

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	120
3.3 Betriebsbereiche von Asynchron- und Synchrongeneratoren	123
3.4 Stationäre und dynamische Drehmomente	129
3.4.1 Stationäre Drehmomente	129
3.4.2 Dynamische Drehmomente	143
3.5 Nachbildung von Generatoren	151
3.5.1 Synchronmaschinen	152

3.5.2 Asynchronmaschinen	156
3.6 Auslegungsaspekte	158
3.6.1 Asynchrongeneratoren	158
3.6.2 Synchrongeneratoren für getriebelose Anlagen	173
3.7 Maschinendaten	187
3.7.1 Masse- und Kostenrelationen	187
3.7.2 Kennwerte von Asynchronmaschinen	190
3.7.3 Kennwerte von Synchronmaschinen	190
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

5 Regelung und Führung von Windkraftanlagen	303
5.1 Systemanforderungen und Betriebsarten	304
5.2 Inselbetrieb von Windkraftanlagen	306
5.2.1 Anlagen ohne Blattverstelleinrichtung	308
5.2.2 Anlagen mit Blattverstelleinrichtung	308
5.2.3 Anlagen mit Verbrauchersteuerung	309
5.2.4 Anlagenregelung über Bypass	310
5.3 Netzbetrieb von Windkraftanlagen	311
5.4 Regelungskonzeptionen	316
5.4.1 Regelung im Inselbetrieb	316
5.4.2 Regelung drehzahlvariabel betriebener Anlagen	320
5.4.3 Regelung schlupfvariabel betriebener Asynchrongeneratoren	322
5.4.4 Regelung netzstarr betriebener Anlagen	335
5.5 Reglerauslegung	337
5.5.1 Verstellvorgänge und Torsionsmomente an den Rotorblättern	341
5.5.2 Normierung und Linearisierung der Größen	346
5.5.3 Regelkreise und die vereinfachte Dimensionierung	349
5.5.4 Verbesserung der Regeleigenschaften	353
5.6 Betriebsführung	359
5.6.1 Betriebszustände	360
5.6.2 Störfälle	371
5.6.3 Zustandserfassung der Systemkomponenten	372
5.7 Überwachungs- und Sicherheitssysteme	372
5.7.1 Windmesseinrichtung	373
5.7.2 Schwingungsüberwachung	373
5.7.3 Netzüberwachung und Blitzschutz	374
5.7.4 Überwachungsrechner	374
5.7.5 Fehlerfrüherkennung	375
6 Nutzung der Windenergie	379
6.1 Windverhältnisse und Energieerträge	379
6.1.1 Globale Windverhältnisse	379
6.1.2 Lokale Windverhältnisse und Jahreswindenergieangebot	380
6.1.3 Berechnung von Anlagenerträgen	382
6.1.4 Wind-Atlas-Methode	389
6.2 Potentiale und Ausbau	391
6.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	394
6.3.1 Anschaffungs- und Unterhaltskosten	394
6.3.2 Energieeinspeisung und monetäre Erträge	397
6.3.3 Stromgestehungskosten	398
6.3.4 Betriebswirtschaftliche Berechnungsmethoden	399
6.4 Rechtliche Aspekte und Errichtung von Windkraftanlagen	403
6.4.1 Immissionsschutz	403
6.4.2 Natur- und Landschaftsschutz	406
6.4.3 Baurecht	408

6.4.4	Planung und Genehmigung	408
6.4.5	Vorgehen zur Errichtung von Windkraftanlagen	410
Anhang		413
Literaturverzeichnis		415
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen		433
Stichwortverzeichnis		441