
Siegfried Heier

Windkraftanlagen

Systemauslegung, Netzintegration und
Regelung

6., aktualisierte und verbesserte Auflage

Inhaltsverzeichnis

1	Windenergieanlagen	1
1.1	Anlagenstrukturen	2
1.2	Rückblick in die Historie	4
1.3	Meilensteine der Entwicklung	6
1.4	Funktionsstrukturen von Windkraftanlagen	24
	Literatur	27
2	System zur Windenergieumwandlung	29
2.1	Antriebsmoment und Leistung am Windrad	29
2.1.1	Ein- und Ausgangsgrößen einer Windturbine	30
2.1.2	Leistungsentnahme aus der Luftströmung	31
2.1.3	Leistungs- bzw. Antriebsmomentbestimmung nach der Blattelementmethode	32
2.1.4	Vereinfachung des Rechenverfahrens	37
2.1.5	Verfahren zur Nachbildung des Turbinenverhaltens	42
2.2	Turbinen	46
2.2.1	Naben- und Turbinenanordnung	49
2.2.2	Rotorblattgeometrie	51
2.3	Eingriffe an der Windturbine zur Leistungsregelung	57
2.3.1	Turbinennachführung	57
2.3.2	Rotorblattverstellung	67
2.3.3	Leistungsbegrenzung durch Stallbetrieb	98
2.3.4	Leistungsanpassung durch Drehzahleinstellung	102
2.4	Mechanischer Triebstrang	104
2.5	Systemdaten von Windkraftanlagen	113
2.5.1	Turbinen- und Triebstrangdaten	113
2.5.2	Anlagen- und Turmmasse	115
2.5.3	Anlagenkosten	119
	Literatur	121

3	Mechanisch-elektrische Energiewandlung durch Generatoren	123
3.1	Randbedingungen und Anforderungen zum Generatoreinsatz	123
3.2	Energiewandlersysteme	126
3.2.1	Aufbau der Asynchronmaschine	129
3.2.2	Aufbau der Synchronmaschine	130
3.3	Betriebsbereiche von Asynchron- und Synchrongeneratoren	132
3.4	Stationäre und dynamische Drehmomente	139
3.4.1	Stationäre Drehmomente	139
3.4.2	Dynamische Drehmomente	154
3.5	Nachbildung von Generatoren	163
3.5.1	Synchronmaschinen	163
3.5.2	Asynchronmaschinen	168
3.6	Auslegungsaspekte	170
3.6.1	Asynchrongeneratoren	171
3.6.2	Synchrongeneratoren für getriebelose Anlagen	185
3.6.3	Multi-Generator-Konzept (Dissertation Dr. Adil Ezzahraoui)	200
3.6.4	Ringgenerator mit Magnetlagerung (Dissertation Dr. Katharina Messoll)	208
3.6.5	Kompakte, supraleitende und andere neue Generatorkonzepte	213
3.7	Maschinendaten	215
3.7.1	Masse- und Kostenrelationen	215
3.7.2	Kennwerte von Asynchronmaschinen	217
3.7.3	Kennwerte von Synchronmaschinen	219
	Literatur	223
4	Elektrische Energieübergabe an Versorgungsnetze	225
4.1	Energieaufbereitung und Netzanbindung	227
4.1.1	Umrichtersysteme	228
4.1.2	Leistungshalbleiter für Umrichter	231
4.1.3	Funktionsmerkmale von Stromrichtern	234
4.1.4	Umrichterkonzeption	239
4.1.5	Zwischenkreisumrichter	240
4.1.6	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	254
4.1.7	Schutzmaßnahmen bei der Energieaufbereitung	255
4.2	Netzschutz	257
4.2.1	Sicherungen und Netztrennung	257
4.2.2	Kurzschlussleistung	258
4.2.3	Erhöhung der Kurzschlussleistung	261
4.2.4	Isolierter Betrieb und Kurzunterbrechungen	264
4.2.5	Überspannungen bei Netzfehlern	267
4.3	Netzeinwirkungen	267
4.3.1	Allgemeine Verträglichkeit und Störungen	267

4.3.2	Leistungsverhalten von Windkraftanlagen	268
4.3.3	Spannungsverhalten bei Netzeinspeisung	282
4.3.4	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	295
4.3.5	Spannungseinbrüche und Durchlauf von Fehlern (FRT)	304
4.4	Resonanzerscheinungen im Netzsystem bei Normalbetrieb	311
4.5	Abhilfemaßnahmen gegen Netzeinwirkungen	317
4.5.1	Filter	317
4.5.2	Filterauslegung	319
4.5.3	Wirkung von Saugkreisfiltern und Kompensationsanlagen	320
4.5.4	Netzspezifische Filterauslegung	323
4.5.5	Nutzung von Ausgleichseffekten	325
4.6	Netzregelung und Netzstützung	328
4.6.1	Einspeisung von Windkraftanlagen	329
4.6.2	Netzstützung und Netzregelung mit Windkraftanlagen und anderen regenerativen Systemen	330
4.6.3	Zentrale Blindleistungsregelung	336
4.6.4	Systemdienstleistungen und Betriebsführung	338
4.6.5	Anschluss von Windkraftanlagen an das Übertragungsnetz	340
4.7	Netzanschlussregeln	342
4.8	Netzanschluss im Offshore-Bereich	347
4.8.1	Offshore-Windpark-Eigenschaften	347
4.8.2	Stationäres und dynamisches Verhalten von Offshore-Windparks	349
4.8.3	Windpark- und Cluster-Bildung im Meer und Netzanbindung	350
4.8.4	Elektrische Energieübertragung zum Festland	355
4.8.5	Blindstrombedarf und Blindstrombereitstellung im Offshore-Netz	357
4.8.6	Flexible AC Transmission Systems (FACTS)	362
4.9	Integration der Windenergie in das Verbundnetz und Energiebereitstellung	367
4.9.1	Netzausbau	367
4.9.2	Energiebereitstellung	368
4.9.3	Regel- und Reserveleistung	371
4.9.4	Bereitstellung von Regelleistung aus Windparks (Dissertation Dr. Alejandro J. Gesino)	373
4.9.5	Interkontinentale Netzverbindung	376
	Literatur	377
5	Regelung und Führung von Windkraftanlagen	387
5.1	Systemanforderungen und Betriebsarten	389
5.2	Inselbetrieb von Windkraftanlagen	391
5.2.1	Anlagen ohne Blattverstelleinrichtung	392
5.2.2	Anlagen mit Blattverstelleinrichtung	394
5.2.3	Anlagen mit Verbrauchersteuerung	395
5.2.4	Anlagenregelung über Bypass	395

5.3	Netzbetrieb von Windkraftanlagen	396
5.4	Regelungskonzeptionen	401
5.4.1	Regelung im Inselbetrieb	402
5.4.2	Regelung drehzahlvariabel betriebener Anlagen	406
5.4.3	Regelung schlupfvariabel betriebener Asynchrongeneratoren	407
5.4.4	Regelung netzstarr betriebener Anlagen	423
5.4.5	Regelung von Windenergieanlagen mit hydrodynamischen Überlagerungsgetriebe	423
5.5	Reglerauslegung	425
5.5.1	Verstellvorgänge und Torsionsmomente an den Rotorblättern	427
5.5.2	Normierung und Linearisierung der Größen	433
5.5.3	Regelkreise und die vereinfachte Dimensionierung	435
5.5.4	Verbesserung der Regeleigenschaften	440
5.5.5	Regelungsentwurf für Windkraftanlagen	447
5.6	Betriebsführung	449
5.6.1	Betriebszustände	449
5.6.2	Störfälle	460
5.6.3	Zustandserfassung der Systemkomponenten	461
5.7	Überwachungs- und Sicherheitssysteme	462
5.7.1	Windmesseinrichtung	462
5.7.2	Schwingungsüberwachung	463
5.7.3	Netzüberwachung und Blitzschutz	464
5.7.4	Überwachungsrechner	464
5.7.5	Fehlerfrüherkennung	465
5.7.6	Spannungsbegrenzung	467
	Literatur	468
6	Nutzung der Windenergie	475
6.1	Windverhältnisse und Energieerträge	475
6.1.1	Globale Windverhältnisse	475
6.1.2	Lokale Windverhältnisse und Jahreswindenergieangebot	477
6.1.3	Berechnung von Anlagenerträgen	480
6.1.4	Wind-Atlas-Methode	488
6.2	Potenziale und Ausbau	490
6.2.1	Windenergienutzung an Land	490
6.2.2	Offshore-Windenergienutzung	492
6.2.3	Repowering	495
6.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	498
6.3.1	Anschaffungs- und Unterhaltskosten	499
6.3.2	Energieeinspeisung und monetäre Erträge	501
6.3.3	Stromgestehungskosten	504
6.3.4	Betriebswirtschaftliche Berechnungsmethoden	505

6.3.5	Berücksichtigung externer Kosten	509
6.4	Rechtliche Aspekte und Errichtung von Windkraftanlagen	509
6.4.1	Immissionsschutz	510
6.4.2	Natur- und Landschaftsschutz	513
6.4.3	Baurecht	515
6.4.4	Planung und Genehmigung	515
6.4.5	Vorgehen zur Errichtung von Windkraftanlagen	517
6.4.6	Offshore-Nutzung der Windenergie	517
6.5	Ökobilanz	521
	Literatur	524
	Sachverzeichnis	531