

Dr.-Ing. Dirk Blume
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schlabbach
Dr.-Ing. Thomas Stephanblome

Spannungsqualität in elektrischen Netzen

Ursachen, Messung, Bewertung von
Netzurückwirkungen und Verbesserung
der Spannungsqualität

Inhalt

1	Einführung	11
1.1	Elektromagnetische Verträglichkeit in elektrischen Netzen	11
1.2	Klassifizierung von Netzrückwirkungen	14
1.3	EU-Richtlinien, VDE-Bestimmungen, Normung	16
1.4	Mathematische Grundlagen	21
1.4.1	Komplexe Rechnung, Zählpfeile und Zeigerdiagramme	21
1.4.2	Fourier-Analyse und -Synthese	25
1.4.3	Symmetrische Komponenten	28
1.4.4	Leistungsbetrachtungen	33
1.4.5	Reihen- und Parallelschwingkreis	36
1.5	Netzbedingungen	39
1.5.1	Spannungsebenen und Impedanzen	39
1.5.2	Merkmale der Spannung in Netzen	41
1.5.3	Impedanzen von Betriebsmitteln	44
1.5.4	Kenndaten typischer Betriebsmittel	48
1.6	Rechenbeispiele	52
1.6.1	Grafische Ermittlung der symmetrischen Komponenten	52
1.6.2	Rechnerische Ermittlung der symmetrischen Komponenten	54
1.6.3	Berechnung von Betriebsmitteln	55
1.7	Literatur	56
2	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	57
2.1	Entstehung und Ursachen	57
2.1.1	Allgemeines	57
2.1.2	Entstehung durch Netzbetriebsmittel	57
2.1.3	Entstehung durch leistungselektronische Betriebsmittel	60
2.1.3.1	Grundlagen	60
2.1.3.2	Zweiweggleichrichter mit kapazitiver Glättung	62
2.1.3.3	Drehstrombrückenschaltungen	65
2.1.3.4	Umrichter	70
2.1.4	Entstehung durch stochastisches Verbraucherverhalten	73
2.1.5	Rundsteuersignale	76
2.2	Beschreibung und Berechnung	77
2.2.1	Kenngößen und Parameter	77
2.3	Oberschwingungen und Zwischenharmonische in Netzen	80

2.3.1	Berechnung von Netzen und Betriebsmitteln	80
2.3.2	Modellierung von Betriebsmitteln	81
2.3.3	Resonanzen in elektrischen Netzen.	82
2.4	Auswirkungen von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen	87
2.4.1	Allgemeines.	87
2.4.2	Energetische Betriebsmittel	87
2.4.3	Netzbetrieb	91
2.4.4	Elektronische Betriebsmittel.	91
2.4.5	Schutz-, Meß- und Automatisierungsgeräte	92
2.4.6	Lasten und Verbraucher	95
2.4.7	Bewertung von Oberschwingungen	96
2.5	Normung	99
2.5.1	Grundsätzliches.	99
2.5.2	Störaussendung	100
2.5.3	Verträglichkeitspegel	103
2.5.4	Störfestigkeitspegel	105
2.6	Meß- und Rechenbeispiele	106
2.6.1	Oberschwingungsresonanz durch Blindstromkompensation	106
2.6.2	Bewertung eines Oberschwingungserzeugers.	108
2.6.3	Impedanzberechnung in einem Mittelspannungsnetz.	110
2.6.4	Typische Oberschwingungsspektren von NS-Verbrauchern	113
2.7	Literatur.	116
3	Spannungsschwankungen und Flicker	117
3.1	Definitionen.	117
3.2	Entstehung und Ursachen	118
3.2.1	Spannungsschwankungen	118
3.2.2	Flicker	119
3.3	Flickerberechnung nach Faustformeln	120
3.3.1	Vorbemerkungen.	120
3.3.2	Berechnen des Spannungsfalls in allgemeiner Form	121
3.3.3	A_{st}/P_{st} -Berechnung	125
3.4	Flickerberechnung für stochastische Signale	128
3.4.1	Mathematische Beschreibung des Flickeralgorithmus	128
3.4.2	Das P_{st} -Störbewertungsverfahren	129
3.5	Auswirkungen von Spannungsschwankungen	130
3.6	Normung	131
3.7	Meß- und Rechenbeispiele	133

3.7.1	Flickermessung im Niederspannungsnetz	133
3.7.2	Berechnung einer Industrieanlage zur Widerstandsheizung	134
3.8	Literatur	137
4	Spannungsunsymmetrien	139
4.1	Entstehung und Ursachen	139
4.2	Beschreibung von Unsymmetrien	139
4.2.1	Vereinfachte Betrachtung	139
4.2.2	Symmetrische Komponenten	140
4.3	Auswirkungen von Spannungsunsymmetrien	141
4.4	Normung	141
4.5	Meß- und Rechenbeispiel	141
4.5.1	Unsymmetriemessung in industriell geprägtem 20-kV-Netz	141
4.5.2	Unsymmetriebestimmung einer Industrieanlage	142
4.6	Literatur	142
5	Messung und Bewertung von Netzurückwirkungen	143
5.1	Vorbemerkungen	143
5.2	Abtastsysteme	144
5.2.1	Allgemeine Kenngrößen	144
5.2.2	Grundstruktur eines digitalen Meßgeräts	145
5.2.3	Transientenrecorder	147
5.2.4	Oberschwingungsanalytoren	148
5.2.5	Flickermeter	149
5.2.6	Kombinationsgeräte	151
5.3	Meßwertverarbeitung	152
5.3.1	Statistische Verfahren	152
5.3.2	Meß- und Auswertemöglichkeiten	157
5.4	Genauigkeitsbetrachtungen	158
5.4.1	Algorithmen und Auswertung	158
5.4.2	Meß- und Schutzwandler, Strommeßzangen	159
5.5	Einsatz und Anschluß von Meßgeräten	162
5.5.1	Niederspannungsnetz	162
5.5.2	Mittel- und Hochspannungsnetze	163
5.6	Normung	165
5.7	Kennzeichen von Meßgeräten	165
5.8	Durchführen von Messungen	168
5.9	Literatur	168

6	Abhilfemaßnahmen	169
6.1	Zuordnen der Abhilfemaßnahmen	169
6.2	Reduktion der Störaussendung des Verbrauchers	169
6.3	Verbraucherseitige Maßnahmen	173
6.3.1	Filterkreise	173
6.3.2	Dynamische Blindleistungskompensation	178
6.3.3	Symmetrierschaltungen	178
6.3.4	Aktives Filtern	179
6.3.4.1	Hochleistungsbatterien	182
6.3.4.2	Supraleitende magnetische Energiespeicher	183
6.3.4.3	Schwungmassenspeicher	186
6.3.4.4	Vergleich der verschiedenen Energiespeicher	188
6.4	Netz-/EVU-seitige Maßnahmen	189
6.4.1	Maßnahmen im Bereich Netzplanung: Netzverstärkungen	189
6.4.2	Maßnahmen im Bereich Netzbetrieb: Kurzschlußstrom-Begrenzung	190
6.5	Kostenanalyse	194
6.6	Anwendungsbeispiel: Projektieren eines aktiven Filters UPCS	195
6.6.1	Dimensionierung des UPCS	196
6.6.1.1	Dimensionieren des UPCS für die Kompensation von Oberschwingungen	196
6.6.1.2	Dimensionieren des UPCS bezüglich Spannungseinbrüchen und Flicker	203
6.6.2	Beispielhafte Netzplanung unter Berücksichtigung aktiver Netzfilter	211
6.6.2.1	Netzanschlußvarianten eines industriellen Großkunden	213
6.6.2.2	Optimieren des Einsatzorts aktiver Filter	222
6.6.3	Bewerten aktiver Netzfilter aus Sicht der Netzplanung	222
6.7	Literatur	223
7	Anleitung zum praxisorientierten Vorgehen	225
7.1	Bestandsaufnahme der Spannungsqualität (Oberschwingungen) in MS-Netzen	225
7.2	Anschluß neuer überschwingungserzeugender leistungsstarker Verbraucher	231
7.3	Ermitteln von Bezugswerten für Planungsrechnungen in einem Ringkabelnetz	237
7.3.1	Ringkabelnetzmessung 35 kV	237

7.4	Störungsaufklärung	240
7.4.1	Störungsanalyse im Kraftwerkseigenbedarfsnetz I	240
7.4.2	Störungsanalyse im Kraftwerkseigenbedarfsnetz II	243
7.4.3	Netzresonanz im Niederspannungsnetz	246
7.4.4	Blindstromkompensationsanlage in einem 500-V-Netz	250
7.5	Literatur	254
8	Anhang	255
8.1	Formelzeichen und Indizes	255
8.1.1	Formelzeichen	255
8.1.2	Indizes, tiefgestellt	256
8.1.3	Indizes, hochgestellt	258
8.2	Zitierte VDE-Bestimmungen, DIN- und IEC-Normen	259
	Stichwortverzeichnis	263