

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 94 (2003)

Heft: 7

Artikel: Umrichter für Windenergieanlagen hoher Leistungen

Autor: Blaser, Monika

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857536>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Umrichter für Windenergieanlagen hoher Leistungen

Windstrom ist eine erneuerbare, kostengünstige, CO₂-neutrale und vom Prinzip her einfache Energiequelle [1]. Je höher aber die Anforderungen bezüglich Verfügbarkeit und Leistung steigen, desto komplizierter wird eine Anlage. Die Firma Technocon AG in Zürich und Basel entwickelte einen 800-kW-Umrichter für die Windenergieanlage auf dem Gütsch in Andermatt. Der folgende Artikel beschreibt den Aufbau der modernsten Windenergieanlagen und speziell den eingesetzten Umrichter.

Der Windmarkt boomt. In Deutschland beispielsweise wurde im Jahr 2002 schon rund 4,7% des gesamten Netto-Stromverbrauchs durch Strom aus Windenergie gedeckt. Weltweit war Ende letzten Jahres eine Windkraft-Leistung von über 30000

Monika Blaser

MW installiert, davon über 20000 MW in Europa – 12000 MW allein in Deutschland. Neue Studien gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2010 in Europa eine Windkraft-Leistung von 60000 MW installiert sein wird [2]. Der Windmarkt beschäftigt in Deutschland rund 40000 Menschen. Auch in der Schweiz, wo eine ganze Menge kleiner und mittlerer Unterneh-

men in zukunftsträchtigen High-Tech-Bereichen tätig sind, ist diese Entwicklung für die Schaffung neuer, qualifizierter Arbeitsplätze von Bedeutung.

Windenergieanlagen mit Asynchrongeneratoren zur Erzeugung des Windstroms

Zu Beginn der Windenergie-Ära, zur Zeit, als die dänischen Anlagen errichtet wurden, wurde auf Leistungselektronik verzichtet. Dieses sogenannte dänische Konzept (Bild 1) verbindet den Kurzschlussläufer-Asynchronmotor starr mit dem Mittelspannungsnetz, wobei die Windturbine drehzahlgesteuert über ein Mehrstufigengetriebe auf die 50 oder 60 Hz des Generators bzw. der Netzfrequenz angepasst wird. Solche Windenergieanlagen sind recht einfach und günstig herzustellen. Die Windturbinen die-

ser Anlagen drehen nur mit einer bestimmten Drehzahl und können nicht die gesamte zur Verfügung stehende Windenergie zur Stromerzeugung nutzen. Deshalb werden viele Generatoren polumschaltbar ausgeführt, damit in Abhängigkeit von der Windstärke mit zwei unterschiedlichen Drehzahlen gearbeitet werden kann.

Zur Verbesserung des dänischen Konzepts wurden doppelt gespeiste Asynchronmotoren eingesetzt (Bild 2). Bei diesem Konzept ist der Stator direkt mit dem Netz verbunden. Der Rotor wird als Schleifringläufer ausgeführt und über einen leistungselektronischen Umrichter ans Netz angeschlossen. Dabei wird der Asynchronmotor durch Leistungsübertragung (positive oder negative Schlupfleistung) über den Rotorkreis je nach Windverhältnissen im unter- oder übersynchronisierten Betrieb betrieben. Die Windenergieanlage kann so mit variabler Drehzahl betrieben werden. Der Drehzahlbereich ist von der Leistung des eingesetzten Umrichters eingeschränkt, der typischerweise für 30% bis 40% der Generatorenleistung ausgelegt ist, was einen Betrieb von etwa 50% bis 100% der Nenndrehzahl ermöglicht. Dadurch kann ein grösserer Teil der zur Verfügung stehenden Windenergie zur Stromerzeugung genutzt werden.

Beide Konzepte müssen auf Grund des verwendeten Asynchronmotors ein Getriebe einsetzen. Die Erfahrung zeigt, dass in einer Windenergieanlage das Getriebe eine kritische Komponente ist, die durch den starken Verschleiss häufig gewartet und ausgetauscht werden muss.

Mit dem Verzicht auf ein Getriebe erhöht sich die Funktionszuverlässigkeit erheblich, wie die Erfahrungen der instal-

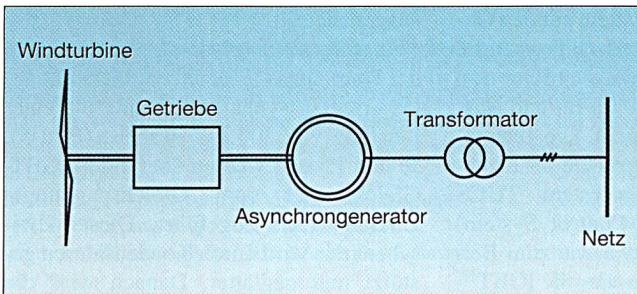
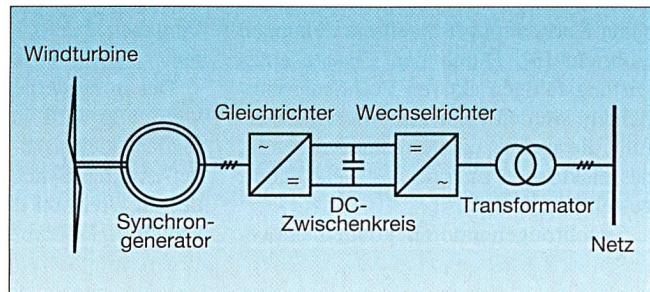
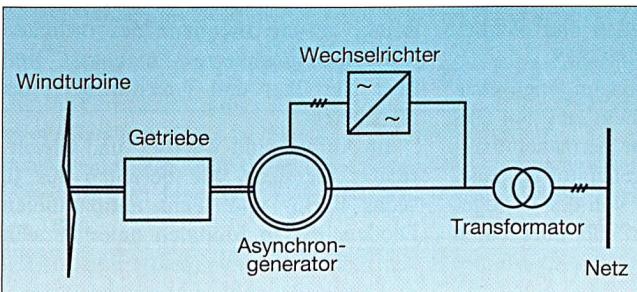


Bild 1 (links) Dänisches Konzept – Bild 2 (unten links) Konzept mit doppeltgespeistem Asynchronmotor – Bild 3 (unten) Konzept mit Synchronmotor



lierten Anlagen heute bestätigen. Insbesondere im Hinblick auf Offshore-Anlagen (vor den Küsten im Meer) muss versucht werden, auf wartungsintensive Komponenten zu verzichten. Die Beschädigungsgefahr durch Böen wird eliminiert. Außerdem entfällt der unerwünschte Getriebelärm.

Moderne Windenergieanlagen mit hohem Ausnutzungsfaktor

Für getriebelose Windenergieanlagen kommen bis jetzt nur Synchronmaschinen in Frage, da nur bei diesen eine genügend hohe Polzahl zur Anpassung an die sehr geringen Drehzahlen der Windturbine (<20 U/min) realisiert werden kann. Hochpolige Synchrongeneratoren arbeiten somit ohne Getriebe und deshalb weit gehend ölfrei, was den Serviceaufwand verkleinert und die Lebenserwartung erhöht. Der Synchrongenerator erreicht ein hohes Drehmoment und einen guten Wirkungsgrad. Er kann aber nicht direkt mit dem Netz verbunden werden, da die Generatorfrequenz der Drehzahl der Windturbine entspricht.

Um die Generatorfrequenz der Netzfrequenz anzupassen, wird ein Umrichter eingesetzt (Bild 3). Der Umrichter besteht aus einem Gleichrichter, der über einen Gleichspannungszwischenkreis mit einem Wechselrichter die erzeugte Windleistung ins Drehzahlnetz einspeist. Somit werden nicht nur Windböen oder starke Leistungsschwankungen aufgefangen, sondern es wird auch ein Full-Scale-Drehzahlbereich gewährleistet, welcher erlaubt, die Windanlagen auch bei Teillast in der Nähe ihres Leistungsoptimums zu betreiben. Das getriebelose Konzept erlaubt somit, neben niedrigerem Service-Aufwand auch einen höheren Nutzungsfaktor zu erreichen.

Um einen zuverlässigen und wirtschaftlichen Betrieb aufrecht zu erhalten, stellen die Netzbetreiber an die Windenergieanlagen zusätzliche Forderungen hinsichtlich der Blindleistungsregelung sowie der Spannungs- und Frequenzstabilität. Windenergieanlagen sollen auch dann noch Energie ins Stromnetz speisen können, wenn die Netzzspannung durch einen Kurzschluss für mehrere Sekunden einbricht [3]. Durch den Einsatz eines leistungsfähigen aktiven Full-Scale-Umrichters werden diese Anforderungen erfüllt, die auch an ein normales Kraftwerk, das elektrische Energie ans Netz liefert, gestellt werden [4].

Synchrongeneratoren können entweder mittels Elektro- oder mittels Permanentmagneten erregt werden. Der grosse



Bild 4 Moderne 800-kW-Windenergieanlage bei Güttsch oberhalb von Andermatt

Vorteil von permanentmagnet-erregten Maschinen sind ihre bis zu 45% geringeren Verluste gegenüber herkömmlichen Asynchronmaschinen oder elektrisch erregten Synchronmaschinen [5]. Eine 800-kW-Anlage mit permanentmagnet-erregtem Synchrongenerator wurde letztes Jahr für das Elektrizitätswerk Ursen auf 2332 mü.M. installiert (Bild 4). Der Permanentmagnet-Generator arbeitet auch bei Teillast mit hohem Wirkungsgrad und weist auch bei mässigen Windverhältnissen noch immer eine hohe Effizienz auf. Von der Anlage wird eine Jahresausbeute von 1,5 GWh erwartet.

Umrichtertechnik der Technocon AG

Der Bau eines Full-Scale-Umrichters stellt hohe Anforderungen. Die 1995 im Technopark in Zürich gegründete Ingenieurunternehmung Technocon AG hat von Anfang an Windenergie-Projekte realisiert, hat sich aber vor allem auf den Gebieten der Leistungselektronik und der Prozessautomation – meist abseits von Standardanwendungen – im In- und Ausland einen Namen gemacht. Die Technocon AG setzt für ihre Projekte ihr eigenentwickeltes Regelungssystem TUCS (Technocon Universal Control System) ein. Andere Komponenten wie zum Beispiel die Schaltschränke oder die IGBT¹⁾- oder GTO²⁾-Module lässt sie nach ihren Vorgaben extern herstellen und montieren.

Der in modernen Anlagen eingesetzte Umrichter wird von einem langsam laufenden, elektrisch- oder permanentmagnet-erregten Synchrongenerator gespeist, dessen Drehzahl direkt von der Windgeschwindigkeit abhängt und über einen Frequenzumrichter und Transformator mit dem Netz verbunden ist. Sowohl auf

der Generator- wie auch auf der Netzseite besteht der Umrichter aus IGBT-Leistungsschaltern, die für eine Spannung von 690 V_{AC} ausgelegt sind. Die IGBT-Stromrichter haben eine konventionelle 2-Punkt-Schaltung. Dreiphasige Umrichter vermögen zur Zeit eine Leistung bis zu 0,8 MVA umzusetzen. Bei höheren Spannungen bis ca. 3,5 kV kommen GTO-Leistungsschalter zum Zuge. GTO-Stromrichter haben eine 3-Punkt-Schaltung und können eine Leistung bis 5 MVA bei einem 3-phägigen Umrichter übertragen. Höhere Leistungen und Spannungen sind mit beiden Leistungsschaltern möglich, da die einzelnen Leistungsmodulen parallel oder seriell kunden-spezifisch kombiniert werden können. Normalerweise werden die Module luftgekühlt, doch ist auch eine Kühlung mit Brauchwasser möglich. Bei einem elektrisch erregten Generator wird der Umrichter zusätzlich mit einem IGBT-Chopper für die Erzeugung des Erregerstromes ausgerüstet.

In Güttsch oberhalb Andermatt wird der Umrichter von einem permanentmagnet-erregten Synchrongenerator mit einer Leistung von 800 kW gespeist (Bild 5). Je drei Phasen werden über einen IGBT-Gleichrichter dem Gleichspannungszwischenkreis zugeführt. Dieser Zwischenkreis wird durch Kondensatoren gestützt und geglättet. Danach wird die Spannungsfrequenz durch den Wechselrichter an die Frequenz des örtlichen Mittelspannungsnetzes angepasst und über Netzfilter und Transformator ans Netz gelegt.

Im Aufbau sind Wechsel- und Gleichrichter identisch. Sie bestehen aus je sechs IGBT- und sechs antiparallelen Dioden, die in Modulen untergebracht sind. Ein Modul beinhaltet zwei IGBT und zwei antiparallele Dioden. Die Takt-

frequenz der IGBT-Leistungsschalter wird nicht durch ein klassisches Pulsweitenmodulationsverfahren festgelegt, sondern durch eine Toleranzbandregelung bestimmt. Diese Regelung gibt den Umrichterausgangsströmen und den Generatorströmen je ein sinusförmiges Toleranzband vor, in dem die jeweiligen Ströme immer gehalten werden. Die Toleranzbänder werden durch die Stromsollwerte und je eine untere und obere Grenze gebildet. Dadurch werden unerwünschte Oberschwingungen weitgehend vermieden. Bei Bedarf kann das Toleranzband nicht nur rein sinusförmig vorgegeben, sondern auch je nach Spezifikation angepasst werden.

Die Technocon-Umrichter sind auf gute Netzeigenschaften hin ausgelegt – keine Flicker und nur geringe Oberschwingungen. Die Umrichter werden kundenspezifisch auf einen Anlagentyp angepasst und weisen für Windenergie-Anlagen Leistungen bis zu 5 MW auf. Sie haben den harten Anforderungen von Offshore-Anlagen zu entsprechen, müssen aber auch sehr kompakt gebaut sein, da der Platz in der Gondel³⁾ oder im Turmfuss beschränkt ist.

Da die Stromrichter modular konzipiert sind, können sie in verschiedenen Gebieten wie in der Industrie, Stromversorgung und Forschung eingesetzt werden. So werden sie nicht nur für Windenergieanlagen eingesetzt, sondern auch für spezielle Anwendungen bei Bahnnetzen, Dreiphasennetzen, Maschinen oder Generatoren. Erfolgreiche Anwendungen auch außerhalb des Windmarkts bei internationalen Kunden wie ABB, ADranz, VA Tech ELIN oder Lagerwey

bestätigen die hervorragende Technik und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten.

Regelungstechnik

Das Regelungssystem wird im Umrichterschrank eingebaut; es synchronisiert den Umrichter an das vorhandene Netz (50 oder 60 Hz). Das mit TUCS, dem *Technocon Universal Control System* implementierte System ist modular aufgebaut, verfügt über eine hohe Rechenleistung und kann mit allen verbreiteten Feldbussen und über Internet kommunizieren (Bild 6).

Der Controller basiert auf einer Motorola-Prozessorkarte (mit einem 68040-Prozessor) und dem multitaskingfähigen Echtzeit-Betriebssystem OS-9. Programmiert wurde die Regelung in C. Durch das Software Paket *tucsView* können Daten aufgezeichnet und auf einem Hostrechner visualisiert werden. Die Kommunikation über Ethernet-Netzwerke wird durch die Software *TUCSnet* realisiert. Da TUCS für Anwendungen in der Leistungselektronik entwickelt wurde und daher hohen Anforderungen genügen muss, können damit auch Applikationen aus anderen Anwendungsbereichen optimal gelöst werden.

Weiterentwicklung der Umrichter und Regelung

Um den Anforderungen an die immer grösser werdenden Windenergieanlagen mit immer höheren Leistungen gerecht zu werden, werden die Umrichter weiter entwickelt. Den neuesten Stand bei der Technocon verkörpern 3-phägige Umrichter mit IGBT-Leistungsschalter für eine Leistung bis 1,5 MW, welche die gleichen Abmessungen wie die 800-kW-Umrichter haben. Gleichzeitig wird an der Weiterentwicklung des Steuer- und Regelsystems TUCS gearbeitet. Es soll durch den Einsatz von PowerPC-Prozes-

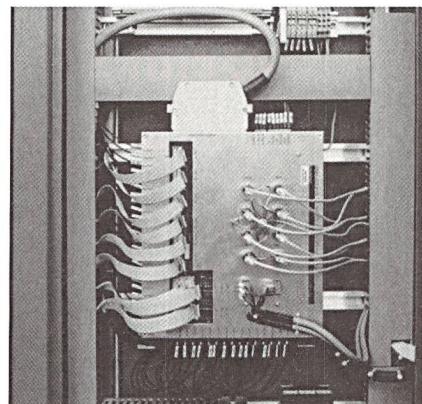


Bild 6 TU CS regelt den Umrichter

soren mit einer höheren Rechenleistung und erweiterten Diagnosefunktionen ausgerüstet werden. In Zukunft soll die Regelung nicht nur die Regelung des Umrichters, sondern die der kompletten Windanlagen übernehmen.

Referenzen

- [1] R. Horbaty: Boom der Windenergie in Europa. Bulletin SEV/VSE 10/2002, S. 29ff
- [2] Bundesverband WindEnergie e.V.: Erneutes Rekordjahr für die Windbranche – 12000 Megawatt überschritten. Pressemitteilung vom 22.01.03, <http://www.wind-energie.de/>
- [3] E.ON Netz GmbH: Ergänzende Netzanschlussregeln für Windenergieanlagen. Stand: 01.12.01
- [4] N. Hennschen: Am Netz bleiben, wenn die Spannung einbricht. Erneuerbare Energien 9/2002.
- [5] M. Kaufhold, A. Jöckel: Permanenterregte Grossmaschinen: Potenziale in der Oberklasse. etz Heft 20/2002, S. 8ff

Angaben zur Autorin

Dipl. El. Ing. FH **Monika Blaser** arbeitet bei der Technocon AG, CH-4053 Basel, und ist seit 2002 Leiterin der Gruppe «Erneuerbare Energien». Weitere Auskünfte unter www.technocon.ch und Technocon AG, Dornacherstrasse 210, 4053 Basel.
Kontakt: blaser@technocon.ch, www.technocon.ch

¹ IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

² GTO: Gate Turn Off Thyristor

³ Gondel: Allgemein üblicher Begriff in der Windtechnologie für das drehbare Maschinenhaus auf dem Turm.

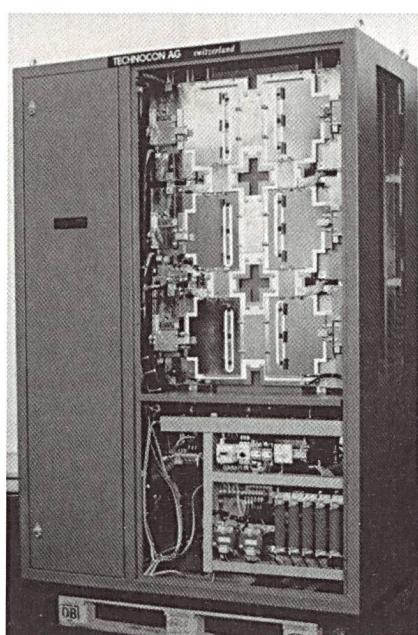


Bild 5 800-kW-Umrichterschrank

Un onduleur pour installations éoliennes de haute puissance

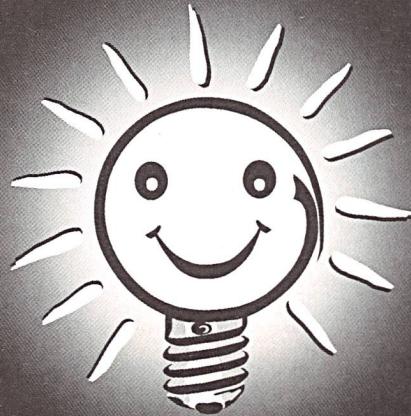
Le courant électrique éolien est une source d'énergie renouvelable, économique, exempte de CO₂ et simple du point de vue du principe. Mais plus les exigences de disponibilité et de puissance augmentent, plus l'installation devient complexe. La société Technocon AG à Zurich et à Bâle a développé un onduleur de 800 kW pour l'installation éolienne située sur le Güttsch à Andermatt. L'article décrit la construction des installations éoliennes les plus modernes et en particulier l'onduleur utilisé.

Wenn's drauf ankommt:
Unterbrechungsfreie Stromversorgungen

SICON SOCOMECH AG
Industriestrasse 17
CH - 4415 Lausen
Tel. 061 - 921 33 00
Fax 061 - 921 33 11
usv@sicon-socomec.ch

SOCOMECH
SICON
www.sicon-socomec.ch

Damit Ihre Sicherheit gewährleistet ist.



Innovativ in Technik und Design

ALMAT®
Notlichtsysteme

ALMAT AG • 8317 Tagelswangen
Tel. 052 355 33 55 • Fax 052 355 33 66 • www.almat.ch

Der Leitfaden für Lebensretter.

ERSTE-HILFE-TAFEL

TSM®

Bei Unfällen mit Herzstillstand entscheidet der Zeitfaktor über Leben und Tod. Die neue Erste-Hilfe-Tafel zeigt, wie Sie schnell und richtig handeln.

Electrosuisse, Verkauf
Luppenstrasse 1
8320 Fehraltorf

Telefon 01 956 14 05 oder 01 956 13 64
www.electrosuisse.ch
E-Mail: verkauf@electrosuisse.ch

electrosuisse >