

## Vorwort zur 2. Auflage

In der vorliegenden 2. Auflage des Buchs *Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe* wurden neben der Elimination verbliebener Fehler zahlreiche Stoffergänzungen vorgenommen. So wurden in den Kapiteln 1 - 4, in denen die Modellbildung sowie grundsätzliche Regelstrategien von Drehstromantrieben und Netzankopplungen im Vordergrund stehen, die Zusammenhänge zwischen strangbezogener Darstellung von Differentialgleichungen und ihrer Gestalt bei Stern- und Dreieckschaltung detaillierter herausgearbeitet. Darüber hinaus wurde das Kapitel über die permanentmagneterregte Synchronmaschine um die optimale Aufteilung der Statorstromkomponenten zur Erzielung maximalen Drehmoments bei magnetischer Unsymmetrie ergänzt. Auch wurde der Abschnitt über die Feldschwächung der permanentmagneterregten Synchronmaschine komplett überarbeitet. In Bezug auf netzrückspeisefähige Antriebe stehen nun mehr Hintergrundinformationen zum Einsatz eines Dämpfungsreglers zur Verfügung. Außerdem wird für einphasige Netzeinspeisungen eine neue Variante zur Netzfrequenzadaption des für die Erzeugung der virtuellen Komplementärphase erforderlichen Filters vorgestellt.

Ein Schwerpunkt der Buchüberarbeitung lag in der Umgestaltung und Erweiterung der Beschreibungen der zum Einsatz kommenden regelungstechnischen Verfahren. So wurde im Kapitel 5 der Stromzustandsreglerentwurf auf eine näher an die Regelungstheorie angelehnte Basis gestellt sowie die Maßnahmen bei Stellgrößenbegrenzungen mit dem Ziel der Aufrechterhaltung der Entkopplung der Statorstromkomponenten erweitert. Auch wurden die bislang noch vorhanden gewesenen Lücken beim Stabilitätsnachweis im Begrenzungsfall geschlossen. Des Weiteren wurde ein neuer Abschnitt über regelungstechnische Maßnahmen bei starken Sättigungserscheinungen, insbesondere bei der permanentmagneterregten Synchronmaschine, eingefügt. Kleinere Ergänzungen gab es noch bei der Totzeitkompensation und bei der Diskretisierung des Modells der magnetisch unsymmetrischen permanentmagneterregten Synchronmaschine.

Im Kapitel 6 wurde die Beschreibung der Drehzahlzustandsregelung um die Anwendung auf einen Zweimassenschwinger sowie um die Integration einer dynamischen Querstromsollwertvorsteuerung ergänzt. Die Bestimmung der Reglerparameter wurde beim Drehzahlzustandsregler ebenso wie beim Stromzustandsregler auf ein anderes Entwurfsverfahren umgestellt. Außerdem wurde der Stabilitätsnachweis beim Erreichen von Stellgrößenbegrenzungen auf mehr Betriebssituationen ausgeweitet sowie die dynamische Querstromsollwertvorsteuerung in die Begrenzungsstrategie mitaufgenommen.

Das Kapitel 7 über den Beobachtereinsatz in Antriebssystemen wurde um einen Drehzahl- und Lastmomentbeobachter für einen Zweimassenschwinger sowie um einen Gegenspan-

nungsbeobachter zur Verbesserung des Systemverhaltens im Feldschwäcbereich bei nicht genau genug bekannten Maschinenparametern erweitert. Kleinere Realisierungsvarianten in der bisherigen Beschreibung des Drehzahl- und Lastmomentbeobachters wurden aus Platzgründen dafür weggelassen.

Komplett neu ist in der 2. Auflage des Buchs das Kapitel 8. Darin wird erläutert, wie aus den Typenschildangaben einer Drehstrommaschine Rückschlüsse auf die in den zugehörigen Differentialgleichungen verwendeten Maschinenparameter gezogen werden können und wie einige dieser Maschinenparameter durch Identifikationsverfahren genauer bestimmbar sind.

Schließlich sind im Anhang die in den Kapiteln 5 und 6 neu verwendeten regelungstechnischen Methoden, wie das zweistufige PI-Zustandsreglerentwurfverfahren bei bereits vorhandenem P-Zustandsregler oder die einfache Erweiterung eines P-Zustandsreglers auf Systeme mit Totzeit, ausführlich beschrieben.

Die Arbeiten zur Neuauflage dieses Buchs haben erneut viel Zeit in Anspruch genommen, was meine Familie wieder geduldig ertragen musste. Mein Dank gilt daher vor allem ihr. Danken möchte ich aber auch meinen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern, insbesondere Herrn Artur Root, Herrn Andreas Huber und Herrn Jonas Rink für die Weiterentwicklung der Software, mit der die im Buch beschriebenen Verfahren verifiziert wurden, sowie für die Erstellung der jeweiligen Oszillogramme. Schließlich gilt mein Dank erneut dem VDE Verlag, namentlich Herrn Bernd Schultz, für die weiterhin stets gute, verlässliche und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Ettlingen, im September 2017

*Uwe Nuß*

## Vorwort zur 1. Auflage

Der durch den Wettbewerb und durch technische Notwendigkeiten bedingte Innovationsdruck lässt die Anforderungen an die Genauigkeit, Geschwindigkeit und Effizienz von industriellen Bearbeitungs-, Transport- und Prüfprozessen fortwährend steigen. Für elektrische Antriebe als Kernstück vieler dieser Prozesse bedeutet das, dass immer höhere Anforderungen an ihre Leistungsfähigkeit gestellt werden. Neben dem Antriebsmotor und das ihn speisende Frequenzrichterleistungsteil spielt hierbei insbesondere die hochdynamische Regelung des Antriebssystems eine zentrale Rolle.

Dieses Buch trägt dem Bestreben nach einer immer höheren Antriebsdynamik Rechnung, indem es zunächst ausführlich die für die Antriebsregelung verwendeten Maschinenmodelle beschreibt und anschließend darauf basierend die regelungstechnischen Möglichkeiten erörtert, mit denen die gestellten Aufgaben bestmöglich gelöst werden können.

Um sich angesichts der Fülle von in der Praxis vorkommenden Antriebsvarianten nicht im Detail zu verlieren, konzentriert sich dieses Buch auf die industriell für hochdynamische Anwendungen am häufigsten eingesetzten Antriebslösungen: die frequenzrichter- gespeiste Asynchron- und permanentmagneterregte Synchronmaschine. Linearmotoren werden zwar nicht explizit behandelt, ihre regelungstechnische Modellierung entspricht aber weitgehend derjenigen von permanentmagneterregten Synchronmaschinen, so dass die hierfür vorgestellten Regelverfahren sinngemäß auch auf Linearmotoren angewandt werden können.

Arbeiten die beschriebenen Antriebe im generatorischen Betrieb, dann muss die im Zwischenkreis anfallende elektrische Energie entweder über Bremswiderstände in unerwünschte Wärmeenergie umgewandelt oder mittels Netzwechselrichtern energieschonend – in der Regel dreiphasig – ins Versorgungsnetz zurückgespeist werden. Angesichts immer knapper werdender Energieressourcen widmet sich dieses Buch auch den regelungstechnischen Aspekten der zuletzt genannten Möglichkeit intensiv. Aber auch die einphasige NetZRückspeisung, wie sie bei Photovoltaikanlagen vorkommt, wird – allerdings nur als Einführung für die dreiphasige Rückspeisung bei elektrischen Antrieben – behandelt.

Nach der regelungstechnischen Modellbildung der genannten Regelstrecken in den Kapiteln 2, 3 und 4 sowie einem einführenden Kapitel über Raumzeiger wird im Kapitel 5 der Versuch unternommen, für den Entwurf der Stromregelkreise, die das jeweilige Herzstück aller beschriebenen Gesamtsysteme sind, eine einheitliche Vorgehensweise zu schaffen. Um hierbei eine sehr hohe Regelungsdynamik zu erzielen, werden grundsätzlich zeitdiskrete Zustandsregler eingesetzt, weshalb sich auch die vorangehende Modellbildung

intensiv der Zustandsraummethodik als adäquates Beschreibungsmittel für das Streckenverhalten widmet.

Während die Stromregelung allen beschriebenen Systemen gemein ist, unterscheiden sich die dem Stromregelkreis überlagerten Regelkreise der beschriebenen Systeme deutlich. So liegt bei Drehstromantrieben häufig die Aufgabe vor, die Motordrehzahl und zusätzlich eventuell noch die Position der Motorwelle oder einer damit mechanisch verbundenen Komponente zu regeln, während bei der aktiven Netzein- und -rückspeisung die Regelung der Zwischenkreisspannung im Fokus der Betrachtungen steht. Die Funktionsweise, Struktur und Parametrierung all dieser überlagerten Regelkreise wird im Kapitel 6 erläutert. In Kapitel 7 wird schließlich der Frage nachgegangen, wie nicht messbare, von den jeweiligen Reglern aber benötigte Größen – typischerweise mithilfe eines Beobachters – geschätzt werden können.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass die im Text enthaltenen Diagramme auf Simulationen basieren. Dadurch lassen sich die erläuterten Zusammenhänge wesentlich klarer darstellen. Manche Zeitverläufe können dadurch überhaupt erst sichtbar gemacht werden. Dass die realen Prozesse sich im Grundsatz genau so verhalten, wurde in entsprechenden Untersuchungen hinreichend ausführlich verifiziert.

In Anbetracht der Fülle an existierenden Antriebsregelverfahren will und kann dieses Buch – selbst bei der vorgenommenen Auswahl der beschriebenen Antriebsregelstrecken – nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erheben. So wird beispielsweise ein bedeutendes Antriebsregelverfahren, die so genannte *Direkte Selbstregelung* [DEPE85] – im englischen Sprachgebrauch in leicht abgewandelter Form und auf [TAKA86] basierend als *Direct Torque Control* [POHJ94] bezeichnet –, nicht behandelt. Der Grund hierfür ist, dass sich das Buch auf eine quasilineare Streckenbeschreibung und deshalb naheliegenderweise auch auf lineare Regelverfahren konzentriert. Die in [DEPE85, TAKA86, POHJ94] beschriebenen oder darauf aufbauenden Regelverfahren sind jedoch ebenso wie das beispielsweise in [KHAM92] erläuterte hochgradig nichtlinear. Zwar sind sie bei speziellen Applikationen, insbesondere bei sehr niedriger Schaltfrequenz und gleichzeitig hoher Drehzahl quasilinearen Regelverfahren oft sogar überlegen. Bei den meisten industriellen Anwendungen ist die Schaltfrequenz jedoch so hoch, dass sich die verfahrensspezifischen Vorteile kaum auswirken, dagegen Nachteile wie das erzeugte Frequenzspektrum und die damit zusammenhängende Geräuscentwicklung durchaus.

Bei dem gewählten Schwerpunkt des Buchs, die staggliednahen Antriebsregelkreise zu optimieren, war auch kein Raum mehr, um so genannte drehgeberlose Antriebsregelverfahren detailliert zu beschreiben. Ebenso wenig konnte das wichtige Thema der automatischen Identifikation und Adaption der Regelstreckenparameter behandelt werden. Dem interessierten Leser kann diesbezüglich nur das Studium der betreffenden Spezialliteratur empfohlen werden. Als Einstiegshilfen hierfür dienen beispielsweise die Übersichten bzw. Einführungen in [SCHR93, BOSE96, QUAN99, BECK01, SCHR01, MICH03, DERF07].

Das vorliegende Buch basiert auf regelungs- und antriebstechnischen Vorlesungen, die ich für Studierende eines Master-Studiengangs an der Hochschule Offenburg halte. Seinen Ursprung hat es jedoch in meiner Habilitationsschrift [NUSS94], in der ebenfalls die Regelung elektrischer Antriebe mithilfe von Zustandsraumverfahren im Vordergrund stand. In meiner dazwischen liegenden Industrietätigkeit auf dem Gebiet geregelter elektrischer Antriebe konnte ich viele der zuvor erarbeiteten Grundlagen umsetzen und weiterentwi-

ckeln sowie dabei eine Menge fachspezifische Erfahrungen sammeln, was nun in Form dieses Buchs weitergegeben werden soll.

Der Inhalt des Buchs geht weit über den in meinen Vorlesungen angebotenen Stoff hinaus. Er eignet sich gleichermaßen auch für interessierte Studierende anderer Hochschularten und Studiengänge sowie für im Beruf stehende Ingenieure, die sich mit der Regelung elektrischer Antriebe befassen.

Bezüglich mathematischer Voraussetzungen wird davon ausgegangen, dass der Leser Kenntnisse besitzt, wie sie in den Mathematikvorlesungen an Hochschulen gelehrt werden. Insbesondere wird von der Matrizenrechnung intensiv Gebrauch gemacht. Auf dem Gebiet der Regelungstechnik sollten für den Leser Strukturbilder sowie die Laplace- und z-Transformation gängige Hilfsmittel sein, wenngleich von den beiden Transformationen nur ab und zu Gebrauch gemacht wird. Die Kenntnis der Zustandsraummethodik ist ebenfalls von Vorteil. Weil dieser Punkt oft nur in geringerem Umfang erfüllt sein wird als die vorausgehenden, enthält das Buch einen Anhang, in dem fast alle Zustandsraumverfahren erläutert werden, von denen in den einzelnen Kapiteln Gebrauch gemacht wird. Eine noch tiefergehendere Auseinandersetzung mit Zustandsraumverfahren wird vom Leser nicht verlangt. Schließlich wird in leistungselektronischer Hinsicht ein gewisses Grundverständnis für die Funktionsweise von Frequenzumrichtern bzw. Wechselrichtern vorausgesetzt.

Bedanken möchte ich mich für das Zustandekommen dieses Buchs vor allem bei meiner Familie. Mit großer Geduld hat sie die vielen Stunden hingenommen, während der ich mich mit der Anfertigung des Manuskripts beschäftigt habe. Darüber hinaus erhielt ich von ihr auch tatkräftige Unterstützung bei der Konvertierung handschriftlicher Entwürfe in Textdokumente. Besonderen Dank möchte ich auch meinen akademischen Mitarbeitern, Herrn Andreas Böhringer, Herrn Johannes Huschle, Herrn Martin Maier und Herrn Jens Schwab aussprechen. Sie haben in mühevoller Detailarbeit die hard- und softwareseitigen Grundlagen geschaffen, ohne die die dem Buch unmittelbar vorausgegangenen praktischen Untersuchungen nicht hätten stattfinden können. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei Herrn Matthias Essig für das Korrekturlesen von Teilen des Manuskripts. Schließlich gilt mein Dank auch dem Verlag für die gute, verlässliche und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Ettlingen, im Februar 2010

*Uwe Nuß*