

W. Hartel

# Stromrichter- schaltungen



Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York

TM46  
A1

7861464

Walter Hartel

# Stromrichter- schaltungen

Einführung in die Schaltungen  
netzgeführter Stromrichter



E7861464



Springer-Verlag  
Berlin · Heidelberg · New York 1977

Professor Dr.-Ing. WALTER HARTEL  
Generalbevollmächtigter Direktor  
der Siemens Aktiengesellschaft, München

Mit 211 Abbildungen

ISBN 3-540-08207-7 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York  
ISBN 0-387-08207-7 Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

Library of Congress Cataloging in Publication Data. Hartel, Walter. Stromrichterschaltungen. Bibliography: p. Includes index. 1. Electric current rectifiers. I. Title. TK7872.R35H38 621.313'77-9037.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1977.  
Printed in GDR.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einband: Konrad Triltsch, Würzburg  
2362/3020-543210

## Vorwort

Bei dem Vorhaben, eine Einführung in die Stromrichterschaltungen zu schreiben, erhebt sich als erstes die Frage, ob man bei der Abhandlung des Stoffes den Schwerpunkt auf die Didaktik, also auf eine möglichst verständliche Darstellung, oder aber auf den praktischen Nutzen, also auf die Bedeutung für die Anwendungen legen soll. Für die Auswahl des Stoffes und für die Art der Darstellung gelten in beiden Fällen unterschiedliche Gesichtspunkte.

Die Erfahrungen einer achtzehnjährigen Lehrtätigkeit an der Technischen Universität München über das Thema Stromrichtertechnik haben gezeigt, daß der Umgang mit stückweise stetigen Vorgängen in aufeinanderfolgenden Zeitintervallen — also der Umgang mit den für die Stromrichterschaltungen typischen Erscheinungen — bei der Einarbeitung in den Stoff wesentlich größere Schwierigkeiten bereitet, als die nachträgliche Übertragung der Ergebnisse auf die praktischen Anwendungen. Daraus wurde der Schluß gezogen, daß offensichtlich ein Bedürfnis nach einer Einführung in die Stromrichterschaltungen besteht, bei der den didaktischen Gesichtspunkten der Vorrang gegeben wird; vielleicht wird durch ein solches Buch sogar eine Lücke im deutschsprachigen Schrifttum geschlossen.

Der Forderung nach einer einfachen und leicht verständlichen Darstellung des Stoffes kommt man dadurch entgegen, daß mit der Beschreibung einfacher Vorgänge begonnen wird und dann — auch unter Inkaufnahme einer gewissen Redundanz — zu komplizierteren Vorgängen aufgebaut, also der Weg vom Speziellen zum Allgemeinen begangen wird. Der umgekehrte Weg, nämlich von allgemeingültigen Betrachtungen auszugehen und daraus die speziellen Sonderfälle abzuleiten, ist zwar in der Darstellung eleganter und auch wesentlich kürzer abzuhandeln; er bereitet dem Kenner der Materie sicher mehr Vergnügen, dem Anfänger und dem mit dem Stoff nur gelegentlich konfrontierten Anwender dagegen mehr Schwierigkeiten und scheidet daher als Leitlinie für eine Einführung in die Stromrichterschaltungen aus.

Im vorliegenden Buch werden im Teil I die charakteristischen Eigen-

schaften der realen und idealen Ventile und ihrer Steuerung beschrieben. Auf die verschiedenen physikalischen Möglichkeiten, eine gute Richtwirkung der Ventile herzustellen, wird nicht eingegangen.

Der Forderung nach einer einfachen und leicht verständlichen Darstellung entsprechend, wird im Teil II mit der Beschreibung der einfachsten Stromrichterschaltung, die auch praktische Bedeutung (Bahnbetrieb) hat, nämlich mit der zweipulsigen Mittelpunktschaltung begonnen. Dieser Sonderfall wird zur  $p$ -pulsigen Mittelpunktschaltung verallgemeinert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden die etwas komplizierteren Zusammenhänge bei der Parallelschaltung und bei der Reihenschaltung zweier Mittelpunktschaltungen, nämlich die Vorgänge bei der Saugdrosselschaltung und bei den Brückenschaltungen, beschrieben. Die Saugdrosselschaltung wird nur kurz behandelt, weil ihr nach der Ablösung der mehranodigen Quecksilberdampfventile durch die Halbleiterventile praktisch nur noch historische Bedeutung zukommt. Dagegen haben die Brückenschaltungen durch die Einführung der Halbleiterventile ganz besonders an Aktualität gewonnen, so daß ihrer Beschreibung entsprechend mehr Platz eingeräumt wird. Bei allen diesen Schaltungen wird im Teil II der einfache Fall einer passiven Last, bestehend aus der Reihenschaltung eines ohmschen Widerstandes und einer Induktivität, angenommen. Zunächst wird nur die Wirkung der Schaltungen im Gleichrichterbetrieb beschrieben; am Ende des Teiles II werden die Überlegungen auf den Wechselrichterbetrieb ausgedehnt.

Im Teil III wird die Wirkung einer Gleichspannung im Lastkreis am Beispiel eines stromrichtergespeisten Gleichstromantriebes beschrieben.

Im Teil IV werden die Eigenschaften der Stromrichtertransformatoren und ihr Einfluß auf den Stromrichterbetrieb beschrieben.

Nicht eingegangen wird auf die Berechnung der Oberwellen auf der Gleichstromseite und auf der Netzseite des Stromrichters sowie auf die Rückwirkungen, die bei der Belastung des Netzes durch die nichtsinusförmigen Ströme eines angeschlossenen Stromrichters auftreten. Bei vorgegebenem Umfang des Buches stand die Entscheidung aus, diese Themen mit einzubeziehen, dann aber die Teile I bis IV entsprechend kurz zu fassen, oder aber auf diese Themen zu verzichten und dafür den Teilen I bis IV mehr Platz einzuräumen. Der letztere Weg wurde gewählt, weil es bei einer Einführung nützlicher schien, etwas weniger, dafür aber ausführlich und leicht verständlich darzustellen, als etwas mehr, dafür aber komprimierter und vielleicht etwas weniger leicht zugänglich zu behandeln.

Bei der Auswahl des Stoffes und bei der Art der Darstellung haben mich die Herren Prof. Dr. Möltgen, Erlangen, und Prof. Dr. Graßl, Wien, beraten und den Stoff durchgesehen. Herrn Prof. Dr. Möltgen verdanke ich insbesondere wertvolle Hinweise für die Stoffauswahl des Kapitels 11.

Herr Dipl.-Ing. Freundel, München, hat das Manuskript und die Bilder korrigiert, die Formeln nachgerechnet und mir viele Hinweise und Ratschläge bei der Abfassung des Textes gegeben. Frau Thea Lichtinger, München, habe ich für die Reinschrift des Textes zu danken und für die vielen Entwürfe und Änderungen, die der Endfassung vorausgingen.

München, im Sommer 1977

**W. Hartel**

## Größenverzeichnis

Sofern es sich um physikalische Größen handelt, bezeichnen Großbuchstaben stets Mittel- bzw. Effektivwerte, während Kleinbuchstaben für Augenblickswerte verwendet werden.

$C, C_1, C_2, C_3,$	Integrationskonstanten
$C_n, C', C''$	
$C_0, C_g$	Abkürzungen nach (6.26) bzw. (6.117)
$D, D'$	Gleichspannungsverlust
$D_N, D_\infty$	Gleichspannungsverlust beim Nennstrom, bzw. bei idealer Glättung
$E$	Effektivwert der Netzspannungen
$E, E', E^*$	Gleichspannung, innere Spannung einer Gleichstrommaschine
$E_{g0}$	Gleichspannung an der Lückgrenze bei ungesteuerten Ventilen
$E_{lück}$	Gleichspannung an der Grenze zwischen lückendem und nicht-lückendem Betrieb
$E_0$	Leerlaufspannung einer Gleichstrommaschine
$E_{I0}, E_{II0}$	Spannungen der Teilstromrichter I und II eines Umkehrstromrichters bei leerlaufender Gleichstrommaschine
$E_I, E_{II}$	Gleichspannungen der Teilstromrichter I und II eines Umkehrstromrichters
$E_{I0}, E_{II0}$	Leerlaufspannungen der Teilstromrichter I und II eines Umkehrstromrichters
$e_{L1}, e_{L2}, e_{L3}$	Leiterspannungen des idealen Netzes
$e_{N1}, e_{N2}, e_{N3}$	Sternspannungen eines idealen Netzes
$e_1, e_2, e_3$	allgemeine Bezeichnung für die Sternspannungen eines idealen Netzes oder eines regulären Dreiphasensystemes
$f$	Netzfrequenz oder Fehler
$G$	Abkürzung nach (6.120) oder Ordinatenhalbachse der Lückellipse (Abschn. 10)
$g$	Glättungsgrad des Laststromes $i_d$
$H$	Abkürzung nach (6.131) oder Abszissenhalbachse der Lückellipse
$H'$	Abszissenhalbachse der Lückellipse bei Berücksichtigung der Kommutierungsinduktivität (Abschn. 10)
$h_a$	magnetische Feldstärke außerhalb des Eisenkörpers
$h_{Fe}$	magnetische Feldstärke im Eisen
$h_{Fe1}, h_{Fe2}, h_{Fe3}$	magnetische Feldstärke in den Schenkeln eines Stromrichtertransformators

$h_1, h_2, h_3$	magnetische Feldstärke in den Schenkeln einer verketteten Dreischenkeldrossel
$I$	Effektivwert des stationären Stromes
$I_d$	Laststrommittelwert
$I_{dg}$	Grenzstrom
$I_{di}$	Laststrommittelwert bei Vollaussteuerung
$I_{dK}$	Kurzschlußstrom auf der Lastseite bei gesteuerten Ventilen
$I_{dK0}$	Kurzschlußstrom auf der Lastseite bei ungesteuerten Ventilen
$I_{dK\alpha}$	Kurzschlußstrom auf der Lastseite beim Steuerwinkel $\alpha$
$I_{d,\text{lück}}$	Laststrommittelwert an der Lückgrenze
$I_{d,mk}$	Grenzstrom beim Übergang zur Mehrfachkommutierung bei gesteuerten Ventilen
$I_{d,mk0}$	Grenzstrom beim Übergang zur Mehrfachkommutierung bei ungesteuerten Ventilen
$I_{dN}$	Nenngleichstrom
$I_{d0}$	Laststrommittelwert bei Betrieb mit ungesteuerten Ventilen oder bei unwirksamer Steuerung
$I_{dI}, I_{dII}$	Laststrommittelwerte der beiden Teilstromrichter eines Umkehrstromrichters, oder Mittelwert des Grenzstromes zwischen den Arbeitsbereichen I/II, und II/III der Sechspulsbrücke
$I_{e\alpha}$	Effektivwert des Laststromes beim Steuerwinkel $\alpha$ (Gegenparallelschaltung)
$I_{kr}, I'_{kr}$	Mittelwert des Kreisstromes beim Leerlauf eines Umkehrstromrichters ohne bzw. bei Berücksichtigung der Kommutierungsinduktivität
$I_{krit}$	kritischer Laststrom der Saugdrosselschaltung
$I_L$	Effektivwert des netzseitigen Leiterstromes
$I_1$	Effektivwert des ventiltseitigen Leiterstromes
$I_n$	Mittelwert des Freilaufventilstromes
$I_{n,max}$	Höchstwert des Mittelwertes des Freilaufventilstromes
$I_P$	Effektivwert des netzseitigen Strangstromes bei beliebiger Transformatorschaltung
$I_p$	Effektivwert des ventiltseitigen Strangstromes bei beliebiger Transformatorschaltung
$I_v$	Mittelwert des Ventilstromes
$I_{v,eff}$	Effektivwert des Ventilstromes
$I_W$	Effektivwert des netzseitigen Strangstromes bei Dreieckschaltung
$I_w$	Effektivwert des ventiltseitigen Strangstromes bei Dreieckschaltung
$I_0$	Anteil des Kreisstromes $I'_{kr}$ nach (11.43)
$I_{00}$	Momentanwert des Laststromes $i_d$ im Zündzeitpunkt $x_\alpha$ (Abb. 10.7)
$I_1, I_2$	Effektivwert des stationären Stromes
$I_1, I_2, I_3$	Gleichkomponenten der Strangströme $i_{p1}, i_{p2}, i_{p3}$ des Transformators (Anhang 6)
$i', i''$	Augenblickswerte des Ventilstromes an den Grenzen zwischen einfacher und mehrfacher Kommutierung
$i_d, i'_d$	Laststrom
$i_{d0}$	Laststrom bei Betrieb mit ungesteuerten Ventilen oder bei unwirksamer Steuerung
$i_{dI}, i_{dII}$	Laststrom $i_d$ außerhalb bzw. während des Kommutierungsintervalles ohne Gleichspannung im Lastkreis. In Abschn. 11: Lastströme der beiden Teilstromrichter eines Umkehrstromrichters
$i'_{dI}, i'_{dII}$	wie $i_{dI}, i_{dII}$ jedoch mit einer Gleichspannung im Lastkreis

$i_f$	Differenz der Augenblickswerte zweier zeitlich aufeinanderfolgender Ventilströme
$i_{II}, i'_{II}$	Augenblickswerte von $i_f$ außerhalb bzw. während des Kommutierungsintervalles (keine Gleichspannung im Lastkreis)
$i''_{II}, i'_{II}$	wie $i_{II}, i'_{II}$ jedoch mit einer Gleichspannung im Lastkreis
$i_{kR}, i'_{kR}$	Kreisstrom beim Leerlauf eines Umkehrstromrichters ohne bzw. bei Berücksichtigung der Kommutierungsinduktivität
$i'_{kR}, i''_{kR}$	Kreisstrom in den Teilintervallen nach Abb. 11.10
$i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}$	netzseitige Leiterströme
$i_1, i_{11}, i_{12}, i_{13}$	ventilseitige Leiterströme der Brückenschaltungen oder netzseitiger Leiterstrom der zweipulsigen Mittelpunktschaltung
$i_n$	Strom durch das Freilaufventil
$i_P, i_{P1}, i_{P2}, i_{P3}$	netzseitige Strangströme bei beliebiger Transformatorschaltung (Abb. 12.3)
$i_{p1}, i_{p2}, i_{p3}$	ventilseitige Strangströme bei beliebiger Transformatorschaltung (Abb. 12.3)
$i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}$	Ventilströme
$i_{s3}, \dots, i_{sp}$	
$i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}$	Bezeichnung der Ventilströme in den Abschn. 12 bis 14
$i'_{s1}, i'_{s2}, i'_{s3}$	
$i_w$	überlagerte Wechselkomponenten des Gleichstromes
$i_{W1}, i_{W2}, i_{W3}$	netzseitige Strangströme bei Dreieckschaltung
$i'_{W1}, i'_{W2}, i'_{W3}$	ventilseitige Strangströme bei Dreieckschaltung
$i_1, i_2, i_3$	Wicklungsströme einer verketteten Dreischenkeldrossel
$i'_1, i'_2, i'_3$	
$i_I, i_{II}, i_{III}$	Sternpunktströme (Summe der Wicklungsströme in Abschn. 12 bis 14)
$i_\sigma$	Saugdrosselstrom
$i_{\sigma, \max}$	Höchstwert des Saugdrosselstromes
$J_c$	Scheitelwert des stationären einpoligen Transformator-Kurzschlußstromes auf der Ventilseite
$J_{cc}$	Scheitelwert des stationären zweipoligen Transformator-Kurzschlußstromes auf der Ventilseite
$J_n$	Effektivwert des Stromes den die Spannung $U_n$ in der Reihenschaltung R und L hervorruft
$J_0$	Effektivwert des Stromes den die Spannung $U_n$ in einem ohmschen Widerstand R hervorruft
$j_1, j_2$	Abkürzungen nach (12.50)
$K$	Konstante oder Abkürzung (6.137)
$k_1, k_2$	Faktoren in (10.1)
$L, L'$	Induktivität im Lastkreis (Glättungsinduktivität)
$L'$	fiktive Induktivität nach (12.68)
$L_a$	Ankerkreisinduktivität
$L_c$	Kommutierungsinduktivität
$L_h$	Induktivität einer Zweischenkeldrossel (12.44)
$L_j$	Joehinduktivität; fiktive Größe zur Darstellung der Ersatzschaltpläne des Stromrichtertransformators (12.21)
$L_K$	Kurzschlußinduktivität
$L_k$	Induktivität einer Dreischenkeldrossel (12.32)
$L_n$	Netzinduktivität
$L_p, L_p'$	netzseitige Streuinduktivität des Transformators

$L_s, L_s'$	ventilseitige Streuinduktivität des Transformators
$L_\sigma$	Saugdrosselinduktivität
$l(x, y)$	Länge einer Feldlinie
$l_h$	Eisenlänge des Kernes einer Zweischenkeldrossel
$l_k$	mittlere Eisenlänge des Schenkels einer Dreischenkeldrossel
$M$	Drehmoment
$N$	Windungszahl
$N_h$	Windungszahl eines Wicklungsstranges einer Zweischenkeldrossel
$N_k$	Windungszahl des Wicklungsstranges einer Dreischenkeldrossel
$N_1, N_2$	Windungszahl eines netzseitigen bzw. ventilseitigen Transformatorstranges
$N_\sigma$	Windungszahl eines Saugdrosselstranges
$n$	Drehzahl
$P_d$	Leistung der Gleichkomponenten von Strom und Spannung (9.1)
$P_{di}$	Wert von $P_d$ bei Vollaussteuerung und ideal geglättetem Nennstrom
$P_{dw}$	gesamte Wirkleistung auf der Gleichstromseite
$P_{LN}$	Summe der Scheinleistungen der netzseitigen Wicklungen
$P_{LV}$	Summe der Scheinleistungen der ventilseitigen Wicklungen
$P_{mech}$	mechanische Leistung
$P_T$	Transformatorbauleistung
$P_w$	Anteil von $P_{dw}$ der von den Gleichstromoberwellen und Gleichspannungsoberwellen hervorgerufen wird
$p$	Pulszahl
$Q$	Anzahl der netzseitigen Stränge
$q$	Anzahl der ventilseitigen Stränge oder Eisenquerschnitt eines Schenkels
$q$	Erhöhung der Gleichspannung einer Saugdrosselschaltung bei Betrieb im kritischen Bereich
$q_h$	Eisenquerschnitt des Kernes einer Zweischenkeldrossel
$q_k$	Eisenquerschnitt des Kernes einer Dreischenkeldrossel
$R, R', R^*$	Lastwiderstand
$R_F$	Durchlaßwiderstand eines Ventiles
$R_a$	Ankerkreiswiderstand
$s_g$	Steuersignal
$T$	Schwingungsdauer
$t$	Zeit
$U_{di}$	ideeller Lastspannungsmittelwert bei Vollaussteuerung
$U_{dia}$	ideeller Lastspannungsmittelwert beim Steuerwinkel $\alpha$
$U_{diaI}, U_{diaII}$	ideelle Lastspannungsmittelwerte der Teilstromrichter I und II eines Umkehrstromrichters
$U_{di\sigma}$	ideeller Gleichspannungsmittelwert der Saugdrosselschaltung bei Vollaussteuerung und voll wirksamer Saugdrossel
$U_{d,lück}$	Lastspannungsmittelwert an der Lückgrenze
$U_{d\alpha}$	Lastspannungsmittelwert beim Steuerwinkel $\alpha$ und bei Berücksichtigung der Spannungsverluste an den Kommutierungsinduktivitäten
$U_{d\alpha g}$	Grenzspannung

$U_{daI}, U_{daII}$	Gleichspannungsmittelwerte der Teilstromrichter I und II eines Umkehrstromrichters bei Berücksichtigung der Kommutierungsinduktivitäten
$U_{do}$	ideeller Gleichspannungsmittelwert der Saugdrosselschaltung beim Betrieb im kritischen Bereich
$U_{dI}, U_{dII}$	Mittelwerte der Grenzgleichspannung zwischen den Arbeitsbereichen I/II und II/III der Sechspulsbrücke
$U_{e\alpha}$	Effektivwert der Lastspannung beim Steuerwinkel $\alpha$ (Gegenparallelschaltung)
$U_{kr}$	Mittelwert der Kreisspannung
$U_1$	Effektivwert der ventiltseitigen Leiterspannung
$U_{ma}$	Halbwellenmittelwert der Lastspannung beim Steuerwinkel $\alpha$ (Gegenparallelschaltung)
$U_n$	Effektivwert der n-ten Oberschwingung der Gleichspannung
$U_p$	Effektivwert der netzseitigen und ventiltseitigen Wicklungsspannung beim Übersetzungsverhältnis 1
$U_S$	Effektivwert der netzseitigen Sternspannung (Strangspannung) des Transformators
$U_s$	Effektivwert der ventiltseitigen Sternspannung (Strangspannung) des Transformators
$U_v$	Mittelwert der Ventilspannung
$u, u', u^*, \bar{u}$	Kommutierungsintervall
$u_c, u_{c1}$	Spannungen an den Kommutierungsinduktivitäten
$u_{c2}, \dots, u_{cp}$	
$u_{c1}, u_{c2}, u_{c3}$	Spannungen an den Kommutierungsinduktivitäten in den Abschn. 12 bis 14
$u'_{c1}, u'_{c2}, u'_{c3}$	
$u_{c1I}, u_{c1II}$	Spannung an der Kommutierungsinduktivität 1 außerhalb, bzw. während der Kommutierung (Abschn. 3)
$u_d, u'_d$	Momentanwerte der Lastspannung
$u_{dyn}$	Kommutierungsintervall beim Wechselrichterkippen
$u_{dI}, u_{dII}$	Lastspannungen der beiden Kommutierungsgruppen der Saugdrosselschaltung (Abschn. 7), oder ideale Lastspannungen der beiden Teilstromrichter I und II eines Umkehrstromrichters (Abschn. 11)
$u_{dI}, u_{dII}$	Lastspannung außerhalb bzw. während der Kommutierung (Abschn. 3)
$u_{daI}, u_{daII}$	Gleichspannungen der Teilstromrichter I und II eines Umkehrstromrichters bei vorgegebenem Steuerwinkel $\alpha_1$ des Stromrichters I vom Jochfluß induzierte Spannung (Jochspannung)
$u_j$	Kommutierungsintervall im Kurzschlußfall
$u_K$	Kommutierungswinkel bei Doppelkommutierung im Kurzschlußfall
$u_K'$	Spannung zwischen Kathodenstern und ventiltseitigem Transformatorsternpunkt (Abb. 8.1)
$u_{km}$	
$u_{kr}, u'_{kr}$	Kreisspannung ohne bzw. mit Kommutierungsinduktivitäten
$u_L, u'_L$	Spannung an der Lastinduktivität
$u_{L1}, u_{L2}, u_{L3}$	netzseitige Leiterspannungen des realen Netzes (allgemein)
$u_{L,dr}, u_{L1,dr}$	netzseitige Leiterspannung bei netzseitigem Dreieck des Transformators (Abschn. 14)
$u_{L,st}, u_{L1,st}$	netzseitige Leiterspannung bei netzseitigem Stern des Transformators (Abschn. 14)
$u_1, u_{11}, u_{12}$	ventiltseitige Leiterspannungen der Brückenschaltungen
$u_{13}$	
$u'_{11}, u'_{12}, u'_{13}$	

$u_{mA}$	Spannung zwischen Transformatorsternpunkt und Anodensternpunkt
$u_{mk}$	Kommutierungsintervall beim Übergang von einfacher zu mehrfacher Kommutierung
$u_{mk0}$	wie $u_{mk}$ jedoch bei ungesteuerten Ventilen
$u_{II}$	Kommutierungsintervall bei Nullaussteuerung
$u_p, u_{p1}, u_{p2},$ $u_{p3}$	netzseitige Strangspannungen bei beliebiger Transformator-schaltung (Abb. 12.3)
$u_p, u_{p1}, u_{p2},$ $u_{p3}$	ventilseitige Strangspannungen bei beliebiger Transformator-schaltung (Abb. 12.3)
$u'_{p1}, u'_{p2}, u'_{p3}$	
$u_R$	Spannung am ohmschen Lastwiderstand
$u_S, u_{S1}, u_{S2},$ $u_{S3}$	netzseitige Sternspannungen des realen Netzes
$u_{S,dr}, u_{S1,dr}$	netzseitige Strangspannung bei netzseitigem Dreieck des Trans-formators (Abschn. 14)
$u_{S,st}, u_{S1,st}$	netzseitige Strangspannung bei netzseitigem Stern des Transfor-mators (Abschn. 14)
$u_s, u_{s1},$ $u_{s2}, \dots, u_{sp}$	ventilseitige Sternspannungen (Strangspannungen)
$u_{s1}, u_{s2}, u_{s3}$ $u'_{s1}, u'_{s2}, u'_{s3}$	Bezeichnung der ventilseitigen Strangspannungen in den Abschn. 12 bis 14
$u_{v1}, u_{v2}, \dots, u_{vp}$	Ventilspannungen
$u_v, u'_v$	
$u_w$	überlagerte Wechselkomponente der Gleichspannung
$u_0$	Kommutierungsintervall bei Vollaussteuerung
$u_1, u_2, u_3$ $u'_1, u'_2, u'_3$	Strangspannungen einer verketteten Dreischenkeldrossel
$\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots$ $\bar{u}'_1, \bar{u}'_2, \dots$	Kommutierungsintervalle in Abschn. 14
$u_\sigma, u'_\sigma$	Saugdrosselspannung ohne (Abschn. 7) bzw. mit (Abschn. 13) Be-rücksichtigung des Jochflusses
$u_{\sigma I}, u_{\sigma II},$ $u_{\sigma III}$	Saugdrosselspannungen bei der zwölpulsigen Saugdrosselschaltung
$x$	relative Zeitkoordinate
$x_e$	Löschzeitpunkt
$x_k$	Ende des Kommutierungsintervalls bei Mehrfachkommutierung (ungesteuerte Ventile)
$x_n$	Zündzeitpunkt bei Nullaussteuerung
$x_{II}$	Ende des Kommutierungsintervalles $u$
$x_{II0}$	wie $x_{II}$ jedoch bei ungesteuerten Ventilen
$x_0, x'_0$	natürlicher Zündzeitpunkt ohne bzw. mit einer Gleichspannung im Lastkreis
$x_{01}, x_{02}$	natürliche Zündzeitpunkte der Ventile $V_1, V_2$
$x_\alpha, x'_\alpha$	Zündzeitpunkt beim Steuerwinkel $\alpha$ bzw. bei spontaner Zündver-zögerung (Abschn. 8.62)
$x_{\alpha g}$	Zeitpunkt am Ende des Grenzsteuerwinkels $\alpha_g$
$x_{\alpha n}$	Zeitpunkt am Ende des Steuerwinkels bei Nullaussteuerung
$x_{\alpha 1}, x_{\alpha 2}, \dots$ $x'_{\alpha 1}, x'_{\alpha 2}, \dots$	Zündzeitpunkte der Ventile $V_1, V_2$ wie $x_{\alpha 1}, x_{\alpha 2}$ jedoch bei spontaner Zündverzögerung
$Z_g$	Zündwert

$\Delta$	Abweichung der Steuerwinkelsumme der beiden Teilstromrichter eines Umkehrstromrichters vom Wert $\pi$
$\Delta_g$	wie $\Delta$ ; die Abweichung ist so, daß ein stetiger Übergang der Belastungskennlinien im Leerlaufpunkt gegeben ist
$\Delta H$	Verkürzung der Abszissenhalbachse der Lückellipse bei Berücksichtigung der Kommutierungsinduktivität
$\Theta_j$	magnetische Jochspannung (Restamperewindungen)
$\Theta_\sigma$	Durchflutung des Saugdrosselkernes
$\Lambda_h$	magnetische Leitfähigkeit des Eisenkernes einer Zweischenkeldrossel
$\Lambda_j$	magnetische Leitfähigkeit des vom Jochfluß durchflossenen Außenraumes
$\Lambda_k$	magnetische Leitfähigkeit des Eisenkernes einer Dreischenkeldrossel
$\Lambda_1$	Streuleitfähigkeit eines netzseitigen Transformatorstranges
$\Lambda_2$	Streuleitfähigkeit eines ventilsseitigen Transformatorstranges
$\Lambda_\sigma$	magnetische Leitfähigkeit des Eisenkernes einer Saugdrossel
$\Phi$	Faktor nach (6.137)
$\Psi$	Überlappungsfunktion (6.153)
$\alpha$	Steuerwinkel allgemein
$\alpha'$	Steuerwinkel bei unwirksamer Steuerung (Abschn. 10.21)
$\alpha_g$	Grenzsteuerwinkel beim Übergang vom lückenden zum nichtlückenden Betrieb
$\alpha_m$	Steuerwinkel beim Höchstwert des Freilaufventilstromes
$\alpha_n$	Steuerwinkel bei Nullaussteuerung
$\alpha_0'$	wie $\alpha'$ jedoch bei Betrieb mit ungesteuerten Ventilen (Abschn. 10.21)
$\alpha_I, \alpha_{II}$	Steuerwinkel des Teilstromrichters I bzw. II eines Umkehrstromrichters
$\beta$	Faktor nach (7.16)
$\beta$	Steuerwinkel bei Wechselrichteraussteuerung
$\gamma$	Zeitintervall
$\gamma$	Verhältnis der ventilsseitigen zur netzseitigen Scheinleistung der Transformatorwicklungen
$\delta$	Schaltungswinkel
$\delta$	Schonzeit
$\delta_1, \delta_2$	Spannungsdifferenzen nach (11.52)
$\lambda, \lambda_h, \lambda_j, \lambda_k, \lambda_n$	Faktoren (Abschn. 12, 14)
$\mu$	Permeabilität des Eisens allg.
$\mu_h$	Permeabilität des Eisenkernes einer Zweischenkeldrossel
$\mu_k$	Permeabilität des Eisenkernes einer Dreischenkeldrossel
$\mu_0$	Permeabilität der Luft
$\varrho$	Lastparameter
$\varrho_1$	Lastparameter bei Berücksichtigung der Kommutierungsinduktivitäten
$\varrho_2$	wie $\varrho_1$ , bei unvollkommener Glättung

$\tau_F$	Durchlaßzeit eines Ventils
$\tau_{F0}$	wie $\tau_F$ , bei ungesteuerten Ventilen bzw. bei unwirksamer Steuerung
$\tau_n$	Durchlaßzeit eines Freilaufventiles
$\tau_S$	Sperrzeit eines Ventiles
$\tau_{S0}$	wie $\tau_S$ , bei ungesteuerten Ventilen bzw. bei unwirksamer Steuerung
$\tau_1, \tau_2$	Zeitintervalle
$\varphi$	Phasenwinkel des stationären Stromes
$\varphi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	magnetische Schenkelflüsse eines Transformator-kerns
$\varphi_j$	magnetischer Jochfluß eines Transformator-kerns
$\varphi_1$	Phasenwinkel des stationären Stromes bei Berücksichtigung der Kommutierungsinduktivitäten
$\varphi_2$	wie $\varphi_1$ , bei unvollkommener Glättung
$\varphi_{10}, \varphi_{20}, \varphi_{30}$	magnetische Teilflüsse (Abschn. 12)
$\varphi_\sigma$	magnetischer Fluß im Saugdrosselkern
$\omega$	Kreisfrequenz

## Inhaltsverzeichnis

Größenverzeichnis . . . . .	XV
<b>I Einführung . . . . .</b>	<b>1</b>
1 Elektrische Ventile . . . . .	2
2 Bezeichnungen und Grundregeln . . . . .	9
<b>II Netzgeführter Stromrichterbetrieb . . . . .</b>	<b>16</b>
3 Zweipulsige Mittelpunktschaltung . . . . .	17
3.1 Wirkungsweise der zweipulsigen Mittelpunktschaltung . . . . .	17
3.11 Stromführung der Ventile . . . . .	18
3.12 Ohmsche Last ( $L = 0$ ) . . . . .	19
3.13 Ideale Glättung ( $L = \infty$ ) . . . . .	21
3.14 Lückender Betrieb bei ohmsch-induktiver Last . . . . .	21
3.15 Nichtlückender Betrieb bei ohmsch-induktiver Last . . . . .	25
3.16 Betrieb an der Lückgrenze . . . . .	28
3.17 Steuerkennlinien . . . . .	28
3.18 Belastungskennlinie . . . . .	32
3.2 Wirkung der Kommutierungsinduktivitäten bei idealer Glättung . . . . .	34
3.21 Einfluß der Kommutierungsinduktivitäten auf den Zeitverlauf der Ströme . . . . .	35
3.22 Belastungskennlinien und Steuerkennlinie mit Kommutierungsinduktivitäten . . . . .	40
3.3 Reduktion der Streureaktanzen . . . . .	42
3.4 Einfluß der Kommutierungsinduktivität bei unvollkommener Glättung . . . . .	44
3.41 Lückender Betrieb bei unvollkommener Glättung . . . . .	44
3.42 Nichtlückender Betrieb bei unvollkommener Glättung . . . . .	45
3.43 Diskussion des Zeitverlaufes der Ströme und Spannungen . . . . .	48
3.44 Belastungskennlinien . . . . .	49
4 Zweipulsige Mittelpunktschaltung mit Freilaufventil . . . . .	56
4.1 Wirkungsweise des Freilaufventiles . . . . .	56
4.2 Zeitlicher Verlauf der Ströme . . . . .	57
4.3 Steuerkennlinie . . . . .	59
4.4 Strommittelwerte . . . . .	61
4.5 Einfluß der Kommutierungsinduktivitäten bei idealer Glättung . . . . .	65
4.51 Zwei Kommutierungsintervalle pro Halbwelle ( $\alpha \geq u_0$ ) . . . . .	66
4.52 Ein Kommutierungsintervall pro Halbwelle ( $\alpha \leq u_0$ ) . . . . .	68
4.53 Belastungskennlinien . . . . .	70

5	Einphasiger Wechselstromsteller . . . . .	72
5.1	Wirkungsweise des einphasigen Wechselstromstellers . . . . .	72
5.2	Steuerkennlinien . . . . .	76
6	Mittelpunktschaltungen mit der Pulszahl $p$ . . . . .	81
6.1	Wirkungsweise der Mittelpunktschaltungen mit der Pulszahl $p$ . . . . .	82
6.11	Zündzeitpunkt und Schaltungswinkel . . . . .	82
6.12	Ohmsche Last . . . . .	85
6.13	Ideale Glättung . . . . .	89
6.14	Ohmsch-induktive Last . . . . .	89
6.2	Steuerkennlinien und Belastungskennlinien . . . . .	95
6.21	Steuerkennlinien bei verschiedener Belastung . . . . .	95
6.22	Belastungskennlinien . . . . .	97
6.3	Einfluß der Kommutierungsinduktivitäten bei idealer Glättung . . . . .	102
6.31	Einfache Kommutierung . . . . .	102
6.32	Belastungskennlinien bei einfacher Kommutierung . . . . .	107
6.33	Grenze zwischen einfacher und mehrfacher Kommutierung . . . . .	109
6.34	Ströme und Spannungen bei mehrfacher Kommutierung und idealer Glättung . . . . .	112
6.35	Vollständige Belastungskennlinie der dreipulsigen Mittelpunktschaltung mit gesteuerten Ventilen bei Vollaussteuerung . . . . .	113
6.36	Vollständige Belastungskennlinie der dreipulsigen Mittelpunktschaltung mit ungesteuerten Ventilen . . . . .	118
6.4	Einfluß der Kommutierungsinduktivitäten bei unvollkommener Glättung . . . . .	125
6.41	Zeitverlauf der Ströme im lückenden Betrieb bei unvollkommener Glättung . . . . .	125
6.42	Zeitverlauf der Ströme im nichtlückenden Betrieb bei unvollkommener Glättung . . . . .	126
6.43	Belastungskennlinien im Bereich einfacher Kommutierung bei unvollkommener Glättung . . . . .	130
6.44	Näherungsweise Berechnung der Belastungskennlinien im Bereich einfacher Kommutierung bei unvollkommener Glättung und nichtlückendem Betrieb . . . . .	132
6.45	Vollständige Belastungskennlinien bei unvollkommener Glättung . . . . .	134
6.5	Ventilströme . . . . .	138
6.51	Mittelwert . . . . .	138
6.52	Effektivwert . . . . .	138
7	Saugdrosselschaltungen . . . . .	141
7.1	Zeitverlauf der Ströme und Spannungen bei Vollaussteuerung . . . . .	142
7.11	Parallelarbeit dreipulsiger Stromrichter . . . . .	142
7.12	Saugdrosselspannung und Gleichspannung . . . . .	144
7.13	Saugdrosselstrom und Sternpunktströme . . . . .	145
7.14	Ventilströme . . . . .	147
7.2	Betrieb im kritischen Bereich . . . . .	149
7.21	Saugdrosselspitze . . . . .	149
7.22	Ungesteuerter Betrieb im kritischen Bereich . . . . .	152
7.23	Kennlinienverlauf im kritischen Bereich . . . . .	155
7.3	Einfluß der Kommutierungsinduktivitäten (Belastungskennlinien) . . . . .	157
7.4	Höherpulsige Saugdrosselschaltungen . . . . .	159

8	Brückenschaltungen	162
8.1	Gemeinsame Eigenschaften der Brückenschaltungen	163
8.2	Vollgesteuerte Zweipulsbrücke	163
8.3	Halbgesteuerte Zweipulsbrücke mit einem ungesteuerten Brücken- zweig	172
8.4	Halbgesteuerte Zweipulsbrücke mit einem ungesteuerten Ventil- stern	175
8.5	Vollgesteuerte Sechspulsbrücke	177
8.51	Betrieb bei ohmscher Last	178
8.52	Betrieb bei ohmsch-induktiver Last	182
8.6	Einfluß der Kommutierungsinduktivitäten bei der Sechspuls- brücke (ideale Glättung)	186
8.61	Vorgänge im ersten Arbeitsbereich (einfache Kommutierung)	186
8.62	Vorgänge im zweiten Arbeitsbereich (spontane Zündver- zögerung)	192
8.63	Vorgänge im dritten Arbeitsbereich (doppelte Kommutie- rung)	196
8.7	Halbgesteuerte Sechspulsbrücke mit einem ungesteuerten Ventil- stern	203
8.71	Steuerbereich $0 \leq \alpha \leq \pi/3$	203
8.72	Steuerbereich $\pi/3 \leq \alpha \leq \pi$ (Freilaufwirkung)	207
8.73	Steuerkennlinien	210
8.8	Erhöhung der Pulszahl durch Kombination mehrerer Brücken- schaltungen	210
9	Wechselrichterbetrieb	214
9.1	Allgemeine Aussagen zum Wechselrichterbetrieb	214
9.11	Voraussetzungen für den Wechselrichterbetrieb	215
9.12	Vereinfachungen	217
9.2	Schaltungsreduktion bei idealer Glättung	218
9.3	Wechselrichterbetrieb bei idealer Glättung und ohne Kommu- tierungsinduktivitäten	220
9.31	Steuerkennlinien und Symmetrie-Eigenschaften des Wechsel- richterbetriebes	220
9.32	Wechselrichtertrittgrenze ohne Kommutierungsinduktivi- täten	223
9.33	Gleichstromverlauf beim Wechselrichterkippen ohne Be- rücksichtigung der Kommutierungsinduktivitäten	224
9.4	Wechselrichterbetrieb der p-pulsigen Mittelpunktschaltung mit Kommutierungsinduktivitäten bei idealer Glättung	227
9.41	Zeitverlauf der Ströme und Verlauf der Belastungskenn- linien im Wechselrichterbetrieb bei einfacher Kommutierung	227
9.42	Einfluß der Kommutierungsinduktivitäten auf die Wechsel- richtertrittgrenze	230
9.43	Grenze zwischen einfacher und mehrfacher Kommutierung	231
9.44	Vollständige Belastungskennlinien der dreipulsigen Mittel- punktschaltung	234
9.5	Wechselrichterbetrieb der sechspulsigen Brückenschaltung mit Kommutierungsinduktivitäten bei idealer Glättung	241
9.6	Einfluß der realen Ventileigenschaften auf die Wechselrichter- trittgrenze	248