

Hans-Georg Schirmer

**Einschaltverfahren für PM-Line-
Start-Motoren zur Begrenzung des
Einschaltstoßes im Netz und im
Wellenstrang**

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik
Band 16

**SHAKER
VERLAG**



Einschaltverfahren für PM-Line-Start-Motoren zur Begrenzung des Einschaltstoßes im Netz und im Wellenstrang

Dipl.-Ing. Hans-Georg Schirmer
geboren in Worms

Vom Fachbereich Elektro- und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Kaiserslautern, 2019
D 386

Datum der mündlichen Prüfung:	26.07.2019
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Nienhaus
Prüfungsvorsitzender:	apl. Prof. Dr.-Ing. Daniel Görge
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 16

Hans-Georg Schirmer

**Einschaltverfahren für PM-Line-Start-Motoren
zur Begrenzung des Einschaltstoßes im Netz
und im Wellenstrang**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

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.: Kaiserslautern, TU, 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 978-3-8440-7060-6

ISSN 1866-5357

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

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	V
1. Einleitung	1
2. Aufbau und Eigenschaften permanentmagneterregter Line-Start-Motoren	5
2.1. Motoren mit Oberflächenmagneten	6
2.2. Motoren mit vergrabenen Magneten	7
3. Einschaltproblematik bei permanentmagneterregten Line-Start-Motoren	9
3.1. Direkteinschaltung von permanentmagneterregten Line-Start-Motoren	10
3.2. Netzurückwirkungen und Anlaufverhalten	10
3.3. Anwendung bekannter Einschaltverfahren	15
3.3.1. Verfahren zur Spannungsabsenkung	18
3.3.2. Vorschaltverfahren	19
3.4. Hochlauf mit Polumschaltung	21
3.4.1. Hochlauf mit untersynchroner Umschaltung	24
3.4.2. Hochlauf mit übersynchroner Umschaltung	25
3.5. Strategien zur Umsetzung der übersynchronen Umschaltung	28
4. Auslegungskriterien für die polumschaltbare Wicklung	31
4.1. Dahlanderwicklung zur Polumschaltung	32
4.1.1. Wahl der Spulenweite	34
4.1.2. Schaltungsvarianten	38
5. Simulation des Betriebsverhaltens von PMLS-Motoren mit Luftspaltmagneten	43
5.1. Methoden zur Simulation des Betriebsverhaltens	43
5.2. Modellierung und Simulation des stationären, synchronen Betriebsverhaltens	47
5.2.1. Simulationsmodell	47

5.2.2.	Ablauf des Berechnungsprogramms	48
5.2.3.	Erfassung der Ummagnetisierungsverluste	59
5.2.4.	Ermittlung von Drehmoment, Leistungsfaktor und Energieeffizienz	62
5.3.	Modellierung und Simulation des transienten Betriebsverhaltens	63
5.3.1.	Herleitung der Spannungsdifferenzialgleichungen	64
5.3.2.	Berücksichtigung von Stromverdrängungseffekten	69
5.3.3.	Inneres Drehmoment	73
5.3.4.	Mechanische Bewegungsdifferenzialgleichungen	73
5.3.5.	Solver zur Lösung der Differenzialgleichungen	75
5.3.6.	Modellierung und Parametrierung der Schaltvorgänge und -zustände	78
5.3.7.	Aufbau des Simulationstools für die übersynchrone Umschaltung	83
6.	Funktionsmusterentwurf und Simulationsergebnisse	87
6.1.	Käfigläuferbasismotor	87
6.2.	Auslegung der Dahlanderwicklung auf Basis des stationären Betriebsverhaltens	90
6.3.	Simulationsergebnisse des transienten Betriebsverhaltens	96
6.3.1.	Untersuchung der Wiederausaltung	96
6.3.2.	Gegenfeldbeanspruchung der Permanentmagnete	98
6.4.	Algorithmus zur übersynchronen Umschaltung	100
6.5.	Simulationsergebnisse des Einschaltverfahrens	109
7.	Prüfstands Aufbau	113
7.1.	Prüfstandskonzept	113
7.2.	Messaufbau für den transienten und den stationären Betrieb	114
8.	Entwurf einer Schaltung für die übersynchrone Umschaltung	119
8.1.	Anforderungen an die Schaltung	119
8.2.	Anforderung an die mechanischen Schütze	123
8.3.	Halbleiterschütz	125
8.4.	Synchronisation zur Netzspannung	127
8.5.	Ermittlung des Rotorwinkels und der Drehzahl aus der Polradspannung	128
8.6.	Software und Bedienungs Oberfläche	137

9. Messtechnische Muster- und Verfahrenserprobung	143
9.1. Messtechnische Untersuchung des stationären Betriebsverhaltens . . .	143
9.1.1. Überprüfung des Statorwicklungssystems	143
9.1.2. Untersuchung des stationären Betriebs und Vergleich mit den Simulationsergebnissen	145
9.1.3. Messtechnische Untersuchung der Ummagnetisierungs- und Rei- bungsverluste	150
9.2. Messtechnische Untersuchung des transienten Betriebsverhaltens . . .	153
9.2.1. Messtechnische Randbedingungen	153
9.2.2. Einfluss des Winkels im Moment der Wiedereinschaltung . . .	154
9.2.3. Vollständige übersynchrone Umschaltung	156
9.2.4. Einfluss der Belastung	158
9.2.5. Einfluss der Schwungmasse	162
10. Zusammenfassung und Ausblick	165
A. Anhang	169
A.1. Berechnung der magnetischen Spannung im Luftspalt	169
A.2. Ermittlung des Statorwiderstands und der Streuinduktivitäten	170
A.3. Ermittlung der Luftspaltflussdichte in den Permanentmagneten . . .	173
A.4. Herleitung der Spannungsdifferenzialgleichungen	174
A.5. Herleitung des Luftspaltdrehmoments	179
A.6. Parameterstudie zur Vergrößerung der axialen Länge	181
Abbildungsverzeichnis	183
Tabellenverzeichnis	187
Literaturverzeichnis	188