

Inhalt

Vorwort.....	9
1	Bedeutung der erneuerbaren Energien für die Elektroenergieversorgung..... 17
1.1	Allgemeines..... 17
1.2	Kenngrößen..... 21
2	Funktionsweise von EE-Anlagen..... 27
2.1	Allgemeines..... 27
2.2	Photovoltaikanlagen..... 29
2.2.1	Elektrische Ersatzschaltung..... 29
2.2.2	Abhängigkeit von Bestrahlungsstärke und Temperatur..... 31
2.2.3	MPP-Auslegung..... 34
2.3	Windenergieanlagen..... 36
2.3.1	Kinetische Energie eines Luftmassenstroms..... 36
2.3.2	Auftriebsläuferprinzip..... 39
2.4	Wasserkraft..... 41
2.4.1	Arten von Wasserkraftanlagen..... 41
2.4.2	Leistungsbetrachtung..... 43
2.5	Anlagenbilder..... 48
2.5.1	Photovoltaikanlagen..... 48
2.5.2	Windenergieanlagen..... 49
2.5.3	Wasserkraftanlagen..... 51
3	Leistungselektronik und Generatoren..... 53
3.1	Grundsätzliches zur Leistungselektronik..... 53
3.2	Gleichspannungswandler..... 58
3.2.1	Grundsätzliches..... 58
3.2.2	Tiefsetzsteller..... 58
3.2.3	Hochsetzsteller..... 60
3.3	Wechselrichter in Photovoltaikanlagen..... 61
3.4	Generatoren..... 64
3.4.1	Allgemeines..... 64
3.4.2	Synchrongenerator..... 64

3.4.3	Asynchrongenerator	68
3.5	Anlagenkonzepte bei Windenergieanlagen	71
3.5.1	Klassisches dänisches Konzept.....	71
3.5.2	Teilumrichterkonzept	72
3.5.3	Vollumrichterkonzept	74
3.6	Anlagenkonzepte bei Wasserkraftanlagen	79
4	Regeln, Richtlinien, rechtliche Grundlagen und Normen.....	81
4.1	Allgemeines	81
4.2	Rechtliche Grundlagen	81
4.2.1	EMV-Gesetz	81
4.2.2	Energiewirtschaftsgesetz	82
4.2.3	Erneuerbare-Energien-Gesetz.....	83
4.2.4	Netzanschlussverordnung	83
4.2.5	Elektrotechnische-Eigenschaften-Nachweis-Verordnung.....	84
4.2.6	Weitere Regelungen.....	85
4.3	Definitionen.....	85
4.4	Richtlinien, Anwendungsregeln.....	88
4.5	Normung.....	90
5	Merkmale der Versorgungsspannung	91
5.1	Allgemeines	91
5.2	Andauernde Phänomene (Pegelwerte)	92
5.3	Spannungsereignisse (Anhaltswerte)	95
5.4	Übersicht.....	96
6	Netzurückwirkungen	99
6.1	Allgemeines	99
6.2	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	100
6.3	Spannungsschwankungen.....	103
6.4	Spannungsunsymmetrien	105
6.5	Flickerstärke (Flicker)	106
6.5.1	Allgemein.....	106
6.5.2	Flicker durch Zwischenharmonische	108
6.5.3	Verteilung des Flickers in Netzen	109
6.6	Kommutierungseinbrüche	110
7	Netzimpedanz.....	113
7.1	Allgemeines.....	113
7.2	Strahlennetze.....	113

7.3	Ringnetze	115
7.3.1	Ringnetz in einfacher Form	115
7.3.2	Ringnetz mit Gegenstation ohne Einspeisung.....	116
7.4	Vermaschte Netze.....	117
7.5	Maschennetze	119
7.6	Netzbedingungen.....	119
7.6.1	Spannungsebenen und Impedanzen.....	119
7.6.2	Berechnung der Netzimpedanz am Verknüpfungspunkt	121
7.7	Netzresonanzen	123
8	Beurteilung der Netzurückwirkungen von Erzeugungsanlagen...	129
8.1	Allgemeines.....	129
8.2	Erzeugungsanlage am Netz.....	129
8.2.1	Spannungsanhebung.....	129
8.2.2	Schaltbedingte relative Spannungsänderung	130
8.3	Kurzzeit- und Langzeitflickerstärke	131
8.3.1	Flicker durch schaltbedingte Spannungsänderungen	131
8.3.2	Flicker von Windenergieanlagen in Betrieb.....	132
8.4	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	134
8.4.1	Allgemeines.....	134
8.4.2	Anschluss an das Niederspannungsnetz	134
8.4.3	Anschluss an das Mittelspannungsnetz.....	135
8.4.4	Anschluss an das Hochspannungsnetz	137
8.4.5	Anschluss an das Höchstspannungsnetz.....	139
9	Netzanschlussbedingungen.....	143
9.1	Allgemeines.....	143
9.2	Spannungshaltung im stationären Betrieb.....	143
9.2.1	Spannung und Blindleistung	143
9.2.2	Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz	144
9.2.3	Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz	145
9.2.4	Erzeugungsanlagen am Hochspannungsnetz.....	147
9.2.5	Erzeugungsanlagen am Höchstspannungsnetz	149
9.3	Frequenzhaltung und Wirkleistungsreduzierung	151
9.3.1	Allgemeines.....	151
9.3.2	Anforderungen an Erzeugungsanlagen.....	151
9.4	Verhalten bei Netzstörungen (dynamische Netzstützung)	153
9.4.1	Allgemeines.....	153
9.4.2	Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz	153
9.4.3	Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz	154

9.4.4	Erzeugungsanlagen am Hochspannungsnetz.....	155
9.4.5	Erzeugungsanlagen am Höchstspannungsnetz.....	156
9.5	Beitrag zum Kurzschlussstrom.....	157
10	Ausführung des Netzanschlusses	159
10.1	Anschluss an das Niederspannungsnetz	159
10.1.1	Regelungen gemäß VDE-AR-N 4105	159
10.1.2	Anschlussausführungen.....	160
10.1.3	Netz- und Anlagenschutz	164
10.1.4	Kuppelschalter.....	164
10.1.5	Kurzschlusschutz, Überlastschutz, Frequenzschutz	165
10.1.6	Schutz gegen elektrischen Schlag, Arbeiten im Netz	166
10.1.7	Inselneterkennung.....	167
10.1.8	Zähler für Lieferung, ggf. auch für Bezug	168
10.1.9	Zuschaltbedingungen	168
10.2	Anschluss an das Mittelspannungsnetz.....	169
10.2.1	Allgemeines.....	169
10.2.2	Anschlussausführungen.....	170
10.2.3	Schutzeinrichtungen.....	171
10.2.4	Schalteinrichtungen	173
10.2.5	Zähler für Lieferung und Bezug.....	173
10.2.6	Zuschaltbedingungen	174
10.2.7	Sonstiges.....	174
10.3	Anschluss an das Hochspannungsnetz	174
10.3.1	Allgemeines.....	174
10.3.2	Anschlussausführungen.....	175
10.3.3	Schutzeinrichtungen.....	175
10.3.4	Schalteinrichtungen	178
10.3.5	Zähler	178
10.3.6	Zuschaltbedingungen	179
10.4	Anschluss an das Höchstspannungsnetz.....	179
10.4.1	Allgemeines.....	179
10.4.2	Anschlussausführungen.....	180
10.4.3	Schutzeinrichtungen.....	180
10.4.4	Schaltgeräte.....	181
10.4.5	Zuschaltbedingungen	181
11	Sonderfragen	183
11.1	Allgemeines.....	183
11.2	Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)	184

11.2.1	Allgemeines zu Drehstromübertragung und HGÜ	184
11.2.2	HGÜ-Technik.....	187
11.2.3	HGÜ-Freileitungen und -Kabel	190
11.2.4	Elektroden	192
11.2.5	Kostenbetrachtungen	192
11.3	Netzanschluss mit Freileitungen	192
11.3.1	Belastbarkeit von Freileitungen.....	192
11.3.2	Hochtemperatur-Leiterseile und Temperaturmonitoring	194
11.3.3	Abstand von Windenergieanlagen zu Freileitungen	196
11.4	Netzanschluss mit Kabeln	197
11.4.1	Belastbarkeit von HS-Kabeln	197
11.4.2	Belastbarkeit von MS-Kabeln.....	198
11.4.3	Belastbarkeit von NS-Kabeln	203
12	Zertifizierung.....	209
12.1	Allgemeines.....	209
12.2	Bestimmung der elektrischen Eigenschaften (TR3)	211
12.3	Anforderungen an Modellierung und Validierung (TR4)	213
12.4	Zertifizierung der elektrischen Eigenschaften (TR8)	214
Literatur		217
Stichwortverzeichnis		221