



## Effizienzsteigerung bei, sowie Steuerung und Schutz von modernen Windkraftanlagen

### Anwendungen

- **Rotorblattverstellung sowie Windnachführung der Gondel**
  - Stromregelung in den elektrischen Antrieben mit geringer Leistung
- **Doppelt-gespeister Asynchrongenerator**
  - Genaue und schnelle Stromerfassung in puls-gesteuerten IGBT-Wechselrichtern zur Leistungsübertragung in das Verbundnetz
  - Kurzschlusschutz der Leistungshalbleiter in den Umrichtern
- **Synchrongenerator**
  - Stromregelung in den puls-gesteuerten Umrichtern (Gleich- und Wechselrichter) zur Leistungsübertragung in das Verbundnetz
  - Kurzschlusschutz der Leistungshalbleiter in den Umrichtern

### Eigenschaften

- Bipolare DC- sowie AC-Strommessung von 50 bis 2000 Aeff
- Bipolare Spannungsversorgung von 12 bis 24 V (abhängig vom Wandlertyp)
- Ansprechzeit bei 90 % von  $I_{PN}$  kürzer als 1  $\mu$ s
- Hohe Bandbreite von DC bis zu einigen hundert kHz
- Genaues (Strom-) Ausgangssignal ( $\pm 0.3$  bis 0.65 % typisch bezogen auf  $I_{PN}$  bei +25°C)
- Galvanische Trennung
- Verschiedene kompakte Baugrößen mit einer Vielzahl von Einbaumöglichkeiten (mechanisch oder auf Platine)
- Vergossene Varianten für raue Umgebungsbedingungen
- Gutes Gleichtaktverhalten
- Gemäss EN 50178
- CE-Kennzeichnung
- 5 Jahre Herstellergarantie

Nachdem lange Zeit hauptsächlich fossile Brennstoffe zur Stromerzeugung favorisiert wurden, setzt durch die Diskussion über die Nachhaltigkeit der Entwicklung sowie der Vermeidung von Treibhausgasen und der beschlossenen Reduzierung des bei der Verbrennung entstehenden Kohlendioxid, ein Umdenken hin zur Nutzung regenerativer Energieformen ein.

Der Bau von modernen Windkraftanlagen mit Leistungen bis 5 MW (derzeit in der Erprobungsphase) ist nur möglich durch die Nutzung moderner Werkstoffe, um den mechanischen Anforderungen gerecht zu werden, sowie moderner Steuerungs- und Leistungselektronik, um aus einer solchen Windkraftanlage stets effizient den Strom ins Verbundnetz einzuspeisen. Unverzichtbarer Bestandteil der in den verschiedenen, in einer Windkraftanlage vorhandenen Umrichter sind Stromwandler in unterschiedlichen Größen, um die Umrichter optimal zu regeln und zu schützen.

Schon früh in seiner Entwicklungsgeschichte machte sich der Mensch den Wind als Energiequelle zu Nutze. Windmühlen wandelten den Wind in mechanisch nutzbare Energie um, um z.B. Korn zu mahlen oder Wasser von einem niedrigeren auf ein höheres Niveau zu pumpen.

Viele der theoretischen Grundlagen zur Physik und Gestaltung von modernen Windkraftanlagen wurden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelegt. Der deutsche

Ingenieur Albert Betz ermittelte in seinem 1926 erschienen Buch, dass höchstens ca. 59,3 % der mechanischen Energie dem Wind entnommen werden kann. In den vierziger Jahren entwickelte Ulrich Hütter in Weimar (Deutschland) die theoretischen Gestaltungs-Grundlagen, angereichert mit aerodynamischen Wissen, für schnelllaufende Windkraftanlagen mit 2 und 3 Rotorblättern.



Bild 1 : Windmühlen im Hafen von Rhodos/Griechenland - das textiltuch, das die Flügel formt, ist hier eingerollt.

Bild 2 : Windschöpfwerk in Lobbe auf Rügen / Ostsee.

Bild 3 : Windpark auf Gran Canaria (Kanarische Inseln).

Überlastung der WKA zu vermeiden. Der Grenzwert ist die Bemessungsleistung des Generators.

Eine Leistungsregelung ist aber auch deswegen nötig, um den Generator stets über einen weiten Bereich der Windgeschwindigkeiten, die sich auch im Sekundenbereich ändern können, in einem optimalen Betriebspunkt betreiben zu können, um eine gleichförmige elektrische Energie dem Verbundnetz zur Verfügung zu stellen.

Verschiedene Arten der Leistungsregelungen sind technisch ausgeführt worden. Sie kann passiv oder aktiv durch die Rotorblätter erfolgen. Passiv erfolgt die Begrenzung durch eine spezielle flügelartige Formgebung der einzelnen Rotorblätter. Ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit reißt die Strömung, die für den Vortrieb des Rotors sorgt, ab und der Rotor kommt zum Stillstand (Stallsteuerung).

Bei den heutigen großen WKAs üblich ist jedoch eine aktive Begrenzung durch eine Verstellung der Rotorblätter um ihre Längsachse (Pitchregelung). Mit dieser Blattwinkelverstellung kann zum einen die Generatorleistung gesteuert werden. Aber auch bei zu hohen Windgeschwindigkeiten können die Rotorblätter aus dem Wind gedreht werden, so dass der Rotor zum Stillstand kommt. Hierbei sind elektrische Antriebe geringer Leistung im Einsatz. In den zugehörigen Umrichtern kommen kompakte, platinenmontierbare Stromwandler (LEM Typen LA 55-P, LA 100-P, LA 125-P, LA 200-P) zum Einsatz, die Bestandteil eines reaktionsschnellen Regelkreises sind.

Erst durch die Veränderung der politischen Rahmenbedingungen in Form einer staatlichen Förderung der regenerativen Energien Anfang der 90er Jahre setzte eine verstärkte kommerzielle Entwicklung von Windkraftanlagen (WKA) ein. Immer größere Windkraftanlagen und Windparks entstehen; derzeit befinden sich die ersten 4,5-5 MW WKA in der Erprobung. Gerade Deutschland nimmt mit 16929 MW von den weltweit 47317 MW installierter Leistung (Stand: 1.1.2005) vor Spanien, den USA und Dänemark eine herausragende Stellung ein.

### Leistungsregelung

Wind ist der Austausch von Luftmassen. Lokale oder auch großflächige Temperaturunterschiede auf Grund der auf die Erde einwirkenden Sonnenstrahlung (Sonnenenergie) ist die Ursache für diesen Austausch. Hindernisse (Wälder, Berge, Gebäude, usw.) bewirken eine ständige Schwankung der Windgeschwindigkeit. Die Rotoren von Windkraftanlagen transformieren die Windenergie in eine rotatorische (Bewegungs-) Energie, die einen Generator antreibt, der den elektrischen Strom erzeugt.

Die aus dem Wind erzeugbare Leistung ist proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Es gibt einen einfachen Zusammenhang zwischen der vom Rotor überstrichenen Fläche und der daraus erzeugbaren Leistung. Wächst die Windgeschwindigkeit über einen bestimmten Grenzwert, müssen WKA über eine Leistungsregelung verfügen, um eine mechanische und/oder elektrische

Zusammen mit einer intelligenten Leistungskontrolle der Generatoren ist hiermit sichergestellt, dass die WKA nach dem Anlauf über einen weiten Bereich der Windgeschwindigkeiten bis zur Abschaltung durch eine zu hohe Windgeschwindigkeit eine gleichbleibende Leistung an das Netz abgibt.

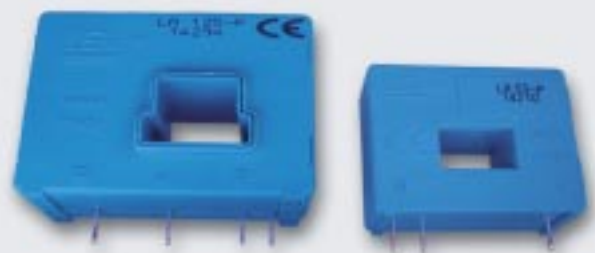


Bild 4: Auf Platinen montierbare LEM-Stromwandler von nominal 50 bis 200 Aeff.



www.lem.com

COMPACT AC/DC CURRENT TRANSDUCERS : **LA** and **LF** Series

## Windnachführung

Aus zwei Gründen ist es wichtig, dass der Rotor immer senkrecht im Wind steht. Zum einen wird so sichergestellt, dass immer die maximale Rotorfläche vom Wind durchströmt wird, also das Maximum an Energieausbeute erzielt wird. Zum anderen wird eine ungleichmäßige Belastung der Rotorblätter vermieden, weil diese während eines Umlaufs nicht hin und her gebogen werden.

Durchgesetzt haben sich bei kommerziellen Großturbinen die sog. Luvläufer, d.h. die Rotoren laufen vor dem Turm im Wind, ein energetisch instabiler Zustand. Dadurch muss die Gondel, die den Rotor trägt, immer aktiv mittels elektrischer Antriebe in den und mit dem Wind gedreht werden. Mit zusätzlichen Bremsen wird sichergestellt, dass der Turm nicht bei jeder kleinen, kurzzeitigen Windrichtungsänderung mitläuft. Um diese Antriebe optimal zu positionieren, wird in den zugehörigen Umrichtern permanent der Strom mit Hilfe von Stromwandlern gemessen. Die Güte und Reaktionsschnelligkeit der Stromregelung werden maßgeblich durch die Bauweise und Qualität der Stromwandler beeinflusst. Deswegen kommen hier Kompensationsstromwandler kleinerer Baugröße zum Einsatz (LEM Typ LF 205-S).

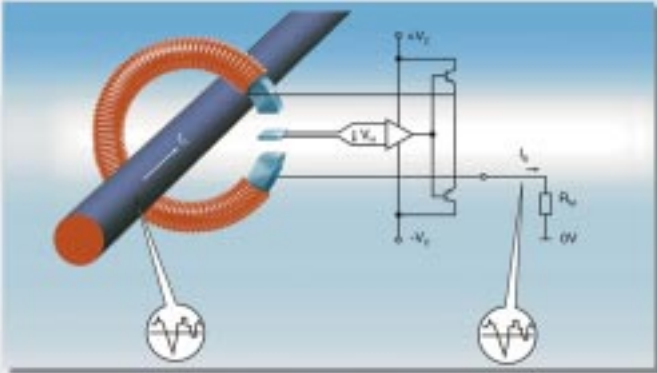


Bild 5: Prinzipschaltbild Kompensationswandler.

Wesentliche Vorteile der Kompensationsstromwandler sind eine hohe Frequenzbandbreite, verbunden mit einer hohen Reaktionsschnelligkeit sowie einer sehr guten Linearität und damit einer hohen Genauigkeit. Doch wie bekommt man nun den elektrischen Strom aus dem Wind ins elektrische Netz? Dazu haben die Windanlagenbauer im Markt konkurrierende Systeme entwickelt. Windkraftanlagen sind prinzipiell entweder mit einem Asynchrongenerator oder einem Synchrongenerator ausgestattet.

## Asynchrongenerator und Netzankoppelung

Das sogenannte klassische „dänische Konzept“ beschreibt eine WKA, die aus einem stall-gesteuerten Rotor mit drei Rotorblättern, einem Getriebe, einem polumschaltbaren Asynchrongenerator mit Käfigläufer und einer direkten Netzanbindung besteht. Durch die direkte Netzanbindung entsteht ein drehzahlstarres System mit einer nahezu konstanten Betriebsdrehzahl im übersynchronen Schlupfbereich. Eine Anpassung an die Rotordrehzahl erfolgt

in engen Grenzen durch eine Schlupfregelung und in einem weiteren Bereich durch die Polumschaltung. Das Getriebe dient der Anpassung der Rotorgeschwindigkeit an die Drehzahl des Generators. Zum Aufbau des Drehfeldes bezieht die Maschine Blindleistung aus dem Netz. Um die hohen Einschaltströme, die beim Aufschalten des Generators auf das Netz entstehen, zu begrenzen, werden Drehstromsteller während des Anlaufens zwischen Generator und Netz geschaltet. Auf Grund einiger Nachteile (z.B. Ausgleichsvorgänge am Netzübergabepunkt durch die zur Leistungsanpassung notwendigen Umschaltheftungen) wird dieses Konzept mit der direkten Netzankopplung heutzutage bei den großen Windturbinen nicht mehr verwendet.

## Doppelt-gespeister Asynchrongenerator

Das modifizierte „dänische Konzept“, das heute mehrheitlich im Markt der großen Windkraftanlagen zu finden ist, verwendet als Generator einen doppelt-gespeisten Asynchrongenerator.

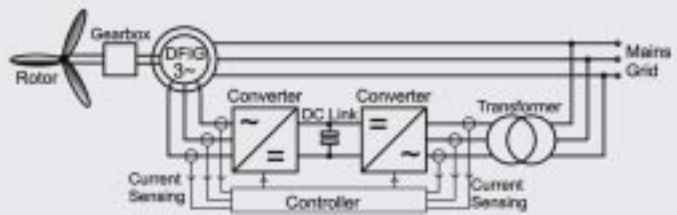


Bild 6: Prinzipschaltbild eines doppelt-gespeisten Asynchrongenerators.

Der Stator ist frequenz- und spannungsstarr mit dem Netz gekoppelt. Der Schleifringläufer ist über einen speziellen Umrichter mit dem Netz gekoppelt. Dieser Umrichter muss in der Lage sein, Energie in beide Richtungen, d.h. maschinenwie netzseitig, zu übertragen. Allerdings muss er nur auf die Schlupfleistung ausgelegt werden, die beispielsweise nur 20 % der Nennleistung des Generators ausmacht. Das heißt, mit Hilfe dieses geschickten Konzepts ist man in der Lage, nur durch Regelung eines kleinen Leistungsanteils eine wesentlich größere Leistung einzustellen. Eine auf diese Weise gebaute WKA wird damit vom unter- bis zum übersynchronen Bereich drehzahlvariabel. Als Umrichter werden zwei identische, pulsgesteuerte IGBT-Wechselrichter mit Gleichspannungszwischenkreis eingesetzt, wobei je nach Energerichtung der eine als Gleichrichter und der andere als Wechselrichter oder umgekehrt betrieben werden. Eine präzise und schnelle Stromerfassung ist zur Regelung der Netzleistung wie auch der Zwischenkreisspannung notwendig. LEM bietet mit Stromwandlern im mittleren Strombereich (LEM Typen LF 305-S, LF 505-S) genau die hierfür passenden Sensoren an. Diese zeichnen sich durch eine kompakte Bauweise sowie vielfältige Einbaumöglichkeiten aus. Zusätzlich können LEM Spannungswandler zur Überwachung und Regelung des Spannungszwischenkreises eingesetzt werden.





Bild 7: Stator einer Synchronmaschine mit Permanentmagneten.  
Picture by courtesy of ETEL-Schweiz

### Synchrongenerator und Netzankoppelung

Beide bislang vorgestellten Konzepte benötigen ein Getriebe, um die relativ langsam drehende Rotorbewegung auf die Generatordrehzahl anzupassen. Ein weiteres im Markt erfolgreiches Konzept ist das einer drehzahlvariablen WKA mit Synchrongenerator. Da auf ein wartungsintensives und mit zusätzlichen mechanischen Verlusten versehenes Getriebe verzichtet wird, muss die Ankopplung des Rotors an den Generator niedertourig erfolgen. Die Größe des Synchrongenerators wird durch die mechanische Energie bestimmt, die durch die Rotorblätter dem Wind entnommen wird. Weil dies niedertourig und mit hohem Drehmoment erfolgt, sind Torquemotoren mit Permanentmagnet-Rotoren ideal für Leistungen bis zu einigen hundert kW. Größere Systeme nutzen einen vielpoligen Synchrongenerator mit einem gewickelten Rotor (Bild 7).

Ein Generator in hochpoliger Ausführung, ein sogenannter Ringgenerator, wird in derartigen großen WKAs verwendet (Bild 8).

Ein wesentlicher Vorteil von Synchrongeneratoren ist auch die Bereitstellung von induktiver bzw. kapazitiver

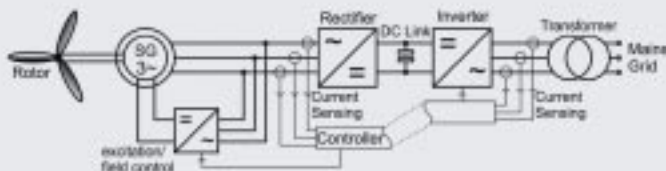


Bild 8: Prinzipschaltbild eines Synchrongenerators.

Blindleistung (ja sogar Null) je nach Regelung des Felderregnerstroms.

Die Netzankoppelung erfolgt durch einen Pulswechselrichter, der allerdings für die volle zu übertragende Leistung bemessen sein muss. Auch hierfür finden sich im Produktprogramm der Firma LEM dynamische Kompensationswandler der LF-Baureihe (LEM Typen LF 1005-S, LF 2005-S), die im Gleich- bzw. Wechselrichter direkt Verwendung finden können. Durch die vergossenen Ausführungen eignen sie sich auch für den Einsatz in rauen Umgebungen.

Alle hier kurz vorgestellten LF-Stromwandler zeichnen sich zudem durch ein gutes Gleichtaktverhalten, sowie Genauigkeit von 0,3 % (bezogen auf den Bemessungswert) bei Raumtemperatur aus.



Bild 9: Die LF-Baureihe bietet Stromwandler in Größen von 100 A bis 2000 Aeff.

Durch die Bauart als reaktionsschneller Kompensationswandler lässt sich durch ihre Verwendung ein Kurzschlusschutz der Leistungshalbleiter in den Umrichtern realisieren – ein unschätzbare Vorteil, wenn man an den geplanten und schon teilweise realisierten Einsatz von Windkraftanlagen im Offshore-Bereich denkt, bei dem eine Wartung nur mit verhältnismäßig großem Aufwand und damit teuer möglich ist.

Stromwandler sind ein unverzichtbarer Bestandteil in modernen Windkraftanlagen. LEM bringt hier mit mehr als 30 Jahren Erfahrung in der Entwicklung dieser Komponenten eine umfangreiche Expertise ein. Für viele dieser Anwendungsfälle bietet LEM schon fertige Lösungen an, andere werden kunden- und anwendungsspezifisch entwickelt und gefertigt.