

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	13
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, Zählpeile 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
2	Elektrische Netze und Betriebsmittel	73
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 Netzrückwirkungen.....	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
3	Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen.....	119
3.1	Grundlagen.....	119
3.2	Grundlagen der Leitungselektronik.....	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
4	Anschluss von Anlagen an das öffentliche Stromversorgungsnetz	169
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
5	Oberschwingungen und Zwischenharmonische.....	195
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 ≤ 16 A	232
5.4.3	Grenzwerte für Oberschwingungen von Geräten mit einem Nennstrom ≤ 75 A	236
5.4.4	Bewertung nach Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen	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
6	Spannungsschwankungen und Flicker	261
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 ≤ 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 ≤ 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
7	Spannungsunsymmetrien	331
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 α	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
8	Messgeräte und Messverfahren.....	347
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