

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IV
Abstract	V
Nomenklatur	X
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	4
2.1 Permanentmagneterregte Synchronmaschinen	4
2.1.1 Transiente Modellierung	4
2.1.2 Elektrisches Ersatzschaltbild	7
2.1.3 Typische Ausführungsformen der Wicklung und des Rotors	8
2.2 Geberlose Regelung	11
2.2.1 Drehzahlregelung mit mechanischem Lagegeber	11
2.2.2 Geberlose Drehzahlregelung	13
2.2.3 Rotorlageschätzung für den gesamten Drehzahlbereich	15
2.3 Anforderungen an das Maschinendesign	17
2.4 Zusammenfassung des Kapitels	19
3 Zeiteffiziente Magnetkreisrechnung	20
3.1 Analytische Berechnungsverfahren	21
3.1.1 Magnetische Ersatznetzwerke für PMSM	21
3.1.2 Generierung magnetischer Ersatznetzwerke aus Finite-Elemente-Modellen	24
3.2 Numerische Berechnungsverfahren mit FEM	26
3.2.1 Möglichkeiten zur Reduktion der Rechenzeit	27
3.2.2 Überlagerung von Feldlösungen im Arbeitspunkt	28
3.3 Zusätzliche Effekte	30
3.3.1 Einfluss von Stanzkanteneffekten	30
3.3.2 Berücksichtigung der magnetischen Hysterese	33
3.3.3 Wirbelströme in Permanentmagneten	34
3.4 Zusammenfassung des Kapitels	36
4 Konzept der Rotorspulen	37
4.1 Vereinfachtes Hochfrequenzmodell	38
4.2 Hochfrequenzmodell mit Kreuzkopplungen	39
4.3 Ausführungsformen der Spulen	41
4.4 Ideen zur praktischen Umsetzung	44
4.5 Zusammenfassung des Kapitels	45

5 Transiente Systemsimulation	46
5.1 Streckenmodell der PMSM mit zusätzlicher Dämpfung im Rotor	46
5.2 Erweiterung der Kennfelddaten für die Rotorlageschätzung	48
5.3 Entkopplung der magnetischen Achsen in der Stromregelung	50
5.4 Simulation der geberlosen Rotorlageschätzung	50
5.4.1 Referenzsimulation mit konstanten Induktivitäten und ohne Kreuzkopplungen	51
5.4.2 Einfluss stromabhängiger Induktivitäten	53
5.4.3 Einfluss von Kreuzkopplungen	55
5.4.4 Einfluss von Mehrfachanisotropien	56
5.4.5 Simulation der geberlosen Rotorlageschätzung mit Rotorspulen	57
5.5 Zusammenfassung des Kapitels	58
6 Vorausberechnung der Maschinencharakteristik	60
6.1 Identifikation der Kennfelder	61
6.1.1 Berechnung des Rotorspulenwiderstands	61
6.1.2 Streuflüsse im Wicklungskopf und in den Stirnverbindern der Rotorspulen	63
6.1.3 Verkettungsflüsse und inneres Drehmoment	65
6.1.4 Induktivitäten und magnetische Anisotropie	69
6.1.5 Invertierung der Kennfelder für die Streckenmodellierung	73
6.2 Strom und Verluste in den Rotorspulen	73
6.2.1 Berücksichtigung von Luftspaltobertfeldern	74
6.2.2 Berücksichtigung von Spannungsoberschwingungen	76
6.3 Zusammenfassung des Kapitels	77
7 Elektromagnetische Gestaltung geberlos geregelter PMSM	78
7.1 Rotoren mit Oberflächenmagneten	80
7.1.1 Magnete mit radialer Magnetisierung (OPM1)	80
7.1.2 Magnete mit paralleler Magnetisierung (OPM2)	87
7.2 Rotoren mit balkenförmig vergrabenen Magneten (BPM)	89
7.3 Rotoren mit V-förmig vergrabenen Magneten (VPM)	92
7.4 Rotoren mit speichenförmig vergrabenen Magneten (SPM)	95
7.5 Zahnpulpenwicklungen	97
7.6 Stromwärmeverluste in den Rotorspulen und zusätzliche Wirbelströme in den Permanentmagneten	101
7.7 Wahl der Stromtrajektorie	104
7.8 Zusammenfassung des Kapitels	105
8 Messtechnische Validierung	107
8.1 Aufbau des verwendeten Maschinenprüfstands	107
8.2 Verfahren zur Messung der differentiellen Maschinenparameter	109
8.3 Messtechnische Untersuchung von Demonstratoren	113
8.3.1 Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Kennfelddaten	114
8.3.2 Vergleich der Gesamtverluste	116
8.3.3 Geberlose Regelung	119
8.4 Zusammenfassung des Kapitels	121
9 Zusammenfassung	122

A Anhang	124
A.1 Koordinatentransformationen	124
B Maschinendaten	125
B.1 Maschine mit Rotor OPM1 und Ganzlochwicklung	125
B.2 Maschine mit Rotor OPM2 und Ganzlochwicklung	128
B.3 Maschine mit Rotor BPM und Ganzlochwicklung	131
B.4 Maschine mit Rotor VPM und Ganzlochwicklung	133
B.5 Maschine mit Rotor SPM und Ganzlochwicklung	135
B.6 Maschine mit Rotor OPM1 und Zahnpulpenwicklung	137
B.7 Maschine mit Rotor BPM und Zahnpulpenwicklung	139
Literaturverzeichnis	141