

Inhalt

1	Bedeutung der erneuerbaren Energien für die Elektroenergie	19
1.1	Allgemeines	19
1.2	Kenngößen	21
2	Erzeugungsanlagen	25
2.1	Allgemeines	25
2.2	Photovoltaik	26
2.2.1	Elektrische Ersatzschaltung	26
2.2.2	Temperatur- und Strahlungsabhängigkeit	28
2.2.3	MPP-Auslegung	31
2.3	Windenergie	33
2.3.1	Grundlegendes zur Strömungsmechanik	33
2.3.2	Verluste am Rotorblatt – Leistungsbeiwert	37
2.3.3	Leistungsbegrenzung	39
2.4	Wasserkraft	44
2.4.1	Arten von Wasserkraftanlagen	44
2.4.2	Leistungsbetrachtung	45
2.4.3	Einsatzbereiche verschiedener Wasserkraftanlagen	46
3	Leistungselektronik und Generatoren	50
3.1	Grundsätzliches zur Leistungselektronik	50
3.2	Gleichspannungswandler	54
3.2.1	Grundsätzliches	54
3.2.2	Tiefsetzsteller	54
3.2.3	Hochsetzsteller	57
3.3	Wechselrichter in PV-Anlagen	58
3.4	Generatoren	61
3.4.1	Synchrongenerator	61
3.4.2	Asynchrongenerator	63

3.5	Anlagenkonzepte in Windenergieanlagen	64
3.5.1	Grundsätzliches	64
3.5.2	Asynchrongenerator mit direkter Netzanschluss	65
3.5.3	Asynchrongenerator mit dynamischer Schlupfregelung	66
3.5.4	Rotorgespeister Asynchrongenerator	67
3.5.5	Synchrongenerator mit Vollumrichter	68
3.6	Anlagenkonzepte bei Wasserkraftanlagen	70

4	Regeln, Richtlinien, rechtliche Grundlagen und Normen	71
4.1	Allgemeines	71
4.2	Rechtliche Grundlagen	71
4.2.1	EMV-Gesetz	71
4.2.2	Energiewirtschaftsgesetz	72
4.2.3	EEG	74
4.2.4	Netzanschlussverordnung	74
4.2.5	Systemdienstleistungsverordnung	75
4.2.6	Weitere Regelungen	76
4.3	Definitionen	77
4.4	Richtlinien, Anwendungsregeln	79
4.5	Normung	82

5	Merkmale der Versorgungsspannung	87
5.1	Allgemeines	87
5.2	Andauernde Phänomene (Pegelwerte)	89
5.3	Spannungseignisse (Anhaltswerte)	91
5.4	Übersicht	93

6	Netzurückwirkungen	95
6.1	Allgemeines	95
6.2	Oberschwingungsspannungen und zwischenharmonische Spannungen	96
6.3	Spannungsschwankungen	99
6.4	Spannungsunsymmetrien	101

6.5	Flickerstärke (Flicker)	102
6.5.1	Allgemein	102
6.5.2	Flicker durch Zwischenharmonische	104
6.5.3	Verteilung des Flickers in Netzen	105
6.6	Kommutierungseinbruch	106
7 Netzimpedanz 108		
7.1	Allgemeines	108
7.2	Strahlennetze	108
7.3	Ringnetze	110
7.3.1	Ringnetz in einfacher Form	110
7.3.2	Ringnetz mit Gegenstation ohne Einspeisung	112
7.4	Vermaschte Netze	112
7.5	Maschennetze	114
7.6	Netzbedingungen	114
7.6.1	Spannungsebenen und Impedanzen	114
7.6.2	Berechnung der Netzimpedanz am Verknüpfungspunkt	117
7.7	Resonanzen in Netzen	119
8 Beurteilung der Netzurückwirkungen von Erzeugungsanlagen 125		
8.1	Allgemeines	125
8.2	Erzeugungsanlage am Netz	126
8.2.1	Spannungsanhebung	126
8.2.2	Schaltbedingte relative Spannungsänderung	128
8.2.3	Kurzzeit- und Langzeitflickerstärke	132
8.2.3.1	Flicker durch schaltbedingte Spannungsänderungen	132
8.2.3.2	Flicker im Betrieb	134
8.2.4	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	140
8.2.4.1	Allgemeines	140
8.2.4.2	Anschluss an das Niederspannungsnetz	140
8.2.4.3	Anschluss an das Mittelspannungsnetz	143
8.2.4.4	Anschluss an das Hochspannungsnetz	147
8.2.5	Unsymmetrie	151

8.2.6	Kommutierungseinbrüche	151
8.2.7	Rückwirkungen auf Einrichtungen zur Signalübertragung	152

9	Netzanschlussbedingungen	153
9.1	Allgemeines	153
9.2	Spannungshaltung im stationären Betrieb	153
9.2.1	Blindleistung und Spannungshaltung	153
9.2.2	Netzanschlussverordnung	154
9.2.3	TR Mittelspannung	154
9.2.4	Bestimmungen der Versorgungsnetzbetreiber	155
9.3	Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz	155
9.4	Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz	156
9.5	Erzeugungsanlagen am Hochspannungsnetz	158
9.6	Frequenzhaltung und Wirkleistungsreduzierung	162
9.6.1	Allgemeines	162
9.6.2	Regeln für Erzeugungsanlagen	163
9.6.3	Sonderregelungen für PV-Anlagen und BHKW	164
9.7	Verhalten bei Netzstörungen, dynamische Netzstützung	165
9.8	Weitere Forderungen	171

10	Ausführung des Anschlusses	175
10.1	Anschluss an das Niederspannungsnetz	175
10.1.1	Regelungen gemäß VDE-AR-N 4105	175
10.1.2	Netz- und Anlagenschutz	180
10.1.3	Kuppelschalter	180
10.1.4	Kurzschlusschutz, Überlastschutz, Frequenzschutz	181
10.1.5	Schutz gegen elektrischen Schlag, Arbeiten im Netz	182
10.1.6	Inselnetzerkennung	184
10.1.7	Zähler für Lieferung, ggf. auch für Bezug	185
10.1.8	Zuschaltbedingungen	186
10.1.9	Anschlusschränke und Zählerplätze	186
10.2	Anschluss an das Mittelspannungsnetz	186
10.2.1	Regelungen gemäß MS-Richtlinie des BDEW	186
10.2.2	Aufbau der Richtlinie	187

10.2.3	Schalteinrichtungen	187
10.2.4	Eigenbedarfsversorgung	188
10.2.5	Schutzeinrichtungen	188
10.2.6	Zuschaltbedingungen	190
10.2.7	Zähler für Lieferung, ggf. auch für Bezug	190
10.3	Anschluss an das Hochspannungsnetz	191
10.3.1	VDN-Leitfaden	191
10.3.2	Schutzeinrichtungen	192
10.3.3	Zuschaltbedingungen	193

11	Sonderfragen	194
11.1	Allgemeines	194
11.2	Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)	195
11.2.1	Allgemeines zu Drehstromübertragung und HGÜ	195
11.2.2	HGÜ-Technik	198
11.2.2.1	Stromrichterstationen	198
11.2.2.2	Stromrichterstation mit Thyristoren	199
11.2.2.3	Stromrichterstation mit IGBT	200
11.2.2.4	Schalter und sonstige Einrichtungen	200
11.2.3	HGÜ-Freileitungen und -Kabel	202
11.2.4	Elektroden	204
11.2.5	Kostenbetrachtungen	204
11.3	Netzanschluss mit Freileitungen	205
11.3.1	Belastbarkeit von Freileitungen	205
11.3.2	Einsatz neuer Leiterseile – Temperaturmonitoring	206
11.3.3	Abstand von Windenergieanlagen zu Freileitungen	208
11.4	Netzanschluss mit Kabeln	210
11.4.1	Belastbarkeit von HS-Kabeln	210
11.4.2	Belastbarkeit von MS-Kabeln	211
11.4.2.1	Betriebsbedingungen	211
11.4.2.2	Bodeneigenschaften	213
11.4.2.3	DIN VDE 0276-1000	214
11.4.3	Belastbarkeit von NS-Kabeln	216
11.4.3.1	VDE 0100-520	216
11.4.3.2	Neutralleiterauslegung	220

12 Zertifizierung	222
12.1 Allgemeines	222
12.2 Bestimmung der elektrischen Eigenschaften (TR3)	224
12.3 Anforderungen an Modellierung und Validierung (TR4)	226
12.4 Zertifizierung der elektrischen Eigenschaften (TR8)	228

13 TAB Hochspannung (E VDE-AR-N 4120)	
– Anschluss an das 110-kV-Netz	231
13.1 Allgemeines	231
13.2 Definitionen	232
13.3 Netzanschluss	233
13.4 Netzurückwirkungen und Spannungsqualität	235
13.4.1 Störaussendungen	235
13.4.2 Erfassen der Spannungsqualität	238
13.5 Blindleistung und Verschiebungsfaktor bei Wirkleistungsbezug	238
13.6 Besondere Regelungen für Erzeugungsanlagen am 110-kV-Netz	239
13.6.1 Reine und gemischte Erzeugungsanlagen	239
13.6.2 Erzeugungsanlagen im quasistationären Betrieb	239
13.6.3 Statische Spannungshaltung	240
13.6.4 Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung	242
13.6.5 Dynamische Netzstützung	245
13.6.6 Wirkleistungsreduzierung	249
13.7 Beitrag zum Kurzschlussstrom	250

14 Anhang	253
14.1 Sicherheitsregeln	253
14.2 Literatur	254
14.3 Technische Richtlinien und Regelungen	256
14.4 Internetinformationen	258

Stichwortverzeichnis	259
-----------------------------	------------