

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT  
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 710 734 B1

(51) Int. Cl.: H02M 7/797 (2006.01)  
H02M 1/42 (2007.01)

**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 00151/15

(22) Anmeldedatum: 04.02.2015

(43) Anmeldung veröffentlicht: 15.08.2016

(24) Patent erteilt: 15.07.2019

(45) Patentschrift veröffentlicht: 15.07.2019

(73) Inhaber:  
ETH Zürich, ETH Transfer HG E 47-49 Rämistrasse 101  
8092 Zürich ETH-Zentrum (CH)

(72) Erfinder:  
Dominik Bortis, 8052 Zürich (CH)  
Johann Walter Kolar, 8044 Zürich (CH)

(74) Vertreter:  
Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach  
8032 Zürich (CH)

(54) **Regelverfahren und -vorrichtung zur aktiven Kompensation von netz- oder lastbedingten Schwankungen des Leistungsflusses eines leistungselektronischen Konvertersystems.**

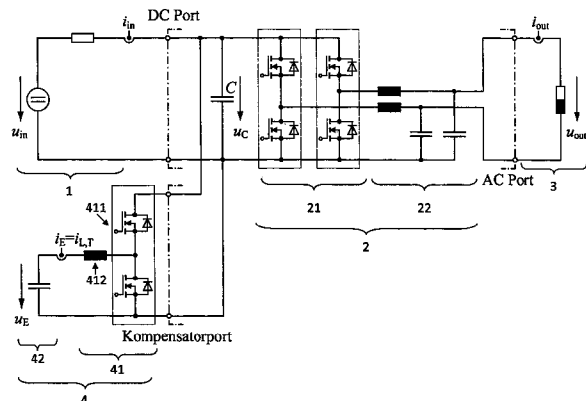
(57) Das erfindungsgemässe Regelverfahren dient zur aktiven Kompensation von Schwankungen eines Leistungsflusses eines leistungselektronischen Konvertersystems.

Das Konvertersystem weist einen Hauptkonverter (2) zur Leistungsübertragung zwischen einem DC-Port und einem Ausgangs-Port, sowie eine parallel zum DC-Port geschaltete Pufferkapazität C mit einer Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  auf.

Parallel zur Pufferkapazität C ist ein Kompensator (4) geschaltet, welcher einen Koppelkonverter (41) und einen Energiespeicher (42) aufweist, wobei der Koppelkonverter (41) dazu eingerichtet ist, Energie in den Energiespeicher (42) zu speisen respektive diesem zu entnehmen. Im Verfahren werden die folgenden Schritte ausgeführt:

- Bestimmen einer vom Hauptkonverter am Ausgangs-Port gelieferten Leistung  $p_{out,AC}$ ;
- Bestimmen, anhand der vom Hauptkonverter am Ausgangs-Port gelieferten Leistung  $p_{out,AC}$ , eines Sollwertes einer vom Kompensator (4) abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out}$  und/oder eines Sollwertes für einen Energiespeicherstrom  $i_E^*$  des Kompensators (4);
- Ansteuern des Koppelkonverters (41), sodass die vom Kompensator (4) abgegebene bzw. aufgenommene Leistung und/oder der Energiespeicherstrom dem entsprechenden Sollwert folgt.

Die Erfindung betrifft weiterhin eine Regelvorrichtung.



## Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der leistungselektronischen Konverter oder Wandler.

[0002] Nachfolgend werden in Abschnitten 1) bis 4) vorerst kurz Beispiele leistungselektronischer Konverter (AC/DC-, DC/AC-, AC/AC- und DC/DC-Konverter) mit Zweitorstruktur beschrieben, deren Leistungsfluss an einem ersten Tor des Konverters neben einem konstanten Anteil eine niederfrequente, z.B. zweifach netzfrequente, Wechselkomponente zeigt. Diese Leistungsschwankung wird im allgemeinen passiv durch einen in der Konverterstruktur integrierten Speicherkondensator bzw. ein Tiefpassfilter gefiltert, sodass am zweiten Tor des Konverters ein weitgehend konstanter Leistungsfluss auftritt, bzw. z.B. ein Gleichspannungsverbraucher mit weitgehend konstanter Spannung gespeist werden kann. Alternativ kann die Filterung auch aktiv mittels einer allgemein als Kompensator zu bezeichnenden leistungselektronischen Einheit erfolgen (siehe Abschnitt 5), wobei dann die Filtereigenschaft durch eine Regelung derart vorgebar ist, dass am zweiten Ende des Konverters ideal nur der konstante Leistungsfluss verbleibt, d.h., die Leistungsschwankung durch den Kompensator vollständig eliminiert wird. Die Erfindung richtet sich auf Verfahren und Regler gemäss dem Oberbegriff der entsprechenden unabhängigen Patentansprüche zur Regelung eines solchen Kompensators.

### 1) AC/DC-Konversion

[0003] Zur Umformung einer Einphasen-Wechselspannung in eine Gleichspannung werden heute leistungselektronische Konverter eingesetzt, welche eingangsseitig (am eingangsseitigen Tor) eine sinusförmige Stromaufnahme und ausgangseitig (am ausgangseitigen Tor) eine konstante (Gleich-)Spannung sicherstellen. Aufgrund der für Einphasennetze bei Sinusstromentnahme charakteristischen zeitlichen Schwankung der Leistungsabgabe mit zweifacher Netzfrequenz (entsprechend Nulldurchgängen von Strom und/oder Spannung, schaltfrequente Schwankungen vernachlässigt) weisen diese, allgemein als Einphasen-Pulsleichrichter oder Power-Factor-Corrected(PFC)-Rectifiers bezeichneten Systeme gleichspannungsseitig zwingend einen Energiespeicher auf, welcher die Differenz zwischen der vom Netz gelieferten und der von einem Gleichspannungsverbraucher bei konstanter Spannung aufgenommenen konstanten Leistung deckt. Im Allgemeinen wird dieser Speicher durch Elektrolytkondensatoren realisiert, welche allerdings ein relativ hohes Bauvolumen und eine beschränkte Lebensdauer aufweisen. Die hohe Baugrösse begründet sich vor allem dadurch, dass der Kondensator so dimensioniert werden muss, dass trotz der pulsierenden Leistungsaufnahme und -abgabe die Schwankung der Gleichspannung auf einen gegenüber dem Nennwert kleinen Wert, typischerweise einige Prozent, beschränkt bleibt. Die im Kondensator insgesamt gespeicherte und das Bauvolumen direkt bestimmende Energie wird daher nur zu einem sehr kleinen Teil für die Pufferung der Eingangsleistungsschwankung genutzt.

[0004] Eine Einphasen-Pulsleichrichtersystemen ähnliche Situation liegt bei Dreiphasen-Pulsleichrichtersystemen und Unsymmetrie des speisenden Netzes vor. Über entsprechende Regelung des Eingangsstromes könnte hier zwar ein zeitlich konstanter gleichspannungsseitiger Leistungsfluss erreicht werden, allerdings treten dann niederfrequente Verzerrungen des Netzstromes auf. Werden sinusförmige Netzströme eingestellt, weist die Ausgangsleistung wieder eine Schwankung mit zweifacher Netzfrequenz auf. Vielfach ist weiter auch die Möglichkeit eines Weiterbetriebs der Systeme bei Ausfall einer Phase des Netzes gefordert, womit hinsichtlich der erforderlichen Grösse des gleichspannungsseitigen Energiespeichers gleiche Verhältnisse wie bei Einphasen-Pulsleichrichtersystemen vorliegen.

[0005] Anzumerken ist, dass anstelle eines Elektrolytkondensators auch ein auf die doppelte Netzfrequenz abgestimmter LG-Saugkreis zur Pufferung der Leistungsschwankung herangezogen werden kann. Eine derartige Anordnung wird z.B. bei Triebfahrzeugen in der Bahntechnik eingesetzt. Allerdings ist die Funktion dieses Systems an eine feste Netzfrequenz gebunden; weiter treten über den Resonanzelementen relativ hohe Spannungen auf. Darüber hinaus ist für die Realisierung des Saugkreises eine Induktivität erforderlich, welche gegenüber kapazitiven Elementen relativ hohe Verluste aufweist.

### 2) DC/AC-Konversion

[0006] Soll Leistung von der Gleichspannungsseite (eingangsseitiges Tor) mit sinusförmigem Strom in ein einphasiges Netz (ausgangseitiges Tor) oder unsymmetrisches Dreiphasennetz eingespeist, d.h., eine Wechselrichterfunktion realisiert, werden, ist bzgl. der niederfrequenten Differenz von Ein- und Ausgangsleistung grundsätzlich eine gleiche Situation wie für Ein- bzw. Dreiphasen-Pulsleichrichtersysteme gegeben.

[0007] Der Fall einer derartigen DC/AC-Konversion liegt z.B. bei Anbindung einer Photovoltaik(PV)-Anlage an ein Einphasennetz vor. Gleichspannungsseitig ist hier eine konstante Leistungsaufnahme sicherzustellen, um die PV-Anlage im Punkt maximaler Leistungsabgabe (Maximum Power Point, MPP) zu halten, andererseits ist jedoch netzseitig eine zweifach netzfrequent pulsierende Leistung zu erzeugen bzw. mittels eines sinusförmigen Stromes in das Netz einzuspeisen. Der Ausgleich der ein- und ausgangseitigen Leistungsdifferenz erfolgt im einfachsten Fall wieder durch einen gleichspannungsseitigen Kondensator, dessen Spannungsschwankung durch Wahl eines entsprechend hohen Kapazitätswertes bzw. Bauvolumens auf kleine Werte beschränkt werden muss, um die Abweichung des Betriebspunktes der PV-Anlage vom MPP zu limitieren. Ist wechselfrequenzseitig z.B. zur Regelung der Netzspannung Blindleistung zu erzeugen, wird die Amplitude der Leistungsschwankung und damit das Kondensatorvolumen nochmals erhöht.

**[0008]** Auch für unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV-Systeme) ist eine Kopplung einer Gleichspannungsquelle mit einem Wechselspannungsnetz vorzunehmen. Als Energiequelle fungiert in diesem Fall typischerweise ein elektrochemischer Speicher, welcher vorteilhaft mit möglichst konstanter Stromentnahme betrieben werden soll. Hierdurch wird einerseits die Lebensdauer erhöht und andererseits werden höhere Verluste auf längeren Zuleitungen zwischen Speicher und Konverter vermieden bzw. kann die Zuleitung nur nach der mittleren Leistungsaufnahme dimensioniert werden. Hierbei ist anzumerken, dass auch USV-Systeme mit Dreiphasenausgang bei der Speisung unsymmetrischer Verbraucher eine gleichspannungsseitige Leistungsschwankung mit zweifacher Ausgangsfrequenz und damit einen entsprechenden Energiespeicherbedarf aufweisen.

### 3) AC/AC-Konversion

**[0009]** Die vorstehend beschriebenen Systeme zur AC/DC- bzw. DC/AC-Konversion können auch zu einem AC/AC-Konvertersystem mit DC-Zwischenkreis kombiniert werden, wobei hier neben der Konversion zwischen Einphasenwechselspannungen oder Dreiphasenwechselspannungen auch Mischformen, d.h. die Kopplung eines speisenden Einphasennetzes (oder unsymmetrischen Dreiphasennetzes) mit einem dreiphasigen Verbraucher oder eines speisenden Dreiphasennetzes mit einem einphasigen (oder unsymmetrischen dreiphasigen) Verbraucher, vorliegen können. Es ist dann ein Speicherkondensator entsprechender Kapazität im DC-Zwischenkreis vorzusehen, um den niederfrequenten Anteil der Differenz der ein- und ausgangsseitigen Momentanleistung unter Sicherstellung einer weitgehend konstanten Zwischenkreisspannung auszugleichen.

### 4) DC/DC-Konversion

**[0010]** Ausser bei der vorstehend beschriebenen Leistungsumformung zwischen einem AC- und einem DC-System bzw. zwischen AC-Spannungssystemen kann auch bei DC/DC-Konverterschaltungen eine niederfrequente Differenz von Ein- und Ausgangsleistung auftreten, welche ggf. durch einen Speicherkondensator ausgeglichen werden muss. Beispiele sind die Speisung einer Last mit pulsformigen Leistungsspitzen aus einer Batterie, bzw. die z.B. zeitlich pulsformig schwankende Leistungsgenerierung eines Energy-Harvesters, welcher DC-Lasten speisen soll, die eine nur geringe Versorgungsspannungsschwankung tolerieren. Anzumerken ist, dass der Begriff der DC/DC-Konversion hier sehr allgemein zu verstehen ist, und auch die einfachste Variante eines DC/DC-Konverters, d.h. eine direkte Verbindung der positiven Ein- und Ausgangsklemme und der negativen Ein- und Ausgangsklemme, einschliesst (Eingangsspannung identisch mit der Ausgangsspannung).

### 5) Aktive Leistungsschwankungsfiltrung mittels Kompensator

**[0011]** Wie vorgehend beschrieben, kann zur Deckung eines niederfrequenten Anteils der Differenz von Eingangs- und Ausgangsleistung ein Speicherkondensator eingesetzt werden, wobei allerdings der erwähnte Nachteil besteht, dass ein Grossteil der gespeicherten Energie nicht zur Pufferung der Leistungsschwankung genutzt wird.

**[0012]** Vorteilhaft wird daher die Spannung des Speicherkondensators von der zu stützenden DC-Spannung über einen DC/DC-Konverter (z.B. Tief- oder Hochsetzsteller-schaltung oder einen Tief- und Hochsetzsteller oder auch einen DC/DC-Konverter mit Potentialtrennung) entkoppelt. Es ist dann eine hohe Schwankung der Speicherkondensatorspannung zulässig, da über ein entsprechendes Tastverhältnis des DC/DC-Konverters stets eine Anpassung an die (konstante) DC-Spannung erfolgen kann. Demgemäss kann der Energieinhalt des Speicherkondensators nun zu einem wesentlich höheren Grad für den Ausgleich der niederfrequenten Leistungsschwankung genutzt werden; z.B. verbleiben bei einer Entladung des Speicherkondensators auf 50% der Nennspannung nur 25% der ursprünglich gespeicherten Energie, d.h., es werden 75% des Nenn-Energieinhaltes für den Leistungsausgleich genutzt. Dies erlaubt, anstelle von Elektrolytkondensatoren Folien- oder Keramikkondensatoren einzusetzen, welche eine signifikant höhere Lebensdauer aufweisen. Die geringere Kapazitätsdichte (Kapazität/Volumen) dieser Kondensator-technologien kann aufgrund der quadratischen Abhängigkeit der gespeicherten Energie von der Spannung – im Gegensatz zur linearen Abhängigkeit von der Kapazität – durch eine entsprechend hohe Schwankung der Speicherkondensatorspannung ausgeglichen werden, womit insbesondere bei Forderung nach kleinen Werten der verbleibenden Schwankung der DC-Spannung trotz des zusätzlich erforderlichen Tief- oder Hochsetzstellers ein Baugrössenvorteil resultiert.

**[0013]** Für die weitere Beschreibung soll der über einen DC/DC-Konverter angekoppelte Speicherkondensator allgemein als Energiespeicher bezeichnet werden. Als Ausführungsvarianten eines entsprechenden DC/DC-Koppelkonverters werden der Einfachheit halber nur ein DC/DC-Tiefsetzsteller (der Strom in der Tiefsetzstellerinduktivität definiert direkt den dem Energiespeicher entnommenen Strom) und ein DC/DC-Hochsetzsteller (der Strom in der Hochsetzstellerinduktivität definiert direkt den für den Leistungsausgleich in die DC-Spannung gespeisten Strom) betrachtet werden. Diese Grundvarianten sind auch für komplexere Konverterschaltungen (z.B. mit Potentialtrennung) kennzeichnend, bzw. kann die Beschreibung sinngemäss einfach auf komplexere Schaltungen übertragen werden. Insgesamt kann eine Kombination des Tief- oder Hochsetzstellers und des Energiespeichers als aktiver Kompensator oder aktives Filter für eine niederfrequente Komponente der Differenz von Ein- und Ausgangsleistung des Hauptkonverters gesehen werden. Neben dem Kompensator ist i.a. auch noch ein direkt an der zu stützenden DC-Spannung liegender Stützkondensator – im Weiteren als Pufferkapazität bezeichnet – vorzusehen, welcher schaltfrequente Stromanteile aufnimmt und die aufgrund der real stets begrenzten Regeldynamik des aktiven Kompensators verbleibenden Leistungsschwankungen aufnimmt.

**[0014]** Bezüglich der Ankopplung des Kompensators ist darauf hinzuweisen, dass für DC/DC-Konverter (d.h. Systeme ohne AC-Anschluss) der Kompensator vorteilhaft an dem Port angeordnet wird, an dem die Leistungsschwankung auftritt, sodass die eigentliche DC/DC-Konversion auf den konstanten Leistungsfluss beschränkt werden kann. Für Dreiphasen-AC/AC-Konverter ist ausser einer Ankopplung des Energiespeichers am DC-Zwischenkreis auch eine Ankopplung an einem der AC-Anschlüsse möglich, wobei dann ein AC/DC-Koppelkonverter vorzusehen ist und die durch den Kompensator zu liefernde Leistung über entsprechende AC-Ströme eingespeist wird.

**[0015]** In der Literatur wird die Struktur und Grundfunktion derartiger Kompensatoren allgemein beschrieben, es fehlen jedoch Details zur Sollwertvorgabe und Regelung der Stromentnahme aus dem Energiespeicher bzw. Stromspeisung in den Energiespeicher und zur Sicherstellung einer mittleren Energiespeicherspannung, d.h. einer Regelung, welche eine beständige langsame Entladung oder Aufladung der Pufferkapazität verhindert. Weiter wird die Regelung der eigentlichen DC-Spannung, d.h. der Spannung der Pufferkapazität, nicht in Verbindung mit der Regelung des Kompensators behandelt und es wird nur eine vollständige und nicht auch eine nur teilweise Eliminierung der niederfrequenten Leistungsschwankung betrachtet, welche u.U. bei pulsierender Ein- und Ausgangsleistung oder bei Überlast oder allgemein bei Minimierung des Kompensatoraufwandes vorteilhaft bzw. erforderlich sein kann.

**[0016]** Mit dem Begriff «niederfrequent» sind hier Frequenzen im Bereich einer Netzwechselspannung oder einer Grundfrequenz, einer Wechselspannung an einem Port des Konvertersystems bezeichnet. «Niederfrequent» kann somit Frequenzen von bis zum Zwei-, Fünf- oder Zehnfachen einer solchen Netz- oder Grundfrequenz umfassen. Diese unterscheiden sich von «hochfrequenten» Frequenzbereichen, die im Bereich von Schaltfrequenzen von elektronischen Schaltern des Konvertersystems liegen.

**[0017]** Eine Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur Regelung eines aktiven Kompensators zur Eliminierung niederfrequenter Differenzen der Ein- und Ausgangsleistung eines Konvertersystems zu schaffen, welches eine Reduktion der Kapazität eines Pufferspeichers des Konvertersystems erlaubt.

**[0018]** Eine weitere Aufgabe ist es, ein Verfahren zur Regelung eines aktiven Kompensators und eine entsprechende Vorrichtung zu schaffen, welche eine Regelung einer DC-Spannung eines Konverters einbeziehen und/oder eine Vorgabe eines Profils der zu kompensierenden Leistung oder des nach Kompensation verbleibenden Leistungsprofils erlauben.

**[0019]** Eine weitere Aufgabe ist es, ein Verfahren zur Regelung eines aktiven Kompensators und eine entsprechende Vorrichtung zu schaffen, welche für den Einsatz mit einem AC/DC-, DC/AC-, AC/AC- oder DC/DC-Konvertersystem geeignet sind.

**[0020]** Mindestens eine dieser Aufgaben löst ein Regelverfahren gemäss den Patentansprüchen. Eine Regelvorrichtung ist erwähnt.

**[0021]** Das Regelverfahren dient zur aktiven Kompensation von Schwankungen eines Leistungsflusses eines leistungselektronischen Konvertersystems,

wobei das Konvertersystem einen Hauptkonverter zur Leistungsübertragung zwischen einem DC-Port und einem Ausgangs-Port, auch AC-Port genannt, sowie eine parallel zum DC-Port geschaltete Pufferkapazität C mit einer Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  aufweist;

wobei parallel zur Pufferkapazität C ein Kompensator geschaltet ist, welcher einen Koppelkonverter und einen Energiespeicher aufweist, wobei der Koppelkonverter dazu eingerichtet ist, Energie in den Energiespeicher zu speisen respektive diesem zu entnehmen.

Im Verfahren werden die folgenden Schritte ausgeführt:

- Bestimmen einer vom Hauptkonverter am Ausgangs-Port gelieferten Leistung  $p_{out,AC}$ ;
- Bestimmen, anhand der vom Hauptkonverter am Ausgangs-Port gelieferten Leistung  $p_{out,AC^*}$ , eines Sollwertes einer vom Kompensator abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out^*}$  und/oder eines Sollwertes für einen Energiespeicherstrom  $i_{E^*}$  des Kompensators;
- Ansteuern des Koppelkonverters, sodass die vom Kompensator abgegebene bzw. aufgenommene Leistung und/oder der Energiespeicherstrom dem entsprechenden Sollwert folgt.

**[0022]** Hier und auch in den anschliessenden Varianten und beispielhaften Ausführungsformen wird der Ausgangs-Port beispielhaft als Wechselspannungsanschluss betrachtet und auch AC-Port genannt. Dabei kann eine Spannung am Ausgangs-Port respektive AC-Port eine prinzipiell beliebige, also auch schwankende und/oder im Grenzfall den Wert Null aufweisende Frequenz aufweisen. Somit eignet sich das Verfahren auch zur Anwendung bei DC/DC-Konvertern. Ausgangsfilter am Ausgangs-Port können entsprechend einer Betriebsfrequenz oder der Betriebsweise (AC oder DC) des Ausgangs-Ports ausgelegt werden.

**[0023]** Das Bestimmen der vom Hauptkonverter am Ausgangs-Port gelieferten Leistung  $p_{out,AC}$  kann durch Messungen von Grössen wie Spannungen und Strömen am Konverter und/oder anhand von Sollwerten für solche Grössen geschehen.

**[0024]** Gemäss einer Ausführungsform werden zur Unterdrückung einer AC-Komponente der Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  die folgenden Schritte ausgeführt:

- Hochpassfiltern der Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  zum Bestimmen einer Schwankung der Pufferkapazitätsspannung  $u_{C,AC}$ ;

- Verarbeiten der Schwankung der Pufferkapazitätsspannung  $u_{C,AC}$  in einem ersten Regelglied und Bestimmen eines Korrekturwertes der Kompensatorleistung  $p_{K,C^*}$  anhand einer Ausgangsgrösse dieses Regelglieds;
- Addieren dieses Korrekturwertes der Kompensatorleistung  $p_{K,C^*}$  zum Sollwert der vom Kompensator abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out^*}$  vor dessen weiterer Verarbeitung.

**[0025]** Diese Ausführungsform kann in Kombination mit den vorgängig beschriebenen Schritten oder unabhängig davon realisiert werden.

**[0026]** Gemäss einer Ausführungsform werden zur Regelung einer mittleren Spannung des Energiespeichers die folgenden Schritte ausgeführt:

- Tiefpassfiltern der Energiespeicherspannung  $u_E$  zum Bestimmen eines Mittelwerts  $u_{E,quer}$  der Energiespeicherspannung  $u_E$ ;
- Bilden einer Differenz  $Du_{E,quer}$  des Mittelwerts  $u_{E,quer}$  der Energiespeicherspannung  $u_E$  von einem entsprechenden Sollwert  $u_{E,quer^*}$ ;
- Verarbeiten dieser Differenz  $Du_{E,quer}$  in einem zweiten Regelglied und Bestimmen eines einen ergänzenden niederfrequenten Kompensatorleistungsanteils  $p_{K,E,quer^*}$  anhand einer Ausgangsgrösse dieses Regelglieds;
- Addieren dieses Kompensatorleistungsanteils  $p_{K,E,quer^*}$  zum Sollwert der vom Kompensator abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out^*}$  vor dessen weiterer Verarbeitung.

**[0027]** Gemäss einer Ausführungsform werden zur Regelung der Spannung  $u_C$  am DC-Port oder der Stromaufnahme  $i_{in,quer}$  aus einer DC-Spannungsquelle die folgenden Schritte ausgeführt:

- Vorgeben eines Sollwertes  $i_{in,quer^*}$  für den aus der DC-Spannungsquelle aufgenommenen Strom  $i_{in,quer}$ , oder Bestimmen dieses Sollwertes  $i_{in,quer^*}$  anhand eines Gesamtleistungsbedarfs aus einem Hauptkonverterleistungsanteil  $p_{out,quer}$  und einem Kompensatorleistungsanteil  $p_{K,E,quer^*}$  und optional auch der Pufferkapazitätsspannung  $u_C$ ;
- Bestimmen, mittels eines Eingangsstromreglers, eines Sollwertes für einen Pufferkapazitätsspannungsmittelwert  $u_{C,quer^*}$ , welcher den aus der DC-Spannungsquelle aufgenommenen Strom  $i_{in,quer}$  zu seinem Sollwert  $i_{in,quer^*}$  führt; optional mit einer Vorsteuerung nach Massgabe der inneren Spannung  $u_i$  der DC-Spannungsquelle;
- Bestimmen, mittels eines Pufferkapazitätsspannungreglers, eines Sollwertes für einen Kondensatorstrom  $i_C^*$  in die Pufferkapazität  $C$ , der die Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  zu ihrem Sollwert  $u_{C,quer^*}$  führt;
- Bestimmen eines diesem Sollwert für den Kondensatorstrom  $i_C^*$  entsprechenden Korrekturwert der Kompensatorleistung  $p_{K,C^*}$ ;
- Addieren dieses Korrekturwertes der Kompensatorleistung  $p_{K,C^*}$  zum Sollwert der vom Kompensator abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out^*}$  vor dessen weiterer Verarbeitung.

**[0028]** Nachfolgend wird das erfindungsgemässe Verfahren am Beispiel eines Emphasen-DC/AC-Konverters (Wechselrichters) für Leistungstransfer von der DC auf die Ausgangsseite respektive AC-Seite diskutiert. Weiter werden im Sinne der Einfachheit nur die Verhältnisse für eine möglichst schwankungsfreie DC-Spannung, bzw. einen zeitlich konstanten Leistungsfluss am DC-Anschluss (vollständige Deckung der AC-seitigen Leistungsschwankung durch den Kompensator) betrachtet.

**[0029]** Anmerkung: Durch entsprechende Änderung der Vorzeichen der Ströme und Leistungsflüsse sind die erfindungsgemässen Verfahren einfach auch auf Gleichrichterbetrieb, d.h. eine inverse Leistungsflussrichtung, zu übertragen.

**[0030]** Jener Port des DC/AC-Konverters (allgemein Hauptkonverters), an dem der Kompensator angeschlossen ist, wird im Weiteren als Kompensatorport (Interface für den Kompensatoranschluss) bezeichnet. Für den Kompensator wird eine Ausführung mit Tiefsetzsteller (Tiefsetzstellerkompensator) und eine Ausführung mit Hochsetzsteller (Hochsetzstellerkompensator) betrachtet.

**[0031]** Der DC/AC-Konverter werde über den DC-Port durch eine DC-Spannungsquelle mit Innenwiderstand gespeist und wird durch zwei Brückenweige, deren Eingangsspannung durch eine Pufferkapazität gestützt wird, gebildet. An den Ausgängen der Brückenweige sind jeweils ein LC-Tiefpassfilter gegen die negative Spannungsscheine gelegt, welches die diskontinuierlichen Brückenweigeausgangsspannungen glättet. Die Ausgänge der beiden Filter bilden direkt die Wechselspannungsausgangsklemmen (AC-Port), an welchen die AC-Last angeschlossen ist. Für die weitere Beschreibung werden beide Filterstufen gemeinsam kurz als Ausgangsfilter bezeichnet.

**[0032]** Für den Tiefsetzstellerkompensator wird der Koppelkonverter durch einen direkt am Kompensatorport angeordneten Tiefsetzstellerbrückenweige bzw. allgemein eine Kompensatorschaltstufe gebildet, deren Ausgang über eine Tiefsetzstellerinduktivität mit dem Energiespeicher des Kompensators verbunden ist. Der dem Energiespeicher entnommene bzw. in den Energiespeicher fliessende Strom (Energiespeicherstrom) wird also über die Schaltstufe in den letztlich am Kompensatorport abgegebenen bzw. aufgenommenen Strom umgesetzt (siehe Fig. 1); andererseits dient die Schaltstufe der Anpassung der Spannung des Energiespeichers und der Kompensatorportspannung. Der Kompensatorausgangsstrom zeigt also diskontinuierlichen Verlauf, welcher über eine Filterschaltung geglättet werden kann, worauf hier jedoch nicht näher eingegangen wird, da die Steuerung und Regelung des Kompensators, nicht jedoch dessen detaillierte Ausführung des Leistungsteils Gegenstand der Erfindung ist. Der Vollständigkeit halber sei einzig erwähnt, dass anstelle eines Brückenweiges ggf. auch eine Vollbrücke oder allgemein ein bidirektionaler potentialgetrennter DC/DC-Konverter mit am Kompensatorport liegender Schaltstufe eingesetzt werden könnte.

**[0033]** Für den Hochsetzstellerkompensator zweigt typischerweise von der positiven Klemme des Kompensatorports eine Hochsetzstellerinduktivität ab und wird mit dem anderen Ende an eine Hochsetzstellerschaltstufe gelegt, welche weiter mit der negativen Klemme des Kompensatorports verbunden ist. Der Energiespeicher ist am Ausgang der Hochsetzstellerschaltstufe angeordnet (siehe Fig. 2). Auch hier stellt dies nur die Grundanordnung dar; wie vorstehend für den Tiefsetzstellerkompensator beschrieben, sind auch hier weitere Ausführungsformen höherer Komplexität möglich. Wichtiges Merkmal aller Varianten ist, dass der in den Kompensatorport gespeiste oder aus dem Kompensatorport bezogene Strom über die Schaltstufe in einen dem Energiespeicher entnommenen oder in den Energiespeicher fließenden Strom umgesetzt werden kann. Dieser diskontinuierliche Strom kann ggf. durch ein zwischen Schaltstufe und Energiespeicher angeordnetes Filter geglättet werden. Andererseits dient die Schaltstufe der Anpassung der Spannung des Energiespeichers und der Kompensatorportspannung. Anstelle des Brückenzeiges kann wieder ohne grundsätzlichen Einfluss auf die erfindungsgemässen Verfahren allgemein eine bidirektionale Schaltstufe höherer Komplexität und ggf. mit integrierter Potentialtrennung eingesetzt werden.

**Teilfunktionen der Regelung:**

**[0034]**

1. Ermittlung eines Sollwertes der vom Kompensator abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung (Kompensatorportleistung) bzw. des Energiespeicherstromes (siehe Fig. 3) in Abhängigkeit der vom Hauptkonverter am AC-Port gelieferten Leistung und optional auch der vor allem durch die Kondensatoren des Ausgangsfilters des Hauptkonverters definierten kapazitiven Blindleistung, welche eine mit zweifacher Ausgangsfrequenz pendelnde und damit von Kompensator auszugleichende Leistungskomponente darstellt. Dieses Verfahren kann in Verbindung mit einer der nachfolgend beschriebenen Erweiterungen oder eigenständig eingesetzt werden.
2. Regelung zur Unterdrückung einer AC-Komponente der Spannung der Pufferkapazität bzw. des DC-Ports (siehe Fig. 4). Diese Anordnung kann zusätzlich zu Teilfunktion 1 oder auch ohne Teilfunktion 1 eingesetzt werden und basiert auf der Grundidee, dass eine glatte Spannung an der Pufferkapazität zeigt, dass die zeitliche Schwankung der Leistung des AG-Ports direkt durch den Kompensator gedeckt wird, womit der Pufferkapazität kein weiterer Strom entnommen werden muss bzw. die Spannung über der Pufferkapazität einen konstanten Wert zeigt. Über den DC-Port, d.h. aus der DC-Spannungsquelle, wird dann eine konstante Leistung bezogen.
3. Regelung der mittleren Spannung des Kompensationskondensators (siehe Fig. 5). Da seitens Teilfunktion 1 oder 2 naturgemäss nur Wechselleistungsanteile definiert werden, ist für die Sicherstellung eines entsprechenden Ruhewertes der Spannung des Energiespeichers (Energiespeicherruhspeisung) ein expliziter Regelkreis vorzusehen. Diese Energiespeicherruhspeisung wird dabei in der Energiemitte und nicht in der Spannungsmitte des durch eine minimal zulässige und eine maximal zulässige Spannung definierten Arbeitsspannungsbandes des Energiespeichers gelegt, sodass der Energiespeicher ausgehend von der Ruhespeisung bis zum Erreichen der Maximalspeisung dieselbe Energiemenge aufnehmen kann, wie er bei Spannungsverringering ausgehend von der Ruhespeisung bis zur Minimalspeisung abzugeben imstande ist. So wird ein für die Kompensation der Leistungspendelungen des AC-Ports symmetrischer Arbeitsbereich sichergestellt. Anmerkung: Für einen Tiefsetzstellerkompensator einfachster Ausführung ist die maximal zulässige Spannung durch die Spannung der Pufferkapazität und die minimal zulässige Spannung durch den Wert Null gegeben. Vorteilhaft wird jedoch von beiden Spannungsgrenzen ein Sicherheitsabstand eingehalten. Für einen Hochsetzstellerkompensator einfacher Ausführung ist die minimal zulässige Spannung gleich der Pufferkapazitätsspeisung, die maximal zulässige Spannung kann unter Berücksichtigung der Speisungsfestigkeit der Leistungshalbleiter und der maximalen Spannungbelastbarkeit des Energiespeichers relativ frei festgelegt werden.
4. Regelung des DC-(Mittel-)wertes der Spannung am DC-Port oder der Stromaufnahme aus der speisenden DC-Spannungsquelle (welche typischerweise einen zeitlich konstanten Wert zeigen soll). Diese Regelung ist erforderlich, da die Regelung der Energiespeicherruhspeisung nach Teilfunktion 3 insbesondere nach Lastsprüngen am AC-Port eine entsprechende Leistungsabgabe oder Leistungsaufnahme des Energiespeichers bzw. Kompensators bewirkt, welche eine Änderung der Pufferkapazitätsspeisung zur Folge hat (die Pufferkapazität wird aufgrund der Anordnung eines Kompensators typ. relativ klein gewählt, womit auch kleinere transiente Leistungsschwankungen bereits in einer relativ grossen Schwankung der Pufferkapazitätsspeisung resultieren). Die Regelung nach Teilfunktion 2 versucht nun, diese Spannungsänderung zu kompensieren, wofür jedoch ein Leistungstransfer an den Energiespeicher erforderlich wäre. Beide Regelungen wirken daher einander entgegen und es ist eine Koordination beider Regelaufgaben erforderlich. Die Lösung liegt in einer Regelung der Stromaufnahme aus der DC-Spannungsquelle bzw. nicht nur des AC-Anteiles der Pufferkapazitätsspeisung (siehe Teilfunktion 2), sondern auch des DC-Wertes, also der gesamten Pufferkapazitätsspeisung.

**[0035]** Im Folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen, welche in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt sind, näher erläutert. Es zeigt jeweils in Form von Schaltbildern respektive Blockschaltbildern:

- Fig. 1 eine Konverterschaltung mit einem aktiven Kompensator mit einem Tiefsetzsteller zur aktiven Kompensation der Spannung eines Energiespeichers eines Hauptkonverters;
- Fig. 2 eine Konverterschaltung mit einem Hochsetzsteller zum gleichen Zweck;
- Fig. 3 einen Regler zur Ermittlung eines Sollwertes für einen Energiespeicherstrom des Kompensators;
- Fig. 4 einen Regler zur Unterdrückung einer AC-Komponente einer Pufferkapazitätsspannung;
- Fig. 5 einen Regler einer mittleren Spannung des Energiespeichers des Kompensators;
- Fig. 6 einen Regler einer Eingangsspannung an einem DC-Port; und
- Fig. 7 einen Regler unter Kombination von Funktionen der Fig. 3, 5 und 6.

[0036] Die vorstehend skizzierten Verfahren/Funktionen werden nachfolgend anhand regelungstechnischer Blockschaltbilder beschrieben. Wie auch für die Konzeption der Regelung werden hierbei vernachlässigbare Verluste der Konverterstufen vorausgesetzt.

[0037] Fig. 1 zeigt einen DC/AC-Hauptkonverter 2 zur Leistungsübertragung zwischen einem DC-Port und einem AC-Port. Am DC-Port ist beispielhaft eine Spannungsversorgung 1 mit einer idealen Spannungsquelle mit Spannung  $u_{in}$  und einem Innenwiderstand angeschlossen. Ein Eingangsstrom am DC-Port ist mit  $i_{in}$  bezeichnet. Am AC-Port ist beispielhaft eine Last 3 angeschlossen. Ein Ausgangsstrom am AC-Port ist mit  $i_{out}$  bezeichnet, eine Ausgangsspannung mit  $u_{out}$ . Der DC/AC-Hauptkonverter 2 weist einen parallel zum DC-Port geschalteten Energiespeicher oder Pufferkapazität C mit Spannung  $u_C$  auf, eine Hauptkonverterschaltstufe 21 und ein Hauptkonverter-Ausgangsfiler 22 auf, dessen Ausgänge den AC-Port bilden. Parallel zur Pufferkapazität C ist über einen Kompensatorport ein aktiver Kompensator 4 geschaltet. Dieser weist einen Koppelkonverter 41 auf, um Energie in einen Kompensationskondensator oder Energiespeicher 42 mit Spannung  $u_E$  zu speisen respektive zu entnehmen. Der Koppelkonverter 41 weist eine Kompensatorschaltstufe 411 und eine Koppelinduktivität 412 auf. In der Fig. 1 ist der Koppelkonverter 41 als Tiefsetzsteller ausgeführt.

[0038] Fig. 2 zeigt dieselben Elemente wie die Fig. 1, mit dem Unterschied, dass der Koppelkonverter 41 als Hochsetzsteller ausgeführt ist.

#### Ad 1. – Ermittlung eines Sollwertes für Energiespeicherleistung resp. Energiespeicherstrom

[0039] Fig. 3: Aufgabe des DC/AC-Hauptkonverters 2 ist es, ausgehend von der Spannung  $u_C$  am DC-Port am AC-Port eine AC-Spannung gemäss einem Sollwert  $u_{out}^*$  einzustellen. Hierfür wird  $u_C$  mittels der Hauptkonverterschaltstufe 21 in eine pulsbreitenmodulierte Spannung umgeformt und diese durch ein ein- oder mehrstufiges Hauptkonverter-(LC-)Ausgangsfiler 22 geglättet (siehe Fig. 1). Die am AC-Port abgegebene Leistung  $p_{out}$  wird als Produkt der Messwerte  $u_{out}$  und  $i_{out}$  berechnet; alternativ zu  $u_{out}$  könnte auch der Sollwert der Ausgangsspannung  $u_{out}^*$  herangezogen werden, da mittels einer hier nicht näher beschriebenen Ausgangsspannungsregelung durch entsprechende Einstellung der oben erwähnten Pulsbreitenmodulation  $u_{out}$  gemäss der Sollwertvorgabe  $u_{out}^*$  geführt werden kann. Zur Ermittlung eines Pendelleistungsanteils  $p_{out,AC}$  von  $p_{out}$ , welcher stationär zweifache Ausgangsfrequenz aufweist, wird durch ein Moving-average-Tiefpassfilter (Knickfrequenz hinreichend weit unterhalb der zweifachen Ausgangsfrequenz gewählt) vorerst ein z.B. auf eine Netzhalbperiode bezogener Mittelwert  $p_{out,qu}$  ermittelt und dieser dann von  $p_{out}$  subtrahiert. Zu  $p_{out,AC}$  wird der, z.B. durch zeitliche Differentiation der einem Ausgangsspannungsmomentanwert  $u_{out}$  (bzw.  $u_{out}^*$ ) zugeordneten gespeicherten Energie ermittelte Momentanblindleistungsbedarf der Filterkondensatoren des Ausgangsfilters,  $p_{out,Q^*}$ , addiert (Anmerkung:  $d/dt (\frac{1}{2} C u_{out}^2) = C u_{out} du_{out}/dt$ ).

[0040] Der so gebildete Sollwert der Leistungslieferung seitens des Kompensators,  $p_{K,out}^* = p_{out,AC}^* + p_{out,Q^*}$ , wird dann für einen Tiefsetzstellerkompensator mittels Division durch die Spannung des Energiespeichers  $u_E$  in einen Sollwert des dem Energiespeicher 42 zu entnehmenden Stromes  $i_E^*$  bzw. des Stromes in der Koppelinduktivität 412 respektive Tiefsetzstellerinduktivität  $i_{L,T}^*$  umgesetzt, welcher durch einen entsprechenden Regelkreis, der auf die Taktung der Kompensatorschaltstufe 411 Einfluss nimmt, eingestellt wird. Hervorzuheben ist, dass hierbei vorteilhaft auch eine (in Fig. 3 nicht gezeigte) Begrenzung des Energiespeicherstromes  $i_E^*$  erfolgen kann, um eine Überlastung des Energiespeichers 42 oder des Koppelkonverters 41 zu vermeiden.

[0041] Für einen Koppelkonverter 41 als Hochsetzsteller (Hochsetzstellerkompensator) ist  $p_{K,out}^*$  durch die Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  zu dividieren, um den Sollwert des Energiespeicherstromes bzw. des Sollwertes des Stromes in der Hochsetzstellerinduktivität  $i_{L,H}^*$  zu erhalten, welcher wieder durch einen Stromregelkreis eingestellt werden kann. Anzumerken ist, dass der Momentanblindleistungsbedarf der Filterkondensatoren  $p_{out,Q^*}$ , z.B. bei tiefen Ausgangsfrequenzen oder kleinen Werten der Filterkapazität, auch unberücksichtigt bleiben kann.

[0042] Weiter ist darauf hinzuweisen, dass bei der Ermittlung der Leistungssollwerte auch der Wirkungsgrad des Hauptkonverters und des Koppelkonverters und des Energiespeichers Berücksichtigung finden können, indem ausgehend von einem Verlustmodell der Konverter der Sollwert  $p_{K,out}^*$  um die beim jeweiligen Stromfluss bzw. Leistungstransfer vorliegenden Verluste des Hauptkonverters, Koppelkonverters und Energiespeichers erhöht wird.

[0043] Zusätzlich ist festzuhalten, dass die vorgehend anhand eines Blockdiagramms beschriebene Ermittlung von  $pK_{out}^*$  nur den Grundgedanken der Kompensation sowohl des Pendelanteiles der Ausgangsleistung als auch der Filterkondensatorblindleistung darstellen soll. Die Zeitverläufe der Grössen  $p_{out,AC}^*$  und  $p_{out,Q}^*$  könnten alternativ auch direkt von  $u_{out}^*$  über Frequenzverdopplung und entsprechende zeitliche Verschiebung abgeleitet und die Amplituden in Verbindung mit  $i_{out}$  (für  $p_{out,AC}$ ) auf Basis allgemeiner Leistungsflussberechnungen in Einphasen-AC-Systemen festgelegt werden.

[0044] Schliesslich sei auch noch die Möglichkeit erwähnt, dass  $p_{out,AC}^*$  nur Anteile innerhalb eines nach oben beschränkten Frequenzbereiches und nicht wie nach Fig. 3 den gesamten AC-Anteil von  $p_{out}$  umfasst. Die Tiefpassfilterung von  $p_{out}$  ist dann durch eine Bandsperre zu ersetzen.

### Ad 2. – Unterdrückung einer AC-Komponente der Spannung der Pufferkapazität

[0045] Fig. 4: Die unter 1) beschriebene Kompensatorleistungsvorsteuerung, welche auf  $pK_{out}^*$  führt, kann durch einen Regelkreis ergänzt sein, welcher eine zeitliche Schwankung der Spannung der Pufferkapazität zu Null regelt. Die Pufferkapazität ist hierbei als Detektor für eine unvollständige Kompensation der zufolge der Blindleistung des Ausgangsfilters und der Schwankung der an die Last gelieferten Leistung mit zweifacher Netzfrequenz auftretenden Leistungspulsation am Wechselrichtereingang durch den Kompensator zu sehen, welche z.B. aufgrund von Messungenauigkeiten oder Toleranzen von Komponenten (Kondensatoren des Ausgangsfilters) auftreten kann. Die damit nach der Kompensation verbleibende Wechselleistung führt zu einer Schwankung der Pufferkapazitätsspannung  $u_{C,AC}$  welche durch Hochpassfilterung von  $u_C$  mit hinreichend weit unter der zweifachen Netzfrequenz liegender Knickfrequenz erfasst und an einen Soll-Ist-Vergleich einer Pufferkapazitätsspannungsschwankungsregelung mit Sollwert Null geführt wird; der Regelfehler wird dann durch einen Regler (Pufferkapazitätsspannungsschwankungsregler) in einen Korrekturwert der Kompensatorleistung  $pK_{C}^*$  umgesetzt, der zu dem nach Teilfunktion 1 berechneten Sollwert  $pK_{out}^*$  addiert wird, womit ein Gesamtsollwert  $pK_{ges}^*$  resultiert. Anmerkung:  $pK_{C}^*$  kann direkt durch den Pufferkapazitätsspannungsschwankungsregler gebildet werden oder der Regler gibt einen Nachladestromsollwert  $i_{C,AC}^*$  der Pufferkapazität aus, welcher dann zu Berechnung von  $pK_{C}^*$  mit der aktuellen Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  multipliziert wird, womit dasselbe Regelziel erreicht wird, jedoch ein anderes dynamisches Verhalten der Regelung resultiert; weiter ist alternativ auch eine Multiplikation des Nachladestromsollwerts  $i_{C,AC}^*$  mit dem für den jeweiligen Betriebspunkt vorliegenden Nennwert der Pufferkapazitätsspannung möglich.

[0046] Weiter anzumerken ist, dass die Bildung von  $pK_{out}^*$  gemäss Teilfunktion 1 auch gänzlich weggelassen werden kann, womit  $pK_{G}^*$  identisch zum Gesamtsollwert  $pK_{ges}^*$  wird. Die Regelung geschieht dabei also nur mittels der Teilfunktion 2.

[0047] Alternativ zur Ermittlung der zeitlichen Schwankung der Pufferkapazitätsspannung kann auch der (gemessene oder durch zeitliche Ableitung von  $u_C$  ermittelte) Pufferkapazitätsstrom  $i_C$  zu Null geregelt werden, wobei über ein Tiefpassfilter die von der schaltenden Betriebsweise des Wechselrichters und ggf. des Kompensators herrührende schaltfrequente Anteile zu unterdrücken wären. Im vorstehend beschriebenen Blockdiagramm wäre dann  $u_{C,AC}$  durch  $i_C$  zu ersetzen und die Hochpassfilterung von  $u_C$  wegzulassen.

### Ad 3. – Regelung der mittleren Spannung des Energiespeichers

[0048] Fig. 5: Zur Regelung der mittleren Spannung des Energiespeichers, auch Energiespeicherruhespannung genannt, kann ein Mittelwert  $u_{Equer}$  der Energiespeicherspannung  $u_E$  mittels eines Tiefpassfilters mit hinreichend weit unter der zweifachen Ausgangsfrequenz liegenden Knickfrequenz ermittelt werden und kann nachfolgend mittels eines Soll-Ist-Vergleichs dessen Abweichung  $Du_{Equer}$  von einem entsprechenden Sollwert  $u_{Equer}^*$ , der beispielsweise durch die Energiemitte des zulässigen Schwankungsbandes der Spannung  $u_E$  definiert ist, berechnet werden.  $Du_{Equer}$  wird einem Regler (Energiespeicherruhespannungsregler) zugeführt, welcher einen Nachladestromsollwert  $i_{Equer}^*$  ausgibt, der mit  $u_{Equer}$  multipliziert einen ergänzenden niederfrequenten Kompensatorleistungsanteil  $pK_{Equer}^*$  ergibt, welcher  $u_{Equer}$  auf  $u_{Equer}^*$  zurückführt.

[0049] Anmerkung: Anstelle der Multiplikation mit  $u_{Equer}$  kann auch eine Multiplikation mit  $u_{Equer}^*$  treten, oder der Regler kann direkt  $pK_{Equer}^*$  ausgeben.

[0050] Naheliegender wäre nun, diesen Leistungsanteil einfach zum Gesamtsollwert  $pK_{ges}^*$  nach Teilfunktion 2 zu addieren und so einen totalen Kompensatorleistungssollwert zu bilden. Dies ist jedoch nicht möglich, da z.B. nach einem Lastsprung am AC-Port ein transienter Leistungsanteil  $pK_{Equer}^*$  auftritt. (Ein Lastsprung bedeutet auch eine momentan höhere Pendelleistung, welche entsprechend Teilfunktion 1 aus dem Energiespeicher gedeckt wird und damit zu einer transienten Änderung der Energiespeicherspannung führt, welche auch in einem transienten Ausgangssignal der Energiespeicherruhespannungsregelung resultiert). Die Einstellung von  $pK_{Equer}^*$  würde zu einer transienten Absenkung der Pufferkapazitätsspannung führen, welche über den Pufferkapazitätsspannungsschwankungsregler in der Anforderung einer aus dem Energiespeicher zu deckenden Nachladeleistung  $pK_{C}^*$  resultieren würde, die  $pK_{Equer}^*$  entgegenwirken würde. Beide Regler würden daher einander entgegenwirken, womit potentiell die Gefahr einer Instabilität gegeben wäre. Die Energiespeicherruhespannungsregelung ist daher nicht in Kombination mit dem Verfahren nach Teilfunktion 2 (Fig. 4), sondern nur gemeinsam mit der Kompensatorleistungsvorsteuerung nach Teilfunktion 1 (welche  $pK_{out}^*$  definiert, Fig. 3) betreibbar, womit insgesamt ein Kompensatorleistungssollwert  $pK^* = pK_{out}^* + pK_{Equer}^*$  resultiert (siehe Fig. 5). Für eine



gleichzeitige Regelung der Pufferkapazitätsspannungsschwankung und der Energiespeicherruhspeisung ist eine Modifikation gemäss Teilfunktion 4 erforderlich.

**[0051]** Anzumerken ist, dass anstelle der linearen Regelung der Energiespeicherruhspeisung  $u_{Equer}$  auch eine nicht-lineare Regelung, z.B. einer Zweipunktregelung, innerhalb des durch den Maximalwert und Minimalwert der Energiespeicherspannung definierten Toleranzbandes erfolgen könnte. Bei Überschreiten des Maximalwertes oder Unterschreiten des Minimalwertes würde ein solcher Energiespeichertoleranzbandspannungsregler dann einen entsprechenden Korrekturwert  $i_{Equer}^*$  generieren, welcher die betriebsbedingt schwankende Spannung des Energiespeichers in das Toleranzband zurückführt. Die Breite des Toleranzbandes wäre dabei vorteilhaft abhängig von der Kompensatorleistung  $p_{K,out}^*$ , d.h. für kleinere Leistungswerte enger, zu wählen und das Band stets energiesymmetrisch um die Energiemitte zwischen Minimal- und Maximalwert der Energiespeicherspannung zu legen, um die maximale Möglichkeit einer transienten Energielieferung aus dem Speicher oder einer transienten Leistungsaufnahme durch den Speicher sicherzustellen.

#### Ad 4. – Regelung des DC-(Mittel-)Wertes der Spannung am DC-Port oder der Stromaufnahme aus der speisenden DC-Spannungsquelle

**[0052]** Fig. 6: Sowohl der Mittelwert der Ausgangsleistung  $p_{out,quer}$  als auch der für eine eventuelle Korrektur der mittleren Energiespeicherspannung auf den Energiespeicherruhspeisungswert durch den Kompensator bezogene Leistungswert  $p_{K,Equer}$  sind vom Eingang her zu beziehen. Die Summe dieser beiden Leistungen oder deren Sollwerte  $p_{out,quer}^*$  und  $p_{K,Equer}^*$  wird als Gesamtleistungsbedarf betrachtet. Es kann daher ein Regler für den aus der DC-Spannungsquelle aufgenommenen (Gleich-)Strom  $i_{in,quer}$  implementiert werden, dessen Sollwert anhand des Gesamtleistungsbedarfs als  $i_{in,quer}^* = (p_{out,quer}^* + p_{K,Equer}^*)/u_{C,quer}$  ermittelt wird. Dabei wird  $u_{C,quer}$  durch Tiefpassfilterung der Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  gebildet; die Tiefpassknickfrequenz ist hierbei hinreichend tief unterhalb der zweifachen Ausgangsfrequenz zu wählen. Dieser Sollwert  $i_{in,quer}^*$  wird nun mit dem Istwert  $i_{in}$  des Eingangsstromes (alternativ mit dem tiefpassgefilterten Strom  $i_{in,quer}$ ) verglichen und der Regelfehler  $Di_{in}$  einem Eingangsstromregler zugeführt, der einen Sollwert des an der inneren Impedanz der speisenden Spannungsquelle mit innerer Spannung  $u_i$  einzustellenden Spannungsabfalls  $u_{Zi,quer}^*$  ausgibt, aus dem unter Berücksichtigung von  $i_{in,quer}$  durch Differenzbildung ein Sollwert für den Pufferkapazitätsspannungsmittelwert  $u_{C,quer}^*$  ermittelt werden kann. Alternativ kann die Vorsteuerung durch Differenzbildung mit  $u_{in}$  auch entfallen, wobei der Eingangsstromregler dann direkt  $u_{C,quer}^*$  auszugeben hat.

**[0053]** Der Sollwert für den Pufferkapazitätsspannungsmittelwert  $u_{C,quer}^*$  wird nun mit dem Istwert  $u_C$  der Pufferkapazitätsspannung verglichen (hier können z.B. höherfrequente Komponenten von  $u_C$  auch durch ein Tiefpassfilter hoher Knickfrequenz abgetrennt werden, oder es kann ein definierter Frequenzbereich von  $u_C$  durch eine Bandsperre ausgeblendet werden). Die resultierende Regelabweichung  $Du_C$  wird einem Pufferkapazitätsspannungsregler zugeführt, der einen Sollwert des für die Korrektur von  $u_C$  in Richtung  $u_{C,quer}^*$  erforderlichen Kondensatorstromes,  $i_{C}^*$ , ausgibt. Dieser kann durch Multiplikation mit  $u_{C,quer}$  in einen Sollwert zur Korrektur der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$  umgesetzt werden. Es ist in einer alternativen Ausführungsform auch eine Multiplikation mit dem Istwert  $u_C$  möglich, wobei dann ein anderes regelungstechnisches Verhalten resultiert. Analog wie für die Teilfunktion 2 beschrieben, wird  $p_{K,C}^*$  dann mit  $p_{K,out}^*$  addiert und so der Gesamtsollwert für die insgesamt vom Kompensator zu liefernde Leistung  $p_{K,ges}^*$  gebildet. Anzumerken ist, dass die Vorsteuerung von  $p_{K,ges}^*$  durch  $p_{K,out}^*$  auch weggelassen werden kann, wobei dann  $p_{K,C}^*$  direkt die Funktion von  $p_{K,ges}^*$  übernimmt.

**[0054]** Wichtig ist weiter, darauf hinzuweisen, dass durch die vorstehend beschriebene Struktur implizit auch die Eliminierung einer AC-Komponente der Pufferkapazitätsspannung erreicht wird, da der Sollwert des Pufferkapazitätsspannungsmittelwertes  $u_{C,quer}^*$  mit der ungefilterten Pufferkapazitätsspannung und nicht mit einer tiefpassgefilterten Spannung verglichen wird. In den Regelfehler  $Du_C$  geht somit auch eine eventuelle Schwankung von  $u_C$  mit zweifacher Ausgangsfrequenz ein bzw. wirkt die Regelung in Richtung einer Unterdrückung einer derartigen Schwankung.

**[0055]** Ist die innere Impedanz der den DC-Port speisenden Quelle bekannt und weist z.B. rein ohmsche Charakteristik (Innenwiderstand) auf, kann der Sollwert von  $i_{in}^*$  alternativ zu einem Eingangsstromregler auch durch direkte Vorgabe von  $u_{C,quer}^*$  eingestellt werden, wobei  $u_{C,quer}^*$  dann so gewählt wird, dass der sich über den Innenwiderstand  $R_i$  bildende Spannungsabfall direkt eine Stromaufnahme  $i_{in} = i_{in}^*$  bewirkt ( $u_{Zi,quer}^* = R_i \cdot i_{in,quer}^*$  bzw.  $u_{C,quer}^* = u_{in} - i_{in}^* R_i$ ;  $u_{in}$  bezeichnet die innere Spannung der den DC-Port speisenden Spannungsquelle).

**[0056]** Anzumerken ist, dass durch Erweiterung des Blockschaltbildes nach Fig. 6 auch eine definierte Schwankung der der speisenden Spannungsquelle entnommenen Leistung erreicht werden kann. Es kann hierfür z.B. bei der Addition von  $p_{out,quer}^*$  und  $p_{K,Equer}^*$  ein Wechselleistungsanteil ergänzt werden oder zur Subtraktion von  $i_{in,quer}^*$  und  $i_{in,quer}$  ein Wechselstromanteil hinzugefügt werden. Weiter ist darauf hinzuweisen, dass eine definierte Schwankung der Spannung  $u_C$  durch Hinzufügen eines Wechselanteiles zur Subtraktion von  $i_{in,quer}$  und  $u_{Zi,quer}^*$  erreicht werden kann. Schliesslich ist auch  $i_{C}^*$  direkt vorgebar, wobei dann über ein anderes Verfahren für die Sicherstellung einer Variation von  $u_C$  um die Energie-Spannungsmittelwert  $u_{Equer}^*$  zu sorgen ist. Die vorstehend beschriebenen Eingriffe können z.B. durch übergeordnete Regler erfolgen.

**[0057]** Fig. 7 zeigt eine mögliche Kombination von oben beschriebenen Einzelregelungen. Es ist dabei ein Teil des Reglers aus der Fig. 5 gemäss Teilfunktion 3 zur Bestimmung von  $p_{K,Equer}^*$  dem Regler aus der Fig. 6 vorgeschaltet. Ferner wird der mit dem Regler aus der Fig. 6 gemäss Teilfunktion 4 bestimmte Sollwert zur Korrektur der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$

zum wie in Fig. 3 gemäss Teilfunktion 1 gebildeten Sollwert der Leistungslieferung entsprechend der Last  $p_{K,out}^*$  addiert und so der Gesamtsollwert für die insgesamt vom Kompensator zu liefernde Leistung  $p_{K,ges}^*$  gebildet.

**[0058]** Allgemein gilt, dass die verwendeten Regler oder Regelglieder typischerweise PID-Regler sind, was natürlich auch reine P-, PI-, PD-Regler etc. umfasst. Sie können aber auch nichtlineare und/oder zeitinvariante und/oder adaptive Elemente etc. aufweisen.

**[0059]** Regelstrukturen für einen Kompensator mit Hochsetzsteller sind in analoger Weise gebildet. Dabei gelten die folgenden Prinzipien: Naturgemäss ist für den Hochsetzsteller der am Kompensatorport auftretende Strom  $i_K$  direkt durch den Strom in der Hochsetzstellerinduktivität  $L_{H12}$  bestimmt. Anstelle der für den Tiefsetzstellerkompensator notwendigen Betrachtung von Leistungen am Kompensatorport, welche dann mit der Energiespeicherspannung  $u_E$  in eine dem Energiespeicher 42 zu entnehmendem, bzw. in der Tiefsetzstellerinduktivität einzustellenden Strom  $i_E^*$  umzurechnen sind, ist für den Hochsetzsteller eine direkte Betrachtung von  $i_K$  bzw. des Sollwertes  $i_K^*$  möglich, womit verschiedene Multiplikationen und Divisionen im Regelalgorithmus entfallen können; in jedem Fall ist jedoch  $i_K^*$  stets mittels Division durch  $u_C$  oder  $u_{Cquer}^*$  aus  $p_{K,ges}^*$  zu berechnen.

### Patentansprüche

1. Regelverfahren zur aktiven Kompensation von Schwankungen eines Leistungsflusses eines leistungselektronischen Konvertersystems, wobei das Konvertersystem einen Hauptkonverter (2) zur Leistungsübertragung zwischen einem DC-Port und einem Ausgangs-Port sowie eine parallel zum DC-Port geschaltete Pufferkapazität C mit einer Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  aufweist; wobei parallel zur Pufferkapazität C ein Kompensator (4) geschaltet ist, welcher einen Koppelkonverter (41) und einen Energiespeicher (42) aufweist, wobei der Koppelkonverter (41) dazu eingerichtet ist, Energie in den Energiespeicher (42) zu speisen respektive diesem zu entnehmen; und wobei im Verfahren die folgenden Schritte ausgeführt werden:
  - Bestimmen einer vom Hauptkonverter am Ausgangs-Port gelieferten Leistung  $p_{out,AC}^*$ ;
  - Bestimmen, anhand der vom Hauptkonverter am Ausgangs-Port gelieferten Leistung  $p_{out,AC}^*$ , eines Sollwertes einer vom Kompensator (4) abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out}^*$  und/oder eines Sollwertes für einen Energiespeicherstrom  $i_E^*$  des Kompensators (4); und
  - Ansteuern des Koppelkonverters (41), sodass die vom Kompensator (4) abgegebene bzw. aufgenommene Leistung und/oder der Energiespeicherstrom dem entsprechenden Sollwert folgt.
2. Regelverfahren gemäss Anspruch 1, wobei zum Bestimmen des Sollwertes der vom Kompensator abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out}^*$ 
  - dieser Sollwert als Differenz  $p_{out,AC}^*$  zwischen einem Momentanwert und einem zeitlichen Mittelwert der vom Hauptkonverter (2) am Ausgangs-Port gelieferten Leistung berechnet wird; und
  - optional ein Momentanblindleistungsbedarf  $p_{out,Q}^*$  von Filterkondensatoren eines Ausgangsfilters (22) des Hauptkonverters (2) berechnet wird und zu  $p_{out,AC}^*$  addiert wird.
3. Regelverfahren gemäss Anspruch 1 oder 2, wobei zum Bestimmen des Sollwertes für den Energiespeicherstrom  $i_E^*$ 
  - im Falle, dass der Koppelkonverter (41) als Tiefsetzsteller realisiert ist, dieser Sollwert  $i_E^*$  durch Division des Sollwertes der vom Kompensator abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out}^*$  durch die Spannung des Energiespeichers  $u_E$  bestimmt wird; und
  - im Falle, dass der Koppelkonverter (41) als Hochsetzsteller realisiert ist, dieser Sollwert  $i_E^*$  durch Division des Sollwertes der vom Kompensator abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out}^*$  durch die Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  bestimmt wird.
4. Regelverfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei zur Unterdrückung einer AC-Komponente der Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  die folgenden Schritte ausgeführt werden:
  - Hochpassfiltern der Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  zum Bestimmen einer Schwankung der Pufferkapazitätsspannung  $u_{C,AC}$ ;
  - Verarbeiten der Schwankung der Pufferkapazitätsspannung  $u_{C,AC}$  in einem ersten Regelglied und Bestimmen eines Korrekturwertes der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$  anhand einer Ausgangsgrösse dieses Regelglieds;
  - Addieren dieses Korrekturwertes der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$  zum Sollwert der vom Kompensator (4) abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out}^*$  vor dessen weiterer Verarbeitung.
5. Regelverfahren gemäss Anspruch 4, wobei beim Bestimmen des Korrekturwertes der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$ 
  - der Korrekturwert der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$  gleich der Ausgangsgrösse des ersten Regelglieds gesetzt wird; oder
  - der Korrekturwert der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$  als Produkt der Ausgangsgrösse des ersten Regelglieds mit der aktuellen Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  bestimmt wird; oder
  - der Korrekturwert der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$  als Produkt der Ausgangsgrösse des ersten Regelglieds mit einem Nennwert der Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  bestimmt wird.

6. Regelverfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei zur Regelung einer mittleren Spannung des Energiespeichers (42) die folgenden Schritte ausgeführt werden:
  - Tiefpassfiltern der Energiespeicherspannung  $u_E$  zum Bestimmen eines Mittelwerts  $u_{E,quer}$  der Energiespeicherspannung  $u_E$ ;
  - Bilden einer Differenz  $Du_{E,quer}$  des Mittelwerts  $u_{E,quer}$  der Energiespeicherspannung  $u_E$  von einem entsprechenden Sollwert  $u_{E,quer}^*$ ;
  - Verarbeiten dieser Differenz  $Du_{E,quer}$  in einem zweiten Regelglied und Bestimmen eines einen ergänzenden niederfrequenten Kompensatorleistungsanteils  $p_{K,E,quer}^*$  anhand einer Ausgangsgrösse dieses Regelglieds;
  - Addieren dieses Kompensatorleistungsanteils  $p_{K,E,quer}^*$  zum Sollwert der vom Kompensator (4) abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out}^*$  vor dessen weiterer Verarbeitung.
7. Regelverfahren gemäss Anspruch 6, wobei beim Bestimmen des Kompensatorleistungsanteils  $p_{K,E,quer}^*$ 
  - der Kompensatorleistungsanteil  $p_{K,E,quer}^*$  gleich der Ausgangsgrösse des zweiten Regelglieds gesetzt wird; oder
  - der Kompensatorleistungsanteil  $p_{K,E,quer}^*$  als Produkt der Ausgangsgrösse des zweiten Regelglieds mit dem Mittelwert  $u_{E,quer}$  der Energiespeicherspannung  $u_E$  bestimmt wird; oder
  - der Kompensatorleistungsanteil  $p_{K,E,quer}^*$  als Produkt der Ausgangsgrösse des zweiten Regelglieds mit dem Sollwert  $u_{E,quer}^*$  des Mittelwerts der Energiespeicherspannung  $u_E$  bestimmt wird.
8. Regelverfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei zur Regelung der Spannung  $u_C$  am DC-Port oder einer Stromaufnahme  $i_{in,quer}$  aus einer DC-Spannungsquelle die folgenden Schritte ausgeführt werden:
  - Vorgeben eines Sollwertes  $i_{in,quer}^*$  für den aus der DC-Spannungsquelle aufgenommenen Strom  $i_{in,quer}$ , oder Bestimmen dieses Sollwertes  $i_{in,quer}^*$  anhand eines Gesamtleistungsbedarfs aus einem Hauptkonverterleistungsanteil  $p_{out,quer}$  und einem Kompensatorleistungsanteil  $p_{K,E,quer}^*$ ;
  - Bestimmen, mittels eines Eingangsstromreglers, eines Sollwertes für einen Pufferkapazitätsspannungsmittelwert  $u_{C,quer}^*$ , welcher den aus der DC-Spannungsquelle aufgenommenen Strom  $i_{in,quer}$  zu seinem Sollwert  $i_{in,quer}^*$  führt; optional mit einer Vorsteuerung nach Massgabe der inneren Spannung  $u_i$  der DC-Spannungsquelle;
  - Bestimmen, mittels eines Pufferkapazitätsspannungsreglers, eines Sollwertes für einen Kondensatorstrom  $i_C^*$  in die Pufferkapazität  $C$ , der die Pufferkapazitätsspannung  $u_C$  zu ihrem Sollwert  $u_{C,quer}^*$  führt;
  - Bestimmen eines diesem Sollwert für den Kondensatorstrom  $i_C^*$  entsprechenden Korrekturwertes der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$ ;
  - Addieren dieses Korrekturwertes der Kompensatorleistung  $p_{K,C}^*$  zum Sollwert der vom Kompensator (4) abzugebenden bzw. aufzunehmenden Leistung  $p_{K,out}^*$  vor dessen weiterer Verarbeitung.
9. Regelverfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei zur Bestimmung des Kompensatorleistungsanteils  $p_{K,E,quer}^*$  die folgenden Schritte ausgeführt werden:
  - Tiefpassfiltern der Energiespeicherspannung  $u_E$  zum Bestimmen eines Mittelwertes  $u_{E,quer}$  der Energiespeicherspannung  $u_E$ ;
  - Bilden einer Differenz  $Du_{E,quer}$  des Mittelwerts  $u_{E,quer}$  der Energiespeicherspannung  $u_E$  von einem entsprechenden Sollwert  $u_{E,quer}^*$ ;
  - Verarbeiten dieser Differenz  $Du_{E,quer}$  in einem zweiten Regelglied und Bestimmen des Kompensatorleistungsanteils  $p_{K,E,quer}^*$  anhand einer Ausgangsgrösse dieses Regelglieds.

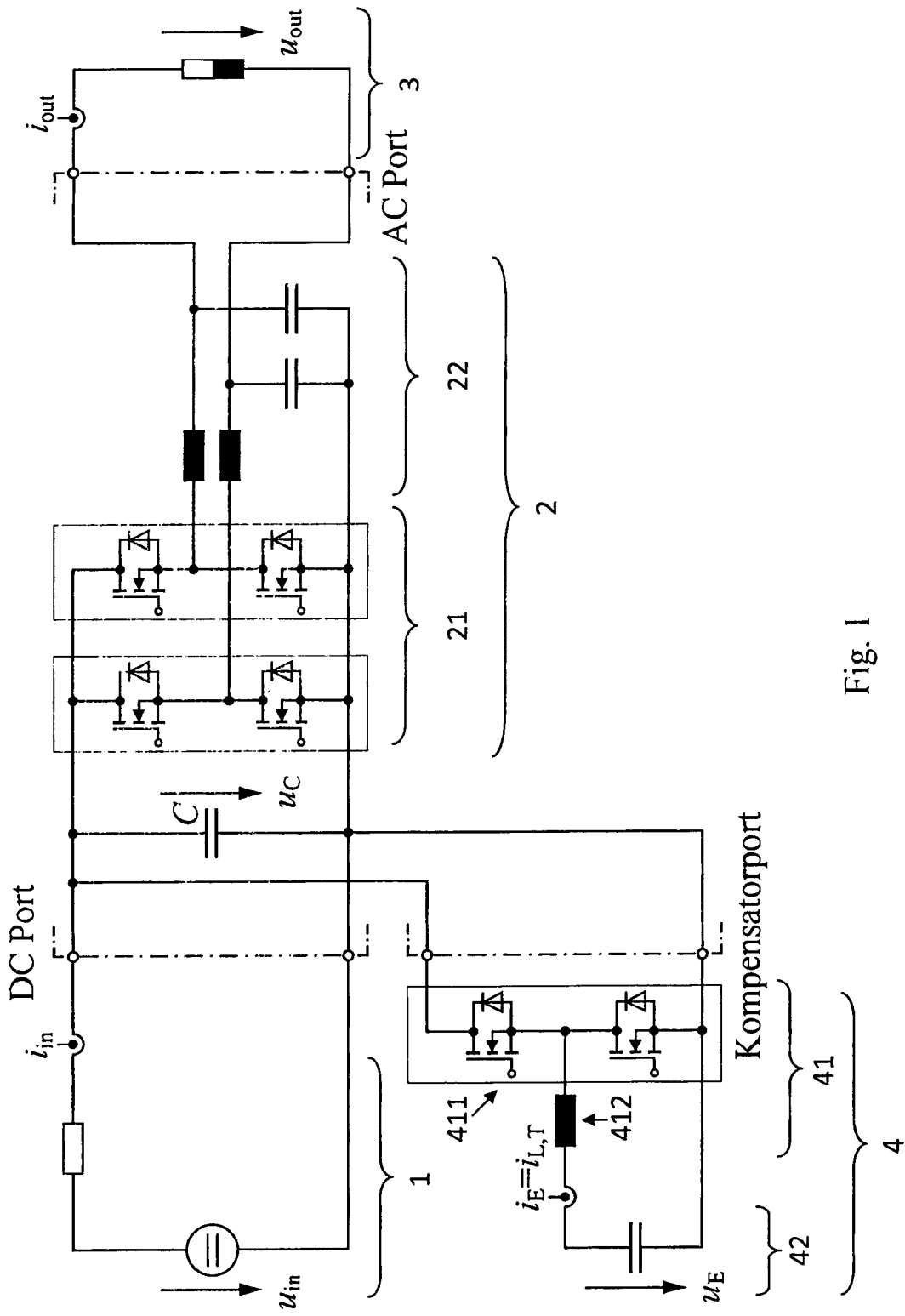


Fig. 1

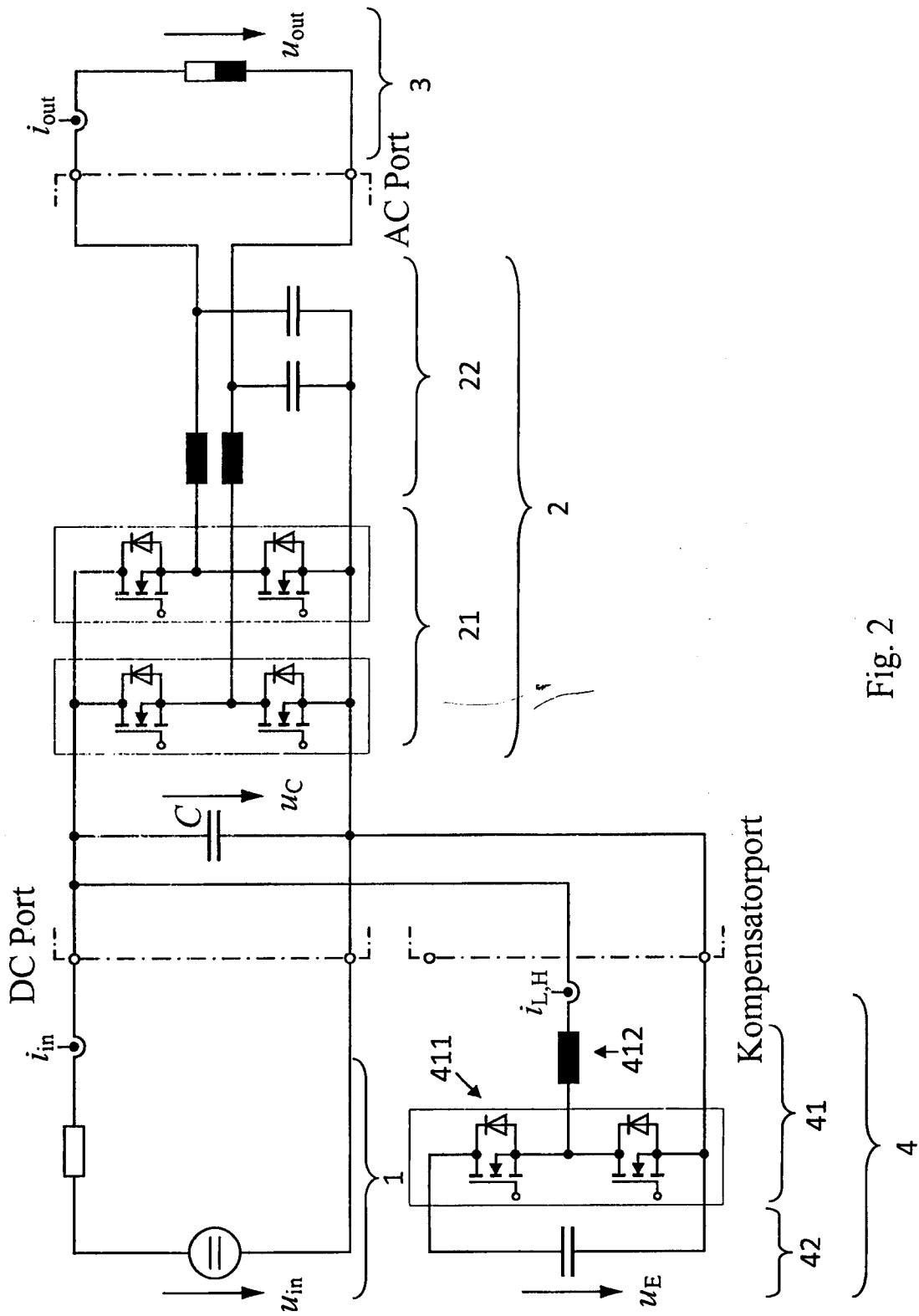


Fig. 2

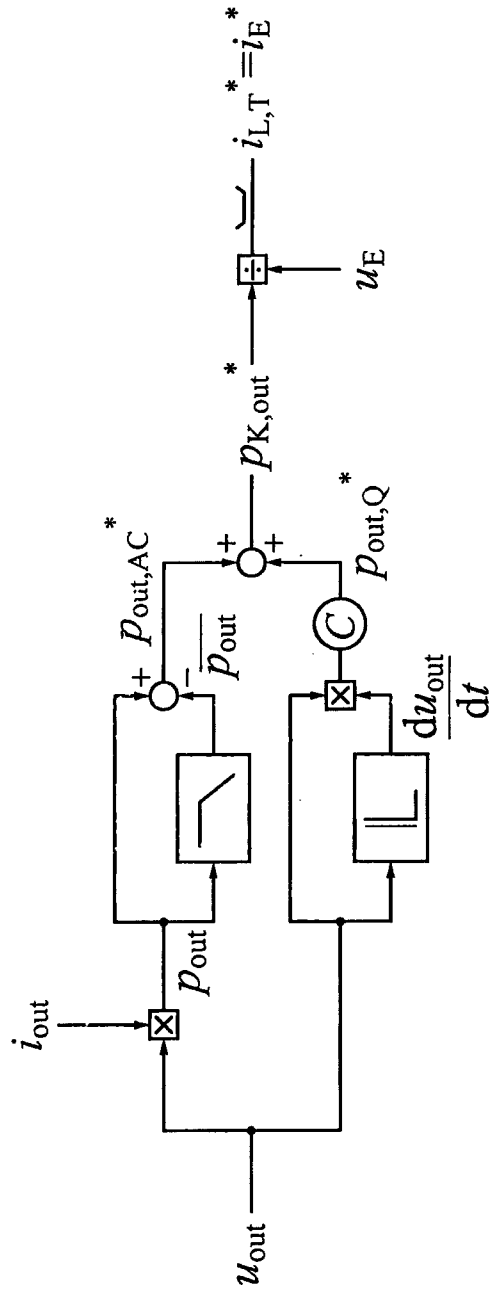


Fig. 3

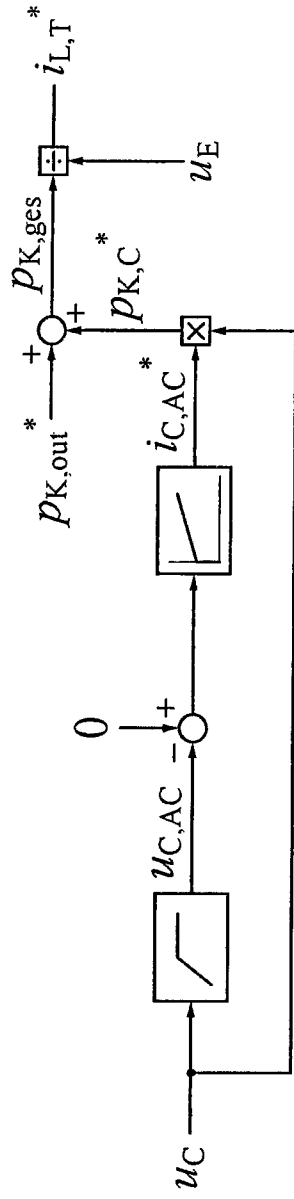


Fig. 4

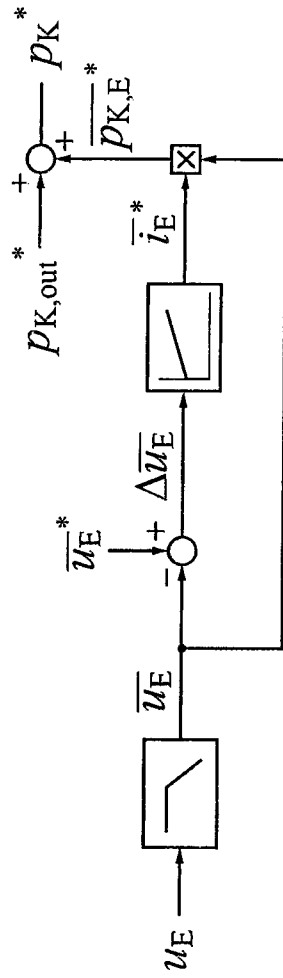


Fig. 5



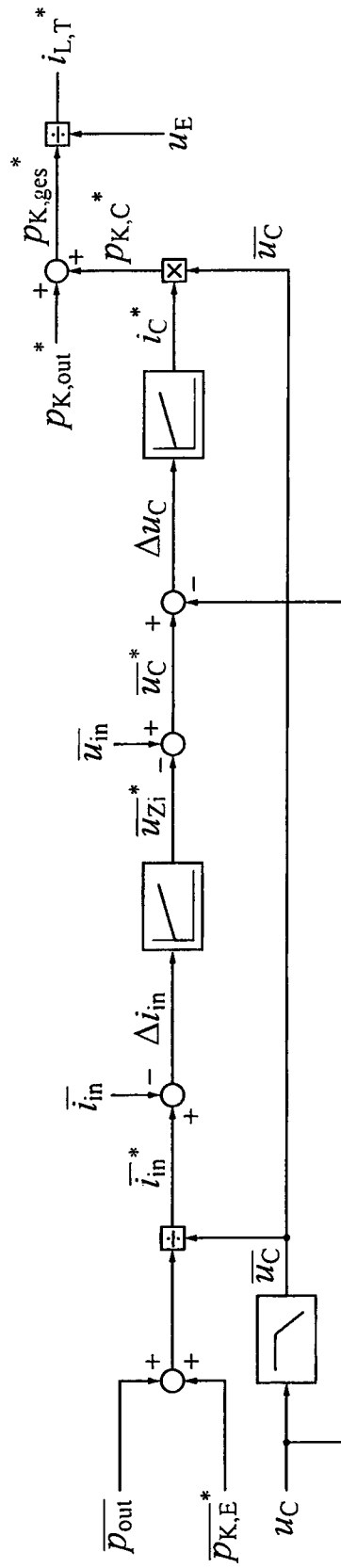


Fig. 6

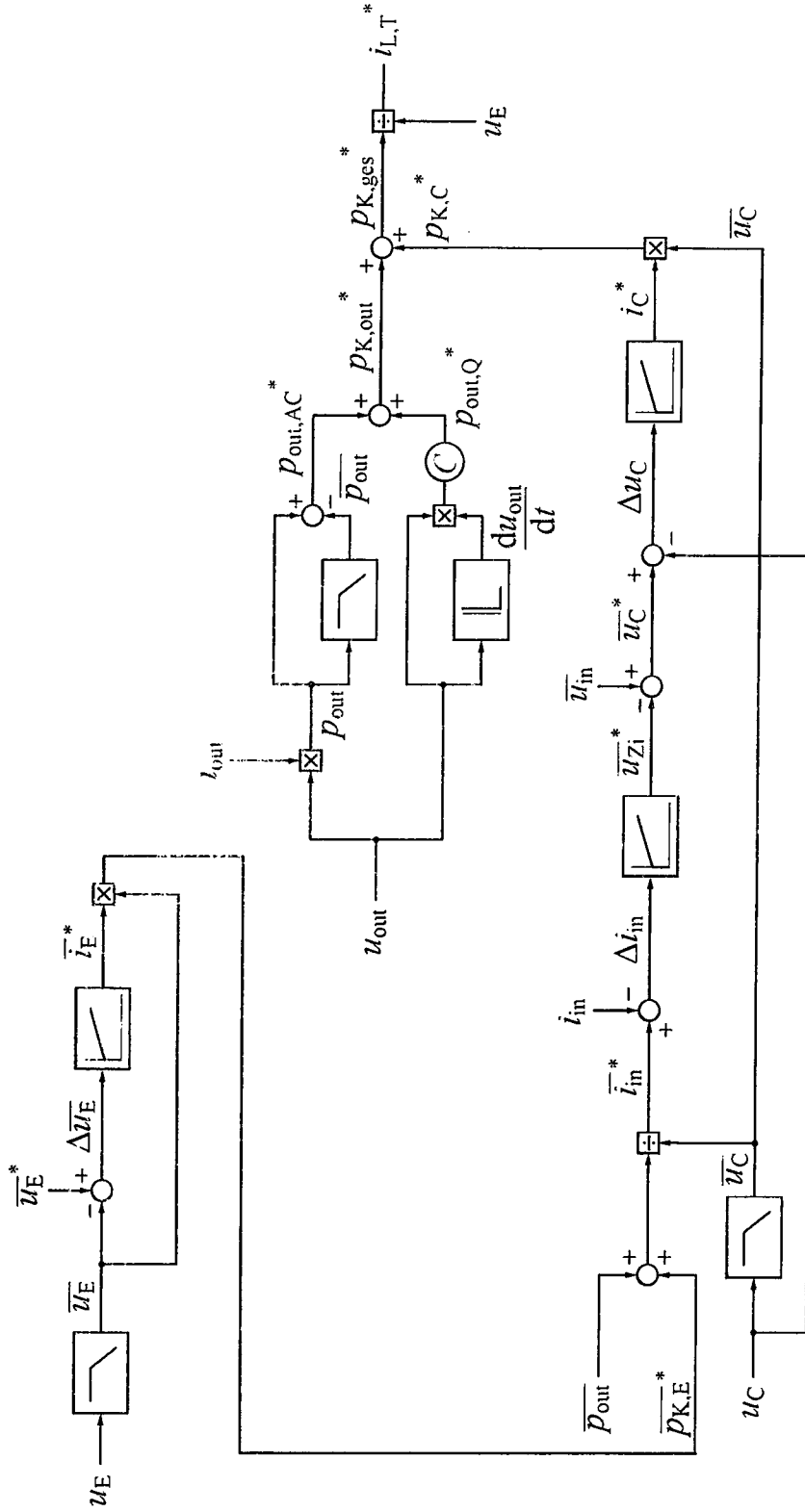


Fig. 7