

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>13</b>
1.1	Elektromagnetische Verträglichkeit in elektrischen Netzen .....	13
1.2	Klassifizierung von Störgrößen (Netzurückwirkungen) .....	19
1.3	EU-Richtlinien, VDE-Bestimmungen, Normung .....	21
1.4	Merkmale der Spannung in Netzen, DIN EN 50160 .....	25
1.5	Mathematische Grundlagen .....	28
1.5.1	Komplexe Rechnung, Zählpfeile und Zeigerdiagramme .....	28
1.5.2	Fourieranalyse und -synthese .....	35
1.5.3	System der symmetrischen Komponenten .....	41
1.5.4	Messung der Impedanzen der symmetrischen Komponenten (012-System) .....	47
1.5.5	Symmetrische Komponenten und Oberschwingungen .....	52
1.5.6	Leistungsbetrachtungen .....	53
1.5.7	Statistik .....	56
1.6	Berechnung der Impedanzen von Betriebsmitteln .....	61
1.7	Rechenbeispiele .....	67
1.7.1	Grafische Ermittlung der symmetrischen Komponenten .....	67
1.7.2	Rechnerische Ermittlung der symmetrischen Komponenten .....	69
1.7.3	Berechnung von Betriebsmitteln .....	70
	Literatur Kapitel 1 .....	72
<b>2</b>	<b>Elektrische Netze und Betriebsmittel</b> .....	<b>73</b>
2.1	Struktur und Aufbau elektrischer Netze .....	73
2.1.1	Strahlennetze .....	73
2.1.2	Ringnetze .....	74
2.1.3	Vermaschte Netze .....	77
2.1.4	Maschennetze .....	77
2.2	Netzbedingungen .....	81
2.2.1	Spannungsebenen und Impedanzen .....	81
2.2.2	Empfohlene Spannungsebenen .....	83
2.3	Berechnung von Netzen und Betriebsmitteln .....	84
2.3.1	Allgemeines .....	84
2.3.2	Modellierung von Betriebsmitteln .....	85
2.3.3	Besonderheiten der Nachbildung von Verbraucherlasten .....	87
2.4	Reihen- und Parallelschwingkreise in Energieversorgungsnetzen .....	90
2.5	Berechnung von Kurzschlussleistung und Kurzschlussströmen nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102) .....	96
2.5.1	Allgemeines .....	96
2.5.2	Berechnung der Kurzschlussstromparameter .....	101

2.5.3	Einfluss von Motoren .....	103
2.6	Berechnung der größten Netzimpedanz zur Beurteilung von Netzurückwirkungen .....	104
2.7	Kenndaten typischer Betriebsmittel .....	106
2.8	Beispiele .....	110
2.8.1	Berechnung von Schwingkreisen .....	110
2.8.2	Resonanzen in Mittelspannungskabelnetzen .....	110
2.8.3	Berechnung des Kurzschlussstroms nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102) und der Netzimpedanz nach VDN-Technische Regeln...	111
2.8.4	Berechnung der frequenzabhängigen Impedanz in einem Mittelspannungsnetz .....	114
2.8.5	Frequenzabhängige Impedanz eines 220-kV-Netzes .....	116
	Literatur Kapitel 2 .....	117
<b>3</b>	<b>Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen .....</b>	<b>119</b>
3.1	Grundlagen .....	119
3.2	Grundlagen der Leistungselektronik .....	121
3.2.1	Allgemeines .....	121
3.2.2	Fremdgeführte (netzgeführte) Stromrichter .....	123
3.2.2.1	Allgemeines .....	123
3.2.2.2	Drehstrombrückenschaltung .....	124
3.2.3	Selbstgeführte Stromrichter .....	130
3.2.3.1	Allgemeines .....	130
3.2.3.2	Umrichter .....	131
3.2.3.3	Pulsweitenmodulation .....	133
3.2.4	Gleichspannungswandler .....	137
3.2.4.1	Tiefsetzsteller .....	138
3.2.4.2	Hochsetzsteller .....	140
3.3	Photovoltaikanlagen .....	141
3.3.1	Grundlagen .....	141
3.3.2	Wechselrichter in PV-Anlagen .....	145
3.3.3	Funktioneller Aufbau von PV-Wechselrichtern .....	146
3.3.4	Netzüberwachung .....	148
3.4	Windenergieanlagen .....	149
3.4.1	Grundlagen .....	149
3.4.2	Elektrische Ausrüstung von Windenergieanlagen .....	152
3.4.2.1	Allgemeines .....	152
3.4.2.2	Asynchrongenerator mit direkter Netzankopplung .....	152
3.4.2.3	Asynchrongenerator mit direkter Netzankopplung und dynamischer Schlupfregelung .....	153
3.4.2.4	Doppelt gespeister Asynchrongenerator mit Umrichter im Läuferkreis .....	154
3.4.2.5	Synchrongenerator mit Umrichter (Gleichspannungszwischenkreis) ..	155

3.5	Beispiele.....	155
3.5.1	Störaussendungen von PV-Anlagen .....	155
3.5.2	Einfluss der in der Netzspannung vorhandenen Oberschwingungen auf die Störaussendung .....	158
3.5.3	Einfluss der Netzüberwachung auf die Störaussendung.....	161
3.5.2	Störaussendungen von Windenergieanlagen.....	163
	Literatur Kapitel 3.....	168
<b>4</b>	<b>Anschluss von Anlagen an das öffentliche Stromversorgungsnetz .....</b>	<b>169</b>
4.1	Allgemeines zu Regeln, Richtlinien und Anschlussbedingungen .....	169
4.2	Transmission Code – Verband der Netzbetreiber .....	172
4.3	Technische Anschlussbedingungen TAB .....	172
4.3.1	Bau und Betrieb von Übergabestationen zur Versorgung von Kunden aus dem Mittelspannungsnetz .....	172
4.3.2	Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Niederspannungsnetz .....	173
4.4	Richtlinien der Fördergesellschaft Windenergie e. V. (FGW-Richtlinien) .....	173
4.5	VDEW-Richtlinien.....	174
4.5.1	Eigenerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz .....	174
4.5.2	Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz .....	175
4.6	VDN-Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen ...	175
4.6.1	VDN-Technische Regeln – Kapitel 1: Netzzrückwirkungen, Elektromagnetische Verträglichkeit und Spannungsqualität .....	176
4.6.2	VDN-Technische Regeln – Kapitel 2: Begriffe und Definitionen .....	176
4.6.3	VDN-Technische Regeln – Kapitel 3: Kurzschlussleistung .....	178
4.6.4	VDN-Technische Regeln – Kapitel 4: Spannungsänderungen und Flicker .....	179
4.6.5	VDN-Technische Regeln – Kapitel 5: Spannungsunsymmetrie .....	182
4.6.6	VDN-Technische Regeln – Kapitel 6: Oberschwingungen .....	182
4.6.7	VDN-Technische Regeln – Kapitel 7: Kommutierungseinbrüche.....	191
4.6.8	VDN-Technische Regeln – Kapitel 8: Zwischenharmonische Spannungen.....	192
4.6.9	VDN-Technische Regeln – Kapitel 9: Tonfrequenzrundsteuerungen (TRA) – Beeinflussungen .....	192
4.6.10	VDN-Technische Regeln – Kapitel 10: Erzeugungsanlagen .....	192
	Literatur Kapitel 4.....	194
<b>5</b>	<b>Oberschwingungen und Zwischenharmonische.....</b>	<b>195</b>
5.1	Entstehung und Ursachen .....	195
5.1.1	Allgemeines .....	195
5.1.2	Entstehung durch Netzbetriebsmittel und Lasten .....	195

5.1.3	Zweiweg-Gleichrichter mit kapazitiver Glättung .....	198
5.1.4	Höherpulsige leistungselektronische Schaltungen.....	201
5.1.5	Entstehung durch stochastisches Verbraucherverhalten .....	201
5.1.5	Rundsteuersignale .....	205
5.2	Beschreibung und Berechnung .....	207
5.2.1	Kenngrößen und Parameter .....	207
5.3	Auswirkungen von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen .....	210
5.3.1	Allgemeines .....	210
5.3.2	Motoren und Generatoren .....	211
5.3.3	Kondensatoren .....	212
5.3.3.1	Resonanzen in elektrischen Netzen .....	212
5.3.3.2	Auswirkungen von Oberschwingungen auf Kondensatoren.....	214
5.3.3.3	Verdrosselung von Kondensatoren .....	217
5.3.3.4	Belastbarkeit von Kondensatoren .....	220
5.3.4	Andere energietechnische Betriebsmittel .....	221
5.3.5	Netzbetrieb.....	223
5.3.6	Elektronische Betriebsmittel.....	223
5.3.7	Schutz-, Mess- und Automatisierungsgeräte .....	224
5.3.8	Lasten und Verbraucher .....	227
5.4	Bewertung von Oberschwingungen .....	228
5.4.1	Allgemeines, Verträglichkeitspegel .....	228
5.4.2	Grenzwerte für Oberschwingungen von Geräten mit einem Nennstrom $\leq 16$ A.....	232
5.4.3	Grenzwerte für Oberschwingungen von Geräten mit einem Nennstrom $\leq 75$ A.....	236
5.4.4	Bewertung nach Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen .....	240
5.5	Bewertung von Zwischenharmonischen .....	244
5.6	Mess- und Rechenbeispiele .....	247
5.6.1	Oberschwingungsresonanz durch Blindstromkompensation .....	247
5.6.2	Bewertung von Oberschwingungen .....	250
5.6.3	Zwischenharmonische .....	252
5.6.4	Störaussendungen von Niederspannungsverbrauchern.....	255
	Literatur Kapitel 5 .....	259
<b>6</b>	<b>Spannungsschwankungen und Flicker .....</b>	<b>261</b>
6.1	Einführung .....	261
6.2	Flickererzeugende Lasten .....	263
6.2.1	Motoren .....	263
6.2.2	Drehstrom-Lichtbogenofen .....	267
6.2.3	Widerstandsschweißmaschinen .....	269
6.3	Summationsgesetz für Flicker .....	275

6.4	Berechnung der Flickerstärke .....	278
6.4.1	Beispiel – Berechnung der Flickerstärke .....	286
6.5	Ermittlung des Spannungsänderungsverlaufs zur Beurteilung der Störaussendung einzelner Verbrauchseinrichtungen .....	287
6.5.1	Symmetrische Belastung .....	288
6.5.1.1	Beispiel – Spannungsänderung beim Motoranlauf .....	291
6.5.2	Unsymmetrische Belastung .....	291
6.5.2.1	Beispiel – Anschlussbeurteilung einer Punktschweißmaschine .....	295
6.6	Verteilung der Flickerpegel im Netz .....	297
6.6.1	Verlegung des Anschlusspunkts einer Last .....	301
6.6.1.1	Beispiel – Flickerverteilung im Netz .....	303
6.6.1.2	Beispiel – Verlagerung des Anschlusspunkts .....	306
6.6.1.3	Beispiel – Transferkoeffizient, Summationsgesetz .....	307
6.7	Flickerminimierung und Kompensation .....	309
6.7.1	Anlagenseitige Maßnahmen: .....	309
6.7.2	Netzseitige Maßnahmen: .....	312
6.8	Flicker durch Zwischenharmonische .....	312
6.8.1	Beispiel – Flicker durch Zwischenharmonische .....	315
6.9	Anschluss von Flicker erzeugenden Lasten an das öffentliche Netz ...	316
6.9.1	Grenzwerte für Spannungsschwankungen und Flicker von Geräten mit einem Nennstrom $\leq 16$ A – DIN EN 61000-3-3 (VDE 0838-3) .....	316
6.9.2	Grenzwerte für Spannungsschwankungen und Flicker von Geräten mit einem Nennstrom von $\leq 75$ A, die einer Sonderanschluss- bedingung unterliegen – DIN EN 61000-3-11 (VDE 0838-11) .....	323
6.9.3	Anschluss von Kundenanlagen größerer Leistung an das öffentliche NS-/MS-Netz – die VDN (D-A-CH-CZ)-Technische Regeln .....	326
	Literatur Kapitel 6 .....	329
<b>7</b>	<b>Spannungsunsymmetrien .....</b>	<b>331</b>
7.1	Ursachen und Beschreibungsparameter .....	331
7.2	Auswirkungen, Grenzwerte und Normung .....	333
7.3	Bewertung von Spannungsunsymmetrien in Niederspannungsnetzen .....	333
7.4	Bewertung von Spannungsunsymmetrien in Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetzen .....	335
7.4.1	Allgemeines, Planungspegel .....	335
7.4.2	Summationsexponent $\alpha$ .....	336
7.4.3	Transferfaktoren $T$ .....	336
7.4.4	Faktoren $k_{u,E}$ .....	338
7.4.5	Bewertung in Mittelspannungsnetzen .....	338
7.4.6	Bewertung in Hoch- und Höchstspannungsnetzen .....	342

7.5	Beispiele.....	344
7.5.1	Bewertung eines unsymmetrischen Verbrauchers im Niederspannungsnetz .....	344
7.5.2	Bewertung eines unsymmetrischen Verbrauchers im Mittelspannungsnetz .....	344
7.5.3	Spannungsunsymmetrie in einem Industriebetrieb.....	345
	Literatur Kapitel 7.....	346
<b>8</b>	<b>Messgeräte und Messverfahren .....</b>	<b>347</b>
8.1	Zielsetzung von Messungen .....	347
8.2	Oberschwingungsmessverfahren – DIN EN 61000-4-7 (VDE 0847-4-7) .....	351
8.3	Flickermeter – DIN EN 61000-4-15 (VDE 0847-4-15) .....	369
8.4	Verfahren zur Messung der Spannungsqualität – DIN EN 61000-4-30 (VDE 0847-4-30).....	378
	Literatur Kapitel 8.....	388