

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Aufbau und Vergleich von PM Line-Start Motoren</b>	<b>4</b>
2.1 Aufbau des Ständers . . . . .	4
2.2 Aufbau des Läufers . . . . .	5
2.3 Konzeptstudie für das Läuferlayout . . . . .	8
<b>3 Elektromagnetische Modellierung</b>	<b>14</b>
3.1 Elektrische Modellierung . . . . .	14
3.1.1 Spannungsgleichungen des Ständers in Originalgrößen . . . . .	14
3.1.2 Spannungsgleichungen in läuferfesten d-q-Koordinaten . . . . .	16
3.1.3 Effektivwertgrößen . . . . .	19
3.2 Modellierung des magnetischen Kreises . . . . .	20
3.2.1 Ersatznetzwerk des magnetischen Kreises . . . . .	20
3.2.2 Berechnung der magnetischen Widerstände . . . . .	25
3.2.3 Berechnung der magnetische Durchflutungsquellen . . . . .	31
3.2.4 Netzwerkgleichung des magnetischen Kreises . . . . .	36
3.2.5 Lösungsalgorithmus für die nichtlineare Netzwerkgleichung . . . . .	40
3.2.6 Analyse des Luftspaltfeldes . . . . .	42
3.2.7 Berechnung der elektromotorischen Kraft . . . . .	47
3.2.8 Stromeingeprägter Betrieb . . . . .	48
3.2.9 Kennfeld . . . . .	49
<b>4 Analytische Modellierung des transienten Betriebsverhaltens</b>	<b>51</b>
4.1 Spannungsdifferentialgleichungen . . . . .	52
4.1.1 Berechnung der Ohm'schen Widerstände . . . . .	61
4.1.2 Berechnung der Streuinduktivitäten . . . . .	63
4.1.3 Berechnung der partiellen Ableitungen . . . . .	66

4.2	Bewegungsdifferentialgleichungen . . . . .	68
4.2.1	Berechnung der Drehmomente . . . . .	69
4.2.2	Berechnung der Massenträgheitsmomente . . . . .	70
4.3	Algorithmus zum Lösen der Differentialgleichungen . . . . .	71
4.4	Analytische Berechnung der Eintrittfallgrenze . . . . .	73
4.5	Vergleich der Ergebnisse der transienten analytischen Berechnung . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Analytische Modellierung des stationären Betriebsverhaltens</b>	<b>78</b>
5.1	Lösungsverfahren zur Findung eines stationären Betriebspunktes . . . . .	78
5.1.1	Berechnung des stationären inneren Drehmoments . . . . .	80
5.1.2	Analyse der Ummagnetisierungsverluste . . . . .	80
5.1.3	Analyse der Verluste durch Reibung . . . . .	82
5.1.4	Thermische Modellierung . . . . .	82
5.1.5	Downhill-Simplex-Verfahren . . . . .	83
5.1.6	Berechnung der stationären Betriebspunkte . . . . .	85
5.2	Verarbeitung der Ergebnisse des stationären Betriebsverhaltens . . . . .	87
5.2.1	Berechnung des Wirkungsgrads . . . . .	87
5.2.2	Berechnung des Leistungsfaktors . . . . .	88
<b>6</b>	<b>Numerische Simulation</b>	<b>89</b>
6.1	Grundlagen der FEM in der elektromagnetischen Berechnung . . . . .	89
6.2	Vorgehensweise bei der numerischen Simulation eines PM Line-Start Motors mittels FEM . . . . .	91
6.3	Analyse des Luftspaltfelds . . . . .	96
6.4	Simulation der induzierten Spannungen bei offenen Anschlussklemmen . . . . .	97
6.5	Simulation des transienten Hochlaufs und der Eintrittfallgrenze . . . . .	98
6.5.1	Numerische Rechnung . . . . .	98
6.5.2	Numerisch-analytisch gekoppelte Rechnung . . . . .	100
6.6	Simulation des stationären Betriebsverhaltens . . . . .	106
<b>7</b>	<b>Funktionsmusterentwurf und Funktionsmusterbau</b>	<b>107</b>
7.1	Aufbau der Ständer . . . . .	108
7.2	Aufbau der Läufer . . . . .	109
7.2.1	U-Modell . . . . .	111
7.2.2	V-Modell . . . . .	113
7.3	Auslegung der Wicklung . . . . .	115

7.4	Vorstellung der Funktionsmuster . . . . .	117
<b>8</b>	<b>Messtechnische Untersuchungen der Funktionsmuster und Vergleich mit der numerischen und analytischen Berechnung</b>	<b>119</b>
8.1	Aufbau der Versuchsstände . . . . .	119
8.1.1	Stationäre Messungen . . . . .	119
8.1.2	Transiente Messungen . . . . .	121
8.2	Spannungsvariation . . . . .	122
8.3	Induzierte Spannung . . . . .	124
8.4	Stationäres Betriebsverhalten . . . . .	127
8.5	Anlaufdrehmoment und Anlaufstrom . . . . .	133
8.6	Transientes Betriebsverhalten . . . . .	134
8.6.1	Zeitliche Verläufe . . . . .	134
8.6.2	Intrittfallverhalten . . . . .	139
<b>9</b>	<b>Reihentauglichkeit und Aussichten</b>	<b>141</b>
9.1	U- und V-Funktionsmuster mit einem Käfig aus Aluminium . . . . .	141
9.2	Untersuchungen bei höherer Bemessungsleistung . . . . .	143
9.3	Untersuchungen der Skalierbarkeit . . . . .	145
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>147</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>150</b>
	<b>Literatur</b>	<b>160</b>