

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

xiii

1. Einleitung und Überblick	1
1.1. Motivation und wissenschaftliche Fragestellung	1
1.2. Arbeitshypothesen und Vorgehen	2
1.3. Gliederung	6
2. Kupferverluste in elektrischen Maschinen bei Sinusströmen	7
2.1. Kupferverluste bei homogener Stromdichte	7
2.1.1. Ohmsche Kupferverluste in einem Leiter	7
2.1.2. Ohmsche Kupferverluste in einer E-Maschinen-Wicklung	8
2.2. Kupferverluste durch Stromverdrängungseffekte	9
2.2.1. Skin-Effekt	11
2.2.2. Proximity-Effekt	12
2.2.3. Kombination aus Skin- und Proximity-Effekt	14
2.2.4. Kreisströme	14
2.3. Stromverdrängung in Statorwicklungen und Gegenmaßnahmen	16
2.3.1. Leitergeometrie	18
2.3.2. Parallele Leiter	19
2.3.3. Leitertransposition	19
2.4. Kupferverlustberechnung in aktiver Länge	21
2.4.1. Hybrider Ansatz	22
2.4.2. Referenzmaschine	26
2.5. Kupferverlustberechnung im Wickelkopf	35
2.5.1. Dreidimensionale Modelle	35
2.5.2. Zweidimensionale Modelle	36
2.5.3. Referenzmaschine Wickelkopf	36
3. Systemverlustberechnung mit Wechselrichterspeisung	43
3.1. Elektromotorsystem	43
3.1.1. Betriebsstrategie	44
3.1.2. Stromregelung	45
3.1.3. Wechselrichter	46

ix

Inhaltsverzeichnis

3.1.4. Elektromotor	47
3.2. Kupferverlustberechnung bei Wechselrichterspeisung	48
3.2.1. Differentialgleichungssystem mit Lookup-Tabellen	50
3.2.2. Spannungsgtriebene transiente FEM Simulation	54
3.2.3. Methodenvergleich zur Bestimmung der Kupferverluste	54
3.2.4. Sensitivitäten der Parameter	57
3.3. Wechselrichterverluste	70
3.3.1. Schaltverluste	74
3.3.2. Durchlassverluste	75
4. Reduzierung der Systemverluste ohne Blechschnittänderung	77
4.1. Systemverluste der Referenz	77
4.2. Schaltfrequenz	79
4.3. Modulationsart	82
4.4. Übermodulation	88
4.5. AC-Filter	93
4.6. Abgeschaltete Windungen	98
5. Einfluss des E-Maschinenentwurfs	103
5.1. Einfluss der Wicklungsart	103
5.1.1. Hairpin-Wicklung (HPW)	105
5.1.2. Runddraht-Wicklung (RDW)	111
5.1.3. Orthozyklische Runddraht-Wicklung (ORW)	122
5.1.4. Litzendraht-Wicklung (LDW)	125
5.1.5. Formgepresste Litzendraht-Wicklung (FLW)	134
5.1.6. Roebelstab-Wicklung (RBW)	145
5.1.7. Verschränkte 3D-Stab-Wicklung (3DW)	149
5.1.8. Vergleich der Wicklungsarten	158
5.2. Einfluss der Statornut	169
5.2.1. Nutöffnung	169
5.2.2. Nutform	172
6. Zusammenfassung und Ausblick	179
6.1. Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion der Hypothesen	179
6.2. Reflexion und Übertragbarkeit der Ergebnisse	184
6.3. Ausblick	185
A. Anhang	187
A.1. Detaillierte Beschreibung der verwendeten Stromregelung . .	187

A.2. Methoden Kupferverlustberechnung bei Wechselrichterkopplung	191
A.2.1. Differentialgleichungssystem mit Lookup-Tabellen	191
A.2.2. Spannungsgtriebene transiente FEM Simulation	193
A.3. Methodenvergleich Kupferverlustberechnung bei Wechselrichter- kopplung	194
A.4. Spektren des Strangstromes	196
A.5. Verlustaufteilung auf die Leiter in diversen Etagen	200
A.6. Studie zur Netzfeinheit bei der Litzendraht-Wicklung in 3D . .	202
A.7. Kupferverluste im Roebelstab - 2D Methodik	203
A.8. Magnetische Flussdichte in der Nut bei veränderter Nutöffnung	206
Symbolverzeichnis	207
Literaturverzeichnis	215
Lebenslauf	227