

## Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

# Sachar Spas

## Analytische Modellierung von Asynchronmaschinen mit konzentrierter Wicklung



### > Eigenschaften des ASM-Modells

- Universell einsetzbar (Wicklungstopologie, Geometrie)
- Leicht erweiterbar (z.B. Nut- oder Wickelkopfstreuung)
- Extrem effizient: Hohe Genauigkeit, sehr kurze Rechenzeit
- Sehr breites Anwendungsspektrum
- (Vorläufige) numerische Begrenzung auf  $v_{\text{max}} = 19$

### > Das ASM-Modell berücksichtigt

- ✓ Konzentrierte Wicklungen
- ✓ Mehrfache Ankermückwirkung
- ✓ Oberwellenmomente
- ✓ Stromverdrängung ( $K_p$ )
- ✓ Schrägung
- ✓ Sättigung
- ✓ Eisenverluste
- Nut- und Wickelkopf(streuung)

### > Fazit

- Umfangreiches Analysewerkzeug

# **Analytische Modellierung von Asynchronmaschinen mit konzentrierter Wicklung**

**Sachar Spas**

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

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Bolte

Die Dissertation wurde am 06.09.2017 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 25.10.2017 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 10.04.2018 statt.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. i.R. Heinz Bausch

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Bolte

Tag der Promotion: 10.04.2018

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 30

**Sachar Spas**

**Analytische Modellierung von Asynchronmaschinen  
mit konzentrierter Wicklung**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5962-5

ISSN 1863-0707

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

## Danksagung

Im Anschluss an mein ziviles Studium an der Universität der Bundeswehr München, nahm ich die Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der FEAM GmbH und am Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik der Universität der Bundeswehr München auf. Während dieser Zeit ist die vorliegende Arbeit entstanden.

Mein ganz besonderer Dank gilt dem Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling, dessen Unterstützung ich von meinem ersten Studientag an erfahren habe. Für die fachliche und die persönliche Betreuung und insbesondere für das mir entgegengebrachte Vertrauen bedanke ich mich ganz herzlich.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Bolte danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Koreferats. Für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses danke ich dem Herrn Univ.-Prof. i.R. Dr.-Ing. Heinz Bausch.

Des Weiteren möchte ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für das hervorragende Arbeitsklima, das von allen Mitarbeitern täglich aufs Neue kreiert wird, meinen Dank aussprechen. Dieses einzigartige Arbeitsumfeld war maßgeblich an der Entstehung dieser Arbeit beteiligt.

Herrn Dr.-Ing. Gurakuq Dajaku danke ich aufrichtig für die zahlreichen Diskussionen, die wir während meiner Zeit am Lehrstuhl führten, für die Tipps und Tricks in Bezug auf elektromagnetische Maschinenauslegung, die er mir in der Zeit gezeigt hat, und für die ermunternden Worte, die ich hin und wieder gebraucht habe.

Dem herausragenden Wissenschaftler und darüber hinaus einem hervorragenden Mentor, dem Herrn Dr. rer. nat. José-Luis Marqués-López, danke ich für die umfangreichen Erklärungen des „Stoffes“ während meines Studiums und für die stete Hilfs- und Diskussionsbereitschaft im Anschluss daran.

Nach wie vor bin ich der Frau Dr. phil. Katharina Riedel zutiefst verbunden. Sie hat mich während des gesamten Bewerbungsprozesses zum zivilen Studenten betreut und war maßgeblich daran beteiligt, dass ich an die Universität der Bundeswehr München kam.

Angesichts dessen was wirklich wichtig und wahr ist, danke ich dem Herrn Dr. phil. Abraham Ehrlich für seine langjährige Unterstützung.

Bei den „Leidensgenossen“ M. Sc. Andreas Baumgardt und den Brüdern M. Sc. Dmytro und Volodymyr Bilyi bedanke ich mich für ihre Gesellschaft innerhalb sowie außerhalb der Büroräume.

Meinen Eltern, meinen Brüdern und meinem engen Freundeskreis danke ich vom ganzen Herzen für Ihre Geduld, ihre offenen Ohren und die nötige Rückendeckung in schwierigen Phasen, die sie mir immer gaben und weiterhin geben.

München, September 2017

*Sachar Spas*



## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein analytisches Modell von Asynchronmaschinen mit konzentrierten Wicklungen, unter Berücksichtigung aller Feldoberwellen und der damit einhergehenden mehrfachen Ankerrückwirkungen, entwickelt. Auf die Unterschiede bezüglich der Serien- oder Parallelschaltung und der Stern-, Dreieck- oder der Stern/Dreieck-Schaltung im Stator wird eingegangen. Es werden schaltungsartspezifisch Spannungsgleichungen aufgestellt sowie Beziehungen zur Berechnung der asynchronen und der synchronen (Oberwellen-)Drehmomente hergeleitet. Darüber hinaus werden Hinweise zur Vermeidung von hohen synchronen Oberwellenmomenten angegeben. Der Weg zur Einbeziehung von Stromverdrängungseffekten wird ausführlich beschrieben. Der Einfluss von Nut- und Wickelkopfstreuung wird vernachlässigt, kann aber mittels Streuinduktivitäten in das Modell eingearbeitet werden.

Abschließend wird das analytische Modell anhand von FEM-Berechnungen validiert. Die Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung zueinander. Wie die Validierung des Modells zeigt, sollte die Berechnung der Statoroberströme einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden. Aus numerischen Gründen müssen die Ordnungszahlen begrenzt werden, sodass unter Umständen die Statoroberströme nicht genau genug bestimmt werden können. Dies ist eine Erkenntnis, die man bei der Nutzung des Modells berücksichtigen sollte. Neben dieser Erkenntnis, tritt im Prozess der Validierung die Mächtigkeit des analytischen Modells als Analysewerkzeug deutlich sichtbar in Erscheinung.

Ansonsten setzt das analytische Modell die üblichen Forderungen nach Linearität und idealen Materialeigenschaften voraus. Die daraus resultierenden vereinfachenden Annahmen sind diskutiert.

In Anbetracht der guten Übereinstimmung der Ergebnisse, im Verbund mit der deutlich kürzeren Dauer der Berechnungen, ist die Verwendung des entstandenen analytischen Modells in der Phase der Grobauslegung einer Asynchronmaschine mit konzentrierter Wicklung aus technischer und wirtschaftlicher Sicht empfehlenswert.



# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Vorgehen bei der Modellierung.....	2
2.1. Annahmen .....	4
3. Maxwell'sche Gleichungen .....	6
3.1. Coulomb-Eichung .....	8
3.2. Feldgleichungen für verschiedene Feldgebiete .....	9
3.2.1. Feldgleichungen für Gebiete mit vorgegebener Stromdichte und Magnetisierung.....	9
3.2.2. Feldgleichungen für elektrisch leitende Gebiete ohne vorgegebene Stromdichte .....	10
3.2.3. Feldgleichungen für elektrisch nichtleitende Gebiete .....	11
4. Lösung der Feldgleichungen für elektrisch nichtleitende Gebiete mit Strombelagsanregung .....	12
5. Spezielle Lösung des 4 – Gebiete Modells mit bewegtem Rotor und .....	16
Strombelagsanregung im Stator und Rotor .....	16
6. Modellierung von Wicklungen.....	23
6.1. Modellierung von konzentrierten Wicklungen .....	23
6.1.1. Wicklungsaufbau / Bezeichnungsschema.....	23
6.1.2. Relative Lage einer beliebigen Spule $A_{k,\rho,k}$ .....	25
6.1.3. Die Berechnung der Durchflutungsverteilung (MMK-Verteilung).....	28
6.1.4. Der Statorstrombelag .....	37
6.1.5. Beispielanwendungen des Wicklungsmodells.....	38
6.2. Modellierung von Käfigwicklungen.....	48
6.2.1. Unterschiedliche Modellierungsansätze der Käfigläuferwicklung .....	48
6.2.2. Berechnung der MMK-Verteilung des Käfigläufers mithilfe des .....	52
Wicklungsmodells für konzentrierte Wicklungen .....	52
6.2.3. Der Rotorstrombelag.....	56
7. Flussverkettungen und Induktivitäten .....	58
7.1. Flussverkettung statorseitiger Luftspaltfelder mit der Statorwicklung .....	58
7.2. Flussverkettung statorseitiger Luftspaltfelder mit den Rotormaschen.....	63
7.3. Flussverkettung rotorseitiger Luftspaltfelder mit den Rotormaschen .....	65
7.4. Flussverkettung rotorseitiger Luftspaltfelder mit der Statorwicklung .....	66
(primäre und sekundäre Ankerrückwirkung) .....	66
7.5. Flussverkettung der Felder der Statoroberströme mit der Statorwicklung .....	77
7.6. Flussverkettung der Felder der Statoroberströme mit den Rotormaschen .....	80
(tertiäre Ankerrückwirkung).....	80
7.7. Flussverkettung der Felder der Rotoroberströme mit den Rotormaschen .....	84
7.8. Flussverkettung der Felder der Rotoroberströme mit der Statorwicklung .....	85
(quartäre Ankerrückwirkung) .....	85

7.9. Zusammenfassung der Flussverkettungen und Bemerkungen zu einachsigen Rückwirkungen .....	87
8. Spannungsgleichungen und Drehmomentberechnung.....	89
8.1. Spannungsgleichungen des Stators .....	89
8.1.1. Stator-Spannungsgleichungen für Parallelschaltungen $a_p > 1$ .....	90
8.1.2. Stator-Spannungsgleichungen für Serienschaltungen $a_p = 1$ oder..... für Sonderfälle von Parallelschaltungen $ Z_1 - Z_2  = K_{SG} p_1 b''; b'' = 0,1,2,3 \dots$	91
8.2. Spannungsgleichungen des Rötors .....	92
8.2.1. Rotor-Spannungsgleichungen für Parallelschaltungen $a_p > 1$ .....	93
8.2.2. Rotor-Spannungsgleichungen für Serienschaltungen $a_p = 1$ oder .....	94
für Sonderfälle von Parallelschaltungen $ Z_1 - Z_2  = K_{SG} p_1 b''; b'' = 0,1,2,3 \dots$	94
8.2.3. Einbeziehung der Stromverdrängung in die Modellierung.....	94
8.3. Drehmomentberechnung .....	95
9. Validierung des Modells anhand von FEM-Simulationen.....	105
10. Zusammenfassung .....	112
11. Anhang.....	114
12. Literaturverzeichnis .....	141
13. Symbolverzeichnis .....	143