



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 016 664.3**

(22) Anmeldetag: **12.11.2014**

(43) Offenlegungstag: **12.05.2016**

(51) Int Cl.: **H02J 3/38 (2006.01)**

**H02M 7/48 (2006.01)**

(71) Anmelder:  
**Senvion GmbH, 22297 Hamburg, DE**

(72) Erfinder:  
**Letas, Heinz-Hermann, 24796 Bovenau, DE;**  
**Fortmann, Jens, 13156 Berlin, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

**AT 408 296 B**  
**US 2011 / 0 153 113 A1**  
**US 2012 / 0 261 917 A1**

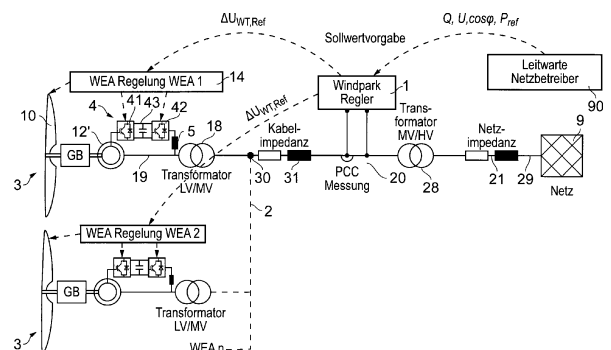
**NEUMANN, T.; ERLICH, I.: Einspeiseverhalten von umrichterbasierten Erzeugungseinheiten während unsymmetrischer Netzfehler. Internationaler ETG-Kongress 2013 - Energieversorgung auf dem Weg nach 2050. 05.-06.11.2013, Berlin, Deutschland. Veröffentlicht in: ETG-Fachbericht, Band 139 - ISBN 978-3-8007-3550-1 URL: <https://www.uni-due.de/ean/downloads/papers/neumann2013a.pdf> [abgerufen am 24.06.2015]**

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage mit komplexer Umrichtersteuerung und Vorrichtung hierfür**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage. Um zu erreichen, dass im Betrieb die Abgabe von Blindleistung und ggf. auch Wirkleistung schneller erfolgen kann in Reaktion auf Netzfehler ist die Windenergieanlage ausgestaltet mit einem von einem Windrotor angetriebenen Generator zur Erzeugung elektrischer Leistung, einem Umrichter, einer Drossel und einen Ausgabeanschluss zur Abgabe der vom Generator erzeugten elektrischen Leistung an ein Netz, welches eine Sollfrequenz und Sollspannung aufweist, wobei der Umrichter einen maschinenseitigen Wechselrichter, einen Zwischenkreis, einen netzseitigen Wechselrichter und eine Umrichtersteuerung für die Wechselrichter umfasst, sowie ferner ein erster Regler für den maschinenseitigen Wechselrichter und ein zweiter Regler für den netzseitigen Wechselrichter vorgesehen sind, die auf die Umrichtersteuerung als Stellglied einwirken, wobei zumindest der zweite Regler komplex ausgeführt ist mit einem Ausgang für ein komplexes Spannungssignal  $U_{WR}^*$  als Stellgröße, welche Signale enthält für eine Amplitude  $U_{WR}$  der Sollspannung des Wechselrichters und eine Sollphasenlage  $\phi_{U_{WR}}$ , wobei diese Stellgröße angelegt ist an einen Stellgrößeneingang der Umrichtersteuerung zum Ansteuern zumindest des netzseitigen Wechselrichters.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer komplexen Umrichtersteuerung für eine Windenergieanlage, die einen von einem Windrotor angetriebenen Generator mit einem Umrichter zur Abgabe elektrischer Leistung über einen Anschlusspunkt an einem Netz umfasst. Die Erfindung erstreckt sich ferner auf eine entsprechende Windenergieanlage sowie Anwendung im Windpark.

**[0002]** Moderne Windenergieanlagen geben die von einem Generator, der von einem Windrotor direkt oder über ein Getriebe angetrieben ist, erzeugt elektrische Leistung über einen Umrichter an das Netz ab. Der Umrichter ist in der Regel voll steuerbar und ermöglicht sowohl die Abgabe von Wirkleistung entsprechend der vom Windrotor aus dem Wind gewonnenen mechanischen Leistung einerseits und die Abgabe von an sich frei einstellbarer Blindleistung andererseits. Grundsätzlich ist man beim Betrieb von Windenergieanlage bestrebt, ein Maximum an Wirkleistung in das Netz einzuspeisen. Jedoch ist anders als bei konventionellen Kraftwerken die abgebbare Wirkleistung nicht frei bestimmbar, sondern richtet sich vielmehr nach den vorherrschenden Windbedingungen.

**[0003]** In jüngerer Zeit hat auch die Abgabe von Blindleistung durch Windenergieanlagen größere Bedeutung erlangt. Es ist bekannt, dass zur Erreichung und Beibehaltung einer ausreichenden Netzstabilität die Abgabe von Blindleistung erforderlich ist, wobei die Abgabe gegebenenfalls schnell änderbar sein muss. Herkömmlicherweise wurde die Aufgabe der Netzstabilisierung durch konventionelle Kraftwerke und deren leistungsstarke Synchrongeneratoren übernommen. Bedingt durch einen umfangreichen Zubau von Windenergieanlagen wird dabei zunehmend nunmehr auch von diesen verlangt, dass sie ihren Beitrag zur Netzstabilisierung leisten. Dazu müssen die Windenergieanlagen befähigt werden, auf Anforderung – insbesondere durch den Netzbetreiber – Blindleistung in das Netz einspeisen zu können. Besondere Bedeutung kommt der Einspeisung von Blindleistung im Fall eines Netzfehlers zu, insbesondere im Fall eines Spannungseinbruchs. Eine schnelle Einspeisung von Blindleistung ist in diesem Fall zwingend erforderlich um das Spannungsniveau zu stabilisieren und so einem Zusammenbruch des Netzes entgegenzuwirken.

**[0004]** Durch den Zubau von Windenergieanlagen und die dadurch in Relation geringer werdende Bedeutung herkömmlicher Kraftwerke mit ihren Synchrongeneratoren müssen nunmehr im zunehmenden Maße auf die Windenergieanlagen größere Anteile an der Bereitstellung von Blindleistung übernehmen. Dies bringt zum einen das Erfordernis mit sich, auf Zuruf möglichst viel Blindleistung bereit zu stellen,

zum anderen aber auch das Erfordernis, dies mit hoher Dynamik bewerkstelligen zu können. Im Grundsatz dazu gut befähigt sind Windenergieanlagen mit Umrichtern, die einen maschinenseitigen Wechselrichter, einen (Gleichspannungs-)Zwischenkreis sowie eine netzseitigen Wechselrichter umfassen, da solche Umrichter eine nahezu freie Einstellung des abzugegebenden Stroms in Bezug auf die Phasenlage ermöglichen. Dies gilt insbesondere für Bauarten von Windenergieanlagen, bei denen die gesamte von einem Generator erzeugte elektrische Leistung über einen Umrichter geführt wird. Bei dieser Bauart wird die gesamte von dem Generator erzeugte elektrische Leistung durch den Umrichter geführt. Man nennt diese Bauart daher auch „Vollumrichter“. Ebenfalls verbreitet und in Bezug auf die Einspeisung von Blindleistung auch sehr leistungsfähig ist die Bauart, bei der nur ein Teil der Leistung durch den Umrichter geführt wird. Hierbei wird ein doppelt gespeister Generator verwendet, dessen Statorwicklung meist direkt mit dem Netz verbunden ist und dessen Rotorwicklung ist angeschlossen an den Umrichter, genauer gesagt an dessen maschinenseitigen Wechselrichter. Der netzseitige Wechselrichter des Umrichters ist in der Regel über eine Drossel an das Netz angeschlossen. Bei dieser Bauart fließt nur ein Teil der von dem Generator erzeugten Leistung über den Umrichter, der zusätzlich zur Aufgabe der Leistungseinspeisung in das Netz noch die Aufgabe übernimmt, eine entsprechende Erregung für den Rotor des Generators bereitzustellen.

**[0005]** Obwohl Windenergieanlagen dank ihrer Umrichter grundsätzlich in der Lage sind, Blindleistung nach Wahl abzugeben, so sind sie in der Praxis bisher jedoch kein adäquater Ersatz für Synchrongeneratoren am Netz. Das liegt darin begründet, dass die Umrichter von Windenergieanlagen in der Regel als stromgeführte Systeme betrieben werden, bei welchen der abzugebende Strom durch die Ansteuerung der elektrischen Schaltelemente in den Wechselrichter (Stromventile) quasi eingepreßt wird. Eine Reaktion auf Änderungen im Netz erfolgt nur indirekt, indem nämlich vorgeschaltete Regelungsfunktionen erkennen, dass eine Netzänderung stattgefunden hat und entsprechend Führungswerte verändert werden. Typischerweise werden in diesen vorgeschalteten Funktionen nicht die Momentanwerte der Netzgrößen verwendet, sondern aus einer Analyse stammende Werte (in der Regel sind diese Analysefunktionen über mindestens eine Periode der Netzspannung), beispielsweise Umrechnungen in Mit- und Gegensysteme. Dadurch entsteht eine Reaktionszeit auf Fehler im Netz, die in der Größenordnung von gut 40 Millisekunden liegt, bis bei dem Auftreten eines Netzfehlers mit einer entsprechenden Anpassung der Blindleistungsabgabe reagiert werden kann. Dies ist ein erheblich schlechteres Verhalten verglichen mit dem von Synchrongeneratoren konventioneller Kraftwerke, welche bauartbedingt bereits innerhalb einer Zeit-

spanne von nur zwei bis drei Millisekunden nach einer Spannungsänderung in Folge eines Netzfehlers bereits einen signifikanten Blindstrom einspeisen können.

**[0006]** Es stellt sich daher die Problematik, dass die gute Netzstabilisierende Wirkung der Synchrongeneratoren nicht hinreichend durch die Windenergieanlagen mit ihren Umrichtern ersetzt beziehungsweise verstärkt werden kann.

**[0007]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Windenergieanlagen mit ihren Umrichtern dahingehend zu verbessern, dass im Betrieb die Abgabe von Blindleistung und ggf. auch Wirkleistung schneller erfolgen kann in Reaktion auf Netzfehler.

**[0008]** Die erfindungsmäßige Lösung liegt in den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche. Vorteilhaftere Weiterbildungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

**[0009]** Bei einem Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage mit einem von einem Windrotor angetriebenen Generator und einem Umrichter, der einen maschinenseitigen Wechselrichter, einen Zwischenkreis, einen netzseitigen Wechselrichter und eine Umrichtersteuerung umfasst, einer Drossel und einen Ausgabeanschluss zur Abgabe der vom Generator erzeugten elektrischen Leistung an ein Netz, welches eine Sollfrequenz und Sollspannung aufweist, wobei der maschinenseitige Wechselrichter von einem ersten Regler und der netzseitige Wechselrichter von einem zweiten Regler kontrolliert wird, ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass zumindest der zweite Regler als ein komplexer Spannungsregler ausgeführt ist mit einem Ausgang für eine komplexe Spannung  $U_{WR}^*$  als Stellgröße, welche Signale enthält für eine Amplitude der Sollspannung des Wechselrichters und eine Sollphasenlage, welche angelegt ist an einen Stellgrößeneingang der Umrichtersteuerung zum Ansteuern zumindest des netzseitigen Wechselrichters.

**[0010]** Unter einer komplexen Spannung wird eine Spannung verstanden, die nach Amplitude und Phase definiert ist. Ein komplexer Spannungsregler ist demgemäß ein Regler, der zur Regelung einer solchen komplexen Spannung ausgeführt ist.

**[0011]** Bei der Drossel kann es sich um eine umrichtereigene Induktivität oder um ein Netzfilter, vorzugsweise der LCL-Bauart, in der Anschlussleitung handeln, oder um eine Kombination daraus.

**[0012]** Die Erfindung macht sich die Erkenntnis zu Nutze, dass der Umrichter mit seinen stromeinprägenden Stromventilen (IGBT, GTO, etc.) in Kombination mit der Drossel als steuerbare Spannungsquelle zu betreiben. Im Gegensatz dazu werden herkömm-

licherweise Umrichter – wegen ihrer Ausrüstung mit schaltbare Stromventilen – stromeinprägend, also als Stromquellen betrieben, wobei die Stellgrößen Stromwerte umfassen (in der Regel Inphasestrom  $I_d$  und Quadraturstrom  $I_q$ ). Erfindungsgemäß wird nun der gegenteilige Weg beschritten und stattdessen eine Amplitude für eine Spannung vorgegeben, wie sie von einer idealen Spannungsquelle abgegeben würde, und ferner eine Phasenlage definiert, welche diese Spannung in Bezug auf Netzspannung haben soll. Damit werden als Stellgröße an den Umrichter Signale für Amplitude und Phase der von ihm abzugebenden Spannung angelegt, mithin also ein komplexes Spannungssignal.

**[0013]** Durch diese auf den ersten Blick paradox erscheinende Maßnahme, den von Haus durch die Stromventile stromeinprägenden Umrichter zu betreiben wie eine ideale Spannungsquelle, werden (in Kombination mit der Drossel) in frappierende Weise signifikante Vorteile erzielt. So wird mit der erfahrungsgemäßen Regelung eine beträchtliche Verbesserung des Störverhaltens des Umrichters erreicht. Das gilt insbesondere in Bezug auf bisher problematische hochdynamische Störungen, wie sie durch Netzfehler entstehen. Ändert sich die Spannung im Netz aufgrund eines Netzfehlers, so wird durch das Absinken der Spannung im Netz die Spannungsdifferenz über der Drossel erhöht, sodass somit unmittelbar mehr übererregter Blindstrom eingespeist wird, ohne dass es dazu einer Veränderung der Stellgrößen bedarf. Die somit erhöhte Blindleistungseinspeisung führt zu einer Stabilisierung der Spannung im Netz. Das eigenstabile Verhalten des Umrichters wird dadurch erheblich verbessert.

**[0014]** Entsprechendes gilt in Bezug auf Störungen in der Wirkleistungsbilanz des Netzes. Wird aus einem Netz mehr Leistung entnommen als eingespeist wird, so verringert sich die Netzfrequenz und es kommt somit als Folge zu einem Anstieg des Phasenwinkels. Da die von dem als ideale Spannungsquelle betriebenen Umrichters in das Netz abgegebene momentane Wirkleistung bestimmt ist durch das Produkt der an den beiden Enden der Drossel anliegenden Spannungen geteilt durch die Impedanz der Drossel, multipliziert mit dem Sinus des Phasenwinkels zwischen der Spannung im Netz und der Spannung des Wechselrichters, erhöht sich bei einem Anstieg des Phasenwinkels die Wirkleistungseinspeisung, da auch der Sinuswert des Phasenwinkels entsprechend ansteigt. Damit wird unmittelbar dem aus mangelnder Leistungseinspeisung entstandenen Ungleichgewicht im Netz entgegengewirkt. Es verbessert sich also auch die Eigenstabilität in Bezug auf die Wirkleistungsbilanz bzw. deren Defizite im Netz.

**[0015]** Insgesamt erreicht die Erfindung somit eine signifikante Verbesserung der Eigenstabilität des Umrichters in Bezug auf Änderungen im Netz, so dass

er deutlich dynamischer auf Störungen im Netz, insbesondere Netzfehler wie Spannungseinbruch oder Kurzschluss, reagieren kann. Die Reaktion ist viel schneller als sie bei den herkömmlichen betriebenen Umrichtern, welche die Signale erst am Eingang einer umfangreichen Regelung mit entsprechend hohen Signalverarbeitungszeiten auswerten und erst nach der Signalverarbeitungszeit reagieren können. Die Signalverarbeitungszeit erstreckt sich in der Regel über mindestens eine oder gar mehr Perioden der Netzschwingung, so dass häufig Verzögerungszeiten von meist mindestens 40 Millisekunden die Folge sind. Im Gegensatz hierzu kann erfindungsgemäß eine viel schnellere Reaktion dank der verbesserten Eigenstabilität erreicht werden, die im Bereich von zwei bis drei Millisekunden liegt. Mit einem solchen Umrichter versehene Windenergieanlage stellt somit im Betrieb einen ebenbürtigen Partner im Netz für die Synchrongeneratoren konventioneller Kraftwerke da, welche bisher im Wesentlichen alleine die Stabilisierung des Netzes übernahmen. Mit der Erfindung kann nunmehr auch in von Windenergieanlagen dominierten Netzen eine hinreichende Eigenstabilität erreicht werden.

**[0016]** Es ist vorteilhaft, bei Einstellung der Stellgröße einen zulässigen Strom im Umrichter zu bestimmen mittels eines Stromprädiktors. So günstig es unter dem Aspekt eines schnellen Störverhaltens ist, auf Störgrößen im Netz mit einer schnellen Reaktion des Umrichters zu antworten, so wichtig ist es jedoch auch, dass der Umrichter dabei vor Überlastung geschützt wird. Mit dem Stromprädiktor wird erreicht, dass schnell ein Erwartungswert für den Stromfluss im Umrichter bestimmt werden kann, um festzustellen, ob dieser noch in zulässigen Grenzen (zulässiger Strom) liegt. Zweckmäßigerweise erfolgt bei Überschreitung einer einstellbaren Grenze, die der zulässige Strom sein kann oder gegebenenfalls zumindest dynamisch auch etwas darüber liegen kann, ein Begrenzen der Stellgröße. Vorzugsweise ist dafür ein Stromwächter vorgesehen. Der Umrichter wird damit vor Überlastung geschützt, ohne dass es dabei zu Verzögerungen kommt. Besonders zweckmäßig ist, beim Bestimmen des erwarteten Stroms und/oder der einstellbaren Grenze eine Referenzspannung zu berücksichtigen, die vorzugsweise von extern angelegt ist.

**[0017]** Mit Vorteil wird der zulässige Strom bestimmt mittels eines einstellbaren Verstärkungsfaktors. Um ein Überschießen zu vermeiden, sollte der Verstärkungsfaktor nicht zu hoch sein. Daher wird dieser zweckmäßigerweise kleiner als fünf gewählt, weiter vorzugsweise beträgt er höchstens drei.

**[0018]** Besonders bevorzugt ist es, wenn der Strom zur Vorsteuerung verwendet wird. Es kann so ein neuer Wert für die Amplitude  $U_{WR}$  bestimmt werden durch Multiplizieren eines Kehrwerts der normierten

Impedanz der Drossel mit einer Differenz der Netzspannung zur Referenzspannung. Dadurch wird ein unmittelbarer Bezug zwischen einer Änderung der Amplitude der Spannung am Wechselrichter (Amplitude des Stellsignals) und den durch die Drossel fließenden Strom hergestellt. Da hierbei die Gefahr eines Überschießens bestehen kann, wird zweckmäßigerweise der sich hieraus ergebende Verstärkungsfaktor begrenzt, wie vorstehend beschrieben. Man erreicht damit einerseits eine schnelle Reaktion, vermeidet aber andererseits ein Übersteuern.

**[0019]** Vorzugsweise wird eine ideale Netzspannung  $U_{Netz}$  bestimmt und mit der gemessenen Netzspannung  $U_{Netz}$  verglichen, ein Korrektursignal für die Stellgröße gebildet auf Basis dieses Vergleichs und das Stellsignal anhand des Korrektursignals modifiziert. Bei der idealen Netzspannung handelt es sich vorzugsweise um eine Oberschwingungsfreie, sinusförmige Spannung. Durch den Vergleich mit der gemessenen, realen Netzspannung werden so Oberschwingungen aufgedeckt. Indem daraus ein Korrektursignal gebildet wird und das Stellsignal entsprechend modifiziert wird, kann auf elegante Weise gleichzeitig eine Reduktion störender Oberschwingungen erfolgen. Um gezielt eine Reduktion der störenden Oberschwingungen (die an sich frei vorgegeben werden können) zu erreichen, ist vorzugsweise ein Frequenzbandfilter vorgesehen, womit das Modifizieren des zu korrigierenden Frequenzbands selektiv durchgeführt wird. Damit kann gezielt eine Abschwächung der Oberschwingungen, und zwar wahlfrei je nach deren Ordnung erfolgen. Insbesondere ist damit auch ermöglicht, gewünschte Oberschwingungsbereiche, wie beispielsweise Signale von Rundsteueranlagen o. ä., ungehindert passieren zu lassen.

**[0020]** Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung werden vorzugsweise Gegensystemspannungen und -ströme im Netz bestimmt, daraus eine zulässige Änderung für Blindstrom im Gegensystem auf Basis einer Gegensystemreferenzspannung  $U_{ref.g}$  ermittelt, und Korrekturwerte für das Stellsignal bestimmt, sodass die Stromänderung im Gegensystem noch zulässig bleibt. Durch das Bestimmen des Gegensystems können Unsymmetrien zwischen den Phasen aufgedeckt werden, wie sie sich durch symmetrische Belastungen oder aber durch einphasige Fehler im Netz ergeben können. Insbesondere letzteres ist von hoher praktischer Bedeutung und kann zu erheblichen Belastungen führen. Um dem entgegenzuwirken werden Korrekturwerte für das Stellsignal bestimmt, sodass die geänderten Ströme im Gegensystem noch innerhalb einer zulässigen Grenze bleiben. Dabei wird eine Überlastung auch im Fall von Phasenunsymmetrien, insbesondere einphasigen Kurzschlüssen vermieden.

**[0021]** Zweckmäßigerweise weist zumindest der zweite Regler eine Blindleistungsregelung auf, die zweischleifig ausgeführt ist, mit einer langsamen äußeren Schleife und einer schnellen inneren Schleife. Unter schnell und langsam wird hier ein Unterschied in den Zeitkonstanten von mindestens einer Größenordnung (also Faktor 10 oder mehr) verstanden. Besonders bevorzugt ist es, wenn entsprechend auch eine zweischleifige Wirkleistungsregelung für den zweiten Regler vorgesehen ist, mit einer langsamen äußeren Schleife und einer schnellen inneren Schleife. Die langsame äußere Schleife dient primär zur Einhaltung von Führungsgrößen und zu Erreichung stationärer Genauigkeit. Sie kann vorzugsweise unter Einbindung eines Windparkreglers ausgeführt sein bei Windenergieanlagen, die Teil eines Windparks sind. Sie kann aber genauso gut auch an der Windenergieanlage selbst vorgesehen sein – bei Verwendung der Windenergieanlage in einem Windpark ist dann zweckmäßigerweise noch eine weitere äußere Regelschleife am Parkmaster vorgesehen zur Koordination mit den anderen Windenergieanlagen im Windpark.

**[0022]** Im Interesse einer besonders schnellen Reaktion sind es zweckmäßigerweise allein die inneren Schleifen, welche die Werte für Amplitude und Phase des komplexen Stellsignals ermitteln. Damit werden die langsamen äußeren Regelschleifen nicht benötigt, so dass sie nicht zu einer Verzögerung führen. Dies schließt selbstverständlich nicht aus, dass ggf. noch optionale Korrekturwerte aufgeschaltet werden – obwohl dies aber nicht erforderlich ist.

**[0023]** Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform fungieren eine oder beide inneren Schleifen als eine Störgrößenaufschaltung. Zweckmäßig ist eine Ausführung als Vorsteuerung. Damit kann auf direktem Weg sehr schnell auf Störgrößenänderungen reagiert werden. Somit erreicht die Windenergieanlage mit Umrichter Reaktionszeiten auf Störungen, wie sie bisher typischerweise klassischen Synchrongeneratoren konventioneller Kraftwerke vorbehalten waren. Es ist sinnvoll, Störgrößenaufschaltung so auszulegen, dass sie dominanter ist als der Führungsgrößen verarbeitende Teil des Reglers. Unter ‚dominanter‘ wird hierbei verstanden, dass zumindest in dynamischer Hinsicht die Störgrößenaufschaltung einen größeren Einfluss ausübt als der Führungsteil des Reglers. Dem Fachmann sind Mittel bekannt, die ‚Dominanz‘ zu bestimmen, beispielsweise anhand der Eigenwerte der entsprechenden Regler-/Streckenmatrix im Zustandsraum.

**[0024]** Es sei angemerkt, dass nach einem Kerngedanken der Erfindung das komplexe Stellsignal in seinen Grundwerten direkt berechnet wird, d. h. ohne dass vorher aufwendige Regelungsstrukturen und/oder aufwendige Berechnungen involviert wären, wie sie für Mit-/Gegensystem erforderlich wä-

ren. Dadurch ergibt sich eine sehr schnelle Reaktion in der Art einer Vorsteuerung. – Die schnelle Erstreaktion schließt aber nicht aus, dass quasi im Nachgang noch Korrekturwerte berechnet, die dann auf die Grundwerte aufgeschaltet. Für solche nachgelagerten Korrekturen kann dann im Rahmen der Erfindung auch auf aufwendigere und zeitintensivere Funktionen, wie solche mit Bestimmung des Mit-/Gegensystems zurückgegriffen werden. Dies führt also lediglich zu einer Verfeinerung, keineswegs aber zu einer Verzögerung.

**[0025]** Die Erfindung bezieht sich ferner auf eine Windenergieanlage, deren Regler zur Ausführung des Verfahrens ausgebildet sind. Ferner erstreckt sich auf eine Anwendung in einem Windpark.

**[0026]** Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Zeichnung beispielhaft erläutert. Es zeigen:

**[0027]** Fig. 1 eine Übersichtsdarstellung eines Ausführungsbeispiels mit einem Windpark zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

**[0028]** Fig. 2 ein Ersatzschaltbild zu einem Windenergieanlagen-Umrichter;

**[0029]** Fig. 3 eine Übersichtsdarstellung für eine Windenergieanlage;

**[0030]** Fig. 4 eine Darstellung von Stellgrößen am Eingang des Umrichters;

**[0031]** Fig. 5 eine äußere Regelschleife für Wirkleistung;

**[0032]** Fig. 6 eine äußere Regelschleife für Blindleistung;

**[0033]** Fig. 7 eine Übersichtsdarstellung der Blindleistungsregelung an der Windenergieanlage;

**[0034]** Fig. 8 eine erste Teildarstellung der Regelung gemäß Fig. 7;

**[0035]** Fig. 9 eine zweite Teildarstellung gemäß Fig. 7 mit einer schnellen inneren Blindleistungsregelschleife;

**[0036]** Fig. 10 eine dritte Teildarstellung gemäß Fig. 7 mit zwei Begrenzungseinheiten;

**[0037]** Fig. 11 eine Darstellung zur schnellen inneren Regelschleife der Wirkleistungsregelung an der Windenergieanlage;

**[0038]** Fig. 12 eine Teildarstellung zu einer ersten Begrenzungseinheit; und

**[0039]** Fig. 13 eine Detaildarstellung zu einer zweiten Begrenzungseinheit.

**[0040]** Ein Ausführungsbeispiel für die Erfindung wird anhand der Figuren erläutert. In dem Ausführungsbeispiel wird die Erfindung in einem Windpark mit einem Parkmaster und mehreren Windenergieanlagen verwendet. Sie kann aber auch verwendet werden für einzelne Windenergieanlage, wobei dann die Funktionalitäten des Parkmasters an der Windenergieanlage selbst vorzusehen sind.

**[0041]** Der Windpark umfasst einen Windparkregler **1** als Parkmaster, der über ein parkinternes Netz **2** mit einer Mehrzahl von Windenergieanlagen **3** verbunden ist. Die Windenergieanlagen **3** sind über einen Anschlusspunkt **30** an das parkinterne Netz angeschlossen. Dieses wiederum ist über einen Verknüpfungspunkt **20** über einen Transformator **28** und eine Anschlussleitung **29** an ein Energieübertragungsnetz **9** angeschlossen ist. Die Impedanzen im parkinternen Netz **2** und die der Anschlussleitung **29** sind durch konzentrierte Elemente **21** bzw. **31** dargestellt.

**[0042]** Die Windenergieanlagen **3** im Windpark umfassen jeweils einen Windrotor **10** zum Antrieb eines Generators **12** über ein optionales Getriebe **11**. Bei dem Generator **12** kann es sich beispielsweise um einen doppelgespeisten Asynchrongenerator **12'** handeln. Hierbei ist dessen Stator unmittelbar mit einer Anschlussleitung **19** verbunden, die über einen Anlagentransformator **18** an das parkinterne Netz **2** angeschlossen ist. Der Rotor der doppelt gespeisten Asynchronmaschine **12'** ist hingegen über einen Umrichter **4** mit einer nachgeschalteten Drossel **5** an die Anschlussleitung **19** angeschlossen. Der Umrichter **4** umfasst einen maschinenseitigen Converter **41**, einen netzseitigen Converter **42** und einen sie verbindenden Gleichspannungszwischenkreis **43**. Sein Betrieb wird kontrolliert von einer Umrichtersteuerung (in Fig. 1 aus Übersichtsgründen nicht dargestellt), welche Schaltelemente in den Convertern **41**, **42** betätigt und an die wiederum eine WEA-Regelung **14** angeschlossen ist. Es sei angemerkt, dass der Generator **12** auch eine andere Bauform aufweisen kann, beispielsweise als ein Synchrongenerator (s. Fig. 3), wobei dann der Umrichter **4** als ein Vollumrichter ausgeführt ist.

**[0043]** Eine vom Betreiber des Netzes **9** unterhaltene Leitwarte **90** gibt Sollwertvorgaben an den Windparkregler **1** aus. Im dargestellten Ausführungsbeispiel sind es Sollvorgaben für die Sollspannung  $U$ , die bereitzustellende Blindleistung  $Q$  bzw. eine Leistungsfaktor  $\cos\varphi$  und die von dem Windpark abzugebende Wirkleistung  $P_{ref}$  (letzteres ist der schwankenden Natur des Windes entsprechend nur als Maximalgrenze zu verstehen). Der Netzbetreiber erwartet, dass diese Sollwerte am Verknüpfungspunkt **20** anliegen.

**[0044]** Um dies zu überwachen, sind an dem Verknüpfungspunkt **20** Sensoren **22** und **23** für Strom und Spannung angeordnet, deren Messsignale an Eingänge des Windparkreglers **1** angelegt sind. Der Windparkregler weist interne Regelungen auf (die später noch näher erläutert werden) und ermittelt aus den Messwerten der Sensoren **22**, **23** sowie aus den Sollwerten des Netzbetreibers Führungsgrößen für die einzelnen Windenergieanlagen **3** des Windparks. In dem dargestellten Ausführungsbeispiel handelt es sich um Größen für eine Sollspannungsabweichung  $\Delta U_{WT,Ref}$  und die (höchstens) abzugebende Wirkleistung  $P_{WT,Ref}$ , welche als Führungsgrößen an die jeweilige WEA-Regelung **14** angeschlossen ist.

**[0045]** Bei dem hier erläuterten Ausführungsbeispiel wird der Umrichter **4** betrieben als eine ideale Spannungsquelle in Kombination mit der Drossel **5**. Wie aus Fig. 2 zu erkennen ist, bildet der Umrichter **4** mit seinem netzseitigen Converter **42** eine ideale Spannungsquelle **42'** mit der eingestellten Spannung  $\vec{u}_{WR}$ , der über eine Drossel **5** mit einer Impedanz  $X_D$  mit dem Netz mit der Spannung  $\vec{u}_{Netz}$  verbunden ist. Sind die beiden Spannung ungleich, so fließt durch die Drossel **5** ein Strom  $\vec{i}_{Netz}$ , der einen Spannungsabfall  $\vec{\Delta v}$  über der Drossel **5** erzeugt.

**[0046]** Bei der als Stellgröße an dem Umrichter **4** eingestellten Spannung  $\vec{u}_{WR}$  handelt es sich um eine komplexe Spannung, die nach Betrag  $U_{WR}$  und Phase  $\phi_{U_{WR}}$  bestimmt ist (s. Fig. 4). Sie fungiert als Stellgröße an der Umrichtersteuerung, welche daraus in an sich bekannter Weise über eine Koordinationstransformation Signale in den drei Phasen eines Drehstromsystems zur Ansteuerung von Schaltelementen im Umrichter erzeugt.

**[0047]** Näher dargestellt ist der Aufbau der WEA-Regelung **14** mit der Umrichtersteuerung in Fig. 3. Demnach sind ein erster Regler **46** für den maschinenseitigen Converter (MSC) **41** und ein zweiter Regler **6** für den netzseitigen Converter (LSC) **42** vorgesehen. Sie wirken über zwei Parameter auf die Umrichtersteuerungen von maschinenseitigem Converter **41** und netzseitigem Converter **42** ein, wobei zumindest für den netzseitigen Converter **42** die Stellgröße ein nach Amplitude und Phase bestimmtes komplexes Spannungssignal ist. Ferner dargestellt ist eine auf Rotorblätter des Windrotors **10** wirkende Pitchregelung **40** für die aus dem Wind entnommene mechanische Leistung, welche auch zu einer Abregelung der Leistungsabgabe ausgebildet ist. Der Windrotor **10** treibt einen Generator, hier einen Synchrongenerator **12**, der die mechanische Leistung in elektrische Leistung wandelt und an den Umrichter **4** ausgibt. Eingangssignale für die WEA-Regelung **14** und die Pitchregelung **40** sind Führungssignale für die Spannung  $\Delta U_{WT,Ref}$  bzw.  $U_{WR,Ref}$  und für die abzugebende Wirkleistung  $P_{WT,Ref}$  bzw.  $P_{Ref}$ . Nachfolgend ist exem-

plarisch der Aufbau des zweiten Reglers **6** beschrieben.

**[0048]** Zur Regelung der Wirk- und Blindleistungsabgabe sind jeweils zweischleifige Regelungen vorgesehen, die je eine äußere und eine innere Regelschleife aufweisen. Hierbei ist die äußere Regelschleife langsamer als die innere. Sie dient zur Erreichung stationärer Genauigkeit in Bezug auf die angelegten Führungsgrößen. Die von ihr ausgegebenen Signale sind an die inneren Regelschleifen angelegt, welche eine größere Dynamik als die äußeren aufweisen. Sie dienen insbesondere zum schnellen Ausregeln von Störungen oder anderen transienten Ereignissen.

**[0049]** Die äußere Regelschleife **64** für die Wirkleistung ist in **Fig. 5** dargestellt. In dem dargestellten Ausführungsbeispiel ist sie im Parkregler implementiert; sie könnte aber genauso gut auch an der Windenergieanlage **3** selbst vorgesehen sein. Als Eingangsgrößen sind ein Vorgabewert für die abzugebende Leistung  $P_{WRef}$  von der Leitwarte **90** und Messwerte für abgegebene Wirkleistung  $p_{WP}$  und die Netzfrequenz  $f_{WP}$ , wie sie am Verknüpfungspunkt **20** gemessen sind, angelegt. Es handelt sich hierbei um normierte Größen. Der Vorgabewert  $P_{WRef}$  wird ergänzt (Summationsstelle **641**) um einen aus einer Statik abgeleiteten frequenzabhängigen Korrekturwert, und es wird (Differenzstelle **642**) eine Abweichung zu dem Messwert für die abgegebene Leistung gebildet. Die so gebildete Differenz ist an den Eingang eines Reglerkerns angelegt, der ein P-Teil **643** und eine I-Teil **644** aufweist, die über ein Summationsglied **645** verknüpft sind. Dessen Summenwert wird nach Begrenzung als Führungsgröße  $P_{WT}$  für die abzugebende Wirkleistung an die die Windenergieanlagen **3** ausgegeben.

**[0050]** Die äußere Regelschleife für Blindleistung **65** ist in **Fig. 6** dargestellt. Sie ist im Parkregler **1** implementiert, kann aber ebenfalls genauso gut auch an der Windenergieanlage vorgesehen sein. Als Eingangsgrößen können verschiedene Sollwertvorgaben für die Blindleistung vorgesehen sein. Die Sollwertvorgabe ist in der linken Hälfte von **Fig. 6** dargestellt. Sie umfasst im Beispiel drei Pfade, das sind als erster Pfad **651** der Phasenwinkel  $\varphi_{PCC,ref}$ , als zweiter Pfad **652** die normierte Blindleistung  $q_{PCC,ref}$  und als dritter Pfad **653** eine Sollspannung  $v_{PCC,ref}$ . Die Auswahl des Pfades erfolgt mittels einer Schalteinrichtung **654**. Nach Begrenzung erfolgt an einer Differenzstelle **655** die Bestimmung der Abweichung des Sollwerts von einem gemessenen Wert  $q_{PCC}$  für die abgegebene Blindleistung. Diese Abweichung wird an den Eingang des Reglerkerns **656** angelegt. Er ist als ein PI-Regler ausgeführt. Als Ausgangssignal kann eine Führungsgröße für eine Spannungsänderung an der Windenergieanlage  $\Delta u_{WT,Ref}$  oder ein direktes Blindleistungssignal  $q_{WT,Ref}$  an die WEA-Regelung **14** aus-

gegeben werden. Diese und die äußere Regelschleife für die Wirkleistung sind beide mit großen Zeitkonstanten versehen, so dass sie langsam regeln.

**[0051]** Eine Übersichtsdarstellung zu einer schnellen, inneren Regelschleife **75** für Blindleistung ist in **Fig. 7** dargestellt. Sie ist in drei Teile gegliedert, welche in der Figur mit römischen Ziffern I bis III im Kreis gekennzeichnet sind. Im Teil I-1 wird aus dem vom Parkregler übermittelten Führungswert für die Spannungsänderung durch Addition mit einem Wert für die Spannungsreferenz der Führungswert  $u'_{WR}$  für die einzelne Windenergieanlage erzeugt. Der Teil I-2 beschreibt eine optionale Umwertungseinheit, falls eine Regelung auf einen weiter entfernten Punkt im Netz angestrebt ist. Ausgabewert ist mit oder ohne die Option ein Signal für die Netzspannung  $u_{Netz}$ . Den eigentlichen Reglerkern der schnellen inneren Regelschleife bildet der Teil II. Er umfasst in Teil II-2 mit einer Vorsteuerungseinheit das Herzstück zu Bildung des Amplitudenwerts für das als Stellgröße fungierende komplexe Spannungssignal. Der Teil II-1 dient einer Berechnung von Strömen, um sie ggf. schon vorab prädiaktiv zu begrenzen. Der Teil III umfasst eine frequenzbandselektive Korrektur und dient insbesondere zur Verringerung von Oberschwingungen.

**[0052]** In Teil I wird der Sollwert vom Windparkregler **1** empfangen, genauer gesagt von dessen Blindleistungsregler **65** (s. **Fig. 6**). Es handelt sich bei dem Signal  $\Delta u_{WT,REF}$  um eine Differenzgröße, normalisiert um eine Grundspannung  $u_{ref0}$ . Mittels der Summationsstelle **711** wird somit wieder ein vollwertiges Spannungssignal gebildet und von dem Teil I ausgegeben als Signal  $U_{WR}'$ .

**[0053]** Im Teil II erfolgt die eigentliche Regelung, wie sie Gegenstand des Kerns der Erfindung ist. Über den Block „Vorsteuerung“ wird ein neuer Wert (Grundwert) für die Amplitude der Stellgröße  $U_{WR}$  an den Umrichter **4** gebildet. Dies erfolgt unmittelbar anhand folgender Beziehung:

$$U_{WR} = U_{Netz} + k \cdot i_{qNetz\_Soll}$$

**[0054]** Hierbei ist  $k$  ein Verstärkungsfaktor. Im Grunde ist er gleich dem Kehrwert der normalisierten Impedanz der Drossel **5**, also  $1/X_D$ . Bei typischen Werten für  $X_D$  von ca. 0,1 bis 0,15 ergäbe sich aber ein Verstärkungsfaktor von bis zu  $k = 10$ . Das wäre aber zu viel, gewünscht ist eine einstellbare Verstärkung von beispielsweise  $k = 2$ . Es erfolgt daher eine Begrenzung in dem Block **721**. Er umfasst einen Proportionalanteil **722** für schnellste Reaktion und einen Integralanteil **723** zur (nachgeordneten) Verbesserung der stationären Genauigkeit. Ferner ist noch ein Limiter **724** zur Begrenzung des Stroms zwischen zulässigen Grenzen ( $I_{qmin}$ ,  $I_{qmax}$ ) vorgesehen. Ausgegeben wird ein begrenzter Sollwert  $i_{qNetz\_Soll}$  für den Blind-

strom durch die Drossel **5**. Er wird an die Vorsteuerung **725** angelegt.

**[0055]** Weiter sind Korrektereinheiten **736**, **727** vorgesehen. Sie verändern den Grundwert für die Amplitude des Stellsignals  $U_{WR}$  bei Bedarf so, dass Stromgrenzen nicht überschritten werden. Dazu wird der aktuelle Strom im Netz  $i_{Netz}$  erfasst und mit dem Wert für den neuen Sollwert  $i_{qNetz\_Soll}$  addiert, und über eine PI-Regelblock **736** begrenzt. Optional ist ein Grundschnwingungsfilter 50 Hz **726'** vorgesehen. Ferner wird auf ggf. drohendes Überschreiten einer Maximalgrenze geprüft, und der Grundwert erforderlichenfalls reduziert mittels eines Korrekturwerts aus dem PI-Regelblock **727**.

**[0056]** Zur frequenzabhängigen Beschränkung von Oberschwingungen sind die Blöcke **73**, **74**. Der Block **74** ist im Detail in **Fig. 13** dargestellt. Basierend auf einem Messwert für die Netzspannung  $u_{Netz}$  wird über einen Bandpass **741** eine wählbare Oberschwingung ausgefiltert. Ihr Energiegehalt wird über einen Effektivwertbildner **742** bestimmt, mit einem zulässigen Maximalwert **743** verknüpft und Überschreitungen von dem PI-Regler **744** ausgeregelt. Um hierbei entstehende Phasenverschiebungen zu kompensieren, ist ein Phasenkompensator **745** in einem Parallelzweig angeordnet, dessen Ausgang an der Multiplikationsstelle **747** mit dem Ausgang des PI-Reglers verknüpft wird. Für weitere Oberschwingungen können weitere entsprechende Blöcke **74'** mit anderen Bandpässen vorgesehen sein. Ihre Ausgänge werden über die Summationsstelle **749** zusammengefasst, und als Korrekturwert auf den Grundwert gegeben.

**[0057]** Es ist möglich, dass sich wegen dieser an sich gewünschten Beschränkung der Oberschwingungen übergroße Ströme ergeben können. Da dies zur Überlastung und Beschädigung führen kann, ist mit dem Block **73** eine frequenzabhängige Strombegrenzung vorgesehen. Sie ist funktional ähnlich zu dem Block **74** und umfasst funktionsähnliche Blöcke **731–737**, verwendet als Grundsignal aber den Strom  $i_{Netz}$  im Netz (s. **Fig. 12**). Das Ausgangssignal wird über die Summationsstelle **739** als Korrekturwert auf den Grundwert gegeben.

**[0058]** Mit all den Korrekturen und Begrenzungen wird aus dem Grundwert am Ausgang der Vorsteuerung schließlich der neue Amplitudenwert  $U_{WR}$  als ein Element der Stellgröße für den Umrichter **4**.

**[0059]** Zur Bestimmung des anderen Elements des komplexen Stellsignals, dem Phasenwinkel  $\phi$ , ist der schnelle Wirkleistungsregler **8** vorgesehen (s. **Fig. 11**). Ein Block **81** bildet den eigentlichen Regelekern. An ihm angelegt sind Meßwerte für die Netzspannung, Phasenwinkel im Netz und Netzfrequenz aus einem Signalverarbeitungsblock **811**. Fer-

ner angelegt ist ein Sollsignal für die Wirkleistungsabgabe der Windenergieanlage  $p_{WT,Ref}$  und der Amplitudenwert für das Stellsignal  $U_{WR}$ . Daraus wird mit dem Block **812** ein Maß für einen Referenz-Wirkstrom  $i_{P,REF}$  erzeugt. Ferner wird daraus mittels des Rechenblocks **813** und dem Arcsin-Block **814** ein Grundwert für einen Phasenwinkel  $\delta$  bestimmt. Die Blöcke **813**, **814** basieren auf dem Steuergesetz:

$$P = \frac{u_{WR} * u_{Netz}}{X_D} * \sin(\delta) ,$$

woraus sich nach Auflösung zu dem Winkel  $\delta$  ergibt:

$$\delta = \arcsin\left(\frac{P_{WT,Ref} * X_D}{u_{WR} * u_{Netz}}\right)$$

**[0060]** Zu diesem Winkel  $\delta$  wird an der Summationsstelle fortgeschriebene Netzwinkel hinzuaddiert (Stelle **815**), so dass sich ein Grundwert für den Phasenwinkel als Stellgröße des Umrichters ergibt.

**[0061]** Dieser Grundwert wird durch Block **82** modifiziert abhängig von dem Netzstrom  $i_{Netz}$ . Dazu wird ein Block **821** ein Mitsystem bestimmt und daraus ein Wert für dessen Wirkstrom  $i_{P,Netz}$ . Dieser wird mit dem im Block **81** bestimmten Referenz-Wirkstrom  $i_{P,Ref}$  verknüpft (Stelle **822**) und über einen PI-Block **823** als Korrekturwert auf den Grundwert aufgeschaltet (Stelle **824**). Ferner wird auf ggf. drohendes Überschreiten einer Maximalgrenze geprüft (Block **825**), und der Grundwert erforderlichenfalls reduziert mittels eines Korrekturwerts aus dem PI-Regelblock **826**, der über Stelle **828** aufgeschaltet wird.

**[0062]** Somit ergibt sich schließlich Ausgang **829** von Block **82** ein modifizierter Wert, der als Signal für den Phasenwinkel des komplexen Stellsignals an den Umrichter **4** angelegt wird.

**[0063]** Es sei angemerkt, dass nach einem Kerngedanken der Erfindung das komplexe Stellsignal in seinen Grundwerten direkt berechnet wird, d. h. ohne dass vorher aufwendige Regelungsstrukturen und/oder aufwendige Berechnungen, wie die für Mit-/Gegensystem erforderlich wären. Dadurch ergibt sich eine sehr schnelle Reaktion in der Art einer Vorsteuerung. – Die schnelle Erstreaktion schließt aber nicht aus, dass quasi im Nachgang noch Korrekturwerte berechnet, die dann auf die Grundwerte aufgeschaltet. Für solche nachgelagerten Korrektoren kann dann im Rahmen der Erfindung auch auf aufwendigere und zeitintensivere Funktionen, wie solche mit Bestimmung des Mit-/Gegensystems zurückgegriffen werden. Dies führt also lediglich zu einer Verfeinerung, keineswegs aber zu einer Verzögerung.



## Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage mit einem von einem Windrotor angetriebenen Generator zur Erzeugung elektrischer Leistung, einem Umrichter, einer Drossel und einen Ausgabeanschluss zur Abgabe der vom Generator erzeugten elektrischen Leistung an ein Netz, welches eine Sollfrequenz und Sollspannung aufweist, wobei der Umrichter einen maschinenseitigen Wechselrichter, einen Zwischenkreis, einen netzseitigen Wechselrichter und eine Umrichtersteuerung für die Wechselrichter umfasst, sowie ferner ein erster Regler für den maschinenseitigen Wechselrichter und ein zweiter Regler für den netzseitigen Wechselrichter vorgesehen sind, die auf die Umrichtersteuerung als Stellglied einwirken, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest der zweite Regler komplex ausgeführt ist mit einem Ausgang für ein komplexes Spannungssignal  $U_{WR}^*$  als Stellgröße, welche Signale enthält für eine Amplitude  $U_{WR}$  der Sollspannung des Wechselrichters und eine Sollphasenlage  $\phi_{U_{WR}}$ , wobei diese Stellgröße angelegt ist an einen Stellgrößeneingang der Umrichtersteuerung zum Ansteuern zumindest des netzseitigen Wechselrichters.

2. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch ein Bestimmen eines zulässigen Stroms im Umrichter bei Einstellung der Stellgröße mittels eines Stromprädiktors.

3. Verfahren nach Anspruch 2, gekennzeichnet durch ein Begrenzen der Stellgröße bei Überschreiten einer einstellbaren Grenze für den erwarteten Strom mittels eines Stromwächters.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, gekennzeichnet durch Bestimmen des erwarteten Stroms und/oder der einstellbaren Grenze unter Berücksichtigung einer Referenzspannung, die vorzugsweise von extern angelegt ist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, gekennzeichnet durch Bestimmen der zulässigen Stroms mittels eines einstellbaren Verstärkungsfaktors, der vorzugsweise kleiner ist als 5, weiter vorzugsweise höchstens 3 beträgt.

6. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zulässige Strom bestimmt wird durch Multiplizieren eines Kehrwerts der normierten Impedanz der Drossel mit einer Differenz der Netzspannung zur Referenzspannung.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Bestimmen einer idealen Netzspannung  $U_{Netz}$  und Vergleichen mit der Netzspannung  $U_{Netz}$ , Bilden eines Korrektursignals für die Stellgröße auf Basis des Vergleichs und Mo-

difizieren des Stellsignals anhand des Korrektursignals.

8. Verfahren nach Anspruch 7, gekennzeichnet dass das Modifizieren anhand des Korrektursignals frequenzbandselektiv erfolgt, insbesondere in Abhängigkeit von der Ordnung von Oberschwingungen.

9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Bestimmen von Gegensystemspannungen und -strömen im Netz, Bestimmen einer zulässigen Änderung für Blindstrom im Gegensystem auf Basis einer Gegensystemreferenzspannung  $U_{ref,g}$  und Bestimmen von Korrekturwerten für das Stellsignal so dass die Stromänderung im Gegensystem noch zulässig bleibt.

10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest der zweite Regler eine Blindleistungsregelung aufweist, die zweischleifig ausgeführt ist, mit einer langsamen äußeren Schleife und einer schnellen inneren Schleife.

11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest der zweite Regler ferner eine Wirkleistungsregelung aufweist, die zweischleifig ausgeführt ist, mit einer langsamen äußeren Schleife und einer schnellen inneren Schleife.

12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass vorzugsweise ausschließlich die schnellen inneren Schleifen die Werte für Amplitude und Phase des komplexen Stellsignals ermitteln.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest eine der inneren Schleifen als eine Störgrößenaufschaltung fungiert, die vorzugsweise als eine Vorsteuerung ausgebildet ist.

14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Störgrößenaufschaltung dominanter ist als ein Führungsgrößen verarbeitender Teil des Reglers.

15. Windenergieanlage mit einem von einem Windrotor angetriebenen Generator zur Erzeugung elektrischer Leistung, einem Umrichter, einer Drossel und einen Ausgabeanschluss zur Abgabe der vom Generator erzeugten elektrischen Leistung an ein Netz, welches eine Sollfrequenz und Sollspannung aufweist, wobei der Umrichter einen maschinenseitigen Wechselrichter, einen Zwischenkreis, einen netzseitigen Wechselrichter und eine Umrichtersteuerung für die Wechselrichter umfasst sowie ferner ein erster Regler für den maschinenseitigen Wechselrichter und ein zweiter Regler für den netzseitigen Wechselrichter vorge-

sehen sind, die auf die Umrichtersteuerung als Stellglied einwirken,

**dadurch gekennzeichnet**, dass

zumindest der zweite Regler komplex ausgeführt ist mit einem Ausgang für ein komplexes Spannungssignal  $U_{WR}$  als Stellgröße, welche Signale enthält für eine Amplitude der Sollspannung des Wechselrichters und eine Sollphasenlage, wobei diese Stellgröße angelegt ist an einen Stellgrößeneingang der Umrichtersteuerung zur Ansteuerung zumindest des netzseitigen Wechselrichters.

16. Windenergieanlage nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste und/oder zweite Regler ausgebildet ist zu Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 14.

17. Windpark mit mehreren Windenergieanlagen nach Anspruch 15 oder 16 und einem Windparkregler als Parkmaster, wobei der Windparkregler in Verbindung mit Reglern der Windenergieanlage ausgebildet ist zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 14.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

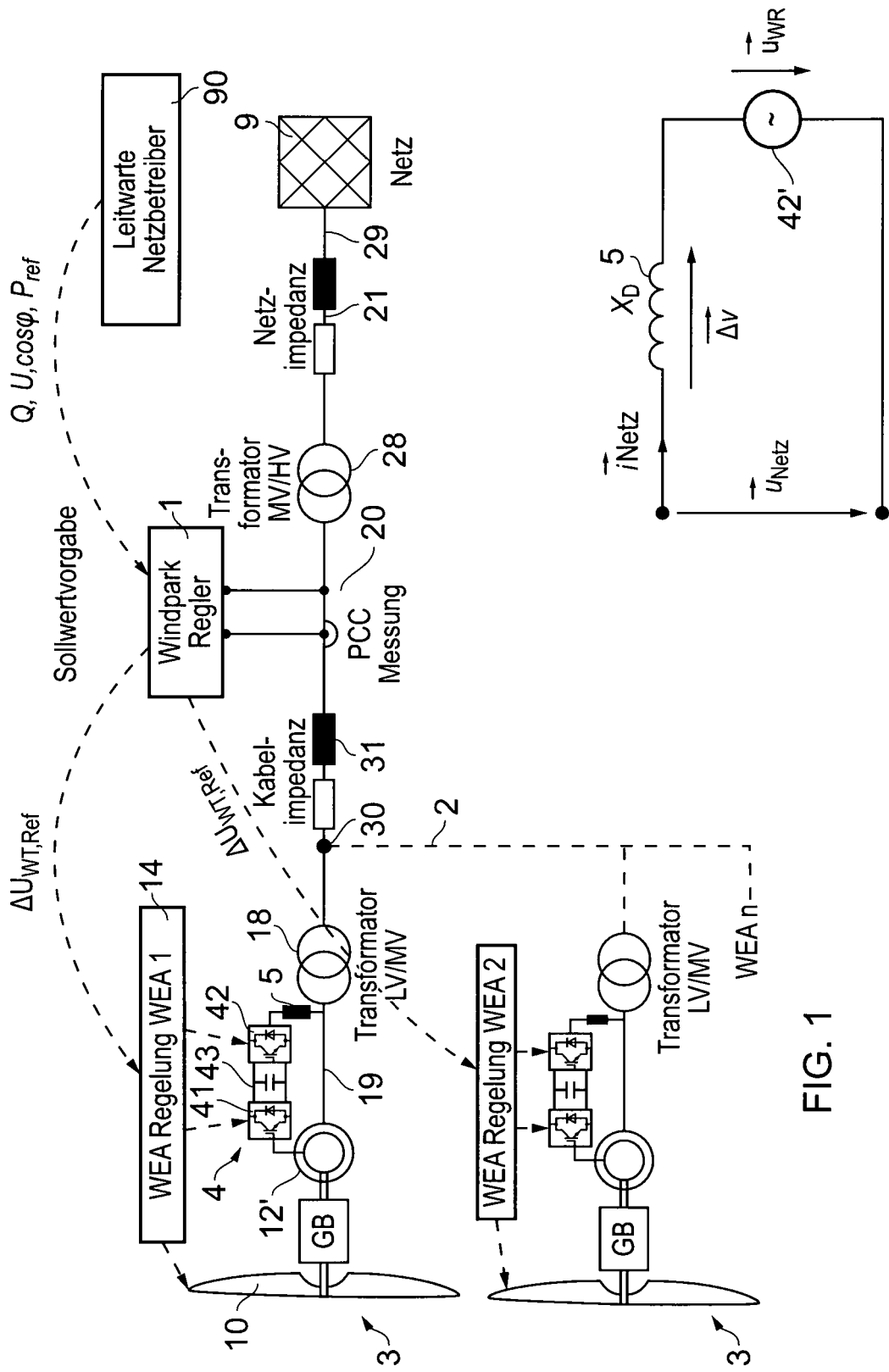


FIG. 1

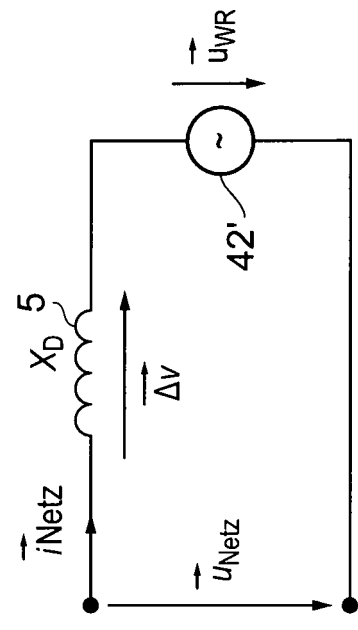


FIG. 2

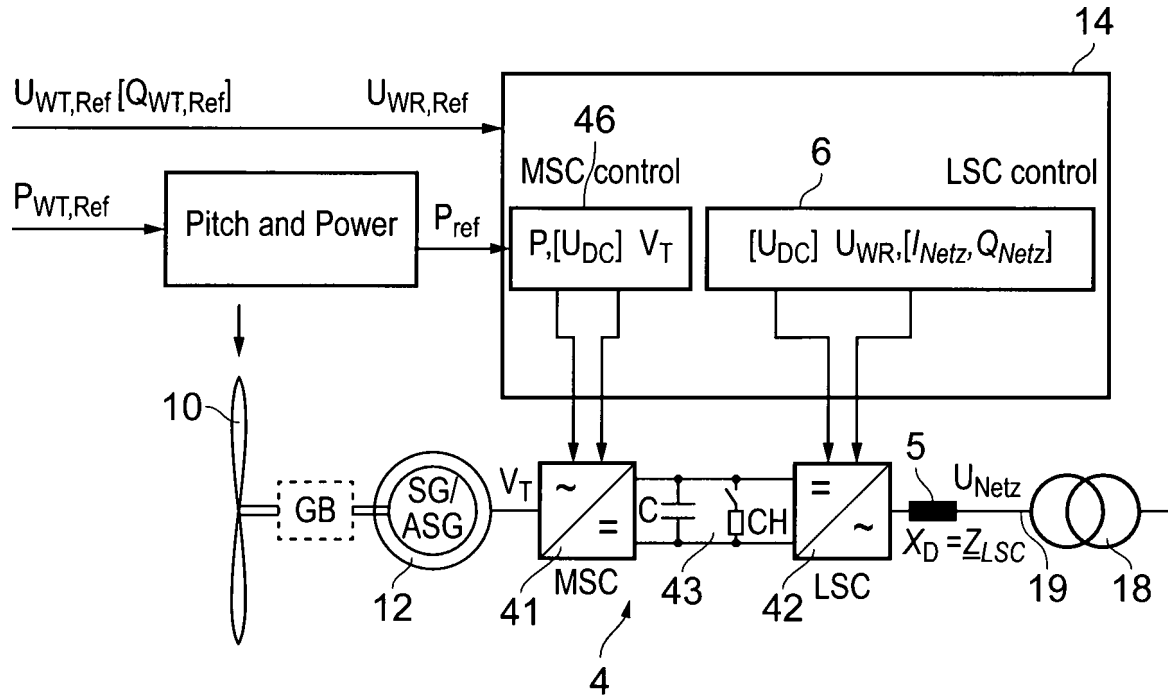


FIG. 3

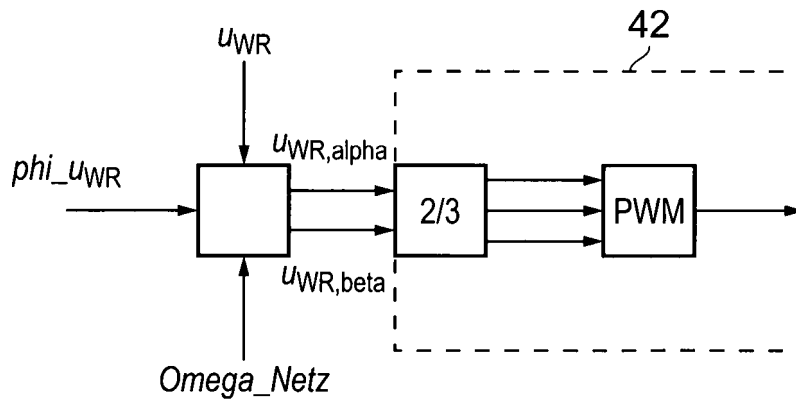


FIG. 4

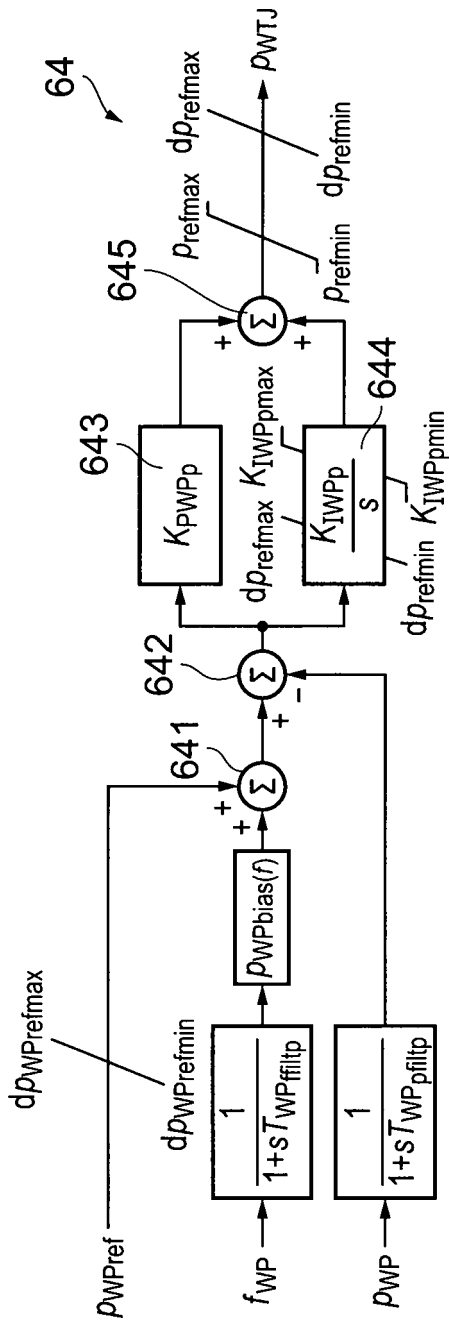


FIG. 5

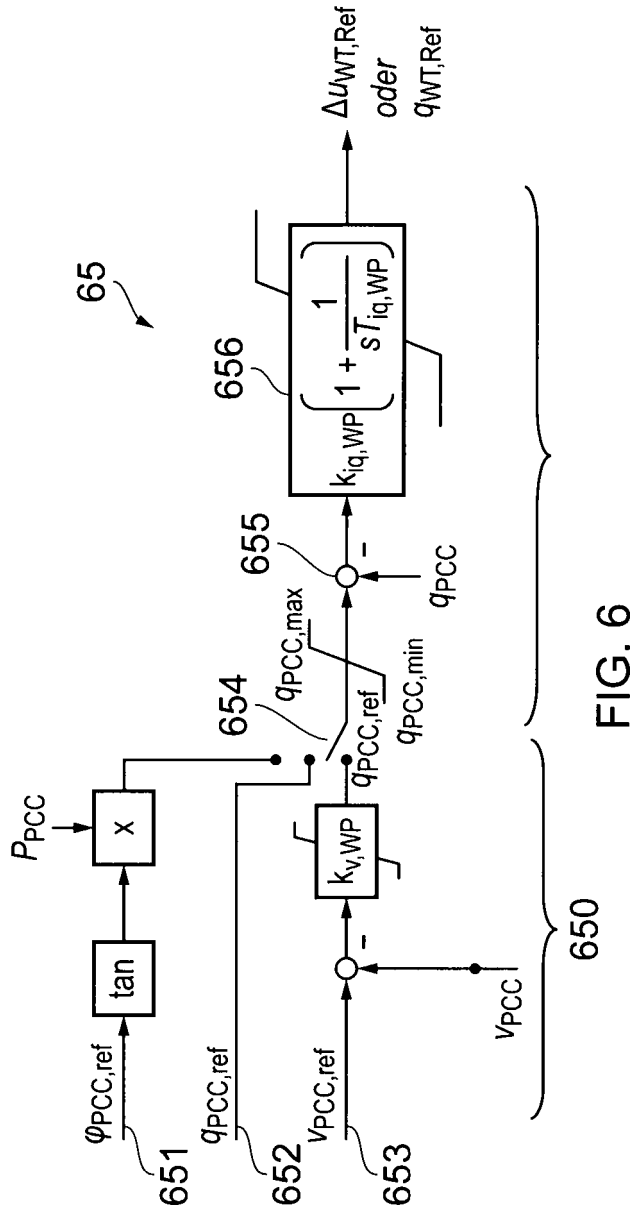


FIG. 6

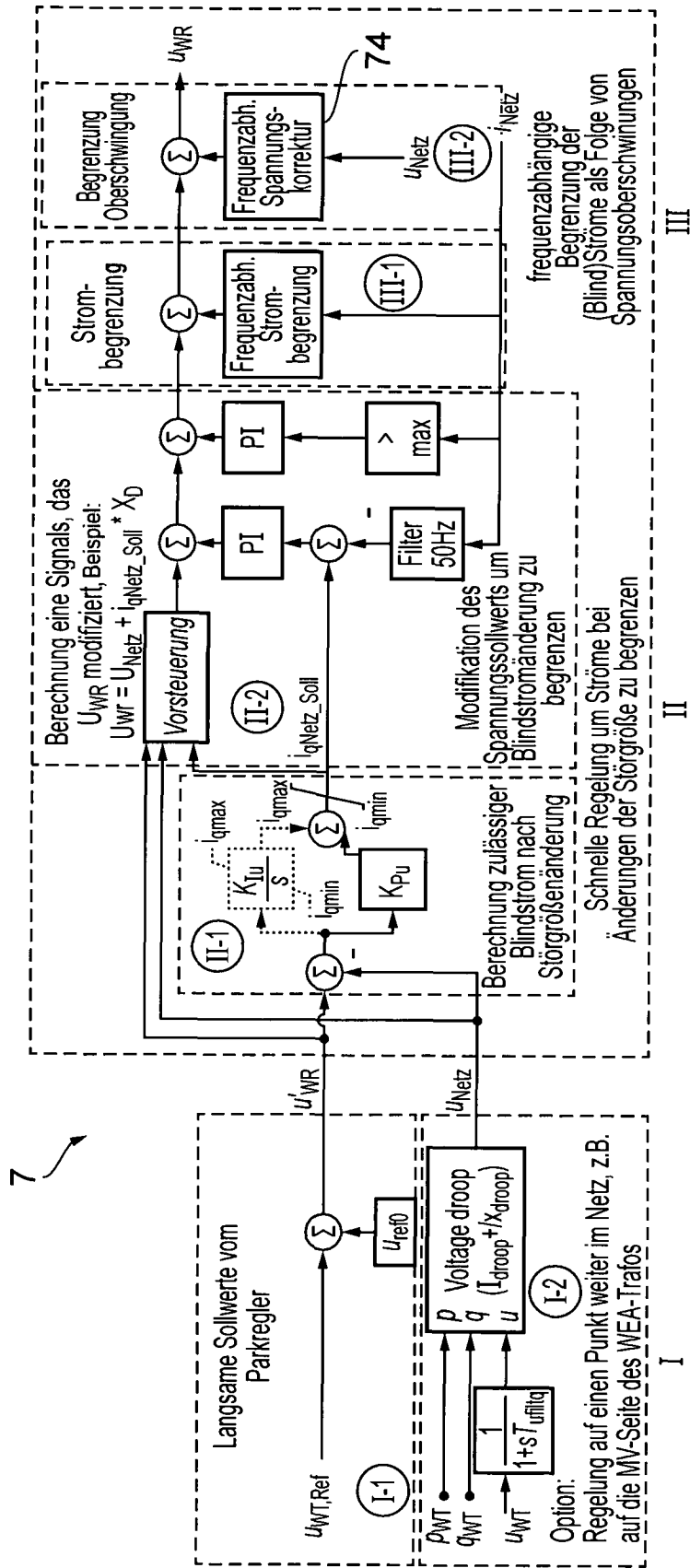


FIG. 7



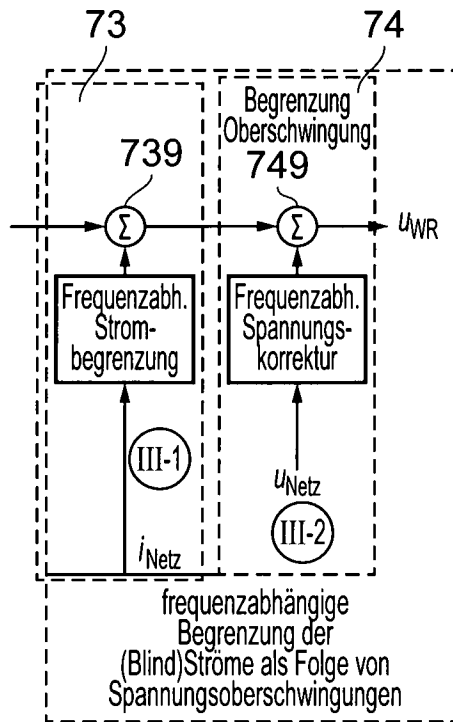


FIG. 10

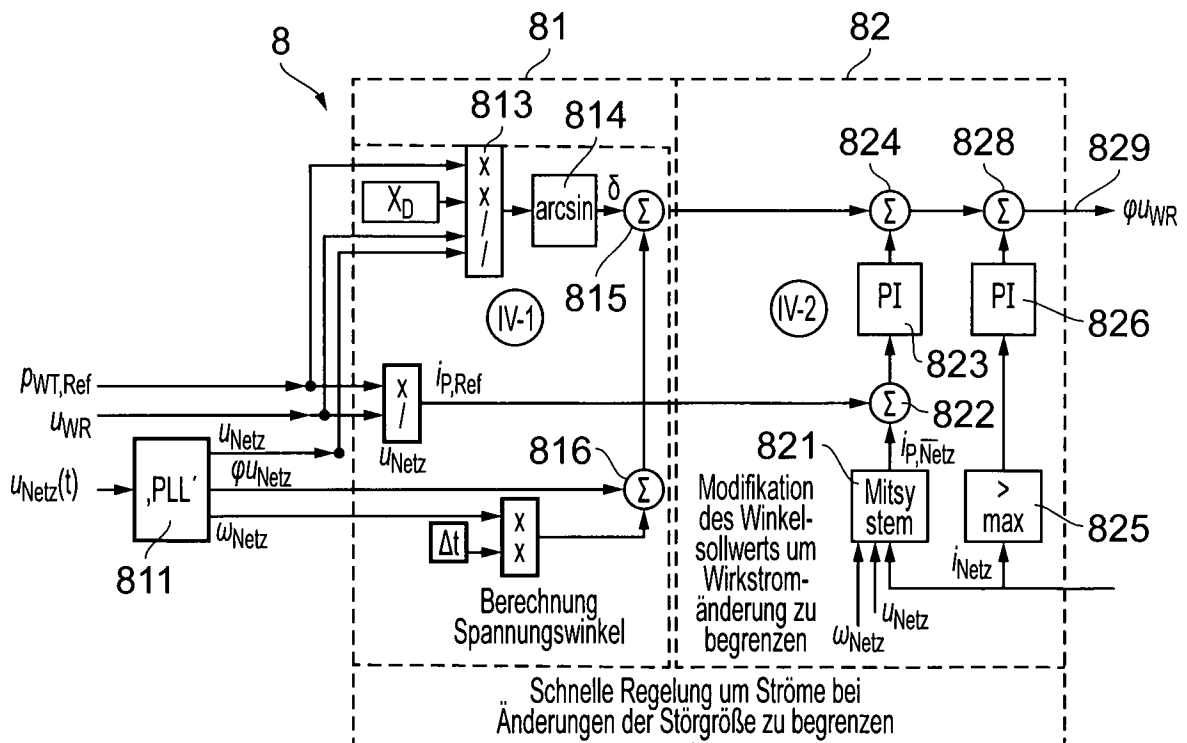


FIG. 11



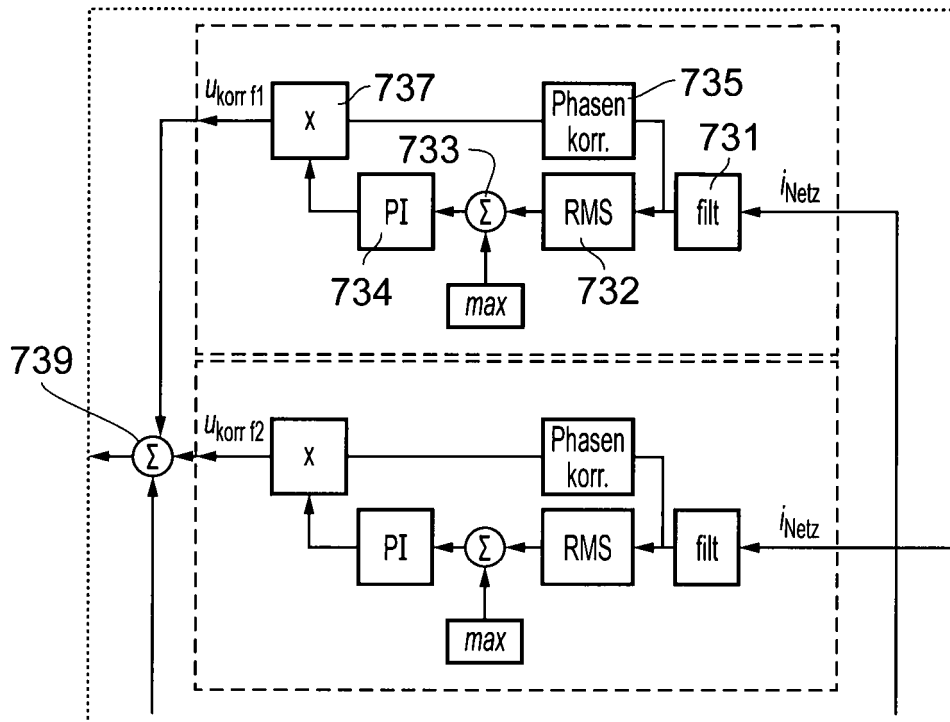


FIG. 12

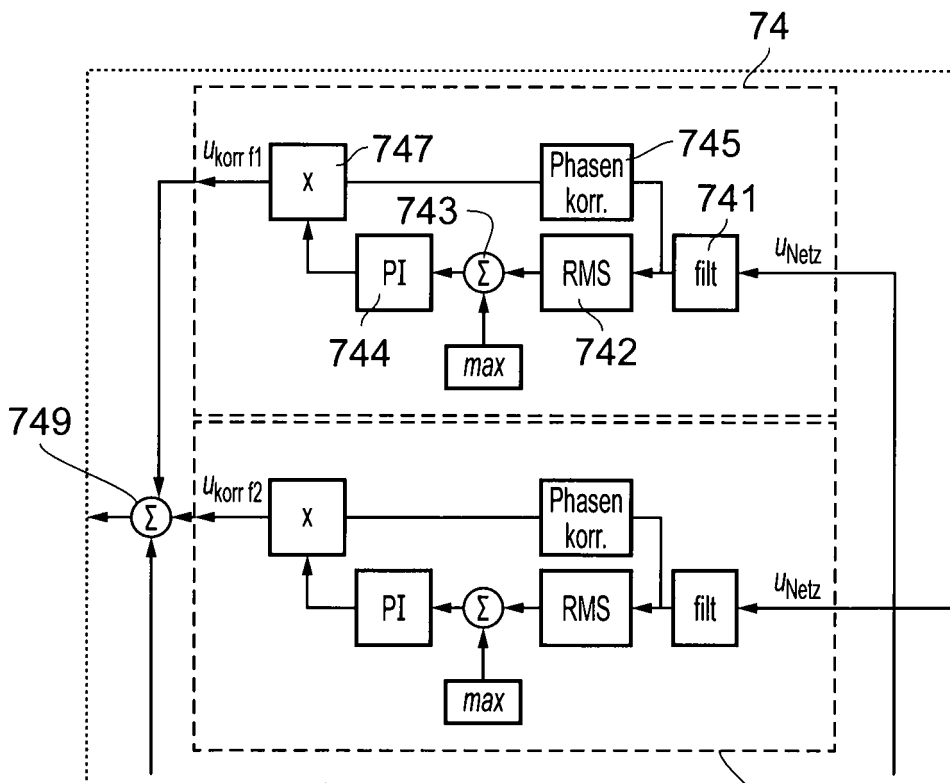


FIG. 13