

Julian Wölfle

## **Regelsysteme zur Verlängerung der Lebensdauer von Leistungsmodulen in Antriebswechselrichtern**

# **Regelsysteme zur Verlängerung der Lebensdauer von Leistungsmodulen in Antriebswechselrichtern**

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Julian Felix Wölfe**

geboren in Ravensburg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Roth-Stielow  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Ingmar Kallfass  
Tag der mündlichen Prüfung: 19.07.2021

Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe  
der Universität Stuttgart

**2021**



Berichte aus der Elektrotechnik

**Julian Wölfle**

**Regelsysteme zur Verlängerung der Lebensdauer  
von Leistungsmodulen in Antriebswechselrichtern**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

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.: Stuttgart, Univ., 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 978-3-8440-8258-6

ISSN 0945-0718

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)

*Meinen Kindern*



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe der Universität Stuttgart.

Ganz besonders herzlich bedanke ich mich, bei Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Roth-Stielow dem Institutsleiter, für die Betreuung, das Interesse und stete Förderung dieser Arbeit sowie für die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen und für die wertvollen Ratschläge.

Auch danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Kallfass für die freundliche Übernahme des Mitberichts und für das Interesse an dieser Arbeit.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Kollegen für die vielen wertvollen und hilfreichen fachlichen Diskussionen. Die sehr angenehme, offene und freundschaftliche Atmosphäre und die Unterstützung die ich erfahren habe, werden mir stets in sehr guter Erinnerung bleiben.

Für die Erstellung der vielen Reinzeichnungen bedanke ich mich besonderes bei Frau Evelin Eiselt. Zudem bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt unter der Leitung von Herrn Herrmann Kattner für die Umsetzung der mechanischen Aufbauten. Herrn Edmund Fridrich und Herrn Hamidullah Baray danke ich für die technische Unterstützung bei den Laboraufbauten. Für die kritische Durchsicht meines Manuskripts bedanke ich mich bei Frau Beate Herzog.

Des Weiteren danke ich allen Studierenden, die im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich möchte mich bei meiner Familie ganz herzlich bedanken, die mir mein Studium ermöglicht hat und mich stets bei meiner Promotion unterstützt hat. Meiner Frau Vera Herzog danke ich ganz besonders für die Unterstützung, die Ermutigungen und für das aufgebrachte Verständnis der häufig späten Heimkehr.

Stuttgart, im Dezember 2019

Julian Felix Wölfle



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>14</b>
<b>1 Kurzfassung</b>	<b>18</b>
<b>2 Abstract</b>	<b>21</b>
<b>3 Einleitung</b>	<b>24</b>
3.1 Stand der Technik . . . . .	25
3.1.1 Aufbau- und Verbindungstechnik von IGBT-Leistungsmodulen . . . . .	25
3.1.2 Empirische Lebensdauermodelle . . . . .	26
3.1.3 Rainflow-Zählung und lineare Schadensakkumulation . . . . .	28
3.1.4 Bekannte Lösungsansätze zur Beeinflussung der Halbleitertemperaturen	29
3.2 Ziele, Angewandtes Grundprinzip und Vorgehensweise der Arbeit . . . . .	33
<b>4 Ermittlung der Halbleitertemperatur</b>	<b>37</b>
4.1 Ermittlung der Halbleitertemperatur der Ventile in einem IGBT-Leistungsmodul	37
4.1.1 Messung der Halbleitertemperatur . . . . .	37
4.1.2 Berechnung der Halbleitertemperatur . . . . .	38
4.2 Zwei-Punkt-Wechselrichter und dessen Ansteuerung . . . . .	39
4.2.1 Topologie . . . . .	39
4.2.2 Modulationsverfahren . . . . .	42
4.3 Analytische Berechnung der Schalt- und Durchlassverlustleistung der Ventile . .	50
4.3.1 Vermessung der charakteristischen Parameter-Kennlinien . . . . .	51
4.3.2 Approximation der charakteristischen Kennlinien . . . . .	55
4.3.3 Mathematische Herleitung der analytischen Verlustleistungsgleichungen	58
4.4 Thermische Modellbildung von IGBT-Leistungsmodulen . . . . .	64
4.4.1 Messungen zum thermischen Verhalten der Ventile im IGBT-Leistungs- modul . . . . .	67
4.4.2 Nachbildung des thermischen Verhaltens der Ventile im IGBT-Leistungs- modul durch eine Finite-Elemente-Simulation . . . . .	71
4.4.3 Eindimensionales thermisches Modell mit der Darstellung in Analogie zu elektrischen Netzwerken . . . . .	75

4.4.4	Darstellung des eindimensionalen thermischen Modells in einem regelungstechnischen Blockschaltbild . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Temperaturregelsysteme zur Beeinflussung der Sperrschichttemperaturen der Ventile in einem Wechselrichter</b>	<b>83</b>
5.1	Stromregelsystem mit Vorgabe des Drehmoments für eine permanent erregte Synchronmaschine . . . . .	84
5.2	Temperaturregelsystem für die Regelung der Sperrschichttemperatur der Ventile in einem Wechselrichter . . . . .	87
5.3	Sollwertvorgabe für die Regelung der Sperrschichttemperatur . . . . .	92
5.4	Struktur des Sperrschichttemperaturreglers und Dimensionierung der Einstellparameter . . . . .	96
5.5	Temperaturregelung durch Variation der Frequenz der Pulsweitenmodulation .	100
5.5.1	Stellbereich der Verlustleistung bei der Variation der Frequenz der Pulsweitenmodulation . . . . .	100
5.5.2	Struktur und Aufbau des Sperrschichttemperaturregel-systems unter Verwendung einer variablen Frequenz der Pulsweitenmodulation . . . . .	103
5.6	Temperaturregelung mit Beeinflussung der Verlustleistung durch das Modulationsverfahren . . . . .	106
5.6.1	Verlustleistungsdifferenz zwischen einem kontinuierlichen und einem diskontinuierlichen Modulationsverfahren . . . . .	107
5.6.2	Hybrides diskontinuierliches Pulsweitenmodulations-verfahren . . . . .	111
5.6.3	Struktur und Aufbau des Sperrschichttemperaturregel-systems mit Verwendung der hybriden diskontinuierlichen Pulsweitenmodulation . . . . .	117
5.7	Temperaturregelung durch Variation der Stromamplitude . . . . .	120
5.7.1	Einfluss der Stromamplitude auf eine permanent erregte Synchronmaschine . . . . .	120
5.7.2	Stellbereich bei der Variation der Stromamplitude . . . . .	122
5.7.3	Struktur und Aufbau des Temperaturregelsystems bei Verwendung der Stromamplitude . . . . .	127
5.8	Kombination der Temperaturregelsysteme mit verschiedenen Stellgrößen . . . . .	130
5.8.1	Varianten zur Kombination der einzelnen Stellgrößen . . . . .	130
5.8.2	Struktur und Aufbau des kombinierten Temperaturregel-systems . . . . .	133
<b>6</b>	<b>Messungen zur Verifikation der Temperaturregelung</b>	<b>136</b>
6.1	Antriebsprüfstand . . . . .	137

6.2	Lastzyklen zur Erprobung der Temperaturregel-systeme . . . . .	139
6.3	Verifikation der Berechnungen zur Ermittlung der Sperrschichttemperatur . . .	141
6.4	Messungen zum Temperaturregelsystem basierend auf der Variation der Fre- quenz der Pulsweitenmodulation . . . . .	148
6.4.1	Auswertung der Sperrschichttemperaturmessungen in Bezug auf die Le- bensdauer . . . . .	152
6.4.2	Auswertung der Messungen der Verlustenergie des Wechselrichters und der PMSM . . . . .	154
6.5	Messungen zum Temperaturregelverfahren unter der Verwendung der diskonti- nuierlichen hybriden Pulsweitenmodulation . . . . .	157
6.5.1	Auswertung der Sperrschichttemperaturmessungen in Bezug auf die Le- bensdauer . . . . .	161
6.5.2	Auswertung der Messungen der Verlustenergie des Wechselrichters und der PMSM . . . . .	163
6.6	Messungen zum Temperaturregelverfahren basierend auf der Vorgabe einer Strom- amplitude . . . . .	165
6.6.1	Auswertung der Sperrschichttemperaturmessungen in Bezug auf die Le- bensdauer . . . . .	168
6.6.2	Auswertung der Messungen der Verlustenergie des Wechselrichters und der PMSM . . . . .	170
6.7	Messungen zu dem kombinierten Temperaturregelverfahren . . . . .	172
6.7.1	Auswertung der Sperrschichttemperaturmessungen in Bezug auf Lebens- dauer . . . . .	175
6.7.2	Auswertung der Messungen hinsichtlich des Verlustenergie der Wech- selrichters und der PMSM . . . . .	177
<b>A Anhang</b>		<b>179</b>
A.1	Topologien der Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	179
A.2	Schaltzustandskombinationen der Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	181
A.3	Raumzeigerebene bei den Drei-Punkt-Wechselrichtern . . . . .	182
A.4	Steuergesetz zur Pulsweitenmodulation der Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	183
A.5	Durchlassspannungen der Ventile bei dem NPC-Drei-Punkt-Wechselrichter . .	183
A.6	Ein- und Ausschaltenergien der Ventile bei dem NPC-Drei-Punkt-Wechselrichter	184
A.7	Durchlassspannungen der Ventile bei dem T-Typ-Drei-Punkt-Wechselrichter . .	185
A.8	Ein- und Ausschaltenergien der Ventile bei dem T-Typ-Drei-Punkt-Wechselrichter	186

---

A.9	Durchlassverlustleistungsgleichungen mit SVPWM-Modulationsverfahren für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	187
A.10	Schaltverlustleistungsgleichungen mit SVPWM-Modulationsverfahren für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	188
A.11	Durchlassverlustleistungsgleichungen mit DPWM-Modulationsverfahren für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	188
A.12	Schaltverlustleistungsgleichungen mit DPWM-Modulationsverfahren für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	190
A.13	Durchlassverlustleistungsgleichungen mit SVPWM-Modulationsverfahren für den NPC-Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	190
A.14	Schaltverlustleistungsgleichungen mit SVPWM-Modulationsverfahren für den NPC-Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	193
A.15	Durchlassverlustleistungsgleichungen mit SVPWM-Modulationsverfahren für den T-Typ-Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	193
A.16	Schaltverlustleistungsgleichungen mit SVPWM-Modulationsverfahren für den T-Typ-Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	196
A.17	Berechnete thermische Eigenimpedanzen aus der Ergebnissen den Messungen und der FE-Simulation für den NPC-Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	197
A.18	Berechnete thermische Eigenimpedanzen aus der Ergebnissen den Messungen und der FE-Simulation für den T-Typ-Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	199
A.19	Durchlassverlustleistungsgleichungen mit HDPWM-Modulationsverfahren für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	201
A.20	Schaltverlustleistungsgleichungen mit HDPWM-Modulationsverfahren für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	206
A.21	Daten der verwendeten PMSM und ASM . . . . .	207
A.22	Infrarotkammerbilder der IGBT-Leistungsmodule der Drei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	208
A.23	Simulationsergebnisse mit der Schaltfrequenz als Stellgröße für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	209
A.24	Simulationsergebnisse mit der Vaiation der Länge der Vollaussteuerungsbereiche als Stellgröße für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	211
A.25	Simulationsergebnisse mit der Vorgabe der Stromamplitude als Stellgröße für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	213
A.26	Simulationsergebnisse mit der Kombination der Stellgrößen für den Zwei-Punkt-Wechselrichter . . . . .	215

---

A.27 Messungen zu dem NPC-Drei-Punkt-Wechselrichter mit der Variation der Frequenz der Pulsweitenmodulation . . . . .	217
A.28 Messungen zu dem NPC-Drei-Punkt-Wechselrichter mit der Vorgabe einer Stromamplitude . . . . .	220
A.29 Messungen zu dem T-Typ-Drei-Punkt-Wechselrichter mit der Variation der Frequenz der Pulsweitenmodulation . . . . .	223
A.30 Messungen zu dem T-Typ-Drei-Punkt-Wechselrichter mit der Vorgabe einer Stromamplitude . . . . .	226
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>229</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>235</b>