

Leistungselektronik-Generator-Systeme in Windenergieanlagen – Stand und Entwicklungstendenzen

Power Electronics Generator Systems in Wind Power Stations – State of the Art and Development Trends

Prof. Dr.-Ing. Friedrich W. Fuchs, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Lehrstuhl für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe, Kiel, Deutschland, Email: fwf@tf.uni-kiel.de; Dipl.-Ing. Vincenz Dinkhauser; Dipl.-Ing. Simon Jensen, Dipl.-Ing. Ralf Lohde, Dipl.-Ing. Kai Rothenhagen, Dipl.-Ing. Christian Wessels, jeweils gleicher Lehrstuhl.

Kurzfassung

Windenergie ist heute schon ein wichtiger Bestandteil der Energiegewinnung. Der Stand der Technik von Windenergieanlagen wird hier mit dem Schwerpunkt auf den Leistungselektronik-Generatorsystemen, deren Regelung und der Anlagenregelung sowie der Netzanbindung dargestellt. Wichtige in diesem Gebiet liegende Herausforderungen und möglichen zukünftige Entwicklungen werden aufgezeigt.

Abstract

Today wind power is an important part of the energy mix. The state of the art of wind power stations is presented here with focus on power electronic generator systems, their control and the control of the plant as well as their connection to the grid. Important demands of this field and possible future developments are shown.

1 Einleitung

Der Einsatz fossiler Energien ist durch sinkende Reserven und hohe Preise bei steigender Umweltbelastung sowie durch politische Probleme mit den Förderländern belastet und zukünftig gefährdet. Deshalb sind regenerative Energiequellen als Alternative sehr gefragt. Die Windenergie spielt dabei neben der Wasserenergie derzeit eine besondere Rolle, da sie gut verfügbar ist, die Energiekosten moderat sind und die Anlagen zur der Energiegewinnung ausgereift sind. Für Länder in den gemäßigten Breiten mit guten Windverhältnissen wie Deutschland ist Windenergie eine gut geeignete Energiequelle.

So sind zum Beispiel in Deutschland, das hier derzeit noch in der Spitzenposition ist und in der Vergangenheit sicherlich eine starke Vorreiterrolle übernommen hat, Ende 2007 insgesamt 19.460 Windenergieanlagen an Land in Betrieb, die vorwiegend innerhalb der letzten 10 Jahre erstellt worden. Die Entwicklung zeigt Bild 1.

Mit einer Gesamtleistung von derzeit 22,2 GW [1] wurde damit im Jahr 2007 insgesamt 39,9 TWh [1] elektrische Energie erzeugt. Mit 7,2 % Anteil am elektrischen [1a] und 1,0 % Anteil an dem Primärenergieverbrauch [2] im Jahr 2007 ist die Windenergie aber schon ein bedeutender Faktor im Energiemix in Deutschland (Primärenergie-Anteil Wasserenergie 0,5 %, Biomasse 4,5 %, sonstige 0,3 %). Die Förderung der Windenergie in Deutschland mit im Mittel 7,16 bis 9,1 Cent je kWh je nach Standort [3] deutet etwa den Gestehungspreis an, der damit recht moderat ist. Dieser wird in [1] mit 6,3 bis 7,0 Cent bei 100 % Referenzeintrag des Windes nach Energieeinspeisegesetz angegeben.

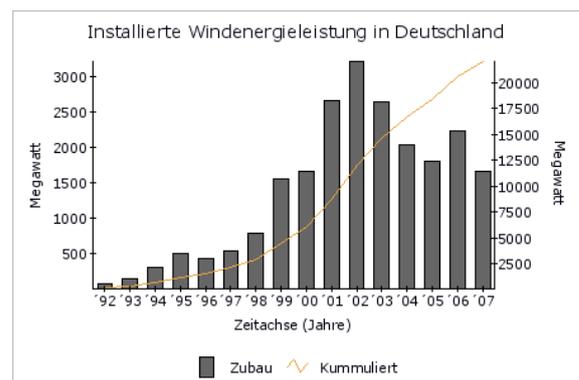


Bild 1 Installierte Windenergieleistung in Deutschland Ende 2007 [1]

Im Vergleich dazu ist die installierte Kraftwerksleistung in Deutschland mit 119,4 GW im Jahr 2005 [4] nur etwa fünf Mal so groß, wenn auch die Energieerzeugung mit 612 TWh im Jahr 2005 [5] etwa 15 Mal so groß wie die durch Windenergieanlagen ist. Dies liegt an der nicht kontinuierlichen Vollausslastung der Windenergieanlagen bei unterschiedlichen Windstärken. Das heißt, je Windenergieanlage wird auf die Nennleistung bezogen nur etwa das 0,4-fache an Energie erzeugt.

Weltweit sind Windenergieanlagen mit einer Leistung von 94,1 GW installiert. Dabei haben die USA mit 5,2 GW pro Jahr derzeit die größte Zuwachsrate. Beide Werte gelten wieder für das Jahr 2007 [1]. China arbeitet auch stark an einem Ausbau der Windenergie. Windenergie ist die am stärksten wachsende regenerative Energieerzeugung mit einem Zuwachs von etwa 20 GW im Jahr 2007 [1]. Die deutschen Hersteller haben daran einen Weltmarktanteil

von 35 % und eine Exportquote von 69 % (geschätzt für 2007 [6]). Dabei ist zu bedenken, dass auch der technische Fortschritt rasant war: so betrug 1980 die übliche Größe einer Windenergieanlage etwa 50 kW [7].

Windenergieanlagen sind, wie schon berichtet, ein ausge-reiftes Produkt, besser wäre es, den Begriff System zu verwenden. Denn in einer Windenergieanlage kommen viele Komponenten zusammen, wie Gründung, Turm, Rotor, Gondel und Generator, die in der Entwicklung, Konstruktion und Fertigung ingenieurtechnische Höchstleistungen verlangen.

Aus elektrotechnischer Sicht sind insbesondere das Leistungselektronik-Generatorsystem mit seiner eigenen und der Anlagenregelung sowie die Netzanbindung interessant. Diese sollen hier in einer Übersicht zum Stand der Technik vorgestellt werden. Dazu wird im Abschnitt 2 das Prinzip der Windenergieanlage und des Vorteils der Drehzahlverstellung vorgestellt. Im Abschnitt 3 werden die heute verwendeten Leistungselektronik-Generatorsysteme erläutert. Der Abschnitt 4 behandelt die Regelverfahren für den Generator und das Gesamtsystem. Im Abschnitt 5 werden die Netzanbindung und ihre hohen Anforderungen aufgezeigt. Im Abschnitt 6 werden die Herausforderungen an Windenergieanlagen und ihre Entwicklungstendenzen behandelt. Eine Zusammenfassung im Abschnitt 7 beschließt den Überblick

2 Prinzip und Ausführung der Windenergieanlagen

Windenergieanlagen, eine Prinzipdarstellung ist in Bild 2 wiedergegeben, werden heute meistens mit Stahlbetontürmen erstellt mit einer Nabenhöhe von derzeit bis zu etwa 100 bis 120 m für eine 5 MW Anlage [10]. Der Rotor, mit einem Durchmesser bis zu etwa 126 m, ebenfalls für eine 5 MW Anlage [10], befindet sich am horizontal drehbar angeordneten Turmkopf, der Gondel. Es werden heute wegen der guten Effizienz und der begrenzten Rotorgeschwindigkeit Dreiblattrotoren verwendet. Das Gewicht der Gondel kann bei großen Anlagen einige 100 t betragen. Die Gondel wird so nachgeführt, dass sie in Windrichtung steht. Das Getriebe, falls ein System mit Getriebe verwendet wird, wie auch der Generator und der Frequenzumrichter befinden sich in der Gondel. Der Transformator zum Netzanschluss wie auch die Filter, zum Sicherstellen begrenzter Oberschwingungen im netzseitigen Strom, sind auf Fundamenthöhe, zum Beispiel im Turmfuß untergebracht. Die Windenergieanlage soll effizient möglichst viel Leistung aus dem Wind entnehmen. Theoretisch können nach Betz etwa 60 % der Windleistung entnommen werden, praktisch ist ein Wert von etwa bis zu 50 % erreichbar [8]. Die dem Wind über den Rotor der Windenergieanlage entnehmbare Leistung ist laut Bild 2 abhängig von der Umlaufgeschwindigkeit des Rotors und der Windgeschwindigkeit. Ein Optimum für jede Windgeschwindigkeit kann erreicht werden, wenn die Drehzahl des Rotors geeignet nachgeführt wird, was über einen stromrichter-gespeisten, drehzahlvariablen Generator erfolgt. Damit sind die als MPP Maximum Power Point gekennzeichneten Betriebspunkte zu erreichen. Dies wird über eine entsprechende

Regelung durchgeführt und muss mit einer geeigneten Dynamik erfolgen.

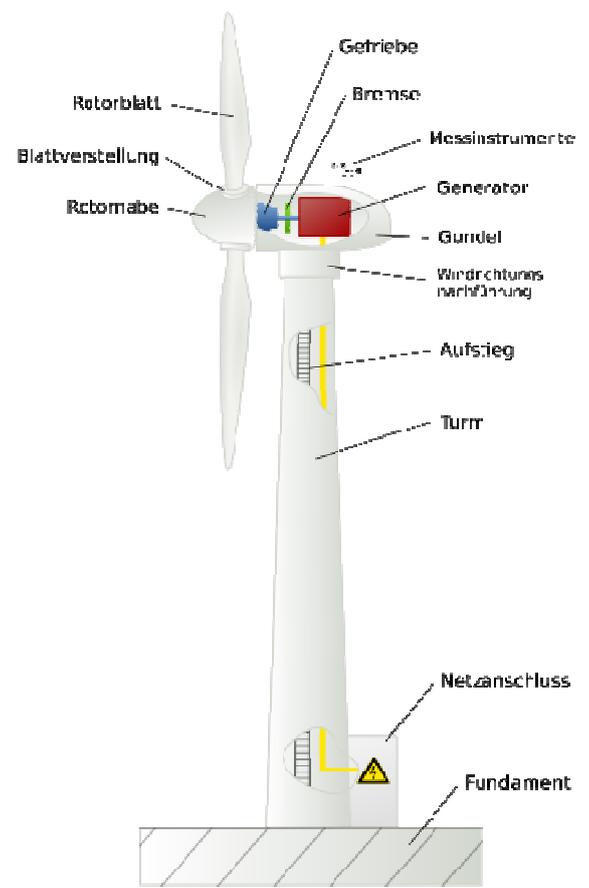


Bild 2 Windenergieanlage mit den wesentlichen Komponenten [11] (Generator enthält auch den Umrichter; Netzanschluss beinhaltet i.a. auch den Transformator)

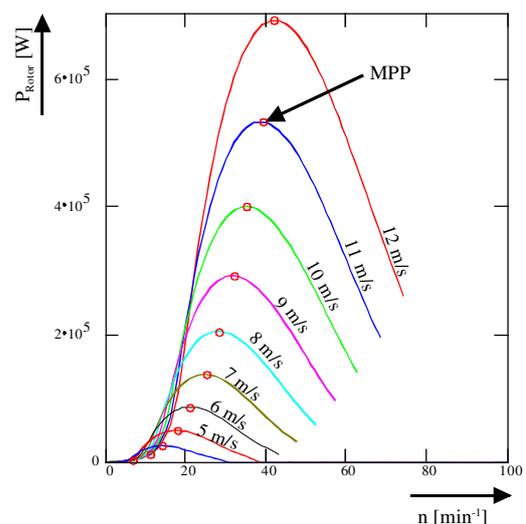


Bild 3 Rotorleistung über der Rotordrehzahl parametrisiert mit der Windgeschwindigkeit für die Windenergieanlage Vestas V44-600kW [9]; Punkte maximaler Leistungsaufnahme durch Kreise gekennzeichnet

Die im Wind enthaltene Leistung ist proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Es kommt deshalb

also darauf an, im Leistungsbereich der Windenergieanlage gerade auch bei hohen Windgeschwindigkeiten die enthaltene Leistung effizient zu gewinnen, andererseits aber auch, die Leistung auf die Nennleistung zu begrenzen. Zum anderen ist die im Wind enthaltene Leistung bei kleinen Windgeschwindigkeiten sehr gering, so dass die Zuschaltung im Allgemeinen erst bei drei bis fünf m/s Windgeschwindigkeit erfolgt.

3 Industriell verwendete Leistungselektronik-Generatorsysteme

Windenergieanlagen mit fester Drehzahl werden in den entwickelten Ländern kaum noch eingesetzt. Ihre Herstellungskosten sind zwar niedrig, aber die Leistungsausbeute ist entsprechend Bild 1 bei fester Drehzahl nicht optimal ist und Windstöße können starke Momentenstöße hervorrufen, die das Getriebe stark belasten [7]. Diese Anlagen werden hier nicht weiter behandelt.

Für drehzahlvariable Systeme werden heute vorwiegend vier verschiedene Varianten hergestellt, wie in Bild 4 dargestellt.

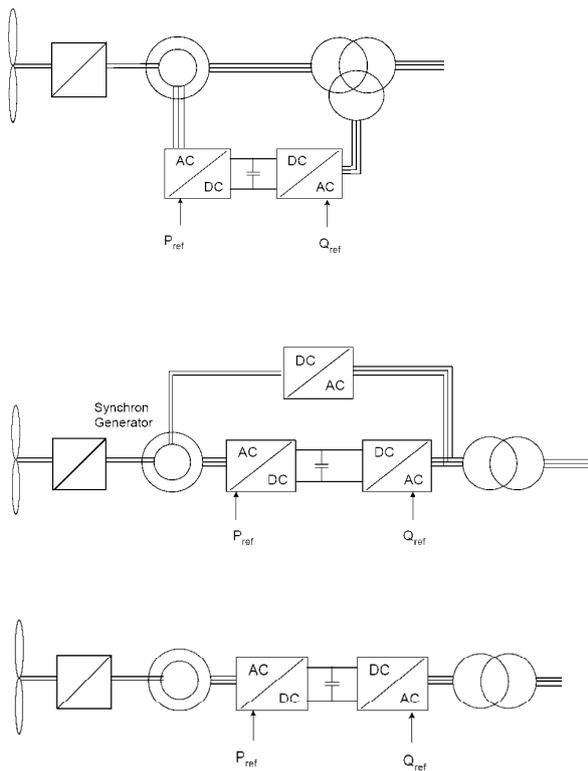


Bild 4 Leistungselektronik-Generatorsysteme in Windenergieanlagen, Getriebe nicht dargestellt, von oben nach unten: Doppeltgespeiste Asynchronmaschine, Fremderregte Synchronmaschine, Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer oder permanentmagnet Synchronmaschine

Am meisten verbreitet und neu installiert ist die doppeltgespeiste Asynchronmaschine. Der Ständer der Maschine

liegt am Netz, der Rotor am Zwischenkreisumrichter mit eingepprägter Spannung. Die Regelung der Maschine erfolgt über diesen Umrichter und den Rotor. Der Vorteil dieser Lösung liegt darin, dass der Umrichter nur für die Schlupfleistung ausgelegt werden muss. Ein Betrieb mit etwa +/- 30 % um die Nenndrehzahl hat sich als ausreichend erwiesen womit der Umrichter nur für 30 % der Nennleistung ausgelegt werden muss. Ein Nachteil liegt darin, dass bei Netzstörungen große Spannungen in den Rotor eingekoppelt werden, die durch Zuschaltung eines Rotorwiderstandes (englisch Crow Bar) zu beherrschen sind. Zudem sind Schleifringe im Einsatz, die einer Wartung bedürfen.

Die anderen drei Generator-Varianten sind mit einem Vollumrichter ausgestattet. Die bei der doppeltgespeisten Asynchronmaschine genannten Nachteile sind dabei nicht vorhanden, stattdessen der Nachteil des Vollumrichters mit entsprechenden Kosten und höheren Verlusten. Darüber hinaus wird ihnen ein geringerer Beitrag zur Kurzschlussleistung des Netzes zugeschrieben [7].

Eine seit langem verwendete Variante ist diejenige mit fremderregter Synchronmaschine und Vollumrichter. Zur Maschine hin wird statt des selbstgeführten Frequenzumrichters alternativ auch ein Diodengleichrichter mit Hochsetzsteller verwendet.

Seit nicht so lang zurückliegender Vergangenheit sind auch Systeme mit permanenterregter Synchronmaschine und Vollumrichter im Einsatz. Hier ist der hohe Wirkungsgrad der Synchronmaschine aufgrund ihres wicklungslosen Läufers das heraushebende Merkmal. Allerdings sind die höheren Herstellkosten der Maschine zu berücksichtigen und es fallen im Vollumrichter wiederum höhere Verluste an als bei der doppeltgespeisten Asynchronmaschine.

Darüber hinaus sind auch Systeme mit Asynchronmaschine und Kurzschlussläufer mit Vollumrichter anzutreffen. Die Wind-Rotoren sind langsam laufend, es bestehen hier besondere Vorschriften, um die Lärmentstehung in Grenzen zu halten. Die am weitesten verbreitete mechanische Variante der Windenergieanlagen arbeitet mit Getriebe, i.a. zweistufig, und darauffolgend einer normal schnell laufender Maschine (z.B. $n_{typ} = 1000 \text{ min}^{-1}$). Daneben gibt es Konzepte, die mit langsamlaufender, hochpoliger Maschine, ohne Getriebe, arbeiten.

Zu diesen grundlegenden Leistungselektronik-Generatorvarianten gibt es noch weitere, firmenspezifische Untervarianten, die hier nicht weiter dargestellt werden.

Derzeit sind Anlagen mit Nennleistungen von 1,5 bis 3,5 MW diejenigen, die am meisten installiert werden. Hierbei werden im Allgemeinen in der Anlage und auch für den Umrichter Nennspannungen von 690 V oder ähnlichen Werten verwendet. Zur Windenergieanlage gehört im Allgemeinen ein Transformator, der auf die Netz-Anschlussspannung als Mittelspannung hochsetzt. Als Stromrichter kommen vorwiegend Zweistufenumrichter mit Isolated Gate Bipolar Transistoren (IGBT) mit 1700 V Sperrspannung als Leistungshalbleiter zum Einsatz. Die Schaltfrequenzen der Pulsweitenmodulation liegen bei etwa 2 kHz. Hier gibt es verschiedenste Untervarianten bezüglich Pulsweiten-

modulationsverfahren, Filterung zum Netz hin und auch Ausführung des Systems wie z.B. bestehend aus mehreren Umrichter-Generator-Teilsystemen um im Schadensfall noch Teilleistung fahren zu können.

Bei höheren Leistungen, der Stand der Technik liegt derzeit nach Kenntnis des Autors bei maximal 6 MW, werden anlagenintern z.T. auch höhere Spannungen verwendet.

4 Regelungsverfahren

Die Leistungselektronik-Generatorsysteme von Windenergieanlagen werden nach den klassischen Verfahren der Antriebstechnik geregelt. Es wird vorwiegend eine feldorientierte Stromregelung für den Generator und eine netzspannungsorientierte für den Netzstromrichter angewendet, eine direkte Strom- oder Momentenregelung wäre auch möglich [12]. Ein Beispiel für die Gesamtregelung einer Windenergieanlage mit doppeltgespeister Asynchronmaschine zeigt Bild 5, die vom Prinzip her auch für die anderen Varianten gültig ist. Am Generator wird dessen Moment und die Blindleistungsaufnahme am Stator über den Strom geregelt (Current Control), mit dem Netzstromrichter die Zwischenkreisspannung und die Blindleistung zum Netz hin.

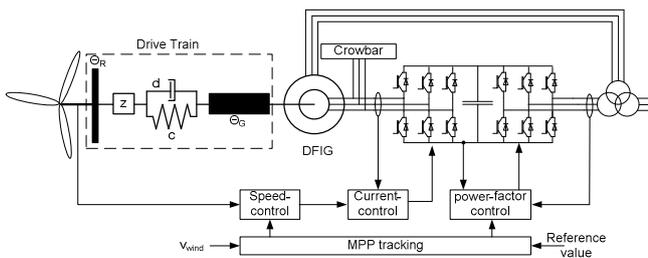


Bild 5 Systemkomponenten mit Einfluss auf das elektrotechnische Verhalten und Regelung der Windenergieanlage mit doppeltgespeister Asynchronmaschine; Drehzahl- und Leistungsregelung mit MPP-Nachführung [13]

Überlagert ist die Anlagenregelung, die das spezifische Verhalten der Windenergieanlage bestimmt, in Bezug auf das aerodynamische System unter den Randbedingungen der von der Netzführung eventuell vorgegebenen Leistungsbegrenzung und inherenten Funktionen der Netzstützung. Diese Anlagenregelung dient besonders der Optimierung der Leistungsgewinnung. Sie muss gut auf das Anlagenverhalten und auf die Dynamik der Mechanik der Windenergieanlage und des Windes abgestimmt sein. Die Darstellung enthält die Komponenten, die für eine Bestimmung der Netzeinspeisung der Windenergieanlage z.B. durch Simulation von Bedeutung sind.

Dabei sind der Leistungsoptimierungsbereich und der Leistungsbegrenzungsbereich zu unterscheiden. Im Leistungsoptimierungsbereich wird der Betriebspunkt optimaler Leistungsaufnahme nach Bild 2 über die Drehzahlregelung entsprechend Bild 5 mit Hilfe des Umrichters angefahren. Herrscht eine derartige hohe Windgeschwindigkeit vor, dass die vom Rotor her aufnehmbare Leistung die Nennleistung übersteigt, wird die aufgenommene Leistung begrenzt. Dies geschieht dadurch, dass der Rotor durch die Pitchverstellung, eine Verstellung des Anstell-

winkels der Rotorblätter, geregelt teilweise aus dem Wind genommen wird. Die Regelung im Leistungsoptimierungs- und im Leistungsbegrenzungsbereich müssen sich weich ablösen.

5 Netzanbindung

Die Struktur der elektrischen Energieerzeugung in Deutschland und weltweit ist bisher durch die thermischen Kraftwerke durch wenige, zentrale Einspeisungen charakterisiert. Diese werden über die Netzführung so geregelt, dass ein stabiler und verlässlicher Betrieb der Energieversorgung erfolgt. Die Netzführung basiert aufgrund der wenigen, zentralen Standorte auf einer guten Kommunikation und Regelung beziehungsweise die Netzführung ist auf diese zentralen Einspeisestellen ausgelegt. Die Synchrongeneratoren der Kraftwerke weisen zudem geeignete Eigenschaften auf, die eine gute Beherrschung der Regelung im Normalbetrieb wie auch im Fall von Netzstörungen ermöglichen und zudem eine in gutem Maße sinusförmige Spannung einspeisen.

Windenergieanlagen müssen sich bei zunehmender Einspeisung an diesen Aufgaben immer stärker beteiligen. Die Netzanschlussbedingungen in Deutschland stellen heute schon generell hohe Anforderungen dar, da hier ja auch schon ein hoher Anteil der Energie aus dieser Energiequelle ins Netz gespeist wird, und sind zum Teil auch Vorbild für andere Länder weltweit. Sie werden entsprechend den Erkenntnissen aus der Einbindung der regenerativen Quellen in die Netze regelmäßig verfeinert und verschärft. Die Anlagenhersteller müssen diesen Vorgaben kontinuierlich folgen.

Die beiden wesentlichen Bedingungen, die Windenergieanlagen zur Netzführung beitragen müssen, sind die Einspeisung von Blindleistung im Normalbetrieb des Netzes und die Aufrechterhaltung des Betriebs und Einspeisung von Strom bei Netzunterspannung. Bild 6 zeigt als Beispiel die Anforderung bezüglich des Betriebs bei Netzunterspannung.

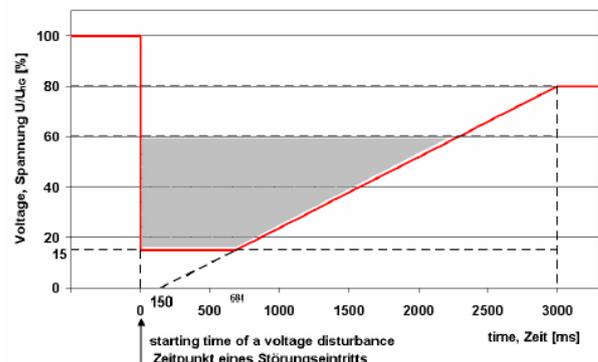


Bild 6 Geforderter Betriebsbereich der Aufrechterhaltung des Betriebs einer Windenergieanlage bei Netzunterspannung nach EON-Richtlinie [14]

Oberhalb der durchgezogenen Kurve bis herunter zu einer Netzspannung von 15 % muss die Anlage für die Dauer von bis zu 3 Sekunden bei extremen kleinen Netzspan-

nungen bis zu 15 % in Betrieb bleiben. Die entsprechende Forderung für Frequenzrichter im industriellen Einsatz lautet etwa, den Betrieb bis zu einer minimalen Spannung von 85 % aufrechterhalten. Diese Forderung, ebenso wie diejenige zur Blindstromspeisung, erfordert spezielle Zusatzmaßnahmen am Umrichter für Windenergieanlagen.

Neben diesen Regeleigenschaften der Windenergieanlage, die sich aus der Netzanschlussspannung ableiten lassen, sind weitere Regelaufgaben notwendig, die eine Kommunikation mit der Netzfürung notwendig machen. Dies ist heute bei neueren Anlagen schon die Leistungsbegrenzung, um die Netzstabilität sicherzustellen, zukünftig könnten weitere Aufgaben dazukommen. Geeignete Kommunikationssysteme sind dafür einzurichten.

Die durch Stromrichter erzeugte Spannung der regenerativen Energieerzeuger am Netz enthält vom Prinzip her einen starken Anteil an Oberschwingungen. Dieser wird durch geeignete Maßnahmen wie derzeit im allgemeinen passive Filter auf die zulässigen Werte reduziert.

6 Herausforderungen und zukünftige Entwicklung

Der Einsatz der Windenergie zur Energieerzeugung und zur Einspeisung in die elektrischen Energieversorgungsnetze bedeutet viele Herausforderungen zu meistern. Windenergieanlagen marktgerecht zu konstruieren heißt das Abwägen zwischen zu kräftiger und zu schwacher Auslegung zu beherrschen und das Ziel, das Erreichen der geplanten Lebensdauer, die oft bei 20 Jahren liegt, zu erreichen. Dies gilt für die Anlagen generell durch die Entwicklung wie auch für die Ausführung für den jeweiligen Einsatz weltweit durch die Projektierung. Wesentliche Herausforderungen sollen hier aufgezeigt werden wie

- Netzunterstützung,
- Belastungs- und Leistungsflussverbesserung,
- Anschluss an schwache Netze und
- off shore Windparks.

Bezüglich der Netzunterstützung sind weitere Anforderungen zu erwarten.

Zur Belastungsreduzierung der Windenergieanlagen auf der Netzseite wie zur Verbesserung des Leistungsflusses der Windparks ins und im Netz werden zunehmend Stromrichter, zum Beispiel in Form von Flexible AC Transmission Systems (FACTS), eingesetzt werden.

Eine weitere Herausforderung ist der Anschluss großer Windparks insbesondere an schwache Netze. Das Netzverhalten am Anschlusspunkt kann dann überwiegend vom Windpark her bestimmt sein. Der Leistungsfluss kann bei voller Einspeisung aus dem Windpark vollständig von der Anschlussstelle zum Kernnetz gehen.

Große Herausforderungen, auf die in der Einleitung schon hingewiesen wurde, sind die off shore Windparks. Für Deutschland sind sie eine Notwendigkeit für den weiteren Ausbau der Windenergie, da die Aufbauflächen an Land zu Ende gehen. Hier sind viele Faktoren eine Herausforderung wie die Gründung, die Stabilität der Türme, die Festigkeit gegen Salzluft und Salzwasser, Transport und Aufbau. Eine Wirtschaftlichkeit wird besser mit großen Anla-

gen zu erzielen sein, weswegen die Entwicklung von großen Anlagen bis 6 Megawatt und in Zukunft eventuell noch höher begünstigt wurde. Auch diese wiederum stellen hohe Anforderungen dar, bezüglich Turmhöhe, Blattlänge, Gewicht der Gondel und anderes mehr.

Wo geht es in der Zukunft hin? Generell ist auch in Deutschland noch mit einem Wachstum der Windenergie zu rechnen, vorwiegend allerdings offshore. So sollen bis 2030 auf See 30 Windparks mit einer installierten Leistung von 25 GW errichtet sein [15].

Die Zukunftsmärkte liegen sicherlich zu großen Teilen außerhalb Europas. Die USA und China als sehr große Märkte sind zum Beispiel intensiv mit dem Aufbau von Windenergie befasst. In Anbetracht der Energie-Problematik kann Windenergie sicherlich auch für viele unter oder mittel entwickelte Staaten hoch interessant werden. Generell wird ein kräftiger Anstieg der installierten Windenergieanlage prognostiziert.

Die Technik muss sich den Anforderungen anpassen. Dies heißt wohl weiterhin noch eine Verstärkung der Eigenschaften als unproblematischer Netzteilnehmer. Die Eingliederung in eine dezentrale Energieregulierung mit Netzunterstützung ist erforderlich. Eine detaillierte Kommunikation zwischen Netzfürung und Windpark könnte deshalb erforderlich werden.

Von der Anlagenseite her wird man bemüht sein, diesen Anforderungen mit möglichst geringem Aufwand zu genügen, es sind geschickte Lösungen gefragt.

Interessant wird es auch sein, ob die am Markt derzeit vorhanden vier Varianten auf Dauer bestehen bleiben werden. Auch bezüglich des Leistungselektronik-Generatorsystems sind Neuerungen zu erwarten.

Die Entwicklungen der Firmen können hier natürlich nur schwer offenbart werden. Folgt man einer anderen Veröffentlichung [7], so gibt es drei Hauptfelder, die bei der Entwicklung im Fokus stehen:

- erstens Zuverlässigkeit,
- zweitens Wirkungsgrad und als
- drittes Kosten.

Die Entwicklungen in der Leistungselektronik kommen ihrem Einsatz in Windenergieanlagen sehr entgegen. Die Kosten für Leistungshalbleiter gleicher Leistung sinken, nach [7] um 2 bis 5 % je Jahr. Dabei ergeben sich zusätzlich noch verbesserte Eigenschaften, so dass Verluste und Volumen der Frequenzrichter über die Jahre erheblich reduziert werden konnten, was sich in Zukunft vermutlich fortsetzen wird.

Schaut man auf die Forschungswelt der Universitäten, z.B. in [17], so erhält man sicher einige Hinweise, wohin die Entwicklung gehen kann. Hier wird insbesondere an der Regelung gearbeitet, wobei konventionelle Verfahren wie feldorientierte Regelung und nichtlineare Verfahren untersucht werden. Nach wie vor wird an der Verbesserung des Durchfahrens von Netzunsymmetrien und von Unterspannung, Low Voltage Ride Through (LVRT), gearbeitet. Der Einsatz von FACTS-Systemen und HGÜ-Übertragung sind weitere Themen. Ein weiterer Komplex befasst sich mit neuen Schaltungskonfigurationen von Windenergiesystemen. Hier wird unter anderem auch Fehlertoleranz

untersucht, sicher ein wichtiger Punkt, z.B. für off shore Windenergieanlagen.

In einer anderen Zusammenstellung wissenschaftlicher Arbeiten auf dem Sektor Leistungselektronik-Generatorsysteme und Windenergie [18] werden weitere Themen bearbeitet. Die Integration von Windenergieanlagen in die Netze bei starker Anlagendichte wird behandelt und Konsequenzen werden gezogen. Dabei geht es um die Aufgaben der Netzregelung für diesen Fall, die Leistungsreserven bei Ausfall und die Aufrechterhaltung der Netze bei Störungen. Vorgehensweisen in verschiedenen Ländern werden verglichen. Andere Arbeiten betrachten den Einfluss der Windenergieanlagen, einschließlich solcher mit HGÜ-Anbindung, auf die Stabilität der Netze und die Auslegung der thermischen Kraftwerke. Verbesserte Methoden zum Durchfahren von Netzstörungen sind ein weiteres Untersuchungsziel.

Zusammengefasst sind die Entwicklungstendenzen:

- stark wachsender Absatz,
- weniger Varianten der Generatorsysteme (?),
- Kostenreduktion und verbessertes Verhalten der Leistungshalbleiter,
- neuartige Regelungsverfahren,
- neuartige Schaltungskonfigurationen,
- Einsatz von HGÜ und FACTS zur verbesserten Einspeisung,
- fehlertoleranter Betrieb
- verbesserte Netzunterstützung.

Am Lehrstuhl des Verfassers werden ebenfalls derartige Arbeiten durchgeführt wie gegenseitige Beeinflussung der Anlagen bei drehstromgespeisten und interne Netzführung bei HGÜ-gespeisten Windparks. Darüberhinaus wird an der Fehlererkennung für den Generator und am fehlertoleranten Betrieb für Sensorfehler gearbeitet. Das Durchfahren von Netzstörungen ist ebenso ein Arbeitsfeld wie der Netzpulsstromrichter mit Netzverhalten.

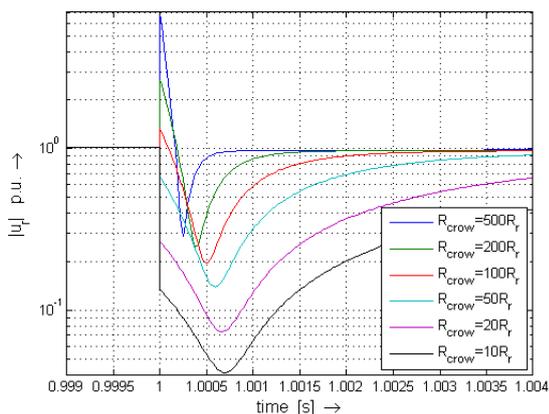


Bild 7 Rotorspannung der Doppeltgespeisten Asynchronmaschine über der Zeit bei schlagartiger Netzunterspannung bei verschiedenen Rotorwiderständen [13] (Bei $P_N = 2 \text{ MW}$, $\cos \varphi = 1$, $n_{\max} = 2000 \text{ min}^{-1}$)

Beispielhaft wird eine Untersuchung des Verhaltens einer doppeltgespeisten Asynchronmaschine bei Netzunterspannung wiedergegeben. Diese Unterspannung liegt ebenso

am Stator an mit der Folge, dass große Spannungen am Rotor entstehen, die begrenzt werden müssen, um den rotorseitigen Stromrichter zu schützen. Das Bild 7 zeigt die Verläufe der Rotorspannung für verschiedene Werte des als Schutz zugeschalteten Rotorwiderstandes. Dessen Wert ist entsprechend der Spannungsfestigkeit der Stromrichter zu wählen, je kleiner aber auch mit um so höherem Strom.

7 Zusammenfassung

Windenergie ist heute schon ein wichtiger Bestandteil der Energiegewinnung. Der Stand der Technik von Windenergieanlagen wird hier mit dem Schwerpunkt auf den Leistungselektronik-Generatorsystemen, deren Regelung und der Anlagenregelung sowie der Netzanbindung dargestellt. Wichtige in diesem Gebiet liegende Herausforderungen und mögliche zukünftige Entwicklungen werden aufgezeigt. Es zeigt sich, dass die Energiegewinnung aus Windenergie in Zukunft noch viele Herausforderungen zu meistern hat.

8 Literatur

- [1] Bundesverband Windenergie, Statistiken 2007 www.wind-energy.de/de/statistiken.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2007; http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/39830.php.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien Gesetz vom 21.07.2004; <http://umweltministerium.de/gesetze/verordnungen/doc/2676.php>.
- [4] VDEW Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V. Pressekonferenz Berlin 14.11.2006; [www.branchenkommunikation-strom.de/.../d9a9181c9f82492cc1257225005a97ba/\\$FILE/Leistungsbilanz_2005-2006.pdf](http://www.branchenkommunikation-strom.de/.../d9a9181c9f82492cc1257225005a97ba/$FILE/Leistungsbilanz_2005-2006.pdf).
- [5] Statistisches Bundesamt, Energieverbrauch; http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Energie/Tabellen/Content50/Erneuerbare_Energie.templateId=renderPrint.psm.
- [6] Bundesverband Windenergie BDE e.V., http://www.windenergie.de/fileadmin/dokumente/Presse_Hintergrund/HG_Arbeitsplaetze.pdf.
- [7] Blaabjerg, F.; Chen, Z.; Teodorescu, R.; Iov, F.; Power Electronics in Wind Turbine Systems; Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPESC '06. CES/IEEE 5th International Volume 1, Aug. 2006 Page(s):1 – 11.
- [8] Heier, S.: Nutzung der Windenergie, Berlin, Springer, 2007.
- [9] Jensen, Simon; Fuchs, Friedrich W.: Dynamic Operation and Energy Gain of a Wind Power Station with Converter Fed Permanent Magnet Synchronous Machine; NORPIE 2006; Lund, Schweden.
- [10] Repower, Anlagendaten 5M; www.repower5m.de
- [11] Wikipedia
- [12] Schröder, D.; Regelung von Antriebssystemen, Springer, Berlin, 2001.
- [13] Lohde, Ralf, Jensen, Simon, Knop, Andre, Fuchs, Friedrich W.: Analysis of Three Phase Grid Failure and Doubly Fed Induction Generator Ride-through using Crowbars; EPE 07 European Conference on Power Electronics and Drives, 2007, Aalborg, Dänemark, Proceedings auf CD.
- [14] EON, Technische Richtlinie für Windenergieanlagen.
- [15] Interview Minister Tiefensee in Handelsblatt, 06.07.2008; <http://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/tiefensee-treibt-ausbau-der-windenergie-voran;2008227>.
- [17] Special Section on Power Electronics for Wind Energy Conversion; IEEE Transactions on Power Electronic, 23(2008)3, pp. 1028-1178.
- [18] Special Issue on Windpower, IEEE Transactions on Energy Conversion, 22(2007)1.