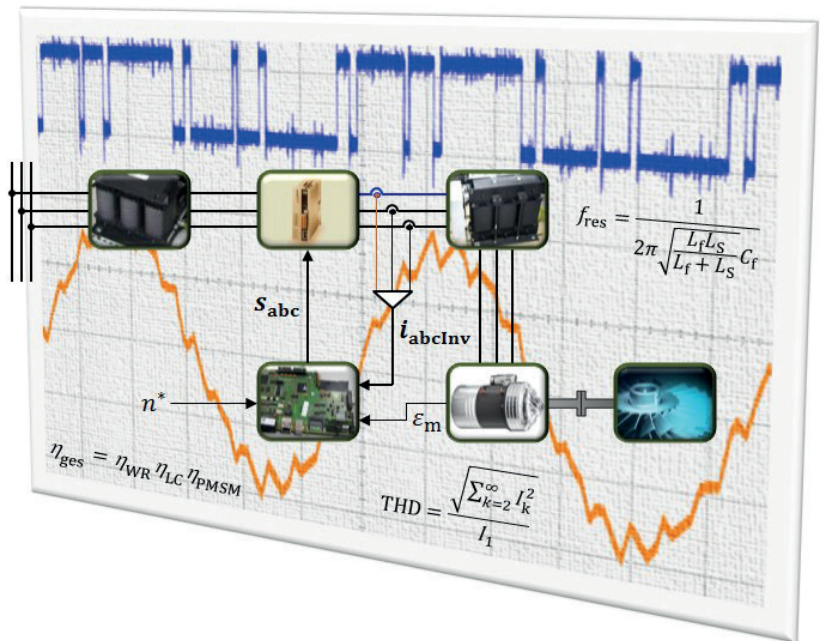


Klaus Peter

Untersuchung des Verlustverhaltens eines geregelt und mit optimierten Pulsmustern gespeisten Hochgeschwindigkeits- Antriebssystems



Berichte aus dem Fachgebiet
Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik

Band 9

Untersuchung des Verlustverhaltens eines geregelten und mit optimierten Pulsmustern gespeisten Hochgeschwindigkeits-Antriebssystems

Von der Fakultät Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

M. Sc. Klaus Peter

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Henke

Tag der mündlichen Prüfung: 02.10.2019

Paderborn 2019

Diss. EIM-E/344

Berichte aus dem Fachgebiet Leistungselektronik und
Elektrische Antriebstechnik

Band 9

Klaus Peter

**Untersuchung des Verlustverhaltens eines geregelten
und mit optimierten Pulsmustern gespeisten
Hochgeschwindigkeits-Antriebssystems**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7097-2

ISSN 1862-3492

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 • E-Mail: info@shaker.de

***„Es gibt kein größeres Hindernis des Fortgangs in den Wissenschaften
als das Verlangen, den Erfolg davon zu früh spüren zu wollen.“***

Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik (LEA) an der Universität Paderborn (UPB). Die folgenden Zeilen sind denjenigen Personen gewidmet, die mich während der Entwicklungsarbeiten begleitet, unterstützt und damit auch zum Gelingen dieser Arbeit mit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt an erster Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker für den eingeräumten Freiraum bei der Wahl des Forschungsthemas, die Begutachtung meiner Arbeit sowie das stetige Interesse an erzielten Zwischenergebnissen in Verbindung mit kritischen Fragestellungen, die zu weiteren Denkanstößen führten und das eigene Systemverständnis schärften. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Henke für die Übernahme des Koreferats bedanken.

Die angefertigte Dissertation spiegelt einen Großteil der Ergebnisse wieder, die im Rahmen eines dreijährigen Verbundprojekts durch Grundlagenforschung, Erarbeitung praxistauglicher Systemlösungen sowie experimentelle Validationen und Messungen erzielt wurden. Im Rahmen der guten Zusammenarbeit und Kooperation mit dem am Projekt beteiligten Industriepartner LTI Motion GmbH möchte ich mich besonders bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Fabian Mink bedanken. Die vor allem rasche und von hoher Motivation begleitete Integration bereitgestellter Teilergebnisse in die Zielhardware und die damit verbundene erfolgreiche Umsetzung und Demonstration des Funktionsprinzips an einem Maschinenlaststand in Verbindung mit den gewonnenen experimentellen Ergebnissen lieferten einen essentiellen und wertvollen Beitrag für diese Arbeit.

Am Fachgebiet LEA möchte ich mich bei allen Kollegen für die entspannte Arbeitsatmosphäre sowie das angenehme Betriebsklima bedanken. Namentlich hervorheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Michael Leuer sowie Herrn Dipl.-Ing. Christoph Schulte für die kooperative Zusammenarbeit im Rahmen von gemeinsam bearbeiteten Verbundprojekten. Meinen studentischen Abschlussarbeitern danke ich für ihr aufgebrachtes Engagement und die daraus entstandenen Lösungen und Ergebnisse. Ferner bedanke ich mich bei unserem mittlerweile pensionierten akademischen Direktor Herrn Dr.-Ing. Norbert Fröhleke, unserem ehemaligen Oberingenieur Herrn Dr.-Ing. Willhelm Peters sowie unserem aktuellen Oberingenieur Herrn Dr.-Ing. Oliver Wallscheid dafür, dass sie für fachliche Diskussionen jederzeit als Ansprechpartner zur Verfügung standen.

Zu guter Letzt bedanke ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern, die mich bei dem gesamten Promotionsvorhaben stets unterstützt und immer wieder ermutigt haben.

Klaus Peter
Beratzhausen, im November 2019

Kurzfassung

Hochgeschwindigkeitsantriebe kommen unter anderem in Vakuumpumpen, Turbodialverdichtern und Zentrifugen zum Einsatz und zeichnen sich typischerweise durch einen Betrieb mit konstanter Drehzahl über längere Zeiträume aus. Das in dieser Arbeit betrachtete Antriebssystem setzt sich aus einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit magnetgelagertem Rotor, einem Wechselrichter in 2- oder 3-Stufen-Topologie, diverser Sensorik sowie einem Antriebsregler zusammen. Dem Wechselrichter sollte zusätzlich noch ein LC-Filter nachgeschaltet sein, falls das Risiko einer thermischen Überbeanspruchung der elektrischen Maschine durch umrichterbedingte Zusatzverluste besteht. Hochtourige Antriebssysteme erreichen bereits alleine durch erbrachte Optimierungsanstrengungen im Maschinenentwurf Wirkungsgrade von bis zu 90 %.

In der vorliegenden Arbeit wurden Pulsmusterformen auf viertel- und halbschwingungssymmetrischer Basis ausgewählt und nach relevanten Kriterien wie die Eliminierung niederfrequenter Harmonischer oder die Minimierung des Oberschwingungsgehalts offline-optimiert. Hierzu wurde eine modifizierte Variante der Partikel-Schwarm-Optimierung verwendet. Ziel war die Substitution der trägerbasierten Dreiecksmodulation durch eine geeignete Modulatorstruktur zur Generierung und Ausgabe offline-optimierter Pulsmuster an den Wechselrichter. Im Verlauf der Arbeit wurde zudem herausgestellt, dass die herkömmliche feldorientierte Reglerstruktur, die standardmäßig für die Regelung von Antriebssystemen Verwendung findet, nicht mit den optimierten Pulsmustern kombiniert werden kann, was auf die fehlende Pulssymmetrie und die abweichenden Kurzzeitmittelwerte der Schaltsignale von der Stellspannung im aktuellen Reglertakt zurückzuführen ist. Daher wurde eine modellbasierte Reglerstruktur, die zum Teil steuernden Charakter aufweist, entworfen und implementiert. Durchgeführte Messungen an einem Laststand mit einer Bemessungsleistung von 150 kW ergaben im maximal zulässigen Arbeitspunkt gegenüber der dreiecksmodulierten Pulsweitenmodulation eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrads von bis zu 0,60 % bei Verwendung eines 2-Punkt-Wechselrichters mit ausgangsseitigem LC-Filter. Die Verbesserungen rühren dabei zum einen von der Synchronisation der Pulsweitenmodulation mit der Spannungsgrundschwingung und zum anderen von der günstigen Oberschwingungszusammensetzung der optimierten Pulsmuster her.

Neben dieser Realisierung wurde zusätzlich noch ein Wechselrichter-Verlustmanagement erarbeitet, das jedoch nur im Simulationsmodell umgesetzt und getestet wurde. Ein Optimierungsalgorithmus versucht im stationären Zustand dasjenige Pulsmuster aufzufinden, das ein benutzerdefiniertes Kriterium unter Einbezug von Mess- und Schätzgrößen wie zum Beispiel den Phasenverschiebungswinkel am besten erfüllt. Anhand eines ausgewählten Arbeitspunkts konnte gegenüber der herkömmlichen Standardmodulation und unter dem Kriterium der Schaltverlustminimierung eine Reduktion der Wechselrichterverluste von 15,4 % sowie unter dem Kriterium der Stromschwankungsminimierung eine Reduktion von 21,3 % erzielt werden.

Abstract

Electrical high-speed drives are used among other applications in vacuum pumps, turbo radial compressors and centrifuges and are generally characterized by long-term constant drive periods. The investigated drive system consists of a permanent magnet synchronous machine equipped with magnetic bearings, a 2-level- or 3-level-inverter, additional sensors and a drive controller. At the output side of the inverter a sine- or LC-filter should be additionally installed if the risk of thermal stress in parts of the electrical machine caused by inverter related losses is considered too high. High-speed drives already achieve high efficiencies up to 90% due to huge optimization efforts in machine design engineering.

In the present thesis quarter- and half-wave-symmetrical pulse pattern shapes were selected and offline-optimized according to relevant criteria like the elimination of low-frequency harmonics or the minimization of the entire harmonic content. For this purpose, a modified version of the Particle Swarm Optimization was used. The goal was to substitute the conventional sine-triangular modulation by an appropriate modulator structure which is capable of driving the inverter with offline-optimized pulse patterns that are generated from stored switching angle characteristics. As it turned out during the developing process, the conventional field-oriented control structure, which is the standard control strategy for electrical drives, is not compatible with offline-optimized pulse patterns due to the missing pulse symmetry and the deviation of the short-term average values of the pulsed voltages from the set voltage vector within one controller clock cycle. That is why a model-based control structure, which is partly characterized by an open-loop behavior, has been developed and implemented. Conducted measurements at a test stand with a rated power of 150 kW revealed at the maximum operating point and in comparison to the sine-triangular-modulation an increase of the total efficiency by approximately 0.60% if a 2-level-inverter with output LC-filter is used. Responsible for the improvements are the synchronization of the pulse width modulation with the voltage fundamental on the one hand and the favorable harmonic content composition of the offline-optimized pulse patterns on the other.

Besides the controller and modulator implementation, the concept of an inverter loss management was developed, implemented and tested in the simulation model. As soon steady state has been reached and detected, an optimization algorithm tries to find the most appropriate pulse pattern that fulfills a user defined criterion best. During the optimization process, the algorithm is also supplied with observed and estimated values like the phase angle for example. Simulation results for a selected operating point showed with regard to the sine-triangular-modulation that an inverter loss reduction of approximately 15.4% for the criterion of minimized inverter losses and a reduction of the inverter output current distortion of approximately 21.3% for the criterion of minimized current ripple are achievable.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	iv
Inhaltsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzungen und technische Fragestellungen	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Elektrisches Hochgeschwindigkeits-Antriebssystem	5
2.1 Hochgeschwindigkeitsmaschinen	6
2.2 Leistungselektronisches System	8
2.2.1 Netzgleichrichter und Spannungszwischenkreis	9
2.2.2 Wechselrichter und Halbleiterbauelemente	9
2.2.3 Motorfilter	11
2.2.4 Sensorik und Treiber	12
2.3 Antriebsregelung	12
2.3.1 Relevante Regelverfahren	13
2.3.2 Generierung der motorspeisenden Wechselspannung	15
2.4 Zusammenfassung	16
3 Modellierung der Regelstrecke	17
3.1 Permanentmagneterregte Synchronmaschine	18
3.1.1 Dreiphasiges Maschinenmodell	18
3.1.2 Transformation ins rotorfeste Koordinatensystem	20
3.1.3 Nichtlineare Eigenschaften	23
3.1.4 Mechanik	24
3.1.5 THD und Verlustleistung der PMSM	26

3.1.6	Signalflussplan der SPMSM.....	29
3.2	Dreiphasiges LC-Filter	29
3.2.1	Dreiphasige Schaltung.....	30
3.2.2	Transformation ins rotorfeste Koordinatensystem	30
3.2.3	Dreieck-Stern-Umwandlung.....	32
3.2.4	Nichtlineare Eigenschaften.....	32
3.2.5	Verlustleistung des LC-Filters.....	33
3.2.6	Signalflussplan des LC-Filters	34
3.3	Wechselrichter	37
3.3.1	Halbleiterbauelemente	37
3.3.2	2-Punkt-Wechselrichter	40
3.3.3	3-Punkt-Wechselrichter	43
3.3.4	THD und Verlustleistung des Wechselrichters	46
3.3.5	Signalflussplan des Wechselrichters	49
3.4	Zusammenfassung	50
4	Regelung des Antriebssystems	51
4.1	Stromregelung ohne wechselrichter Ausgangsseitiges LC-Filter.....	53
4.1.1	Analyse der Regelstrecke	53
4.1.2	Feldorientierte Regelung nach dem Betragsoptimum	57
4.1.3	Modellbasierte Reglerstruktur	68
4.1.4	Stabilitätsanalyse	72
4.1.5	Validation mittels Simulation.....	78
4.2	Stromregelung mit wechselrichter Ausgangsseitigem LC-Filter	80
4.2.1	Analyse der Regelstrecke	81
4.2.2	Reduktion der Systemordnung	84
4.2.3	Anpassung der modellbasierten Reglerstruktur.....	90
4.2.4	Validation mittels Simulation.....	92
4.2.5	Umrechnung der Motorströme in Filterströme.....	94
4.3	Entwurf der Drehzahlregelung	96
4.3.1	Auslegung des Drehzahlreglers nach Symmetrischem Optimum	98

4.3.2	Feldschwächung	100
4.3.3	Sollstrombegrenzung	102
4.3.4	Phasenregelschleife	106
4.3.5	Validation mittels Simulation	106
4.4	Zusammenfassung	108
5	Integration des Modulators	109
5.1	Grundlagen der dreiecksmodulierten PWM	111
5.1.1	Funktionsweise und Kenngrößen	111
5.1.2	Dreiecksmodulation für 2-Punkt-Wechselrichter	112
5.1.3	Dreiecksmodulation für 3-Punkt-Wechselrichter	119
5.2	Synchronisationsstruktur	122
5.3	Modulator	126
5.4	Validation mittels Simulation	128
5.5	Zusammenfassung	130
6	Pulsmusteroptimierung	131
6.1	Pulsmusterformen	132
6.1.1	Viertelschwingungssymmetrische Pulsmuster	132
6.1.2	Halbschwingungssymmetrische Pulsmuster	133
6.2	Optimierungsverfahren	135
6.2.1	Die klassische Partikel-Schwarm-Optimierung	135
6.2.2	Die winkelmodulierte Partikel-Schwarm-Optimierung	137
6.3	Verwendung der AMPSO zur Optimierung von Pulsmustern	138
6.3.1	Bildung und Konditionierung	138
6.3.2	Evaluation anhand relevanter Gütefunktionen	140
6.3.3	Flussdiagramm der AMPSO für einzelnen Aussteuerungsgrad	141
6.3.4	Ein illustriertes Beispiel	142
6.4	Generierung vollständiger Schaltwinkel-Kennliniensätze	143
6.4.1	Flussdiagramm zur Kennliniengenerierung	143
6.4.2	Optimierte Kennliniensätze für 2-Punkt-Wechselrichter	145
6.4.3	Optimierte Kennliniensätze für 3-Punkt-Wechselrichter	149

6.5	Erweiterung des Modulators.....	152
6.6	Validation mittels Simulation.....	154
6.6.1	Umschaltung von STPWM auf 2L-QWS-np7-SHE*.....	155
6.6.2	Umschaltung von STPWM auf 2L-HWS-np7-SHE.....	157
6.6.3	Umschaltung von STPWM auf 3L-QWS-np6-SHE.....	159
6.7	Zusammenfassung.....	162
7	Experimentelle Ergebnisse	163
7.1	Laststand.....	163
7.2	Untersuchte Pulsmuster.....	164
7.3	Messergebnisse.....	166
7.4	Besonderheiten.....	169
7.5	Zusammenfassung.....	170
8	Wechselrichter-Verlustmanagement.....	173
8.1	Pattern-Search-Algorithmus.....	175
8.2	Teilanalytische Schaltwinkelberechnung.....	177
8.3	Evaluation der Testmuster.....	180
8.4	Erweiterung der Schaltwinkelausgabe.....	181
8.5	Validation mittels Simulation.....	182
8.5.1	Minimierung der Stromverzerrung.....	182
8.5.2	Minimierung der Schaltverluste.....	185
8.6	Zusammenfassung.....	186
9	Fazit und Ausblick.....	187
9.1	Erarbeitete Systemlösung und erzielte Ergebnisse.....	187
9.2	Weiterführende Arbeiten.....	188
A	Anhang.....	189
A.1	Überführung von Systemgleichungen vom abc - ins dq -System.....	189
A.1.1	PM-Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten.....	189
A.1.2	Dreiphasiges LC-Filter.....	193
A.2	Analytische Berechnung der Wechselrichterverlustleistung.....	199
A.2.1	Durchlassverluste des 2-Punkt-Wechselrichters.....	199

A.2.2	Schaltverluste des 2-Punkt-Wechselrichters	201
A.3	Systemtheoretische Beschreibung der Regelstrecke	202
A.3.1	Teilübertragungsfunktion $G'_{sdd}(s)$	202
A.3.2	Teilübertragungsfunktion $G'_{sqd}(s)$	204
A.3.3	Teilübertragungsfunktion $G'_{sypd}(s)$	207
A.3.4	Teilübertragungsfunktion $G'_{sdq}(s)$	209
A.3.5	Teilübertragungsfunktion $G'_{sqq}(s)$	210
A.3.6	Teilübertragungsfunktion $G'_{sypq}(s)$	211
A.4	Zeitdiskrete Übertragungsfunktionen wichtiger Elemente.....	214
A.4.1	Zeitdiskrete Übertragungsfunktion des P-T ₁ -Glieds	214
A.4.2	Zeitdiskrete Übertragungsfunktion des I-Glieds	215
A.4.3	Zeitdiskrete Übertragungsfunktion des PI-Glieds	216
A.5	Pulsmusterformen.....	218
A.5.1	Pulsmusterformen für 2-Punkt-Wechselrichter	218
A.5.2	Pulsmusterformen für 3-Punkt-Wechselrichter	218
A.6	Laststands-Komponenten	219
A.6.1	Permanentmagneterregte Synchronmaschine.....	219
A.6.2	LC-Filter	220
A.6.3	Wechselrichter und Bauelemente	221
A.7	Lösung quartärer Polynome mittels der Galois-Theorie	223
A.7.1	Grundlagen der Galois-Theorie	223
A.7.2	Lösung der quadratischen Gleichung	224
A.7.3	Lösung der kubischen Gleichung	225
A.7.4	Lösung der quartären Gleichung	228
F	Formel- und Abkürzungsverzeichnis	231
F.1	Verwendete Formelzeichen	231
F.2	Variablenschreibweisen und mathematische Operatoren.....	239
F.3	Matrizen.....	239
F.4	Chemische Elemente und Verbindungen	240
F.5	Abkürzungen und Akronyme	240

Literaturverzeichnis.....	243
Lebenslauf.....	248