

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	iv
1 Motivation und Zielsetzung	1
2 Untersuchte Windgeneratorkonzepte	7
2.1 Doppeltgespeister Asynchrongenerator	7
2.2 Permanenterregter Synchrongenerator	13
3 Magnetkreisberechnung der doppeltgespeisten Asynchronmaschine	19
3.1 Berechnung der Eisenwege	19
3.2 Berechnung der magnetischen Spannungen	22
3.3 Stegwellenbedingte magnetische Rotorjochentlastung	30
4 Magnetkreisberechnung der permanenterregten Synchronmaschine	35
4.1 Berechnung geometrieabhängiger Feldfaktoren	39
4.2 Analytisch eindimensionale magnetische Arbeitspunktermittlung im Leerlauf	48
4.3 Analytisch eindimensionale magnetische Lastpunktermittlung bei Querstrom	62
4.3.1 Berücksichtigung der Hauptfeld- und Statorstrefeldsätti- gung	75
5 Betriebspunkte der doppeltgespeisten Asynchronmaschine	89
5.1 Berechnung der Ersatzschaltbildparameter	89
5.2 Leerlaufberechnung von Asynchronmaschinen	99
5.3 Berechnung von Motor- und Generatorbetriebspunkten bei Rotor- kurzschluss	102
5.4 Berechnung von Generatorbetriebspunkten bei Doppelspeisung . .	105
6 Betriebspunkte der permanenterregten Synchronmaschine	115
6.1 Leerlaufberechnungen permanenterregter Synchronmaschinen . . .	116

6.2	Lastpunktberechnungen für permanenterregte Synchronmaschinen mit Kennlinienfeldern	119
6.2.1	Kennlinienfelder der Maschinen P1 und P2	120
6.2.2	Betriebspunktberechnungen permanenterregter Synchronmaschinen bei d - q -Strom	127
6.3	Kurzschlussberechnungen	133
6.3.1	Dreisträngiger Klemmenkurzschluss	135
6.3.2	Zweisträngig einphasiger Kurzschluss	141
7	Berechnung der Verluste	145
7.1	Grundschwingungs-Ummagnetisierungsverluste	151
7.2	Oberflächenverluste im Leerlauf und unter Last	154
7.3	Pulsationsverluste im Leerlauf und unter Last	158
7.4	Wirbelstromverluste in den Magneten durch Nutungsoberschwingungen im Leerlauf und unter Last	161
7.5	Umrichterbedingte Zusatzverluste	163
7.5.1	Stromoberschwingungsbedingte Stator- und Rotorwicklungsverluste	163
7.5.1.1	Stromoberschwingungsbedingte Statorwicklungsverluste für permanenterregte Synchronmaschinen	163
7.5.1.2	Stromoberschwingungsbedingte Wicklungsverluste für doppeltgespeiste Asynchronmaschinen	167
7.5.2	Stromoberschwingungsbedingte Stator- und Rotorummagnetisierungsverluste bei permanenterregten Synchronmaschinen	169
7.5.3	Stromoberschwingungsbedingte Wirbelstromverluste in den Magneten	172
7.6	Reibungs- und Ventilationsverluste	173
7.6.1	Lagerreibungsverluste	175
7.6.2	Luftreibungsverluste im Luftspalt	175
7.6.3	Lüfterverluste der Innenkühlung	177
8	Thermisches Modell der permanentmagneterregten Synchronmaschine	181
8.1	Berechnung der Wärmewiderstände	188
8.2	Berechnung drehzahl- und strömungsabhängiger Wärmewiderstände	192
8.3	Berechnete Temperaturen im Vergleich zur Messung	196

9 Zusammenfassung	199
A Vergleich zwischen Messung und Rechnung	205
A.1 Ergebnisse der doppeltgespeisten Asynchronmaschinen	205
A.1.1 Vergleich der Ersatzschaltbildparameter für die Maschinen D2, D3, D4 und K4	205
A.1.2 Leerlaufergebnisse der Maschinen D2, D3, D4 und K4 . . .	207
A.1.3 Ergebnisse im Motor- und Generatorbetrieb bei rotorseitigem Kurzschluss	210
A.1.4 Ergebnisse im Generatorbetrieb bei Doppelspeisung	212
A.2 Ergebnisse der permanenterregten Synchronmaschinen	217
A.2.1 Leerlaufergebnisse der Maschinen P4 bis P6	217
A.2.2 Motorbetriebspunkte von P3 bis P6: Verluste	219
A.2.3 Motorbetriebspunkte von P3 bis P6: Erwärmung	226
B Verwendete Materialdaten und Programmabläufe	229
B.1 Magnetisierungskennlinien der doppeltgespeisten Asynchronmaschinen	229
B.2 Magnetisierungskennlinien der permanenterregten Synchronmaschinen	233
B.2.1 Magnetisierungskennlinien des Magnettyps <i>VACODYM AP 677</i>	237
B.3 Struktogramme zu Betriebspunktberechnungen von doppeltgespeisten Asynchronmaschinen	238
C Ergänzende Berechnungen	241
C.1 Berechnung der Stromverdrängung	241
C.1.1 Widerstandserhöhung durch Stromverdrängung	241
C.1.2 Verringerung der Nutstreue durch Stromverdrängung . .	244
C.2 Auswertung des gemessenen Oberschwingungsspektrums für Betriebspunkt P3U1	244
D Numerische Feldberechnungen mit <i>FEMAG</i>	249
D.1 Vergleich der analytischen Rechnung mit <i>FEMAG</i> : Nutpulsationsflussdichte B_{Qs} für PMSM	250
D.2 Bestimmung der Magnetfeldpulsation B_{QM0} von PMSM mit Hilfe von <i>FEMAG</i>	253

Inhaltsverzeichnis

D.3 Vergleich der analytischen Rechnung mit <i>FEMAG</i> : Magnetpulsationsflussdichte B_{QM} für PMSM	253
D.4 Abschätzung der umrichterbedingten Magnetpulsationen von PMSM mit <i>FEMAG</i>	258
D.5 Stromüberschwindungsbedingte Ummagnetisierungs- und Magnetverluste von PMSM mit <i>FEMAG</i>	260
Literaturverzeichnis	262
Lebenslauf	272