
Windkraftanlagen

Lizenz zum Wissen.




Sichern Sie sich umfassendes Technikwissen mit Sofortzugriff auf tausende Fachbücher und Fachzeitschriften aus den Bereichen: Automobiltechnik, Maschinenbau, Energie + Umwelt, E-Technik, Informatik + IT und Bauwesen.

Exklusiv für Leser von Springer-Fachbüchern: Testen Sie Springer für Professionals 30 Tage unverbindlich. Nutzen Sie dazu im Bestellverlauf Ihren persönlichen Aktionscode **C0005406** auf www.springerprofessional.de/buchaktion/



**Jetzt
30 Tage
testen!**

Springer für Professionals.
Digitale Fachbibliothek. Themen-Scout. Knowledge-Manager.

-  Zugriff auf tausende von Fachbüchern und Fachzeitschriften
-  Selektion, Komprimierung und Verknüpfung relevanter Themen durch Fachredaktionen
-  Tools zur persönlichen Wissensorganisation und Vernetzung

www.entschieden-intelligenter.de

Springer für Professionals

 Springer

Siegfried Heier

Windkraftanlagen

Systemauslegung, Netzintegration und
Regelung

6., aktualisierte und verbesserte Auflage

 Springer Vieweg

Siegfried Heier
Inst. f. Elektr. Energietechnik
Universität Kassel
Kassel, Deutschland

ISBN 978-3-8348-1426-5

ISBN 978-3-8348-2104-1 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2104-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 1994, 1996, 2003, 2005, 2009, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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 Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die weltweite 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 der wirtschaftliche Durchbruch ist erreicht. 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 2500 kW. Drei- bis Sechsmegawatt-Anlagen wurden bereits in den Markt eingeführt, die Zehn-Megawatt-Klasse wird folgen. Bei dieser Entwicklung wurden erfolgreiche Konzepte und Innovationen von kleinen und mittleren Anlagen auf größere Einheiten übertragen. Dies führte zu deren 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 weit überschritten.

Die stürmische Entwicklung der Windenergienutzung hat in der Öffentlichkeit, Politik und Wissenschaft ein verstärktes Interesse geweckt und 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. Wesentliche Ergänzungen ergaben sich insbesondere im Hinblick auf die in Kürze zu erwartende Offshore-Nutzung der Windenergie. Dabei wurde der Netzanbindung im Meer und an Land besondere Bedeutung beigemessen.

Dieses Buch entstand im Rahmen meiner langjährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten insbesondere als Leiter des Windenergie-Forschungsbereiches und als Professor an der Universität Kassel im Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme des Instituts für Elektrische Energietechnik. Hervorzuheben ist die enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e. V., seit 2011 Fraunhofer-Institut für Wind-Energie-Systeme IWES, Kassel. 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 Dr.-Ing. Katharina Messoll, Dr.-Ing. Alejandro Gesino, Prof. Dr.-Ing. Rajesh Saiju, Dr.-Ing. Abdelbahi Tamzarti, Dr.-Ing. Likaa Fahmi Ahmed Izzat, Dr.-Ing. Adil Ezzahraoui, Dipl.-Ing. Christof Gericke, 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* durch die Veröffentlichung bei dem weltweit präsenten Verlag John Wiley & Sons einem internationalen Leserkreis zugänglich.

Für die Bereitschaft, das Buch zu verlegen und für die sorgfältige Herstellung gilt dem Springer-Vieweg-Verlag, Frau Andrea Broßler und Herrn Reinhard Dapper mein besonderer Dank. Meiner Frau Hannelore möchte ich als Ratgeberin für schwierige Formulierungen und für das entgegengebrachte Verständnis danken, das für die Entstehung dieses Werkes notwendig war. Dieses Buch widme ich ihr, meinen Enkeln Mila und Serafin sowie meinen Töchtern Angela, Sandra und Tina.

Mit der Herausgabe der 6. Auflage werden vier Jahrzehnte meines stets auf Fortschritt orientierten Wirkens auf diesem Sektor dokumentiert und die rasante Entwicklung der Windenergienutzung untermauert. In diesem die Technologie immer stärker prägenden Wissenschafts- bzw. Energiebereich haben sich Erfolge eingestellt, die im Hinblick auf eine zukunftssichere Energieversorgung optimistische Perspektiven eröffnen.

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Symbole

| | |
|----------------------------|--|
| α | örtliche Profilanströmung am Rotorblatt |
| α | Steuer- oder Zündwinkel von Thyristoren |
| α_0 | Zündwinkel-Ausgangswert |
| α_{\max} | maximaler Ansteuerwinkel bzw. Trittgrenze von Thyristoren |
| $\alpha_{\max 15}$ | maximaler Ansteuerwinkel bzw. Trittgrenze von Thyristoren bei 15 % Spannungseinbruch |
| β | Rotorblatteinstellwinkel |
| $\dot{\beta}$ | Verstellgeschwindigkeit des Rotorblattes |
| β | Rotorblatteinstellwinkel |
| $\dot{\beta}$ | Verstellgeschwindigkeit des Rotorblattes |
| $\dot{\beta}_n$ | Normalverstellgeschwindigkeit des Rotorblattes |
| $\dot{\beta}_s$ | Schnellverstellgeschwindigkeit des Rotorblattes |
| $\ddot{\beta}$ | Verstellbeschleunigung des Rotorblattes |
| γ | Konuswinkel |
| γ | technische Verfügbarkeit |
| Δn | Drehzahlstellbereich |
| ΔP | Schwankungsbreite der Leistung |
| ΔU | Spannungsfall |
| ΔU_a | Spannungsanhebung |
| $\Delta U_{a \text{ zul}}$ | zulässige Spannungsanhebung |
| $\Delta u_{\text{VP zul}}$ | Zulässige Spannungsänderungen am Verknüpfungspunkt VP |
| Δv | Schwankungsbreite der Windgeschwindigkeit |
| $\Delta \epsilon$ | Torsionswinkel |
| δ | Winkel zwischen Rotationsebene und resultierender Anströmgeschwindigkeit der Luft |
| ϵ_G | Drehwinkel des Generatorläufers |
| $\dot{\epsilon}_G$ | Winkelgeschwindigkeit des Generatorläufers |
| ϵ_W | Drehwinkel der Windturbine |
| $\dot{\epsilon}_W$ | Winkelgeschwindigkeit des Windrades |

| | |
|------------------------|---|
| η_{ABI} | Wirkungsgrad bei der Übertragung zwischen Verstellantrieb und Rotorblatt |
| ϑ | Polradwinkel (el.) einer Synchronmaschine |
| ϑ | Winkel (mech.) zwischen Rotationsebene und Profilschne |
| ϑ_{B} | Winkel zwischen 0,7 und der Profilstellung des Rotorblattes |
| $\vartheta_{0,7}$ | Winkel zwischen Rotationsebene und Profilschne am Rotorblatt beim 0,7fachen Radius |
| λ | Lastwinkel (el.) bei Ansynchronmaschinen zwischen fester Netz- und lastabhängiger Schlupfspannung |
| λ | Leistungsfaktor als Grundwellen- und Oberschwingungswert |
| λ | Leitungswinkel |
| λ | Schnellaufzahl (mech.), Verhältnis der Rotorblattspitzengeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit |
| λ_{N} | Schnellaufzahl im Nennbetriebszustand |
| μ | nichtganzzahlige Faktoren von Zwischenharmonischen |
| ν | Ordnungszahl von Oberschwingungen |
| ρ | Luftdichte |
| φ_{f} | flickerwirksamer Phasenwinkel |
| φ_{Gen} | Phasenwinkel des Generatorstromes (Einspeisewinkel) |
| φ_{Mot} | Phasenwinkel des Motorstromes |
| φ_{ν} | Phasenverschiebungswinkel der ν -ten Oberschwingung |
| ψ | Netzimpedanzwinkel |
| ψ | Stellung des Rotors zum Turm |
| ψ_{BI} | Rotorblattstellung zum Turm |
| ψ_{kV} | Netzimpedanzwinkel bei Kurzschluss am Verknüpfungspunkt |
| ω | resultierende Winkelgeschwindigkeit aus der Azimutnachführung und der Windradrotation |
| ω_0 | stationäre Netz- (Kreis-)frequenz |
| ω_1 | Winkelgeschwindigkeit des Ständerdrehfeldes bei zweipoliger Wicklungsausführung ($p = 1$) |
| ω_2 | Winkelgeschwindigkeit des Läuferdrehfeldes bei zweipoliger Wicklungsausführung ($p = 1$) |
| ω_{A} | Winkelgeschwindigkeit bei Nachführung des Azimutwinkels |
| ω_{BI} | Winkelgeschwindigkeit der Drehung des Blattes um seine Längsachse |
| ω_{BV} | Auslegungswert der Winkelgeschwindigkeit des Blattverstellungssystems |
| ω_{G} | Winkelgeschwindigkeit des Generatorläufers |
| ω_{Mot} | Winkelgeschwindigkeit des Stellmotors |
| ω_{mech} | Winkelgeschwindigkeit der mechanischen Rotation des Generatorläufers |
| ω_{N} | Nennwinkelgeschwindigkeit |
| ω_{R} | Winkelgeschwindigkeit des Windrades (vektorielle Größe) |
| ω_{st} | Winkelgeschwindigkeit des Stellantriebes |

| | |
|----------------|---|
| ω_w | Winkelgeschwindigkeit des Windrades |
| ω_ν | Kreisfrequenz der ν -ten Oberschwingung |
| A | |
| A | Skalierungsfaktor der Häufigkeitsdichte mit der Dimension m/s |
| a | konstanter Faktor bezüglich Profildrehpunkt |
| A_1 | Querschnitt der Turbinenanströmung vor dem Rotor |
| A_2 | Querschnitt der Turbinenanströmung am Rotor |
| A_3 | Querschnitt der Turbinenanströmung nach dem Rotor |
| a_a | Abstand zwischen Auftriebskraftangriffspunkt und Blattdrehachse |
| A_B | Blattfläche eines Rotorblatts |
| A_{lt} | Langzeit-Flickerstörfaktor (long term) |
| a_p | Blattachsenabstand zwischen Dreh- und Schwerkraftangriffspunkt |
| A_R | Rotorkreisfläche |
| a_s | Durchbiegung des Blattes in Schlag- und Schwenkrichtung |
| A_{st} | Kurzzeit-Flickerstörfaktor (short term) |
| B | |
| b | Beschleunigung im Schwerpunkt des Rotorblattes |
| b' | Beschleunigung des Rotorblattschwerpunktes im rotierenden Koordinatensystem |
| b_c | Coriolisbeschleunigung des Rotorblattschwerpunktes |
| b_o | Zentripetalbeschleunigung im Rotorkopf |
| b_R | Zentripetalbeschleunigung von ω_R herrührend |
| b_s | Biegebeschleunigung des Rotorblattes in Schlag- und Schwenkrichtung |
| b_{schlag} | Blattdurchbiegung in Schlagrichtung |
| $b_{schwenk}$ | Blattdurchbiegung in Schwenkrichtung |
| $b_{\omega A}$ | Zentripetalbeschleunigung von ω_A herrührend |
| C | |
| C | = $C(k)$ Theodorsen-Funktion |
| c | Anlagenflickerbeiwert |
| c | Überhöhungsfaktor für die Anfangskurzschlusswechselstromleistung bzw. den größtmöglichen Kurzschlussstrom |
| C_0 | Kapitalwert |
| c_a | Auftriebsbeiwert eines Blattprofils |
| C_F | Filterkapazität |
| C_k | Kapazität der Kondensatorbatterie |
| c_m | Drehmomentbeiwert der Turbine |
| c_p | Leistungsbeiwert der Turbine |
| c_t | Torsionsmomentenbeiwert auf ein Viertel der Blattiefe bezogen |

| | |
|------------------|---|
| c_w | Widerstandsbeiwert eines Blattprofils |
| $\cos \varphi$ | Leistungsfaktor als Grundwellenwert |
| $\cos \varphi_K$ | Leistungsfaktor im Kurzschlussfall |
| D | |
| d | halbe Profiltiefe |
| $d A_B$ | Fläche eines Blattelements |
| $d F_A$ | Auftriebskraft am Blattelement |
| $d F_{AW}$ | resultierende Kraft am Blattelement aus Auftriebs- und Widerstandsanteil |
| $d F_{ax}$ | axial wirkende Kraftkomponente am Blattelement |
| $d F_t$ | tangential wirkende Kraftkomponente am Blattelement |
| $d F_W$ | Widerstandskraft am Blattelement |
| $d \dot{J}_{ax}$ | axialer Impulsverlust der Luftströmung |
| $d \dot{J}_t$ | tangentiale Impulsänderung der Drallströmung |
| d_m | mittlerer Durchmesser eines Lagers |
| $d M_{Auf}$ | Torsionsmoment am Blattelement durch Auftriebskräfte |
| $d M_L$ | Moment pro Spannweiteinheit bei Blattverstellung durch Beschleunigung von Luftmassen und durch Luftdämpfung |
| $d M_T$ | Rückstellmoment in Anströmrichtung am Blattelement |
| $d U$ | Spannungsabweichung, Spannungsfall |
| E | |
| E_i | Ertrag für die erzeugte Energie im Jahr i |
| F | |
| F | Faktor zur Beschreibung der Auswirkungen freier Randwirbel am Blatt (Blattspitze und Nabennähe) |
| f | Frequenz |
| f_1 | Netzfrequenz |
| $f_{2\nu}$ | Frequenz des Läuferstromes (der ν -ten Oberwelle) in Asynchronmaschinen |
| F_A | Auftriebskraft außerhalb der Blattdrehachse |
| F_a | axiale Lagerkraft |
| F_{ax} | axial wirkende Kraft am Rotorblatt |
| f_G | Generatorfrequenz |
| f_{L1} | lagerart- und belastungsspezifischer Beiwert eines Lagers |
| F_N | Normalkraft |
| F_N | Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Randwirbelverluste für Nabennähe |
| F_{Pr} | Propellermoment erzeugende Kraft |
| F_Q | Querkraft |

| | |
|----------------------|--|
| F_S | Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Randwirbelverluste an der Blattspitze |
| F_{St} | Stellkraft am Blatt |
| F_Z | Zentrifugalkraft |
| f_μ | Frequenz der μ -ten Zwischenharmonischen |
| f_ν | Frequenz der ν -ten Oberschwingung |
| G | |
| g_{LI} | Lastrichtungsfaktor eines Lagers |
| I | |
| I_0 | Leerlaufstrom in einem Maschinenstrang |
| I_0 | investiertes Kapital |
| I_1 | Statorstrom |
| I_1 | Effektivwert des Grundschwingungsstromes |
| I'_2 | Läuferstrom auf die Statorseite bezogen |
| i_{ABl} | Übersetzungsverhältnis zwischen Stellantrieb- und Rotorblattverstellung |
| I_{an} | Anlaufstrom von Asynchronmaschinen |
| I_B | Blindstrom |
| I_E | Erregerstrom |
| I_{Fe} | Eisenverluststrom in einem Maschinenstrang |
| \underline{i}_G | Gesamtstrom (rotierender Zeiger) |
| i_{G1} | Gesamtstrom in Phase 1 |
| i_{G2} | Gesamtstrom in Phase 2 |
| i_{G3} | Gesamtstrom in Phase 3 |
| i_{Gd} | Gesamtstrom in Längsrichtung der Feldkoordinaten |
| i_{Gq} | Gesamtstrom in Querrichtung der Feldkoordinaten |
| I_k | Dauerkurzschlussstrom |
| $I''_{k\text{Netz}}$ | Anfangskurzschlussstrom im Netz |
| $I''_{k\text{WKA}}$ | Anfangskurzschlussstrom der Windkraftanlage |
| i_{MBl} | Übersetzungsverhältnis zwischen Stellmotor und Blattdrehung |
| $i_{MBl,lin-rot}$ | Übersetzungsverhältnis zwischen Stellmotor und Rotorblattverstellung bei direktem Motorantrieb |
| $i_{MBl,rot}$ | Übersetzungsverhältnis zwischen Stellmotor und Rotorblattverstellung |
| i_{mS} | Magnetisierungsstrom im Stator |
| \underline{i}_R | maschinenseitiger Rotorstrom (rotierender Zeiger) |
| i_{R1} | maschinenseitiger Rotorstrom in Phase 1 |
| i_{R2} | maschinenseitiger Rotorstrom in Phase 2 |
| i_{R3} | maschinenseitiger Rotorstrom in Phase 3 |
| i_{Rd} | maschinenseitiger Rotorstrom in Längsrichtung der Feldkoordinaten |
| $i_{Rd\text{ ist}}$ | Istwert von i_{Rd} |
| $i_{Rd\text{ soll}}$ | Sollwert von i_{Rd} |

| | |
|--|---|
| i_{RN} | netzseitiger Rotorstrom (rotierender Zeiger) |
| i_{Rq} | maschinenseitiger Rotorstrom in Querrichtung der Feldkoordinaten |
| $i_{Rq \text{ ist}}$ | Istwert von i_{Rq} |
| $i_{Rq \text{ soll}}$ | Sollwert von i_{Rq} |
| I_{Stell} | Stellstrom für elektromotorische oder hydraulische Rotorblattverstellung |
| I_Z | Strom einer Zusatzeinrichtung zur Blindstromlieferung |
| I_μ | Magnetisierungsstrom in einem Maschinenstrang |
| I_ν | Effektivwert des ν -ten Oberschwingungsstromes |
| $I_{\nu,\mu \text{ zul.}}, I_{\nu,\mu \text{ A zul.}}$ | zulässige Oberschwingungsströme für eine Einzelanlage oder einen Windpark |

J

| | |
|----------------------|--|
| J_B | Trägheitsmoment des Blattes bei Rotation um die Nabe |
| J_{Bl} | Trägheitsmoment des Rotorblattes bei Drehung um seine Längsachse |
| $J_{Bl(A)}$ | Trägheitsmoment des Rotorblattes auf die Antriebsmotorseite bezogen |
| J_G | Trägheitsmoment des Generatorläufers |
| J_{ges} | Trägheitsmoment der gesamten Blattverstelleinrichtung |
| $J_{\text{ges(A)}}$ | Trägheitsmoment der gesamten Blattverstelleinrichtung auf die Antriebsseite bezogen |
| $J_{\text{ges(Bl)}}$ | Trägheitsmoment der gesamten Blattverstelleinrichtung auf die Blattseite bezogen |
| $J_{\text{ges(M)}}$ | Trägheitsmoment der gesamten Blattverstelleinrichtung auf die Motorseite bezogen |
| J_{LB} | Trägheitsmomentenäquivalent infolge beschleunigter Luftmassen |
| J_{Mot} | Trägheitsmoment des Antriebsmotors |
| $J_{\text{Mot(Bl)}}$ | Trägheitsmoment des Antriebsmotors auf die Rotorblattseite bezogen |
| J_R | Trägheitsmoment aller rotierenden Massen |
| $J_{\text{Übertr.}}$ | Trägheitsmoment der Übertragungselemente wie Getriebe, Kupplungen etc. zwischen Antriebsmotor und Blattdrehung |

K

| | |
|--------------------|--|
| K | Annuität |
| k_0 | netzzustands- und netzkurzschlussleistungsabhängiger Ausgangswert des Klirrfaktors |
| k_1 | Steigungsfaktor des Klirrfaktors |
| k_2 | Streckungsfaktor des Klirrfaktors |
| $k_{\dot{\alpha}}$ | Faktor für die Änderungsgeschwindigkeit des Polradwinkels nach außen Tritt fallen |
| k_D | charakteristische Dämpfung |
| k_{DB} | Beiwert für Struktur- und aerodynamische Dämpfung |
| k_{DK} | Dämpfungsbeiwert des Triebstranges |

| | |
|---------------|--|
| k_{DS} | Anteil der Strukturdämpfung |
| k_f | Energiekosten |
| K_i | Kosten im Jahr i , |
| $k_{i \max}$ | Anlauf- zu Nennstrom-Verhältnis von Generatoren |
| $k_{i\psi}$ | netzabhängiger Schaltstromfaktor |
| k_{kl} | Kurzschluss-Leistungsverhältnis-Faktor von Netzkurzschluss- zu maximaler Anlagenleistung |
| k_{RL} | Reibungsbeiwert für Lagerreibung am Rotorblatt bei Blattverstellung |
| k_t | Verhältnis der Beschleunigungsmomente von Triebstranganteil zum gesamten Rotorsystem (M_{BT}/M_{BR}) |
| k_{THD} | Klirrfaktor (Total Harmonic Distortion) |
| k_{TS} | Torsionssteifigkeit des Triebstranges |
| k_u | Klirrfaktor der Spannung |
| $k_{\dot{U}}$ | Faktor für die maximale Überhöhung des Generatormomentes |
| L | |
| L_F | Filterinduktivität |
| M | |
| m | Strangzahl von Drehstromwicklungen |
| M_A | Antriebsmoment |
| M_{AG} | Antriebsmoment am Generator |
| M_{AM} | Anlaufmoment eines Motors |
| M_{An} | äußeres Drehmoment des Blattverstellantriebes unter Berücksichtigung der Feder- und Dämpfungseigenschaften |
| M_{AT} | Antriebsmoment des Triebstrangs inklusive Verluste |
| M_{Auf} | Torsionsmoment am Rotorblatt durch Auftriebskräfte |
| M_{AV} | inneres Drehmoment des Blattverstellantriebes |
| M_{AW} | Antriebsmoment der Windturbine |
| m_B | Masse eines Rotorblattes |
| M_{BG} | Beschleunigungsmoment am Generator |
| M_{Bieg} | Torsionsmoment am Rotorblatt infolge Durchbiegung |
| M_{Bl} | Rotorblatt-Torsionsmoment bei Drehung um Blattlängsachse |
| $M_{Bl \max}$ | maximales Blatt-Torsionsmoment bei Extremsituationen |
| $M_{Bl n}$ | Blatt-Torsionsmoment bei Normalbetrieb |
| M_{BR} | Beschleunigungsmoment im Rotorsystem |
| M_{BT} | Beschleunigungsmoment am Triebstrang |
| M_{BW} | Beschleunigungsmoment an der Windturbine |
| M_{cz} | Coriolismoment bezüglich der z-Achse |
| M_D | Dämpfungsmoment der Synchronmaschine |
| m_{dyn} | $= M_{KD}/M_{KS \max}$ dynamischer Momenterhöhungsfaktor |

| | |
|---------------------|---|
| M_{ist} | Drehmoment-Istwert |
| M_{K} | Kippmoment einer elektrischen Maschine |
| M_{KD} | dynamisches Kippmoment |
| M_{KG} | Kippmoment des Generators |
| M_{KM} | Kippmoment eines Motors |
| M_{Kmax} | maximales Kippmoment |
| M'_{Kmax} | Höchstwert des pulsierenden Kurzschlussmomentes von Synchronmaschinen infolge transientscher Ströme |
| M''_{Kmax} | Höchstmoment von Synchronmaschinen infolge subtransientscher Kurzschlussströme in der Dämpferwicklung |
| M_{KS} | statisches Kippmoment |
| M_{KSmax} | statisches Kippmoment bei maximaler Erregung |
| M_{KSmin} | statisches Kippmoment bei Leerläufererregung |
| M_{Ku} | Kupplungsdrehmoment am Generator |
| M_{L} | Moment bei Blattverstellung durch Beschleunigung von Luftmassen und durch Luftdämpfung |
| M_{LB} | Moment bei Blattverstellung durch Beschleunigung von Luftmassen |
| M_{LD} | Moment bei Blattverstellung infolge Luftdämpfung |
| M_{max} | maximales Moment |
| M_{N} | Nennmoment |
| M_{NG} | Nennmoment eines Generators |
| M_{NM} | Nennmoment eines Motors |
| M_{O} | oszillierender Anteil des Rotor-Drehmoments |
| M_{Pend} | Torsionsmoment am Blatt infolge Pendelbewegung des Rotors |
| M_{Pr} | Propellermoment |
| M_{Reib} | Reibmomente aller Blattlager bei Blattverstellung |
| M_{res} | Reservemoment bei Beschleunigung der Blattverstelleinrichtung |
| M_{RL} | lastabhängiges Reibungsmoment eines Lagers |
| $M_{\text{RL}k}$ | lastabhängiges Reibungsmoment des Lagers k |
| M_{S} | Sattelmoment |
| M_{s} | stationäres Drehmoment |
| M_{SG} | Sattelmoment eines Generators (Asynchronmaschine) |
| M_{SM} | Sattelmoment eines Motors (Asynchronmaschine) |
| M_{soll} | Drehmoment-Sollwert |
| M_{St} | Moment des Stellgliedes am Blatt |
| M_{T} | Rückstellmoment in Anströmrichtung am Blattprofil |
| M_{TD} | dämpfende Anteile des Triebstrangmomentes |
| M_{TT} | torsionselastische Anteile des Triebstrangmomentes |
| M_{u} | Drehmoment bei ungestörter Windverteilung am Rotor |
| M_{W} | Widerstandsmoment |
| M_{WG} | (elektrisches) Widerstandsmoment des Generators |

N

| | |
|------------|---|
| n | Drehzahl |
| n | Laufzeit |
| n_{0M} | Leerlauf- bzw. maximale Drehzahl von Motoren zur Blattverstellung |
| n_1 | Drehfeld- bzw. Synchrondrehzahl |
| n_A | Anlagenanzahl |
| n_{AV} | Drehzahl des Blattverstellantriebes |
| n_{el} | der elektrischen Drehfrequenz entsprechende Drehzahl |
| n_{ist} | Istwert der Drehzahl |
| n_{KG} | Kippdrehzahl eines Generators (Asynchronmaschine) |
| n_{KM} | Kippdrehzahl eines Motors (Asynchronmaschine) |
| n_{NG} | Nenn Drehzahl eines Generators (Asynchronmaschine) |
| n_{mech} | mechanische Drehzahl |
| n_{NM} | Nenn Drehzahl eines Motors (Asynchronmaschine) |
| n_{soll} | Sollwert der Drehzahl |
| n_v | Drehzahl des Oberwellenfeldes der Ordnungszahl ν |

P

| | |
|-------------------------------|--|
| P | Mittelwert der Leistung |
| p | Zinssatz |
| P_δ | Luftpaltleistung einer elektrischen Maschine |
| P_σ | Standardabweichung der Leistung |
| P_0 | Leistung der bewegten Luftmasse |
| p_1 | Polpaarzahl des Stators |
| $p_{1 \min}$ | relatives Wirkleistungsmaximum während einer Minute |
| p_2 | Polpaarzahl des Läufers |
| P_E | Leistung der Erzeuger im Netz |
| P_{el} | elektrische Abgabeleistung des Generators |
| P_G | Gesamtwirkleistung im Rotor und Stator |
| $P_{G \text{ ist}}$ | Istwert der Gesamtwirkleistung |
| $P_{G \text{ soll}}$ | Sollwert der Gesamtwirkleistung |
| P_L | Leistung der Last im Netz |
| P_{L0} | äquivalente statische Belastung eines Lagers |
| P_{lt} | Langzeit-Flickerstärke |
| $P_{lt \text{ res}}$ | resultierende Langzeit-Flickerstärke |
| $P_{lt \text{ res genähert}}$ | Überschlagswert der resultierend. Langzeit-Flickerstärke |
| P_{mech} | mechanische Aufnahmeleistung des Generators |
| P_N | Nennleistung |
| P_{NG} | Nennleistung eines Generators |
| P_R | Rotorwirkleistung |
| P_{st} | Kurzzeit-Flickerstärke |

| | |
|------------------|--|
| P_{Stn} | Leistung zur Rotorblattverstellung bei Normalverstellgeschwindigkeit |
| P_{Sts} | Leistung zur Rotorblattverstellung bei Schnellverstellgeschwindigkeit |
| P_V | Anlagenverlustleistung |
| P_{VN} | leistungsabhängiger Anteil der Anlagenverluste |
| P_{V0} | konstanter Anteil der Anlagenverluste |
| P_W | Windturbinenleistung |
| P_{Wmax} | maximaler Windturbinenleistungswert |
| P_{WP} | Windparkleistung |
| Q | |
| Q_C | Kompensations-Blindleistung |
| Q_G | Gesamtblindleistung im Rotor und Stator |
| Q_{Gist} | Istwert der Gesamtblindleistung |
| Q_{Gsoll} | Sollwert der Gesamtblindleistung |
| R | |
| r | Radius eines Blattelementes |
| r | Inflationsrate |
| r' | Radius des Rotorblattschwerpunktes |
| R_1 | Statorwiderstand eines Maschinenstranges |
| R'_2 | Läuferwiderstand eines Asynchronmaschinenstranges auf die Statorseite transformiert |
| R_a | Außenradius des Rotorblatts |
| r_b | prozentualer Anteil des investierten Kapitals für Wartung und Instandhaltung |
| r_f | reale Energiekostensteigerung |
| R_i | Innenradius des Rotorblatts |
| R_{kV} | (Kurzschluss-) Resistanz der Verbindungselemente zwischen Netz und Verknüpfungspunkt |
| R_{L+T} | Resistanz von Leitungen und Transformatoren |
| r_o | Drehpunktabstand zwischen Richtungsnachführung und Rotorblättern |
| R_z | Zusatzwiderstand |
| S | |
| s | Schlupf (einer Asynchronmaschine) |
| s_v | Schlupf der v -ten Oberwelle (einer Asynchronmaschine) |
| S_A | Anlagen-Scheinleistung |
| S_{Amax} | maximale Scheinleistung einer Anlage |
| $S_{Amax 1 min}$ | maximaler Anlagenmittelwert der Scheinleistung während einer Minute |
| S_{AV} | Einspeise-Scheinleistung am Verknüpfungspunkt |
| S_{Ein} | Einspeise-Scheinleistung |
| S_k | Netzkurzschluss-Scheinleistung |

| | |
|---------------------|--|
| s_K | Kippschlupf (einer Asynchronmaschine) |
| S''_k | Anfangskurzschlusswechselstromleistung |
| S''_{kAP} | subtransiente Kurzschluss-Scheinleistung am Anschlusspunkt |
| S''_{kASM} | Kurzschluss-Scheinleistung einer Asynchronmaschine |
| S''_{kSM} | Kurzschluss-Scheinleistung einer Synchronmaschine |
| $S''_{k\text{erh}}$ | erhöhte Netzkurzschluss-Scheinleistung (subtransienter Wert) |
| S''_{kM} | subtransiente Kurzschluss-Scheinleistung angeschlossener Maschinen oder Windkraftanlagen |
| S''_{kN} | subtransiente Netzkurzschluss-Scheinleistung |
| S''_{kVP} | Netzkurzschluss-Scheinleistung am Verknüpfungspunkt |
| S''_{kVP} | subtransiente Netzkurzschluss-Scheinleistung am Verknüpfungspunkt |
| S''_{kWKA} | subtransiente Kurzschluss-Scheinleistung einer Windkraftanlage |
| S_{Last} | Last-Scheinleistung |
| s_N | Nennschlupf (einer Asynchronmaschine) |
| S_{NASM} | Nennscheinleistung der Asynchronmaschine |
| S_{NE} | Nennscheinleistung einer Einzelanlage |
| S_{nE} | Scheinleistung einer Einzelanlage in einem Windpark mit n gleichen Anlagen |
| S_{Netz} | Netz-Scheinleistung |
| S_{NSM} | Nennscheinleistung der Synchronmaschine |
| S_p | Schwerpunkt |
| S_{rG} | Bemessungs-Scheinleistung des Generators (rated) |
| S_{rT} | Bemessungs-Scheinleistung des Transformators (rated) |
| T | |
| t | Zeit |
| t_0 | Zeit zur Rotorblattverstellung in einem betriebssicheren Zustand |
| t_{0b} | Zeit zur Rotorblattverstellung in einem betriebssicheren Zustand bei rein beschleunigten Vorgängen |
| t_B | Blatttiefe |
| T_D | Zeitkonstante der Dämpfung der Drehmomentenschwingung |
| T_E | Zeitkonstante des Erregerkreises |
| t_f | Nachwirkdauer von Flickern |
| T_G | Hochlaufzeitkonstante des Generators |
| t_{HBvd} | Hochlaufzeit eines direkt vom Antrieb bewegten Blattes |
| t_{HBvz} | Hochlaufzeit von z Rotorblättern, die von einem Abtrieb verstellt werden |
| t_{Hs} | Hochlaufzeit des Blattverstellantriebes bei Schnellstellvorgängen |
| T_n | = $1/\omega_0$ Zeitkonstante des Drehzahlintegrators |
| T_R | Hochlaufzeitkonstante des Rotorsystems |
| T_V | Zeitkonstante für das abklingende dynamische Kippmoment auf seinen stationären Wert |
| t_v | Verzögerungszeit |

| | |
|-------------------------|---|
| t_v | Rotorblatt-Verstellzeit bei konstanter Geschwindigkeit |
| T_W | Hochlaufzeitkonstante der Windturbine |
| T_ϵ | = p/ω_0 Zeitkonstante des Integrators zur Bestimmung des Torsionswinkels (generatorseitig) |
| U | |
| $u_{\mu VT}$ | auf die Grundschiwingung bezogener Verträglichkeitspegel der μ -ten Zwischenharmonischen |
| U_v | Effektivwert der v -ten Oberschwingungsspannung |
| u_v | auf die Grundschiwingung bezogene Oberschwingungsspannung v -ter Ordnung |
| $u_{v VT}$ | auf die Grundschiwingung bezogener Verträglichkeitspegel der v -ten Oberschwingung |
| U_0 | Gleichspannungsanteil |
| U_1 | Netzspannung |
| U_1 | Effektivwert der Grundschiwingungsspannung, Netzspannung |
| U_C | Bezugsleiterspannung der Kondensatorbatterie |
| $U_{d \max}$ | maximale abschaltbare Spannung eines Leistungshalbleiters |
| U_{di} | ideelle Gleichspannung |
| U_g | Zwischenkreisspannung |
| \underline{u}_G | Gesamtspannung (rotierender Zeiger) entspricht der Statorspannung ($\underline{u}_G = u_S$) |
| u_{Gd} | Gesamtspannung in Längsrichtung der Feldkoordinaten ($u_{Gd} = u_{Sd}$) |
| U_{Gen} | Generatorspannung |
| u_{Gq} | Gesamtspannung in Querrichtung der Feldkoordinaten ($u_{Gq} = u_{Sq}$) |
| U_i | induzierte Maschinenspannung |
| U_{Mot} | Motorspannung |
| U_N | Nennspannung |
| U_{Netz} | Netzspannung |
| U_{NP} | Netzspannung am übergeordneten Netzpunkt NP |
| $U_{N \text{ soll, L}}$ | Sollwert der Netzspannung im Leerlauf |
| U_p | Polradspannung einer Synchronmaschine |
| u_{R1} | maschinenseitige Rotorspannung in Phase 1 |
| u_{R2} | maschinenseitige Rotorspannung in Phase 2 |
| u_{R3} | maschinenseitige Rotorspannung in Phase 3 |
| u_{Rd} | maschinenseitige Rotorspannung in Längsrichtung der Feldkoordinaten |
| $U_{R \max}$ | maximale Rotorspannung |
| u_{Rq} | maschinenseitige Rotorspannung in Querrichtung der Feldkoordinaten |
| u_{S1} | Statorspannung in Phase 1 |
| u_{S2} | Statorspannung in Phase 2 |
| u_{S3} | Statorspannung in Phase 3 |
| u_{Sd} | Statorspannung in Längsrichtung der Feldkoordinaten |

| | |
|-------------------|---|
| u_{Sq} | Statorspannung in Querrichtung der Feldkoordinaten |
| U_{VP} | Spannung am Verknüpfungspunkt VP |
| U_Z | Zündimpulsspannung |
| U_{zk} | Zwischenkreisspannung |
| \ddot{i}_{kASM} | Überhöhungsfaktor der Kurzschlussleistung von Asynchronmaschinen |
| \ddot{i}_{kSM} | Überhöhungsfaktor der Kurzschlussleistung von Synchronmaschinen |
| V | |
| v | Windgeschwindigkeit |
| \bar{v} | Mittelwert der Windgeschwindigkeit |
| v_σ | Standardabweichung der Windgeschwindigkeit |
| \vec{v}_0 | Drehgeschwindigkeit des Rotorkopfes |
| v_1 | ungestörte Windgeschwindigkeit weit vor dem Windrad |
| v_{1ax} | axiale Komponente der ungestörten Windgeschwindigkeit |
| v_2 | Windgeschwindigkeit am Windrad |
| v_{2ax} | axiale Komponente der verzögerten Windgeschwindigkeit am Rotorblatt |
| v_{2t} | tangentiale Komponente der verzögerten Windgeschwindigkeit am Rotorblatt |
| v_3 | verzögerte Windgeschwindigkeit weit hinter dem Windrad |
| v_{3ax} | axiale Komponente der verzögerten Windgeschwindigkeit weit hinter dem Windrad |
| v_{Ab} | Abschaltwindgeschwindigkeit |
| v_{Ein} | Einschaltwindgeschwindigkeit |
| V_L | Luftvolumenelement |
| v_{Mess} | Messbereich der Windgeschwindigkeit |
| v_N | Nennwindgeschwindigkeit |
| v_r | resultierende Windgeschwindigkeit |
| v_u | Umfangsgeschwindigkeit |
| v_w | örtliche Windgeschwindigkeit |
| W | |
| W_W | Energieentzug durch die Windturbine |
| X | |
| $X_{1\sigma}$ | Streureaktanz eines Statorstranges |
| $X'_{2\sigma}$ | Streureaktanz eines Läuferstranges auf den Stator bezogen |
| X_d | synchrone Längsreaktanz einer Synchronmaschine |
| X'_d | transiente Längsreaktanz einer Synchronmaschine |
| X''_d | subtransiente Längsreaktanz einer Synchronmaschine |
| X_G | Streureaktanz von Stator und Läufer einer Asynchronmaschine |
| X_h | Hauptreaktanz eines Maschinenstranges |
| X_k | Kurzschlussreaktanz |

| | |
|------------|---|
| X_{kV} | (Kurzschluss-) Reaktanz der Verbindungselemente zwischen Netz und Verknüpfungspunkt |
| X_{L+T} | Reaktanz von Leitungen und Transformatoren |
| X_q | synchrone Querreaktanz einer Synchronmaschine |
| X_u | Reaktanz der Umrichterrosseln |
| Z | |
| z | Anzahl der Rotorblätter |
| z | Rückzahlungsdauer in Jahren |
| z_a | Anzahl der angetriebenen Rotorblätter |
| Z_{an} | Anlaufimpedanz der Asynchronmaschine |
| Z_C | Impedanz der Kondensatorbatterie |
| Z_k | Netzimpedanz (im Kurzschluss) |
| Z_{kV} | (Kurzschluss-) Impedanz der Verbindungselemente zwischen Netz und Verknüpfungspunkt |
| Z_{Last} | Last-Impedanz |
| Z_N | Nennimpedanz als rechnerischer Wert aus den Nenngrößen (U_N/I_N) einer Maschine |

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 |