



SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft  
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 708 511 B1

(51) Int. Cl.: H02M 1/08 (2006.01)  
H02M 7/219 (2006.01)

**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 01545/13

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

(22) Anmeldedatum: 09.09.2013

(72) Erfinder:  
Johann Walter Kolar, 8044 Zürich (CH)  
Patricio Cortes Estay, 8047 Zürich (CH)  
Jonas Huber, 5600 Lenzburg (CH)

(43) Anmeldung veröffentlicht: 13.03.2015

(24) Patent erteilt: 31.03.2017

(45) Patentschrift veröffentlicht: 31.03.2017

(74) Vertreter:  
Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach 1771  
8032 Zürich (CH)

(54) **Verfahren zur Regelung einer Sternpunktspannung eines elektronischen Leistungswandlers.**

(57) Das erfindungsgemässe Verfahren dient zur Regelung einer Sternpunktspannung ( $u_{N\gamma}$ ) in einem elektronischen mehrphasigen Leistungswandler, wobei der Leistungswandler für jede Phase ein Phasenmodul mit einer Eingangsseite und einer Ausgangsseite aufweist, die Phasenmodule an ihren Eingangsseiten in einer Sternschaltung verschaltet sind, deren Sternpunkt mit dem Sternpunkt eines Eingangsfilters verbunden ist, und phasenweise jeweils eine Eingangsstromregelung vorgesehen ist, welche den Eingangsstrom auf einen vorgegebenen Eingangsstromsollwert regelt.

Zur Regelung der Sternpunktspannung ( $u_{N\gamma}$ ) wird

- ein Messwert entsprechend der Sternpunktspannung ( $u_{N\gamma}$ ) gebildet,
- mittels eines Reglers aus diesem Messwert ein Offset-Strom-Sollwert gebildet, und
- für jede Phase der Offset-Strom-Sollwert zu einem Sollwert ( $i_{in}^*$ ) für den Eingangsphasenstrom dieser Phase addiert und damit der Eingangsstromsollwert für diese Phase gebildet.

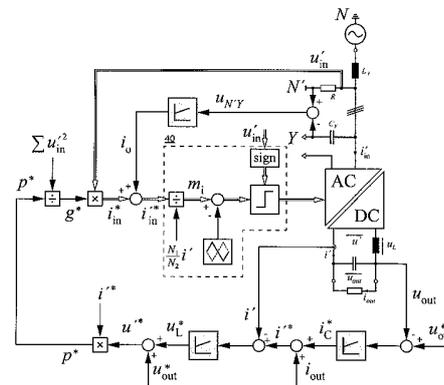


Fig. 5

**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft das Gebiet der leistungselektronischen Schaltungen und bezieht sich auf ein Verfahren zur Regelung einer Sternpunktspannung in einem AC/DC-Konverter zur Leistungsübertragung von einer mehrphasigen Primärseite an eine Sekundärseite oder umgekehrt.

**[0002]** Schaltungen zum Gleichrichten einer Dreiphasen-Netzspannung sind bekannt. In den folgenden Artikeln werden phasenmodulare Gleichrichter mit Leistungsfaktorkorrektur (PFC) vorgestellt, bei denen einer Wechselspannungsphase jeweils ein Phasenmodul zugeordnet ist, mit welchem über einen Phasenumrichter und einen Phasentransformator eine Wechselspannung erzeugt wird. Die Wechselspannungen der Phasentransformatoren werden durch Serienschaltung an Ausgangsseiten der Phasentransformatoren addiert.

- M. A. de Rooij, J. A. Ferreira, and J. D. Van Wyk, «A three phase, soft switching, transformer isolated, unity power factor front end Converter,» in 29<sup>th</sup> Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC98), vol. 1, 1998, pp. 798–804.
- W. Phipps, R. Duke, and M. J. Harrison, «A proposal for a new generation power Converter with pseudo-derivative control,» in 28<sup>th</sup> Annual International Telecommunications Energy Conference (INTELEC'06), 2006, pp. 1–5.

**[0003]** Eingangsseitig können die Phasenmodule eine Sternschaltung bilden. Dabei stellt sich das Problem, dass an der Primärseite ein Sternpunkt resultiert und, wenn der Sternpunkt nicht geerdet werden kann, sich bei ungleichmässiger Belastung die Sternpunktspannung unkontrolliert verhalten kann.

**[0004]** Es ist Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Regelung einer Sternpunktspannung zu schaffen, welche mindestens für einige der eingangs genannten Schaltungen anwendbar ist.

**[0005]** Die Aufgabe wird durch ein Verfahren zur Regelung einer Sternpunktspannung gemäss dem unabhängigen Anspruch 1 gelöst.

**[0006]** Das Verfahren dient zur Regelung der Sternpunktspannung in einem elektronischen mehrphasigen Leistungswandler, wobei der Leistungswandler für jede Phase ein Phasenmodul mit einer Eingangsseite und einer Ausgangsseite aufweist, die Phasenmodule an ihren Eingangsseiten in einer Sternschaltung verschaltet sind und phasenweise jeweils eine Eingangsstromregelung aufweisen, welche den Eingangsstrom des Phasenmoduls auf einen vorgegebenen Eingangsstromsollwert regelt. Zur Regelung der Sternpunktspannung wird:

- ein Messwert entsprechend der Sternpunktspannung gebildet,
- mittels eines Reglers aus diesem Messwert ein Offset-Strom-Sollwert gebildet, und
- für jede Phase der Offset-Strom-Sollwert zu einem Sollwert für den Eingangsphasenstrom dieser Phase addiert und damit der Eingangsstromsollwert für diese Phase gebildet.

**[0007]** Der genannte Sollwert für den Eingangsphasenstrom dieser Phase (zu welchem der Offset-Strom-Sollwert addiert wird) wird beispielsweise durch einen übergeordneten Regler für den Leistungsfluss durch die Phase oder für die Ausgangsspannung des Leistungswandlers erzeugt.

**[0008]** In einer Ausführungsform wird der Messwert entsprechend der Sternpunktspannung gebildet, indem mittels eines symmetrischen Filters ein künstlicher Sternpunkt gebildet wird und die Sternpunktspannung mit diesem künstlichen Sternpunkt als Referenz gemessen wird und so den Messwert bildet.

**[0009]** In einer Ausführungsform wird der Messwert entsprechend der Sternpunktspannung gebildet, indem die Spannungen der Phasen gemessen werden und aus diesen Messungen der Messwert rechnerisch bestimmt wird.

**[0010]** Die Regelung ist insbesondere geeignet in Kombination mit einer Regelung eines elektronischen Leistungswandlers zur Leistungsübertragung von einer Primärseite (oder Wechselspannungsseite) mit mehreren Phasen an eine Sekundärseite (oder Gleichspannungsseite) oder umgekehrt, wobei der Leistungswandler für jede der Phasen einen Transformator aufweist, wobei jeweils eine primärseitige Wicklung eines Teiltransformators an eine zugeordnete Schalteinrichtung angeschlossen ist und wobei sekundärseitige Wicklungen der Teiltransformatoren beispielsweise in Serie oder parallel geschaltet sein können, gegebenenfalls unter Zwischenschaltung jeweils eines Gleichrichters pro Phase, wodurch eine Summenspannung über respektive ein Summenstrom durch die sekundärseitigen Wicklungen bildbar ist.

**[0011]** Im Folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen, welche in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt sind, näher erläutert. Es zeigen jeweils schematisch:

Fig. 1–4 elektronischer Leistungswandler mit unterschiedlicher, aber analoger Struktur;

Fig. 5 eine Struktur eines Reglers zur Regelung einer primärseitigen Sternpunktspannung solcher und ähnlicher Leistungswandler.

Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

**[0012]** Die Fig. 1 bis 4 zeigen Leistungswandler mit einzelnen Phasenmodulen. Jeweils ein Phasenmodul ist an eine Phase a, b, c, eines Wechselspannungssystems mit Phasenspannungen  $u_{in,a}$ ,  $u_{in,b}$ ,  $u_{in,c}$  bezüglich eines primärseitigen Eingangssternpunktes N angeschlossen.

**[0013]** Der Einfachheit halber, weil oftmals ein Leistungsfluss von einer Quelle oder einem Netz an der Primärseite zu einer Last an der Sekundärseite stattfindet, wird hier die Primärseite auch als Eingangsseite oder Eingang bezeichnet oder Wechselspannungsseite, und die Sekundärseite als Ausgangsseite oder Ausgang oder als Gleichspannungsseite bezeichnet. Ungeachtet dessen kann mit den beschriebenen Schaltungen auch ein Leistungsfluss in der Gegenrichtung stattfinden, sofern die Schalteinrichtungen entsprechend mit aktiven Schaltelementen ausgeführt sind.

**[0014]** Fig. 1 zeigt einen elektronischen Leistungswandler 1 mit drei Teiltransformatoren 2a, 2b, 2c mit Übersetzungsverhältnis  $N_1/N_2$ , wobei jeweils eine primärseitige Wicklung eines Teiltransformators 2a, 2b, 2c an eine zugeordnete Schalteinrichtung 1a, 1b, 1c angeschlossen ist. Sekundärseitige Wicklungen der Teiltransformatoren 2a, 2b, 2c mit Sekundärspannungen  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$  sind in Serie geschaltet, wodurch im Betrieb der Schaltung eine Summenspannung  $u$  über die gleichspannungsseitigen Wicklungen bildbar ist.

**[0015]** Für jede der Phasen ist die Schalteinrichtung 1a, 1b, 1c dazu eingerichtet, die jeweilige zugeordnete, in der Regel wie gezeigt gefilterte, Phasenspannung  $u_{C,a}$ ,  $u_{C,b}$ ,  $u_{C,c}$  oder die negative Phasenspannung oder die Spannung Null, also beispielsweise einen Kurzschluss, an die primärseitige Wicklung des zugeordneten Teiltransformators 2a, 2b, 2c anzulegen. Im gezeigten Beispiel sind dazu Brücken 12, jeweils mit Vierquadrantenschaltern, gezeigt. In anderen Ausführungsformen kann eine Diodenbrücke als Gleichrichter und eine anschliessende Brückenschaltung mit aktiven Schaltern vorliegen (nicht dargestellt). Gemäss weiteren Ausführungsformen können in jedem Phasenmodul mehrere Brückenschaltungen primärseitig in Serie geschaltet sein, wobei jede dieser Brückenschaltungen eine Primärseite eines eigenen Teiltransformators speist, und Sekundärseiten der Teiltransformatoren in Serie geschaltet sind.

**[0016]** In die Schalteinrichtung 1a, 1b, 1c fliesst von der Primärseite her gesehen jeweils ein Eingangsphasenstrom  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ .

**[0017]** Eine Eingangfilterkapazität  $C_F$  kann zur Glättung einer jeweiligen Brücken-Eingangsspannung angeordnet sein. Im gezeigten Beispiel ist diese Eingangfilterkapazität  $C_F$  zwischen einem Eingangsphasenanschluss 13 und einem gemeinsamen Sternpunkt Y der Schalteinrichtungen 1a, 1b, 1c eingezeichnet. Die Spannung an diesem Sternpunkt Y gilt es zu regeln.

**[0018]** Eine Eingangfilterinduktivität  $L_F$  kann zur Glättung eines jeweiligen Phasenstromes vorliegen; sie kann Teil der Schalteinrichtung 1a, 1b, 1c sein, oder Teil einer externen Beschaltung.

**[0019]** Sekundärseitig weist der Leistungswandler einen Gleichrichter 3 zum Gleichrichten der Summenspannung  $u$  und eine Induktivität  $L$  als Glättungselement 4 zum Glätten eines sekundärseitigen Stroms  $i$  auf. Dieser sekundärseitige Strom  $i$  ist also jener, der durch die Serieschaltung der sekundärseitigen Wicklungen der Teiltransformatoren 2a, 2b, 2c fliesst. Eine Ausgangfilterkapazität  $C$  kann als Glättungskapazität zum Bilden einer geglätteten Ausgangsspannung  $u_{out}$  an einer Last 16 angeordnet sein.

**[0020]** Fig. 2 zeigt, ausgehend von der Topologie der Fig. 1, eine Variante des elektronischen Leistungswandlers. Es werden daher nur die Unterschiede beschrieben: Die Variante weist eine Last an einem Serien-LC-Resonanzkreis auf, mit der im Wesentlichen ohmschen Last 16 parallel zur Kapazität respektive einem Resonanzkreiskondensator  $C_R$  des Resonanzkreises. Damit ist bei geeigneter Dimensionierung und Betriebsfrequenz der Elemente der Strom durch die Last im Wesentlichen unabhängig vom Widerstand der Last 16. Diese Anordnung ist bekannt zur Speisung von Lampen oder anderen Verbrauchern, deren Widerstand vom Betriebszustand abhängig ist. Die Last wird resonant mit der Summenspannung  $u$  gespeist. Dabei entfällt also die Gleichrichtung der Summenspannung  $u$  und vereinfacht sich die Schaltung.

**[0021]** Im Zusammenhang mit der hier beschriebenen Erfindung ist die Kombination mit einem Serien-LC-Resonanzkreis wie oben beschrieben vorteilhaft, da dessen Induktivität gleichzeitig auch zur Glättung respektive Einprägung des sekundärseitigen Stroms  $i$  dient. Dadurch vereinfacht sich der Aufbau der kombinierten Schaltung noch weiter.

**[0022]** Fig. 3 und 4 zeigen duale Versionen der Topologien der Fig. 1 und 2, und damit weitere Varianten der elektronischen Leistungswandler. Die Dualität wirkt sich unter anderem wie folgt aus:

- Die sekundärseitigen Wicklungen der Teiltransformatoren 2a, 2b, 2c respektive zugeordnete Gleichrichterbrücken 3a, 3b, 3c sind nicht in Serie, sondern parallel geschaltet.
- Die Induktivität  $L$  als Glättungselement 4 ist jeweils nicht, wie in den Fig. 1 und 2, auf der Sekundärseite zwischen Wandlerausgang und Last angeordnet. Stattdessen ist die Induktivität  $L$  gemäss den Fig. 3 und 4 aufgeteilt auf je ein Phasen-Glättungselement 4' zwischen dem jeweiligen Phasenanschluss respektive dem Anschluss der jeweiligen Eingangfilterkapazität  $C_F$  und dem Wandlereingang angeordnet (Die Induktivität  $L$  prägt also der jeweiligen Schalteinrichtung 1a, 1b, 1c den Strom ein, im Gegensatz zu der Eingangfilterinduktivität  $L_F$ , deren Strom sich auf die Schalteinrichtung 1a, 1b, 1c und die Eingangfilterkapazität  $C_F$  aufteilt).
- In der Version der Fig. 4 ist nicht der Resonanzkreiskondensator  $C_R$  parallel zur Last 16, sondern ist die Resonanzkreisspule  $L_R$  in Serie zur Last 16.
- Die Phasenmodule arbeiten nicht als Tiefsetzsteller (buck-type Converter), sondern als Hochsetzsteller (boost-type Converter).

**[0023]** Fig. 5 zeigt einen Regler zur Regelung der Ausgangsspannung an der Last, und als Teil dieses Reglers auch die Regelung der Sternpunktspannung an der Eingangsseite. Der Regler der Ausgangsspannung an der Last arbeitet wie folgt:

- Die gemessene Ausgangsspannung  $u_{out}$  an der Last wird in einem ersten Summierglied vor einem Sollwert  $u_{out}^*$  der Ausgangsspannung an der Last subtrahiert und aus dieser Regelabweichung mit einem ersten Regler ein Sollwert  $i^*_C$  für einen Strom durch die Ausgangsfilterkapazität C gebildet.
- Dieser Sollwert  $i^*_C$  wird in einem zweiten Summierglied zu einem gemessenen Wert eines Laststroms  $i_{out}$  addiert und dadurch ein Sollwert  $i^*$  für einen Strom  $i'$  durch die Induktivität L gebildet. Dieser Strom  $i'$  ist gleich dem Ausgangsstrom des Wandlers (also an dessen Sekundärseite).
- Von diesem Sollwert  $i^*$  wird in einem dritten Summierglied ein Wert des gemessenen entsprechenden Stroms  $i'$  subtrahiert und aus dieser Regelabweichung mit einem zweiten Regler ein Sollwert  $u^*_L$  für eine Spannung über die Induktivität L gebildet.
- Dieser Sollwert  $u^*_L$  wird in einem vierten Summierglied zum Sollwert  $u^*_{out}$  der Ausgangsspannung an der Last addiert und dadurch ein Sollwert  $u^*$  für die Ausgangsspannung des Wandlers gebildet.
- Der Sollwert  $u^*$  für die Ausgangsspannung des Wandlers wird mit dem Sollwert  $i^*$  für den Ausgangsstrom des Wandlers multipliziert und dadurch ein Sollwert  $p^*$  für die Ausgangsleistung des Wandlers gebildet. Diese Ausgangsleistung soll gleich der Eingangsleistung des Wandlers sein.
- Der Sollwert  $p^*$  für die Eingangs- respektive Ausgangsleistung wird durch die Summe der Quadrate der Eingangsphasenspannungen  $u'_{in}$  dividiert und dadurch ein Sollwert für einen Leitwert  $g^*$  gebildet, der am Eingang der Phasen wirksam respektive «sichtbar» werden und zu der Aufnahme der Eingangsleistung  $p^*$  führen soll.

**[0024]** Die folgenden Schritte der Regelung respektive Teile des Reglers werden jeweils für jede Phase einzeln realisiert. Zusammenfassend werden dabei die Eingangsphasenströme  $i_a, i_b, i_c$  als Eingangsphasenstrom  $i_{in}$  bezeichnet.

- Der Leitwert  $g^*$  wird mit der Eingangsphasenspannung  $u'_{in}$  multipliziert, und dadurch ein Sollwert  $i_{in}^*$  für den Eingangsphasenstrom gebildet.

**[0025]** In einer herkömmlichen Regelung dient der Sollwert  $i_{in}^*$  für den Eingangsphasenstrom  $i_{in}$  als Eingangsstromsollwert für eine Stromregelung 40. Es wird der Wandler mit der Stromregelung 40 so angesteuert, dass je Phase ein Strom entsprechend dem Eingangsstromsollwert aufgenommen wird. Dies kann in bekannter Weise und beispielsweise auf folgende Weise realisiert werden:

- Der Eingangsstromsollwert wird durch den Ausgangsstrom  $i'$  des Wandlers und das Übersetzungsverhältnis  $N1/N2$  der Transformatoren des Wandlers dividiert und dadurch ein Modulationssignal  $m_i$  gebildet.
- Mit diesem Modulationssignal ist der Ausgangsstrom  $i'$  im Wandler mittels Pulsbreitenmodulation zu modulieren, um den jeweils gewünschten Eingangsphasenstrom zu erzeugen. Dazu wird mittels eines Trägersignalgenerators ein periodisches Trägersignal erzeugt und in einem sechsten Summierglied vom Modulationssignal subtrahiert und dadurch ein Differenzsignal gebildet. Entsprechend dem Vorzeichen des Differenzsignals und dem Vorzeichen der entsprechenden Eingangsphasenspannung  $u'_{in}$  werden die Schalter der Schalteinrichtung 1a, 1b, 1c der entsprechenden Phase angesteuert, und dadurch im zeitlichen Mittel über eine Periode des Trägersignals der Eingangsphasenstrom entsprechend dem Eingangsstromsollwert realisiert.

**[0026]** Die oben erklärte Regelung ist für Anordnungen gemäss den Fig. 1 und 2 anwendbar, also solche, in welchen eine Induktivität L als Glättungselement 4 zwischen Wandlerausgang und Last angeordnet ist. In Anordnungen gemäss den Fig. 3 und 4, also mit einer Induktivität L als Glättungselement 4 zwischen Phasenanschluss und Wandlereingang, ist die Regelung in analoger Weise aufgebaut. Die Regelung der Sternpunktspannung wie sie nun im Folgenden erläutert wird, ist für alle Anordnungen prinzipiell dieselbe. Die Regelung kann auch allgemein bei Strukturen, bei welchen der Eingangsstrom zu Schalteinrichtungen 1a, 1b, 1c einzelner Phasen geregelt wird, eingesetzt werden.

**[0027]** Zur Regelung der Sternpunktspannung wird in jeder Phase unterschieden zwischen dem Eingangsphasenstrom  $i_{in}$ , (der in das Eingangsfilter fliesst) und dem Eingangsphasenstrom  $i'_{in}$ , der in die Schalteinrichtung 1a, 1b, 1c fliesst. Die Differenz ist der Strom, der in die Eingangsfilterkapazität  $C_F$  fliesst und somit zur Regelung der Sternpunktspannung genutzt werden kann.

**[0028]** Es wird dazu der Stromregelung 40 als Eingangsstromsollwert anstelle des Sollwerts  $i_{in}^*$  für den Eingangsphasenstrom (der in das Eingangsfilter fliesst) ein modifizierter Sollwert  $i_{in}^{\prime*}$  für den Eingangsphasenstrom übergeben (der in die Schalteinrichtung 1a, 1b, 1c fliesst). Der modifizierte Sollwert  $i_{in}^{\prime*}$  wird erzeugt, indem in einem fünften Summierglied zum Sollwert  $i_{in}^*$  ein Offset-Strom-Sollwert  $i^*_O$  addiert wird. Dieser Strom soll in die Eingangsfilterkapazitäten  $C_F$  zum Sternpunkt Y hinein (oder hinaus) fließen und dadurch die Sternpunktspannung korrigieren. Der Offset-Strom-Sollwert  $i^*_O$  wird durch einen Sternpunktspannungsregler erzeugt. Dieser Regler weist als Eingang eine Abweichung der Sternpunktspannung  $u_{N'Y}$  von einem Sollwert auf. Der Sollwert ist in der Regel null und damit ist die Sternpunktspannung selber gleich dieser Abweichung, eine Berechnung der Abweichung ist daher in der Fig. 5 nicht eingezeichnet. Die Abweichung der Sternpunktspannung  $u_{N'Y}$  kann, wie in der Fig. 5 gezeigt, als Differenz der Spannung zwischen dem Sternpunkt Y der Eingangsfilterkapazitäten  $C_F$  und einem künstlichen Sternpunkt  $N'$  bestimmt werden. Der künstliche Sternpunkt  $N'$  wiederum kann gebildet werden durch ein symmetrisches Filter, in einer einfachen Variante wie dargestellt eine Sternschaltung von Filterwiderständen R mit gleichem Ohmwert von den Anschlusspunkten der Eingangsfilterkapazitäten  $C_F$

zu dem künstlichen Sternpunkt  $N'$ . In einer anderen Ausführungsform wird die Sternpunktspannung  $u_{N\gamma}$  bestimmt, indem die einzelnen Phasenspannungen gemessen und daraus die Sternpunktspannung berechnet werden.

**[0029]** Alle erwähnten Regler, also erster und zweiter Regler sowie Sternpunktspannungsregler, können als P, PI oder PID-Regler oder mit anderen Reglertypen realisiert sein.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung einer Sternpunktspannung ( $u_{N\gamma}$ ) in einem elektronischen mehrphasigen Leistungswandler, wobei der Leistungswandler für jede Phase ein Phasenmodul (1a, 2a; 1b, 2b; 1c, 2c) mit einer Eingangsseite und einer Ausgangsseite aufweist, die Phasenmodule (1a, 2a; 1b, 2b; 1c, 2c) an ihren Eingangsseiten in einer Sternschaltung verschaltet sind und phasenweise jeweils eine Eingangsstromregelung aufweisen, welche den Eingangsstrom auf einen vorgegebenen Eingangsstromsollwert regelt, dadurch gekennzeichnet, dass zur Regelung der Sternpunktspannung ( $u_{N\gamma}$ ) ein Messwert entsprechend der Sternpunktspannung ( $u_{N\gamma}$ ) gebildet wird, mittels eines Reglers (33) aus diesem Messwert ein Offset-Strom-Sollwert ( $i^*_o$ ) gebildet wird, und für jede Phase der Offset-Strom-Sollwert ( $i^*_o$ ) zu einem Sollwert ( $i_{in}^*$ ) für den Eingangsphasenstrom dieser Phase addiert und damit der Eingangsstromsollwert ( $i^*_{in}$ ) für diese Phase gebildet wird.
2. Verfahren gemäss Anspruch 1, wobei der Messwert ( $u_{N\gamma}$ ) entsprechend der Sternpunktspannung gebildet wird, indem mittels eines symmetrischen Filters ein künstlicher Sternpunkt ( $N'$ ) gebildet wird und die Sternpunktspannung mit diesem künstlichen Sternpunkt als Referenz gemessen wird und den Messwert ( $u_{N\gamma}$ ) bildet.
3. Verfahren gemäss Anspruch 1, wobei der Messwert ( $u_{N\gamma}$ ) entsprechend der Sternpunktspannung gebildet wird, indem die Spannungen der Phasen gemessen werden und aus diesen Messungen der Messwert rechnerisch bestimmt wird.
4. Verfahren gemäss Anspruch 2 oder 3, wobei der Sollwert ( $i_{in}^*$ ) für den Eingangsphasenstrom dieser Phase durch eine Regelung für eine Ausgangsspannung des Leistungswandlers erzeugt wird.

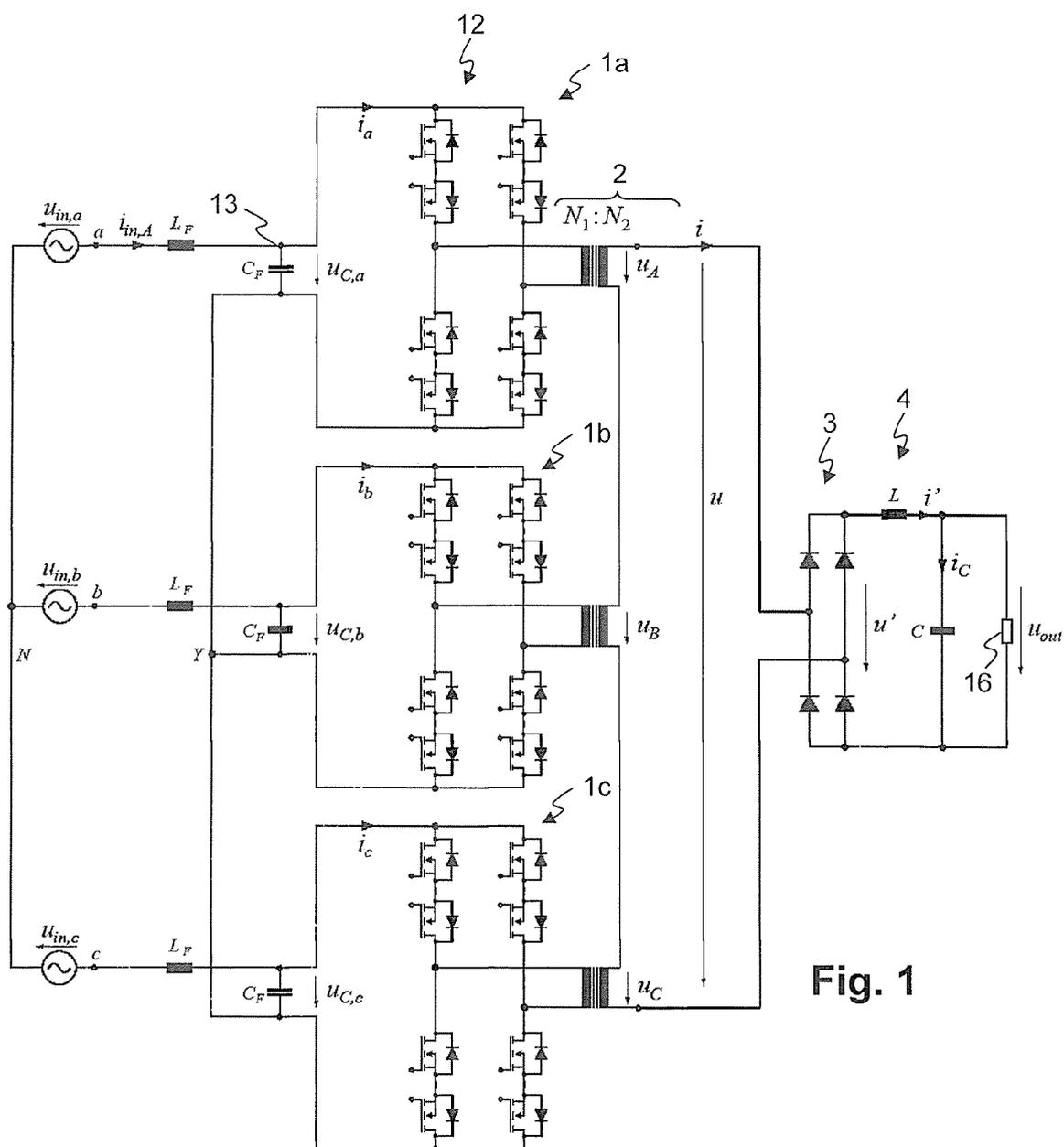


Fig. 1

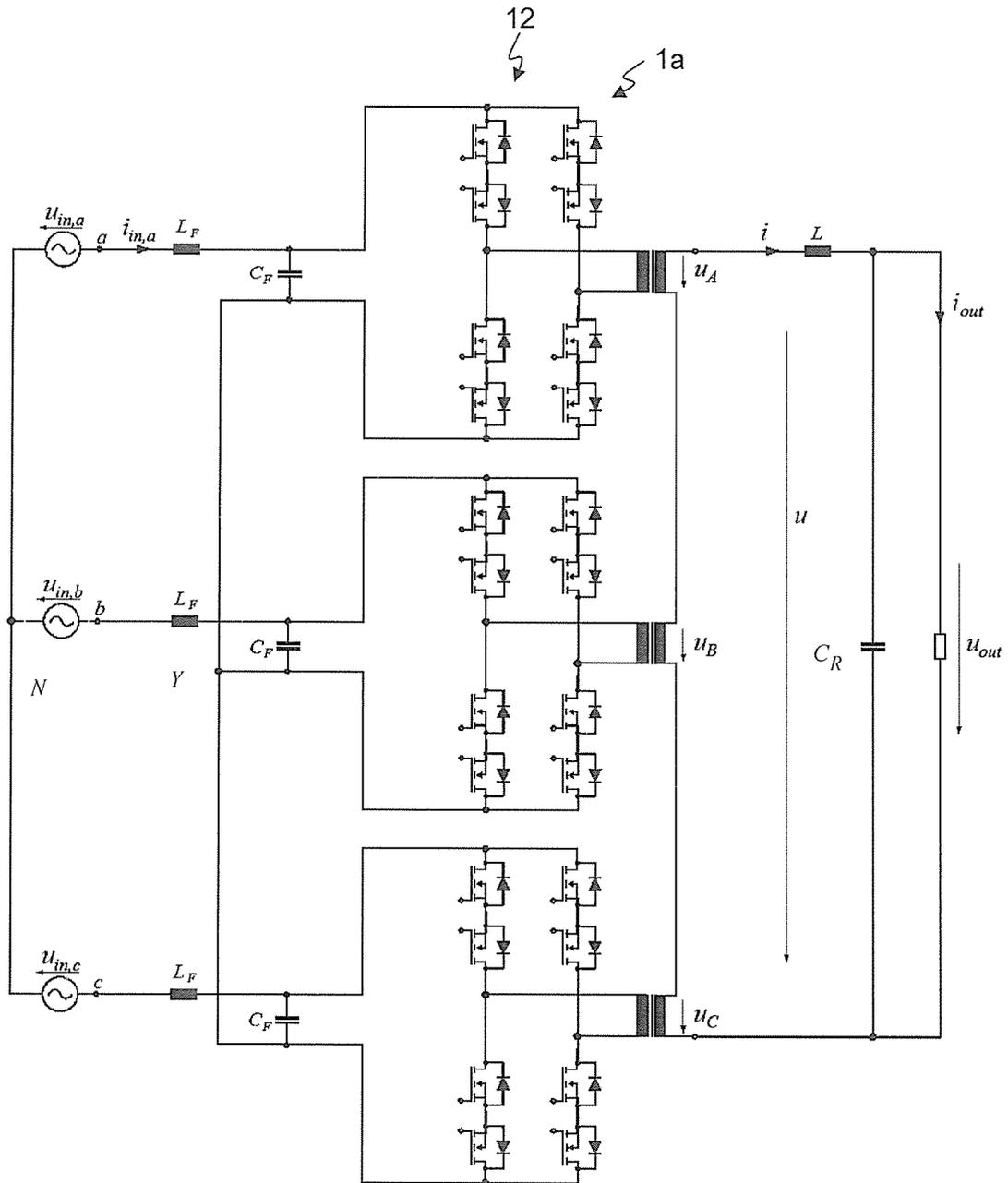


Fig. 2

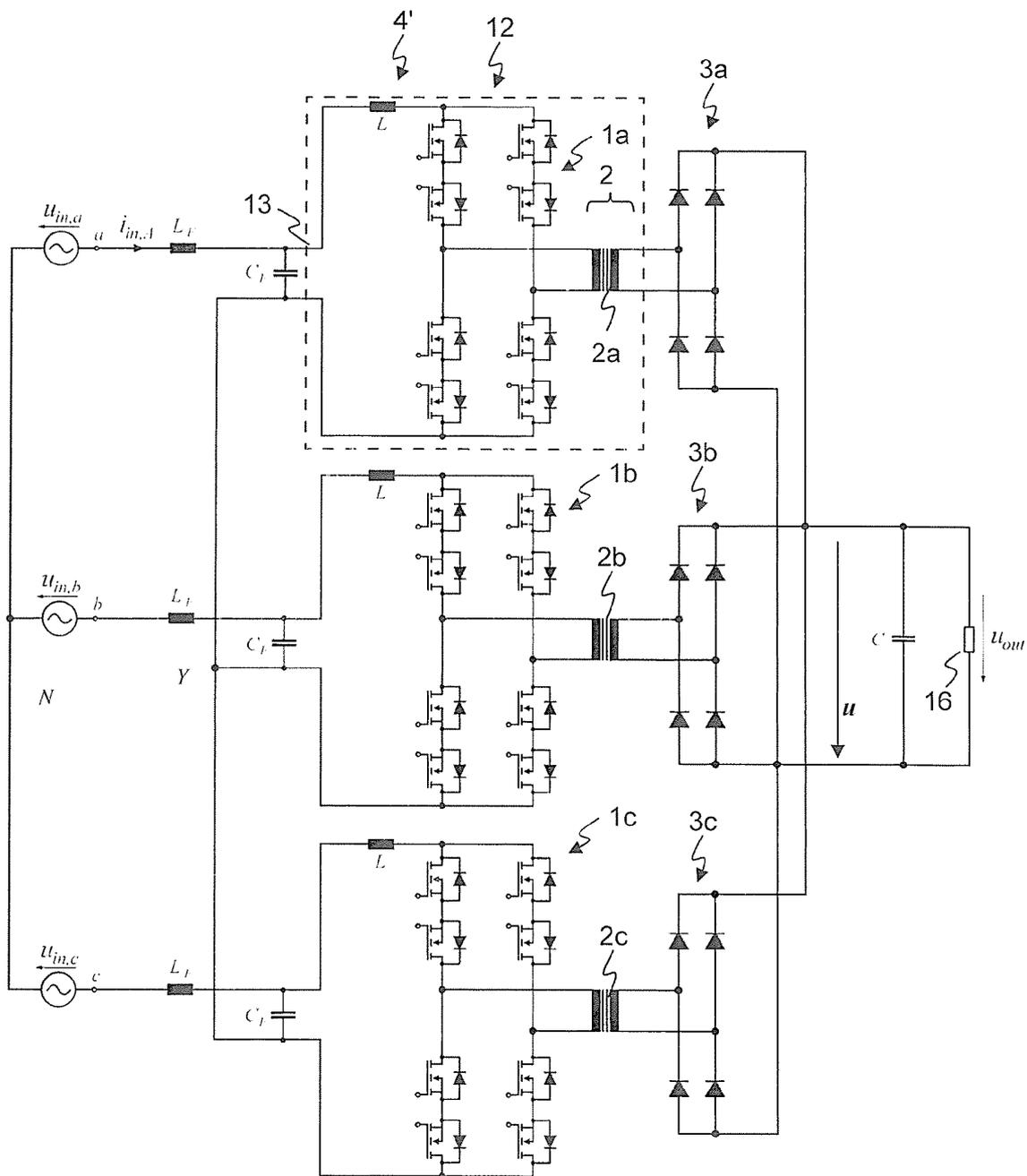


Fig. 3

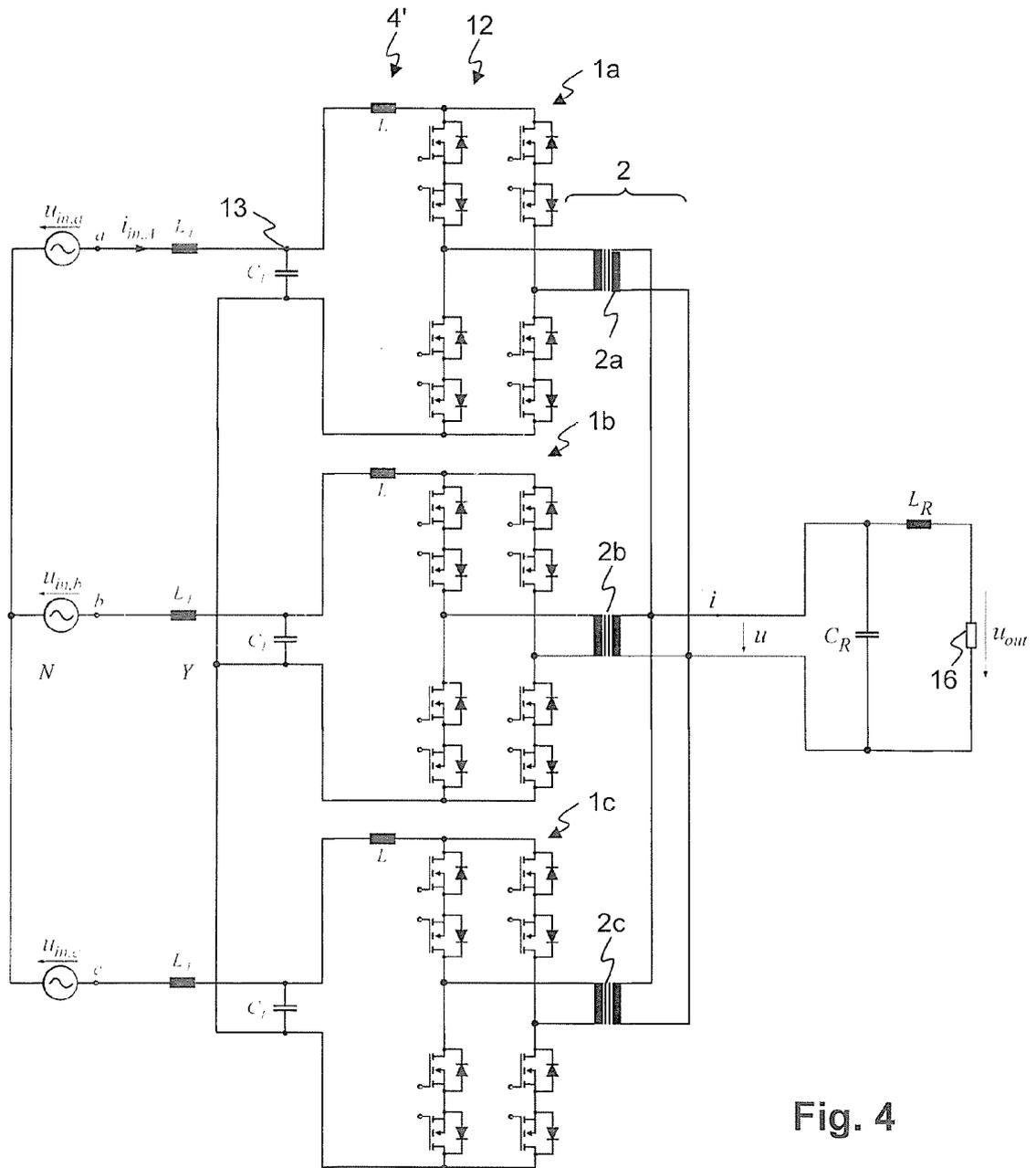


Fig. 4

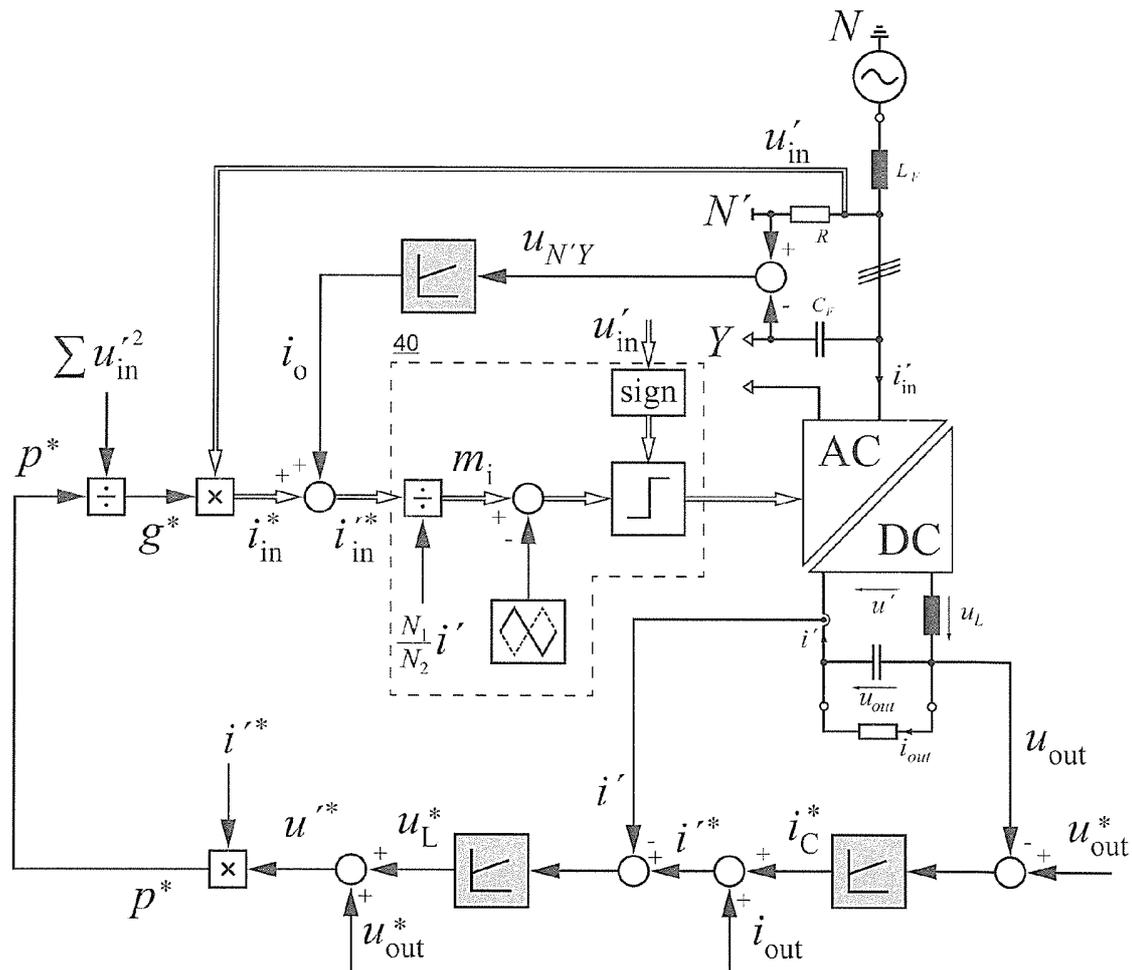


Fig. 5