

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Kurzfassung	XIII
Abstract	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Definition der Winkel und Bezugssysteme der PSM	5
2.2 Allgemeines Spannungsdifferentialgleichungssystem der dreisträngigen PSM im statorfesten Bezugssystem	6
2.3 Das vereinfachte Hauptwellenmodell der PSM im dq-System	7
2.4 Das dreisträngige Flussmodell der PSM mit Oberwellen und Sättigungseinflüssen	10
2.4.1 Induktivitätsbestimmung mittels Methode der eingefrorenen Permeabilitäten	13
2.4.2 Bestimmung der differentiellen Induktivitätsmatrix mittels Methode der eingefrorenen Permeabilitäten	16
2.4.3 Drehmomentberechnung aus der magnetischen Koenergie	16
2.4.4 Koenergie im dq-System	20
3 Fehlertolerante Antriebstopologien	24
3.1 Einleitung und Begriffsdefinitionen	24
3.2 Überlegungen zum AKS als sicheren Betriebszustand	26
3.3 Arten und Einordnung fehlertoleranter Antriebstopologien	28
3.3.1 $n \times 3$ -strängige Topologien	31
3.3.2 Vollbrückengespeiste Topologien (H-Topologien)	33
3.4 Wicklungen für mehrsträngige, fehlertolerante Antriebe	35
3.4.1 Induktive Kopplung von Teilsystemen	37
3.4.2 Wicklungseigenschaften vor und nach Fehlerfall	42
3.4.3 Beispielwicklungen für $n \times 3$ -Topologien mit Zonenplänen und Felderreggerkurven	44
3.4.4 Beispielwicklungen für H-Topologien mit Zonenplänen und Felderreggerkurven	46
3.5 Koordinatentransformationen für mehrsträngige Systeme	48
3.5.1 Mehrfach dq-Transformation für $n \times 3$ -Topologien	48
3.5.2 Vektorraumzerlegung für $n \times 3$ -Topologien (Vector Space Decomposition)	50
3.5.3 Vektorraumzerlegung für beliebige Strangzahlen	53
3.6 Zur Problematik der Stromüberschwingungen bei mehrsträngigen Antrieben . .	55

4	Modellierung fehlertoleranter Antriebstopologien	58
4.1	Allgemeines elektrisches Ersatzschaltbild mehrsträngiger PSM	59
4.2	Modellierung mehrsträngiger Antriebe mit dem Fluss als Zustandsvariable . . .	62
4.2.1	Transformation in umlaufende Koordinatensysteme (dq oder VSD)	63
4.2.2	Begründung für die Notwendigkeit der Bestimmung der Induktivitätsmatrix	65
4.3	Berücksichtigung des Sättigungszustandes	66
4.3.1	Strombasiertes Sättigungsmodell mit Verwendung von differentiellen In-	67
	duktivitäten	
4.3.2	Flussbasiertes Sättigungsmodell	73
4.3.3	Vereinfachtes strombasiertes Sättigungsmodell für $n \times 3$ -Topologien . .	76
4.3.4	Erweiterung der Sättigungsmodelle für Zahnspulenwicklungen inkl. Kreuz-	78
	kopplung von Wicklungssystemen	
4.3.5	Vergleich der vorgestellten Sättigungsmodelle	80
4.4	Berechnung des Drehmomentes	81
4.5	Modellparametrierung mittels Methode der eingefrorenen Permeabilitäten . .	86
4.5.1	Berechnung der Wickelkopfstreuinduktivität	87
4.5.2	Schrägung durch analytisches Postprocessing	90
4.6	Modellvalidierung mittels FE-Simulation	92
4.6.1	Verhalten im symmetrischen, stationären Kurzschluss	93
4.6.2	Verhalten im unsymmetrischen, stationären Kurzschluss	94
4.6.3	Verhalten mit symmetrischer Speisung und konstanter Spannungsamplitude	96
4.6.4	Verhalten mit unsymmetrischer Speisung und konstanter Spannungsam-	
	plitude	97
4.7	Zusammenfassung Modellierung	98
5	Regelverfahren für fehlertolerante Antriebe	100
5.1	Regelverfahren für $n \times 3$ -Topologien	101
5.1.1	Vereinfachtes Hauptwellenmodell für $n \times 3$ -Topologien im dq-System . .	101
5.1.2	Betrieb mit kurzgeschlossenem Teilsystem	107
5.1.3	Betrieb mit offenem Teilsystem	114
5.1.4	Betrieb mit offenem Teilsystem und Kompensation des Bremsmomentes	
	aus Rückspeisung	117
5.1.5	Zusammenfassung der Regelverfahren für $n \times 3$ -Topologien	121
5.2	Regelverfahren für H-Topologien	121
5.2.1	Betrieb von H-Topologien mit offenem Wicklungsstrang und sinusförmigen	
	Strömen	122
5.2.2	Optimierung der Stromkurvenform bei offenem Strang	126
5.2.3	Optimierung der Stromkurvenform im Normalbetrieb	127
5.2.4	Senkung der Stillstandsbelastung der Leistungsschalter in H-Topologien	129
5.3	Stromregelverfahren zur Reduzierung von Stromüberschwingungen	132
5.3.1	Modellbasierte Vorsteuerung der induzierten Spannung inklusive Ober-	
	schwingungen	132
5.3.2	Resonanzstromregler	133
5.3.3	Drehzahlbegrenzung der Unterdrückung von Stromüberschwingungen .	134
5.4	PWM-Speisung von fehlertoleranten Antrieben	136
5.4.1	Interleaving zur Senkung der Strombelastung des Zwischenkreiskondensators	137
5.4.2	Abschaltung von Teilsystemen zur Senkung der PWM-induzierten Ober-	
	schwingungsverluste	137
6	Messtechnische Validierung	139
6.1	Modellvalidierung für $n \times 3$ -Topologien mit verteilter Ganzlochwicklung	139

6.2 Modellvalidierung für Antriebe mit Zahnspulenwicklung und Kreuzkopplung von Teilsystemen 141

6.3 Validierung von Regelstrategien für $m \times 3$ -Topologien am Beispiel eines sechssträngigen Radnabenantriebs 143

6.3.1 Betrieb mit kurzgeschlossenem Teilsystem und Kompensation des Kurzschlussbremsmomentes 144

6.3.2 Betrieb mit rückspeisendem Teilsystem und Kompensation des Rückspeisemoments 145

6.4 Validierung von Regelstrategien für H-Topologien am Beispiel eines fünfsträngigen Hochdrehmomentantriebs 147

7 Ergebnisse aus Fahrversuchen 149

7.1 Identifikation kritischer Fahrsituationen 150

7.2 Ergebnisse Kreisfahrt auf regennasser Fahrbahn 152

7.3 Ergebnisse Bremsen und Ausweichen auf eisglatter Fahrbahn 154

8 Zusammenfassung und Ausblick 156

8.1 Ausblick 158

A Beschreibung der verwendeten Antriebssysteme und Simulationsparameter 159

A.1 Simulationsparameter FE-Simulation 159

A.2 Antriebssystem 1: Sechssträngiger Hochdrehzahlantrieb mit verteilter Ganzlochwicklung 161

A.3 Antriebssystem 2: Dreisträngiger Hochdrehzahlantrieb mit verteilter Ganzlochwicklung 161

A.4 Antriebssystem 3: Sechssträngiger Hochdrehzahlantrieb mit verteilter, gesehnter Ganzlochwicklung 162

A.5 Antriebssystem 4: Fünfsträngiger Hochdrehzahlantrieb mit verteilter, gesehnter Wicklung 163

A.6 Antriebssystem 5: Sechssträngiger Radnabenantrieb *FhG-RNM* mit Zahnspulenwicklung 164

A.7 Antriebssystem 6: Sechssträngiger Radnabenantrieb *SeRiel* mit Zahnspulenwicklung 165

A.8 Antriebssystem 7: Fünfsträngiger Hochdrehmomentantrieb *FuSy-Demonstratormotor* mit Zahnspulenwicklung 166

A.9 Antriebssystem 8: Sechssträngiger Hochdrehzahlantrieb *BEREIT-Demonstratormotor* mit verteilter Ganzlochwicklung 167

B Modellvalidierung H-Topologie 168

C Komponenten des Antriebsstrangprüfstands 170

Literaturverzeichnis 171