

NEUARTIGES GENERATORSYSTEM FÜR WINDKRAFTANLAGEN

Einführung. Erneuerbare Energien sind umweltschonende und nahezu unerschöpfliche Energiequellen und sind unverzichtbar bei der zukünftigen Energieversorgung. Für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ist die Windenergie mit ca. 45% Anteil in Deutschland (Stand: 2007, [1]) von großer Bedeutung. Dabei liegt der Trend unter den Windkraftanlagen-Herstellern eindeutig bei den drehzahlvariablen Generatorsystemen, was ein leistungselektronisches Stellglied zur Anpassung der Systemparameter voraussetzt. Dabei kommt überwiegend der Frequenzumrichter mit Gleichspannungszwischenkreis (U-Umrichter) zum Einsatz. Zur Einprägung der Gleichspannung U_{DC} enthält der U-Umrichter im Zwischenkreis einen Kondensator als Speicherelement. Der aufwendige Zwischenkreiskondensator wird allerdings oft als Hauptnachteil dieses Umrichters angesehen, da er viel Raum beansprucht und sich negativ auf die Zuverlässigkeit des Umrichters auswirkt. Eine Alternative dazu kann der so genannte Zweistufige Direktumrichter (ZDU) sein, vgl. Bild 1. Obwohl seine Topologie mehr Halbleiterbauelemente aufweist, zeigt er trotzdem eine vergleichbare Effizienz gegenüber dem U-Umrichter [2].

Das Generatorsystem einer Windkraftanlage (WKA) bestehend aus Frequenzumrichter, Generator und ggf. Getriebe sowie Kupplung ist das Kernstück einer Windkraftanlage, das die Umwandlung mechanischer in elektrische Energie durchführt. Mit bis zu ca. 28% sind diese Komponente der zweitgrößte Teil des Gesamtpreises einer Windkraftanlage. Es ist deswegen unerlässlich in diesem Bereich weitere Forschungsarbeiten durchzuführen mit dem Ziel der Kostensenkung, der Ertragssteigerung und der Sicherstellung einer hohen Verfügbarkeit der Anlagen [3].

Zurzeit werden folgende Konzepte der WKA auf dem Markt angeboten:

1. *Getriebeloses Generatorsystem* mit einem vielpoligen Synchrongenerator
 „+“ kein Getriebe
 „-“ Vollumrichter erforderlich; hohes Gondelgewicht (>500 t bei 4,5 MW-Anlage)
2. *Getriebehaftetes Generatorsystem* mit einer schnell drehenden doppeltgespeisten Asynchronmaschine
 „+“ kleiner Umrichter
 „-“ wartungsintensive Schleifringe; Getriebegewicht zu hoch
3. *Getriebehaftetes Generatorsystem* mit einem langsam drehenden Permanentmagnet-Synchrongenerator
 „+“ keine Schleifringe, kleines langsamdrehendes einstufiges Getriebe
 „-“ Vollumrichter mit Zwischenkreiskondensatoren

Ein neues Generatorsystem bestehend aus einer wartungsfreien Bürstenlosen Doppeltgespeisten Maschinenkaskade (DMK) und einem Zweistufigen Direktumrichter (vgl. Bild 1), das in diesem Beitrag vorgestellt wird, vereint alle Vorteile der beiden letzten obenerwähnten Generatorkonzepte.

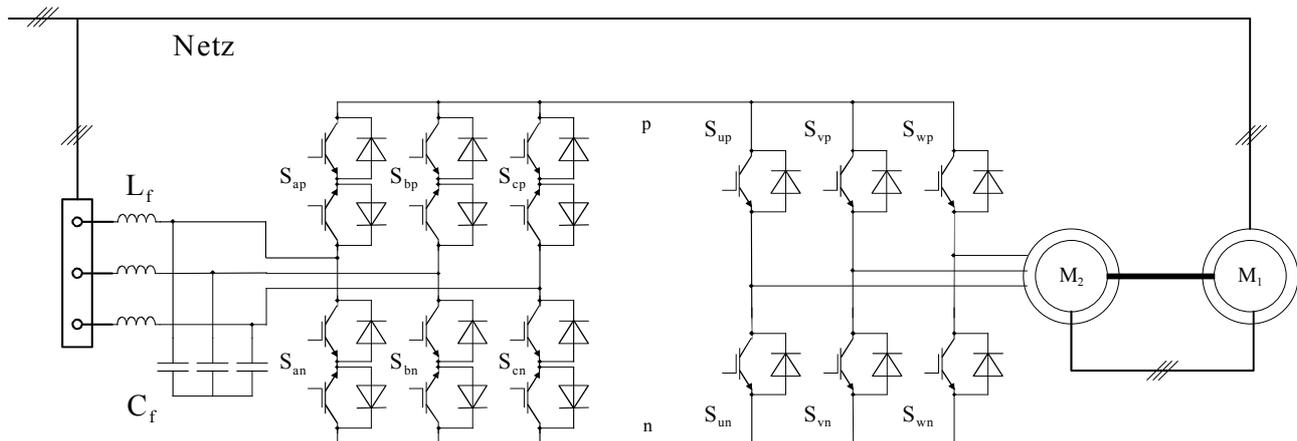


Bild 1: Zweistufige Direktumrichter mit Doppeltgespeisten Maschinenkaskade

Zielsetzung der Forschung. Es soll ein neuartiges Generatorsystem mit erhöhter Zuverlässigkeit und niedrigem Gewicht, was besonders im Off-Shore-Bereich vorteilhaft ist, vorgestellt werden. Für dieses System soll darüber hinaus eine stabile Drehmomentenregelung aufgebaut werden.

Untersuchungsmaterialien. Zwei Schleifringläufermaschinen, die auf einer gemeinsamen Welle montiert sind und deren beiden Rotorwicklungen miteinander verbunden sind (ggf. schleifringlos), bezeichnet man als Doppeltgespeiste Maschinenkaskade. Der Ständer einer Maschine (Vordermaschine, M_1) wird mit dem Netz verbunden. Der Ständer der zweiten Maschine (Hintermaschine, M_2) wird dagegen über den Frequenzumrichter (ZDU) gespeist. Beide Ständerpakete können in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht werden. Für den Aufbau der Kaskade wurden die

gleichen Asynchronmaschinen genommen. Die Daten der Maschinen sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Die mechanische Leistung einer Windturbine ist eine Funktion der Windgeschwindigkeit und der Drehzahl des Windrotors. Die Arbeitspunkte der maximalen mechanischen Leistung liegen auf einer kubischen Parabel [4], d. h. $P_{\max} \sim n^3$. Sogar ein schmaler Drehzahlstellbereich führt bei dieser Charakteristik zu einer „breiten“ Leistungsregelung. Dementsprechend klein fällt auch das Stellglied aus, da es nur für die Schlupfleistung dimensioniert wird.

Das Grundwellenmodell der DMK wird mit folgenden Gleichungen beschrieben [5]:

$$\dot{i}_{S1}(s) = \frac{1}{R_{S1} \cdot (1 + s T_{S1})} (u_{S1} - s L_{SR1} \dot{i}_R + j \dot{\gamma}_{S1} (L_{SS1} \dot{i}_{S1} + L_{SR1} \dot{i}_R)) \quad (1)$$

$$\dot{i}_{S2}(s) = \frac{1}{R_{S2} \cdot (1 + s T_{S2})} (u_{S2} - s L_{SR2} \dot{i}_R + j \dot{\gamma}_{S2} (L_{SS2} \dot{i}_{S2} + L_{SR2} \dot{i}_R)) \quad (2)$$

$$\dot{i}_R(s) = \frac{1}{R_R \cdot (1 + s T_R)} (s L_{SR2} \dot{i}_{S2} - s L_{SR1} \dot{i}_{S1} + j \dot{\gamma}_R (L_{RR} \dot{i}_R + L_{SR1} \dot{i}_{S1} - L_{SR2} \dot{i}_{S2})) \quad (3)$$

$$m_G(s) = \text{Im} \left\{ (z_{P1} L_{S1h} \dot{i}_{S1} + z_{P2} L_{S2h} \dot{i}_{S2}) \cdot \dot{i}_R^* \right\} \quad (4)$$

Das Modell der DMK wurde in Matlab/Simulink implementiert. Das Koordinatensystem wird am Netzspannungsraumzeiger orientiert. Dadurch kann das Drehmoment durch die Stromlängskomponente der Hintermaschine eingestellt [5]. Der ZDU wurde mit der Toolbox Plecs nachgebildet. Für die Kommutierung des Gleichrichters im ZDU wurde „Zero Current Switching“-Kommutierung verwendet [2]. Die Steueralgorithmen wurden in Simulink in einer S-Funktion implementiert. Nachfolgend werden einige ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 1: Daten der ASM

$P_N = 5500$	W
$I_N = 11,5$	A
$U_N = 400$	V
$f_N = 50$	Hz
$n_N = 1450$	U/min
$\cos \varphi = 0,76$	-

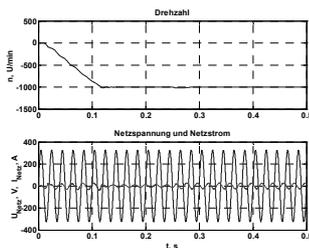


Bild 2: Drehzahlhochlauf sowie Netzspannung und Strom in der Phase a

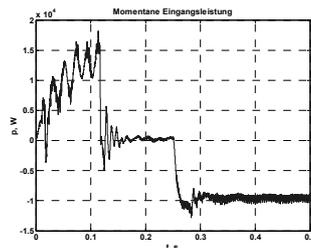


Bild 3: Momentane Eingangsleistung

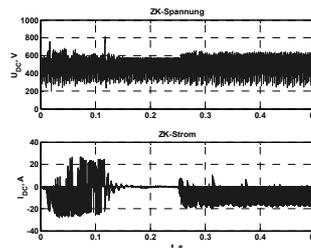


Bild 4: Zwischenkreisspannung und Zwischenkreisstrom

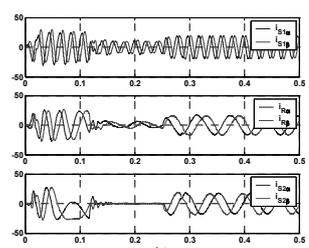


Bild 5: Maschinenströme im jeweiligen Koordinatensystem

Der Generator wird zuerst auf die Drehzahl von 1000 U/min gebracht, die über der sogenannten natürlichen Drehzahl $n_{nat} = f_N / (z_{P1} + z_{P2}) = 750$ U/min liegt, vgl. Bild 2. Im gleichen Bild ist auch die Netzspannung sowie der Strom der Vordermaschine in der Phase a dargestellt. Bei $t = 0,25$ s wird ein generatorisches Moment angelegt so, dass die elektrische Leistung ins Netz gespeist wird. Die Leistung ändert ihr Vorzeichen, vgl. Bild 3. Die Form der Zwischenkreisspannung ist im Bild 4 dargestellt. Während des Hochlaufs ändert der Zwischenkreisstrom sein Vorzeichen, sobald die natürliche Drehzahl überschritten wird. Bild 5 zeigt alle Motorströme im jeweiligen Koordinatensystem. Bei steigender Drehzahl sinkt die Frequenz der Statorströme der Hintermaschine und bei $n = n_{nat}$ wird die Frequenz null. Mit weiter steigender Drehzahl wechselt der Stromzeiger seine Drehrichtung.

Schlussfolgerung. Es wurde ein neuartiges Generatorsystem vorgestellt. Diese einmalige Kombination von Umrichter und Generator erlaubt eine dynamische Drehmomentenregelung bei kleiner installierter Umrichterleistung und gleichzeitigem Verzicht auf das Schleifringssystem und voluminösen sowie anfälligen Zwischenkreiskondensator.

Literaturverzeichnis.

1. Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2007. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Juni 2008
2. Tyshakin, O., Riefenstahl, U.: Frequenzumrichter für die modernen Drehstromantriebe: simulativer Vergleich der Halbleiterverluste. Problems of Automated Electrodrives, Theory and Applications, 2007
3. BMU-Themenpapier: Windenergie, Artikel-Nr. 2123, September 2006
4. Seifert, D., "The back-to-back converter", MThesis; Lund Institute of Technology; Lund, Sweden; 1998
5. Kroitzsch, J., Die Bürstenlose Doppelgespeiste Induktionsmaschine als Generator in dezentralen Elektroenergieerzeugungsanlagen, Diss., 2006