

Inhaltsverzeichnis

1	Windenergieanlagen	1
1.1	Anlagenstrukturen	1
1.2	Rückblick in die Historie	4
1.3	Meilensteine der Entwicklung	4
1.4	Funktionsstrukturen von Windkraftanlagen	20
2	System zur Windenergiewandlung	25
2.1	Antriebsmoment und Leistung am Windrad	25
2.1.1	Ein- und Ausgangsgrößen einer Windturbine	25
2.1.2	Leistungsentnahme aus der Luftströmung	26
2.1.3	Leistungs- bzw. Antriebsmomentbestimmung nach der Blattelementmethode	28
2.1.4	Vereinfachung des Rechenverfahrens	33
2.1.5	Verfahren zur Nachbildung des Turbinenverhaltens	37
2.2	Turbinen	41
2.2.1	Naben- und Turbinenanordnung	44
2.2.2	Rotorblattgeometrie	45
2.3	Eingriffe an der Windturbine zur Leistungsregelung	52
2.3.1	Turbinennachführung	52
2.3.2	Rotorblattverstellung	61
2.3.3	Leistungsbegrenzung durch Stallbetrieb	93
2.3.4	Leistungsanpassung durch Drehzahleinstellung	98
2.4	Mechanischer Triebstrang	100
2.5	Systemdaten von Windkraftanlagen	106
2.5.1	Turbinen- und Triebstrangdaten	106
2.5.2	Anlagen- und Turmmasse	108
2.5.3	Anlagenkosten	113
3	Mechanisch-elektrische Energiewandlung durch Generatoren	115
3.1	Randbedingungen und Anforderungen zum Generatoreinsatz	115
3.2	Energiewandlersysteme	117
3.2.1	Aufbau der Asynchronmaschine	120
3.2.2	Aufbau der Synchronmaschine	121
3.3	Betriebsbereiche von Asynchron- und Synchrongeneratoren	123
3.4	Stationäre und dynamische Drehmomente	128
3.4.1	Stationäre Drehmomente	129
3.4.2	Dynamische Drehmomente	144
3.5	Nachbildung von Generatoren	152
3.5.1	Synchronmaschinen	153
3.5.2	Asynchronmaschinen	157

3.6	Auslegungsaspekte	159
3.6.1	Asynchrongeneratoren	159
3.6.2	Synchrongeneratoren für getriebelose Anlagen	174
3.7	Maschinendaten	188
3.7.1	Masse- und Kostenrelationen	188
3.7.2	Kennwerte von Asynchronmaschinen	191
3.7.3	Kennwerte von Synchronmaschinen	191
4	Elektrische Energieübergabe an Versorgungsnetze	197
4.1	Energieaufbereitung und Netzanbindung	197
4.1.1	Umrichtersysteme	199
4.1.2	Leistungshalbleiter für Umrichter	202
4.1.3	Funktionsmerkmale von Stromrichtern	205
4.1.4	Umrichterkonzeption	210
4.1.5	Zwischenkreisumrichter	211
4.1.6	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	224
4.1.7	Schutzmaßnahmen bei der Energieaufbereitung	226
4.2	Netzschutz	227
4.2.1	Sicherungen und Netztrennung	228
4.2.2	Kurzschlussleistung	228
4.2.3	Erhöhung der Kurzschlussleistung	231
4.2.4	Isolierter Betrieb und Kurzunterbrechungen	234
4.2.5	Überspannungen bei Netzfehlern	236
4.3	Netzeinwirkungen	237
4.3.1	Allgemeine Verträglichkeit und Störungen	237
4.3.2	Leistungsverhalten von Windkraftanlagen	237
4.3.3	Spannungsverhalten bei Netzeinspeisung	251
4.3.4	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	262
4.4	Resonanzerscheinungen im Netzsystem bei Normalbetrieb	272
4.5	Abhilfemaßnahmen gegen Netzeinwirkungen	277
4.5.1	Filter	278
4.5.2	Filterauslegung	280
4.5.3	Wirkung von Saugkreisfiltern und Kompensationsanlagen	281
4.5.4	Netzspezifische Filterauslegung	281
4.5.5	Nutzung von Ausgleichseffekten	285
4.6	Netzregelung und Netzstützung	288
4.6.1	Einspeisung von Windkraftanlagen	289
4.6.2	Netzstützung und Netzregelung mit Windkraftanlagen und anderen regenerativen Systemen	290
4.7	Netzanschlussregeln	296
4.8	Netzanschluss im Offshore-Bereich	301
4.8.1	Offshore-Windpark-Eigenschaften	301
4.8.2	Stationäres und dynamisches Verhalten von Offshore-Windparks	303
4.8.3	Windpark- und Cluster-Bildung im Meer und Netzanbindung	303
4.8.4	Elektrische Energieübertragung zum Festland	307

4.9	Integration der Windenergie in das Verbundnetz und Energiebereitstellung	310
4.9.1	Netzausbau	310
4.9.2	Energiebereitstellung	311
4.9.3	Regel- und Reserveleistung	313
4.9.4	Interkontinentale Netzverbindung	315
5	Regelung und Führung von Windkraftanlagen	317
5.1	Systemanforderungen und Betriebsarten	318
5.2	Inselbetrieb von Windkraftanlagen	320
5.2.1	Anlagen ohne Blattverstelleinrichtung	322
5.2.2	Anlagen mit Blattverstelleinrichtung	322
5.2.3	Anlagen mit Verbrauchersteuerung	324
5.2.4	Anlagenregelung über Bypass	325
5.3	Netzbetrieb von Windkraftanlagen	325
5.4	Regelungskonzeptionen	330
5.4.1	Regelung im Inselbetrieb	330
5.4.2	Regelung drehzahlvariabel betriebener Anlagen	335
5.4.3	Regelung schlupfvariabel betriebener Asynchrongeneratoren	336
5.4.4	Regelung netzstarr betriebener Anlagen	351
5.5	Reglerauslegung	351
5.5.1	Verstellvorgänge und Torsionsmomente an den Rotorblättern	355
5.5.2	Normierung und Linearisierung der Größen	358
5.5.3	Regelkreise und die vereinfachte Dimensionierung	363
5.5.4	Verbesserung der Regeleigenschaften	367
5.6	Betriebsführung	374
5.6.1	Betriebszustände	374
5.6.2	Störfälle	385
5.6.3	Zustandserfassung der Systemkomponenten	386
5.7	Überwachungs- und Sicherheitssysteme	387
5.7.1	Windmesseinrichtung	387
5.7.2	Schwingungsüberwachung	387
5.7.3	Netzüberwachung und Blitzschutz	388
5.7.4	Überwachungsrechner	388
5.7.5	Fehlerfrüherkennung	390
6	Nutzung der Windenergie	393
6.1	Windverhältnisse und Energieerträge	393
6.1.1	Globale Windverhältnisse	393
6.1.2	Lokale Windverhältnisse und Jahreswindenergieangebot	394
6.1.3	Berechnung von Anlagenerträgen	397
6.1.4	Wind-Atlas-Methode	402
6.2	Potenziale und Ausbau	405
6.2.1	Windenergienutzung an Land	407
6.2.2	Offshore-Windenergienutzung	409
6.2.3	Repowering	411

6.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	413
6.3.1	Anschaffungs- und Unterhaltskosten	414
6.3.2	Energieeinspeisung und monetäre Erträge	416
6.3.3	Stromgestehungskosten	417
6.3.4	Betriebswirtschaftliche Berechnungsmethoden	418
6.3.5	Berücksichtigung externer Kosten	422
6.4	Rechtliche Aspekte und Errichtung von Windkraftanlagen	423
6.4.1	Immissionsschutz	423
6.4.2	Natur- und Landschaftsschutz	426
6.4.3	Baurecht	428
6.4.4	Planung und Genehmigung	429
6.4.5	Vorgehen zur Errichtung von Windkraftanlagen	430
6.4.6	Offshore-Nutzung der Windenergie	430
6.5	Ökobilanz	434
Anhang		437
Literaturverzeichnis		439
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen		465
Stichwortverzeichnis		473