

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	3
1.2	Gliederung der Arbeit	6
2	Grundlagen	9
2.1	Elektrischer Antrieb mit Permanentenerregter Synchronmaschine	9
2.2	Permanentenerregte Synchronmaschinen	12
2.2.1	Aufbau und Funktionsweise	12
2.2.2	Eisensättigung	15
2.2.3	Radialkräfte	17
2.2.4	Begriffsdefinitionen	21
2.2.5	Modellierung	23
2.3	Wechselrichter	29
2.4	Regelung 3-phasiger PSM	34
2.4.1	Stromregelung	35
2.4.2	Drehmomentsteuerung	38
2.5	Mehrphasige PSM	43
3	Stand der Technik	49
3.1	Modellierung	49
3.2	Kompensation von Drehmomentoberwellen im fehlerfreien Zustand	53
3.3	Regelung nach Fehlereintritt	55
4	Konzept eines sicheren elektrischen Antriebs	59
4.1	Forschungsfragen	61
4.2	Wissenschaftliche Zielsetzung	66
5	Modellierung und Parameteridentifikation	
	multi-3-phasiger PSM	69
5.1	Mathematische Beschreibung	69
5.1.1	Allgemeines Modell	70
5.1.2	Beschreibung in rotorfesten Koordinaten	74

5.1.3	Zeitdiskretes Modell	77
5.1.4	Lineares Modell	79
5.2	Analyse der magnetischen Kopplung	80
5.2.1	Modellierung der magnetischen Kopplung	81
5.2.2	Auswirkungen auf das Drehmoment	86
5.2.3	Vergleich verschiedener Verschaltungsvarianten	90
5.2.3.1	Drehmoment	91
5.2.3.2	Radialkräfte	93
5.3	Parameteridentifikation	96
5.3.1	Flussverkettungen	96
5.3.2	Differentielle Induktivitäten	99
5.3.3	Aufteilung der gemittelten Flussverkettungen	102
6	Regelung multi-3-phasiger PSM	107
6.1	Regelung im fehlerfreien Zustand	107
6.1.1	Drehmomentsteuerung für multi-3-phasige PSM	108
6.1.1.1	Modellgleichungen	112
6.1.1.2	Rückkopplungen im Regelkreis	114
6.1.1.3	Approximationen der Flussverkettungen	114
6.1.1.4	Berechnung der potentiellen Lösungen für die Sollströme	116
6.1.1.5	Bestimmung der optimalen Sollströme	119
6.1.2	Resonante Regler zur Oberwellenkompensation	121
6.1.2.1	Auslegung des zeitkontinuierlichen Reglers	123
6.1.2.2	Diskretisierung des Reglers	126
6.1.3	Adaptive Vorsteuerung zur Oberwellenkompensation	127
6.1.3.1	Adaption der Koeffizienten	130
6.1.3.2	Entkopplung von nomineller Regelung und adaptiver Vorsteuerung	134
6.2	Regelung im Fehlerfall	137
6.2.1	Auswirkungen von Fehlern im Wechselrichter	138
6.2.2	Anpassung der Ansteuerung des fehlerhaften Teilantriebs	141
6.2.2.1	Voraussetzungen für einen Weiterbetrieb	141
6.2.2.2	Symmetrischer Kurzschluss	142
6.2.2.3	Anpassung der Stromregelung	145
6.2.3	Kompensation des Drehmomentfehlers	148

7	Evaluation	151
7.1	Versuchsaufbau	151
7.1.1	Wechselrichter	152
7.1.2	Signalverarbeitung und Messtechnik	153
7.1.3	Versuchsmotoren	157
7.2	Parameteridentifikation	157
7.2.1	Phasenwiderstand	158
7.2.2	Flussverkettungen	159
7.2.3	Differentielle Induktivitäten	164
7.2.4	Drehmomentkennfeld	167
7.2.5	Permanentmagnetflussverkettung und absolute Induktivitäten	169
7.2.6	Übertragungsverhalten zwischen Drehmoment und Winkelbeschleunigung	171
7.3	Validierung des Simulationsmodells	175
7.4	Regelung im fehlerfreien Zustand	180
7.4.1	Drehmomentharmonische beim Betrieb an unterschiedlichen Arbeitspunkten	181
7.4.2	Kompensation von Drehmomentharmonischen	185
7.5	Regelung im Fehlerfall	192
7.5.1	Betrieb mit angepasster Stromregelung	193
7.5.2	Aktiver Kurzschluss	195
7.5.3	Kompensation des Drehmomentfehlers	200
8	Zusammenfassung	203
	Anhang	205
A.1	Ergänzungen zum Abschnitt 5.2 Analyse der magnetischen Kopplung	205
A.1.1	Phasenwinkel der Induktivitätsgrundwelle bei fünf Polpaaren	205
A.1.2	Parallelverschaltung von Spulen zu einer Phase	205
A.1.3	Weitere Verschaltungsmatrizen	206
A.1.4	Weitere Induktivitätskoeffizienten	207
A.1.4.1	Induktivitätskoeffizienten der 12/8 V30-PSM	207
A.1.4.2	Induktivitätskoeffizienten der 12/8 V90-PSM	208

A.1.4.3	Induktivitätskoeffizienten der 12/10 V30-PSM	209
A.1.4.4	Induktivitätskoeffizienten der 12/10 V180-PSM	209
A.2	Modellierung Wechselrichter	212
Abkürzungsverzeichnis		217
Symbolverzeichnis		219
Tabellenverzeichnis		229
Abbildungsverzeichnis		236
Literaturverzeichnis		237