



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2012 222 948.5**  
 (22) Anmeldetag: **12.12.2012**  
 (43) Offenlegungstag: **12.06.2014**

(51) Int Cl.: **H02J 3/00 (2006.01)**

(71) Anmelder:  
**Siemens Aktiengesellschaft, 80333, München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**EP 1 990 906 B1**

(72) Erfinder:  
**Benesch, Norbert, 90562, Heroldsberg, DE**

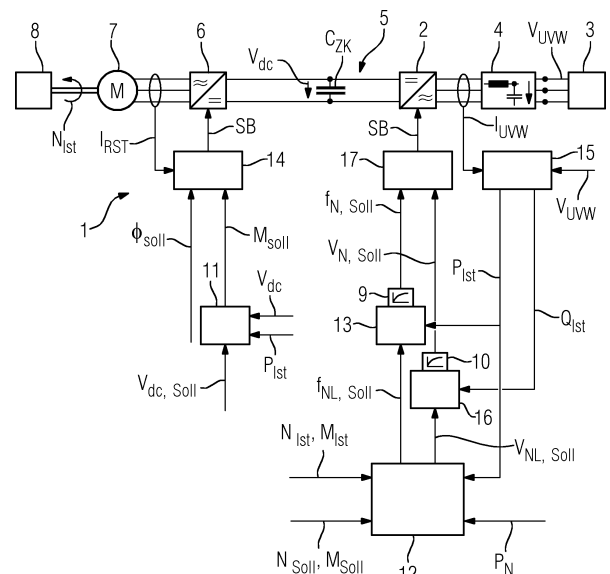
**CHANDORKAR, M.C. [et al.]: Control of Parallel Connected Inverters in Standalone ac Supply Systems. IEE Transactions on Industry Applications, Vol.29, No.1, January/February 1993, S.136-143.**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Schaltungsanordnung zum Stabilisieren eines Wechselstromnetzes**

(57) Zusammenfassung: Stromnetze sollen besser stabilisiert werden. Dazu wird eine Schaltungsanordnung und ein Verfahren zum Stabilisieren eines Wechselstromnetzes durch aktives Wechselrichten eines Wechselstroms des Wechselstromnetzes in einen Gleichstrom eines Zwischenkreises (5) durch einen Netzwechselrichter (2), Erfassen einer Ist-Wirkleistung ( $P_{Ist}$ ) und einer Ist-Blindleistung ( $Q_{Ist}$ ) eines Leistungsaustausches zwischen dem Netzwechselrichter (2) und dem Wechselstromnetz (3) sowie Gewinnen eines Schaltbefehls (SB) für den Netzwechselrichter (2) in Abhängigkeit von der Ist-Wirkleistung ( $P_{Ist}$ ) und einer Soll-Leerlaufnetzfrequenz ( $f_{NL, Soll}$ ) sowie in Abhängigkeit von der Ist-Blindleistung ( $Q_{Ist}$ ) und einer Soll-Leerlaufnetzspannung ( $V_{NL, Soll}$ ) vorgeschlagen. Es erfolgt ein Steuern oder Regeln des Netzwechselrichters (2) anhand des Schaltbefehls (SB) sowie ein Ermitteln der Soll-Leerlaufnetzfrequenz ( $f_{NL, Soll}$ ) und der Soll-Leerlaufnetzspannung ( $V_{NL, Soll}$ ) aus der Ist-Wirkleistung ( $P_{Ist}$ ), einer vorgegebenen verfügbaren Netzleistung ( $P_N$ ) des Wechselstromnetzes (3), einer Ist-Verbraucherleistung ( $N_{Ist}$ ,  $M_{Ist}$ ) eines an den Zwischenkreis (5) angeschlossenen Stellglieds (1) und einer vorgegebenen Soll-Verbraucherleistung ( $N_{Soll}$ ,  $M_{Soll}$ ) für das Stellglied (1). Schließlich wird die Gleichspannung ( $V_{dc}$ ) des Zwischenkreises (5) mittels Energiepufferung in dem Stellglied (1) geregelt.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Stabilisieren eines Wechselstromnetzes sowie eine entsprechende Schaltungsanordnung.

**[0002]** In leistungsschwachen Inselnetzen und eventuell auch in einem so genannten „Smart-Grid-Verbundnetz“ steht teilweise keine ausreichende Wirk- und Blind-Erzeugerleistung für den dynamisch stabilen Betrieb großer wechselrichtergespeister Verbraucher zur Verfügung. Dadurch können im Netz Spannungsüberschwingungen oder auch Netzzusammenbrüche auftreten, die die Versorgungssicherheit beeinträchtigen oder zu Beschädigungen führen.

**[0003]** Die Entwicklung im Bereich elektrischer Netzwerke ist durch mehrere Trends gekennzeichnet:

– Auf der einen Seite sinkt die Zahl der leistungsfähigen Kraftwerke mit der Fähigkeit zur Regelung von Netzfrequenz und Netzspannung. Die Menge der rotierenden Schwungmassen (Generatoren, Turbinen), die durch ihre Trägheit kurzzeitige Schwankungen der benötigten Verbraucherleistung puffern kann, wird kleiner. Stattdessen nimmt die Zahl der erneuerbaren Energiequellen zu, die über Stromrichter – in erster Näherung unabhängig von Betriebspunktschwankungen im Netz – ihre Energie einspeisen und sich somit nicht an der primären Frequenzregelung und nicht (oder nur teilweise) an der Spannungsregelung im Netz beteiligen.

– Auf der anderen Seite steigt bei den elektrischen Verbrauchern die Zahl der Konstant-Leistungssenken, also Verbrauchern, die mithilfe von leistungselektronischen Schaltungen die momentan benötigte Leistung dem Netz entnehmen – in erster Näherung unabhängig von Frequenz- und Spannungsschwankungen des Netzes. Beispielsweise ist es aus Energieeffizienzgründen häufig sinnvoll, bislang direkt am Netz angeschlossene elektrische Antriebe (typisch Pumpen, Lüfter) mit geregelten Wechselrichtern im optimalen Betriebspunkt zu betreiben. Teilweise wird dies bereits auch vom Gesetzgeber gefordert. Durch die leistungselektronische Schaltung wird der Leistungsbedarf des Antriebs allerdings von der Netzfrequenz entkoppelt, abhängig von der Ausprägung des Wechselrichters gilt dies auch für die Netzspannung. Dies kann z. B. für eine optimale Prozessführung zwingend notwendig sein. In vielen Anwendungsfällen wäre diese Entkopplung jedoch nicht erforderlich.

**[0004]** Damit lassen sich zwei gegenläufige Entwicklungen ableiten, die jeweils die Netzstabilität beeinträchtigen: Im Vergleich zur benötigten Verbraucherleistung sinkt die verfügbare Regelleistung für kurzfristige Leistungsschwankungen. Gleichzeitig nimmt

die Zahl der Verbraucher zu, die dem Netz unabhängig von Frequenz- und Spannungsschwankungen Leistung entnehmen. Mit dem Umbau der elektrischen Energieerzeugung ist somit in Zukunft eine Beeinträchtigung der Netzstabilität für das künftige Verbundnetz zu erwarten. Für die zunehmende Zahl von Inselnetzen stellt die reduzierte Stabilität bereits heute ein Problem dar. Beispielsweise sollen große elektrische Antriebe in Schiffsnetzen auch bei minimaler Generatorleistung stabil im Teillastbetrieb arbeiten, da durch die Abschaltung von Generatoren Treibstoff eingespart werden kann.

**[0005]** Instabilität von elektrischen Netzen ist u. a. gekennzeichnet durch das Auftreten signifikanter Oberschwingungen in der Netzspannung, die zur Beschädigung von Anlagenteilen führen können, sowie durch das Verletzen der zulässigen Toleranzgrenzen für Netzfrequenz und Spannungsamplitude, das zum Netzzusammenbruch bzw. zur Netzabschaltung führt. Die Verfügbarkeit einer ausreichenden Regelleistung im Netz ist damit für die Versorgungssicherheit von ausschlaggebender Bedeutung.

**[0006]** Insbesondere in Inselnetzen steht stark schwankende Erzeugerleistung zur Verfügung. Mit dem Zu- und Wegschalten von Erzeuger- und Verbraucherlasten kann sich die Netzimpedanz erheblich ändern. Insbesondere aktive Netzeinspeisungen umfassen häufig passive Filterschaltungen (z. B. L-C-L-Filter), um die schaltfrequenten Anteile der Wechselrichter-Ausgangsspannungen auf normgerechte Maße zu reduzieren. Die Resonanzüberhöhung der Filterübertragungsfunktion nimmt in der Regel mit der Netzimpedanz zu, zudem kann sich die Resonanzfrequenz erheblich verschieben. Dies kann zu Instabilitäten im Stromregelkreis des Wechselrichters führen, da die Reglerauslegung für Nenn-Betriebsbedingungen erfolgt. Als Abhilfe denkbar sind z.B. aufwendige Parameteradaptationen oder eine Verbesserung der Reglerperformance (z.B. kleinere Abtastzeit, kleinere Totzeiten etc.). Dadurch sind zusätzliche Kosten für erhöhten Entwicklungs- und Inbetriebnahmeaufwand zu erwarten, zudem zusätzliche Kosten für erhöhten Hardware-Aufwand (z.B. für Rechenleistung).

**[0007]** Bisher wurde zum Gewährleisten eines stabilen Netzbetriebs beispielsweise eine ausreichend große Regelleistung für die Primärregelung von Wirk- und Blindleistung im Netz vorgehalten. Alternativ erfolgte eine dynamische Stützung des Netzes ausschließlich mit Blindstrom abhängig von der Netzspannungsabweichung, oder es erfolgte ein Abschalten und Zuschalten von Erzeugern und Lasten in einer Sekundärregelung als zusätzliche Maßnahme. Ebenso können zusätzliche aktive Filter zur Dämpfung von Resonanzeffekten verwendet werden. Ferner zeichneten sich netzfreundliche Antriebe bislang dadurch aus, dass sie dem Netz netzfrequente sinusförmige Ströme entnehmen und einen Wirkfaktor

$\cos\varphi = 1$  realisieren (d.h. Ströme und Spannungen sind in Phase). Dies dient der Effizienz aber nur geringfügig der Stabilität.

**[0008]** Aus der Druckschrift EP 1 990 906 B1 ist ein Leistungswandler insbesondere für ein Wasserfahrzeug bekannt, das ein Versorgungsnetz, einen Versorgungsbus und mehrere Antriebseinheiten aufweist. Mehrere solcher Leistungswandler für die Antriebseinheiten sind mit dem gemeinsamen Versorgungsbus verbunden und ein Spannungsanforderungssignal, das die Spannung angibt, die an den Netzanschlüssen jedes Leistungswandlers erreicht werden soll, wird von einem Leistungsverwaltungssystem geliefert.

**[0009]** Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Wechselstromnetz mit einem oder mehreren Verbrauchern besser stabilisieren zu können.

**[0010]** Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe gelöst durch ein Verfahren zum Stabilisieren eines Wechselstromnetzes durch

- aktives Wechselrichten eines Wechselstroms des Wechselstromnetzes in einen Gleichstrom eines Zwischenkreises durch einen Netzwechselrichter,
- Erfassen einer Ist-Wirkleistung und einer Ist-Blindleistung eines Leistungsaustausches zwischen dem Netzwechselrichter und dem Wechselstromnetz,
- Gewinnen eines Schaltbefehls für den Netzwechselrichter in Abhängigkeit von der Ist-Wirkleistung und einer Soll-Leerlaufnetzfrequenz sowie in Abhängigkeit von der Ist-Blindleistung und einer Soll-Leerlaufnetzspannung,
- Steuern oder Regeln des Netzwechselrichters anhand des Schaltbefehls,
- Ermitteln der Soll-Leerlaufnetzfrequenz und der Soll-Leerlaufnetzspannung aus der Ist-Wirkleistung, einer vorgegebenen verfügbaren Netzleistung des Wechselstromnetzes, einer Ist-Verbraucherleistung eines an den Zwischenkreis angeschlossenen Stellglieds und einer vorgegebenen Soll-Verbraucherleistung für das Stellglied, und
- Regeln einer Gleichspannung des Zwischenkreises mittels Energiepufferung in dem Stellglied.

**[0011]** Darüber hinaus wird erfindungsgemäß bereitgestellt eine Schaltungsanordnung zum Stabilisieren eines Wechselstromnetzes umfassend

- einen Netzwechselrichter zum Umrichten eines Wechselstroms des Wechselstromnetzes in einen aktiven Wechselrichten eines Zwischenkreises,
- ein an den Zwischenkreis angeschlossenes Stellglied mit Energiepuffer,
- eine Leistungsmesseinrichtung zum Erfassen einer Ist-Wirkleistung und einer Ist-Blindleistung

eines Leistungsaustausches zwischen dem Netzwechselrichter und dem Wechselstromnetz,

- eine Ansteuereinrichtung zum Gewinnen eines Schaltbefehls für den Netzwechselrichter in Abhängigkeit von der Ist-Wirkleistung und einer Soll-Leerlaufnetzfrequenz sowie in Abhängigkeit von der Ist-Blindleistung und einer Soll-Leerlaufnetzspannung, und zum Steuern oder Regeln des Netzwechselrichters anhand des Schaltbefehls,
- eine Ermittlungseinrichtung zum Ermitteln der Soll-Leerlaufnetzfrequenz und der Soll-Leerlaufnetzspannung aus der Ist-Wirkleistung, einer vorgegebenen verfügbaren Netzleistung des Wechselstromnetzes, einer Ist-Verbraucherleistung des Stellglieds und einer vorgegebenen Soll-Verbraucherleistung für das Stellglied,
- einer Regelungseinrichtung zum Regeln einer Gleichspannung des Zwischenkreises mittels des Energiepuffers des Stellglieds.

**[0012]** In vorteilhafter Weise wird also Energie in einem Stellglied gepuffert, und die Energie wird dazu verwendet, um die Frequenz bzw. Spannung eines Netzwechselrichters einzustellen und damit das Wechselstromnetz hinsichtlich Frequenz und Spannung zu stabilisieren.

**[0013]** In einer Ausführungsform erfolgt das Ermitteln der Soll-Netzfrequenz anhand einer vorgegebenen ersten Tabelle aus der Ist-Wirkleistung und der Soll-Leerlaufnetzfrequenz und einer anschließenden zeitlichen Glättung. Analog hierzu kann das Ermitteln der Soll-Netzspannung anhand einer vorgegebenen zweiten Tabelle aus der Ist-Blindleistung und der Soll-Leerlaufnetzspannung und einer anschließenden zeitlichen Glättung erfolgen. Durch die jeweiligen Tabellen können die Sollwerte sehr einfach ermittelt werden. Die zeitliche Glättung sorgt darüber hinaus dafür, dass trotz schneller dynamischer Vorgänge im Netz ein stabiler Arbeitspunkt erreicht werden kann.

**[0014]** Vorzugsweise umfasst das Stellglied einen Antrieb und einen Antriebswechselrichter, mit dem ein Gleichstrom des Zwischenkreises in einen Wechselstrom für den Antrieb umgerichtet wird. Somit können am Netz betriebene Antriebe zur Netzstabilisierung verwendet werden.

**[0015]** Insbesondere kann die Energiepufferung in einer von dem Antrieb bewegten Last erfolgen. So lässt sich beispielsweise die Bewegungsenergie einer Last zu Stabilisierungsaufgaben des Netzes rückgewinnen.

**[0016]** Gemäß einer Weiterentwicklung wird ein Schaltbefehl für den Antriebswechselrichter aus einem Ist-Strom von dem Antriebswechselrichter zu dem Antrieb und einem vorgegebenen magnetischen Soll-Fluss des Antriebs ermittelt. Hierdurch lässt sich

eine Leistungsentnahme über den Antriebswechsellrichter spezifisch für den jeweiligen Antrieb über den Soll-Fluss als vorgegebene Motorgröße realisieren.

**[0017]** Der Schaltbefehl für den Antriebswechsellrichter kann ferner mittels einer Drehmoment-Fluss-Regelung anhand eines vorgegebenen Soll-Drehmoments ermittelt werden. Durch die Regelung lässt sich also die Energie im Zwischenkreis bedarfsgerecht einstellen.

**[0018]** Das Soll-Drehmoment kann aus einer Ist-Zwischenkreisspannung und einer vorgegebenen Soll-Zwischenkreisspannung durch Regelung gewonnen werden. Damit lässt sich das Soll-Drehmoment unmittelbar der Zwischenkreisspannung nachführen.

**[0019]** Des Weiteren kann die Ist-Wirkleistung des Netzwechsellrichters für die Regelung des Soll-Drehmoments herangezogen werden. In vorteilhafter Weise kann somit durch den vom netzseitigen Wechsellrichter bekannten Leistungsistwert eine Vorsteuerung der Lastleistung erreicht werden.

**[0020]** Die vorstehend genannten Verfahrensmerkmale stellen auch optionale funktionelle Merkmale der erfindungsgemäßen Schaltungsanordnung dar.

**[0021]** Die vorliegende Erfindung wird nun anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert, in denen zeigen:

**[0022]** Fig. 1 eine Wirkleistungsstatik-Kennlinie für die Frequenz;

**[0023]** Fig. 2 eine Wirkleistungsstatik-Kennlinie für die Spannung;

**[0024]** Fig. 3 zwei Wirkleistungsstatik-Kennlinien zur Ermittlung eines gemeinsamen Arbeitspunkts mehrerer Erzeuger im Netz;

**[0025]** Fig. 4 ein Blockschaltdiagramm zum erfindungsgemäßen Verfahren zur Netzfrequenz- und Netzspannungsstabilisierung mit Antriebswechsellrichtern;

**[0026]** Fig. 5 ein Blockschaltdiagramm zur Gewinnung des Phasenwinkels  $\varphi$  der Ausgabespannung und

**[0027]** Fig. 6 ein alternatives Blockschaltdiagramm zu dem von Fig. 5.

**[0028]** Die nachfolgend näher geschilderten Ausführungsbeispiele stellen bevorzugte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung dar.

**[0029]** Ein erfindungsgemäßes Regelungs- und Steuerungsverfahren ist für wechsellrichtergespeis-

te Verbraucher geeignet. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass der netzseitige Wechsellrichter nicht den Leistungsfluss zwischen Netz und Zwischenkreis entsprechend einem Leistungs-Sollwert regelt (Stand der Technik). Stattdessen besteht die Aufgabe des netzseitigen Wechsellrichters darin, Frequenzänderungen und Spannungsänderungen im Netz entgegenzuwirken und somit das Netz zu stabilisieren, wobei insbesondere auch dynamische Vorgänge, die schneller sind als eine Netzperiode, stabilisiert werden können. Für langsame Lastpendelungen im Netz wäre ein System nach dem Stand der Technik ausreichend. Ein Stellglied als Verbraucher am Zwischenkreis bzw. ein lastseitiger Wechsellrichter regelt den Zwischenkreis und beeinflusst dazu geeignet die Leistungsaufnahme der Last.

**[0030]** Ein übergeordnetes Leistungsmanagement passt die Frequenz- und Spannungssollwerte für den netzseitigen Wechsellrichter so an, dass im Mittel ein gewünschter Leistungsaustausch zwischen Last und Netz realisiert wird. Dazu kann z.B. ein mittleres Soll-Drehmoment oder eine mittlere Soll-Drehzahl für die Last vorgegeben werden, wenn genügend Erzeugerleistung im Netz zur Verfügung steht.

**[0031]** Der Erfindung liegen folgende Erkenntnisse zugrunde: Der Lastausgleich zwischen den Erzeugereinheiten im Netz, der für einen stabilen Betrieb an einem Arbeitspunkt mit gemeinsamer Frequenz und Amplitude nötig ist, erfolgt bevorzugt mithilfe so genannter Statikkennlinien (vgl. Fig. 1 bis Fig. 3). Die Statik kann Glättungsglieder (PT1) umfassen, um eine Anpassung an die vorliegenden Zeitkonstanten des jeweiligen Netzes zu ermöglichen. Beispielsweise sinkt die Frequenz eines Erzeugers mit zunehmender Abgabeleistung. Es ergibt sich beispielsweise die in Fig. 1 dargestellte Wirkleistungsstatik-Kennlinie  $f_L$  für den Leerlauf (Erzeuger E sind durch eine negative, Verbraucher V durch eine positive Wirkleistung gekennzeichnet.). Ein korrespondierender Zusammenhang zwischen Blindleistung und Spannung ist durch die Blindleistungsstatik-Kennlinie  $U_L$  für den Leerlauf von Fig. 2 gegeben.

**[0032]** Jeder Energieerzeuger im Netz, der zu Frequenz- und Spannungshaltung aktiv beiträgt, ermittelt mithilfe dieser Kennlinien seine aktuellen Sollwerte für Ausgabespannung und Frequenz. Häufig wird dies auch als Primärregelung bezeichnet. Besitzen beispielsweise alle Erzeugereinheiten die gleiche Nennleistung und die gleichen Kennlinien, so ergibt sich ein f-U-Arbeitspunkt im Netz, an dem alle Erzeuger die gleiche Leistung zur erforderlichen Gesamtlast beitragen. Es resultiert also eine symmetrische Lastaufteilung ohne weitere Kommunikation der Erzeuger untereinander.

**[0033]** Die Wirkungsweise eines solchen Systems sei an einem einfachen Beispiel für die Wirkleistungs-

kennlinie mit zwei Erzeugern und einer Verbraucherlast  $P_v$  erklärt (vgl. Fig. 3). Für die Ausgangsfrequenz des ersten und zweiten Erzeugers gilt mit  $k_1$  und  $k_2$  als Kennlinien Steigungen und der identisch gewählten Leerlauf Frequenz  $f_0$ :

$$f_{E1} = f_0 + k_1 \cdot P_1,$$

$$f_{E2} = f_0 + k_2 \cdot P_2.$$

**[0034]** Mit der Bedingung für die Leistungssumme  $P_1 + P_2 + P_v = 0$  gilt für die Frequenz des zweiten Erzeugers folgende Abhängigkeit von der Leistung des ersten Erzeugers:

$$f_{E2} = f_0 + k_2 \cdot (-P_1 - P_v).$$

**[0035]** Daher kann die Kennlinie des zweiten Erzeugers gespiegelt und um  $P_v$  verschoben im P-f-Diagramm des ersten Erzeugers eingetragen werden, um den resultierenden Arbeitspunkt mit der gemeinsamen Frequenz  $f_A$  zu veranschaulichen. Der erste Erzeuger übernimmt dabei den Anteil  $PE_1$  der notwendigen Gesamtleistung.

**[0036]** Die Primärregelung in Netzen ist typischerweise eine schnelle P-Regelung, die Regelabweichungen nicht zu Null ausregeln kann. Stationäre Genauigkeit wird durch überlagerte langsame Sekundärregelungen erreicht, die z. B. die Leerlaufpunkte der Statikkennlinien so verschieben, dass im Mittel die Netznennfrequenz erreicht wird. Dazu ist unter Umständen auch das manuelle Zuschalten weiterer Erzeuger notwendig.

**[0037]** Konstant-Leistungssenken haben spezifische Wirkungen auf ein Netz. Die destabilisierende Wirkung von regulären geregelten Antriebswechselrichtern auf ein Netz zeigt eine einfache Überlegung: Angenommen sei eine temporär sinkende Netzspannung. Die Leistungsregelung des Wechselrichters erhöht daraufhin den Wirkstrom, um die Leistung konstant zu halten. Der zusätzliche Strom verursacht zusätzliche Spannungsabfälle an den Netzimpedanzen und erhöht die Verluste im Netz. Folglich sinkt die Netzspannung zusätzlich und die Energieerzeuger werden zusätzlich belastet.

**[0038]** Netzfrequenzänderungen haben keine direkte Auswirkung auf den Leistungsbedarf eines regulären geregelten Antriebswechselrichters. Allerdings wird das Netz aber z.B. bei fallender Netzfrequenz auch nicht durch reduzierte Leistungsaufnahme stabilisiert (entsprechend einer P-f-Kennlinie). Indirekt kann der gesamte Leistungsbedarf im Netz in diesem Beispiel sogar ansteigen, da die frequenzabhängige Impedanz der Netzinduktivitäten abnimmt. Somit steigt der Blindstrom, und die Verluste an den ohmschen Anteilen der Netzimpedanz steigen.

**[0039]** Im Folgenden wird ein konkretes Beispiel anhand von Fig. 4 dargestellt. Es zeigt einen Verbraucher **1**, der über einen aktiven Netzwechselrichter **2** vom Netz **3** gespeist wird. Im vorliegenden Beispiel ist ein 3-Phasen-Netz dargestellt. Es kann sich aber auch um ein Netz mit nur einer oder zwei Phasen oder dergleichen handeln. In dem vorliegenden Beispiel ist außerdem zwischen dem Netz und dem Netzwechselrichter **2** ein üblicher Netzfilter **4** geschaltet.

**[0040]** Auf der Gleichstromseite des Netzwechselrichters **2** befindet sich ein Zwischenkreis **5** mit einem Zwischenkreiskondensator CZK. An diesem liegt die Zwischenkreisspannung  $V_{dc}$  an.

**[0041]** Der Zwischenkreis dient zur Speisung des Verbrauchers **1**, der hier allgemein ein Stellglied mit Energiepufferung und Regelung der Zwischenkreisspannung  $V_{dc}$  sein kann. Im vorliegenden Fall weist der Verbraucher einen Antriebs-Wechselrichter **6** auf, der den Gleichstrom des Zwischenkreises **5** in einen Wechselstrom (hier ebenfalls 3-Phasen-System) für einen Antrieb bzw. Motor **7** wandelt. Der Motor **7** dreht beispielsweise eine Last **8** mit einer Ist-Drehzahl  $n_{Ist}$ . Bei der Last kann es sich beispielsweise um eine Schiffsschraube oder eine Pumpe handeln. Der Antriebs-Wechselrichter **6** ist Teil einer unten näher beschriebenen Regelung der Zwischenkreisspannung  $V_{dc}$ .

**[0042]** Bei dem Netzwechselrichter **2** handelt es sich um einen aktiven Netzwechselrichter, bei dem Leistungsfluss sowohl vom AC-Netz in den DC-Zwischenkreis **5** als auch umgekehrt geregelt möglich ist und sinusförmige Wechselströme (mit regelbarer Wirk- und Blindkomponente) in das Netz **3** eingepreßt werden können (siehe z.B. internationale Norm IEC/TS 62578: „Power electronics system and equipment – Operation conditions and characteristics of active in-feed converter applications“).

**[0043]** Typische Anordnung nach dem Stand der Technik ist ein selbstgeführter Spannungszwischenkreisumrichter mit IGBTs im B6-Brückenschaltung, die mit einer Pulsfrequenz im kHz-Bereich getaktet wird und im Mittel über einen PWM-Takt Spannungs-Raumzeiger mit definierter Amplitude und definiertem Phasenwinkel am Ausgang des Umrichters realisieren kann. Üblich ist, mithilfe einer Stromregelung den Spannungs-Raumzeiger so zu berechnen, dass sich ein gewünschter Wirk- und Blindstrom am Anschlusspunkt des Netzwechselrichters ergibt. Mit den Freiheitsgraden Amplitude und Winkel (bzw. Wirk- und Blindstrom) ist ein derartiger Wechselrichter prinzipiell in der Lage eine Spannung mit definierter Amplitude und Frequenz an seinen Anschlussklemmen zu stellen.

**[0044]** Nach dem Stand der Technik wird somit die mit dem Netz ausgetauschte Wirkleis-

tung so geregelt, dass eine vom Prozess geforderte Sollleistung erreicht wird (beispielsweise aufgrund des aktuellen Leistungsbedarfs eines am Zwischenkreis angeschlossenen Antriebs oder für das Nachladen der Zwischenkreiskapazität (siehe z.B. EP 1 990 906 B1)).

**[0045]** Unabhängig von der Wirkachse kann der Blindstrom auf einen Sollwert geregelt werden. Aufgrund des Spannungsabfalls an den Netzinduktivitäten kann mit dem Blindstrom die Höhe der Netzspannung beeinflusst werden. Dies wird bereits heute genutzt und z.B. in Netzanschlussnormen für Energieerzeugungsanlagen (siehe Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: „Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz“, 2008) gefordert. Von Umrichtern erzeugte Blindleistung dient somit der Netzstützung bzw. Stabilisierung. Im Vordergrund steht dabei die Spannungshaltung bzw. der Kompensation der Spannungsabfälle an den Netzimpedanzen bei Laständerungen.

**[0046]** Entsprechend der vorliegenden Erfindung wird nun zusätzlich die Wirkachse in die Netzstabilisierung einbezogen, die für die Frequenzhaltung im Netz benötigt wird. Für kurzzeitige dynamische Vorgänge wirkt der Verbraucher damit im Netz mit seiner vollen Leistung als zusätzliche Erzeugereinheit. Insgesamt wird damit ein konkretes Verfahren bereitgestellt, mit dem Umrichterlasten im Netz mit ihrer gesamten dynamischen Leistung zu Primärregelung von Spannung und Frequenz (bzw. Blindleistung und Wirkleistung) und damit zur dynamischen Stabilisierung des Netzes beitragen.

**[0047]** Zu diesem Zweck wird mit dem Netzwechselrichter **2** anstatt der Wirkleistung die Ausgangsfrequenz des Netzwechselrichters auf einen definierten Sollwert geregelt. Insbesondere wird – z.B. mit einem Glättungsglied **9**, **10** – erreicht, dass sich die Ausgangsfrequenz des Netzwechselrichters im Vergleich zu seinem PDM-Takt nur langsam ändern kann. Dies entspricht bei einem Erzeuger mit Generator einer trägen Drehzahländerung aufgrund der Schwungmasse. Der Netzwechselrichter **2** wirkt auf diese Weise einer Frequenzänderung im Netz **3** stabilisierend entgegen. Ändert sich die Netzfrequenz bei zunächst konstanter Ausgangsfrequenz des Netzwechselrichters **2**, so resultiert ein Phasenwinkel zwischen Netzwechselrichterspannung und Netzspannung, der je nach Vorzeichen zu einer Leistungsaufnahme bzw. Leistungsabgabe führt. Diese Leistungsänderung führt dementsprechend zu einem Energieanstieg bzw. -abfall im Zwischenkreis.

**[0048]** Der lastseitige Verbraucher **1** – im Beispiel der Antriebswechselrichter **6** mit elektrischem Antrieb **7** und mechanischer Last **8** – muss diese Energieänderung im Zwischenkreis **5** durch entsprechende

Leistungsänderung kompensieren. Vorteilhaft wird dazu ein Zwischenkreisspannungsregler **11** verwendet, der das Soll-Moment  $M_{Soll}$  des Motors **7** so anpasst, dass dem Zwischenkreis **5** eine Leistung entnommen wird, die der Spannungsänderung entgegenwirkt. Die Antriebsleistung ist dementsprechend temporären Schwankungen unterworfen, für die die betroffene Anwendung geeignet sein muss. Ein Beispiel wäre ein optionaler Zusatzantrieb bei Schiffen. Stationäre Genauigkeit kann (ähnlich wie bei Netzregelungen) durch eine überlagerte langsame Sekundärregelung **12** erreicht werden, die die Leerlauf Frequenz  $f_0$  (vgl. **Fig. 3**) einer netzseitigen Frequenzstatik **13** nachführt, wenn der Zustand des Netzes bzw. zusätzliche Erzeugerleistung dies zulässt.

**[0049]** Ebenso wie die Frequenz wird auch die Amplitude der netzseitigen Ausgangsspannung des Netzwechselrichters **2** nur langsam verändert und wirkt damit Spannungsänderungen im Netz **3** entgegen. Da sich die Spannungsamplitude auf die mit dem Netz **3** ausgetauschte Blindleistung auswirkt, ist der lastseitige Verbraucher **1** von dieser Stabilisierung nicht betroffen.

**[0050]** Das Beispiel von **Fig. 4** wird nun im Detail beschrieben: Die am lastseitigen Umrichter **6** angeschlossene elektrische Last muss kein Antrieb sein. Allgemein wird für die Lastseite nur gefordert, dass der Umrichter bzw. allgemein das Stellglied zur Regelung der Zwischenkreisspannung  $V_{dc}$  in der Lage ist, wie dies oben beschrieben wurde. Dies kann dadurch erreicht werden, dass die verbrauchte Leistung geregelt wird. Prinzipiell wäre als elektrische Last auch ein Lastwiderstand denkbar.

**[0051]** Für die Möglichkeit zur Wirkleistungsstützung muss die Applikation gegebenenfalls zunächst in einen geeigneten Betriebszustand/Lastzustand gebracht werden. Für eine Stabilisierung muss die Leistung erhöht und verringert werden können. Im Falle eines Lastwiderstands (Choppers bzw. Bremswiderstands) muss zunächst ein Betriebspunkt mit Leistungsaufnahme angenommen werden, bevor eine entsprechende Entlastung möglich ist.

**[0052]** Zur Regelung des Antriebs-Wechselrichters **6** steht hier eine Drehmoment- und Fluss-Regelung **14** zur Verfügung. Sie generiert aus den Wechselströmen  $I_{RST}$  (Stromstärken der ausgangsseitigen Phasen R, S und T des Antriebs-Wechselrichters **6**), einem magnetischen Sollfluss  $\Phi_{Soll}$  und dem Soll-Drehmoment  $M_{Soll}$  Schaltbefehle SB für den Antriebs-Wechselrichter **6**. Dabei wird ausgenutzt, dass das Produkt von magnetischem Fluss und Strom zum jeweiligen Drehmoment führt. Das Soll-Drehmoment  $M_{Soll}$  seinerseits wird von der  $V_{dc}$ -Regelung **11** in Abhängigkeit von der Zwischenkreisspannung  $V_{dc}$  und einer Soll-Zwischenkreisspannung  $V_{dc}$ , Soll und einer Ist-Wirkleistung geregelt. Die Ist-Wirkleistung

Plst stammt von einer Leistungsmesseinrichtung **15**, die den Leistungsfluss in den Netzwechselrichter **2** oder aus ihm heraus anhand der Netzgrößen IUVW und VUVW ermittelt. Die Sollwerte  $\Phi$  Soll und Vdc, Soll für den Motorfluss und die Zwischenkreisspannung können von einer übergeordneten Steuerung (in **Fig. 4** nicht dargestellt) für die jeweilige Applikation passend und z.B. konstant vorgegeben werden. Abhängig vom Maschinentyp und von der Drehzahl können Flussabsenkungen oder ein Anheben der Zwischenkreisspannung Vdc nötig sein, was hier jedoch für die Stabilisierung nicht von Bedeutung ist. Abhängig vom Typ des Netzwechselrichters (z.B. bei Hochsetzsteller mit IGBT in B6-Schaltung) kann zudem die Forderung gelten, dass die Bedingung  $Vdc > \text{"Amplitude der Leiter-Leiter-Netzspannung"}$  eingehalten werden muss.

**[0053]** Netzseitig wird mit der Leistungsmesseinrichtung **15** neben der Ist-Wirkleistung Plst auch die Ist-Blindleistung Qlst ermittelt. Mithilfe der Wirkleistung-Frequenz-Statik **13** und dem daran angeschlossenen Glättungsglied **9** wird aus der Ist-Wirkleistung Plst und einer Soll-Leerlaufnetzfrequenz fNL, Soll eine Soll-Netzfrequenz fN, Soll ermittelt. Analog wird mit einer Blindleistungs-Spannungs-Statik **16** (vgl. **Fig. 2**) und dem nachgestellten Glättungsglied **10** aus der Ist-Blindleistung Qlst und einer Soll-Leerlaufnetzspannung VNL, Soll eine Soll-Netzspannung VN, Soll ermittelt. Aus der Soll-Netzfrequenz fN, Soll und der Soll-Netzspannung VN, Soll erzeugt eine Frequenz-Spannungs-Regelung **17** Schaltbefehle SB für den Netz-Wechselrichter **2**. So kann der im Netzwechselrichter **2** bekannte Leistungsistwert (Plst und Qlst) vorteilhaft zur Vorsteuerung der Lastleistung verwendet werden. Damit werden die Abweichungen der Zwischenkreisspannung Vdc vom Sollwert reduziert.

**[0054]** Die Blöcke Wirkleistungsstatik **13** und Blindleistungsstatik **16** korrespondieren mit den **Fig. 1** und **Fig. 2**. In dem Signalverlauf von der Steuerung bis zu den Schaltbefehlen ist eine Glättung (Glättungsglieder **9** und **10**) vorgesehen, die für eine temporäre Konstanz von Ausgangsfrequenz und Ausgangsspannung des Netz-Wechselrichters sorgt und damit entscheidend für das Maß der Netzstabilisierung ist.

**[0055]** Für die „Regelung“ der Netzfrequenz kann im einfachsten Fall im Block **17** ein Integrator (vgl. Integrator **18** in den **Fig. 5** und **Fig. 6**) genutzt werden. Mit dem Integrator wird aus der Frequenz der aktuelle Phasenwinkel  $\varphi$  der Ausgabespannung berechnet. Für die „Regelung“ der Netzspannungamplitude durch Block **17** kann ein Proportionalitätsglied (vgl. Proportionalitätsglied **19** von **Fig. 5**) genutzt werden. Durch Winkel und Amplitude sind die Schaltbefehle SB – z.B. durch eine lookup-table – eindeutig in einem Steuersatz ermittelbar.

**[0056]** Eine aufwendige, aber prinzipiell mögliche Alternative für den Integrator und das Proportionalitätsglied in dem Block **17** wäre eine schnelle Stromregelung, die Netzströme gerade derart einprägt, dass die Ausgangsspannung die gewünschte Frequenz und Amplitude annimmt. Alternativ zur Blindleistung/Wirkleistung kann auch der Blindstrom/Wirkstrom verwendet werden.

**[0057]** In der übergeordneten Steuerung **12** (Leistungsmanagement) werden die Sollwerte fNL, Soll und VNL, Soll für die Statiken **13** und **16** abhängig von dem gewünschten Verhalten der Gesamapplikation, insbesondere abhängig von der Ist-Drehzahl NIst, dem Ist-Drehmoment MIst, einer extern vorgegebenen Soll-Drehzahl NSoll, einem extern vorgegebenen Soll-Drehmoment MSoll und einer ebenfalls extern vorgegebenen verfügbaren Netzleistung PN, erzeugt. Beispielsweise kann eine bestimmte Antriebsleistung in einem Inselnetz nur erbracht werden, wenn im Mittel auch genügend Erzeugerleistung zur Verfügung steht.

**[0058]** Mit einer langsamen Regelung (z.B. PI) können die Statik-Leerlaufpunkte so nachgeführt werden, dass im Mittel stationäre Genauigkeit für das Drehmoment eines Antriebs oder die Netzamplitude erreicht wird. Vergleichbare Wirkung bei Kraftwerken hätte die so genannte Sekundärregelung.

**[0059]** Prinzipiell kann auch die Abweichung zwischen Drehzahl-Istwert und Sollwert von einem PI-Regler genutzt werden, um die Leerlauffrequenz  $f_0$  nachzuführen. Aufgrund der Glättung im Statik-Kanal ist dies aber nur für Antriebe mit langsamer Dynamik sinnvoll und stabil.

**[0060]** Die Verwendung linearer Kennlinien für die Statik ist sinnvoll, aber nicht zwingend. Allgemein sollte die Steigung monoton sein.

**[0061]** Grundsätzlich wäre es auch denkbar, die Soll-Antriebsleistung für den lastseitigen Umrichter **6** über eine Kennlinie direkt abhängig von der momentanen Netzfrequenz zu berechnen. Der Netz-Wechselrichter **2** könnte dann wie im bisherigen Stand der Technik die Netzleistung basierend auf der Regelung der Zwischenkreisspannung Vdc stellen sowie die Blindleistung regeln. Allerdings wäre auf diese Weise nur mit großem Aufwand sicherzustellen, dass sich die Ausgangsfrequenz des Netzwechselrichters **2** nur langsam im Vergleich zum PWM-Takt ändert.

**[0062]** Optional können auch zusätzliche Dämpfungsglieder zur Vermeidung von Leistungspendelungen zwischen Netz und stabilisierendem Netzwechselrichter implementiert werden. Prinzipiell kann dies mit einem additiven D-Anteil (eines PID-Reglers) im Frequenzregelungspfad realisiert werden. So kann beispielsweise gemäß **Fig. 5** in dem

Block **17** ein Integrator **18** mit vorgeschaltetem ersten Proportionalitätsglied **19** vorgesehen sein, um aus der Soll-Netzfrequenz  $f_N$ , Soll einen Winkel  $\varphi$  zu ermitteln, wobei hierzu der Ausgang des Integrators **18** mit dem Ausgang eines zweiten Proportionalitätsglieds **20** summiert wird, in das wie in das erste Proportionalitätsglied **19** die Soll-Netzfrequenz  $f_N$ , Soll eingespeist wird.

heit großräumig betroffen sein kann, liegt eine entsprechende ökonomische Bedeutung vor.

**[0063]** In einer alternativen Ausführungsform gemäß **Fig. 6** ist in dem Block **17** ebenfalls ein Integrator **18** vorgesehen, an dessen Ausgang der Winkel  $\varphi$  bereitgestellt wird. Das Eingangssignal des Integrators **18** besteht aus einer Summe der Soll-Netzfrequenz  $f_N$ , Soll und einem Ausgangssignal eines Differenzierers **21**. Das Eingangssignal des Differenzierers **21** wird mittels eines Proportionalitätsglieds **22** aus der Soll-Netzfrequenz  $f_N$ , Soll gewonnen.

**[0064]** Für die prinzipielle Funktion der "Stabilisierung des Netzes" ist eine Dämpfung (z.B. mit einem D-Anteil) nicht zwingend. Allerdings wird man in den meisten Fällen eine derartige Dämpfung verwenden, da das Betriebsverhalten im Allgemeinen verbessert wird.

**[0065]** Der vorgeschlagene Ansatz unterscheidet sich von Verfahren, die mithilfe einer Modellbildung versuchen, das Betriebsverhalten von Synchrongeneratoren mit einem Umrichter möglichst genau nachzubilden. Zum einen ist der vorliegende Ansatz wesentlich praktikabler, da im Vergleich kaum Aufwand für die Einstellung von Modellparametern entsteht. Zum anderen sind die Synchronmaschinenmodelle vorgesehen für Erzeugungsanlagen mit Netzstromrichtern, die das Netzverhalten von Synchrongeneratoren möglichst genau nachbilden sollen. Im vorliegenden Fall sollen jedoch Verbraucherlasten, die in der Summe einen signifikanten Anteil der Erzeugerleistung benötigen, zur Netzstabilisierung beitragen.

**[0066]** Erfindungsgemäß wird somit auch an sehr leistungsschwachen Netzen der Betrieb großer Antriebsumrichter möglich. Dies ist von besonderem Interesse z.B. in Schiffsnetzen, wo die Anforderung besteht, große Fahrtriebe in Teillast mit minimaler Generatorkonfiguration zu betreiben (Treibstoffersparnis). Dabei werden Resonanzeffekte in der Netzspannung sowie Netzspannungs- und Frequenzschwankungen wirksam unterdrückt. Das Netz wird somit stabilisiert. Ähnliche Anforderungen sind in anderen Inselnetzen mit großen Antrieben zu erwarten, z.B. im Bergbau.

**[0067]** Darüber hinaus kann in den so genannten „SmartGrid-Netzen“ mit hohem Anteil dezentraler Erzeugung mit Wechselrichter-Einspeisungen die Frage der dynamischen Netzstabilität erheblich an Bedeutung gewinnen. Da hier die Versorgungssicher-



**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- EP 1990906 B1 [0008, 0044]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- Norm IEC/TS 62578 [0042]

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Stabilisieren eines Wechselstromnetzes (3), gekennzeichnet durch

- aktives Wechselrichten eines Wechselstroms des Wechselstromnetzes (3) in einen Gleichstrom eines Zwischenkreises (5) durch einen Netzwechselrichter (2),
- Erfassen einer Ist-Wirkleistung (PIst) und einer Ist-Blindleistung (QIst) eines Leistungsaustausches zwischen dem Netzwechselrichter (2) und dem Wechselstromnetz (3),
- Gewinnen eines Schaltbefehls (SB) für den Netzwechselrichter (2) in Abhängigkeit von der Ist-Wirkleistung (PIst) und einer Soll-Leerlaufnetzfrequenz (fNL, Soll) sowie in Abhängigkeit von der Ist-Blindleistung (QIst) und einer Soll-Leerlaufnetzspannung (VNL, Soll),
- Steuern oder Regeln des Netzwechselrichters (2) anhand des Schaltbefehls (SB),
- Ermitteln der Soll-Leerlaufnetzfrequenz (fNL, Soll) und der Soll-Leerlaufnetzspannung (VNL, Soll) aus der Ist-Wirkleistung (PIst), einer vorgegebenen verfügbaren Netzleistung (PN) des Wechselstromnetzes (3), einer Ist-Verbraucherleistung (NIst, MIst) eines an den Zwischenkreis (5) angeschlossenen Stellglieds (1) und einer vorgegebenen Soll-Verbraucherleistung (NSoll, MSoll) für das Stellglied, und
- Regeln einer Gleichspannung (Vdc) des Zwischenkreises (5) mittels Energiepufferung in dem Stellglied (1).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Gewinnen des Schaltbefehls (SB) anhand einer vorgegebenen ersten Tabelle (13) aus der Ist-Wirkleistung (PIst) und der Soll-Leerlaufnetzfrequenz (fNL, Soll) und einer anschließenden zeitlichen Glättung (9) erfolgt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Gewinnen des Schaltbefehls (SB) anhand einer vorgegebenen zweiten Tabelle (16) aus der Ist-Wirkleistung (PIst) und der Soll-Leerlaufnetzspannung (VNL, Soll) und einer anschließenden zeitlichen Glättung (10) erfolgt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Stellglied (1) einen Antrieb (7) und einen Antriebswechselrichter (6) umfasst, mit dem ein Gleichstrom des Zwischenkreises (5) in einen Wechselstrom für den Antrieb umgerichtet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die Energiepufferung in einer von dem Antrieb (7) bewegten Last (8) erfolgt.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, wobei ein Schaltbefehl (SB) für den Antriebswechselrichter (6) aus einem Ist-Strom (IRst) von dem Antriebswechselrichter (6) zu dem Antrieb (7) und einem vorgegebenen

nen magnetischen Soll-Fluss ( $\Phi_{\text{Soll}}$ ) des Antriebs ermittelt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei der Schaltbefehl (SB) für den Antriebswechselrichter (6) mittels einer Drehmoment-Fluss-Regelung (14) anhand eines vorgebbaren Soll-Drehmoments (MSoll) ermittelt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei das Soll-Drehmoment (MSoll) aus einer Ist-Zwischenkreisspannung (Vdc) und einer vorgegebenen Soll-Zwischenkreisspannung (Vdc, Soll) durch Regelung gewonnen wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei die Ist-Wirkleistung (PIst) des Netzwechselrichters (2) für die Regelung des Soll-Drehmoments (MSoll) herangezogen wird.

10. Schaltungsanordnung zum Stabilisieren eines Wechselstromnetzes (3), gekennzeichnet durch

- einen Netzwechselrichter (2) zum aktiven Wechselrichten eines Wechselstroms des Wechselstromnetzes (3) in einen Gleichstrom eines Zwischenkreises (5),
- ein an den Zwischenkreis (5) angeschlossenes Stellglied (1) mit Energiepuffer,
- eine Leistungsmesseinrichtung (15) zum Erfassen einer Ist-Wirkleistung (PIst) und einer Ist-Blindleistung (QIst) eines Leistungsaustausches zwischen dem Netzwechselrichter und dem Wechselstromnetz (3),
- eine Ansteuereinrichtung (13, 16, 17) zum Gewinnen eines Schaltbefehls (SB) für den Netzwechselrichter (2) in Abhängigkeit von der Ist-Wirkleistung (PIst) und einer Soll-Leerlaufnetzfrequenz (fNL, Soll) sowie in Abhängigkeit von der Ist-Blindleistung (QIst) und einer Soll-Leerlaufnetzspannung (VNL, Soll), und zum Steuern oder Regeln des Netzwechselrichters (2) anhand des Schaltbefehls (SB),
- eine Ermittlungseinrichtung (12) zum Ermitteln der Soll-Leerlaufnetzfrequenz (fNL, Soll) und der Soll-Leerlaufnetzspannung (VNL, Soll) aus der Ist-Wirkleistung (PIst), einer vorgegebenen verfügbaren Netzleistung (PN) des Wechselstromnetzes (3), einer Ist-Verbraucherleistung (NIst, MIst) des Stellglieds und einer vorgegebenen Soll-Verbraucherleistung (NSoll, MSoll) für das Stellglied (1),
- einer Regelungseinrichtung zum Regeln einer Gleichspannung (Vdc) des Zwischenkreises (5) mittels des Energiepuffers des Stellglieds (1).

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

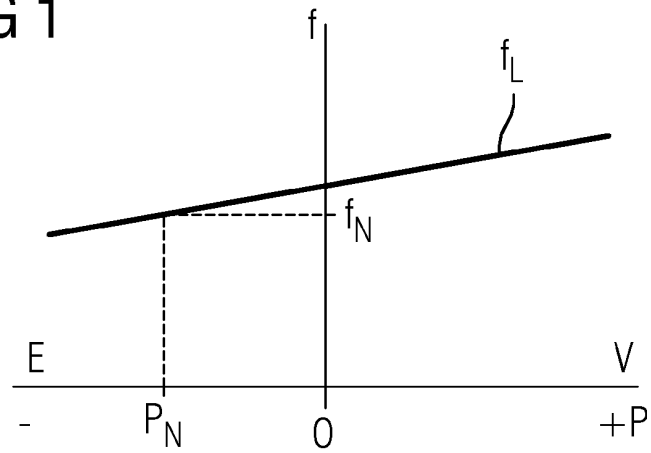


FIG 2

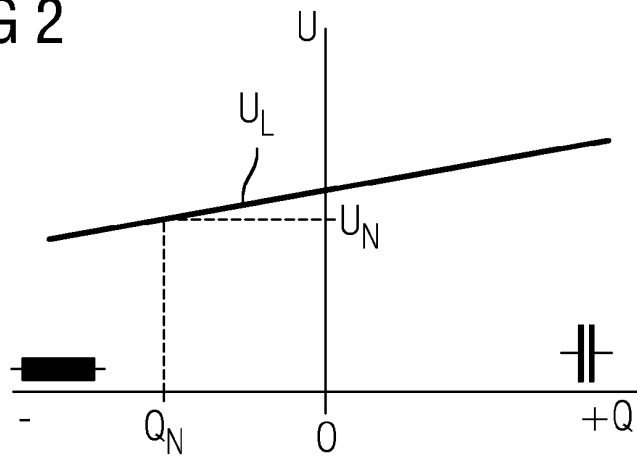


FIG 3

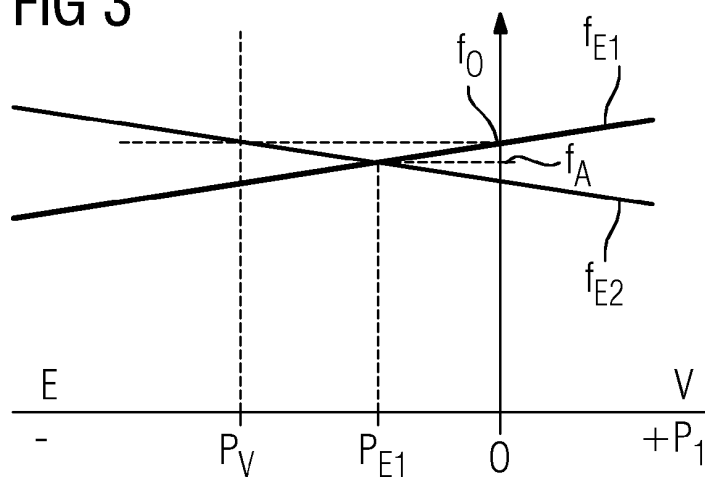




FIG 5

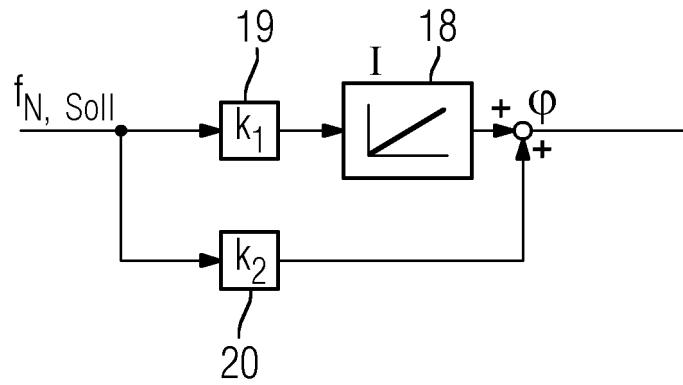


FIG 6

