

Doppeltspeisende Asynchronengeneratoren bis 5,6 MW für die Windenergie

Der Boom der vergangenen Jahre bei der Errichtung von Windenergieanlagen führt auch zu zahlreichen Innovationen im Elektromaschinenbau. So erlebt die Drehstromasynchronmaschine mit Schleifringläufer eine Renaissance als Generator bis in den Megawattbereich hinein. Dieses Generatorkonzept weist zahlreiche Vorteile gegenüber einer direktangetriebenen hochpoligen Synchronmaschine auf.

Peter Stupin
Stephan Kühne

netzseitige Entnahme (untersynchroner Generatorbetrieb) von Schlupfleistung.

Charakteristik der Turbine

Wegen der kubischen Abhängigkeit des Maximums der Turbinenleistung einer Windenergieanlage von der Drehzahl mit der Windgeschwindigkeit als Parameter ergibt sich die Notwendigkeit, die Drehzahl nur in einem eingeschränkten Bereich nachzuführen [3]. Oft ist bei Windenergiean-

Die 4-MW-Grenze ist überschritten

Die Anlagenleistung bei der Installation und beim Repowering von Windenergieanlagen zur Energieerzeugung hat inzwischen die 4-Megawatt-Grenze überschritten. Die weltgrößte Windenergieanlage mit einer Nennleistung von 5 MW wurde von der Firma Repower Anfang Oktober 2004 in der Nähe von Brunsbüttel in Betrieb genommen [1, 2]. Durch die Wahl eines geeigneten Generatorkonzepts und einer passenden Betriebsführung des Generators ist mit der wachsenden Anlagenleistung auch eine Verbesserung des Wirkungsgrads möglich. Dieses führt zu einer Erhöhung der betriebswirtschaftlichen Effektivität. Wegen des robusten Aufbaus und der Möglichkeit einer effektiven leistungselektronischen Steuerung sind Drehstromasynchronmaschinen mit Schleifringläufer für den Einsatz jenseits der

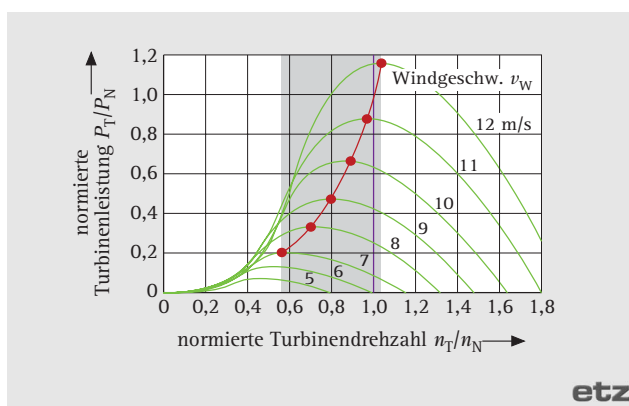


Bild 1. Mechanische Leistung eines Windrotors über der Drehzahl

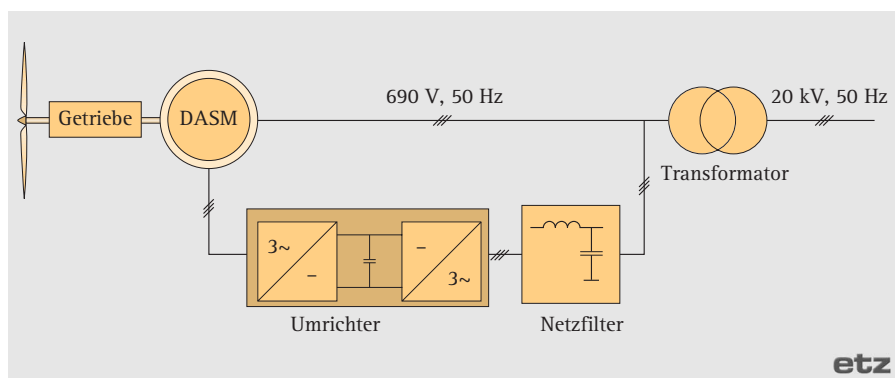


Bild 2. Prinzip der Windenergieanlage: Turbine, Getriebe, Generator und Umrichter

Dr.-Ing. Peter Stupin (61) hat an der Technischen Universität Dresden studiert, wo er 1973 auch promoviert wurde. Er ist in der Berechnungsabteilung der VEM Sachsenwerk GmbH in Dresden tätig und bearbeitet das Aufgabengebiet Auslegung von Asynchronmaschinen.
E-Mail: stupin@vem-group.com



Prof. Dr.-Ing. Stephan Kühne (42) ist Inhaber der Professur Elektronik/Schaltungstechnik an der Hochschule Zittau-Görlitz (FH) und hier u. a. für die Leistungselektronik und die elektrischen Antriebe verantwortlich.
E-Mail: st.kuehne@hs-zigr.de



4-MW-Marke besonders geeignet. Während bei der in den 1970er- und 1980er-Jahren in der Industrie im oberen Kilo- und unteren Megawattbereich eingesetzten untersynchronen Stromrichter-kaskade (USK) nur eine Energieflussrichtung vom Rotor ins Netz stattgefunden hat (untersynchroner Motorbetrieb), ermöglichen heute moderne Stromrichter in Generatorsystemen von Windenergieanlagen mit doppeltgespeisten Drehstromasynchronmaschinen ein netzseitiges Einspeisen (übersynchroner Generatorbetrieb) und eine

lagen ein Drehzahlstellbereich S von $7:10 \leq S \leq 10:7$ ausreichend. Bei kleineren Windgeschwindigkeiten ist das Leistungsmaximum nicht mehr so stark ausgeprägt und evtl. geringfügige Abweichungen führen kaum zu Leistungseinbußen. Durch die Verluste, im Besonderen im Getriebe und im Generator, ist jedoch eine Mindestwindgeschwindigkeit erforderlich, um die Turbine in Betrieb zu halten. Bild 1 zeigt den Verlauf der auf die Nennwerte normierten Turbinenleistung über der Drehzahl bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Über die Turbi-



rendrehzahl lässt sich weiterhin die Turbinenleistung bei Bedarf vermindern und somit den Einspeise- bzw. Verbraucheranforderungen anpassen.

Das Generatorsystem

Ein doppelt gespeisender Drehstromasynchrongenerator ist in der Lage, diese

Forderungen nach einer Drehzahlvariation von max. $\pm 30\%$ in Bezug auf seine synchrone Drehzahl besonders effektiv umzusetzen. Die Bemessungsdrehzahl befindet sich im übersynchronen Bereich bei einem Schlupf von $s = -0,2 \dots -0,1$. Die mechanische Wellenleistung wird dabei im übersynchronen Generatorbetrieb zu

einem kleinen Teil über den Rotor und zu einem großen Teil über den Stator ins Netz eingespeist. Statorseitig erfolgt eine starre Netzankopplung. Der Rotor ist über einen Umrichter mit dem Netz verbunden (Bild 2). Für Windenergieanlagen haben sich indirekte Umrichter mit Spannungszwischenkreis durchgesetzt. Als leistungselektronische Bauelemente kommen hier ausschaltbare Halbleiterventile, im Besonderen IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) zum Einsatz (Bild 3).

Entsprechend der Energieflussrichtung arbeiten im übersynchronen Generatorbetrieb der maschinenseitige Stromrichter im Gleichrichter- und der netzseitige Stromrichter im Wechselrichterbetrieb. Bei einer Umkehr der Energieflussrichtung (untersynchroner Betrieb) wechseln beide Stromrichter ihre Betriebsart.

Im Gegensatz zur unterschynchronen Stromrichterasskade (USK) sind der maschinen- und netzseitige Stromrichter so aufgebaut, dass beide Energieflussrichtungen möglich sind. Bei der USK ist nur ein unterschynchroner Motorbetrieb möglich, dem Rotor der Schleifringläufermaschine kann nur Schlupfleistung entzogen werden.

Mit einem eingangsseitigen Netztransformator erfolgt eine Anpassung vom 20-kV-Übertragungsnetz auf ein Spannungsniveau von 690 V. Wegen des Pulsbetriebs des netzseitigen Stromrichters ist zur Unterdrückung von Oberschwingungsströmen i. d. R. ein zusätzlicher Netzfilter vorzusehen.

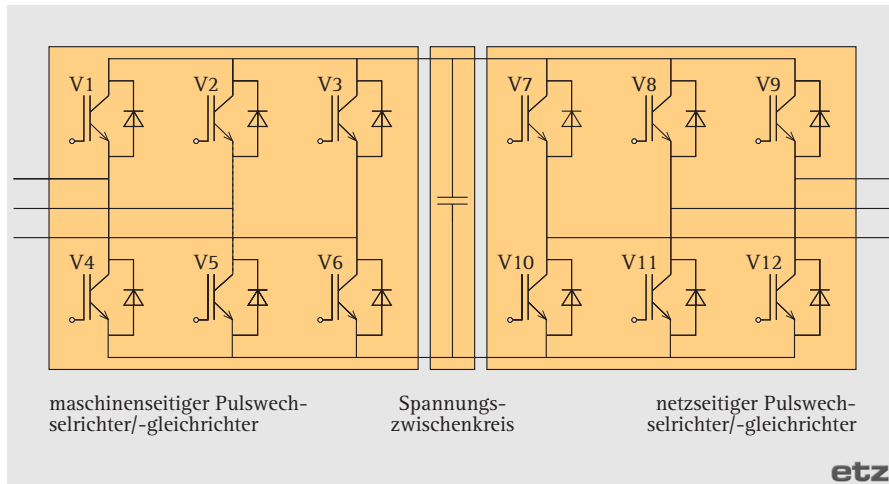


Bild 3. Maschinen- und netzseitiger Wechselrichter des rotorseitigen Umrichters

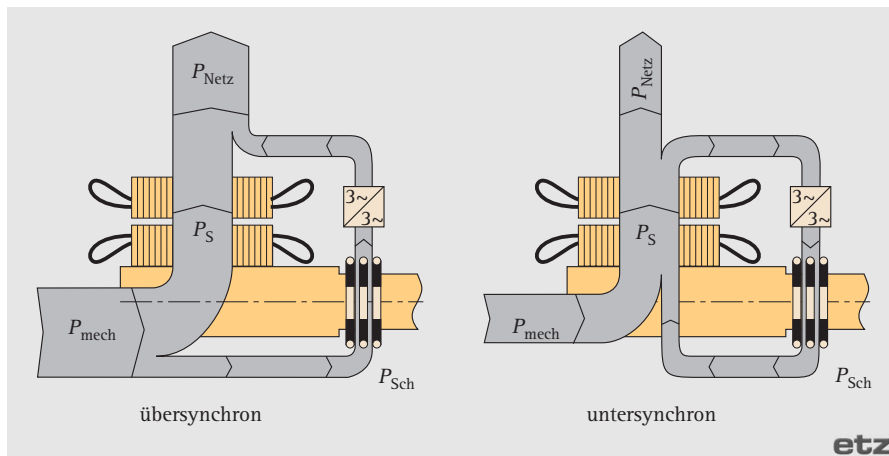


Bild 4. Energieflüsse im über- und unterschynchronen Betrieb

Auslegung der Stromrichtertechnik

Da nur die Schlupfleistung zum Absenken oder Anheben der Drehzahl über das Stromrichterstellglied übertragen werden muss, braucht der Rotorumrichter auch nur auf diesen vorab genannten Wert von annähernd 30 % der Nennleistung des Generators ausgelegt zu werden. Die quantitativen Leistungsflüsse ohne die Berücksichtigung der Verluste des Generators sind in Bild 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die statorseitig und über den Luftspalt übertragene Leistung P_S der als verlustfrei angenommenen Maschine über- und unterschynchron konstant ist (100 %). Im über- und unterschynchronen Betrieb findet ein richtungsabhängiger Ausgleich über die Schlupfleistung P_{Sch} statt. Erfolgt keine Leistungsübertragung über den Umrichter ($P_{Sch} = 0$), so stellt sich bei Belastung ein Arbeitsschlupf ein, der dem Leerlaufschlupf $s_0 = 0$ entspricht.

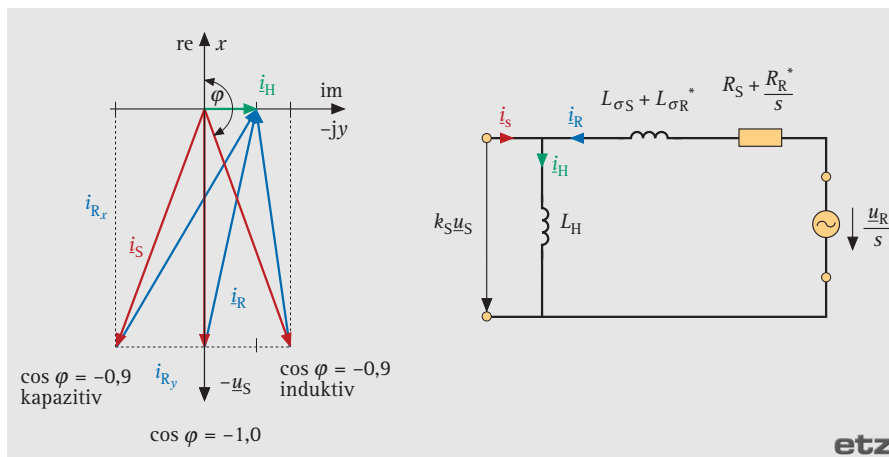


Bild 5. Zeigerbild der Ströme und Ersatzschaltbild

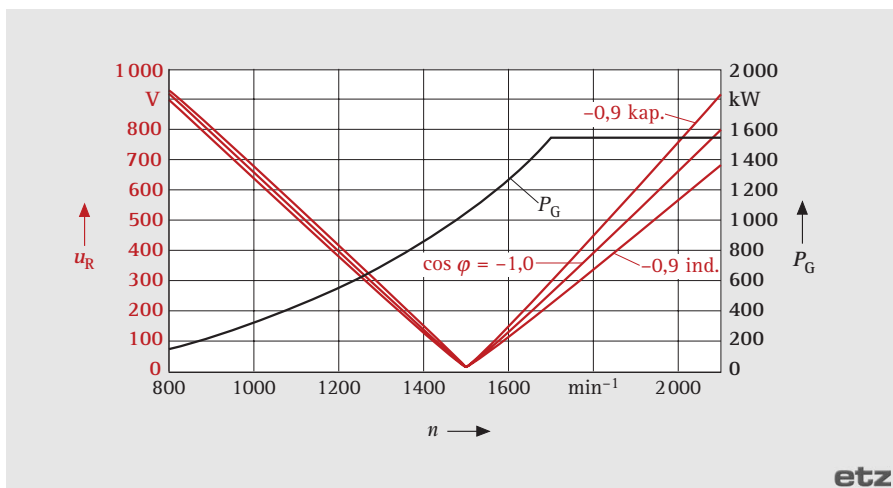


Bild 6. Verlauf der Rotorzusatzspannung und der Generatorleistung

Der Phasenschieberbetrieb

Bei der Steuerung der Blindleistung bzw. beim Phasenschieberbetrieb von Generatoren wird in erster Linie an den Betrieb von Synchrongeneratoren mit Über- und Untererregung gedacht. Der doppelt gespeiste Drehstromasynchrongenerator gestattet ebenfalls in einem eingeschränkten Bereich die Steuerung der Blindleistung. Mit dem Umrichter erfolgt in erster Linie die Steuerung des Wirkleistungsflusses. Bei einer Auslegung des netz- und maschinenseitigen Teilstromrichters als Pulsspannungswechselrichter bzw. -gleichrichter besteht auch die Möglichkeit, den Blindleistungsfluss zu steuern. Dann ist in einem vorgegebenen Betriebsbereich die

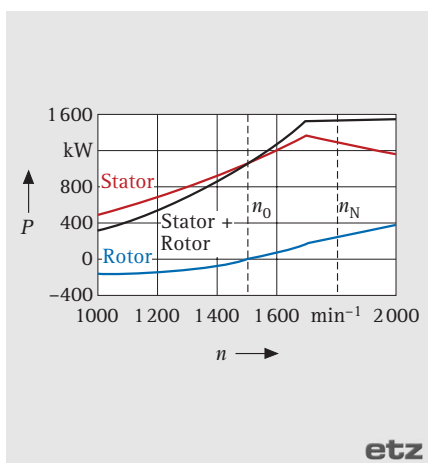


Bild 7. Verlauf der Stator- und Rotorleistung über der Drehzahl

Einprägung einer hinsichtlich Betrag und Phase beliebigen Rotorzusatzspannung u_R/s möglich (Schlupf s). Die Beschreibung des elektrischen Verhaltens des Generators erfolgt dabei auf der Basis des in Bild 5 dargestellten einsträngigen Ersatzschaltbilds. Zur Vereinfachung werden die statorseitigen Längsbaulemente R_S (ohmscher Wicklungswiderstand) und $L_{\sigma S}$ (Streuinduktivität) auf die Rotorseite übertragen und die mit dem ständerseitigen Kopplungsfaktor ($k_S \approx 0,95$) reduzierte Statorspannung auf die Hauptfeldinduktivität L_H geschaltet [4]. Der Statorstrom i_S und der auf die Statorseite umgerechnete Rotorstrom i_R sind bei Maschinen großer Leistung und bei Belastung mit Nenndrehmoment annähernd

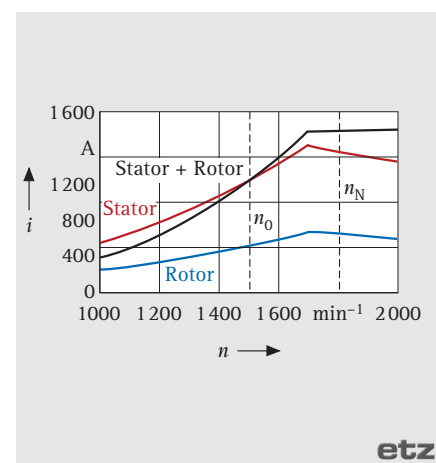


Bild 8. Verlauf der Stator- und Rotorströme über der Drehzahl

Typ	DASAA 5023	DASAA 5626-6U	DASAA 5025-4U	DAKAA 6328-6U	DASAE 6326-4WF	DASAA 6332-4U	DASAA 8034-6U
Leistung in kW	1 500	1 500	2 000	2 500	3 200	3 700	5 400
Spannung in V	690	690	690	660	3 300	3 300	950
Frequenz in Hz	50	50	50	50	50	50	50
Nennzahl in min ⁻¹	1 800	1 100	1 800	1 100	1 800	1 800	1 170
Drehzahlbereich in min ⁻¹	1 000... 2 000	700... 1 300	1 000... 2 000	700... 1 300	1 000... 2 000	1 000... 2 000	670... 1 330
Bauform	IM B3	IM B20	IM B3	IM B3	IM B20	IM B20	IM B3
Schutzart	IP54	IP54	IP54	IP54	IP54	IP54	IP54
Kühlart	IC 616 Luft-Luft	IC 616 Luft-Luft	IC 666 Luft-Luft	IC81W7 Luft-Wasser	IC9A6A7 Luft-Luft	IC9A6A7 Luft-Luft	IC616 Luft-Luft
Wärmeklasse	F	F	F	F	F	F	F

Tabelle 1. Typenangebot von 50-Hz-Windenergiegeneratoren



gegenphasig. Beide unterscheiden sich nur durch den Magnetisierungsstrom i_H in ihren Querkomponenten bzw. y -Anteilen. Eine Beeinflussung der statorseitigen Blindleistung ist somit durch eine Steuerung des Rotorstroms möglich. Entsprechend der Zeigeranordnung in Bild 5 ist zu erkennen, dass in erster Linie über die y -Komponente i_{Ry} bzw. den Blindanteil des Rotorstroms der Verschiebungsfaktor zwischen Statorspannung und -strom eingestellt werden kann. Die Beeinflussung der Wirkleistung hingegen geschieht über die Längskomponente des Rotorstroms i_{Rx} . Bei einer starren statorseitigen Netzankopplung kann trotz unterschiedlicher Strombelastungen im Besonderen bei Maschinen großer Leistung von einer annähernd konstanter Magnetisierung des Generators ausgegangen werden. Moderne Windenergieanlagen leisten einen Phasenschieberbetrieb von $-0,9 \text{ kap.} \dots -1 \dots -0,9 \text{ ind.}$ (Verbraucherzählpeilsystem). Der Blindleistungsbedarf für die Magnetisierung bei $\cos \varphi = -1$ kann bei Vorhandensein eines Netzfilters (Bild 2) von diesem geliefert werden.

Betriebsverhalten des Generators

Für einen 1,5-MW-Windenergiegenerator mit einer Rotorstillstandspannung von $U_{R0} = 1680 \text{ V}$ ist im Bild 6 als Beispiel der Verlauf der Rotorspannung über der Drehzahl dargestellt. Mit angegeben ist die vom Generator innerhalb des Drehzahlbereichs abzugebende Leistung.



Bild 9. Sechspolige Asynchrongeneratoren vom Typ DASAA 5025-6U

Bei 1700 min^{-1} wird die Bemessungsleistung der Anlage erreicht, die auch bei weiter steigender Drehzahl konstant gehalten werden soll. Da sich die über den Luftspalt zum Ständer übertragene Leistung P_s zur Schlupfleistung P_s reziprok zum Schlupf s verhält ($P_s/P_s = -1/s$), muss, wenn die Gesamtleistung (Summe von Ständer- und Schlupfleistung) konstant bleiben soll, der rotorseitige Stromrichter weiter aufgesteuert werden. Die statorseitig ins Netz

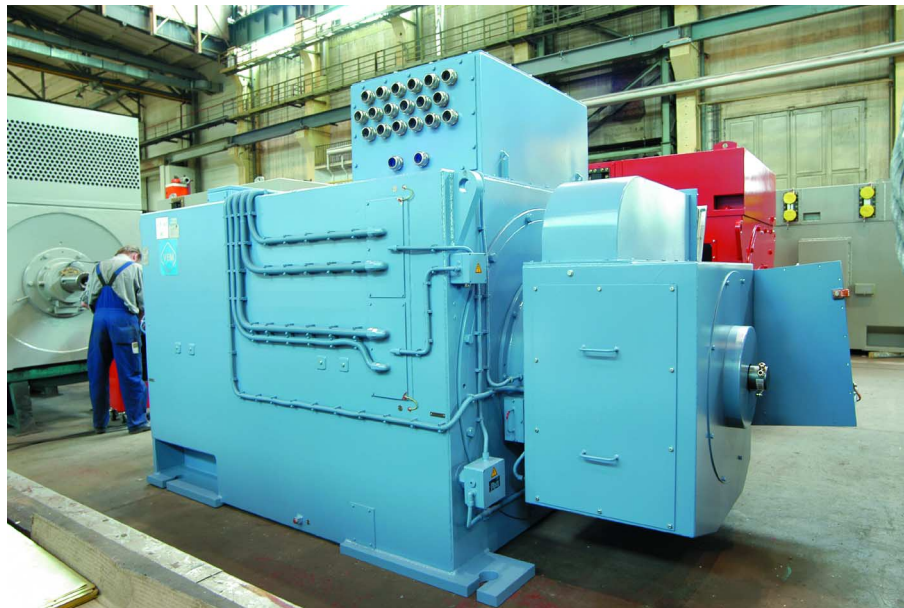


Bild 10. Doppelt gespeisender 5,4-MW-Asynchrongenerator Typ DASAA 8034-6U



Bild 11. Statorpaket mit speziell abgesteifter Wicklung eines 5,4-MW-Generators vom Typ DASAA 8034-6U

übertragene Leistung sinkt mit steigender Drehzahl, die rotorseitig übertragene Leistung steigt entsprechend an (Bild 7).

Ähnlich wie die Leistungen verhalten sich die Ströme des Stators, des Rotors und des gesamten Generators. Wird durch eine Turbinensteuerung (Pitchregelung) die Leistung ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit bzw. Drehzahl (in Bild 8 $n = 1700 \text{ min}^{-1}$) konstant gehalten, dann gehen bei einer weiteren Aufsteuerung des Umrichters und einer Erhöhung der

über 3 MW die Mittelspannungsebene vorzusehen. Dem stehen jedoch oft die Kosten einer Mittelspannungsanlage in einer Windturbine entgegen.

Bezüglich der Polzahl kommen vier- und sechspolige Maschinen in Betracht. Vierpolige Ausführungen ergeben bekanntermaßen kleinere Maschinenbaugrößen als sechspolige Ausführungen (Bild 9). Das spricht auf den ersten Blick für den Einsatz der niederpoligeren Generatoren in Windenergieanlagen. Inner-

halb einer Generatorbaureihe sind jedoch auch hier Grenzen für vierpolige Maschinen gesetzt.

Typenauswahl

Von der VEM Sachsenwerk GmbH [5] werden doppelt-speisende Drehstromasynchrongeneratoren im Leistungsbereich von 1 500 kW bis 5 400 kW gefertigt. Tabelle 1 zeigt das Typenangebot der bisher entwickelten und produzierten Generatoren [6]. Eine ähnliche Typenreihe existiert auch für 60-Hz-Generatoren.

Hinsichtlich Spannungsebene (Nieder- oder Mittelspannung) und Kühlart (Luft-Luft oder Luft-Wasser) wird weitestgehend auf Kundenwünsche eingegangen. Aus Sicht der Maschinenauslegung ist es hinsichtlich der Spannungsebene jedoch zweckmäßig, für Generatoren mit Leistungen

halb einer Generatorbaureihe sind jedoch auch hier Grenzen für vierpolige Maschinen gesetzt.

Mit dem einfachen Ansatz, dass die magnetische Induktion und die Strombeläge in etwa konstant bleiben, folgt als Wachstumsgesetz für elektrische Maschinen, dass das Volumen bzw. die Masse linear mit der Leistung der Maschinen und die Abmessungen l mit der dritten Wurzel der Leistung $l \sim \sqrt[3]{P}$ zunehmen.

Als Maß für die Maschinenbaugröße wird unter den Abmessungen im Allgemeinen die Achshöhe, mit der letztlich auch die Durchmesser der Blechpakete gegeben sind, gewählt. Wegen der mit der Achshöhe größer werdenden Umfangsgeschwindigkeit an den Schleifringen, den steigenden Reibungsverlusten und zunehmenden Geräuschen sowie den hohen geforderten Lagerlebensdauern erscheint es sinnvoll, bei vierpoligen Generatoren nicht über 710 mm Achshöhe hinaus zu gehen. Dies entspricht einer Generatorleistung von 4 MW bis 4,5 MW. Darüber hinaus ist wegen dieser zusätzlichen Randbedingungen sechspoligen Generatoren der Vorzug zu geben. Der mit 5,4 MW bisher leistungsstärkste Windenergiegenerator überhaupt, der in der eingangs genannten derzeit weltgrößten Windenergieanlage zum Einsatz gekommen ist, ist als sechspoliger doppelt-speisender Asynchrongenerator ausgeführt (Bild 10).

Unabhängig von diesen Überlegungen kann von Windenergieanlagenherstellern ohnehin ein sechspoliger Generator auch bei kleineren Leistungen gefordert werden, weil Windrad und Getriebe auf einen entsprechenden Drehzahlbereich optimiert sind. Für die 60-Hz-Windenergiegeneratorenreihe der VEM Sachsenwerk GmbH sind generell nur sechspolige Maschinen vorgesehen.

In Tabelle 2 sind die Leistungsmerkmale der doppelt-speisenden Windenergiegeneratoren zusammengefasst.

Die Wicklungen

Bezüglich der Fertigung bestehen bei Generatoren für Windenergieanlagen besondere Forderungen hinsichtlich der Lebensdauer des Isoliersystems, seiner Schaltspannungsfestigkeit und der Kurzschlussfestigkeit. Dies betrifft sowohl das Beherrschen der elektrischen Ausgleichsvorgänge als auch der mechanischen Belastungen. Letztere treten im Besonderen bei Kurzschlüssen und Netzstörungen auf. Die Wicklungen von Stator und Rotor müssen mechanisch so dimensioniert sein,

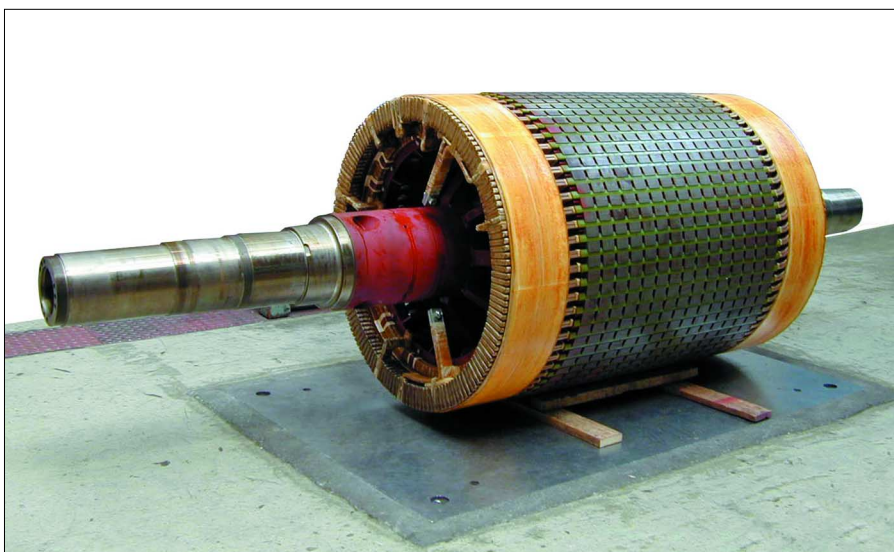


Bild 12. Läufer eines 5,4-MW-Generators, Typ DASAA 8034-6U



dass die enormen strombedingte Kräfte solcher Störfälle über die gesamte Maschinenlebensdauer sicher ausgehalten werden [7, 8].

Formspulenwicklungen und genau berechnete Bandagen sorgen dafür, dass die Stabilität der Wicklungen bei solchen Beanspruchungen gesichert ist (Bild 11). Aus elektrischer Sicht sind die Wicklungen selbstverständlich für die Impulsspannungsbeanspruchung beim Betrieb mit IGBT-Pulsumrichtern ausgelegt. Dabei sind die in der VEM Sachsenwerk GmbH vorhandenen jahrzehntelangen Erfahrungen beim Bau von Maschinen in der 6-kV- bzw. 10-kV-Spannungsebene eingeflossen. Ein über normales Niveau herausgehendes Qualitätsmerkmal sind hier beispielsweise die in den ZLM-Vorschriften (Zusätzliche Liefervereinbarungen für Hochspannungs-Elektromotoren in Kraftwerken [9]) fixierten Bestimmungen hinsichtlich der $\tan \delta$ -Grenzwerte als Maß für niedrigen Teilentladungspegel bei Wicklungen der Mittelspannungsebene, die für Windenergiegeneratoren mit Spannungen zwischen 3 kV und 6,6 kV übernommen wurden.

Wicklungen für Windenergiegeneratoren im Niederspannungsbereich werden analog den Mittelspannungswicklungen mit Folienglimmerisolierungen und VPI-Tränkung ausgeführt. Die Läuferwicklung der Generatoren (Bild 12) wird nach den gleichen Gesichtspunkten wie die Ständerwicklung ausgelegt. Mechanisch wirken als zusätzliche Beanspruchung die Fliehkräfte. Elektrisch ist die Wicklung zwar betriebsmäßig durch den verwendeten Umrichter nominell nur mit Niederspannung beaufschlagt, die bekannten Effekte der Spannungsüberhöhung an den Maschinenklemmen bei IGBT-Pulsumrichtern durch hohe Spannungssteilheiten der Pulse und Reflexion bei „langen“ Kabelstrecken führen aber durchaus zu Spannungswerten um 2 kV an der Läuferwicklung.

Läuferwicklung und Schleifring-Bürstenapparat sind daher isolationsmäßig entsprechend reichlich dimensioniert. Ein weiterer Gesichtspunkt bei der Dimensionierung des Läufers und seiner Wicklung ist die Wärmeabfuhr, denn der Läufer eines doppelt gespeisenden Asynchrongenerators wird thermisch höher belastet als der eines äquivalenten Schleifringläufermotors. Die Eigenschaften der Wicklungen von VEM-Generatoren lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Formspulenwicklung,
- Folienglimmerisolierung,
- VPI-Tränkung,

Baureihe	DAS ... bzw. DAK ... in Achshöhen 500 mm bis 800 mm
Leistungsbereich	1 500 kVA bis 6 000 kVA
Spannung	Niederspannung 660 V ... 950 V/50 Hz bzw. 575 V/60 Hz, Mittelspannung 3 kV ... 6,6 kV
Drehzahlen	700 min ⁻¹ ... 2 200 min ⁻¹ , weitere Drehzahlbereiche auf Anfrage
Kühlarten	IC616, IC666, IC967, IC81W7, entsprechend Konzept der Gesamtanlage
Merkmale	Ausführung nach den Normenreihen IEC 60072, DIN EN 60034 (VDE 0530), Generatoren für variable Drehzahl bei fester Statorfrequenz Bauformen IM B3 und IM B20 nach DIN/IEC, robuste, schwingungsarme Konstruktion, Schutzart IP 54, Wärmeklasse F, Isoliersystem Vemodur-VPI-155, Vakuum-Druckimprägnierung (VPI), energieökonomisch und umweltfreundlich, vielfältige Modifizierbarkeit

Tabelle 2. Zusammenfassung von Leistungsmerkmalen

- teilentladungsarm nach ZLM bei Mittelspannungsmaschinen (3 kV ... 6 kV),
- teilentladungsfrei bei Niederspannungsmaschinen,
- kurzschlussfest,
- seeklimatauglich,
- gute Wärmeabfuhrung.

Die Vakuum-Druck-Imprägnierung (VPI-Verfahren)

Die zum Einsatz kommende Methode für die Harz-Imprägnierung ist das VPI-Verfahren (Vacuum-Pressure-Impregnation). Dies bedeutet, dass die Objekte im Vakuum getränkt werden und dann in einem Umluftofen das Harz zur Härtung gebracht wird. Die Wicklungen der Maschinen werden selbst für niedrige Umrichterspannungen grundsätzlich in VPI-Technik ausgeführt.

Während des Tränkprozesses werden die Komponenten Viskosität des Harzes, Tränk- und Härtetemperatur, Druckhaltezeiten, Unter- und Überdruck und Durchimprägnierung überprüft und dokumentiert. Die Aushärtung der Isolierung erfolgt dabei rotierend. Die Vakuum-Druck-Imprägnierung in Verbindung mit Formspulenwicklungen garantieren eine hohe mechanische Festigkeit, besonders der Wickelkopfsteifigkeit, hohe Alterungsbeständigkeit und thermische Überlastbarkeit sowie Unempfindlichkeit gegenüber den bei der Umrichterspeisung auftretenden Impulsspannungen. Es werden Bemessungsstoßspannungen nach DIN EN 60034-15 (VDE 0530-15):1996-08 [10] garantiert.

Der Bedarf wird wachsen

Trotz eines seit dem ersten Halbjahr 2003 festzustellenden Rückgangs der installierten Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland existiert wegen der

wachsenden Typenleistung von Neuanlagen und des Repowerings in Verbindung mit einer Leistungsaufstockung ein großer Bedarf an Generatoren im Megawattbereich. Im Besonderen wird die geplante Serienfertigung der vorab genannten Repower 5M ab dem Jahr 2006 für den Onshore-Bereich und angekündigte größere Stückzahlen für den Offshore-Einsatz ab dem Jahr 2007 zu einer weiteren Belebung des Markts für Generatoren jenseits der 4-MW-Marke führen [2].

Literatur

- [1] Repower systems AG, Hamburg: www.repower.de
- [2] Schaffeld, T.: Repower errichtet die erste 5M. Erneuerbare Energien 14 (2004) H. 11, S. 22–24 (ISSN 0946-7556)
- [3] Heier, S.: Windkraftanlage: Systemauslegung, Netzintegration und Regelung. Stuttgart: Teubner, 2005 (ISBN 3-519-36171-X)
- [4] Vogel, J.; Riefenstahl, U.; Schauer, W.: Elektrische Antriebstechnik. Heidelberg: Hüthig, 1998 (ISBN 3-7785-2649-9)
- [5] VEMSachsenwerk GmbH, Dresden: www.vem-group.com
- [6] Windkraft: Generatoren für Windkraftanlagen. Druckschrift. Dresden: VEM-Sachsenwerk GmbH, 2002 (Online-Dokument im Internet unter www.vem-group.com/mediadb/pdf/windkraft.pdf)
- [7] DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1):2005-04 Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [8] DIN EN 60034-7 (VDE 0530-7):2001-12 Drehende elektrische Maschinen – Teil 7: Klassifizierung für Bauarten, der Aufstellungsarten und der Klemmkasten-Lage (IM-Code). Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [9] ZLM – zusätzliche Liefervereinbarungen für Hochspannungs-Elektromotoren in Kraftwerken. Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke – VDEW – e. V. (Hrsg.). Frankfurt/M: VDEW, 1995 (ISBN 3-8022-0445-X)
- [10] DIN EN 60034-15 (VDE 0530-15):1996-08 Drehende elektrische Maschinen – Teil 15: Bemessungsstoßspannungen drehender Wechselstrommaschinen mit Formspulen im Ständer. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG