Der effiziente Weg zu mehr Energie

Bei der Entwicklung einer neuen Generation von Windenergieanlagen hatte Vestas von Beginn an ein Ziel vor Augen: Die effizienteste Windenergieanlage des Marktes hervorzubringen. Als Kriterium galten dabei die Kosten pro erzeugte Kilowatt-stunde (kWh) kalkuliert über die voraussichtliche Lebensdauer einer Anlage von zwanzig Jahren.

Dieses Ziel ist mit Einführung der Windenergieanlage V90-3,0 MW erreicht. Einer der entscheidenden Faktoren für die Verbesserung von Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit ist das Gewicht. Es ist Vestas gelungen, eine Anlage zu entwickeln, die trotz einer nominalen Ertragssteigerung von 50 Prozent ungefähr genau so viel wiegt wie das Modell V80-2,0 MW.

Darüber hinaus setzt Vestas neue Maßstäbe bei der Rotorblatt-Konstruktion. Die Flügelgeometrie basiert auf einer neuen Generation von aerodynamischen Profilen und steigert die Energieproduktion, reduziert die Belastung der Gesamtkonstruktion und sorgt dafür, dass sich an der Vorderkante der Rotoren weniger Schmutz ansammelt.

Zu den Innovationen gehört die Verwendung von Kohlefaser- anstelle von Glasfaserkunststoff

für eine Reihe von Komponenten am Blattholm. Dadurch sind die neuen 44 m langen Rotorblätter der V90 sogar leichter als die 39 m Rotorblätter der V80-Anlage.

Da das Gewicht die Transportkosten stark beeinflusst, hat Vestas neue Wege beschritten und ein leichteres Maschinenhaus entwickelt.

Die auf die Anlage wirkenden Kräfte werden durch ein optimiertes Maschinenfundament aufgefangen. Das bedeutet, dass eine Hauptwelle überflüssig ist, wodurch die gesamte Konstruktion leichter wird.

Das geringe Gesamtgewicht der V90-3,0 MW reduziert zudem die auf das Fundament einwirkenden Lasten.

Vestas Deutschland GmbH
Otto-Hahn-Strasse 2 - 4
25813 Husum/Nordsee
Deutschland
Tel. +49 4841 971 0
Fax +49 4841 971 360
www.vestas.de

Siegfried Heier

Windkraftanlagen

**Systemauslegung,
Netzintegration und Regelung**

Siegfried Heier

Windkraftanlagen

Systemauslegung, Netzintegration und Regelung

4., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 305 Abbildungen und 14 Tabellen

B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Dr.-Ing. habil. Siegfried Heier ist Leiter des Fachgebietes Windkrafttechnik. Er beschäftigt sich seit über 20 Jahren mit der Windenergie, ist Initiator und Leiter vieler Forschungsvorhaben auf diesem Gebiet und hat mehr als 70 Fachaufsätze über Generatorsysteme, Regelung und Netzintegration von Windkraftanlagen etc. publiziert. Er ist Autor dreier Bücher. Darüber hinaus ist er Vorsitzender bzw. Mitglied nationaler sowie internationaler Gremien und Komitees.

Universität Kassel
Institut für Elektrische Energietechnik
Wilhelmshöher Allee 71
34121 Kassel

1. Auflage 1994
2. Auflage 1996
3. Auflage 2003
- 4., überarbeitete und aktualisierte Auflage Februar 2005

Alle Rechte vorbehalten
© B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2005
Softcover reprint of the hardcover 4th edition 2005
Der B. G. Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.teubner.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Waren- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

ISBN 978-3-322-94088-9 ISBN 978-3-322-94087-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-322-94087-2

Vorwort

Die Energieversorgung wird langfristig nur unter Einbindung erneuerbarer Ressourcen ökologisch verträglich gesichert werden können. Bei der Nutzung regenerativer Energien ist neben der bereits etablierten Wasserkraft die Windtechnologie am weitesten vorangeschritten und dem wirtschaftlichen Durchbruch am nächsten. Ihr Einsatz wird sich – von wenigen Ausnahmen abgesehen – auf Elektrizitätsversorgungen konzentrieren.

Die Entwicklung von Windkraftanlagen führte – von Anlagen der 50 kW-Klasse Anfang der achtziger Jahre ausgehend – knapp zwei Jahrzehnte später zu serienreifen Konvertern der Leistungsgröße von 500 bis 2 500 kW. Drei- bis Fünf-Megawatt-Anlagen werden momentan in den Markt eingeführt. Bei dieser Entwicklung wurden erfolgreiche Konzepte und Innovationen von kleinen und mittleren Anlagen auf größere Einheiten übertragen. Dies führte zu einer stark verbesserten Zuverlässigkeit. Die technische Verfügbarkeit erreicht heute Durchschnittswerte von ca. 98 %. Darüber hinaus konnte der wirtschaftliche Einsatz enorm gesteigert werden. Dadurch hat die Windenergie einen kaum für möglich gehaltenen Aufschwung genommen und die Beiträge der Wasserkraft bereits überschritten.

Die stürmische Entwicklung der Windenergienutzung hat in der Öffentlichkeit, Politik und Wissenschaft ein verstärktes Interesse geweckt und bereits seit Jahren eine breite Diskussion ausgelöst. Dabei hat die Verträglichkeit der Windkraftanlagen mit der Natur und Umwelt sowie dem Elektrizitätsnetz besondere Bedeutung erlangt.

Um politische Vorgaben zur Umweltentlastung zu erreichen, muss ein langfristiger Ausbau der Windenergienutzung angestrebt werden. Da Strom aus Wind momentan die günstigste technische und wirtschaftliche Perspektive verspricht, ist dieser Energie hohe Priorität beizumessen. Aufgrund der weiterhin steigenden Anlagengröße muss – zumindest regional – mit einer hohen Netzdurchdringung der Windenergie gerechnet werden, so dass der Anschluss von Windkraftwerken an technische Grenzen stoßen kann. Diese werden bereits heute zum Teil schon erreicht.

Ziel einer zukunftsweisenden Energieversorgung muss es daher sein, die vorhandenen Netze für eine Windenergieeinspeisung möglichst gut auszunutzen. Der Einsatz von Anlagen mit guter Netzverträglichkeit in Verbindung mit netzstützenden Maßnahmen ermöglicht dies. Für eine Beurteilung von Netzeinwirkungen spielen die Eingriffe zur Regelung und die elektrotechnische Konzeption der Windkraftanlagen eine bedeutende Rolle. Die Ausführungen im folgenden sollen daher besonders auf diesen Themenkreis ausgerichtet werden.

Gegenüber der letzten Auflage wurden wichtige Aktualisierungen im Anlagen-, Entwicklungs- und Netzanschlussbereich dieser sich im schnellen Wandel befindenden Technik vorgenommen. Weiterhin wurden im Sinne einer einheitlichen Darstellung der Bücher im Verlag das Layout angepasst und eine Vielzahl von Bildern neu erstellt. Wesentliche Ergänzungen ergaben sich insbesondere im Hinblick auf die von starkem Umbruch geprägten Richtlinien.

Dieses Buch entstand im Rahmen meiner langjährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten insbesondere als Leiter des Windenergie-Forschungsbereiches an der Universität Kassel im Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme des Instituts für Elektrische Energietechnik. Die enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e. V. brachte

eine erhebliche Erweiterung des Erfahrungshorizontes. Mein besonderer Dank gilt dem Gründer, Herrn Professor Dr. Werner Kleinkauf. Seine Anregungen und die fachlichen Diskussionen mit ihm haben die Darstellungen wesentlich mitgeprägt.

Die Mitarbeit und Unterstützung durch Herrn Dr.-Ing. Gunter Arnold, Herrn Dr. Boris Valov, Herrn Dipl.-Ing. Michael Durstewitz, Herrn Dr.-Ing. Martin Hoppe-Kilpper, Herrn Dipl.-Ing. Berthold Hahn, Herrn Dipl.-Ing. Martin Kraft, Herrn Dipl.-Ing. Volker König, Herrn Dipl.-Ing. Werner Döring, Herrn Dipl.-Ing. Bernd Gruß, Herrn Dr.-Ing. Oliver Haas, Herrn Thomas Dörrbecker, Herrn Bernhard Siano, Herrn Martin Nagelmüller, Frau Dipl.-Des. Renate Rothkegel sowie Frau Melanie Schmieder, Frau Anja Clark-Carina und Frau Judith Keuch haben wesentlich zum Gelingen des Werkes beigetragen.

Dieses Buch wendet sich nicht nur an Studierende technischer Fakultäten. Zahlreiche Ausführungshinweise und Erfahrungswerte sind für Ingenieure in Wissenschaft und Praxis sehr hilfreich. Neben der deutschen Ausgabe ist die englische Übersetzung *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems* durch die Veröffentlichung bei dem weltweit präsenten Verlag John Wiley & Sons einem internationalen Leserkreis zugänglich. Eine Neuauflage wird in Kürze erscheinen.

Für die Bereitschaft, das Buch zu verlegen und für die sorgfältige Herstellung gilt dem Teubner-Verlag und Herrn Dr. Feuchte mein besonderer Dank. Meiner Frau Hannelore möchte ich für das entgegengebrachte Verständnis danken, das für die Entstehung dieses Werkes notwendig war.

Kassel, im Oktober 2004

Siegfried Heier

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

X Inhaltsverzeichnis

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
-----------------------------	------------