

Timur Werner

Geberlose Rotorlage- bestimmung in elektrischen Maschinen

Spannungsbasierte Verfahren
für permanentmagneterregte
Synchronmotoren



Springer Vieweg

Geberlose Rotorlagebestimmung in elektrischen Maschinen

Timur Werner

Geberlose Rotorlage- bestimmung in elektrischen Maschinen

Spannungsbasierte Verfahren
für permanentmagneterregte
Synchronmotoren

 Springer Vieweg

Timur Werner
Erlangen, Deutschland

Dissertation Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2018 u.d.T.: Timur Werner: „Spannungsbasierte Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage in permanentmagneterregten Synchronmaschinen ohne Lagegeber.“

1. Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

2. Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel

Tag der Promotion: 30. August 2017

ISBN 978-3-658-22270-3 ISBN 978-3-658-22271-0 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-22271-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Das von Herr Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens entgegengebrachte Vertrauen erlaubte es mir, an dem spannenden Thema mit den dazu notwendigen Freiheiten forschen zu dürfen. Seine fortwährende fachliche Begleitung und die zahlreichen Diskussionen bildeten wichtige Impulse auf dem Weg zu wissenschaftlichen Erkenntnissen im Rahmen der Arbeit. Die Übernahme von universitären Lehraufträgen und die Möglichkeit, die Aktivitäten der Universität im Bereich Formula Student Electric zusammen mit engagierten Studenten etablieren zu dürfen bereicherten meinen fachlichen und persönlichen Horizont. Dafür danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens aufrichtig.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel von der Technischen Universität München danke ich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Bei Herr Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und die anregenden Diskussionen über elektrische Maschinen.

Bei den Mitarbeiterinnen und den Mitarbeitern des Instituts möchte ich mich für die freundschaftliche Atmosphäre und die konstruktive Zusammenarbeit bedanken. Für die Unterstützung bei der technischen Umsetzung der Versuche gilt mein besonderer Dank Clemens Lariviere und Carsten Selke. Auch danke ich den zahlreichen Studenten, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten oder als Hilfswissenschaftler an dem Thema mitgewirkt haben, vor allem Tobias Krone, Florian Boseniuk, Bernhard Ullrich und Simon Weber.

Ganz besonders bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Lennart Baruschka, Thies Köneke, Dr.-Ing. Karsten Wiedmann, Dr.-Ing. Sebastian Tegeler und Dennis Kaczorowski für den anregenden fachlichen Diskurs, den geschätzten Rat und die tollen Zeiten auch außerhalb des fachlichen Umfelds.

Mein größter Dank gilt den Frauen in meinem Leben. Allen voran meiner Großmutter Martha Werner und meiner Mutter Svetlana Werner für ihre unerschütterliche Unterstützung und ihren Beitrag zu meiner Weiterentwicklung. Meiner Frau Angelina Werner für die Liebe und das entgegengebrachte Vertrauen. Meiner Tochter Emely Werner für ihre Neugier und die Möglichkeit, die Welt mit den Augen eines Kindes wieder erkunden zu dürfen.

Hannover im August 2017

Timur Werner

*Für Frauen und Mütter, die durch ihre Arbeit, Geduld und Liebe
stets zum Fortschritt mit beitragen*

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Nomenklatur | XI |
| Kurzfassung | XVII |
| Abstract | XIX |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Ausgewählte Grundlagen und Definitionen der elektrischen Energietechnik | 9 |
| 2.1 Modaltransformation | 9 |
| 2.1.1 Fortescue-Transformation | 11 |
| 2.1.2 Clarke-Transformation | 12 |
| 2.1.3 Park-Transformation | 14 |
| 2.2 Symmetriezustände von Dreiphasennetzen | 16 |
| 2.2.1 Symmetrisches Dreiphasensystem | 17 |
| 2.2.2 Unsymmetrisches Dreiphasensystem | 21 |
| 3 Modell des untersuchten Antriebssystems | 27 |
| 3.1 Randbedingungen | 27 |
| 3.2 Induktivität | 30 |
| 3.2.1 Induktivität in linearen Magnetkreisen | 30 |
| 3.2.2 Induktivität in nichtlinearen Magnetkreisen | 31 |
| 3.3 Elektrisches Motormodell | 38 |
| 3.3.1 Modellierung in Drehstromkoordinaten | 38 |
| 3.3.2 Modellierung im ruhenden kartesischen Koordinatensystem | 40 |
| 3.3.3 Modellierung im rotierenden kartesischen Koordinatensystem | 44 |
| 3.4 Zusammenfassung | 49 |
| 4 Vorevaluation von Ansätzen zur spannungsbasierten Rotorlageerfassung | 51 |
| 4.1 Nutzung von zwei Spulen eines Strangs | 53 |
| 4.1.1 Nutzbarkeit des gewonnenen Signals zur Bestimmung der Rotorlage | 53 |
| 4.1.2 Grundsätzliche Anforderungen an das Maschinendesign | 58 |
| 4.1.3 Implementierungsaufwand | 58 |
| 4.2 Auswertung eines stromlosen Strangs | 59 |
| 4.2.1 Nutzbarkeit des gewonnenen Signals zur Bestimmung der Rotorlage | 59 |
| 4.2.2 Grundsätzliche Anforderungen an das Maschinendesign | 60 |
| 4.2.3 Implementierungsaufwand | 60 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3 | Nutzung des Maschinensternpunktes | 61 |
| 4.3.1 | Nutzbarkeit des gewonnenen Signals zur Bestimmung der Rotorlage | 61 |
| 4.3.2 | Grundsätzliche Anforderungen an das Maschinendesign | 64 |
| 4.3.3 | Implementierungsaufwand | 64 |
| 4.4 | Zusammenfassung | 64 |
| 5 | Vorevaluation der Anregungsansätze | 67 |
| 5.1 | Grundsätzlicher Vergleich mit strombasierten Verfahren | 67 |
| 5.2 | Anregung mit einem Rechteckpuls | 70 |
| 5.3 | Anregung mit einem rotierenden HF-Signal | 73 |
| 5.4 | Anregung mit einem alternierenden HF-Signal | 76 |
| 5.5 | Zusammenfassung | 79 |
| 6 | Signalauswertung bei Anwendung der Pulsspannungsinjektion | 83 |
| 6.1 | Bestimmung der -2ten Harmonischen | 84 |
| 6.2 | Zusammenfassung | 87 |
| 7 | Anforderungen an das Maschinendesign | 93 |
| 7.1 | Kenndaten der herangezogenen Beispielmotoren | 93 |
| 7.2 | Verifikation der Induktivitätsmodelle anhand von FEM-Daten | 94 |
| 7.3 | Grundlegende Anforderungen an die Motorinduktivitätsverhältnisse | 99 |
| 7.3.1 | Bestimmung des optimalen Koeffizientenverhältnisses für die strombasierte Lagerfassung | 103 |
| 7.3.2 | Bestimmung des optimalen Koeffizientenverhältnisses für die nullspannungsbasierte Lagerfassung | 104 |
| 7.3.3 | Vergleich der aufgestellten Induktivitätskriterien für das strom- und das nullspannungsbasierte Verfahren | 109 |
| 7.4 | Einfluss der Motorgeometrie und der Eisensättigung durch die PM-Induktion | 109 |
| 7.5 | Zusammenfassung | 111 |
| 8 | Implementierung des Verfahrens | 113 |
| 8.1 | Aufbau des Versuchsstands | 114 |
| 8.2 | Verifikation der resolverbasierten Referenzmessung | 117 |
| 8.3 | Injektion des Anregungssignals | 118 |
| 8.4 | Messtechnische Erfassung des Nullspannungssignals | 129 |
| 8.5 | Bildung des Nullspannungsraumzeigers aus den Messdaten | 142 |
| 8.6 | Zusammenfassung | 143 |
| 9 | Betriebsverhalten des Verfahrens | 145 |
| 9.1 | Stationäres Verhalten | 147 |
| 9.1.1 | Leerlauf | 147 |
| 9.1.2 | Konstanter Betrieb unter Last | 150 |
| 9.2 | Transientes Verhalten | 156 |
| 9.2.1 | Drehzahlsprung | 156 |
| 9.2.2 | Drehmomentsprung | 159 |
| 9.3 | Zusammenfassung | 161 |

| | |
|--|------------|
| 10 Zusammenfassung und Ausblick | 163 |
| 10.1 Zusammenfassung der Arbeit | 163 |
| 10.2 Ausblick | 165 |
| Literaturverzeichnis | 167 |
| Anhang | 179 |
| 1 Stromsensorik | 179 |
| 2 Weitere Kenndaten der untersuchten Beispielmotoren | 182 |
| 2.1 Motor M1 | 183 |
| 2.2 Motor M2 | 183 |
| 2.3 Motor M3 | 192 |

Nomenklatur

Generelle Konvention

| | |
|--------------------------------|---|
| A, a | Konstante |
| \mathbf{A} | Matrix |
| A | Effektivwert |
| a | Variable |
| \hat{a}, \hat{A} | Amplitude |
| \bar{a}, \bar{A} | Mittelwert |
| \tilde{a}, \tilde{A} | Schätzwert bzw. Messwert |
| \vec{a}, \vec{A} | Vektor |
| $\underline{a}, \underline{A}$ | Zeitzeiger, komplexe Darstellung einer Wechselgröße |
| \vec{a}, \vec{A} | Raumzeiger |
| $ \dots $ | Betrag |
| $\Re\{\dots\}$ | Realteil einer komplexen Größe |
| $\Im\{\dots\}$ | Imaginärteil einer komplexen Größe |

Lateinische Buchstaben

| | |
|------------------|---|
| A | Verstärkungsfaktor |
| \vec{B} | magnetische Flussdichte |
| C | elektrische Kapazität |
| \mathbf{E} | Einheitsmatrix |
| \vec{H} | magnetische Feldstärke |
| J | Trägheitsmoment |
| L_a | Selbstinduktivität des Stranges a |
| M_{ab} | Gegeninduktivität zwischen den Strängen a und b |
| R | Widerstand |
| T | thermodynamische Temperatur |
| \mathbf{T} | Transformationsmatrix |
| T_{PWM} | Periodendauer der PWM |

| | |
|----------|---|
| Z | komplexe Impedanz |
| i | elektrischer Strom |
| idx | Ordnungszahl einer Oberschwingungsharmonischen bezogen auf die Grundschwingung |
| m | Drehmoment |
| m | Anzahl der Stränge |
| n | Drehzahl |
| p | Polpaarzahl |
| q | Lochzahl |
| u | elektrische Spannung |
| u_i | induzierte elektrische Spannung |
| u_n | Eine auf GND bezogene Potentialdifferenz des Sternmittelpunktes, die als Sternpunktspannung oder auch als Neutralleiterspannung bezeichnet wird |
| u_{zk} | Zwischenkreisspannung des Wechselrichters |

Griechische Buchstaben

| | |
|------------------------|---|
| γ | Auslenkung der Leitwertwelle aus der ψ_{PM} -Achse |
| θ | Rotorflusswinkel im $\alpha\beta$ -Koordinatensystem |
| δ | Absolutabweichung vom tatsächlichen Rotorflusswinkel |
| δ_{mess} | Relativabweichung der geberlosen Lageerfassung bezogen auf den Referenzgeberwert |
| ϵ | Fehler allgemein |
| χ | Winkel zwischen der d-Achse in dq0-Koordinaten und dem Winkel des resultierenden Luftspaltflusses |
| μ | magnetische Permeabilität |
| ν | Magnetisierungswinkel der Stränge bezogen auf den Strang a |
| η | Schrittweite bei Verwendung des Gradientenabstiegsverfahrens |
| ρ | Raumzeigerwinkel im dq-Koordinatensystem |
| φ | Raumzeigerwinkel im $\alpha\beta$ -Koordinatensystem |
| ξ | Wicklungsfaktor |
| ψ | magnetischer Verkettungsfluss |
| ψ_{PM} | Permanentmagnetfluss |
| ω | Raumzeigerkreisfrequenz im $\alpha\beta$ -Koordinatensystem, $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ |
| ω_e | Rotorflusskreisfrequenz im $\alpha\beta$ -Koordinatensystem, $\omega_e = \frac{d\theta}{dt}$ |

Indizes

tiefstehend

| | |
|-----------------|--|
| 1, 2, 0 | Mit-, Gegen- und Nullkomponente in Fortescue-Koordinaten |
| 00 | Nullkomponente des $\alpha\beta$ - oder dq0-Koordinatensystems |
| _100, _010 usw. | Variablenwert während des entsprechenden PWM-Schaltzustandes |
| _1o0 usw. | Variablenwert während des entsprechenden PWM-Schaltzustandes und der entsprechend offenen Klemme (in diesem Fall wäre die Klemme „b“ offen) |
| _x00 usw. | Wert, der aus einem Schaltzustand gewonnen wurde, bei dem nur eine Phase des Umrichters mit u_{zk} verbunden ist. Der entsprechende Schaltzustand wird auch als Einfachschaltzustand bezeichnet. |
| __xx0 usw. | Wert, der aus einem Schaltzustand gewonnen wurde, bei dem zwei Phasen des Umrichters mit u_{zk} verbunden ist. Der entsprechende Schaltzustand wird auch als Doppelschaltzustand bezeichnet. |
| N | Bemessungsgröße |
| anr | Anregungssignalgröße |
| _alt | Variablenwert, der aus der Anregung mit der alternierenden Hochfrequenzinjektion resultiert |
| a, b, c | Eine auf GND bezogene Komponente des Drehstromsystems (Klemmengrößen) |
| a1, b1, c1 | Eine Komponente der ersten Spule des Strangs a (Spulengröße) |
| an, bn, cn | Eine auf den Sternmittelpunkt bezogene Komponente des Drehstromsystems (Stranggrößen) |
| d, q | d, q-Komponente im rotorfesten Koordinatensystem |
| d'', q'' | d'', q''-Komponente im kartesischen Koordinatensystem, das mit der Grundschiebungsfrequenz rotiert und an dem Minimum der Leitwertwelle ausgerichtet ist |
| d(-2), q(-2) | d(-2), q(-2)-Komponente im kartesischen Koordinatensystem, dass mit -2facher-Frequenz bezogen auf die Grundschiebungsfrequenz rotiert |
| err | Fehleranteil |
| HF | Anteil, der aus der HF-Injektion resultiert |
| f | fundamentale Komponente; Grundschiebungskomponente |
| I | Variable, die aus der Auswertung aller drei Schaltzustandsmessungen 100, 010 und 001 resultiert |
| II | Variable, die aus der Auswertung aller drei Schaltzustandsmessungen 110, 101 und 011 resultiert |
| , h | Oberfeld bzw. Oberschiebung der Ordnung h |

| | |
|-----------------|---|
| harm | harmonischer Anteil |
| lin | linearer bzw. proportionaler Anteil |
| _trml | Variablenwert, der sich aus der Verwendung von Klemmengrößen ergibt |
| _mot | Variablenwert aus der Messung am Motor |
| _ph | Variablenwert, der sich aus der Verwendung von Stranggrößen ergibt |
| _ref | Variablenwert aus der Messung an der virtuellen, elektrisch symmetrischen Referenzmaschine |
| reg | Variablenwert, der sich aus dem Eingriff des Regelungssystems ergibt |
| res | Variablenwert, der aus dem Eingriff des Regelungssystems und des Anregungssignalgenerators resultiert |
| rslvr | Messwert, der aus der Auswertung des Referenzresolver resultiert |
| regrssn | Messwert, der aus der Bildung einer Regressionsgeraden über den Referenzresolververlauf resultiert |
| _rot | Variablenwert, der aus der Anregung mit einem hochfrequent rotierenden Raumzeiger resultiert |
| , soll | Sollwert |
| α, β | α, β -Komponente im statorfesten Koordinatensystem |
| σ | Streu- |
| abc | im Drehstromsystem |
| dq0 | im dq0-Koordinatensystem |
| $\alpha\beta 0$ | im $\alpha\beta 0$ -Koordinatensystem |
| dq(-2) | im kartesischen Koordinatensystem, dass mit -2 facher-Frequenz bezogen auf die Grundswingungsfrequenz rotiert |
| dq(4) | im kartesischen Koordinatensystem, dass mit 4 facher-Frequenz bezogen auf die Grundswingungsfrequenz rotiert |

hochstehend

| | |
|----------|--|
| * | konjugiert komplexe Größe |
| , | die zweite Form der dq0-Transformation |
| δ | differentielle Größe |

Operatoren

| | |
|-----------------|--|
| \underline{a} | Drehoperator $\hat{=} e^{j\frac{2}{3}\pi}$ |
| s | Laplace-Operator |

Akronyme

| | |
|---------|--|
| ASW | Applikationssoftware |
| DGL | Differentialgleichung |
| GND | Erdpotenzial |
| EMK | Elektromotorische Kraft |
| EMV | Elektromagnetische Verträglichkeit |
| HANN | Harmonic Activated Neural Network |
| HF | Hochfrequenz |
| IPM | Interior Permanentmagnet Synchronous Motor |
| KOS | Koordinatensystem |
| PMSM | permanentmagneterregte Synchronmaschine |
| IPMSM | permanentmagneterregte Synchronmaschine mit innen liegenden Magneten ¹⁾ |
| SPMSM | permanentmagneterregte Synchronmaschine mit außen liegenden Magneten ²⁾ |
| PWM | Pulsweitenmodulation |
| SSOA | Save Sensorless Operation Area |
| SPM | Surface-Mounted Permanentmagnet Synchronous Motor |
| SS-MRAS | Self-Sensing Model Reference Adaptive System |
| rotHF | rotierende Hochfrequenzinjektion |
| altHF | alternierende Hochfrequenzinjektion |
| KR | Kriterium |
| SKR | Subkriterium |
| SNR | Signal-to-Noise-Ratio |

¹⁾Interior Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor

²⁾Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor

Kurzfassung

Um der stets aktuellen Forderung nachkommen zu können, den Hardwareaufwand in Antriebssystemen und die Kosten für die Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Messpfadredundanzen weiter zu senken, wird unter anderem angestrebt, neben dem mechanischen Rotorlagegeber auch die dedizierte Stromsensorik durch weniger aufwendige und somit kostengünstigere Lösungsansätze zu ersetzen. Vor allem bei kleineren Antrieben mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen im Bereich von bis zu 10 kW wird dieses Streben immer deutlicher.

Die deutliche Reduktion des Strommessbedarfs für die positionsgeberlose Rotorlagebestimmung stellt hierbei einen wichtigen Schritt zur Erfüllung der geschilderten Anforderung dar. Im Drehzahlbereich von $n > 10\%n_N$ kann dazu auf die bereits etablierten und industriell erprobten Verfahren zurückgegriffen werden, die auf der elektromotorischen Kraft (EMK) basieren und weniger genaue bis keine zusätzliche Strommessung zur Bestimmung der Rotor- bzw. Rotorflusslage erfordern. Im darunterliegenden Drehzahlbereich bis einschließlich Stillstand basieren mit Abstand die meisten Verfahren auf der direkten Verwendung des Stroms oder seiner zeitlichen Ableitung entweder als gemessene Größe zur Auswertung der Anregung oder als Anregungssignal. Des Weiteren wird die Kenntnis des Strangstromverlaufs verwendet, um den negativen Einfluss der stromabhängigen Sättigungseffekte und damit die Lastabhängigkeit der anisotropiebasierten Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage zu minimieren. Viele der bekannten Arbeiten fokussieren sich daher auf die Reduktion der Anzahl der noch erforderlichen Stromsensoren innerhalb der strombasierten Verfahren zur geberlosen Lagebestimmung.

Ein anderer Ansatz liegt in der Verwendung der Spannung als Medium sowohl für die Anregung als auch für die Erfassung des rotorlagemodulierten Signals. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ermittlung und Evaluation der Möglichkeiten zur ausschließlichen spannungsbasierten Rotorlageerfassung bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen im Drehzahlbereich von $n < 10\%n_N$ und in der Bewertung der Lagebestimmungsgüte bei unterschiedlichen Lastzuständen. Des Weiteren werden dazu auch weiterführende Ansätze für Anregungs-, Aufbereitungs- und Auswertungsstrategien erarbeitet und kombiniert, um das spannungsbasierte Verfahren hinsichtlich Signalgüte, Messdynamik, Lastabhängigkeit und Störung der Antriebsregelung weiter zu optimieren.

Die dabei abgeleiteten und gegenübergestellten Anforderungen an das Maschinendesign sowohl für strom- als auch für spannungsbasierte Verfahren bieten neue Einblicke in die fundamentalen Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Klassen geberloser Lageerfassung.

Schlagworte: sensorlose Regelung, geberlose Rotorlagebestimmung, Rotorwinkelermittlung nahe Stillstand, Nullspannung, permanentmagneterregte Synchronmaschine, Maschinendesign für geberlosen Betrieb, Symmetriezustände in elektrischen Antriebssystemen, Modaltransformation, HF Injektion

Abstract

In order to further reduce the hardware complexity of electrical powertrain systems and to minimize the costs for an increased reliability, which is based on measurement redundancy, not only the replacement of a dedicated position sensor but also of current sensors by cheaper solutions plays a major role. This trend is especially evident for permanent magnet synchronous machines with a rated power of up to 10 kW.

This requirement can be met with a considerable reduction of current sensing demand for position sensorless operation.

For speeds above $10\%n_N$, a wide range of industrially proven methods based on the electromotive force can be used, which are able to provide the needed results with less current sensing quality. This picture changes for speeds below $10\%n_N$. In this speed range by far most of the already existing sensorless position sensing methods rely on either a high bandwidth current sensing signal or its derivative. Additionally, the current shape information is needed in order to compensate the negative influence of current-based saturation effects and the load dependency of the sensorless techniques, which are based on the anisotropy evaluation. Therefore, many of the actually known publications are focused on further reduction of current sensors and its costs for the current-based sensorless methods.

A completely different approach just uses voltage for signal injection as well as for evaluation in order to reduce the current sensing demand. This work focuses on investigation and evaluation of methods with solely voltage-based rotor position estimation in speed ranges below $10\%n_N$. Furthermore, the performance of the method during different load profiles is analysed. Therefore, additional signal injection, conditioning and evaluation strategies are developed and combined, in order to improve the voltage-based approach with regard to signal quality, measurement dynamics, load dependency and distortion of the powertrain control.

The machine design requirements, which are developed and compared in this thesis for optimal position detection at low speed based on current or on voltage sensing provide new insights into the fundamental similarities and differences of the two classes of position sensorless rotor angle estimation.

Keywords: sensorless control, sensorless rotor position estimation, rotor angle estimation near standstill, zero-sequence voltage, permanent magnet synchronous machine, machine design for encoderless operation, symmetry states in electric drives, modal transformation, HF injection



1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit hat die Online-Bestimmung der Rotorlage von permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) ohne einen dedizierten Rotorlagegeber vom Stillstand bis $n \approx n_N/10$ zum Gegenstand. Die Besonderheit der angestellten Untersuchungen liegt in der zusätzlichen Randbedingung, dass für den genannten Zweck die Anwendung der Stromsensoren weitgehend vermieden werden soll.

Der betrachtete Zielanwendungsbereich beschränkt sich dabei auf permanentmagneterregte Synchronmaschinen mit Zahnpulsenwicklung, die eine Sternschaltung der Stränge aufweisen und von einem zweistufigen Spannungszwischenkreisumrichter mit einer kaskadierten Strom- und Drehmomentregelung angesteuert werden. Die Stellgröße wird über eine Pulsweitenmodulation (PWM) am Ausgang des Umrichters umgesetzt. Die Validierung der erarbeiteten Lösungen zur geberlosen Bestimmung der Rotorlage erfolgt an einem Antriebssystem im Spannungszwischenkreisbereich von kleiner als 60 V und in einer Leistungsklasse von unter 10 kW, wobei eine Übertragung der vorgestellten Ansätze auch für Systeme mit höheren Spannungs- und Leistungsebenen denkbar ist.

Die Gründe für die geberlose Rotor- bzw. Rotorflusslageerfassung liegen in dem Wunsch nach Reduktion des mechanischen Aufwands, des Bauraumbedarfs, der Herstellungs- sowie Wartungskosten und der höheren Robustheit der elektrischen Antriebssysteme durch Wegfall der Lagesensorik [1], [2], [3]. Bei einigen Antriebssystemen wird aufgrund der Sicherheits- und/oder Verfügbarkeitsanforderungen eine Redundanz der Rotorlageerfassung gefordert, so dass in dem Fall die geberbasierten Verfahren durch die geberlosen ergänzt werden [4].

Die existierenden Ansätze zur geberlosen Lageerfassung können zunächst in Abhängigkeit von der Drehzahl in zwei Gruppen gegliedert werden: In Verfahren für den Drehzahlbereich oberhalb von $n_N/10$ und in diejenigen vom Stillstand bis $n_N/10$.

Im oberen Drehzahlbereich stützen sich die Ansätze hauptsächlich auf die Auswertung der Klemmenspannung, die durch die Rotation des permanentmagnetfeldbehafteten Läufers induziert wird und die auch als Gegeninduktionsspannung oder elektromotorische Kraft (EMK) bekannt ist. Allgemein können hier die Methoden zur Erfassung der Lage als weitgehend ausgereift aufgefasst werden und erfreuen sich daher einer breiten Verwendung [4], [5]. Um die Vielfalt der Lösungsansätze auf diesem Gebiet aufzuzeigen, wird auf die Übersicht im Bild 1.1 verwiesen, die sich aus den Arbeiten von [6], [7] und [8] ergibt.

Im Bereich bis $n_N/10$ generieren die permanentmagneterregten Synchronmaschinen in der Regel eine geringe Gegeninduktionsspannung, so dass die Relation zwischen der erforderlichen Mindestgenauigkeit der EMK-Messung und dem dazu notwendigen Messaufwand ungünstige Verhältnisse annimmt [8]. Im Stillstand entfällt die Gegeninduktionsspannung und somit auch die geschilderte Möglichkeit zur Bestimmung der Rotorlage gänzlich. Daher verlieren hier die passiven Verfahren, die im oberen Drehzahlbereich eingesetzt werden, an Bedeutung [9] und stattdessen versprechen hier aktive, also auf Einprägung von Anregungssignalen basierende Methoden eine zwischen technischen und wirtschaftlichen Aspekten

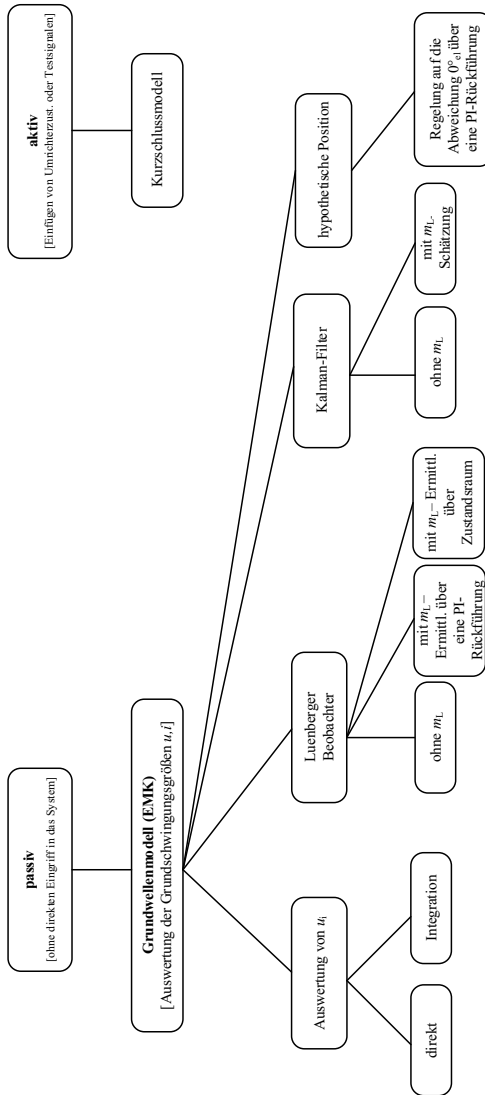


Bild 1.1: Überblick über die Verfahren zur sensorlosen Rotorlagerefassung bei $n > 10\% n_N$.

ausgewogenere Lösung zu bieten. Dabei sind maßgeblich Verfahren vertreten, die auf der Auswertung der magnetischen Anisotropie fußen [10]. Die Bestimmung der Rotorlage in diesem Drehzahlbereich stellt aktuell immer noch eine Herausforderung hinsichtlich der Auswertbarkeit und Nutzbarkeit der rotorlageabhängigen Eigenschaften des jeweiligen Motors dar. Angesichts der zahlreichen Merkmale, die die entsprechenden Verfahren kennzeichnen, erscheint der Versuch, einen Überblick über die dazu bereits entwickelten Ansätze wie im Bild 1.1 zu geben weniger zielführend, so dass in dem Fall auf eine alleinige Übersicht der Merkmale zur Kennzeichnung des jeweiligen Lagebestimmungsverfahrens im unteren Drehzahlbereich verwiesen wird (s. Bild 1.2). Die Darstellung ist von außen nach innen zu lesen und die inneren Ebenen stellen dabei eine Untermenge der oberen dar, so dass auch die Reihenfolge der Fragen verdeutlicht werden soll, die beantwortet werden müssen, um ein bestimmtes Verfahren klassifizieren zu können.

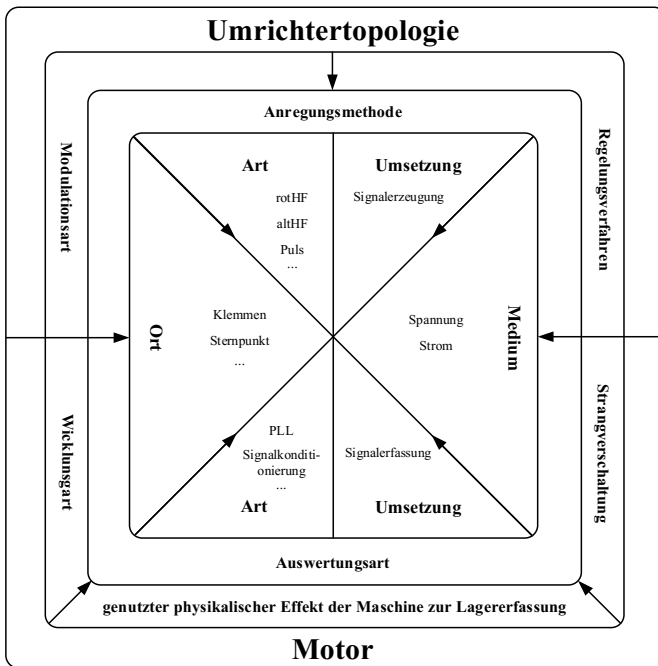


Bild 1.2: Überblick über die Merkmale, die zur eindeutigen Beschreibung und Bewertung von Verfahren zur geberlosen Rotorlagebestimmung bei $n \leq 10\% n_N$ zu berücksichtigen sind. Die Pfeile sollen dabei verdeutlichen, dass es sich bei der Beschreibung des jeweiligen Verfahrens empfiehlt, mit der höheren Systembeschreibungsebene zu beginnen und sich hin zur niedrigeren vorzuarbeiten.

Die bekanntesten Verfahren zur geberlosen Lagebestimmung im unteren Drehzahlbereich

basieren auf der Einprägung von Spannungssignalen und der messtechnischen Erfassung mit anschließender Auswertung entweder des Strangstromes oder seiner zeitlichen Änderung. In der Literatur werden die Ansätze dabei weniger nach der Auswertung der Messsignale sondern mehr nach dem Anregungsansatz unterschieden. Dazu gehören die INFORM³-Methode [11], die rotierende [12], [13] und die alternierende [14] Hochfrequenzinjektion (kurz HF-Injektion), die alle erstmals in den 90er Jahren vorgestellt wurden [9]. In allen drei Fällen wird dabei dem zur Regelung des Antriebs notwendigen Grundschwingungsstrom noch ein in Relation dazu hochfrequenter Strom mit deutlich kleinerer Amplitude überlagert, der aus der Anregungsspannungseinprägung resultiert. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Ansätze zur geberlosen Lagebestimmung, die sich durch die Einprägung von Spannungssignalen und die Auswertung der daraus resultierenden Strangströme oder deren zeitlichen Ableitung kennzeichnen, zusammenfassend als strombasierte Verfahren deklariert. Um aus den erfassten Stromwerten die zur effektiven Lagebestimmung notwendige Information extrahieren zu können, muss das dafür herangezogene Strommessverfahren in der Regel eine hohe Bandbreite und eine hohe Genauigkeit im gesamten Messbereich aufweisen [9],[15]. Dadurch wird auch erkennbar, dass die Güte und die Funktionstüchtigkeit der genannten geberlosen Ansätze maßgeblich von dem Signal-Rausch und -Störabstand, der Bandbreite und der Robustheit des verwendeten Strommess- und Auswertungsverfahrens beeinflusst wird [16], so dass zumindest eine teilweise Verschiebung des Aufwands vom dedizierten Rotorlagegeber hin zur Stromsensorik festzustellen ist. Wie der Tabelle 1 entnommen werden kann, weisen die bekanntesten physikalischen Prinzipien zur Messung der Ströme neben eigenen vielfältigen Komplikationen auch einen Zusammenhang zwischen der erreichbaren Genauigkeit und dem Mess- oder Auswertungsaufwand auf.

Daher wurden im Verlauf der letzten Jahre diverse Abwandlungen der oben genannten drei Methoden vorgestellt, die sich vor allem auf die Reduktion der Anzahl der erforderlichen Stromsensoren (s. Tabelle 2), [17], die Analyse von alternativer Stromesstechnik [18], [19], die Optimierung der Messsignalabtastung und -auswertung [20], [21], [22], [23] sowie der darauf aufbauenden Rotorlageschätznachführungen fokussieren [8], [2]. Eine Übersicht dazu kann den Ausführungen von Briz [5] entnommen werden.

In Antriebssystemen der anfangs genannten Leistung ist der Kostenanteil der Stromsensorik an den Gesamtkosten nicht zu vernachlässigen und somit auch der Druck zur Reduktion der Stromsensoranzahl oder der Anforderungen an die Sensorgüte stärker ausgeprägt. In sicherheitsrelevanten Anwendungen ist oft auch eine Redundanz der Lagebestimmung erforderlich, die sich auf unterschiedlichste physikalische Signalquellen stützt. In diesen Fällen erscheint es vorteilhaft zu sein, zusätzlich zur Strommessung die Spannung als Auswertungssignalquelle zu verwenden. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden solche Ansätze als spannungsbasierte Methoden aufgefasst.

Entsprechend den Ausführungen von Briz [5], [24] erfahren die Methoden, die auf der ausschließlichen Nutzung der Spannung basieren als dem Medium zur Anregung und anschließenden Nutzsignalübertragung zur geberlosen Bestimmung der Rotorlage eine geringere Verbreitung in der wissenschaftlichen Literatur als die strombasierten Ansätze. Auf dem Gebiet der spannungsbasierten Verfahren sind vor allem die Arbeiten der Forschergruppen um Holtz [25], [1], [26], [15], Briz [27], [28], Consoli [29], [30], [31], [32], Moreira [33], Scaglione [34], [35], Iwaji [36], [37], [38], Thiemann [39] und Xu [40], [41] zu nennen.

³Indirekte Flussermittlung durch Online Reaktanz-Messung

In Anlehnung an die Strukturierung von Briz [5] bietet die Tabelle 1.1 eine erweiterte Übersicht der einzelnen bereits veröffentlichten spannungsbasierten Verfahren, die nach Anregungs- und Auswertungsmethoden sortiert sind. Die genannten Verfahren wurden sowohl an PM-Synchronmaschinen als auch an Käfigläufer-Induktionsmotoren erprobt. Aus der Tabelle 1.1 geht hervor, dass in der wissenschaftlichen Literatur die Umsetzung der spannungsbasierten Verfahren entweder unter Anwendung der Strangspannungen und/oder des Motorsternpunkts präsentiert wird aber keine weiteren Bereiche der Motorwicklung für die genannte Aufgabe beleuchtet werden. Daher wird in der vorliegenden Arbeit ein weiterer Sektor der Maschinenwicklung einer analytischen Untersuchung auf seine Eignung für eine rein spannungsbasierte geberlose Rotorlagebestimmung hin unterzogen und den anderen bereits in der Wissenschaft dazu verwendeten Maschinenbereichen gegenübergestellt.

Auch die Wahl des Anregungsverfahrens spielt eine entscheidende Rolle für das Verhalten der geberlosen Lageerfassung. Dazu können der Literatur zahlreiche Vergleiche der Anregungsmethoden im Zusammenhang mit den strombasierten Verfahren entnommen werden [8], [5], [3]. Während in den Ausführungen von Holtz [8] auch die sternpunktspannungsbasierte Methode mit in den Vergleich einbezogen wird, werden von Briz [5] auch die spannungsbasierten Ansätze mit rotierender HF-Injektion untersucht. Bei den Analysen von Xu [40], [41] erfolgt eine Gegenüberstellung der rotierenden und der alternierenden HF-Injektion bei Anwendung der Spannung am Sternpunkt und des Strangstromes, wobei die alternierende Injektion als die vorteilhaftere beschrieben wird. Ein zusammenhängender analytischer Vergleich und eine darauf aufbauende Bewertung der rotierenden, alternierenden und der gepulsten Injektion im Zusammenhang mit den strom- und sternspannungsbasierten Verfahren, vor allem im Hinblick auf Stör- und Nutzgrößen der zu messenden Signale bei Verwendung des zuvor genannten Maschinentyps, ist bisher nicht bekannt. Das wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen, was einen weiteren wissenschaftlichen Beitrag darstellt.

Um aus dem gemessenen Spannungssignal die Rotorlage bestimmen zu können, ist zunächst eine Trennung zwischen dem Stör- und Nutzanteil notwendig. Dazu ist aus der wissenschaftlichen Literatur eine Vielzahl an Ansätzen bekannt [45], [46], [15], [47], [38]. Wenn die Spannung am Sternpunkt als das zur Rotorlagebestimmung ausgewertete Medium herangezogen wird, so besteht vor allem die Notwendigkeit, die Harmonische zweiter und vierter Ordnung⁴⁾ voneinander trennen zu müssen [46]. Zur Lösung der Aufgabe wird in der vorliegenden Arbeit die Anwendung des HANN⁵⁾-Ansatzes [48] zur Extraktion der Nutzharmonischen aus dem Sternspannungsmesssignal untersucht, was in der Konstellation in der wissenschaftlicher Literatur bisher nicht präsentiert wurde. Die Implementierung des genannten Ansatzes ist vor allem in dem Ziel begründet, eine effektive Extraktion umzusetzen, in der rechenlastige Operationen vermieden werden. Das stellt den wesentlichen Unterschied zu den bisher veröffentlichten Verfahren im Zusammenhang mit der sternspannungsbasierten Rotorlagebestimmung dar.

Einen weiteren Aspekt bei der Umsetzung einer geberlosen Rotorlageerfassung stellt der Aufbau der Motoren dar. Es existieren zahlreiche Modellierungsansätze, die die Einflüsse der Stator- und der Rotorauslegung auf die geberlosen Verfahren beleuchten. Vor allem die Forschergruppen von Bianchi [49], [50], [51], [52], [53], [54] und um Sul [55], [56], [57] befassten sich ausgiebig mit dem Thema. Die dabei angestellten Untersuchungen

⁴⁾bezogen auf die Frequenz der Grundschwingung

⁵⁾Harmonic Activated Neural Network