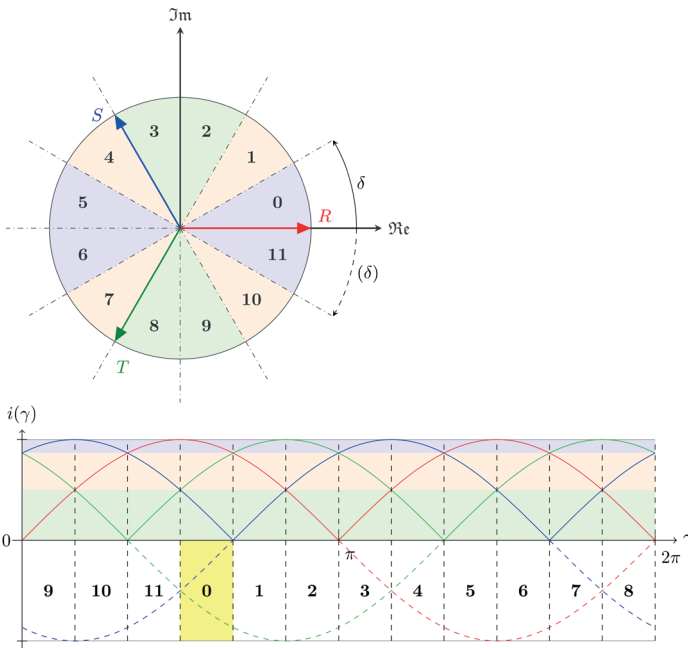


Yeqi Wang

# Hochdynamische Regelung der Zweigenenergien von Modularen Multilevel Umrichtern



UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

# Hochdynamische Regelung der Zweigenergien von Modularen Multilevel Umrichtern

Yeqi Wang

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und  
Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung  
des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs  
(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt
2. Prof. Dr. rer. nat. habil. Claus Hillermeier

Die Dissertation wurde am 15.09.2020 bei der Universität der  
Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik  
und Informationstechnik am 09.03.2021 angenommen.  
Die mündliche Prüfung fand am 26.03.2021 statt.



Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 15

**Yeqi Wang**

**Hochdynamische Regelung der Zweigenergien  
von Modularen Multilevel Umrichtern**

Shaker Verlag  
Düren 2021

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8370-5

ISSN 1867-5700

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2011 bis 2019 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Leistungselektronik und Steuerungen an der Fakultät der Elektro- und Informationstechnik an der Universität der Bundeswehr München.

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt, für die Betreuung dieser Dissertation bedanken. Seine zukunftsweisende und innovative Sicht im Bereich der Leistungselektronik, gepaart mit seinem Erfahrungsschatz der gesamten Elektrotechnik, haben das Forschungsthema und somit auch diese Arbeit erst ermöglicht. In fortwährenden und konstruktiven Gesprächen vermittelte er mir den wichtigen Grundgedanken, dass viele Probleme auf einfache und verständliche Art gelöst werden können. Nur dadurch ergibt sich die Möglichkeit bestehende Konzepte kritisch zu hinterfragen, mittels einfacher Lösungsansätze weiterzuentwickeln und sich nie mit dem Status quo zufriedenzugeben.

Ein großer Dank gilt auch meinem Korreferenten Herrn Prof. Dr. rer. nat. Claus Hillermeier für das Interesse an meiner Arbeit, am Thema der Hochspannungs-Gleichstromübertragung und der Begutachtung meiner Dissertation. Ebenso bedanke ich mich beim Vorsitzenden der Prüfungskommission Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Brückner für die Organisation und die Moderation der Prüfung.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen KollegInnen, externen Mitarbeitern und Kooperationspartnern des Instituts, mit denen ich sehr konstruktiv zusammenarbeiten durfte. Insbesondere Herrn Christopher Dahmen danke ich für die Unterstützung auch abseits der fachlichen Zusammenarbeit. Mein Dank gilt auch allen Bachelor- bzw. Masterstudenten, deren Abschlussarbeiten maßgeblich zu den Forschungsergebnissen geführt haben.

Ein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Daniel Schmitt, der mir mit seiner fachlichen Expertise und menschlichen Kompetenz immer wieder mit Rat und Tat zur Seite stand und mich fortwährend ermutigt hat. Der Dank gilt ebenso seiner gesamten Familie, die mich immer als Teil ihrer betrachtet haben.

Ein sehr großer Dank gilt insbesondere meinen Eltern und meiner Familie, die mich sowohl bereits bei der Wahl des Studiengangs, als auch bei meinen nachfolgenden Entscheidungen immer ermutigt und unterstützt haben. Insbesondere meinem Vater, Dr.-Ing Yongfan Wang, danke ich für den frühzeitigen Einblick in die Welt der Leistungselektronik. Leider hat er den Abschluss dieser Arbeit nicht mehr miterleben können.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modularer Multilevel Umrichter</b>	<b>3</b>
2.1	Grundlagen	4
2.2	Messbare Größen	10
2.3	Submodultopologien	12
2.4	Normierung	15
<b>3</b>	<b>ABC-System</b>	<b>17</b>
3.1	Grundlagen	17
3.2	Auswirkung der Phasenverschiebung $\varphi$	21
3.3	Ermittlung der Sektorvariablen	24
3.4	Multiplexer	25
<b>4</b>	<b>Symmetrierung der Zweigenenergien</b>	<b>27</b>
4.1	Zweigenenergie	27
4.2	Definition der Betriebsbereiche	34
4.3	Gleichstrombetrieb (Bereich I)	37
4.4	NF-Betrieb (Bereich II)	56
4.5	HF-Betrieb (Bereich III)	67
4.6	Reglerauslegung	79
4.7	Dynamisches Verhalten	86
<b>5</b>	<b>Gesamtsystem</b>	<b>89</b>
5.1	Zweigstromregelung	91
5.2	Online Erfassung	95
5.3	Regelung der Gesamtenergie des Umrichters	100
5.4	Regelung der DC-Seite	101
5.5	Regelung der AC-Seite	102
5.6	Simulationsergebnisse	103
<b>6</b>	<b>Gleichstromleistungsschalter (DC-Breaker)</b>	<b>115</b>
6.1	Grundlagen	116
6.2	Topologien	117
6.3	Mechanischer Schalter	127
6.4	DC-Breaker auf Thyristorbasis	131
6.5	Auslegung eines DC-Breaker Moduls	139



6.6	Messaufbau . . . . .	149
6.7	Schwingkreisauswirkungen . . . . .	153
6.8	Weiterentwicklung . . . . .	155
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>157</b>
<b>Anhang</b>		<b>159</b>
A.1	Approximation des Trapezfehlers . . . . .	159
A.2	Betreute Arbeiten . . . . .	162
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>163</b>

# Symbolverzeichnis

$a$	Aussteuergrad
$b$	Normierter Gleichspannungsaussteuergrad
$C$	Kondensator
$d$	Durchmesser
$\varepsilon$	Skalierungsfaktor Strom, Spannungstoleranz
$E$	Normierte Energie
$\bar{E}_x$	Summe der Kurzzeitmittelwerte der AC-seitigen Phasenleistung
$E_{q,x}$	Normierte Zweigenergie
$E_{q,x,p}$	Normierte Zweigenergie eines positiven Umrichterzweiges
$E_{q,x,n}$	Normierte Zweigenergie eines negativen Umrichterzweiges
$E_{\Delta q,x}$	Normierte Differenz der Zweigenergien einer Phase
$E_{\Sigma q,x}$	Normierte Summe der Zweigenergien einer Phase
$E_{\Sigma \Delta q}$	Normierte Summe aller Differenzzweigenergien
$E_{\Sigma \Sigma q}$	Normierte Summe aller Zweigenergien
$\hat{E}_x$	Normierte, maximal auftretende Zweigenergie
$E_{q,f}$	Normierter Fehler der Zweigenergie
$f$	Frequenz
$\mathfrak{f}$	Fehler
$f_A$	Abtastfrequenz
$f_{cm}$	Gleichtaktfrequenz
$f_M$	Messfrequenz
$f_N$	Netzfrequenz
$f_{N,max}$	Maximale, AC-seitige Netzfrequenz
$f_S$	Schaltfrequenz
$F_x(s)$	Übertragungsfunktion im Laplace-Bereich
$\gamma$	Normierte Raumzeigerposition
$h$	Teilungsfaktor
$i$	Zählindex ( $i = 1, 2, 3, \dots$ )
$I, i$	Strom
$I_d$	DC-seitiger Strom
$i_{kr}$	Kreisstrom
$i_{q,x}$	Zweigstrom
$i_{q,x,p}$	Zweigstrom eines positiven Umrichterzweiges
$i_{q,x,n}$	Zweigstrom eines negativen Umrichterzweiges
$i_w$	AC-seitiger Phasenstrom
$j$	Zählindex ( $j = 1, 2, 3, \dots$ )
$\kappa$	Spannungsteilheit
$k$	Normierte Spannung
$K$	Reglerverstärkung
$k_{cm}$	Normierte, resultierende Gleichtaktspannung

$k_{3f}$	Normierte 3. Harmonische der Gleichtaktspannung
$\bar{k}_{cm}$	Normierte, konstante Komponente der Gleichtaktspannung
$\tilde{k}_{cm}$	Normierte Wechselkomponente der Gleichtaktspannung
$\bar{k}_x$	Summe der Kurzzeitmittelwerte der AC-seitigen Phasenspannung
$\Delta\bar{k}_x$	Differenz der Kurzzeitmittelwerte der AC-seitigen Phasenspannung
$\lambda$	Skalierungsfaktor Spannung
$L$	Drossel, Induktivität, Länge
$L_A$	Zweiginduktivität
$\nu$	Anzahl Abtastungen pro Gleichtaktperiode
$m$	Normierter Strom
<b>M</b>	Matrix
$m_{kr}$	Normierter, resultierender Kreisstrom
$\bar{m}_{kr}$	Normierte, konstante Komponente des Kreisstroms
$\tilde{m}_{kr}$	Normierte Wechselkomponente des Kreisstroms
$\bar{m}_x$	Summe der Kurzzeitmittelwerte des AC-seitigen Phasenstroms
$\Delta\bar{m}_x$	Differenz der Kurzzeitmittelwerte des AC-seitigen Phasenstroms
$n$	Submodulanzahl pro Zweig, Zählvariable
$N$	Zählvariable
$P_d$	DC-seitige Leistung
$P_{q,x}$	Zweigleistung
$P_{q,x,p}$	Zweigleistung eines positiven Umrichterzweiges
$P_{q,x,n}$	Zweigleistung eines negativen Umrichterzweiges
$P_w$	AC-seitige Phasenleistung
$Q$	Ladung
$r$	Normierter Redundanzfaktor
$R$	Ohmscher Widerstand
$s$	Komplexe Kreisfrequenz, Sektorvariable
$SW$	Mechanischer Schalter
$\vartheta$	Normierte Zeit
$\vartheta_{cm}$	Normierte Gleichtaktperiode
$t$	Zeit
$T$	Periodendauer, Integrator Zeitkonstante
$T_A$	Abtastperiode
$T_{cm}$	Gleichtaktperiode
$T_f$	Filterzeitkonstante
$T_k$	Kommutierungszeit
$T_N$	Netzperiode
$t_r$	Anstiegszeit
$T_S$	Schaltperiodendauer
$T_t$	Totzeit
$U, u$	Spannung
$u_{cm}$	Gleichtaktspannung
$U_d$	DC-seitige Spannung am Umrichter
$u_{q,x}$	Zweigspannung
$u_{q,x,p}$	Zweigspannung eines positiven Umrichterzweiges

---

$u_{q,x,n}$	Zweigschaltung eines negativen Umrichterzweiges
$u_{q,C}$	Zweigkondensatorschaltung
$u_{q,\Sigma C}$	Summe der Kondensatorschaltungen eines Zweiges
$u_{SM}$	Klemmenspannung an den Submodulen
$u_w$	AC-seitige Phasenspannung
$V$	Umrechnungsfaktor
$W$	Energie, 1. Binärstelle der Sektorvariable
$W_{q,x}$	Zweigenergie
$W_{q,x,p}$	Zweigenergie eines positiven Umrichterzweiges
$W_{q,x,n}$	Zweigenergie eines negativen Umrichterzweiges
$\hat{W}_q$	Zweigenergiehub
$x$	Platzhaltervariable
$X$	2. Binärstelle der Sektorvariable
$y$	Platzhaltervariable
$Y$	3. Binärstelle der Sektorvariable
$Z$	4. Binärstelle der Sektorvariable
$\omega_N$	Kreisfrequenz
$Z$	Impedanz



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Modularer Multilevel Umrichter inklusive Ersatzschaltbild der externen AC- und DC-Netze/Lasten . . . . .	4
2.2	Halbbrücken Submodul . . . . .	5
2.3	Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Modularen Multilevel Umrichters mit unabhängig steuerbaren Spannungsquellen und eingepprägten AC- und DC-Größen . . . . .	8
2.4	Vollbrücken Submodul . . . . .	12
2.5	Clamp-Double-Submodul . . . . .	13
2.6	Double Connection zweier Submodule mit bipolarer Klemmenspannung	13
2.7	Semi Full-Bridge Submodul . . . . .	14
2.8	Double-Zero Submodul . . . . .	15
3.1	Raumzeigerdiagramm und zugehörige Sektordefinition . . . . .	18
3.2	3-phasiges ABC-System mit Sinus Größen . . . . .	19
3.3	Variable $s$ zur Sektorzuweisung . . . . .	19
3.4	Aufteilung der Sektoren unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung $\varphi$ . . . . .	22
3.5	Aufteilung der Sektoren für die Zweigenenergien im $ABC$ -System Beispiel für $k = 0.9$ , $\varphi = \pi/6$ . . . . .	22
3.6	Ermittlung der Sektorvariable $s$ aus den $RST$ -Größen . . . . .	25
3.7	Multiplexen der Zweigströme aus dem $RST$ - ins $ABC$ -System . . . . .	25
4.1	Definition der Kreisströme und Gleichtaktspannungen für den 3-phasigen Modularen Multilevel Umrichter im $ABC$ -System . . . . .	28
4.2	Aufteilung der Kreisströme in Gleich- und Wechselanteil . . . . .	29
4.3	Aufteilung der Gleichtaktspannung in Gleich- und Wechselanteil . . . . .	29
4.4	Typische $U/f$ -Kennlinie zur Erläuterung der Betriebsbereiche (DC, NF, HF) . . . . .	36
4.5	Verlauf der Zweigenenergien und Stellgrößen im DC-Betriebsbereich (Bereich I, $k = 0.2$ , $\varphi = 0$ ) . . . . .	40
4.6	Verlauf der Zweiggrößen im DC-Betriebsbereich mit (Bereich I, $k = 0.2$ , $\varphi = 0$ ) . . . . .	41
4.7	Energiehub bei Optimierung der Gleichtaktspannung $\tilde{k}_{cm}$ im Spezialfall $\gamma = 0$ des Gleichstrombetriebs (Bereich I) . . . . .	44
4.8	Energiehub bei Optimierung der Gleichtaktspannung $\tilde{k}_{cm}$ im Spezialfall $\gamma = \pi/6$ des Gleichstrombetriebs (Bereich I) . . . . .	47
4.9	Optimierte Gleichtaktspannung $\tilde{k}_{cm,opt,B}$ mit $\gamma = \pi/12$ . . . . .	48

4.10	Maximal auftretender Energiehub in den Phasen $A$ und $B$ bei Optimierung der Gleichtaktspannung $\tilde{k}_{\text{cm}}$ (Gleichstrombetrieb mit $\varphi = 0$ )	48
4.11	Vergleich des maximal auftretenden Energiehubs in den Phasen $A$ und $B$ bei Optimierung der Gleichtaktspannung $\tilde{k}_{\text{cm}}$ auf Phasendifferenz und auf kleinste Quadrate (Gleichstrombetrieb mit $\varphi = 0$ und $\gamma = \pi/12$ )	49
4.12	Vergleich der Zweigspannungen in den beiden Gleichtaktabschnitten der Phasen $A$ und $B$ bei Optimierung der Gleichtaktspannung $\tilde{k}_{\text{cm}}$ auf kleinste Quadrate im Gleichstrombetrieb mit $\gamma = \pi/12$	50
4.13	Maximal und minimal notwendige Zweigspannung im DC-Betrieb bei verschiedenen Raumzeigerposition unter Anwendung der optimalen Gleichtaktspannung (Prinzip der kleinsten Quadrate)	51
4.14	Vergleich der Gleichtaktspannungen (Optimierung nach den kleinsten Quadraten) und den Grenzwerten für Halbbrücken-Submodule im DC-Betrieb	52
4.15	Vergleich des maximal auftretenden Energiehubs in den Phasen $A$ und $B$ bei Verwendung von Halbbrücken-Submodulen im DC-Betrieb mit $\varphi = 0$ und $k = 0, 0.5$ und $1$	52
4.16	Vergleich des maximal auftretenden Energiehubs in den Phasen $A$ und $B$ bei Verwendung von Vollbrücken-Submodulen im DC-Betrieb mit $\varphi = 0$ und $k = 0, 0.5$ und $1$	53
4.17	Zweigstromeffektivwert normiert auf den KG-freien Betrieb $\varphi = 0$	54
4.18	Zweigstromeffektivwert normiert auf den KG-freien Betrieb in Abhängigkeit vom maximalen Energiehub im Gleichstrombetrieb mit $\varphi = 0$ und $\gamma = \pi/12$	55
4.19	Verlauf der Zweigenergien über zwei Sektoren ( $60^\circ$ ) für $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6, \pi/12$ und $\pi/24$ ( $\varphi = \pi/6$ und $k = 0.8$ )	59
4.20	Optimierter Wechselanteil der Gleichtaktspannung $\tilde{k}_{\text{cm,opt}}$ in den beiden $30^\circ$ -Sektoren nach Gl. 4.54 mit $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$	60
4.21	Maximaler Energiehub $\hat{E}_q$ unter Verwendung der Werte für $\tilde{k}_{\text{cm}}$ nach Gl. 4.54 mit $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$	61
4.22	Verlauf der Zweiggrößen bei Verwendung der positiven Gleichtaktspannung $\tilde{k}_{\text{cm,opt}}$ mit $\varphi = \pi/6$ und $k = 0.8$	62
4.23	Verlauf der Zweiggrößen bei Verwendung der negativen Gleichtaktspannung $\tilde{k}_{\text{cm,opt}}$ mit $\varphi = \pi/6$ und $k = 0.8$	62
4.24	Maximaler Energiehub $\hat{E}_x$ normiert auf den KG-freien Betrieb ( $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6, \tilde{k}_{\text{cm}}$ nach Gl. 4.54)	63
4.25	Maximal auftretende Zweigspannung in Abhängigkeit der Spannungsaussteuerung $k$ (Bereich II, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6, \tilde{k}_{\text{cm}} = \tilde{k}_{\text{cm,opt}}$ )	64
4.26	Normierter Effektivwert der Zweigströme in Abhängigkeit von der Spannungsaussteuerung $k$ (Bereich II, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6, \varphi = \pi/6, \tilde{k}_{\text{cm}} = \tilde{k}_{\text{cm,opt}}$ )	66
4.27	Normierter Effektivwert der Zweigströme in Abhängigkeit vom maximalen Energiehub (Bereich II, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6, \varphi = \pi/6$ )	67

4.28	Blockschaltbild der technischen Realisierung einer Sollwertanpassung für den HF-Betrieb (Bereich III) . . . . .	69
4.29	Vergleich des Energiehubs bei reduzierter Gleichtaktspannung (Bereich III, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$ , $\varphi = \pi/6$ ) . . . . .	70
4.30	Effektivwert der Zweigströme normiert auf den KG-freien Betrieb bei reduzierter Gleichtaktspannung (Bereich III, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$ , $\varphi = \pi/6$ ) . . . . .	70
4.31	Blockschaltbild der technischen Realisierung einer Gleichtaktspannungsreduktion . . . . .	71
4.32	Maximale Zweigspannung bei Reduktion der Gleichtaktspannung (Bereich III, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$ , $\varphi = \pi/6$ ) . . . . .	71
4.33	Maximale Zweigspannung und Energiehub bei Reduktion der Gleichtaktspannung (Bereich III, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$ , $\varphi = \pi/6$ , $b = 1/3$ ) . . . . .	72
4.34	Maximale erzielbare Spannungsaussteuerung $k$ bei Anwendung einer 3. Harmonischen in der Gleichtaktspannung (Bereich III) . . . . .	73
4.35	Blockschaltbild der technischen Realisierung einer Aufschaltung der 3. Harmonischen in der Gleichtaktspannung . . . . .	73
4.36	Maximale Zweigspannung und Energiehub bei Verwendung einer 3. Harmonischen in der Gleichtaktspannung $k_{3f}$ (Bereich III, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$ , $\varphi = \pi/6$ ) . . . . .	74
4.37	Maximale Zweigspannung und resultierender Energiehub bei Verwendung einer 3. Harmonischen in der Gleichtaktspannung $k_{3f}$ (Bereich III, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$ , $\varphi = \pi/6$ , $b = 1/3$ ) . . . . .	75
4.38	Einfluss der Kreisströme auf den Energiehub (Bereich III, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$ , $\varphi = \pi/6$ ) . . . . .	76
4.39	Stromeffektivwert bei Reduktion des Kreisstromgleichanteils $\bar{m}_{\text{kr},x}$ (Bereich III, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$ , $\varphi = \pi/6$ , $\bar{m}_{\text{kr},x} = 0$ ) . . . . .	77
4.40	Maximaler Energiehub bei Reduktion des Kreisstromgleichanteils $\bar{m}_{\text{kr},x}$ (Bereich III, $\vartheta_{\text{cm}} = \pi/6$ , $\varphi = \pi/6$ , $\bar{m}_{\text{kr},x} = 0$ ) . . . . .	78
4.41	Blockschaltbild der technischen Realisierung einer Kreisstrombegrenzung . . . . .	78
4.42	Blockschaltbild der Energieregulation mit Umrechnungsmatrix . . . . .	79
4.43	Verkopplung der Stellgrößen eines 3-phasigen Systems mit den rein steuerbaren Größen . . . . .	80
4.44	Ersatzschaltbild des Modularen Multilevel Umrichters mit 2 Phasen . . . . .	81
4.45	Prinzipieller Verlauf der Zweigenergie bei direkter Berücksichtigung des Energiefehlers in der Vorsteuerung . . . . .	87
4.46	Prinzipieller Verlauf der Zweigenergie bei Reduktion der Gleichtaktperiode zur schnellen Ausregelung von Energiefehlern . . . . .	88
5.1	Blockschaltbild des gesamten Regelungskonzeptes . . . . .	90
5.2	Einprägung der Zweigströme unter Annahme einer idealen Zweiginduktivität . . . . .	92
5.3	Prinzipieller Verlauf der Zweigstromregelung bei Verwendung einer variablen Pulsfrequenz (mit maximal $T_{A,\text{max}}$ ) zur Reduktion des Trapezfehlers . . . . .	93



5.4	Strukturbild der Fehlerkorrektur in Folge der endlichen Abtastzeit $T_A$	94
5.5	Realisierung der Messwertaufnahme und -auswertung mit zwei Ringspeichern	97
5.6	Maskieren der Werte im Ringspeicher zur Ermittlung der Kurzzeitmittelwerte	98
5.7	Approximationsfehler der Summen- und Differenzkomponenten für Polynome verschiedenen Grades bei Extrapolation zum Abtastzeitpunkt bei sinusförmigen Größen ( $\vartheta_{cm} = \pi/6$ , $f'_M = 10f'_{cm}$ )	99
5.8	Approximationsfehler der Summen- und Differenzkomponenten in Folge der Phasenverschiebung bei sinusförmigen Größen ( $\vartheta_{cm} = \pi/6$ , $f'_M = 10f'_{cm}$ , Amplitude = 1)	100
5.9	Verlauf der elektrischen Größen für den I. Betriebsbereich ( $k = 0.2$ , $\varphi = 0$ , $I_d = 120$ A, $f_N = 1$ Hz, $f_{cm} = 300$ Hz)	104
5.10	Vergößerter Verlauf der Kondensatorspannungen für den I. Betriebsbereich ( $k = 0.2$ , $\varphi = 0$ , $I_d = 120$ A, $f_N = 1$ Hz, $f_{cm} = 300$ Hz)	104
5.11	Verlauf der Kondensatorspannungen bei unterschiedlicher Gleichtaktfrequenz $f_{cm}$ für den I. Betriebsbereich ( $k = 0.2$ , $\varphi = 0$ , $I_d = 120$ A, $f_N = 1$ Hz, $f_A = 20$ kHz)	105
5.12	Verlauf der Zweiggrößen für den I. Betriebsbereich ( $k = 0.2$ , $\varphi = 0$ , $I_d = 120$ A, $f_N = 1$ Hz, $f_{cm} = 300$ Hz, $f_A = 20$ kHz)	106
5.13	Verlauf der elektrischen Größen des Umrichters mit unterschiedlichen Gleichtaktfrequenzen $f_{cm}$ für den II. Betriebsbereich ( $k = 0.8$ , $\varphi = \pi/6$ , $I_d = 750$ A, $f_N = 10$ Hz, $f_A = 20$ kHz)	107
5.14	Verlauf der Zweiggrößen für den II. Betriebsbereich ( $k = 0.8$ , $\varphi = \pi/6$ , $I_d = 750$ A, $f_N = 10$ Hz, $f_{cm} = 300$ Hz, $f_A = 20$ kHz)	108
5.15	Verlauf der Kondensatorspannung für den II. Betriebsbereich im Vergleich zum KG-freien Betrieb ( $k = 0.8$ , $\varphi = \pi/6$ , $I_d = 750$ A, $f_N = 10$ Hz, $f_{cm} = 300$ Hz, $f_A = 20$ kHz)	109
5.16	Verlauf der elektrischen Größen des Umrichters bei linearer Absenkung der Reduktionsfaktoren und anschließender Superposition einer 3. Harmonischen für den III. Betriebsbereich ( $k = 1.2$ , $\varphi = \pi/3$ , $I_d = 750$ A, $f_N = 50$ Hz, $f_A = 20$ kHz)	110
5.17	Verlauf der elektrischen Größen des Umrichters bei linearer Absenkung der Reduktionsfaktoren und gleichzeitiger Superposition einer 3. Harmonischen für den III. Betriebsbereich ( $k = 1.2$ , $\varphi = \pi/3$ , $I_d = 750$ A, $f_N = 50$ Hz, $f_A = 20$ kHz)	111
5.18	Verlauf der Kondensatorspannung bei linearer Absenkung der Reduktionsfaktoren und anschließender Superposition einer 3. Harmonischen für den III. Betriebsbereich im Vergleich zum KG-freien Betrieb ( $k = 1.2$ , $\varphi = \pi/3$ , $I_d = 750$ A, $f_N = 50$ Hz, $f_A = 20$ kHz)	112
5.19	Verlauf der elektrischen Größen des Umrichters im Hochfahrvorgang ( $f_A = 20$ kHz, $P_{max} = 6$ MW)	113
6.1	ZnO-Varistorkennlinie für 4kV Spannungsbegrenzung bei verschiedenen Abschaltströmen	118

6.2	Proactive Hybrid HVDC-Breaker . . . . .	119
6.3	Einfluss der Snubber-Beschaltung des Proactive Hybrid HVDC-Breakers beim Abschaltvorgang . . . . .	120
6.4	Zeitlicher Verlauf des Löschvorgangs des Proactive Hybrid HVDC-Breakers $U_{DC} = 300\text{kV}$ , $I_{Last} = 10\text{kA}$ . . . . .	121
6.5	Kommutierungszeit $T_k$ in Abhängigkeit der Gegenspannung des Niederspannungsschalters NS für uni- und bidirektionale Ausführung	121
6.6	HVDC-Breaker mit Aktiver Kommutierung . . . . .	122
6.7	Zeitlicher Verlauf des Löschvorgangs der Aktiven Kommutierung $U_{DC} = 300\text{kV}$ , $I_{Last} = 10\text{kA}$ , $C_{NS} = 2\text{mF}$ . . . . .	123
6.8	Abhängigkeit der Gegenspannungsdimensionierung zur Kommutierungszeit $U_{DC} = 300\text{kV}$ , $I_{Last} = 10\text{kA}$ . . . . .	124
6.9	HVDC Breaker mit H-Brücke . . . . .	125
6.10	Zeitlicher Verlauf des Löschvorgangs der H-Brücke $U_{DC} = 300\text{kV}$ , $I_{Last} = 10\text{kA}$ , $C_{NS} = 4\text{mF}$ . . . . .	126
6.11	Prinzipieller Aufbau (unipolar) des thyristorbasierten HVDC-Breakers	132
6.12	Prinzipieller Aufbau (bipolar) des thyristorbasierten HVDC-Breakers	132
6.13	HVDC-Breaker im Normalbetrieb . . . . .	133
6.14	HVDC-Breaker bei Fehlereintritt am Ausgang . . . . .	134
6.15	HVDC-Breaker bei Ansteuerung der mechanischen Schalter . . . . .	135
6.16	HVDC-Breaker bei gezündeten Thyristoren . . . . .	135
6.17	HVDC-Breaker bei Löschen des Fehlerstromes . . . . .	136
6.18	HVDC-Breaker bei gelöschten mechanischen Schaltern . . . . .	138
6.19	HVDC-Breaker Entmagnetisieren der Leitungsinduktivitäten . . . . .	138
6.20	Wiederkehrende Thyristorspannung bei variierender Anzahl Ringbandkerne $U_c = 3\text{kV}$ , $L_{SG} = 5,69\mu\text{s}$ , $C_{SG} = 160\mu\text{F}$ , $R_{SG} = 200\text{m}\Omega$ , $d_{Ringband} = 0,3\text{mm}$ . . . . .	142
6.21	Vereinfachtes Prinzip der Thyristorzündelektronik . . . . .	143
6.22	Primärseitige Ansteuerung . . . . .	143
6.23	Sekundärseitige Zündelektronik . . . . .	144
6.24	Prinzipieller Verlauf der sekundärseitigen Zündelektronik . . . . .	145
6.25	Primärseitige Spannung über MOSFET $T_{prim}$ und Gateströme $i_{g1..3}[1\text{A}/\text{V}]$ im Detail $U_{DC} = 180\text{V}$ , $T_{Puls} = 2\mu\text{s}$ . . . . .	146
6.26	Elektronik zur Ansteuerung von Thyristoren bei Pulsförmigen Betrieb	146
6.27	Energieauskopplung aus dem Kondensator des DC-Breakers für die Zündelektronik . . . . .	147
6.28	Wiederkehrende Thyristorspannung bei variierender Anzahl Ringbandkerne $U_c = 3\text{kV}$ , $L_{SG} = 5,69\mu\text{s}$ , $C_{SG} = 160\mu\text{F}$ , $R_{SG} = 200\text{m}\Omega$ , $R_p = 15\Omega$ , $d_{Ringband} = 0,3\text{mm}$ . . . . .	149
6.29	Schaltbild des Messaufbaus . . . . .	150
6.30	Schaltung zur Verarbeitung der Wegaufnehmerspannung . . . . .	151
6.31	Messung der Abschaltung eines Laststromes von $10\text{kA}$ . . . . .	152
6.32	Spannungsbelastung des mechanischen Schalters . . . . .	152
6.33	Aufladung des Kondensators . . . . .	153

6.34 Thyristorbasiertes DC-Breaker Modul mit Dämpfungswiderstand zur Energieaufnahme und aktiver Spannungsbegrenzung . . . . .	155
A.1 Blockschaltbild der technischen Realisierung einer Aufschaltung der 3. Harmonischen in der Gleichtaktspannung . . . . .	159
A.2 Fehlerabschätzung ( $T_{cm} = \frac{1}{12f_N}$ ) . . . . .	160

# Tabellenverzeichnis

3.1	Mögliche Zustände und Sektorinformationen aller 12 Sektoren . . . .	20
3.2	Mögliche Zustände und Sektorinformationen aller 6 Sektoren der Zweigenergie . . . . .	23
3.3	Mögliche Kombinationen der Phasenregler und ihre Eigenschaften auf die Regeldynamik . . . . .	24
4.1	Definition der Betriebsbereiche mit typischen Eigenschaften der Arbeitspunkte . . . . .	34