

Inhaltsverzeichnis

1	Windenergieanlagen	1
1.1	Anlagenstrukturen	2
1.2	Rückblick in die Historie	4
1.3	Meilensteine der Entwicklung	6
1.4	Windkraftanlagen mit hohen Energieerträgen und guter Netzauslastung	23
1.5	Multi-Megawatt-Anlagen der neuen Generation	26
1.6	Funktionsstrukturen von Windkraftanlagen	27
	Literatur	30
2	System zur Windenergieumwandlung	31
2.1	Antriebsmoment und Leistung am Windrad	31
2.1.1	Ein- und Ausgangsgrößen einer Windturbine	32
2.1.2	Leistungsentnahme aus der Luftströmung	33
2.1.3	Leistungs- bzw. Antriebsmomentbestimmung nach der Blattelementmethode	34
2.1.4	Vereinfachung des Rechenverfahrens	39
2.1.5	Verfahren zur Nachbildung des Turbinenverhaltens	44
2.2	Turbinen	48
2.2.1	Naben- und Turbinenanordnung	51
2.2.2	Rotorblattgeometrie	53
2.3	Eingriffe an der Windturbine zur Leistungsregelung	59
2.3.1	Turbinennachführung	59
2.3.2	Rotorblattverstellung	68
2.3.3	Leistungsbegrenzung durch Stallbetrieb	100
2.3.4	Leistungsanpassung durch Drehzahleinstellung	105
2.4	Mechanischer Triebstrang	106

2.5	Systemdaten von Windkraftanlagen.	113
2.5.1	Turbinen- und Triebstrangdaten.	113
2.5.2	Anlagen- und Turmmasse	115
2.5.3	Anlagenkosten	121
	Literatur.	122
3	Mechanisch-elektrische Energiewandlung durch Generatoren	125
3.1	Randbedingungen und Anforderungen zum Generatoreinsatz	125
3.2	Energiewandlersysteme	128
3.2.1	Aufbau der Asynchronmaschine	131
3.2.2	Aufbau der Synchronmaschine	132
3.3	Betriebsbereiche von Asynchron- und Synchrongeneratoren	134
3.4	Stationäre und dynamische Drehmomente	141
3.4.1	Stationäre Drehmomente	141
3.4.2	Dynamische Drehmomente	156
3.5	Nachbildung von Generatoren	165
3.5.1	Synchronmaschinen	166
3.5.2	Asynchronmaschinen.	171
3.6	Auslegungsaspekte.	172
3.6.1	Asynchrongeneratoren	173
3.6.2	Synchrongeneratoren für getriebelose Anlagen.	188
3.6.3	Multi-Generator-Konzept (Dissertation Dr. Adil Ezzahraoui)	203
3.6.4	Ringgenerator mit Magnetlagerung (Dissertation Dr. Katharina Messoll).	212
3.6.5	Kompakte, supraleitende und andere neue Generatorkonzepte.	216
3.7	Maschinendaten	218
3.7.1	Masse- und Kostenrelationen.	218
3.7.2	Kennwerte von Asynchronmaschinen	221
3.7.3	Kennwerte von Synchronmaschinen	223
	Literatur.	226
4	Elektrische Energieübergabe an Versorgungsnetze.	229
4.1	Energieaufbereitung und Netzanbindung.	231
4.1.1	Umrichtersysteme	232
4.1.2	Leistungshalbleiter für Umrichter	235
4.1.3	Funktionsmerkmale von Stromrichtern	239
4.1.4	Umrichterkonzeption	244
4.1.5	Zwischenkreisumrichter.	246
4.1.6	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).	258
4.1.7	Schutzmaßnahmen bei der Energieaufbereitung	260
4.1.8	Umrichtersysteme mit Energiespeicher	262

4.2	Netzschutz	263
4.2.1	Sicherungen und Netztrennung	263
4.2.2	Kurzschlussleistung	264
4.2.3	Erhöhung der Kurzschlussleistung	267
4.2.4	Isolierter Betrieb und Kurzunterbrechungen	271
4.2.5	Überspannungen bei Netzfehlern	273
4.3	Netzeinwirkungen	273
4.3.1	Allgemeine Verträglichkeit und Störungen	274
4.3.2	Leistungsverhalten von Windkraftanlagen	274
4.3.3	Spannungsverhalten bei Netzeinspeisung	288
4.3.4	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	301
4.3.5	Spannungseinbrüche und Durchlauf von Fehlern (FRT)	311
4.4	Resonanzerscheinungen im Netzsystem bei Normalbetrieb	318
4.5	Abhilfemaßnahmen gegen Netzeinwirkungen und Netzresonanzen	324
4.5.1	Filter	324
4.5.2	Filterauslegung	326
4.5.3	Wirkung von Saugkreisfiltern und Kompensationsanlagen	327
4.5.4	Netzspezifische Filterauslegung	330
4.5.5	Nutzung von Ausgleichseffekten	332
4.6	Netzregelung und Netzstützung	334
4.6.1	Einspeisung von Windkraftanlagen	336
4.6.2	Netzstützung und Netzregelung mit Windkraftanlagen und anderen regenerativen Systemen	337
4.6.3	Zentrale Blindleistungsregelung	343
4.6.4	Systemdienstleistungen und Betriebsführung	345
4.6.5	Anschluss von Windkraftanlagen an das Übertragungsnetz	347
4.6.6	Stromführung im Turm der Anlagen	350
4.6.7	Netzanschlussstationen für Windparks	351
4.7	Netzanschlussregeln	355
4.8	Netzanschluss im Offshore-Bereich	362
4.8.1	Offshore-Windpark-Eigenschaften	363
4.8.2	Stationäres und dynamisches Verhalten von Offshore-Windparks	364
4.8.3	Windpark- und Cluster-Bildung im Meer und Netzanbindung	365
4.8.4	Elektrische Energieübertragung zum Festland	371
4.8.5	Blindstrombedarf und Blindstrombereitstellung im Offshore-Netz	372
4.8.6	Flexible AC Transmission Systems (FACTS)	378

4.9	Integration der Windenergie in das Verbundnetz und Energiebereitstellung	382
4.9.1	Netzausbau	383
4.9.2	Energiebereitstellung	384
4.9.3	Regel- und Reserveleistung	388
4.9.4	Bereitstellung von Regelleistung aus Windparks (Dissertation Dr. Alejandro J. Gesino [74])	390
4.10	Parallelbetrieb von Windkraftanlagen und Wasserstoff-Turbinen	393
4.10.1	Emissionsfreie Wasserstoff-Turbine	395
4.10.2	Anwendungsbereiche der Turbine	398
4.10.3	Wasserstoff-Turbine im geschlossenen Kreisprozess CCS (CLOSED-LOOP CYCLE HYDRO STORAGE)	399
4.10.4	Wasserstoff-Turbine als Kraftwerksersatz in starken Netzknotten	401
4.10.5	Wasserstoff-Turbine in Schwachen Netzbereichen zur Netzstützung und zur Versorgung von Elektrofahrzeug-Ladestationen und Schienenverkehr	402
4.10.6	Wasserstoff-Turbine im Parallelbetrieb mit Offshore-Windparks	403
4.10.7	Wasserstoff-Turbine für heiße Wüsten- und Küstenregionen	404
4.10.8	Wasserstoff-Turbine für Inselbetrieb	405
4.10.9	Wasserstoff-Turbine für Schiffsversorgungen	406
4.10.10	Generatoren für Wasserstoff-Turbinen	407
4.10.11	Netzstabilisierung durch Generatoren von Wasserstoff-Turbinen	410
4.11	Windenergie als Basis Virtueller Kraftwerke und Intelligenter Netze, Smart Grids	411
4.11.1	Windkraftanlagen als Teil Virtueller Kraftwerke	412
4.11.2	Regionales Virtuelles Kraftwerk	412
4.12	Blockchain in der Windenergie	414
4.13	Interkontinentale Netzverbindung	415
	Literatur	416
5	Regelung und Führung von Windkraftanlagen	427
5.1	Systemanforderungen und Betriebsarten	429
5.2	Inselbetrieb von Windkraftanlagen	431
5.2.1	Anlagen ohne Blattversteleinrichtung	433
5.2.2	Anlagen mit Blattversteleinrichtung	434
5.2.3	Anlagen mit Verbrauchersteuerung	435
5.2.4	Anlagenregelung über Bypass	436
5.3	Netzbetrieb von Windkraftanlagen	436

5.4	Regelungskonzeptionen	443
5.4.1	Regelung im Inselbetrieb	443
5.4.2	Regelung drehzahlvariabel betriebener Anlagen	447
5.4.3	Regelung schlupfvariabel betriebener Asynchrongeneratoren	449
5.4.4	Regelung netzstarr betriebener Anlagen	464
5.4.5	Regelung von Windenergieanlagen mit hydrodynamischen Überlagerungsgetriebe	464
5.5	Reglerauslegung	464
5.5.1	Verstellvorgänge und Torsionsmomente an den Rotorblättern	468
5.5.2	Normierung und Linearisierung der Größen	474
5.5.3	Regelkreise und die vereinfachte Dimensionierung	476
5.5.4	Verbesserung der Regeleigenschaften	481
5.5.5	Regelungsentwurf für Windkraftanlagen	488
5.6	Betriebsführung	490
5.6.1	Betriebszustände	490
5.6.2	Störfälle	502
5.6.3	Zustandserfassung der Systemkomponenten	503
5.7	Überwachungs- und Sicherheitssysteme	504
5.7.1	Windmesseinrichtung	504
5.7.2	Schwingungsüberwachung	505
5.7.3	Netzüberwachung und Blitzschutz	506
5.7.4	Überwachungsrechner	506
5.7.5	Fehlerfrüherkennung	508
5.7.6	Spannungsbegrenzung	509
5.8	Neue Ära Industrie 4.0 und Digitalisierung in der Windenergieindustrie	510
5.8.1	Industrie 4.0	511
5.8.2	Digitalisierung in der Windenergie und Anlagentechnik	512
	Literatur	512
6	Nutzung der Windenergie	519
6.1	Windverhältnisse und Energieerträge	519
6.1.1	Globale Windverhältnisse	520
6.1.2	Lokale Windverhältnisse und Jahreswindenergieangebot	521
6.1.3	Berechnung standort- und regionbezogener Anlagenerträge	525
6.1.4	Wind-Atlas-Methode	530
6.2	Potenziale und Ausbau	535
6.2.1	Windenergienutzung an Land	535
6.2.2	Offshore-Windenergienutzung	536
6.2.3	Repowering	541

6.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.	543
6.3.1	Anschaffungs- und Unterhaltskosten.	543
6.3.2	Energieeinspeisung und monetäre Erträge.	545
6.3.3	Stromgestehungskosten	548
6.3.4	Betriebswirtschaftliche Berechnungsmethoden.	549
6.3.5	Berücksichtigung externer Kosten	553
6.4	Rechtliche Aspekte und Errichtung von Windkraftanlagen.	554
6.4.1	Immissionsschutz.	554
6.4.2	Natur- und Landschaftsschutz	558
6.4.3	Baurecht.	560
6.4.4	Planung und Genehmigung	560
6.4.5	Vorgehen zur Errichtung von Windkraftanlagen	562
6.4.6	Offshore-Nutzung der Windenergie.	562
6.5	Ökobilanz.	566
6.5.1	Beitrag zum Klimaschutz.	567
6.5.2	Landschaftsverbrauch	567
6.5.3	Vogelschlag	568
6.5.4	Fledermäuse	568
6.5.5	Recycling von Windkraftanlagen.	568
6.5.6	Energetische Amortisationszeit und Erntefaktor	569
	Literatur.	569
	Stichwortverzeichnis.	577