

# **BLDC-Motor mit schlankem Zwischenkreis am einphasigen Netz**

Ventilatoranwendungen

Ralph Wystup



Universitätsverlag Ilmenau

2018

# Impressum

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Die dieser Publikation zugrunde liegende Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau im Jahr 2017 unter dem Titel „Dynamische Feldschwächung bei am einphasigen Netz betriebenen EC-Motoren mit schlankem Zwischenkreis“ als Dissertation vorgelegen und ist online mit der URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017000461](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017000461) erschienen.

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### **Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

**ISBN** 978-3-86360-170-6 (Druckausgabe)

**URN** [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018100015](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018100015)

---

Titelfoto: [photocase.com](http://photocase.com) | AlexFlint

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Stand der Technik</b>	<b>13</b>
<b>2 Elektrisches Verhalten von EC-Motoren</b>	<b>17</b>
2.1 Betriebsverhalten an verschiedenen Versorgungsnetzen	17
2.2 Vereinfachte Spannungsgleichungen eines EC-Motors im rotorfesten kartesischen Koordinatensystem ohne Sättigungsverhalten	21
2.3 Abweichungen von den vereinfachten Spannungsgleichungen aufgrund des Sättigungsverhaltens	25
2.4 Leistungsbilanz und Luftspaltdrehmoment ohne Sättigungsverhalten	30
<b>3 Dynamische Feldschwächung bei Synchronmaschinen</b>	<b>32</b>
3.1 Grundprinzip der dynamischen Feldschwächung	32
3.2 Grundsätzliche Anforderungen an den Zeitverlauf des feldbildenden Stromes	34
3.3 Bestimmung des optimalen Zeitverlaufs für den feldbildenden Strom	36
3.3.1 Berechnung des Zeitverlaufs der Zwischenkreisspannung	37
3.3.2 Bestimmung der optimalen regelungstechnischen Parameter	39
3.4 Auswirkungen der dynamischen Feldschwächung auf die Leistungsbilanz	43
3.5 Grenzen der dynamischen Feldschwächung	45
<b>4 Entwurf einer optimierten PMSM für die dynamische Feldschwächung</b>	<b>50</b>
4.1 Grundlegende Anforderungen an den Blechschnitt des Statorblechpaketes	51
4.2 Minimierung des Nutrastrmomentes	52
4.3 Analytische Abhängigkeit der regelungstechnischen Parameter von den geometrischen Abmessungen des Blechschnittes	57
4.3.1 Berechnung der Polradspannung	58
4.3.2 Berechnung der Stranginduktivität	61
4.3.3 Berechnung des Strangwiderstandes	66
4.4 Optimierung der geometrischen Abmessungen in Abhängigkeit der regelungstechnischen Parameter	67
<b>5 Experimentelle Überprüfung des linearen physikalischen Verhaltens</b>	<b>71</b>
5.1 Der Maschinenstand	71
5.1.1 Der Prüfling	72
5.1.2 Der analoge Motoremulator	75
5.2 Die Leistungsendstufe mit Kapazitätsdekade und Spannungsversorgung	78

5.3	Die Signalistwerterfassung	80
5.4	Das dSpace-Steuerungssystem	82
5.4.1	Aufbau der Stromregelung	83
5.4.2	Aufbau der Drehzahlregelung	86
5.4.3	Online-Modellabgleich zur Bestimmung der wichtigsten Modellparameter	86
5.4.4	Online-Leistungsberechnungen zur Überprüfung des Motorentwurfs	87
5.5	Offline-Modellabgleich	89
5.5.1	Berechnung der Endstufenverluste des Zwischenkreises	89
5.5.2	Offline Schätzung der Motorparameter mittels Kalman-Filter	90
5.6	Aufbau des vollständigen Prüfstandes	92
<b>6</b>	<b>Betriebsverhalten des 12N10P-PMSM am einphasigen Versorgungsnetz</b>	<b>93</b>
6.1	Ergebnisse aus der Prüfstandskalibrierung mit dem analogen Motoremulator	93
6.2	Bestimmung der Motorparameter vom analogen Motoremulator mithilfe eines nichtlinearen Kalman-Filters	95
6.3	Bestimmung der Verlustparameter für die Endstufe	99
6.4	Bestimmung der regelungstechnischen Parameter des 12N10P-PMSM anhand des nichtlinearen Kalman-Filters	101
6.5	Bewertung der Einsetzbarkeit der dynamischen Feldschwächung	105
6.5.1	Betriebsverhalten des 12N10P-PMSM am Standardzwischenkreis	105
6.5.2	Gegenüberstellung des Betriebsverhaltens zwischen 12N10P-PMSM und einem Serienmotor für den Lüfterbetrieb	107
6.5.3	Diskussion der Ergebnisse	112
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>114</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>117</b>
8.1	Formelverzeichnis	117
8.2	Abkürzungsverzeichnis	124
8.3	Berechnung des Kopplungsfaktors aus Klemmen- und Stranginduktivität	125
8.4	Transformation der Strangspannungs-Differentialgleichungen aus dem statorfesten Drehgrößensystem in das rotorfeste Raumzeiger-Koordinatensystem	126
8.5	Transformation von Leistungsgrößen aus dem statorfesten Drehgrößensystem in das rotorfeste Raumzeiger-Koordinatensystem	128
8.6	Berechnung der Modulations-Pulsbreitenintervalle zur Bestimmung der minimalen Zwischenkreiskapazität	129

8.7	Berechnung des maximalen Spannungsrippels als Funktion einer gegebenen Zwischenkreiskapazität	129
8.8	Berechnung des Zahnflusses zur Bestimmung der Polradspannung	130
8.9	Berechnung von Strang- und Klemmeninduktivität anhand des Knotenpotentialverfahrens	136
8.10	Berechnung des Nutleitwertes für eine gegebene Nutgeometrie beim Lüftermotor 12N10P-PMSM	137
8.11	Berechnung der Nutinduktivität für eine gegebene Nutgeometrie beim Lüftermotor 12N10P-PMSM	139
8.12	Literaturverzeichnis	141