

Inhalt

1 Bedeutung der erneuerbaren Energien für die Elektroenergieversorgung	21
1.1 Allgemeines	21
1.2 Kenngrößen	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 Spannungsereignisse (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 Netzurückwirkungen 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
----------------------	-----