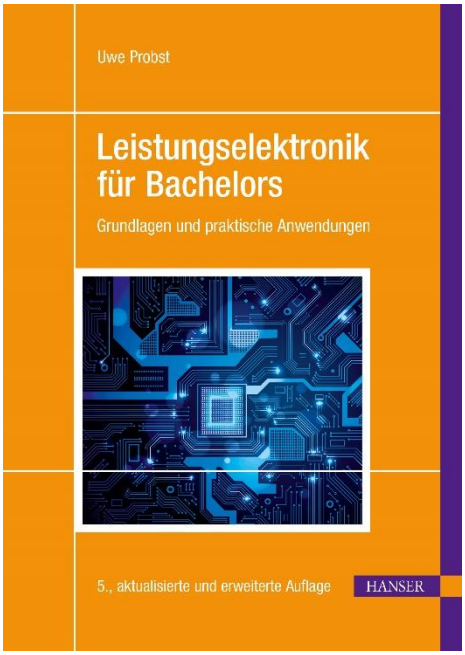
HANSER



Leseprobe

zu

Leistungselektronik für Bachelors

von Uwe Probst

Print-ISBN: 978-3-446-47281-5
E-Book-ISBN: 978-3-446-47367-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter
https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472815
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 5. Auflage

Dieses Buch richtet sich an Studierende und Mitarbeiter der elektrotechnischen Fakultäten an Universitäten und Fachhochschulen sowie an Ingenieure in der Praxis, die sich einen Einblick in die Wirkungsweise von leistungselektronischen Bauelementen und Schaltungen verschaffen wollen.

Ziel dieses Buches ist es, die Erläuterungen anhand von Beispielen und überschaubaren Übungsaufgaben zielgerichtet zu strukturieren sowie mit einfach handhabbaren und über das Internet zugänglichen Simulationsprogrammen der beiden virtuellen Labore für „Leistungselektronik“ und „elektronischer Antriebstechnik“ zu unterstützen.

Die Inhalte basieren auf der gleichnamigen Vorlesung „Leistungselektronik“, die ich seit 2002 an der Technischen Hochschule Mittelhessen in dieser Form anbiete. Mathematische Grundlagen, die für das Verständnis und die Auslegung leistungselektronischer Schaltungen unerlässlich sind, werden im ersten Kapitel vorgestellt. Das Kapitel 2 ist den Leistungshalbleitern gewidmet. Kapitel 3 enthält eine umfassende Beschreibung der netzgeführten Stromrichter und ihrer Funktionsweise. Klassische Gleichstromsteller und ihre Steuerverfahren, die eine Grundlage moderner Schaltnetzteile bilden, sind Gegenstand von Kapitel 4. In Kapitel 5 werden die Grundschaltungen der Gleichstromsteller zu ein- und dreiphasigen spannungseinprägenden Wechselrichtern und den zugehörigen Steuerverfahren erweitert. Neben einigen zusätzlichen Beispielen stellt die 5. Auflage aktive Gleichrichter vor. Sie ermöglichen eine Netzrückspeisung, wenn Antriebe im Bremsbetrieb kurzzeitig als Generator arbeiten.

Kapitel 6 gibt eine Einführung in das Themengebiet der Mehrpunktumrichter. Die Grundlagen des weichen Schaltens unter Nutzung von Resonanzkreisen finden sich in Kapitel 7.

Die in den virtuellen Laboren verfügbaren Simulationsmodelle decken nahezu alle besprochenen Schaltungen ab. Sie zeigen die charakteristischen Zeitverläufe der Zustandsgrößen, die für die Schaltung entscheidend sind. Zusätzlich bieten sie eine animierte Darstellung der jeweils leitenden Schaltungszweige und erleichtern so das Verständnis ihrer Funktionsweise. Da die meisten Browser herkömmliche Java-Applets aufgrund von Sicherheitsbedenken nicht mehr unterstützen, werden sie beim Start automatisch in Java-Script übersetzt und dann ausgeführt. Dadurch ist gewährleistet, dass beide virtuellen Labore weiterhin verwendet werden können.

Ich danke meinem Lektor Frank Katzenmayer für die unkomplizierte Kommunikation und Dr. Malte Probst für das sorgfältige Korrigieren der neuen Manuskriptteile. Schließlich gebührt ein besonderer Dank meiner Familie, die die Arbeit immer unterstützt hat.

Gießen, im Januar 2022

Uwe Probst

URL des virtuellen Labors „Leistungselektronik“:
https://homepages.thm.de/~hg13555/Datenbank/lei/index.php/de/

URL des virtuellen Labors „elektronische Antriebstechnik“:
https://homepages.thm.de/~hg13555/Datenbank/aat/index.php/de/

Inhalt

1 Einführung in die Leistungselektronik 13

1.1 Grundlagen 13
1.2 Eigenschaften des Schaltbetriebs 15
1.2.1 Gleich-, Wechsel-, Mischgrößen 16
1.2.2 Arithmetischer Mittelwert 17
1.2.3 Effektivwert 19
1.2.4 Gesamteffektivwert, Klirrfaktor, Formfaktor und Welligkeit 22
1.2.5 Überschlägige Berechnung bei einfachen Kurvenverläufen 24
1.3 Leistungsbilanz bei Stromrichtern 29
1.3.1 Leistungsfaktor bei sinusförmigen Größen 29
1.3.2 Fourier-Analyse 31
1.3.3 Blindleistung bei Stromrichtern 32
1.4 Betriebsquadranten 38
1.5 Lösungen 39

2 Leistungshalbleiter 44

2.1 Grundlagen der Halbleiterphysik 44
2.1.1 Eigenleitfähigkeit 47
2.1.2 Dotierung 48
2.1.3 Feld- und Diffusionsstrom 50
2.1.4 Kombination von P- und N-dotierten Halbleitern zum PN-Übergang 50
2.1.4.1 Raumladungszone beim stromlosen PN-Übergang 51
2.1.4.2 Raumladungszone beim PN-Übergang in Durchlassrichtung 53
2.1.4.3 Raumladungszone beim PN-Übergang in Sperrrichtung 54
2.1.5 PiN-Übergang 54
2.2 Neue Halbleitermaterialien 56
2.2.1 Halbleiter mit großem Bandabstand 56
2.2.2 Anwendungsgebiete 57
2.3 Vergleich von idealen und realen Schaltern 58
2.4 Diode 62
2.5 Thyristor 65

2.6 Transistoren ... 68
2.6.1 MOSFET (Unipolar-Transistor) ... 68
2.6.2 Bipolar-Transistor ... 73
2.6.3 IGBT ... 74
2.6.4 Parasitäre Elemente ... 80
2.6.5 Schaltverhalten ... 84
2.6.6 Latch-Up ... 88
2.6.7 Ersatzschaltbild ... 88
2.6.8 Gemeinsamkeiten von Transistoren ... 89
2.7 GaN-Transistoren ... 92
2.8 Abschaltbare Thyristoren ... 95
2.8.1 Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO) ... 95
2.8.2 Integrated-Gate-Commutated-Thyristor (IGCT) ... 96
2.9 Schutz von Leistungshalbleitern ... 96
2.9.1 Spannungsbelastbarkeit ... 97
2.9.2 Überspannungsschutz ... 98
2.9.3 Schutz gegen Überstrom und Kurzschluss ... 103
2.9.4 Ein- und Ausschaltentlastung bei Transistoren ... 104
2.10 Erwärmung und Kühlung von Leistungshalbleitern ... 107
2.10.1 Durchlassverluste bei Thyristoren und Dioden ... 108
2.10.2 Verluste bei Transistoren ... 110
2.10.2.1 Durchlassverluste ... 110
2.10.2.2 Schaltverluste ... 112
2.10.3 Wärmetransport und Auslegung der Kühlung ... 113
2.11 Datenblattangaben für Dioden und Transistoren ... 119
2.11.1 Verwendete Kurzzeichen und Indizes in Datenblättern ... 119
2.11.2 Angabe von Kenndaten und Grenzwerten ... 121
2.11.3 Gleichrichterdioden ... 122
2.11.3.1 Grenzwerte (Absolute maximum ratings) ... 122
2.11.3.2 Kenndaten (Characteristics) ... 124
2.11.4 Thyristoren ... 125
2.11.4.1 Grenzwerte ... 126
2.11.4.2 Kenndaten ... 126
2.11.5 Transistormodule ... 128
2.11.5.1 Grenzwerte für Transistor-Module ... 129
2.11.5.2 Kenndaten ... 130
2.12 Lösungen ... 134

3 Stromrichterschaltungen mit Dioden und Thyristoren ... 139

3.1 Einpuls-Gleichrichter M1 ... 139
3.1.1 Aufbau der Schaltung ... 139
3.1.2 Funktionsweise der ungesteuerten M1U-Schaltung ... 140
3.1.3 Funktionsweise der gesteuerten M1C-Schaltung ... 142
3.2 Zweiphasige Mittelpunktschaltung M2 ... 145
3.2.1 Aufbau und Funktionsweise ... 145
3.2.2 Stromglättung ... 149
3.2.3 Steuergesetz im nicht lückenden Betrieb ... 153

3.3 Dreiphasige Mittelpunktschaltung M3 ... 154
3.3.1 M3-Schaltung bei ohmscher Last ... 154
3.3.1.1 Steuergesetz im nicht lückenden Betrieb ... 160
3.3.1.2 Steuergesetz im Lückbetrieb ... 161
3.3.2 M3-Schaltung bei idealer Glättung ... 162
3.3.3 Glättungsdrossel ... 166
3.3.4 Wechselrichterbetrieb ... 168
3.3.5 Auswirkung und Berechnung der Kommutierung ... 170
3.3.5.1 Kommutierung bei netzgeführten Stromrichtern ... 170
3.3.5.2 Auswirkung der Überlappung ... 174
3.3.5.3 Wechselrichtergrenze ... 177
3.3.5.4 Gleichspannungsersatzschaltbild für Mittelwerte ... 178
3.3.6 Mittelpunktschaltungen mit verbundenen Anoden ... 180
3.3.7 Netzströme und Transformatorbauleistung ... 182
3.4 Brückenschaltungen netzgeführter Stromrichter ... 184
3.4.1 Vollgesteuerte Drehstrombrückenschaltung B6C ... 185
3.4.2 Brückenschaltung B2C ... 189
3.5 Umkehrstromrichter ... 192
3.6 Lösungen ... 195

4 Gleichstromsteller ... 203

4.1 Einführung ... 203
4.2 Tiefsetzsteller ... 206
4.2.1 Grundschaltung ... 206
4.2.2 Realer Tiefsetzsteller ... 208
4.2.3 Dimensionierung des LC-Filters ... 209
4.2.4 Stromwelligkeit ... 210
4.2.5 Betrieb mit lückendem Strom ... 214
4.3 Hochsetzsteller ... 219
4.3.1 Grundlegende Arbeitsweise ... 219
4.3.2 Betrieb mit lückendem Strom ... 223
4.4 Mehrquadrantensteller ... 224
4.4.1 Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr ... 225
4.4.2 Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr ... 227
4.5 Vollbrücke ... 233
4.5.1 Allgemeine Einführung ... 234
4.5.2 Pulsweitenmodulation ... 237
4.5.2.1 Pulsweitenmodulation mit zwei Spannungsniveaus (PWM2) ... 238
4.5.2.2 PWM mit drei Spannungsniveaus (PWM3) ... 241
4.6 Ansteuerschaltungen für MOS-Transistoren ... 251
4.6.1 Grundlagen ... 251
4.6.2 CMOS-Gatter ... 253
4.6.3 Gegentaktstufe ... 254
4.6.4 Beschleunigtes Abschalten ... 254
4.6.5 Treiber-ICs ... 255
4.6.6 Potenzialfreie Ansteuerung mit Impulsübertrager ... 256
4.7 Lösungen ... 260

5 Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis ... 272

5.1 Einführung ... 272
5.2 Einphasige spannungseinprägende Wechselrichter ... 275
5.2.1 Halbbrücke mit Grundfrequenztaktung ... 275
5.2.2 Vierquadrantensteller mit Grundfrequenztaktung ... 278
5.2.3 Steuerverfahren zur Verstellung von Frequenz und Amplitude . 281
5.2.3.1 Pulsamplitudenmodulation ... 281
5.2.3.2 Vierquadrantensteller mit Unterschwingungsverfahren ... 281
5.2.4 Anwendungen ... 293
5.3 Dreiphasiger spannungseinprägender Wechselrichter ... 293
5.3.1 Grundlegender Aufbau und Steuerverfahren ... 293
5.3.1.1 Grundfrequenztaktung ... 294
5.3.1.2 Unterschwingungsverfahren ... 302
5.3.1.3 Raumzeigermodulation ... 309
5.3.1.4 Weitere Steuerverfahren ... 316
5.3.1.5 Flattop-Verfahren ... 318
5.3.2 Ergänzende Komponenten ... 319
5.4 Einsatzgebiete und Anwendungen ... 320
5.4.1 Elektronische Antriebstechnik ... 321
5.4.2 Netzeinspeisung regenerativ erzeugter Energien ... 322
5.4.3 Aktive Gleichrichter ... 323
5.4.3.1 Einführung ... 323
5.4.3.2 Netzanschluss und Ersatzschaltbilder ... 326
5.4.3.3 Raumzeiger und Koordinatensysteme ... 328
5.4.3.4 Regelung des aktiven Gleichrichters ... 334
5.5 Lösungen ... 341

6 Mehrpunkt-Wechselrichter ... 347

6.1 Grundlagen und Schaltungsvarianten ... 347
6.2 Dreipunkt-Wechselrichter ... 351
6.2.1 Einphasiger Dreipunkt-Halbbrücken-Wechselrichter ... 352
6.2.1.1 Pulsweitenmodulation der Dreipunkt-Halbbrücke ... 356
6.2.1.2 Steuergesetz und Ausgangsspannung ... 360
6.2.1.3 Spannungs- und Stromverläufe bei der PWM ... 360
6.2.1.4 Bedeutung der Klemmdioden ... 361
6.2.2 Dreiphasiger Dreipunkt-Wechselrichter ... 362
6.2.2.1 Schaltzustände und Ausgangsspannungen ... 363
6.2.2.2 Spannungsraumzeiger ... 367
6.2.2.3 Modulationsverfahren und Steuergesetz ... 371
6.2.2.4 Auswirkung von Verriegelungszeiten auf die Ausgangsspannung ... 372
6.3 Lösungen ... 376

7 Resonantes Schalten ... 381

7.1 Motivation ... 381
7.2 Grundlegende Analyse von LC-Kreisen ... 384
7.3 Grundstrukturen für weiches Schalten ... 393
7.4 Tiefsetzsteller mit ZCS ... 397
7.5 Tiefsetzsteller mit ZVS ... 404
7.6 Lösungen ... 408

A1 Fachbegriffe Deutsch-Englisch/Englisch-Deutsch ... 411

A2 Formelzeichen und Abkürzungen ... 418

A3 Glossar ... 422

Literatur ... 425

Index ... 429

1 Einführung in die Leistungselektronik

1.1 Grundlagen

Lernziele
Die Lernenden ...

- unterscheiden die Begriffe schalten, steuern, umrichten, gleichrichten,
- begründen die Vorteile des Schaltbetriebs,
- kennen die unterschiedlichen Einsatzgebiete der Leistungselektronik.

Die Leistungselektronik ist ein wesentliches Teilgebiet der Automatisierungstechnik. Zudem findet man sie in vielen anderen Bereichen des täglichen Lebens. Moderne Traktionsanwendungen (U-Bahnen, Straßenbahnen, ICE), einfache drehzahlregelbare elektrische Bohrmaschinen, Computernetzteile oder der Dimmer zur Helligkeitssteuerung von Glühbirnen basieren auf leistungselektronischen Schaltungen. Zunehmend mehr Haushaltsgeräte (Waschmaschinen, Kühlschränke, Geschirrspüler) werden zur Verbesserung ihres Wirkungsgrades mit Motoren ausgestattet, deren Drehzahl über Stromrichter energieeffizient gesteuert werden kann.

Gegenwärtig beträgt der Anteil der elektrischen Energie am Gesamtenergieverbrauch etwa 40 %, wird aber bis 2040 auf 60 % anwachsen. Gleichzeitig wird der Anteil der elektrischen Energie, die über leistungselektronische Schaltungen gesteuert wird, von 40 % im Jahr 2000 auf 80 % im Jahr 2015 ansteigen. Damit entwickelt sich die Leistungselektronik zu einer der Schlüsseltechnologien der kommenden Jahre.

Leistungselektronische Schaltungen werden eingesetzt, um möglichst verlustarm elektrische Energie einer Spannungsebene in elektrische Energie mit einer anderen Spannung umzuwandeln.

Am Beispiel der Helligkeitssteuerung einer Glühlampe wird dies deutlich: Sie leuchtet umso heller, je größer der Strom ist, der durch den Glühdraht fließt. Um die Höhe des Stromes und damit die Leuchtstärke der Lampe zu beeinflussen, muss die Spannung, mit der die Lampe versorgt wird, geändert werden können.

Bild 1.1 zeigt dafür prinzipiell verschiedene Möglichkeiten auf. Im Teilbild a) wird ein einstellbarer Vorwiderstand verwendet. Je nach Stellung des Schleifers fällt am Vorwiderstand ein mehr oder weniger großer Teil der Netzspannung ab. Die Spannung u_0 an der Lampe ist um diesen Betrag kleiner als die Netzspannung. Somit kann durch Verändern der Schleiferstellung die Größe der Spannung u_0 gesteuert werden.

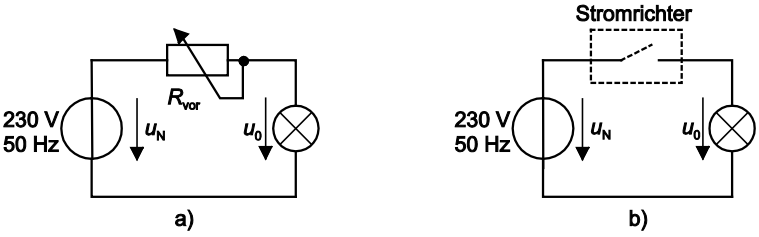


Bild 1.1 Helligkeitssteuerung einer Glühlampe a) mit Vorwiderstand b) mit Schaltbetrieb (Dimmer)

$$u_0 = \frac{R_{\text{Glühlampe}}}{R_{\text{Vor}} + R_{\text{Glühlampe}}} \cdot u_N$$

Unabhängig von der Stellung des Schleifers fließt hierbei immer Strom durch Lampe und Vorwiderstand. Diese Art der Helligkeitssteuerung ist nicht optimal, weil der Spannungsabfall am Vorwiderstand in Verbindung mit dem fließenden Strom in Wärme umgesetzt wird und somit Energie nutzlos verloren geht.

In Bild 1.1 b) wird statt des Vorwiderstandes als einfachste Variante eines Stromrichters ein elektronischer Schalter verwendet. Ist der Schalter geschlossen, so liegt die Netzspannung an der Lampe. Ist der Schalter geöffnet, dann ist die Spannung an der Lampe null und es fließt kein Strom. Diese Betriebsart heißt Schaltbetrieb.

Schalter ein: $u_0 = u_N$ Schalter aus: $u_0 = 0$

Die grundlegenden Unterschiede zwischen beiden Betriebsarten werden in den Zeitverläufen in Bild 1.2 deutlich. Ist der Widerstandswert des Vorwiderstandes gleich dem der Lampe, so erhält man für $u_0(t)$ den oberen Zeitverlauf. Wird der Schalter 5 ms nach jedem Nulldurchgang der Netzspannung bis zum nächsten Spannungsnulldurchgang geschlossen und danach wieder geöffnet, ergibt sich für die Spannung $u_0(t)$ an der Lampe der unten dargestellte Zeitverlauf.

Beide Zeitverläufe führen zu unterschiedlichen Helligkeiten der Lampe im Vergleich zum Betrieb mit voller Netzspannung. Anstatt mit Vorwiderstand kann die Helligkeit beim Schaltbetrieb ebenso durch Verändern der Einschaltdauer des Schalters relativ zur Periodendauer der Netzspannung gesteuert werden.

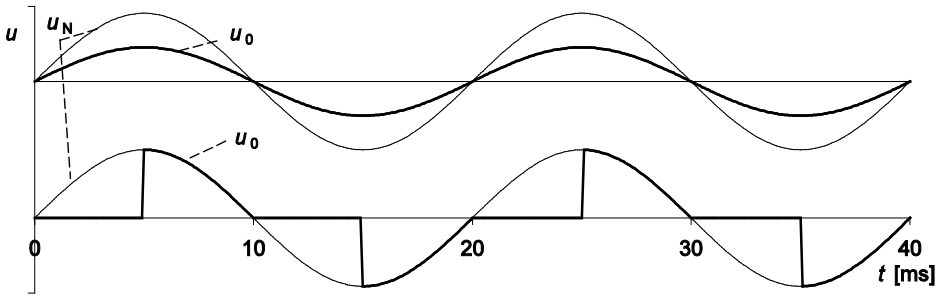


Bild 1.2 Zeitverläufe von $u_0(t)$: oben mit Vorwiderstand; unten mit Schaltbetrieb

Dadurch fließt beim Schaltbetrieb aber nur zeitweise Strom; der Vorwiderstand und die damit verbundenen Verluste entfallen. An diesem einfachen Beispiel wird bereits deutlich, wie wichtig der Schaltbetrieb für die Leistungselektronik ist. Auch wenn der Schalter zunächst idealisierend als verlustfrei angesehen wird, erhält man als qualitatives Ergebnis dieser einführenden Betrachtung:

Durch den *Schaltbetrieb* (switching mode) bleiben die Verluste in Stromrichtern gering. Die erreichbaren Wirkungsgrade sind sehr hoch.

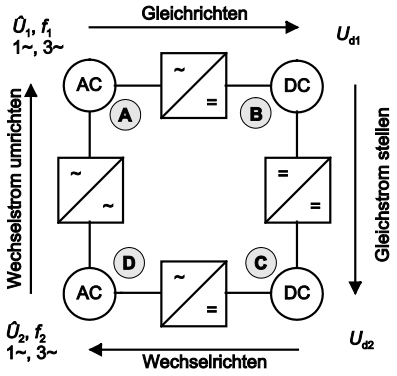


Bild 1.3 Anwendungsgebiete der Leistungselektronik

Bild 1.3 fasst die Anwendungsgebiete der Leistungselektronik zusammen. Neben der Amplitudenverstellung von Gleich-, Wechsel- oder Drehspannungen (Stellen) ermöglicht sie auch die Umwandlung von Wechsel- oder Drehspannung in Gleichspannung (Gleichrichten) und die Erzeugung von Wechsel- oder Drehspannungen mit variabler Frequenz und Amplitude aus Gleichspannungen (Wechselrichten). Des Weiteren kann eine Wechsel- oder Drehspannung einer Amplitude und Frequenz in eine Wechsel- oder Drehspannung anderer Amplitude und anderer Frequenz gewandelt werden (Umrichten). Dazu werden unterschiedliche Schaltungen eingesetzt.

1.2 Eigenschaften des Schaltbetriebs

Lernziele

Die Lernenden ...

- kennen die Unterschiede zwischen Mittel- und Effektivwert,
- berechnen Mittel- und Effektivwerte von Strömen und Spannungen für Zeitverläufe, die für die Leistungselektronik charakteristisch sind,
- berechnen Kenngrößen (Welligkeit, Klirrfaktor) von Schaltungen.

1.2.1 Gleich-, Wechsel-, Mischgrößen

Die Gemeinsamkeit aller Schaltungen der Leistungselektronik ist der Schaltbetrieb. Daraus resultiert, dass sich Spannungs- und Stromverläufe, die das Schaltungsverhalten beschreiben, aus Teilabschnitten mit teilweise sprungförmigen Übergängen zusammensetzen. Man erkennt dies am Zeitverlauf von $u_0(t)$ in Bild 1.2 unten.

Der Prozess besteht hier aus zwei Teilen der sinusförmigen Netzspannung für 5 ms < t < 10 ms und 15 ms < t < 20 ms sowie null während der restlichen Zeit und ist eine reine Wechselgröße. Typische Zeitverläufe bei anderen Schaltungen der Leistungselektronik können sich aus reinen Gleich- oder reinen Wechselgrößen oder Kombinationen von beiden zusammensetzen. Besteht ein Zeitverlauf aus Gleich- und Wechselanteilen, spricht man von einer Mischgröße.

Bild 1.4 zeigt den Verlauf einer solchen Mischspannung $u_d(t)$. Sie besteht nur aus den positiven Halbwellen einer sinusförmigen Spannung und hat daher einen positiven Mittelwert. Dieser arithmetische Mittelwert U_d der Spannung $u_d(t)$ wird auch Gleichanteil genannt. Er entspricht dem Flächeninhalt zwischen dem Zeitverlauf $u_d(t)$ und der Zeitachse t, wobei Flächen oberhalb der Zeitachse positiv und Flächen unterhalb der Zeitachse negativ gezählt werden. Dieser Flächeninhalt wird auch als Spannungs-Zeit-Fläche bezeichnet.

Subtrahiert man den Mittelwert U_d vom Zeitverlauf $u_d(t)$, so ergibt sich der Wechselanteil $u_{d\sim}(t)$ der Mischgröße. Dieser Wechselanteil zeichnet sich dadurch aus, dass positive und negative Spannungs-Zeit-Flächen gleich groß sind. Insgesamt kann man sich vorstellen, dass eine Mischgröße aus der Addition eines reinen Wechselanteils zu einem Gleichanteil entsteht.

$$u_d(t) = U_d + u_{d\sim}(t) \tag{1.1}$$

Die Zeitverläufe, um die es in der Leistungselektronik geht, können Gleich-, Wechsel- oder Mischgrößen sein, die ihrerseits Mittelwert, Effektivwert und Scheitelwert haben. Um den Überblick zu behalten, werden alle zeitlich veränderlichen Größen ($u_d(t)$, $u_{d\sim}(t)$ in Bild 1.4) mit Kleinbuchstaben bezeichnet. Größen, die nicht zeitabhängig sind (Scheitelwert $\hat{U}_d$, Mittelwert U_d in Bild 1.4), erhalten Großbuchstaben.

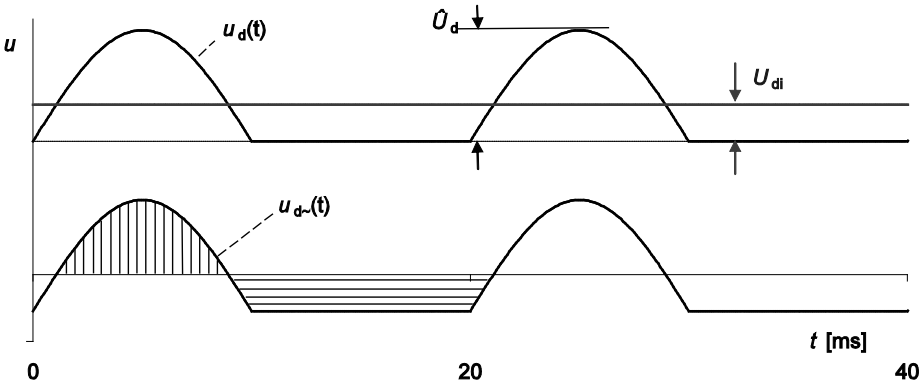


Bild 1.4 Zeitverlauf einer Mischspannung, oben: Mischspannung $u_d(t)$, arithmetischer Mittelwert U_d; unten: Wechselanteil $u_\sim(t)$

Zur Beschreibung von Mischgrößen wird in der Leistungselektronik eine ganze Reihe unterschiedlicher Begriffe verwendet. Die wichtigsten werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

1.2.2 Arithmetischer Mittelwert

Der arithmetische Mittelwert eines Zeitverlaufs wird auch Gleichanteil genannt. Um ihn zu berechnen, muss die Spannungs-Zeit-Fläche – also der Flächeninhalt zwischen dem Zeitverlauf der Spannung und der Zeitachse – bestimmt werden.

Näherungsweise Berechnung

Zunächst wird an einem Beispiel eine überschlägige Berechnung vorgenommen und anschließend auf die exakte mathematische Darstellung erweitert [Felderhoff06].

Beispiel 1.1 Berechnung der Spannungs-Zeit-Fläche einer Sinushalbwelle

Zur überschlägigen Berechnung wird die Sinushalbwelle nach Bild 1.5 durch eine Treppenfunktion angenähert. Die Gesamtfläche ergibt sich durch die Summation der einzelnen Flächeninhalte der Treppenstufen. Aufgrund der Symmetrie der Halbwelle zu $\pi/2$ genügt es, die Treppenstufen der ersten Viertelperiode zu summieren und das Ergebnis zu verdoppeln.

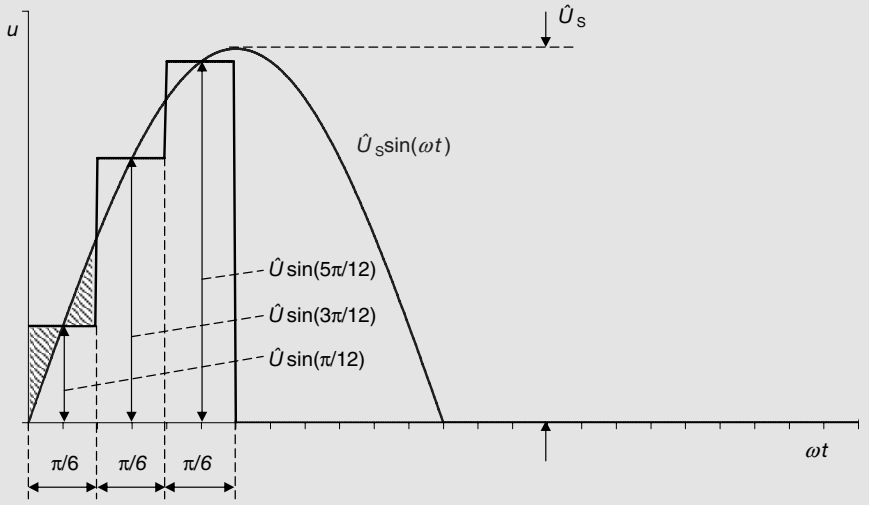


Bild 1.5 Mittelwertberechnung durch Treppenfunktion

Im Beispiel wird die Näherung durch drei Rechtecke vorgenommen. Jedes von ihnen hat die Breite $\pi/6$. Die Höhe ergibt sich aus dem Wert der Sinushalbwelle genau in der Mitte des jeweiligen Rechtecks. Für die drei eingezeichneten Rechtecke betragen die Höhen $\hat{U}\sin(\pi/12)$, $\hat{U}\sin(3\pi/12)$ sowie $\hat{U}\sin(5\pi/12)$. Der Flä-

cheninhalt $F/2$ der Viertelperiode entspricht näherungsweise der Summe der drei Rechteckflächen und ergibt sich zu

$$\frac{F}{2} = \left[\frac{\pi}{6}\sin(\frac{\pi}{12}) + \frac{\pi}{6}\sin(\frac{3\cdot\pi}{12}) + \frac{\pi}{6}\sin(\frac{5\cdot\pi}{12})\right]\cdot\hat{U}_S$$

$$F = 2\cdot\left[\frac{\pi}{6}\sin(\frac{\pi}{12}) + \frac{\pi}{6}\sin(\frac{3\cdot\pi}{12}) + \frac{\pi}{6}\sin(\frac{5\cdot\pi}{12})\right]\cdot\hat{U}_S$$

Der Flächeninhalt der Halbperiode ist doppelt so groß wie der der Viertelperiode. Dividiert man den Flächeninhalt F durch die Periodendauer 2π, so erhält man den überschlägigen arithmetischen Mittelwert. Je kleiner die Breite der Treppenstufen, umso genauer wird die Annäherung der Überschlagsrechnung.

$$U_d = \frac{F}{2\pi} = \frac{2\cdot\left[\frac{\pi}{6}\sin(\frac{\pi}{12}) + \frac{\pi}{6}\sin(\frac{3\cdot\pi}{12}) + \frac{\pi}{6}\sin(\frac{5\cdot\pi}{12})\right]\cdot\hat{U}_S}{2\pi} = 0.321\cdot\hat{U}_S$$

Anhand der schraffierten Dreiecke in Bild 1.5 wird das Prinzip der Näherung deutlich. Werden die Rechtecke ausreichend schmal, so sind die Flächeninhalte der beiden schraffierten Dreiecke etwa gleich groß. Damit entspricht die Summe der Rechteckflächen näherungsweise der Fläche unter der Sinushalbwelle.

Mathematisch exakte Berechnung

Wesentlich genauer und mathematisch exakt geschieht die Bestimmung des Mittelwertes durch das bestimmte Integral nach Gl. (1.2).

$$U_d = \frac{1}{T}\cdot\int_0^T \hat{U}_s\cdot\sin\omega t\cdot dt = \frac{1}{2\pi}\cdot\int_0^{2\pi}\hat{U}_s\cdot\sin\omega t\cdot d\omega t \tag{1.2}$$

Angewendet auf Beispiel 1.1 der pulsierenden Gleichspannung ergibt sich für deren arithmetischen Mittelwert folgende exakte Lösung:

$$U_d = \frac{1}{2\pi}\cdot\int_0^{\pi}\hat{U}_s\cdot\sin\omega t\cdot d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi}0\cdot d\omega t = \frac{\hat{U}_s}{2\pi}\cdot\left[-\cos\omega t\right]_0^{\pi} = \frac{\hat{U}_s}{2\pi}\cdot[-(-1)-(-1)] = \frac{\hat{U}_s}{\pi}$$

$$U_d = 0.318\cdot\hat{U}_s$$

Die Abweichung zwischen der exakten Lösung und dem Ergebnis aus Beispiel 1.1 ist vergleichsweise gering.

Der *arithmetische Mittelwert* (arithmetic mean value, arithmetic average value) eines Zeitverlaufs ist der in ihm enthaltene Gleichanteil. Mathematisch entspricht er dem Flächeninhalt der Kurve bezogen auf die Zeitachse.

Allgemein wird der arithmetische Mittelwert mit Großbuchstaben bezeichnet. In Halbleiterdatenblättern verwendet man den Index AV (Average Value) für Mittelwerte. Das wird auch in diesem Buch so gehandhabt.

1.2.3 Effektivwert

Aufgrund des ohmschen Gesetzes hängt bei linearen Stromkreisen die umgesetzte Leistung quadratisch von Strom oder Spannung ab.

$$p = \frac{u^2}{R} \qquad\qquad p = i^2 \cdot R$$

Sind Strom und Spannung keine Gleichgrößen, sondern periodische zeitabhängige Größen, so muss zur Leistungsberechnung der quadratische Mittelwert verwendet werden. Dieser heißt *Effektivwert* und wird im Englischen Root Mean Square genannt.

Mathematisch ergibt sich der Effektivwert als Mittelwert des quadrierten Zeitverlaufs.

$$U_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) \cdot \mathrm{d}t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u^2(\omega t) \cdot \mathrm{d}\omega t} \tag{1.3}$$

Effektivwerte werden u. a. benötigt, um die Wärmebelastung von Halbleitern und die Ausgangsleistung von Wechselrichtern zu berechnen sowie Transformatoren auszulegen.

Im Deutschen dient der Index „eff“ zur Kennzeichnung von Effektivwerten. Halbleiterdatenblätter sind üblicherweise in Englisch verfasst. Dort wird der Begriff Root Mean Square als Bezeichnung für den Effektivwert benutzt. Daher lautet die Indexbezeichnung für Effektivwertangaben in Datenblättern meist RMS. Die Bezeichnung RMS für den Effektivwert wird auch in diesem Buch gebraucht.

Beispiel 1.2 Angabe der Strombelastbarkeit

Zur Beschreibung der Strombelastbarkeit gibt man im Datenblatt den maximalen Effektivwert I_{TRMSM} des Bauelementstroms an. Die Indizes haben folgende Bedeutung:

T: Bauelementtyp, beispielsweise Thyristor

RMS: Root Mean Square (quadratischer Mittelwert)

M: maximal

I_{TRMSM} bezeichnet demnach den maximal zulässigen Effektivwert, mit dem der Thyristor belastet werden darf.

Beispiel 1.3 Effektivwert einer sinusförmigen Spannung

Es soll der Effektivwert des Zeitverlaufs $\hat{U}\sin(\omega t)$ aus Bild 1.6 berechnet werden.

Lösung:
Zunächst muss der Zeitverlauf $u(\omega t)$ quadriert werden.

$$u(\omega t) = \hat{U} \cdot \sin \omega t \quad \Rightarrow \quad u^2(\omega t) = (\hat{U} \cdot \sin \omega t)^2 = \hat{U}^2 \cdot \sin^2 \omega t$$

Anschließend wird der quadrierte Zeitverlauf nach Gl. (1.3) integriert.

$$U_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} (\hat{U} \cdot \sin \omega t)^2 \cdot \mathrm{d}\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \hat{U}^2 \cdot \sin \omega t^2 \cdot \mathrm{d}\omega t}$$

Am einfachsten entnimmt man die Lösung der Integration einer mathematischen Tabelle.

$$U_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \hat{U}^2 \cdot \left[-\frac{1}{2} \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) + \frac{\omega t}{2} \right]_0^{2\pi}}$$

Setzt man die Integrationsgrenzen ein, so ergibt sich der bekannte Zusammenhang zwischen Scheitel- und Effektivwert bei sinusförmigen Größen.

$$U_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \hat{U}^2 \cdot \left[\left(-\frac{1}{2} \sin(2\pi) \cdot \cos(2\pi) + \frac{2\pi}{2}\right) - \left(-\frac{1}{2} \sin(0) \cdot \cos(0) + \frac{0}{2}\right) \right]}$$

$$U_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \hat{U}^2 \cdot \left[0 + \frac{2\pi}{2} - (0) + \frac{0}{2} \right]} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \hat{U}^2 \cdot \frac{2\pi}{2}} = \sqrt{\frac{\hat{U}^2}{2}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

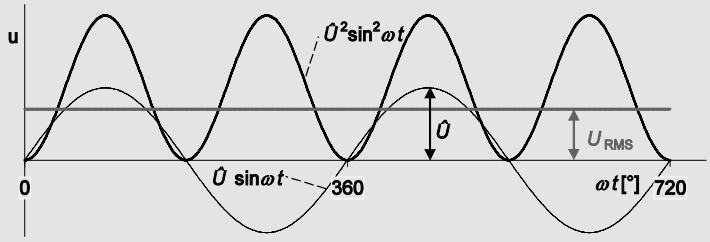


Bild 1.6 Sinusförmige Spannung $\hat{U}\sin\omega t$, quadrierte sinusförmige Spannung $\hat{U}^2\sin^2(\omega t)$ und Effektivwert U_{RMS} für $\hat{U}$ = 2 V

Übung 1.1

Berechnen Sie den Effektivwert der sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.7.

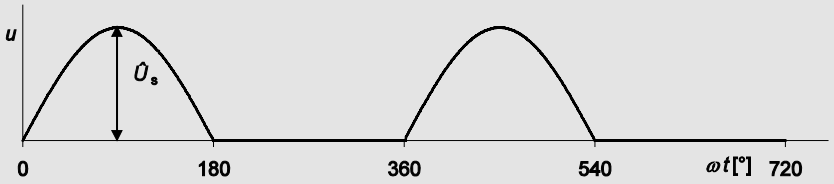


Bild 1.7 Zeitverlauf zur Übung 1.1

Übung 1.2

Berechnen Sie Effektivwert und Mittelwert der angeschnittenen sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.8 in Abhängigkeit vom Winkel α.

Verwenden Sie zur Lösung das Applet „Charakteristische Zeitverläufe“.

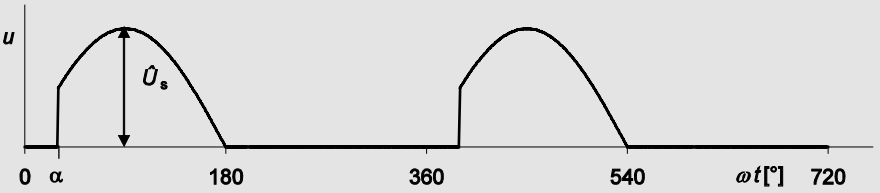


Bild 1.8 Zeitverlauf zur Übung 1.2

Übung 1.3

Berechnen Sie den Effektivwert und Mittelwert der sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.9.

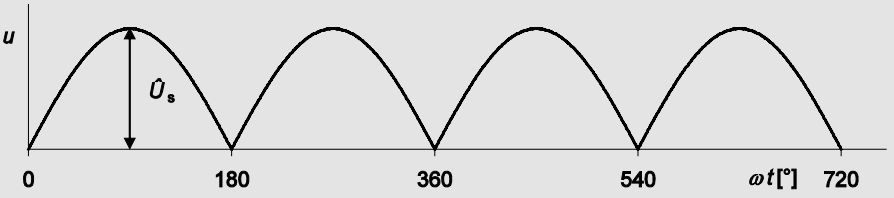


Bild 1.9 Zeitverlauf zur Übung 1.3

Übung 1.4

Berechnen Sie Effektivwert und Mittelwert der sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.10 in Abhängigkeit vom Winkel α.

Verwenden Sie zur Lösung das Applet „Charakteristische Zeitverläufe“.

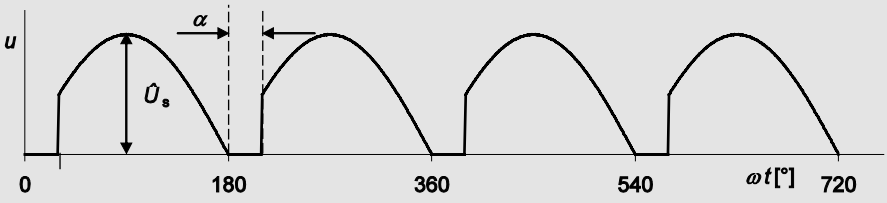


Bild 1.10 Zeitverlauf zur Übung 1.4

Übung 1.5

Berechnen Sie den Effektivwert des Stromverlaufs aus Bild 1.11 in Abhängigkeit von τ, T und I_d.

Kontrollieren Sie Ihre Lösung mit dem Applet „Charakteristische Zeitverläufe“.

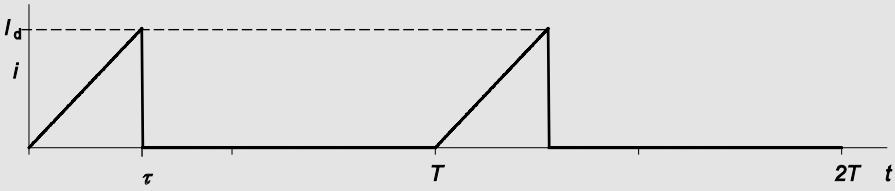


Bild 1.11 Zeitverlauf zur Übung 1.5

1.2.4 Gesamteffektivwert, Klirrfaktor, Formfaktor und Welligkeit

Ausgehend von Mittelwert und Effektivwert sind weitere Begriffe üblich, um Mischgrößen zu beschreiben.

Gesamteffektivwert

Nach Gl. (1.1) kann eine Mischspannung als Addition von Gleich- und Wechselanteil aufgefasst werden. Der Gesamteffektivwert der Mischgröße setzt sich daher zusammen aus dem quadratischen Mittelwert des Gleichanteils U_d und dem Effektivwert des Wechselanteils $U_{RMS,\sim}$. Somit gilt:

$$U_{RMS,ges}^2 = U_d^2 + U_{RMS,\sim}^2 \qquad \Rightarrow \qquad U_{RMS,ges} = \sqrt{U_d^2 + U_{RMS,\sim}^2} \tag{1.4}$$

Index

A

Abwärtswandler 206
aktiver Gleichrichter
– Schaltbild 325
– Zeitverläufe 337
Ansteuerschaltungen
– beschleunigtes Abschalten 254
– CMOS-Gatter 253
– Gegentaktstufe 254
– Grundlagen 251
– High-Side-Treiber 255
– Impulsübertrager 256
– Treiber-IC 255
Ansteuerstufen 252
Ansteuerverluste 107
Applet
– B2C-Schaltung 190
– B6C-Schaltung 187, 189
– charakteristische Zeitverläufe 21 f., 24 f., 28
– dreiphasiger Wechselrichter 307
– dreiphasiger Wechselrichter mit Raumzeiger 310
– Dreipunkt-Halbbrücken-Wechselrichter 353
– einphasiger WR 290
– Fourier-Synthese 32
– Hochsetzsteller 223
– Kommutierung 172
– M3-Schaltung 165, 198
– PT1-Verhalten 329
– PT2-Verhalten 329
– PWM mit modifizierten Steuerspannungen 318
– Raumzeiger 330
– Raumzeigerverfahren 316
– rotierendes Koordinatensystem 330
– sinusförmige PWM 282
– Tiefsetzsteller 208, 219
– Tiefsetzsteller mit ZCS 401
– Tiefsetzsteller mit ZVS 407
– Vollbrücke 236, 240, 247 f.
– VQS-GM 244
– Wechselstromsteller 32, 35 f.
arithmetischer Mittelwert 16
Ausschaltentlastung 106
Aussteuergrad 284 – 286, 288, 291, 304 f., 309, 342

B

B2C 189, 191
– Mittelwert 191
– Ventilspannung 190
– Welligkeit 191
B6C 185, 191
– Mittelwert 186 f.
– Welligkeit 186 f.
Bandabstand 56
Bändermodell 46, 56
Betriebsquadranten
– bei Stromrichtern 38
Bipolar-Transistor 260
Blindleistung 30, 32 – 37, 184
Boost Converter 222
Brückenschaltung 184, 189
Buck Converter 206

D

Diffusionsstrom 50, 52
Diode
– Datenblattangaben 65, 119, 122
– Durchlassverluste 108

– idealisierte Kennlinie 63
– Kennlinie 62
– Schaltverhalten 64
– Schaltverluste 112
– Verlustleistung 63
Dotierung 48 f.
Drehstrombrückenschaltung 185
Driftstrom 50
Durchlassverluste 61, 107

E

Effektivwert 16, 19, 39 – 42, 165
– Abschätzung 27
– Berechnung 21
– RMS 19
– überschlägige Berechnung 24
einphasiger Wechselrichter
– Ausgangsspannung 279
Einschaltentlastung 104
Ersatzschaltbild
– Diode 63 f., 108 f.
– für Mittelwerte 179
– IGBT 88
– MOSFET 86
– Schaltzustände beim dreiphasigen Wechselrichter 296
– thermisch 113
– Thyristor 67, 109
– Überspannung 99

F

Feldstärke
– elektrisch 47, 50
– kritisch 57
Feldstrom 52
Formfaktor 22, 24
Fourier 31, 36, 276
– Zerlegung 32
Freilaufdiode 219, 225
Frequenzverhältnis 284 – 286, 288 – 291, 306, 309, 341, 344

G

GaN
– 2DEG 93
– Eigenschaften 92
GaN-Transistor
– Aufbau 93
– Einschalten 93
– Kennlinien 95
– Rückwärtsleiten 94
GCT 96
Gesamteffektivwert 22
Glättungsdrossel 151
Glättungszeitkonstante 152
Gleichgröße 16
Gleichrichter
– als Einspeisung für Tiefsetzsteller 205
– bei Zwischenkreisumrichter 272
– M1 139
– Toleranz der Netzspannung 218
– vollgesteuert 196
– Wechselanteil 23
Gleichspannungs-Zwischenkreis 272
Gleichstromsteller 203
– Anwendungen 204
Grundfrequenztaktung 276
GTO 96, 204, 290

H

Helligkeitssteuerung
– mit Stromrichter 13
– mit Vorwiderstand 13
Hochsetzsteller 219 – 222, 225
– Lückbetrieb 223
– Schaltbild 220
– Zeitverläufe 221

I

ideale Stromglättung 151
ideelle Gleichspannung 143
IGBT 74, 204, 251, 260
– Aufbau 75
– Datenblattangaben 89, 119, 128
– Durchlassverluste 110 f.
– Ersatzschaltbild 88

– Gateladung 131
– Grenzwerte 129
– Kennlinie 76
– Latch-Up 88
– NPT 77, 79
– Parameter 128
– parasitäre Elemente 80, 82 f.
– parasitäre Kapazitäten 81, 83
– P-Kanal 77
– PT 77, 80
– Schaltverhalten 84, 89
– Schaltverluste 112
– Schaltzeichen 76
– Schaltzeiten 77
– SOA-Diagramm 91
– symmetrisch 77
– unsymmetrisch 77, 80
IGCT 204

K

Klirrfaktor 22 f.
Kommutierung 170, 173
– bei M3C 176
– Berechnung der Spannungsänderung 176
– Ersatzschaltbild 171
– fremdgeführter Stromrichter 203
– selbstgeführter Stromrichter 204
– Spannungsabfall bei Kommutierung 177
– Spannungsabfall durch Kommutierung 174
– Ventilstromverlauf 173
– Wechselrichtergrenze 177
Kommutierungsinduktivität 177
Koordinatensysteme 328
Kühlkörper
– Auswahl 118
– Berechnung 117

L

Leistung
– beim Wechselstromsteller 34 f.
Leistungsbilanz 29
Leistungsfaktor 31
– bei sinusförmigen Größen 29
– der Grundschwingung 325
Lückbetrieb
– Hochsetzsteller 224
– Tiefsetzsteller 214, 216
Lückgrenze
– Hochsetzsteller 223
– Tiefsetzsteller 217

M

M1 139, 191
– Welligkeit 144
M1C 142
M1U 140
M2 145, 191
– arithmetischer Mittelwert 149
– Mittelwert 148
– natürlicher Zündzeitpunkt 146
– Teilaussteuerung 148
– Vollaussteuerung 147
– Welligkeit 148
M3 154, 185, 191
– arithmetischer Mittelwert 156
– mit verbundenen Anoden 180
– Strangströme 163
– Teilaussteuerung 160
– Ventilspannung 158 f.
– Ventilströme 163
– Vollaussteuerung 156
– Welligkeit 157
Mischgröße 16
Mittelpunktschaltung
– M1 139
– M2, M2C 145
– M3, M3C 154
Mittelwert 16 f., 32, 36, 40 f., 141 f., 206, 215, 237, 240, 243
– Abschätzung 27
– Berechnung 21
– Berechnung durch Treppenfunktion 17
– exakte Berechnung 18
– überschlägige Berechnung 24
MOSFET 68, 203, 206, 208, 260
– Ansteuerschaltungen 251

– Aus/Einschalten 69
– Bahnwiderstand 71
– Datenblattangaben 72, 119, 128
– Durchlassverluste 110
– Grenzwerte 129
– lateraler Aufbau 69
– Parameter 128
– Schaltverluste 112
– statische Kennlinie 71
– vertikaler Aufbau 70

N

natürlicher Zündzeitpunkt 142, 146
netzgeführte Stromrichter 203
Netzrückspeisefähigkeit 323
N-Kanal-MOSFET 252, 255, 260
N-Kanal-MOS-Transistoren 251
NPN 203

O

Oberschwingung 23, 32 – 34, 36, 209, 274, 276, 279, 341
– Grundfrequenztaktung 280, 299
– Unterschwingungsverfahren 306
– Zeitverläufe 277
Ordnungszahl 32, 277, 279, 288, 299, 306, 309, 341

P

PiN-Übergang 54
PNP 203
PN-Übergang 50
Pulsamplitudenmodulation 281, 342
Pulsweitenmodulation 208, 237, 253, 281 – 283, 304, 342
– bipolar 278
– bipolar, zwei Spannungsniveaus 238 – 240, 248
– Steuerbereiche 292
– synchronisiert 289
– unipolar, drei Spannungsniveaus 241 – 244, 246, 250
– unsynchronisiert 290
– Unterschwingungsverfahren 284, 287
PWM2 238
PWM3 243, 250

R

Raumladungszone 53 f.
Raumzeiger 309, 328
– der Netzspannung 335

S

Sägezahnspannung 206, 208
Schaltbetrieb 15
Schalter 14, 140, 203 f., 219, 225, 227 f., 232, 241
– eingeschaltet 235
– ideal 58
– real 58
– stromführend 235
Schaltfrequenz 208
Schaltverluste 61, 107, 251
Schaltvorgang 59
Scheitelwert 16, 36, 281
Schleusenspannung 251
Schutz
– Kurzschluss 103
– Überstrom 103
Schutzbeschaltung
– active clamping 101
– dynamische Gatesteuerung 101
– passiv 101
– Steuerkreis 102
selbstgeführte Stromrichter 203
Spannungsbelastbarkeit
– von Bauelementen 97
Sperrschichttemperatur 56 f.
Sperrverluste 61, 107
Sperrwandler 221 f.
Step-Down Converter 206
steuerbare Stromrichter 140
Steuerblindleistung 34, 37
Steuergesetz 142
Steuerverluste 61
Steuerwinkel 142
Stromglättung 149

Stromgrundschwingung 33
Stromrichter 203
Stromwelligkeit 149

T

Tastgrad 216, 224
THD 23, 43
Thyristor 66, 156
– Abschalten 67
– Blockieren 66
– Datenblattangaben 67, 125
– Durchlassverluste 108
– Kennlinie 66
– kritische Spannungssteilheit 67
– Leiten 67
– Spannungsspitze 100
– Sperren 66
– Sperrfähigkeit 97
– Zünden 66
Tiefpassfilter 210
Tiefsetzsteller 206, 320
– Ausgangsspannung 215
– Berechnung der Stromwelligkeit 211
– grundlegende Zeitverläufe 207
– Grundschaltung 206
– Kennlinien 217 f.
– Lückbetrieb 214 f.
– Lückbetrieb bei konstanter Ausgangsspannung 218
– Lückbetrieb bei konstanter Eingangsspannung 216
– realer Aufbau 208
– Stromwelligkeit 210
Transformatorbauleistung 182
Transistor 203
Treiberschaltungen 252

U

Überlappung 173
Überspannungsschutz 98
Umkehrstromrichter 192, 345
– mit B6C 192
Umrichten von Wechselstrom 272
Umrichter 272
Umschaltverluste 204
Unterschwingungsverfahren 283, 285, 287, 291
– dreiphasiger Wechselrichter 302
– linearer Steuerbereich 304
– Oberschwingungen 286
– Spektren 288
– synchronisierte Taktung 288
– unsynchronisierte Taktung 290
– Vierquadrantensteller 281

V

Ventilspannung 146, 159
Verluste 15, 29, 319
Verschiebungsblindleistung 34
Verzerrungsblindleistung 34 – 37
Vierquadrantensteller 234
– einphasiger Wechselrichter 278
Vollaussteuerung 143
Vollbrücke 233

W

Wärmekapazität 115
Wärmeleitfähigkeit 57
Wärmewiderstand 114
Wechselanteil 143
Wechselgröße 16
Wechselrichter
– Bremsbetrieb 319
– dreiphasig 293
– dreiphasig mit Grundfrequenztaktung 295
– einphasig 275
– Ersatzschaltbild 297
– Grundfrequenztaktung 281
– linearer Steuerbereich 288
– mit einer Halbbrücke 275
– mit Vierquadrantensteller 278
– Photovoltaikmodul 274
– Pulsweitenmodulation 303
– spannungseinprägend 272
– Spektren 305
– Steuerbereich 309
– synchronisierte Taktung 306

– unterbrechungsfreie Stromversorgung 274
– Unterschwingungsverfahren 281
– Vollbrücke 234
– Zerhacken einer Gleichspannung 273
– Zusatzkomponenten 320
Wechselrichterbetrieb 168
– bei netzgeführtem Stromrichter 193
Wechselrichtergrenze 177
Welligkeit 22 f.

Z

Zündwinkel 142, 144
Zweiquadrantensteller
– mit Spannungsumkehr 227
– mit Stromumkehr 225
– synchrone Taktung 228
– Taktung eines Transistors 232
– zeitlich versetzte Taktung 229
Zwischenkreisumrichter 272
– mit aktivem Gleichrichter 325
– mit eingeprägter Spannung 273