerung von MOSFETs und IGBTs .....	71
2.8.4	Thermische Modelle von Leistungshalbleitern .....	72
2.9	Einsatz von Leistungshalbleitern .....	73
2.9.1	Datenblattangaben .....	73
2.9.1.1	Normen .....	74
2.9.1.2	Bezeichnungen, Abkürzungen und Indizes .....	75
2.9.1.3	Datenblattangaben bei Dioden .....	77
2.9.1.4	Datenblattangaben bei Thyristoren .....	79
2.9.1.5	Datenblattangaben bei MOSFET und IGBT .....	81
2.9.2	Schutz.....	85
2.9.2.1	Überspannungsschutz .....	86
2.9.2.2	Überstrom- und Kurzschlussstromschutz .....	90
2.9.2.3	Sonstige Schutzmaßnahmen.....	92
2.9.3	Bauformen von Leistungshalbleitern .....	92
2.9.4	Kühlung .....	94
<b>3</b>	<b>Netzgeführte Stromrichter mit Dioden und Thyristoren .....</b>	<b>97</b>
3.1	Überblick über netzgeführte Stromrichter .....	97
3.1.1	Klassifizierung und Schaltungsübersicht .....	97
3.1.2	Bezeichnungen .....	99
3.1.3	Kenngrößen .....	99
3.1.4	Idealisierungen .....	100
3.2	Einweggleichrichterschaltungen .....	103
3.2.1	Einweggleichrichter mit ohmscher Last .....	103
3.2.1.1	Ungesteuerter Einweggleichrichter mit ohmscher Last .....	103
3.2.1.2	Gesteuerter Einweggleichrichter mit ohmscher Last .....	104
3.2.2	Einweggleichrichter mit ohmsch-induktiver Last .....	107
3.2.2.1	Ungesteuerter Einweggleichrichter mit ohmsch-induktiver Last.....	108
3.2.2.2	Gesteuerter Einweggleichrichter mit ohmsch-induktiver Last .....	110
3.2.3	Einweggleichrichter mit ohmsch-kapazitiver Last .....	112

3.3	Mittelpunktschaltungen .....	115
3.3.1	Zweipuls-Mittelpunktschaltung (M2) .....	115
3.3.1.1	Ungesteuerte Zweipuls-Mittelpunktschaltung (M2U) mit ohmscher Last .....	116
3.3.1.2	Gesteuerte Zweipuls-Mittelpunktschaltung (M2C) mit ohmscher Last .....	117
3.3.1.3	Zweipuls-Mittelpunktschaltung mit ohmsch-induktiver Last und Stromglättung .....	121
3.3.1.4	Zweipuls-Mittelpunktschaltung mit idealer Stromglättung ...	123
3.3.1.5	Zweipuls-Mittelpunktschaltung mit gemeinsamer Anode.....	130
3.3.2	Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3).....	132
3.3.2.1	Dreipuls-Mittelpunktschaltung mit idealer Stromglättung....	133
3.3.2.2	Dreipuls-Mittelpunktschaltung mit gemeinsamer Anode .....	137
3.4	Kommutierung.....	140
3.4.1	Kommutierungsspannung.....	142
3.4.2	Kommutierungsstrom .....	143
3.4.3	Überlappungswinkel .....	145
3.4.4	Spannungsfall durch Kommutierung .....	146
3.5	Brückenschaltungen .....	148
3.5.1	Zweipuls-Brückenschaltung (B2) .....	148
3.5.1.1	Anwendungen der Zweipuls-Brückenschaltung .....	148
3.5.1.2	Gesteuerte Zweipuls-Brückenschaltung (B2C) mit idealer Stromglättung .....	150
3.5.1.3	Ungesteuerte Zweipuls-Brückenschaltung (B2U) mit Spannungsglättung .....	152
3.5.2	Sechspuls-Brückenschaltung (B6) .....	159
3.5.2.1	Gesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung (B6C) mit idealer Stromglättung .....	159
3.5.2.2	Ungesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung (B6U) mit Spannungsglättung .....	163
3.5.2.3	Wechselrichterkippen .....	166
3.6	Anwendungsbeispiele netzgeführter Stromrichter .....	170
3.6.1	Netzseitiger Gleichrichter für Umrichter .....	170
3.6.2	Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) .....	171
3.6.3	Umkehrstromrichter für Gleichstrommaschinen .....	173
<b>4</b>	<b>Selbstgeführte Stromrichter mit MOSFET und IGBT .....</b>	<b>179</b>
4.1	Überblick über selbstgeführte Stromrichter .....	179
4.2	Gleichstromsteller .....	180
4.2.1	Umformung einer Gleichspannung .....	182

4.2.2	Betriebsarten von Gleichstromstellern.....	185
4.2.3	Einquadranten-Gleichstromsteller .....	185
4.2.3.1	Tiefsetzsteller .....	185
4.2.3.2	Hochsetzsteller .....	192
4.2.3.3	Tief-Hochsetzsteller .....	196
4.2.4	Zweiquadranten-Gleichstromsteller .....	199
4.2.4.1	Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr.....	200
4.2.4.2	Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr .....	202
4.2.5	Vierquadrantensteller .....	208
4.2.5.1	Anwendungen des Vierquadrantenstellers.....	208
4.2.5.2	Vierquadrantensteller als Gleichstromsteller .....	208
4.2.6	Gleichspannungswandler mit galvanischer Trennung.....	213
4.2.6.1	Transformator .....	213
4.2.6.2	Sperrwandler .....	216
4.2.6.3	Durchflusswandler .....	220
4.2.6.4	Gegentaktwandler .....	224
4.3	Wechselrichter mit eingepprägter Spannung .....	230
4.3.1	Umrichter .....	231
4.3.2	Erzeugung einer Wechselspannung .....	233
4.3.2.1	Steuerverfahren Grundfrequenztaktung .....	234
4.3.2.2	Steuerverfahren Pulsweitenmodulation (PWM).....	235
4.3.3	Einphasiger spannungseinprägender Wechselrichter (4QS).....	238
4.3.3.1	Steuerverfahren Grundfrequenztaktung .....	240
4.3.3.2	Steuerverfahren Pulsweitenmodulation (bipolares Schalten) .....	240
4.3.3.3	Steuerverfahren Pulsweitenmodulation (unipolares Schalten) .....	241
4.3.3.4	Oberschwingungsemissionen.....	242
4.3.4	Dreiphasiger spannungseinprägender Wechselrichter (UWR) .....	244
4.3.4.1	Steuerverfahren Grundfrequenztaktung .....	246
4.3.4.2	Steuerverfahren Pulsweitenmodulation.....	248
4.3.4.3	Steuerverfahren Raumzeigermodulation.....	251
4.3.4.4	Vergleich zwischen Pulsweitenmodulation und Raumzeigermodulation.....	258
4.3.4.5	Oberschwingungsemissionen.....	260
4.3.5	Ersatzschaltbild, Strombildung und Leistungen.....	261
4.3.6	Regelung spannungseinprägender Wechselrichter .....	264
4.4	Anwendungsbeispiele selbstgeführter Stromrichter.....	267
4.4.1	Schaltnetzteil mit PFC.....	267
4.4.2	Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) .....	274

4.4.3	Photovoltaik-Wechselrichter .....	276
4.4.4	Windkraftanlage .....	280
4.4.5	Gleichstromladegerät für die E-Mobility .....	284
4.4.6	Elektrischer Antrieb mit permanenterregter Synchronmaschine .....	287
<b>A</b>	<b>Formelzeichen, Indizes, Abkürzungen und Notationen .....</b>	<b>297</b>
A.1	Formelzeichen .....	297
A.2	Indizes .....	301
A.3	Abkürzungen .....	303
A.4	Notationen .....	305
<b>B</b>	<b>Liste der Simulationsdateien .....</b>	<b>307</b>
B.1	Simulationsdateien zu Kapitel 1 .....	307
B.2	Simulationsdateien zu Kapitel 3 .....	308
B.3	Simulationsdateien zu Kapitel 4 .....	309
<b>C</b>	<b>Kurzeinführung in PLECS .....</b>	<b>311</b>
C.1	Installation .....	311
C.2	Grundlegende Programmbedienung .....	313
C.3	Anwendungsbeispiel .....	320
C.4	Tipps und Tricks .....	326
C.5	Troubleshooting .....	327
	<b>Literatur .....</b>	<b>329</b>
	<b>Index .....</b>	<b>331</b>