

## Inhaltsverzeichnis

<b>Allgemeine Hinweise</b> . . . . .	<b>XIV</b>
<b>Formelzeichen-Übersicht</b> . . . . .	<b>XV</b>
<b>1. Stromrichter für Drehfeldmaschinen</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Übersicht . . . . .	1
1.2 Umrichter mit Spannung zwischenkreis . . . . .	2
1.2.1 Umrichter mit veränderlicher Zwischenkreisspannung . . . . .	3
1.2.2 Umrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung . . . . .	7
1.3 Umrichter mit Stromzwischenkreis . . . . .	9
1.4 Direktumrichter . . . . .	14
<b>2. Die Asynchronmaschine mit Stromrichter</b> . . . . .	<b>18</b>
2.1 Übersicht . . . . .	18
2.2 Die Asynchronmaschine mit Spannung zwischenkreis-Umrichter . . . . .	20
2.2.1 Die Ortskurve der Grundschwingungen . . . . .	20
2.2.2 Der Stromverlauf einschließlich der Oberschwingungen . . . . .	26
2.2.2.1 Berechnung durch Superposition . . . . .	26
2.2.2.2 Geschlossene Berechnung . . . . .	28
2.2.2.3 Zahlenbeispiel . . . . .	31
2.2.3 Betrieb mit gepulster Spannung . . . . .	34
2.2.4 Auswirkungen der Oberschwingungen . . . . .	37
2.2.4.1 Einfluß der Schaltung . . . . .	37
2.2.4.2 Zusätzliche Verluste . . . . .	39
2.2.4.3 Drehmomentpulsationen . . . . .	42
2.2.4.4 Magnetische Geräusche . . . . .	43
2.2.5 Transientes Verhalten der Maschine . . . . .	46
2.3 Die Asynchronmaschine mit Stromzwischenkreis-Umrichter . . . . .	59
2.3.1 Die Ortskurve der Grundschwingungen . . . . .	59
2.3.2 Der vollständige Verlauf von Strom und Spannung . . . . .	61
2.3.2.1 Näherungsrechnung . . . . .	61
2.3.2.2 Genaue Rechnung . . . . .	67
2.3.2.3 Zahlenbeispiel . . . . .	71
2.3.3 Betrieb mit gepulstem Strom . . . . .	76
2.3.4 Auswirkungen der Oberschwingungen . . . . .	77
2.3.4.1 Einfluß der Schaltung . . . . .	77
2.3.4.2 Zusätzliche Verluste . . . . .	79
2.3.4.3 Drehmomentpulsationen . . . . .	81
2.3.4.4 Magnetische Geräusche . . . . .	83
2.3.5 Transientes Verhalten der Maschine . . . . .	83
2.4 Die doppelt gespeiste Asynchronmaschine (Kaskadenschaltungen) . . . . .	91

2.4.1 Betrieb mit fester Statorfrequenz . . . . .	92
2.4.2 Betrieb mit fester Rotorfrequenz . . . . .	97
2.5 Die untersynchrone Stromrichterkaskade . . . . .	99
2.5.1 Wirkungsweise . . . . .	99
2.5.2 Angenäherte Berechnung des Betriebsverhaltens . . . . .	102
2.5.3 Die Kommutierung als Schaltvorgang . . . . .	106
2.5.4 Zahlenbeispiel . . . . .	112
2.5.5 Auswirkungen der Oberschwingungen . . . . .	114
2.6 Bemessung von umrichtergespeisten Asynchronmaschinen . . . . .	120
<b>3. Die Synchronmaschine mit Stromrichter . . . . .</b>	<b>123</b>
3.1 Übersicht . . . . .	123
3.2 Die maschinengeführte Kommutierung . . . . .	124
3.2.1 Angenäherte Berechnung . . . . .	124
3.2.2 Genaue Theorie der Kommutierung . . . . .	132
3.3 Das Betriebsverhalten der Synchronmaschine mit ZK-Umrichter . . . . .	135
3.3.1 Einführung . . . . .	135
3.3.2 Die Maschine mit Polradlagegeber . . . . .	138
3.3.2.1 Die Vollpolmaschine ohne magnetische Sättigung . . . . .	138
3.3.2.2 Die Einzelpolmaschine mit magnetischer Sättigung . . . . .	142
3.3.3 Die Maschine mit Spannungssteuerung . . . . .	150
3.3.3.1 Die Vollpolmaschine ohne magnetische Sättigung . . . . .	150
3.3.3.2 Die Einzelpolmaschine mit magnetischer Sättigung . . . . .	151
3.3.4 Kombinierte Steuerungen . . . . .	152
3.3.5 Die fremdgesteuerte Maschine . . . . .	155
3.3.5.1 Die statischen Betriebskennlinien . . . . .	155
3.3.5.2 Die dynamische Stabilität des Betriebes . . . . .	160
3.3.6 Anlaufverfahren . . . . .	160
3.3.6.1 Drehzahluntergrenze für maschinengeführte Kommutierung . . . . .	160
3.3.6.2 Selbstanlauf des Stromrichtermotors ohne Kommutierungs hilfe . . . . .	168
3.3.6.3 Anlauf mit Kommutierungshilfe . . . . .	172
3.4 Die Synchronmaschine mit Direktumrichter . . . . .	174
3.5 Die Synchronmaschine mit Umrichter mit unterdrücktem Zwischenkreis . . . . .	179
3.6 Auswirkungen der Oberschwingungen . . . . .	180
3.7 Synchronmaschinen mit wicklunglosem Läufer . . . . .	182
3.7.1 Gleichpolmaschine nach Schmidt/Lorenz . . . . .	182
3.7.2 Gleichpolmaschine nach Arco . . . . .	183
<b>4. Transientes Verhalten von Drehfeldmaschinen . . . . .</b>	<b>185</b>
4.1 Komplexe Raumzeiger . . . . .	185
4.1.1 Einführung . . . . .	185
4.1.2 Vergleich zwischen Raumzeiger und Zeitzeiger . . . . .	189
4.1.3 Ströme und Flußverkettungen . . . . .	191
4.1.4 Komplexe Spannungsgleichungen in ruhenden und in rotierenden Koordinatensystemen . . . . .	196
4.1.5 Das Drehmoment und die Bewegungsgleichung . . . . .	201
4.1.6 Das Nullstromsystem . . . . .	204
4.1.7 Oberwellen und Oberschwingungen . . . . .	206
4.1.8 Behandlung der Verluste beim Vergleich von Rechnung und Messung	210
4.2 Gleichungssysteme für die Asynchronmaschine . . . . .	211
4.2.1 Das statorfeste System ( $\alpha, \beta, 0$ -System) . . . . .	211

	Inhaltsverzeichnis	XIII
4.2.2 Das rotorfeste System ( $d, q, 0$ -System) . . . . .	213	
4.2.3 Das drehfeldfeste System ( $x, y, 0$ -System) . . . . .	215	
4.2.4 Der stationäre Betrieb in Raumzeigerdarstellung . . . . .	217	
4.2.5 Einschalten einer laufenden Asynchronmaschine . . . . .	221	
<b>4.3 Das Gleichungssystem für die Synchronmaschine . . . . .</b>	<b>225</b>	
4.3.1 Die Grundgleichungen im $d, q, 0$ -System . . . . .	225	
4.3.2 Andere gebräuchliche Bezeichnungssysteme . . . . .	230	
4.3.3 Der stationäre Betrieb in Raumzeigerdarstellung . . . . .	232	
4.3.4 Systemgleichungen im Bildbereich und Reaktanzoperatoren . . . . .	235	
4.3.5 Veränderliche Drehzahl und magnetische Sättigung . . . . .	241	
<b>Anhang 1: Zum Rechnen mit normierten Größen. . . . .</b>	<b>249</b>	
<b>Anhang 2: Laplace-Transformation . . . . .</b>	<b>253</b>	
<b>Anhang 3: Matrizenrechnung . . . . .</b>	<b>258</b>	
<b>Schrifttum. . . . .</b>	<b>269</b>	
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>275</b>	