

Besonderheiten von Frequenzumrichtern für Windkraftanlagen

Specific characteristics of frequency converters for wind applications

Franz Schwimmbeck, Loher GmbH, Ruhstorf, Deutschland

Kurzfassung

Seit über 30 Jahren sind Frequenzumrichter aus der elektrischen Antriebstechnik nicht mehr wegzudenken. Sie tragen bei zur Energieeinsparung, lassen Aufzüge „samtw weich“ ihren Dienst tun, regeln Förderbänder und vieles mehr. Auch bei der Anbindung von Windturbinen an das Stromnetz sind Frequenzumrichter ein wichtiger Bestandteil. Mit ihrer Hilfe können die Generatoren stoßfrei auf das Netz synchronisiert werden, lassen sich die Auswirkungen von Windböen auf den Triebstrang reduzieren und durch die variable Drehzahl kann bei unterschiedlichsten Windgeschwindigkeiten die jeweils optimale Leistung erzeugt werden. Der Energieverlust der Umrichter steht dabei in keinem Verhältnis zu den Vorteilen, die sein Einsatz für die Windturbine bietet. In diesem Beitrag sollen einige typische Eigenschaften von Frequenzumrichtern näher betrachtet und dabei auf ihre Auswirkung auf den Betrieb von Windturbinen eingegangen werden.

Abstract

For more than 30 years frequency inverters have been established in the electrical drive technology. They contribute to energy saving, make lifts moving smoothly, drive conveyor bands and much more. They are also an important component for the connection of wind turbines to the grid. With their help the generators can be synchronized to the grid, the impact of gusts of wind can be minimized and the variable speed allows achieving the optimal power at different wind speeds. The loss of energy of the inverter itself is minimal compared to its advantages for the turbine. In this contribution some typical characteristics of frequency inverters and their effects on wind turbines are considered.

1 Der rückspeisefähige IGBT Umrichter

Seit der Entwicklung des IGBT Transistors hat sich der sogenannte pulsweitenmodulierte Umrichter (PWM Umrichter) als Standard in der elektrischen Antriebstechnik etabliert. Auch in der Windkraft findet diese Technik breite Anwendung und zwar, im Unterschied zu den meisten Industrieanwendungen, in der Ausführung als rückspeisefähiges Gerät. Eine Besonderheit stellt dabei der Einsatz in Verbindung mit der doppeltgespeisten Asynchronmaschine (DASM) dar. Sie stellt besondere Anforderungen an die Regelung und an die Hardware.

1.1 Grundsätzlicher Aufbau des rückspeisefähigen IGBT Umrichters

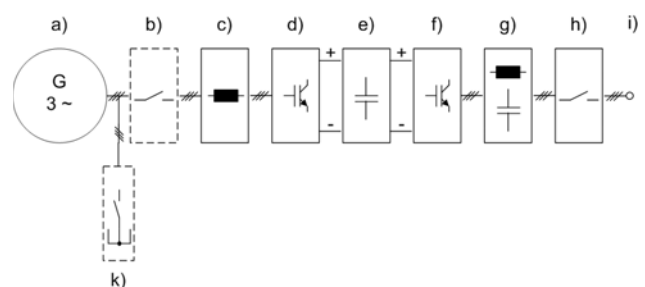


Bild 1 Die Hauptkomponenten eines rückspeisefähigen Frequenzumrichters für die Windkraft.

Bild 1 zeigt die Hauptkomponenten eines Umrichters:

- a) Generator
- b) Optional: generatorseitiges Schaltglied
- c) Filter zur Begrenzung der Spannungssteilheit du/dt
- d) Generatorseitige IGBT B6 Brücke
- e) Zwischenkreiskondensator
- f) Netzseitige IGBT B6 Brücke
- g) Netzseitiges Filter zur Begrenzung der Stromober-schwingungen
- h) Netzseitiges Schaltglied
- i) Anschluss zum Netz bzw. Transformator

k) Optional: Kurzschlusseinrichtung (Speziell bei doppelt gespeisten Asynchronmaschinen)

b) um, bei Synchronmaschinen (SM) im Falle einer zu hohen Drehzahl den Umrichter vor Überspannung zu schützen.

1.2 Die Arbeitsweise des rückspeisefähigen IGBT Umrichters

Windkraftanlagen werden heute überwiegend mit drei verschiedenen Generatortypen ausgestattet:

a) Die Asynchronmaschine mit Käfigläufer (ASM)
Bei diesem Maschinentyp muss der Umrichter entsprechend der Nennleistung der Maschine dimensioniert sein (Vollumrichter).

b) Die doppeltgespeiste Asynchronmaschine (DASM)
Dieser Maschinentyp ist bei Windkraftanlagen besonders verbreitet, weil hier der Umrichter nicht auf die volle Leistung des Generators ausgelegt werden braucht, sondern nur auf ca. ein Drittel. Dies wird dadurch ermöglicht, dass der Drehzahl-Regelbereich einer Windturbine üblicherweise nur +/- ein Drittel der Nenn Drehzahl beträgt. Der Umrichter wird dabei an den Rotor der Maschine angeschlossen.
Eine Besonderheit ist auch, dass bedingt durch die Auslegung im Fehlerfall sehr hohe Spannungen aus dem Generator in den Umrichter gelangen können, die zur Zerstörung führen würden. Deshalb wird in der Regel eine sog. Crowbar vorgesehen, die bei Überschreiten einer gewissen Spannungsschwelle den Rotor kurzschließt.

c) Die Synchronmaschine (SM), permanenterrregt oder fremderregt.

Hier wird wie bei der ASM ein Vollumrichter benötigt. Bei einer Synchronmaschine wird aufgrund der Permanentmagneten eine Spannung induziert, sobald sich der Rotor dreht. Im Überdrehzahlbereich könnte diese Spannung auch bei ausgeschaltetem Umrichter diesen zerstören. Deshalb wird in der Regel ein Schaltorgan zwischengeschaltet, um den Umrichter vom Rotor zu trennen.

Aufgabe des Frequenzumrichters ist es,

- durch Speisung des Generators mit der korrekten Spannung (Amplitude und Frequenz) das von der Turbinensteuerung vorgegebene Drehmoment zu erzeugen.
- Die so vom Generator in den Zwischenkreis eingespeiste Leistung als möglichst sinusförmigen Strom an das Netz weiterzugeben sowie bei Bedarf Blindleistung in das Netz einzuspeisen.

Hierzu wird der Generator über ein du/dt Filter an die generatorseitige IGBT Brücke angeschlossen.

Ein dazwischen liegendes Trennglied (Schütz) ist notwendig,

- um bei teilredundantem Betrieb einen Teilumrichter vom Generator zu trennen oder

Die generatorseitige IGBT Brücke erzeugt eine PWM modulierte Spannung (Bild 2), die im Generator einen annähernd sinusförmigen Strom zur Folge hat (Bild 3). Die Grundfrequenz der PWM wird Taktfrequenz des Stromrichters genannt und liegt bei Umrichtern für Windkraftanlagen im Bereich 1...5 kHz.

Auf der Netzseite sind die Verhältnisse sehr ähnlich: eine IGBT Brücke regelt den Strom so, dass die Zwischenkreisspannung konstant bleibt. Damit wird für eine ausgeglichene Leistungsbilanz gesorgt und es wird genau die Leistung an das Netz weitergegeben, die vom maschinenseitigen Stromrichter in den Zwischenkreis gespeist wird.

Die Sinusform des Stromes wird hier durch ein Sinusfilter erreicht, das zwischen IGBT Brücke und Netzanschluss geschaltet ist.

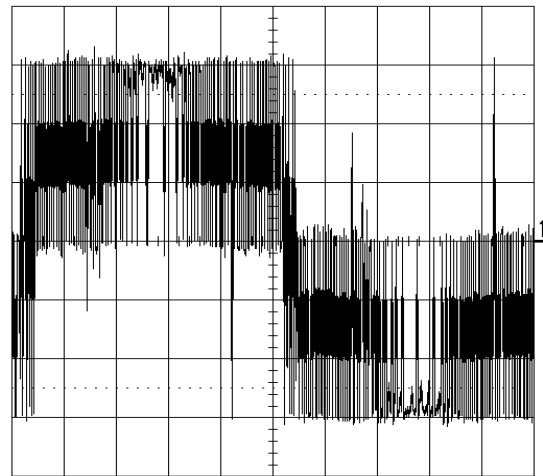


Bild 2 Typischer Spannungsverlauf an den AC Anschlüssen eines PWM Umrichters

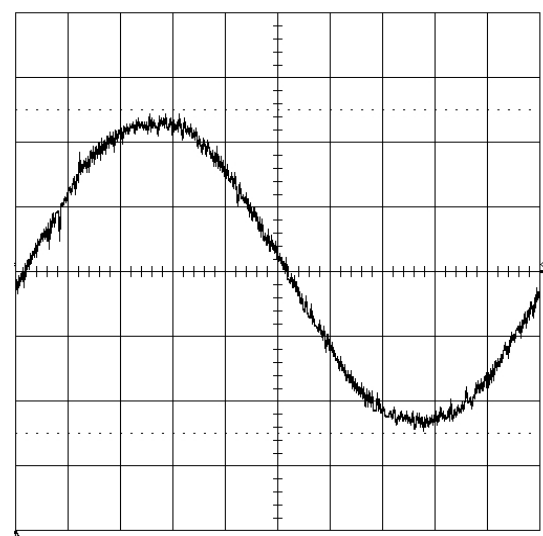


Bild 3 Typischer Stromverlauf an den AC Anschlüssen eines PWM Umrichters

2 Besondere Anforderungen an Frequenzumrichter für Windkraftanlagen

2.1 Lebensdauer

Üblicherweise fordern die Hersteller von Windkraftanlagen eine Design-Lebensdauer von 20 Jahren auf die verwendeten Komponenten. Verschleißteile wie Lüfter sind hiervon in der Regel ausgenommen, vorausgesetzt diese Komponenten können einfach gewechselt werden.

2.1.1 Zwischenkreiskondensatoren

Ein großes Augenmerk ist auf die Auswahl der Zwischenkreiskondensatoren zu legen: sie werden durch hohe Wechselströme, vor allem im Bereich der Taktfrequenz der beiden Stromrichter, belastet.

Kommen Elektrolytkondensatoren zum Einsatz, kann man den Datenblättern direkt die zu erwartende Lebensdauer in Abhängigkeit von der Strombelastung und der Umgebungstemperatur entnehmen. Die Elektrolytkondensatoren bieten nach wie vor die größte Energiedichte bei gegebenem Volumen, haben aber den Nachteil, dass man mehrere in Reihe schalten muss, wofür wiederum Symmetrierwiderstände zur Spannungsaufteilung benötigt werden.

Ein weiterer Nachteil ist der relativ hohe ESR (Ersatz-Serien-Widerstand) dieser Kondensatoren, d.h. seine Eigenverluste sind relativ groß.

In den letzten Jahren werden deshalb vermehrt Kunststoff-Folienkondensatoren eingesetzt. Diese haben pro Bauteil Nennspannungen bis zu mehreren kV, so dass die Reihenschaltung entfällt. Außerdem ist der ESR erheblich kleiner. Der Nachteil dieser Kondensatoren ist die wesentlich kleinere Energiedichte pro Volumeneinheit.

Auch für Folienkondensatoren wird im Datenblatt eine Lebensdauer angegeben, abhängig von Strom, Temperatur und Höhe der Betriebsspannung.

In beiden Fällen kann die Forderung nach 20 Jahren Lebensdauer nur mit hochwertigen Bauelementen erfüllt werden.

2.1.2 IGBT Transistoren

Auch die IGBT Transistoren müssen genau betrachtet werden, um die Tauglichkeit für die Anwendung in der Windkraft nachzuweisen.

Speziell bei kleinen Drehfrequenzen kommt es nämlich zu einem Effekt, der u. U., sehr früh zu einem Ausfall führen kann:

die Verlustleistung des IGBT ist stark stromabhängig und schwankt damit mit der doppelten Grundschiebungsfrequenz des Stromrichters. Die thermische Trägheit des Transistors sorgt bei großen Frequenzen für eine gleichmäßige Temperatur des Bauteils, bei kleinen Frequenzen (typ. < 10 Hz) schwankt die Temperatur des Halbleiters jedoch merklich mit der doppelten Grundschiebungsfrequenz.

Speziell bei Maschinen mit kleinen Nennfrequenzen wie der doppelt gespeisten Asynchronmaschine oder der getriebelosen Synchronmaschine sind kleine Frequenzen in Verbindung mit großen Strömen durchaus üblich.

Die genannten Temperaturschwankungen haben unterschiedliche Ausdehnungen der einzelnen Materialien im Halbleiter-Modul zur Folge, was wiederum zu mechanischem Stress und damit zu Ausfällen durch Alterung führen kann.

U. U. müssen hier spezielle zyklensichere Bauelemente verwendet werden, was bei industriellen Anwendungen in der Regel nicht erforderlich ist.

2.2 Verluste, Wirkungsgrad

Die Verlustleistung eines Frequenzumrichters wird im Wesentlichen bestimmt durch:

- Die IGBT Transistoren (Durchlassverluste, Schaltverluste)
- Die induktiven Bauelemente (Filterdrosseln)
- Die Zwischenkreis-Kondensatoren und die Symmetrierung hierfür
- Bedämpfungswiderstände
- Die Verdrahtung
- Eigenverbraucher wie Lüfter und Steuerung

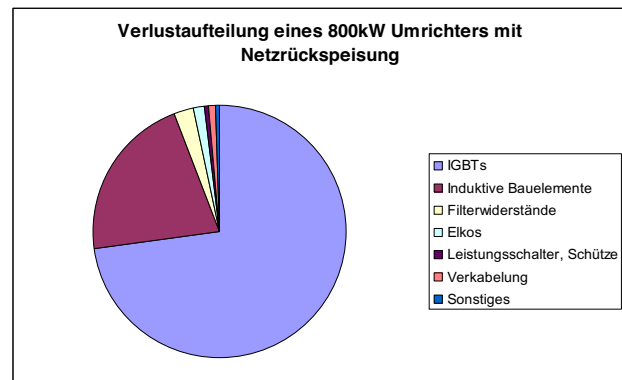


Bild 4 Typische Aufteilung der Verlustleistung bei einem Umrichter mit Netzurückspeisung bei Vollast

Der Vollast-Wirkungsgrad eines Umrichters für Windkraftanlagen liegt in der Größenordnung von 97 %.

Maßnahmen, die den Wirkungsgrad beeinflussen, sind:

- Auswahl der Transistoren
- Wahl der Taktfrequenz der IGBT Brücken:
Die Schaltverluste der IGBTs sind direkt proportional zur Taktfrequenz. Je kleiner man diese wählt, umso geringer sind also die Schaltverluste. Allerdings geht dies beim Generatorstromrichter auf Kosten der Verluste im Generator. Durch Absenkung der Taktfrequenz steigen nämlich die Stromüberschwingungen in der Maschine, was dort höhere Verluste zur Folge hat.
Auf der Netzseite ist es ähnlich: Eine kleinere Taktfrequenz erfordert eine größere Induktivität des netzseiti-

gen Filters, was mit höheren Kosten und höheren Verlusten verbunden ist.

Die Wahl der Taktfrequenz ist also ein wichtiger Aspekt bei der Dimensionierung eines Frequenzumrichters. Eine Optimierung ist nur möglich, wenn man das Gesamtsystem Netz-Umrichter-Generator betrachtet. Moderne Umrichter verändern die Taktfrequenz selbsttätig um das jeweilige Optimum für jeden Betriebspunkt zu erreichen. (z.B. automatische Absenkung bei kleinen Drehfrequenzen).

2.3 Netzverhalten

2.3.1 Netzurückwirkungen

Die netzseitige IGBT Brücke stellt eine eingeprägte Spannungsquelle dar mit folgenden Frequenzanteilen:

- a) Grundschiwingung (50 oder 60 Hz)
- b) Niederfrequente Oberschwingungen (Ordnungszahl 5, 7, 11, 13, ...)

Diese Oberschwingungen treten nur bei nicht optimaler Modulation auf und können bei modernen Umrichtern nahezu vernachlässigt werden.

- c) Taktfrequente Anteile

Es kommen Anteile mit einfacher, doppelter, dreifacher usw. Taktfrequenz vor, und zwar mit abnehmender Amplitude. Genau betrachtet sind es immer zwei Seitenbänder, die z.B. um die Grundschiwingungsfrequenz von der Taktfrequenz abweichen:

Es kommen also folgende Frequenzen vor:

$$\begin{aligned}
 & f_{\text{takt}} - 2 * f_{(1)} \\
 & f_{\text{takt}} + 2 * f_{(1)} \\
 & 2 * f_{\text{takt}} - f_{(1)} \\
 & 2 * f_{\text{takt}} + f_{(1)} \\
 & \text{usw.}
 \end{aligned}$$

Wird eine solche IGBT Brücke an ein Stromnetz angeschlossen, so fließen Ströme mit den genannten Frequenzen.

Für Standard-Antriebe in der Industrie werden die zulässigen Netzurückwirkungen in der Norm EN 61800 – 3 beschrieben, die z. T. auf andere Grundnormen verweist.

Für Windenergieanlagen fordern die Energieversorgungsunternehmen (EVU) die Einhaltung eigener Grenzwerte für die ausgesandten Oberschwingungsströme.

In Deutschland sind hier die VDEW Richtlinien (vsl. ab 2009 ersetzt durch die BDEW - Richtlinie) maßgebend. Folgende Grenzwerte gelten für eine an das Mittelspannungsnetz angeschlossene Erzeugungseinheit:

Ordnungszahl v, μ	Zulässiger, bezogener Oberschwingungsstrom $i_{v, \mu}$ in A/MVA		
	10-kV-Netz	20-kV-Netz	30-kV-Netz
5	0,058	0,029	0,019
7	0,082	0,041	0,027
11	0,052	0,026	0,017
13	0,038	0,019	0,013
17	0,022	0,011	0,07
19	0,018	0,009	0,006
23	0,012	0,006	0,004
25	0,010	0,005	0,003
$25 < v < 40$ ¹⁾	$0,01 \times 25/v$	$0,005 \times 25/v$	$0,003 \times 25/v$
geradzählige	$0,06/v$	$0,03/v$	$0,02/v$
$\mu < 40$	$0,06/\mu$	$0,03/\mu$	$0,02/\mu$
$\mu, v > 40$ ²⁾	$0,18/\mu$	$0,09/\mu$	$0,06/\mu$

Bild 5 Zulässige Stromüberschwingungen bei Anschluss einer Windkraftanlage an das Mittelspannungsnetz [1]

Die Einhaltung dieser Grenzwerte erfordert den Einsatz eines Sinusfilters, das je nach Netzkurzschlussleistung speziell angepasst werden muss.

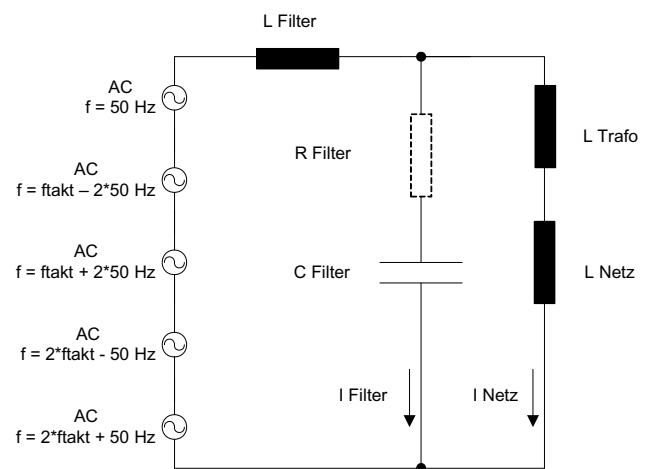


Bild 6 Ersatzschaltbild von IGBT-Brücke, Sinusfilter, Trafo und Netz

Ein Dämpfungswiderstand in Reihe zum Filterkondensator begrenzt die Auswirkungen etwaiger Netzresonanzen.

Sonderfall doppelt gespeiste Asynchronmaschine

Bei der DAM wird der Stator direkt an das Netz angeschlossen, der Rotor an den maschinenseitigen Stromrichter des Umrichters. Transformatorisch bilden sich dabei auch die taktfrequenten Anteile des maschinenseitigen Stromrichters auf das Netz ab.

Diese müssen deshalb bei der Auslegung des Filters berücksichtigt werden.

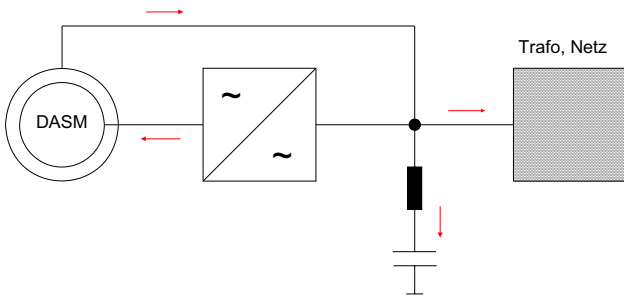


Bild 7 Ausbreitungsweg der maschinenseitigen OS-Ströme bei der DASM

2.3.2 Wirkleistung, Blindleistung, Verhalten bei Störungen im Netz

Das westeuropäische Verbundnetz (UTCE) wurde in der Vergangenheit fast ausschließlich von rotierenden Maschinen (Synchrongeneratoren) gespeist. Alle diese Generatoren helfen mit ihrer Schwungmasse zusammen,

- die Netzfrequenz konstant zu halten und
- bei Störungen wie Kurzschlüssen das Netz zu stützen, um die Auswirkungen möglichst gering zu halten.

Während Synchrongeneratoren diese Anforderungen quasi „von Natur aus“ erfüllen, müssen Frequenzrichter mit spezieller Hardware oder Software ausgestattet sein um ein entsprechendes Verhalten zu zeigen.

Die genauen Anforderungen werden in den sog. „grid codes“ definiert. Solche grid codes wurden von nahezu allen Netzbetreibern herausgegeben.

Ein Beispiel sind die

„Netzanschlussregeln für Hoch- und Höchstspannung“ [2], herausgegeben von der E.On Netz GmbH im April 2006.

Hier werden Anforderungen an Windkraftwerke für folgende Fälle beschrieben:

- Blindleistungslieferung bzw. Bezug bei Abweichungen der Netzspannung vom Nennwert. Um die Netzspannung zu regeln, sollen die Windkraftanlagen auch bei Spannungseinbrüchen bis Null nicht mit Störung abschalten, sondern für eine bestimmte Zeit weiterlaufen und die Netzspannung durch Einspeisung von Blindstrom stützen.

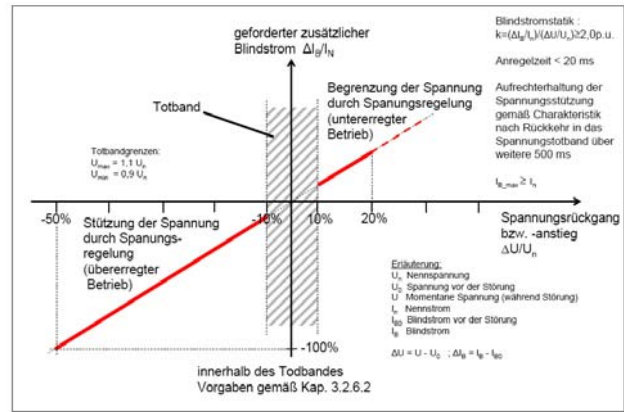


Bild 8 Blindstrom einer WKA bei Netzfehlern [2]

- Absenkung der Wirkleistung bei Anstieg der Netzfrequenz.

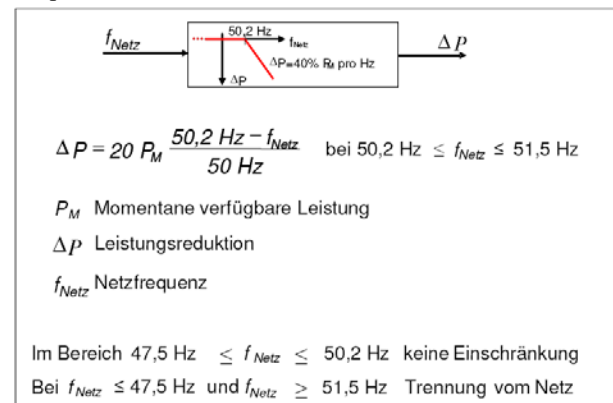


Bild 9 Wirkleistungsabsenkung bei Überfrequenz [2]

2.4 Verfügbarkeit

Windkraftanlagen stellen eine Besonderheit hinsichtlich der Verfügbarkeitsanforderungen und der Möglichkeiten diese zu erhöhen dar:

einerseits ist jede Stunde Ausfallzeit Verlust von Bargeld, andererseits sind die Zeiten, in denen man mit vollem Wind rechnen kann, sehr selten.

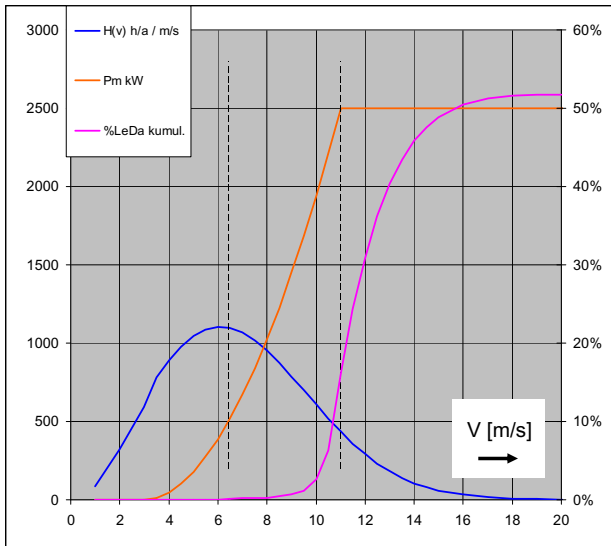


Bild 10 Typische Verteilung der Windgeschwindigkeit in Stunden / a (blaue Kurve);
daraus abgeleitet die Leistung einer Windturbine (orange) und der „Lebensdauer – Verbrauch der IGBTs (pink)“.
(Horizontale Achse: Windgeschwindigkeit in m/s)

D.h. man kann, vorausgesetzt der Frequenzrichter besteht aus mehreren parallelen Einheiten, die Verfügbarkeit durch Wegschalten eines defekten Teilsystems und Weiterbetrieb mit den verbleibenden Teilsystemen deutlich erhöhen.

Eine mögliche Variante für Vollumrichter-Systeme ist dabei, einen Generator mit mehreren parallelen Wicklungssystemen zu verwenden und diesen an voneinander unabhängige Umrichter anzuschließen.

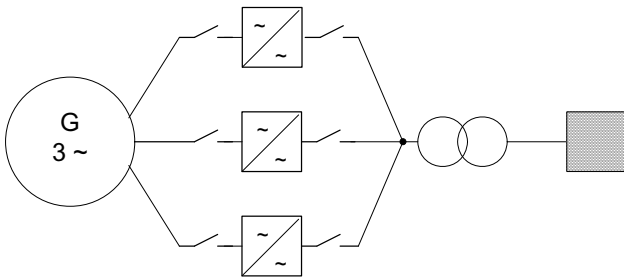


Bild 11 Generator mit mehreren voneinander isolierten Wicklungen und zuschaltbare Teilumrichter

3 Ausblick, Trends

Frequenzrichter haben heute einen hohen Stand der Technik erreicht. Die in Bild 1 gezeigte Topologie ist derzeit am weitesten verbreitet und wird dies sicher in den nächsten Jahren auch bleiben. Neue Trends könnten sich ergeben:

- a) Durch den vermehrten Einsatz von Mittelspannungs-Umrichtern, die heute, meist aus Kostengründen, wenig Verwendung finden.
- b) Durch die Entwicklung neuer Halbleiterbauelemente (z.B. SiC). Diese Bauelemente haben sehr wenig Schaltverluste, können daher mit hohen Taktfrequenzen betrieben werden. So können kleinere Filterdrosseln verwendet werden.

Bei den Generatoren ist derzeit die DASM die am weitesten verbreitete Maschine. Sie wird es auch in den nächsten Jahren bleiben, wobei die permanent erregte Synchronmaschine immer mehr an Bedeutung gewinnt.

4 Literatur

- [1] Technische Richtlinie Energieerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. Berlin: BDEW, 2008
- [2] Netzanschlussregeln Hoch- und Höchstspannung. Bayreuth: E. On. Netz GmbH, 2006