

Inhalt

1	Bedeutung der erneuerbaren Energien für die Elektroenergieversorgung	21
1.1	Allgemeines	21
1.2	Kenngößen	23
2	Erzeugungsanlagen	28
2.1	Allgemeines	28
2.2	Photovoltaik	29
2.2.1	Elektrische Ersatzschaltung	29
2.2.2	Temperatur- und Strahlungsabhängigkeit	31
2.2.3	MPP-Auslegung	35
2.3	Windenergie	37
2.3.1	Grundlegendes zur Strömungsmechanik	37
2.3.2	Verluste am Rotorblatt - Leistungsbeiwert	41
2.3.3	Leistungsbegrenzung	44
2.4	Wasserkraft	49
2.4.1	Arten von Wasserkraftanlagen	49
2.4.2	Leistungsbetrachtung	51
2.4.3	Einsatzbereiche verschiedener Wasserkraftanlagen	52
2.5	Anlagenbilder	56
2.5.1	Photovoltaikanlagen	56
2.5.2	Windenergieanlagen	58
2.5.3	Wasserkraftanlagen	63
3	Leistungselektronik und Generatoren	68
3.1	Grundsätzliches zur Leistungselektronik	68
3.2	Gleichspannungswandler	73

3.2.1	Grundsätzliches	73
3.2.2	Tiefsetzsteller	74
3.2.3	Hochsetzsteller	76
3.3	Wechselrichter in PV-Anlagen	77
3.4	Generatoren	80
3.4.1	Synchrongenerator	80
3.4.2	Asynchrongenerator	82
3.5	Anlagenkonzepte in Windenergieanlagen	84
3.5.1	Grundsätzliches	84
3.5.2	Asynchrongenerator mit direkter Netzankopplung	84
3.5.3	Asynchrongenerator mit dynamischer Schlupfregelung	86
3.5.4	Rotorgespeister Asynchrongenerator	87
3.5.5	Synchrongenerator mit Vollumrichter	89
3.5.6	Asynchrongenerator mit Vollumrichter	91
3.6	Anlagenkonzepte bei Wasserkraftanlagen	92
4	Regeln, Richtlinien, rechtliche Grundlagen und Normen	93
4.1	Allgemeines	93
4.2	Rechtliche Grundlagen	93
4.2.1	EMV-Gesetz	93
4.2.2	Energiewirtschaftsgesetz	94
4.2.3	EEG	96
4.2.4	Netzanschlussverordnung	96
4.2.5	Systemdienstleistungsverordnung	97
4.2.6	Weitere Regelungen	99
4.3	Definitionen	99
4.4	Richtlinien, Anwendungsregeln	103
4.5	Normung	106

5	Merkmale der Versorgungsspannung	114
5.1	Allgemeines	114
5.2	Andauernde Phänomene (Pegelwerte)	116
5.3	Spannungseignisse (Anhaltswerte)	118
5.4	Übersicht	120

6	Netzurückwirkungen	122
6.1	Allgemeines	122
6.2	Oberschwingungsspannungen und zwischenharmonische Spannungen	123
6.3	Spannungsschwankungen	126
6.4	Spannungsunsymmetrien	129
6.5	Flickerstärke (Flicker)	131
6.5.1	Allgemein	131
6.5.2	Flicker durch Zwischenharmonische	133
6.5.3	Verteilung des Flickers in Netzen	133
6.6	Kommutierungseinbruch	135

7	Netzimpedanz	137
7.1	Allgemeines	137
7.2	Strahlennetze	137
7.3	Ringnetze	139
7.3.1	Ringnetz in einfacher Form	141
7.3.2	Ringnetz mit Gegenstation ohne Einspeisung	141
7.4	Vermaschte Netze	142
7.5	Maschennetze	144
7.6	Netzbedingungen	144
7.6.1	Spannungsebenen und Impedanzen	144
7.6.2	Berechnung der Netzimpedanz am Verknüpfungspunkt	147
7.7	Resonanzen in Netzen	149

8	Beurteilung der Netzzrückwirkungen von Erzeugungsanlagen _____	156
8.1	Allgemeines _____	156
8.2	Erzeugungsanlage am Netz _____	157
8.2.1	Spannungsanhebung _____	157
8.2.2	Schaltbedingte relative Spannungsänderung _	160
8.2.3	Kurzzeit- und Langzeitflickerstärke _____	164
8.2.3.1	Flicker durch schaltbedingte Spannungsänderungen _____	164
8.2.3.2	Flicker im Betrieb _____	166
8.2.4	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	172
8.2.4.1	Allgemeines _____	172
8.2.4.2	Anschluss an das Niederspannungsnetz _____	172
8.2.4.3	Anschluss an das Mittelspannungsnetz _____	175
8.2.4.4	Anschluss an das Hoch- und Höchstspannungsnetz ____	179
8.2.5	Unsymmetrie _____	184
8.2.6	Kommutierungseinbrüche _____	185
8.2.7	Rückwirkungen auf Einrichtungen zur Signalübertragung _____	185

9	Netzanschlussbedingungen _____	187
9.1	Allgemeines _____	187
9.2	Spannungshaltung im stationären Betrieb _____	187
9.2.1	Spannung und Blindleistung _____	187
9.2.2	Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz _____	188
9.2.3	Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz _	190
9.2.4	Erzeugungsanlagen am Hochspannungsnetz (110-kV-Netz) _____	192

9.2.4.1	Reine und gemischte Erzeugungsanlagen_____	192
9.2.4.2	Erzeugungsanlagen im quasistationären Betrieb _____	193
9.2.4.3	Statische Spannungshaltung _____	194
9.2.4.4	Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung _____	197
9.2.5	Erzeugungsanlagen am Höchstspannungsnetz_____	200
9.3	Frequenzhaltung und Wirkleistungsreduzierung _____	205
9.3.1	Allgemeines _____	205
9.3.2	Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz _____	206
9.3.3	Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz_____	208
9.3.4	Erzeugungsanlagen am Hochspannungsnetz _____	209
9.3.5	Erzeugungsanlagen am Höchstspannungsnetz_____	211
9.3.6	Sonderregelungen für PV-Anlagen und BHKW_	211
9.4	Verhalten bei Netzstörungen, dynamische Netzstützung _____	212
9.4.1	Allgemeines _____	212
9.4.2	Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz _____	214
9.4.3	Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz_____	214
9.4.4	Erzeugungsanlagen am Hochspannungsnetz _____	217
9.4.5	Erzeugungsanlagen am Höchstspannungsnetz_____	222
9.5	Beitrag zum Kurzschlussstrom_____	228
9.6	Weitere Forderungen _____	230

10. Ausführung des Anschlusses _____	234
10.1 Anschluss an das Niederspannungsnetz _____	234
10.1.1 Regelungen gemäß VDE-AR-N 4105 _____	234
10.1.2 Anschlussausführungen _____	235
10.1.3 Netz- und Anlagenschutz _____	240
10.1.4 Kuppelschalter _____	241
10.1.5 Kurzschlusschutz, Überlastschutz, Frequenzschutz _____	241
10.1.6 Schutz gegen elektrischen Schlag, Arbeiten im Netz _____	243
10.1.7 Inselnetzerkennung _____	245
10.1.8 Zähler für Lieferung, ggf. auch für Bezug ____	246
10.1.9 Zuschaltbedingungen _____	246
10.2 Anschluss an das Mittelspannungsnetz _____	247
10.2.1 Regelungen gemäß Richtlinie des BDEW ____	247
10.2.2 Anschlussausführungen _____	248
10.2.3 Schutzeinrichtungen _____	251
10.2.4 Schalteinrichtungen _____	253
10.2.5 Zähler für Lieferung und Bezug _____	254
10.2.6 Zuschaltbedingungen _____	254
10.2.7 Sonstiges _____	255
10.3 Anschluss an das Hochspannungsnetz _____	255
10.3.1 Regelungen gemäß VDE-AR-N 4120 _____	255
10.3.2 Anschlussausführungen _____	256
10.3.3 Schutzeinrichtungen _____	257
10.3.4 Schalteinrichtungen _____	259
10.3.5 Zähler _____	260
10.3.6 Zuschaltbedingungen _____	260
10.4 Anschluss an das Höchstspannungsnetz _____	260
10.4.1 Regelungen gemäß VDN-Leitfaden _____	260
10.4.2 Anschlussausführungen _____	261
10.4.3 Schutzeinrichtungen _____	262
10.4.4 Schaltgeräte _____	263

10.4.5	Zuschaltbedingungen	263
11	Sonderfragen	264
11.1	Allgemeines	264
11.2	Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)	265
11.2.1	Allgemeines zu Drehstromübertragung und HGÜ	265
11.2.2	HGÜ-Technik	268
11.2.2.1	Stromrichterstationen	268
11.2.2.2	Stromrichterstation mit Thyristoren	269
11.2.2.3	Stromrichterstation mit IGBT	270
11.2.2.4	Schalter und sonstige Einrichtungen	271
11.2.3	HGÜ-Freileitungen und -Kabel	272
11.2.4	Elektroden	275
11.2.5	Kostenbetrachtungen	275
11.3	Netzanschluss mit Freileitungen	276
11.3.1	Belastbarkeit von Freileitungen	276
11.3.2	Einsatz neuer Leiterseile – Temperaturmonitoring	277
11.3.3	Abstand von Windenergieanlagen zu Freileitungen	280
11.4	Netzanschluss mit Kabeln	281
11.4.1	Belastbarkeit von HS-Kabeln	281
11.4.2	Belastbarkeit von MS-Kabeln	283
11.4.2.1	Betriebsbedingungen	283
11.4.2.2	Bodeneigenschaften	285
11.4.2.3	DIN VDE 0276-1000	286
11.4.3	Belastbarkeit von NS-Kabeln	289
11.4.3.1	VDE 0100-520	289
11.4.3.2	Neutralleiterauslegung	293

12	Zertifizierung	295
12.1	Allgemeines	295
12.2	Bestimmung der elektrischen Eigenschaften (TR3)	297
12.3	Anforderungen an Modellierung und Validierung (TR4)	300
12.4	Zertifizierung der elektrischen Eigenschaften (TR8)	302

13	Anhang	305
13.1	Sicherheitsregeln	305
13.2	Literatur	306
13.3	Internetinformationen	310

	Stichwortverzeichnis	311
--	----------------------	-----