Dreiphasiger, netzfreundlicher Dreipunkt-Gleichrichter zur Speisung von Gleichspannungszwischenkreisen

Zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR-INGENIEUR
dem Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der
Universität Paderborn
genehmigte Dissertation
von
Dipl.-Ing. Peter Ide
aus Brakel / Westfalen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Horst Grotstollen
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Petzoldt
Tag der mündlichen Prüfung: 27. November 2002

D 14-181
Paderborn 2002

Berichte aus der Elektrotechnik

Peter Ide

Dreiphasiger, netzfreundlicher Dreipunkt-Gleichrichter zur Speisung von Gleichspannungszwischenkreisen

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2003

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Ide, Peter:
Dreiphasiger, netzfreundlicher Dreipunkt-Gleichrichter zur Speisung von Gleichspannungszwischenkreisen / Peter Ide.
Aachen : Shaker, 2003
(Berichte aus der Elektrotechnik)
Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2002
ISBN 3-8322-1682-0

Copyright Shaker Verlag 2003
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1682-0
ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik an der Universität Paderborn.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Grotstollen, dem Leiter dieses Fachgebietes, gilt daher meine herzlicher Dank für die jahrelange Förderung und Betreuung sowie die Begutachtung meiner Arbeit.

Gefreut habe ich mich, dass Herr Prof. Dr.-Ing. Jürgen Petzoldt (TU Ilmenau) sein Interesse an der Arbeit zeigte und das Korreferat übernommen hat.

Anregung und Unterstützung erhielt ich aber auch von Seiten der damaligen Kollegen im Fachgebiet Dr.-Ing. Norbert Fröhleke, Dr.-Ing. Peter Wallmeier und Dr.-Ing. Stephan Beineke. Mit ihren Abschlussarbeiten leisteten die Studenten Dipl.-Ing. Jochen Mielke, Dipl.-Ing. Hermann Wetzel und Dipl.-Ing. Frank Schafmeister wertvolle Beträge zu dieser Arbeit. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Norbert Sielemann für den Aufbau der ersten Prototypen. Das freundschaftliche Verhältnis zu vielen Kollegen im Fachgebiet in Verbindung mit dem guten allgemeinen Arbeitsklima haben die Arbeit in vielfacher Hinsicht vereinfacht und zur Freude an der Tätigkeit beigetragen.

Ein wesentlicher Teil der Arbeiten wurde im Rahmen von Kooperationsprojekten mit den Firmen Lust Antriebstechnik, Lahnau und ABB Power Supplies, Soest durchgeführt. Die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung von dieser Seite hebe ich gern hervor. Besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang Herrn Dr.-Ing. Basile Margaritis und Herrn Wilhelm Korb.

Meiner Familie und insbesondere meiner Frau Ute danke ich für die geduldige Unterstützung und Rücksichtnahme, ohne die diese Arbeit nicht hätte entstehen können.

Peter Ide
Soest, im Mai 2003

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis . . . . . **i**

Verzeichnis der Formelzeichen . . . . . **v**

Verwendete Formelzeichen v
Indizes ix
Allgemeine Festlegungen ix
Abkürzungen ix

1 Einleitung **1**

2 Vergleich und Auswahl von Schaltungen zur dreiphasigen, netzfreundlichen Gleichrichtung **5**

2.1 Grundprinzip und Definitionen 5
2.2 Schaltungen mit reiner Sinusform der Ströme 8
2.2.1 Dreiphasige Brückenschaltung 8
2.2.2 Varianten der dreiphasigen Brückenschaltung 9
2.2.2.1 Stellbereich der Varianten des Zweipunkt-Gleichrichters 10
2.2.2.2 Schaltfolge und Kommutierungen 12
2.2.2.3 Belastung der Halbleiter 17
2.2.2.4 Treiberaufwand 26
2.2.2.5 Gleichtaktspannungen 27
2.2.2.6 Zusammenfassende Bewertung der Zweipunkt-Topologien 27
2.2.3 Dreipunkt-Topologien 28
2.2.3.1 Dreipunkt-Gleichrichter 30
2.2.3.2 Funktionsprinzip und Stellbereich der Dreipunkt-Gleichrichter 32
2.2.3.3 Belastungsgrößen der Dreipunkt-Gleichrichter 35

2.2.3.4 Treiberaufwand 39
2.2.4 Stromwelligkeit bei Zweipunkt- und Dreipunkt-Topologien 41
2.2.4.1 Spektrum der Spulenströme 41
2.2.4.2 Spektrum der Stromrichterspannungen 41
2.2.4.3 Globale Effektiv- und Spitzenwerte der Spulenströme 47
2.2.5 Gleichtaktspannungen 49
2.2.6 Zusammenfassende Bewertung von Zwei- und Dreipunkt-Topologien . . . 49
2.3 Weitere Gleichrichterschaltungen 51
2.3.1 Dreiphasiger Hochsetzsteller bei lückendem Strom 51
2.3.2 Minnesota Gleichrichter 53
2.3.3 Netzgeführter Dreipunkt-Gleichrichter 54
2.3.4 Nicht auf dem Hochsetzsteller basierende Schaltungen 56
2.3.5 Drei einphasige Teilschaltungen 57
2.4 Übersicht 61

3 Modulationsverfahren 63

3.1 Analoges Modulationskonzept 64
3.1.1 Zweipunkt-Regelung 64
3.1.2 Pulsbreitenmodulation mit zwei Referenzsignalen 66
3.2 Wahl der Nullkomponente 69
3.2.1 Optimale Nutzung des Stellbereichs der Spannungen 70
3.2.2 Optimale Symmetrie der Zwischenkreisspannungen 71
3.2.3 Zweisträngige Modulation („Flat-Top“-Prinzip) 72
3.2.4 Strombelastung der Kondensatoren im Zwischenkreis 76
3.2.5 Minimierung der Welligkeit der Eingangsströme 78
3.2.6 Auswirkung auf das Spektrum der Ströme 82
3.2.7 Zusammenfassung und Bewertung 85
3.3 Analoge Implementierung des Modulationsverfahrens 87
3.3.1 Der Modulator 87
3.3.2 Erzeugung der Nullkomponente 88
3.4 Raumzeigerbasiertes Modulationskonzept 89

4 Aspekte zur Realisierung 93

4.1 Der Gleichrichter 93
4.1.1 Halbleiter 93
4.1.2 Passive Bauelemente 101
4.1.2.1 Speicherspulen 101
4.1.2.2 Kondensatoren im Zwischenkreis 104
4.2 Netzseitiges Filter 104
4.2.1 Gegentaktfilter 106
4.2.2 Gleichtaktfilter 107

5 Modellierung und Regelung 111

5.1 Modellierung von Dreipunkt-Gleichrichtern 111
5.1.1 Wechselstromseitiges Teilsystem 114

5.1.2 Gleichstromseitiges Teilsystem 117
5.2 Messgrößenerfassung 119
5.3 Regelung 121
5.3.1 Stromregelkreise 122
5.3.2 Spannungsregelkreis 128
5.3.3 Simulative Verifikation. 130
5.3.4 Symmetrierung der Ausgangsspannungen 134
5.4 Messergebnisse 140

6 Besondere Betriebszustände 147

6.1 Unsymmetrisches Netz 147
6.2 Betrieb an zwei Leitern. 152
6.2.1 Auswirkungen auf den Leistungsteil 153
6.2.2 Modulation und Regelung. 156
6.2.2.1 Modulationsverfahren 156
6.2.2.2 Regelung 159
6.2.3 Messergebnisse 162
6.3 Betrieb bei Schwachlast und Stromlücken 164
6.3.1 Analyse des Lückbetriebs 164
6.3.2 Vermeidung und Kompensation von Fehlerspannungen 178
6.3.2.1 Funktionsprinzip der adaptiven Kompensation 179
6.3.2.2 Simulationen und Messergebnisse 181

7 Zusammenfassung 187

Literaturverzeichnis 189

Anhang A 197

A.1 Gleichungen 197
A1.1 Maximale und Minimale Leistung beim Dreipunkt-GR. 197
A1.2 Spezifische Schaltverlustleistung 198
A1.3 Effektivwert des schaltfrequenten Wechselanteils 198
A1.4 Belastungsgrößen des Dreipunkt-Gleichrichters beim Betrieb an zwei Leitern 201
A1.5 Effektivwert des schaltfrequenten Wechselanteils beim Betrieb des Dreipunkt-Gleichrichters an zwei Leitern202

Anhang B 203

Verzeichnis der Formelzeichen

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
$\tilde{A}_{si}$	Siliziumfläche bezogen auf den Strom	mm^2/A
C	Kondensator im Zwischenkreis, bzw. dessen Kapazität	F
C_{x1}, C_{x2}	Filterkondensatoren im Netzfilter (x-Kondensatoren)	F
d_{000}, d_0	Relative Einschaltzeit, beispielsw. des Nullzustandes (000) oder Nullvektors	
f_p	Pulsfrequenz, Anzahl der Schaltzyklen pro Sekunde	Hz
f_s, T_S	(mittlere) Schaltfrequenz bzw. Dauer eines Schaltzyklus	Hz,(s)
f_N, T_N	Netzfrequenz, (Netzperiodendauer)	Hz,(s)
g_N	Eingangsleitwert der Schaltung	A / V
G_{oi}, (G_{wi})	Übertragungsfunktion des offenen (geschlossenen) Stromregelkreises	
G_F, G_F^N	Übertragungsverhalten von Netzfilter und Netz	
h	Hysteresebreite	A, V
I_N	Effektivwert der Netzströme	A
$\hat{I}_N$	Amplitude / Scheitelwert (der Netzströme)	A
$I_{N(k)}$	Effektivwert der *k*-ten Harmonischen des Stromes i_N	A
I_B	Basisstrom bei Normierung	A
i_{d1}, i_{d2}	Ausgangsstrom des katoden- bzw. anodengekoppelten Teilstromrichters	A

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
i_d, $(\overline{i_d})$	Equivalenter, speisender Strom (lokaler Mittelwert)	A
i_L, (I_L)	Laststrom, (arithmetischer Mittelwert)	A
i_{Na}, i_{Nb}, i_{Nc}	Strangströme am Netz (Phasen a, b, c, Momentanwerte)	A
i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc}	Strangströme im Stromrichter (Phasen a, b, c, Momentanwerte)	A
i_M, $(\overline{i_M})$	Strom zum Mittenpotential (lokaler Mittelwert)	A
$J_n(x)$	Bessel-Funktion (erster Gattung) n-ter Ordnung	
k, n	Ordnungszahlen der Spektrallinie n-ter Ordnung im Seitenband zur k-fachen Schaltfrequenz	-
K_k	P-Anteil im Kompensationsglied	
K_{Pu}	Reglerverstärkung der Spannungsregler (P-Anteil)	1/Ω
K_{Pi}	Reglerverstärkung der Stromregler (P-Anteil)	Ω
K_M	Rückkopplung bei der Symmetrierung der Zwischenkreisspannung	1/V
K_{Fu}	Skalierungsfaktor bei der Erfassung der Netzspannungen	-
L	Induktivität oder Spule allgemein	Vs/A
L_{F1}	Filterspule im Netzfilter	H
L_N, R_N	Netzinduktivität, Netzwiderstand	
L_1	(Speicher-)Spule bzw. deren Induktivität	H
m_0	Normierte Nullkomponente	-
m_f	Verhältnis von Schaltfrequenz zu Netzfrequenz	-
m_N, m_S	Modulationsgrad (Amplitude der auf U_d normierten Netz- und Stromrichterstrangspannungen.)	-
$m_x(\varphi)$, $m_x^*(\varphi)$	Normierte Vorgabesignale der Modulation ohne (mit) Nullkomponente ($x \in \{a, b, c\}$)	-
p_n	Normierte Leistung	
$p_{n,\,lg}$	Normierte Leistung an der Lückgrenze	
$P_{D,\,fw}$	Mittlere Verlustleistung einer Diode D während der Leitphasen	W
$P_{T,\,on(off)}$	Mittlere Verlustleistung eines Transistors beim Ein- oder (Aus)schalten	
P_V	Verlustleistung	W

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
r_f	Differentieller Widerstand eines leitenden Halbleiters	Ω
R_1	Parasitärer Widerstand der Spule L_1	Ω
s	Laplace Operator	s^{-1}
$\boldsymbol{T}$, $\boldsymbol{T}^{-1}$	Transformationsmatrix zwischen abc- und αβ-Koordinaten	
THD	Klirrfaktor (in der englischspr. Literatur Total Harmonic Distortion)	
$t_{D,\,off}$	Charakteristische Zeit beim Auschalten einer Diode	s
$t_{T,\,on(off)}$	Charakteristische Zeit beim Ein- oder (Aus)schalten eines Transistors	s
T_{Fu}	Filterzeitkonstante bei der Erfassung der Netzspannungen	s
T_{Fi}	Filterzeitkonstante bei der Erfassung der Ströme	s
T_{1i}	Filterzeitkonstante im Stromregelkreis	s
T_{Ni}	Nachstellzeit der Stromregelkreise	s
T_{Nk}	Nachstellzeit im Kompensationsglied	s
T_{Mi}	Verzögerungszeit des geschlossenen Stromregelkreises	s
T_{Ru}	Zeitkonstante des Spannungsreglers	s
U_B	Basisspannung bei Normierung	V
U_d, u_d	Ausgangsspannung des Gleichrichters (Mittelwert, Momentanwert)	V
U_{d1}, U_{d2}, u_{d1}, u_{d2}	Teilspannungen der Ausgangsspannung (Mittelwert, Momentanwert)	V
u_M	Differenz der Ausgangsspannungen (Unsymmetrie)	V
u_{f0}	Flussspg. in Ersatzschaltung eines leitenden Halbleiters	V
u_{CM}	Gleichtaktspannung (engl. Common Mode)	V
$u_{\mathrm{Stör}}$	Hochfrequente Störspannung über Netzimpedanz	V
$U_{Sx,\,\Sigma,\,k}$	Spektralanteil der Stromrichterspannung bei k-facher Schaltfrequenz	V_{rms}
U_N	Netzspannung (Effektivwert der Leiterspannung)	V
$\tilde{U}_{T,\,rms}$	Nutzungsgrad der Transistoren einer Topologie, bei Berücksichtigung der Effektivwerte der Ströme	-

Formelzeichen	Beschreibung	Ein-heit
$\underline{u}_{100}$	Raumzeiger der Stromrichterspg. im Schaltzustand (100)	-
u_{NMa}, u_{NMb}, u_{NMc}	(Netz-) Strangspannungen (Momentanwerte), auf das Mittenpotential des Stromrichters bezogen	V
u_{Na}, u_{Nb}, u_{Nc}	Momentanwerte der (Netz-) Strangspgen., Phase a, b, c	V
u_{Sa}, u_{Sb}, u_{Sc}	(Stromrichter-) Strangspannungen (Momentanwerte)	V
u_{SMa}, u_{SMb}, u_{SMc}	(Stromrichter-) Strangspannungen. (Momentanwerte), auf das Mittenpotential des Stromrichters bezogen	V
u_{ref1}, u_{ref2}	Periodische Dreieckssignale der Modulation	V
$\underline{u}_N$, $\underline{u}_S$	Raumzeiger der Netzspannung und Stromrichterspanung	V
$W_{T,\,on(off)}$	Verlustenenergie beim Ein- oder Aussschalten	Ws
Z_N	Netzimpedanz	V/A
γ_M	Relative Unsymmetrie (u_M / U_d)	
$\sigma_{T,\Sigma}$	Spezifische Schaltverlustleistung aller Transitoren einer Topologie	-
ρ	Verhältnis der Einschaltzeit eines der äquivalenten Schaltzustände zur Gesamteinschaltzeit beider	
ϑ, (ϑ_j)	Temperatur, (Chip-Temperatur)	$°C$
φ_N	Phasenverschiebung zwischen Netzstrom und Netzspg.	°(rad)
φ	Phasenwinkel der Netzspannungen ($2\pi f_N \cdot t$)	°(rad)
φ_S	Innere Phasenverschiebung zwischen Eingangsstrom $i_{S,\,x}$ und -spannung $u_{S,\,x}$ des Gleichrichters	°(rad)
$\phi(x)$	Heavisidesche Funktion (Sprungfunktion)	-
λ	Leistungsfaktor	-
$\theta_{a,\,(k)}$	Phasenverschiebung der k-ten Oberschwingung bei unsymmetrischem Netz	rad
(+0-)	Schaltzustand	

Indizes

Index		Beschreibung
ft	*engl.* Flat-Top	Zweisträngige Modulation
av	*engl.* average	arithm. Mittelwert
rms	*engl.* Root Mean Square	Effektivwert
dc	*engl.* Direct Current	Gleichanteil
ac	*engl.* Alternating Current	Wechselanteil
CM	*engl.* Common Mode	Gleichtakt
DM	*engl.* Differential Mode	Gegentakt
j	*engl.* Junction	Halbleiterchip

Allgemeine Festlegungen

x'	Skaliertes Signal der Größe x
$\bar{x}$	Lokaler Mittelwert des Signals x
y_x	Signal y für beliebigen Strang $x \in \{a, b, c\}$
$\hat{x}$	Scheitelwert der Größe x

Abkürzungen

DGl	Differentialgleichung	
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit	
WR	Wechselrichter	
GR	Gleichrichter	
ZCT	*engl.* Zero Current Transition	Nullstromschalten
ZVT	*engl.* Zero Voltage Transition	Nullspannungsschalten
IGBT	*engl.* Insulated Gate Bipolar Transistor	
MOSFET	*engl.* Metall Oxid Field Effect Transistor	
PWM	*engl.* Puls Width Modulation	Pulsbreitenmodulation
µ-Controller	Micro-Controller	
DSP	Digital Signal Processor	
PTC (NTC)	*engl.* Positive (Negative) Temperatur Coefficient	Positiver (Negativer) Temperatur-Koeffizient