

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Flux-Switching-Maschinen im Kontext der Drehfeldtheorie	4
2.1. Flux-Switching-Maschine	4
2.1.1. Bauform	4
2.1.2. Intuitives Funktionsprinzip	5
2.1.3. Bewertung des Konzeptes der Flux-Switching-Maschine	6
2.2. Erweiterung der Drehfeldtheorie um Mehrphasigkeit und harmonische Effekte	8
2.2.1. Definition der Wicklungsfunktion	10
2.2.2. Herleitung der Felderregerkurve	11
2.2.3. Herleitung der Flussverkettung	17
2.2.4. Herleitung von harmonischen Induktivitäten	18
2.2.5. Prinzip der Drehmomentbildung	20
2.2.6. Modulationseffekte durch Stator- und Rotornutung	24
2.2.7. Entstehung von Reluktanzmomenten	27
2.3. Einordnung der Flux-Switching-Maschine in die Drehfeldtheorie	28
2.3.1. Herleitung und Analyse des Erregerfeldes	29
2.3.2. Berücksichtigung der Wicklung	40
2.3.3. Analyse der Drehmomentbildung	44
2.4. Zusammenfassung, Bewertung und weiteres Vorgehen	47
3. Wicklungsauslegung für Flux-Switching-Maschinen	48
3.1. Wicklungsauslegung basierend auf dem Nutenstern	48
3.1.1. Generelle Wicklungsauslegung anhand des Nutensterns	48
3.1.2. Auslegung für Flux-Switching-Maschinen	50
3.2. Automatisierte Wicklungsauslegung	51
3.2.1. Verketteter Fluss pro Zahnpule	52
3.2.2. Festlegung des Schaltschrittes	53
3.2.3. Verschaltung der Spulen zu Phasen	54
3.2.4. Bewertung des vorgeschlagenen Verfahrens und Implikationen für das weitere Vorgehen	58
4. Analytische Rechenverfahren für flussmodulierte Maschinen	59
4.1. Berechnung von relativen Luftspaltleitwerten	59
4.2. Analytische und numerische Verfahren	63
4.3. Fazit und Auswahl eines Modellierungsansatzes	68

5. Entwicklung eines generischen Maschinenmodells	69
5.1. Formulierung von Anforderungen an effizient lösbarer Gleichungssysteme	70
5.1.1. Direkte Verfahren	70
5.1.2. Iterative Verfahren	74
5.2. Maxwell-Gleichungen	80
5.3. Entwicklung von generisch erzeugten magnetisch äquivalenten Netzwerken	83
5.3.1. Herleitung von magnetischen Leitwerten	83
5.3.2. Entwicklung eines Algorithmus zur Erzeugung meshbasierter MEC	90
5.3.3. Modellierung von Permanentmagneten	96
5.3.4. Modellierung mehrphasiger Drehstromwicklungen	99
5.3.5. Berücksichtigung von Sättigungseffekten	105
5.4. Modellierung des Luftspalts	111
5.4.1. Formulierungen mithilfe von MEC-Elementen	111
5.4.2. Modellierung über Fourierreihen	124
5.5. Postprocessing	129
5.5.1. Berechnung verketteter Flüsse	129
5.5.2. Berechnung der Luftspaltfelder	129
5.5.3. Methoden zur Berechnung des Drehmoments	131
5.6. Zusammenfassung und Zwischenfazit	133
6. Modellevaluation	135
6.1. Evaluation der Modellvarianten	135
6.1.1. Validierung der Feldlösung	135
6.1.2. Evaluation der Recheneffizienz	139
6.1.3. Festlegung der Modellierungs- und Rechenmethode	141
6.2. Weiterführende Validierung der gewählten Variante	141
6.3. Zwischenfazit	144
7. Topologiestudie unter Anwendung der entwickelten Methoden	145
7.1. Topologieoptimierung	146
7.1.1. Operationalisierung der entwickelten Methoden in einen Ablaufplan	146
7.1.2. Zielfunktion	150
7.1.3. Parametrierung der Geometrie	151
7.1.4. Berücksichtigung thermischer Randbedingungen	153
7.1.5. Auswahl einer Optimierungsmethode	162
7.2. Ergebnisse	164
7.2.1. Dreiphasige Flux-Switching-Maschinen	165
7.2.2. Fünfphasige Flux-Switching-Maschinen	175
7.2.3. Sechsphasige Flux-Switching-Maschinen	181
7.2.4. Siebenphasige Flux-Switching-Maschinen	183
7.2.5. Flux-Switching-Maschinen mit 9,10,11 und 12 Phasen	187
8. Zusammenfassung und Ausblick	192

A. Mathematischer Anhang	195
A.1. Beweis der Reihe von Sinus- und Kosinusthermen	195
A.2. Beweis der Integration über Kosinusprodukte	196
A.3. Fourierreihe 1	197
A.4. Fourierreihe 2	198
B. Zur Berechnung magnetischer Widerstände	200
C. Wicklungen mehrphasiger Flux-Switching-Maschinen	201
C.1. Dreiphasige Wicklungen	201
C.2. Fünfphasige Wicklungen	206
C.3. Sechs- und Siebenphasige Wicklungen	210
D. Bild Anhang	215
D.1. Zur Synthese von Flux-Switching-Maschinen in die Drehfeldtheorie	215
Symbole und Abkürzungen	219
Abbildungsverzeichnis	229
Tabellenverzeichnis	233
Literatur	235