



## Spannungsregelung mit moderner WEA-Technik

Istvan Erlich, Universität Duisburg-Essen, Duisburg  
 Jens Fortmann, REpower Systems AG, Rendsburg  
 Stephan Engelhardt, Woodward SEG GmbH & Co. KG, Kempen  
 Jörg Kretschmann, Woodward SEG GmbH & Co. KG, Kempen

### 1 Einleitung

Lange Zeit hat man von Windenergieanlagen (WEA) Einspeisung mit einem festen vorgegebenen cosinus<sub>fi</sub> gefordert. Auch während eines tieferen Spannungseinbruchs, verursacht durch einen Netzfehler, sollten WEA vom Netz getrennt werden, um negative Auswirkungen sowohl auf die WEA als auch auf das Netz zu vermeiden. Untersuchungen im Übertragungsnetz haben aber später gezeigt, dass die fehlende Stützung der Spannung durch die WEA während eines Kurzschlusses zur Ausweitung des Spannungstrichters führt und somit die Folgen des Fehlers noch größer werden lässt [1]. Insbesondere die Abschaltung einer großen Anzahl von WEA führt zum Verlust einer beträchtlichen Erzeugerleistung mit möglichen ernsten Folgen für die Systemstabilität. Deshalb wird heute in fast allen Grid Codes der Welt das Durchfahren von Spannungseinbrüchen (Fault Ride-Through, FRT) gefordert. Außerdem sollen die WEA bevorzugt einen Blindstrom zur Stützung der Netzspannung einspeisen. Trotz dieser Maßnahmen kann man bei WEA noch nicht über Spannungsregelung, wie sie bei kleinen und großen konventionellen Synchrongeneratoren allgemein üblich ist, sprechen. Die deutschen Grid Codes [2], [3] haben aber schon für den Fall vorgesorgt, dass eine direkte kontinuierliche Spannungsregelung aus Netzsicht zu bevorzugen ist, indem diese Option nach Ermessen des Netzbetreibers gefordert werden kann. Für die WEA bedeutet die Spannungsregelung und die Erweiterung der Blindleistungseinspeisung nicht nur eine veränderte Reglerstruktur, sondern u. U. eine erhöhte Umrichterleistung, was höhere Kosten nach sich zieht und somit die Anlagen teurer macht.

Im vorliegenden Beitrag werden die Autoren folgende Fragen diskutieren:

- Welche Netzanforderungen bestehen bezüglich Spannungsregelung und Spannungsstützung?
- Wie kann man diese Anforderungen mit den heutigen modernen WEA erfüllen?
- Welche Auswirkungen hat die Spannungsstützung durch WEA auf das Netz?

### 2 Netzanforderungen

Die Netzanforderungen für WEA sind in Deutschland im Transmission Code [3] und der Mittelspannungsrichtlinie [4] niedergelegt. Hinzu kommen noch Spezifikationen für die Gewährung des sogenannten System-Dienstleistungsbonus [5]. Man kann die Anforderungen in Bezug auf das hier diskutierte Thema in zwei Gruppen unterteilen:

- Anforderungen bezüglich des statischen (quasistationären) Verhaltens der WEA hinsichtlich Spannungsregelung und Blindleistungseinspeisung.
- Anforderungen bezüglich der Dynamik der Spannungsregelung, Blindstromeinprägung im Fehlerfall.

## 2.1 Stationäre Anforderungen

Die natürliche Veränderung der Netzlast über einen Tag und die damit verbundene Anpassung der Erzeugerleistung führt im Netz zu einer zwar langsam, aber nicht vernachlässigbaren Änderung der Knotenspannungen. Um die Spannung in einem bestimmten Toleranzband zu halten, passen die Übertragungsnetzbetreiber die Blindleistungseinspeisung aus Kraftwerken oder aus anderen Quellen so an, dass die Netzverluste möglichst gering bleiben. Hierfür stehen auch die Transformatoren mit ihren Stufenstellern zur Verfügung. Es ist deshalb eine verständliche Forderung der Netzbetreiber, dass sich auch die WEA bzw. die Windparks an diesem Regime beteiligen sollen. Bild 1 zeigt zwei Diagramme, in denen diese Forderung quantitativ niedergelegt ist. WEA müssen in den rot umrandeten Flächen jeden Arbeitspunkt bezogen auf den Netzverknüpfungspunkt einstellen können. Dabei sind die Stellzeiten unkritisch. Es ist ausreichend, von einem Arbeitspunkt zum anderen in 1-2 Minuten oder auch über eine längere Zeitspanne zu wechseln. Die Schwierigkeit besteht darin, die erforderliche Blindleistungskapazität vorrätig zu halten. Hier stellen die Grid Codes den WEA- bzw. Windparkbetreibern frei, ob die Blindleistung durch die WEA erzeugt wird oder in zusätzlichen Quellen, wie z. B. Kondensatorbatterien oder Drosselpulen. Falls ein Windpark über einen Transformator mit Stufensteller angeschlossen ist, wird die Spannungsschwankung vom Netz nur begrenzt in den Windpark hineingetragen. Diese Tatsache macht es den WEA etwas leichter, die Anforderungen zu erfüllen.

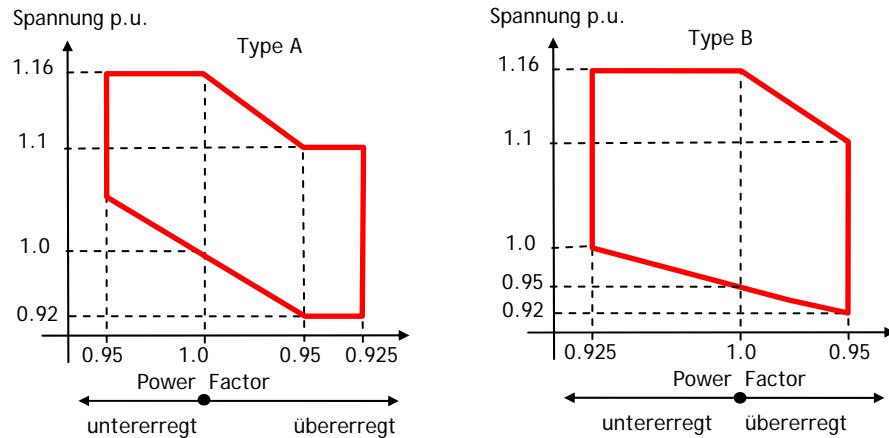


Bild 1 Stationäre Blindleistungsanforderungen nach [3]

## 2.2 Dynamische Anforderungen

Während eines Netzfehlers kann die Spannung an den WEA-Klemmen kurzzeitig tief einbrechen. Die Abgabe der vorher gefahrenen Wirk- und Blindleistung ist unter Umständen nicht mehr möglich, da der dafür erforderliche Strom die Bemessungsgrenzwerte des WEA-Umrichters übersteigt. Auch der transiente kurzzeitige Kurzschlussstrombeitrag der WEA kann intern zu einem zu hohen Strom führen. Trotz dieses Problems fordern die Netzbetreiber das Verbleiben am Netz, wobei ein kurzes „Aussetzen“ unter bestimmten Bedingungen und für wenige Millisekunden



toleriert wird (Kurzzeitige Trennung der Erzeugereinheit, KTE). Bild 2 zeigt die FRT-Charakteristik, wie sie in [3] gefordert wird.

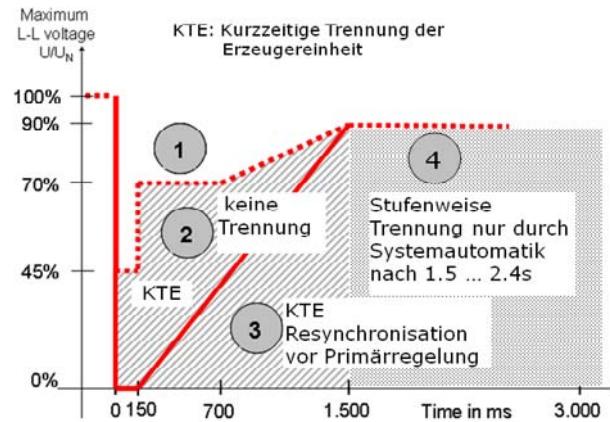


Bild 2 FRT-Charakteristik nach [3]

Noch wichtiger für das Netz ist aber der eingeprägte Blindstrom, sowohl bezüglich der Höhe als auch der Dynamik. Die Bilder 3-4 definieren die geforderte Blindstrom-/ Spannungsstatik sowie das Zeitverhalten in Form der Sprungantwort.

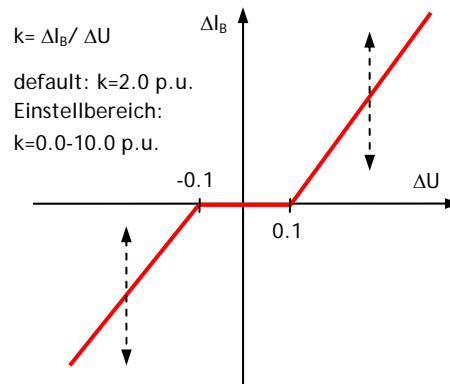


Bild 3 Blindstrom-/Spannungsstatik der dynamischen Blindstromstütze nach SDL-Verordnung [5]

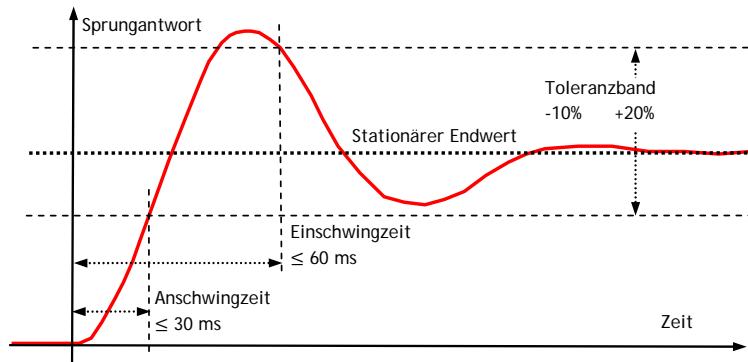


Bild 4 Sprungantwort der dynamischen Blindstromstütze nach SDL-Verordnung [5]

Es wird verlangt, mindestens 1.0 p.u. Blindstrom ins Netz einprägen zu können. Um auch bei tiefen Spannungseinbrüchen den geforderte Blindstrom liefern zu können, kann gegebenenfalls der Wirkstrom abgesenkt werden. Dadurch wird eine eventuelle Überlastung des WEA-Umrichters vermieden. Die Blindstromeinspeisung soll proportional zum Spannungseinbruch mit der vorgegebenen Statik erfolgen. Ein Toleranzband von 10% um den stationären Spannungswert vor dem Fehler ist in der Regel anwendbar, um ein unnötiges Regeln des Blindstromes zu vermeiden. Wendet man aber eine kontinuierliche Spannungsregelung an, dann ist das Totband nicht mehr erwünscht. Man muss auch noch festhalten, dass die Bildstromstütze einer Spannungsregelung, mit Totband, entspricht. Es wird in diesem Beitrag deshalb das Wort Spannungsregelung bevorzugt.

Bezüglich des dynamischen Verhaltens der Blindstromeinspeisung sind die Anforderungen hoch, aber mit moderner Umrichtertechnik und ausgefeilter Regelung erfüllbar. Die hohe Dynamik ist erforderlich einerseits, um die Netzspannung schnell genug anzuheben, und andererseits dem Netzschatz einen erkennbaren Kurzschlussstrombeitrag seitens der WEA zu liefern.

### 3 Spannungsregelung mit WEA

#### 3.1 Aufbau moderner WEA

Die heute als modern geltenden WEA kann man in zwei Gruppen unterteilen:

- WEA mit sogenannten doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren (Doubly-Fed Induction Generators, DFIG), wo der Umrichter an die dreiphasige Rotorwicklung angeschlossen ist
- WEA mit Vollumrichtern, angeordnet zwischen dem Ständer des Generators und dem Netz. Man kann dabei sowohl Synchron- als auch Asynchronmaschinen als Generator verwenden.

Einen Überblick über die beiden WEA-Typen und ihre Regelungsmöglichkeiten bieten die Bilder 5 und 6.

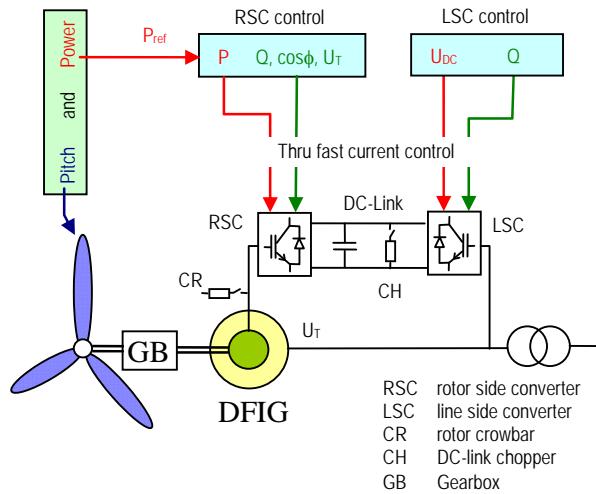


Bild 5 Struktur einer WEA mit DFIG

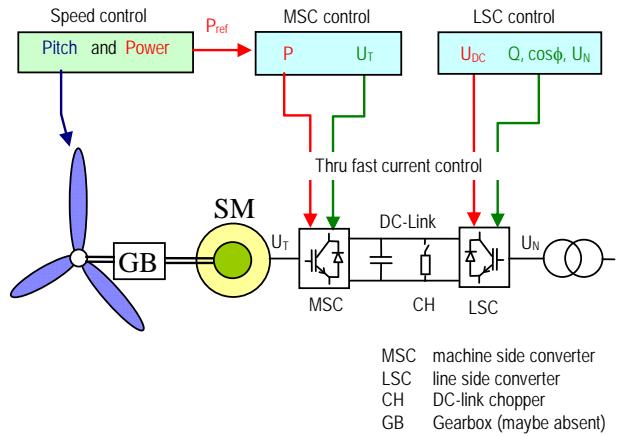


Bild 6 Struktur einer WEA mit Vollumrichter

Gemeinsam bei beiden Typen ist, dass getrennte, weitestgehend entkoppelte Regelkreise für Wirk- und Blindleistung bzw. Wirk- und Blindstrom zur Verfügung stehen. Für die Spannungsregelung kommt der Blindleistungs-/Blindstromkanal in Frage.

Bei der DFIG-WEA ist es sinnvoll, im stationären Zustand die Blindleistung über den maschinen-seitigen Umrichter und den Generator ins Netz zu speisen. Unter bestimmten Bedingungen, insbesondere während eines tiefen Spannungseinbruchs und um die geforderte Dynamik zu gewährleisten, kann man auch den netzseitigen Umrichter für Blindstromeinprägung ansteuern. Es ist dabei aber zu beachten, dass die vorrangige Aufgabe des netzseitigen Umrichters die Rege-

lung der Zwischenkreisspannung ist und nur, wenn die Stromkapazität des Umrichters nicht voll ausgenutzt ist, kann diese für Blindstromerzeugung genutzt werden.

Bei Anlagen mit Vollumrichtern steht nur der netzseitige Umrichter für Spannungsregelung bzw. Blindstromeinprägung zur Verfügung. Da bei dieser Konfiguration keine elektrische Maschine zwischen Umrichter und Netz liegt, verhält sich diese Anlage dynamisch schneller. Andererseits kann sie, aus dem gleichen Grund, nicht von der Stromausspeisung aus der Maschine unmittelbar nach dem Spannungseinbruch, wie es bei DFIG-Anlagen der Fall ist, profitieren.

Während eines zweipoligen Netzfehlers im Netz kann bei DFIG-WEA über die Maschine und somit auch über den maschinenseitigen Umrichter ein Gegenstrom fließen. Dieser schränkt u. U. den zur Verfügung stehenden Blindstrombereich für Spannungsstütze ein. Es bedarf ausgefeilter Regelungstechnischer Maßnahmen, um diesem Effekt entgegen zu wirken und trotzdem einen ausreichenden Blindstrom ins Netz speisen zu können. Diesem Problem trägt auch die(SDL-Verordnung [5] Rechnung, indem beim Vorhandensein eines Gegenstromes nur noch 0.4 p.u. Mitsystem-Blindstrom gefordert wird. Anlagen mit Vollumrichter betrifft dieses Problem nicht, da dort durch die Regelung ein Gegenstrom über den Umrichter komplett unterdrückt werden kann.

Bei älteren DFIG-WEA wurde für den Schutz des Umrichters während der Kurzschlussphase ein sogenannter Crowbar, ein Schutzwiderstand an die dreiphasige Rotorwicklung geschaltet und gleichzeitig der Umrichter gestoppt. Dadurch ging die Erregung verloren und die Maschine wurde zu einem Schleifrigläufer-Asynchrongenerator. Diese Phase kann, abhängig von der Auslegung, 50-100 ms, d. h. nahezu die gesamte Kurzschlussphase dauern. Während dieser Zeit bezieht die Maschine Blindstrom aus dem Netz, statt, wie im Grid Code gefordert, einzuspeisen. Aus diesem Grund ist die traditionelle Crowbarlösung für das Netz nicht akzeptabel. Eine Alternative ist, den Chopper im Gleichstrom-Zwischenkreis so auszulegen, dass damit die Gleichspannung in fast allen Betriebszuständen stabilisiert werden kann und das Einschalten der Crowbar dadurch überflüssig wird.

### 3.2 WEA-Reglerstrukturen für Spannungsregelung

In Bild 7 ist eine mögliche Reglerstruktur, alternativ für Blindleistungs-, cos<sub>fi</sub>- oder langsame Spannungsregelung, mit unterlagerter Blindstromstütze dargestellt. Der Ausgang des Reglers ist der Blindstrom-Sollwert für den Umrichter. Die drei Möglichkeiten Blindleistungs-, cos<sub>fi</sub>- oder langsame Spannungsregelung können von den Netzbetreibern wahlweise gefordert werden. Die Blindstromstütze besitzt ein Totband und liefert ein zusätzliches Delta zum Blindstromsollwert. Der quasistationäre Blindleistungspfad muss während der aktiven Spannungsstütze entweder blockiert werden (Werte festgehalten) oder von vornherein ein sehr langsames Verhalten aufweisen. In einigen Anwendungen wurde statt des Aufsummierens des quasistationären und des dynamischen Blindstromanteils ein Umschalten implementiert. Dies kann zu Unstetigkeiten (Sprünge) bei der Regelung führen und ist deshalb nicht zu empfehlen.

Eine separate Begrenzung des dynamischen Anteils des Blindstromes z. B. auf 1.0 p.u., wie manchmal der Grid Code falsch ausgelegt wurde, führt dazu, dass die Blindstromkapazität der WEA u. U. nicht voll für die Stützung der Netzspannung ausgenutzt wird.

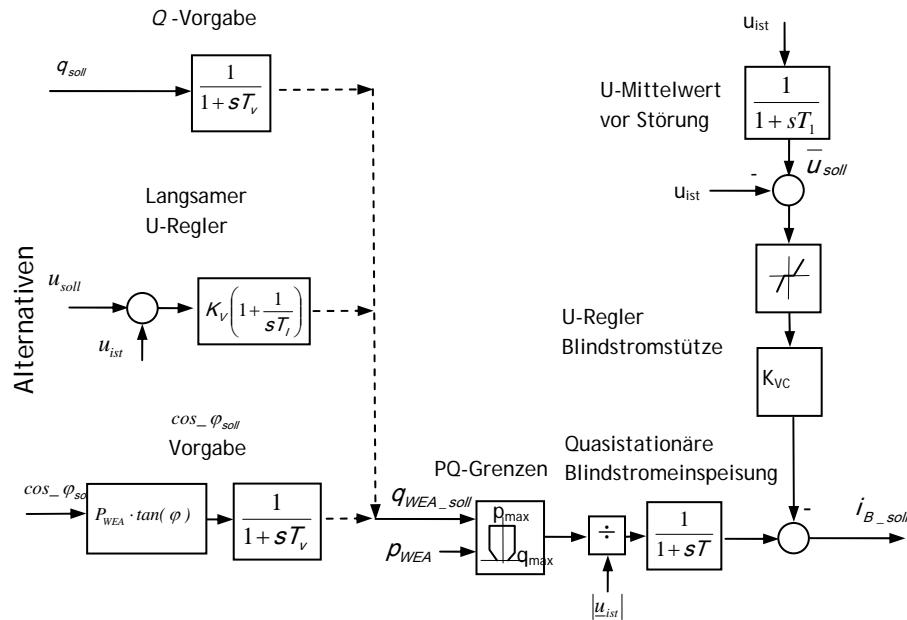


Bild 7 Blindleistungs-/Blindstromregelung und Blindstromstütze mit Totband

Aus diesem Grund sollte eine Limitierung des Blindstromes besser nur über die immer vorhandene Betragsbegrenzung des Umrichterstromes (Wirk- und Blindstrom geometrisch addiert) unter Beachtung einer gewissen kurzzeitigen Überlastbarkeit der Halbleiterbauelemente erfolgen. Die Anpassung der Blindstromstütze an eine möglicherweise variable Klemmen-Sollspannung erfolgt dadurch, dass als Sollwert ein  $U$ -Mittelwert, z. B. über eine Minute gemittelt, verwendet wird. Als Richtwert für die Blindstrom/Spannungs-Verstärkung der Blindstromstütze gilt 2.0 p.u.. Nach der(SDL)-Verordnung [5] wird aber schon eine im Bereich 0-10 p.u. einstellbare Verstärkung gefordert, wodurch eine bessere Anpassung an die Gegebenheiten des Netzes ermöglicht wird. Es muss aber betont werden, dass eine zu hohe Verstärkung, u. U. noch unterhalb von 10 p.u., an schwachen Netzanschlusspunkten schon zu Instabilitäten führen kann.

In Fachkreisen wird immer häufiger über eine direkte kontinuierliche Spannungsregelung ohne Totband, wie bei konventionellen Synchrongeneratoren allgemein üblich, diskutiert. WEA sind hierzu durchaus in der Lage. Bild 8 zeigt eine mögliche Reglerstruktur. Das Blockschaltbild enthält einen Führungsregler mit drei Alternativen für Spannung-, Blindleistungs- oder  $\cos\phi$ -Regelung. Dieser Führungsregler kann zentral im Windpark oder in der WEA implementiert werden. Der lokale Spannungsregler selbst besitzt Proportionalverhalten.

Das Fehlen des Totbandes kann nach Meinung der Verfasser eher als Vorteil gewertet werden, da einerseits das langsame quasistationäre Verhalten der WEA weiterhin, wie in der vorhergehenden

Struktur auch, durch den Führungsregler bestimmt wird. Kurzzeitige transiente Spannungsschwankungen werden dagegen hier durch den schnellen Spannungsregler geglättet.

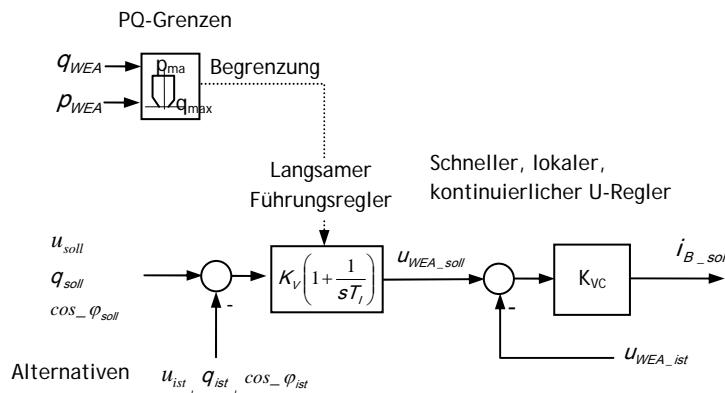


Bild 8 Kontinuierlicher Spannungsregler mit alternativen Führungsreglern

Für den Führungsregler kann man z. B. die in Bild 9 gezeigte stationäre Kennlinie implementieren, wodurch sichergestellt wird, dass die maximale bzw. minimale Blindleistung der WEA beim Erreichen vorgegebener Spannungsgrenzwerte (z. B.  $\pm 5\%$ ) aktiviert werden.

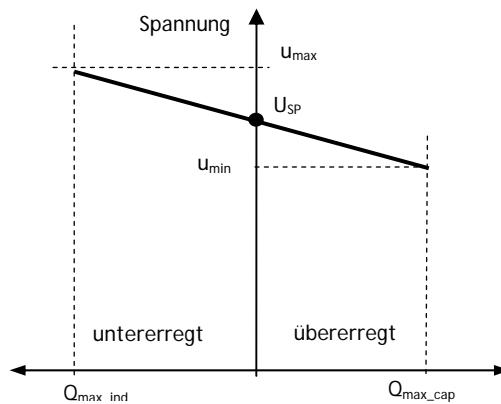


Bild 9 U-Q-Charakteristik des Führungsreglers

#### 4 Effekt der WEA-Einspeisung während Netzfehlern auf das Spannungsniveau

Bisher wurde die Spannungsregelung bzw. Blindstromstütze während eines Netzfehlers lediglich als gegebene Forderung der Netzbetreiber beschrieben. Im Folgenden wird kurz gezeigt, von



welchen Faktoren die Wirkung der Blindstromeinprägung auf das Netz abhängt und zu welchem tatsächlichen Effekt diese führen kann. Für diese Betrachtungen wird von dem in Bild 10 dargestellten Ersatzschaltbild ausgegangen.

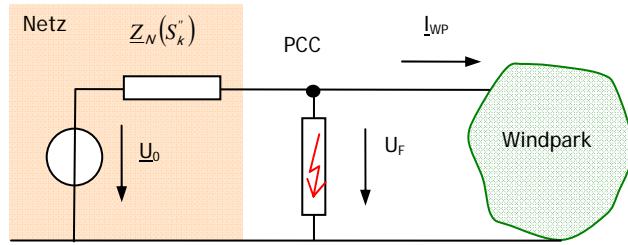


Bild 10 Ersatzschaltbild zur Untersuchung des Effektes der Blindstromeinprägung

Eine ausführliche Herleitung der Zusammenhänge ist in [6] zu finden. Die Wirkung wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\eta_{WP} = 1 - \frac{I_{WP}}{I_N} e^{j(\varphi_{WP} + \varphi_N)} = 1 - \frac{S_{WP-N}}{S_N} e^{j(\varphi_{WP} + \varphi_N)} \quad (1)$$

wobei  $\eta_{WP}$  das Verhältnis der Spannung im Netzanschlusspunkt (PCC) mit und ohne Stromein- speisung durch die WEA ausdrückt. Um maximale Spannungsanhebung zu erzielen, muss für die Phasenlage des Windparkstromes in Bezug auf die PCC-Spannung gelten  $\varphi_{WP} = \pi - \varphi_N$ . Beträgt die Netzimpedanz  $\varphi_N = 90$  Grad (ausschließlich induktiv), so muss der Windparkstrom -90 Grad aufweisen, was einem reinen kapazitiven Strom (übererregt) entspricht. Besitzt die Netzimpedanz auch einen ohmschen Anteil, so trägt auch eine Wirkstromeinprägung (Erzeuger) zur Spannungsanhebung bei. Der erzielbare Effekt hängt aber auch vom Verhältnis WP-Nennleistung zu Netz-Kurzschlussleistung  $\frac{S_{WP-N}}{S_N}$  ab. Bild 11 zeigt die Wirkung für verschiedene tiefe Spannunseinbrüche bei einem eingeprägten WP-Strom von 1.0 p.u. mit der günstigsten Phasenlage.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass an starken Netzen mit einer hohen Kurzschlussleistung die erzielbare Spannungsanhebung gering ist. Besitzt das Netz dagegen eine kleine Kurzschlussleistung, so führt die Einspeisung eines Blindstromes zu einer größeren Anhebung der Spannung. Mit zunehmender Tiefe des Spannungseinbruchs nimmt die Wirkung aber ab. Unter 10-15% Spannung stellt sich deshalb die Frage, ob es noch einen Sinn macht, Blindstrom ins Netz zu speisen oder lieber das Halten der WEA am Netz, was bei diesem Spannungsniveau auch ohne Blindstrom- speisung schon schwierig ist. Priorität haben sollte.

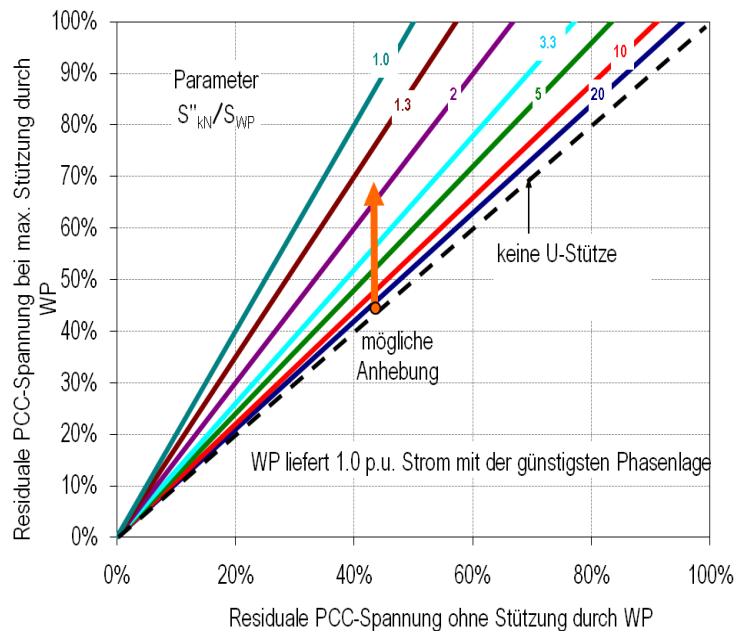


Bild 11 Mögliche Spannungsanhebung durch WEA bzw. Windparks

## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Beitrag wurde die Spannungsregelung bzw. Blindleistungs-/Blindstrombereitstellung durch WEA diskutiert. Moderne WEA können die Grid Code-Forderungen durch geeignete Regelung der Umrichter durchaus erfüllen. U. U. ist dazu aber eine stärkere Umrichterhardware erforderlich, wodurch die Kosten der WEA steigen können. Bisher wurde von den WEA eine Spannungsstütze durch Blindstromeinspeisung während der Phase des Kurzschlusses und noch eine halbe Sekunde danach gefordert. Moderne WEA sind aber auch in der Lage, die Netzspannung auch kontinuierlich ohne Totband, ähnlich zu konventionellen Synchrongleichstrommaschinen, zu regeln. Die Autoren geben hierfür geeignete Regelstrukturen an. Die kontinuierliche Spannungsregelung ist vorteilhafter als die bisherige Lösung mit Spannungsstütze nur während der Kurzschlussphase. Die Einspeisung eines Blindstromes durch die WEA führt zur Spannungsanhebung im Netz. Im Beitrag wird der Effekt quantifiziert und gezeigt, dass an starken Netzen und bei sehr tiefen Spannungseinbrüchen (Nahfehler) die spannungshebende Wirkung gering ist.



## 6 Literatur

- [1] dena-Netzstudie, [www.deutsche-energie-agentur.de](http://www.deutsche-energie-agentur.de), Februar 2005
- [2] Eon Netz GmbH: „Netzanschlussregeln Hoch- und Höchstspannung“, Bayreuth, 2006
- [3] VDN: Transmission Code 2007, Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, August 2007
- [4] BDEW: Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, Juni 2008
- [5] Verordnung zu Systemdienstleistungen durch Windenergieanlagen (Systemdienstleistungsverordnung - SDLWindV), "Systemdienstleistungsverordnung vom 3. Juli 2009 (BGBl. I S. 1734)"
- [6] I. Erlich, F. Shewarega, S. Engelhardt, J. Kretschmann, J. Fortmann, F. Koch: Effect of Wind Turbine Output Current during Faults on Grid Voltage and the Transient Stability of Wind Parks, IEEE PES General Meeting, July 2009, Calgary, Canada

