

(12) **Patentschrift**

(21) Anmeldenummer: A 50982/2022 (51) Int. Cl.: **H02M 7/06** (2006.01)  
(22) Anmeldetag: 21.12.2022 **H01F 29/02** (2006.01)  
(45) Veröffentlicht am: 15.02.2024 **H02P 13/06** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
DE 102014002348 A1  
CN 206379261 U  
DE 2218806 A1  
JP H02101967 A  
JP S5638594 U  
WO 9717753 A2

(73) Patentinhaber:  
Andritz AG  
8045 Graz (AT)

(72) Erfinder:  
Rechberger Andreas  
6300 Zug (CH)

(74) Vertreter:  
Puchberger & Partner Patentanwälte  
1010 Wien (AT)

(54) **Regelbare Gleichrichteranordnung für die Wasserstoff-Elektrolyse**

(57) Gleichrichteranordnung für die Wasserstoff-Elektrolyse, umfassend einen Transformator (1) mit einer Primärwicklung (2) und einer Sekundärwicklung (3) mit einem angeschlossenen Gleichrichter (4), wobei zur Ermöglichung einer Grob- und Feineinstellung des Transformatorverhältnisses die Primärwicklung (2) eine erste Teilwicklung (8) und eine zweite Teilwicklung (9) umfasst und an der ersten Teilwicklung (8) eine Zahl  $N > 1$  Wicklungsanzapfungen (10) und an der zweiten Teilwicklung (9) eine Zahl  $M > 1$  Wicklungsanzapfungen (11) vorgesehen sind und ein erster (12) und zweiter Laststufenschalter (13) vorgesehen sind, die mit einem Regler (7) zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen (10, 11) der ersten (8) und zweiten Teilwicklung (9) ausgeführt sind und die ersten Teilwicklung (8) über den zweiten Laststufenschalter (13) in Serie mit der zweiten Teilwicklung (9) geschaltet ist, sodass das Transformatorverhältnis des Transformators (1) in  $N \times M$  Stufen schaltbar ist.

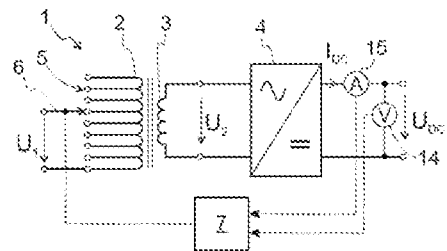


Fig. 1

## Beschreibung

### REGELBARE GLEICHRICHTERANORDNUNG FÜR DIE WASSERSTOFF-ELEKTROLYSE

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine regelbare Gleichrichteranordnung für die Wasserstoff-Elektrolyse.

**[0002]** Aus dem Stand der Technik sind Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse, insbesondere PEM (Proton Exchange Membrane) - Elektrolyse und AEL (Alkalische Elektrolyse), bekannt. Derartige Verfahren benötigen einen hohen und im Wesentlichen konstanten, jedoch von den Gegebenheiten der Produktion abhängigen Gleichstrom. Erforderlich sind dabei üblicherweise Gleichströme über 600 A bei einer Leistung von über 1 MW.

**[0003]** Zur Bereitstellung des Gleichstroms sind regelbare Gleichrichteranordnungen bekannt, die aus einer Eingangs-Wechselspannung eine Ausgangs-Gleichspannung erzeugen. Dazu werden heutzutage Gleichrichteranordnungen mit aktiv geregelten elektronischen Schaltungen, beispielsweise Schaltungen mit Thyristoren oder IGBTs mit oder ohne DC/DC-Stellern und nachgeschalteten Filterelementen verwendet.

**[0004]** Derartige Gleichrichteranordnungen zur Wasserstoff-Elektrolyse sind beispielsweise aus der DE 10 2014 002 348 A1 bekannt, leiden jedoch unter dem Nachteil, dass bei der Umwandlung der Eingangs-Wechselspannung in die Ausgangs-Gleichspannung relativ hohe Verluste entstehen. In der Regel betragen die Gesamtverluste inklusive der Maßnahmen für die Sicherstellung der Spannungsqualität und Kühlung bis zu 4%, was aufgrund des hohen Energiebedarfs bei der Wasserstoff-Elektrolyse problematisch ist.

**[0005]** Die Aufgabe der Erfindung besteht somit darin, eine verbesserte Gleichrichteranordnung zu schaffen, die insbesondere dafür geeignet ist, einen im Wesentlichen konstanten Gleichstrom mit geringer Restwelligkeit (Ripple), geringen Netzurückwirkungen und geringen Verlusten für die Wasserstoff-Elektrolyse bereitzustellen.

**[0006]** Diese und andere Aufgaben werden durch eine Gleichrichteranordnung gemäß Anspruch 1 gelöst.

**[0007]** Eine erfindungsgemäße Gleichrichteranordnung für die Wasserstoff-Elektrolyse, umfasst einen Transformator mit einer Primärwicklung zum Anschluss einer Eingangs-Wechselspannung und einer Sekundärwicklung zur Bereitstellung einer Ausgangs-Wechselspannung, sowie einen an der Sekundärwicklung angeschlossenen Gleichrichter zur Erzeugung eines Ausgangs-Gleichstroms  $I_{DC}$  und einer Ausgangs-Gleichspannung  $U_{DC}$ . Der Gleichrichter ist als ein- oder mehrphasiger Dioden-Brückengleichrichter ausgebildet, insbesondere in Form einer Zweipuls-Brücken-Gleichrichterschaltung. Am Ausgang des Gleichrichters kann eine Drosselpule zur Glättung des Gleichstroms angeordnet sein.

**[0008]** An der Primärwicklung des Transformators sind mehrere Wicklungsanzapfungen vorgesehen, die es ermöglichen, die Windungszahl der Primärwicklung in N Stufen zu verstellen. Abhängig von der Eingangs-Wechselspannung und dem Transformationsverhältnis kann eine Windungszahl der Primärwicklung im Bereich von 1000 bis 1500 Windungen vorgesehen sein. Die Anzahl der Wicklungsanzapfungen N kann größer als 10, vorzugsweise etwa 20 sein. Es können aber auch bis zu 35 Wicklungsanzapfungen vorgesehen sein. Die Wicklungsanzapfungen können in einem Teilbereich der Primärwicklung vorgesehen sein, sodass beispielsweise von etwa 1000 Windungen nur etwa 200 Windungen angezapft sind.

**[0009]** Es ist ein mit einem Regler verbundener Laststufenschalter vorgesehen, der zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen ausgebildet ist. Der Regler kann somit über den Laststufenschalter das Transformationsverhältnis  $N1:N2$  des Transformators, und somit die Ausgangsspannung der Gleichrichteranordnung, in N Stufen einstellen. Das Transformationsverhältnis ist dabei als Verhältnis der Windungszahl der Primärwicklung zur Windungszahl der Sekundärwicklung des Transformators definiert. Der Regler kann mit einem Voltmeter und einem Amperemeter zur Messung der Ausgangsspannung und des Ausgangsstroms verbunden sein,

sodass er den geforderten Gleichstrom über eine Verstellung des Laststufenschalters im Transformator erzeugen kann.

**[0010]** Der erfindungsgemäße Vorteil äußert sich darin, dass durch den Verzicht auf herkömmliche Gleichrichteranordnungen mit aktiv geregelten elektronischen Schaltungen und Filterelementen die elektrischen Verluste reduziert werden können und somit eine effizientere Bereitstellung der elektrischen Energie erfolgen kann.

**[0011]** Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass die Gleichrichteranordnung eine Grob- und Feineinstellung ermöglicht.

**[0012]** Zu diesem Zweck ist vorgesehen, dass die Primärwicklung eine erste Teilwicklung und eine in Serie geschaltete zweite Teilwicklung umfasst, wobei an der ersten Teilwicklung eine Zahl  $N > 1$  Wicklungsanzapfungen vorgesehen sind, und an der zweiten Teilwicklung eine Zahl  $M > 1$  Wicklungsanzapfungen vorgesehen sind.

**[0013]** Bei dieser Ausführungsform sind zwei, mit dem Regler verbundene Laststufenschalter vorgesehen. Ein erster Laststufenschalter ist zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen der ersten Teilwicklung ausgeführt, und ein zweiter Laststufenschalter ist zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen der zweiten Teilwicklung ausgeführt. Die erste Teilwicklung ist dabei über den zweiten Laststufenschalter in Serie mit der zweiten Teilwicklung geschaltet, sodass das Transformationsverhältnis des Transformators in  $N \times M$  Stufen schaltbar ist. Die Anzahl der Wicklungsanzapfungen  $N$  und  $M$  kann jeweils größer als 10, vorzugsweise etwa 20 sein. Es können aber auch jeweils bis zu 35 Wicklungsanzapfungen vorgesehen sein.

**[0014]** Um eine Grob- und Feineinstellung des Transformationsverhältnisses zu ermöglichen, kann vorgesehen sein, dass die Wicklungszahl der ersten Teilwicklung höher ist als die Wicklungszahl der zweiten Teilwicklung. Es kann aber auch vorgesehen sein, dass die Anzahl  $N$  größer als die Anzahl  $M$  ist. Diese Ausführungen können auch kombiniert werden. Dadurch wird erreicht, dass das Transformationsverhältnis über die Laststufenschalter in  $N$  groben Stufen und  $M$  feinen Stufen verstellbar ist. Dadurch lässt sich die Ausgangsspannung beispielsweise bei  $N = M = 19$  in 361 Schritten einstellen, die aber nicht zwingend gleich groß sein müssen.

**[0015]** Durch die Verwendung derartig kaskadierter Stufenschalter können sowohl der normale Regelbereich, als auch netzseitige stärkere Über- und Unterspannungen abgedeckt werden ( $\pm 10\%$  der Eingangsspannung). Zudem kann die Stufenanpassung im Regelbereich sehr fein erfolgen, während die Grobstufen sehr schnell angefahren werden können, um größere Anpassungen vorzunehmen.

**[0016]** Die Anzahl und Aufteilung der Stufen auf Fein- und Grobstufen kann individuell an den Anwendungsbereich angepasst sein, wobei für die erfindungsgemäße Verwendung bei der Wasserstoff-Elektrolyse erfahrungsgemäß mehr als 125 Stufen erforderlich sind. Das Umschalten von einer Stufe zur nächsten Stufe unter Last kann dabei bis zu mehreren Sekunden dauern, was jedoch für die Anwendung bei der Wasserstoff-Elektrolyse kein Problem darstellt.

**[0017]** Erfindungsgemäß kann vorgesehen sein, dass der Transformator als mehrphasiger, insbesondere als dreiphasiger Transformator ausgebildet ist. Bei dieser Ausführungsform dient als Eingangsspannung eine 3-phasige Spannung, wobei die Primärwicklungen in Stern- oder Dreiecksconfiguration geschaltet sind. An jeder Primärwicklung sind eine Zahl  $N > 1$  Wicklungsanzapfungen vorgesehen, und es sind drei mit dem Regler verbundene Laststufenschalter vorgesehen, die zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen ausgebildet sind. Die Laststufenschalter können dabei im Wesentlichen identisch ausgebildet sein. Statt mehrerer einphasiger Laststufenschalter kann auch ein mehrphasiger Laststufenschalter vorgesehen sein.

**[0018]** Die Sekundärwicklungen können ebenfalls in Stern- oder Dreiecksconfiguration geschaltet sein. Ferner kann in dieser Ausführungsform ein mehrphasiger Brückengleichrichter, insbesondere in Form einer Sechspuls-Bückenschaltung (B6U-Schaltung) zur Erzeugung einer Ausgangs-Gleichspannung vorgesehen sein. Wiederum ist ein Regler vorgesehen, der mit einem

Voltmeter und einem Amperemeter zur Messung der Ausgangsspannung und des Ausgangsstroms verbunden ist, sodass er den geforderten Gleichstrom über eine Verstellung der drei Laststufenschalter im Transformator erzeugen kann. Am Ausgang des Brückengleichrichters kann wiederum eine Drosselspule zur Glättung des Gleichstroms angeordnet sein.

**[0019]** Erfindungsgemäß kann auch bei einer Verwendung eines dreiphasigen Transformators eine Grob- und Feinjustierung des Transformationsverhältnisses vorgesehen sein. Dazu können die Primärwicklungen jeweils eine erste Teilwicklung und eine zweite Teilwicklung umfassen, wobei an den ersten Teilwicklungen jeweils eine Zahl  $N > 1$  Wicklungsanzapfungen vorgesehen sind, und an den zweiten Teilwicklungen jeweils eine Zahl  $M > 1$  Wicklungsanzapfungen vorgesehen sind. In diesem Fall sind zur Grobeinstellung erste Laststufenschalter vorgesehen, die mit dem Regler verbunden und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen der ersten Teilwicklungen ausgebildet sind.

**[0020]** Zur Feinjustierung sind in diesem Fall zweite Laststufenschalter vorgesehen, die mit dem Regler verbunden und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen der zweiten Teilwicklung ausgebildet sind. Die ersten Teilwicklungen sind dabei über die ersten Laststufenschalter in Serie mit den zweiten Teilwicklungen geschaltet, sodass das Transformationsverhältnis des Transformators und somit die Ausgangs-Gleichspannung wiederum in  $M \times N$  Stufen einstellbar ist.

**[0021]** Um eine bessere Gleichrichtung der Ausgangsspannungen des Transformators zu erreichen und um die AC Netzurückwirkungen zu vermindern, kann vorgesehen sein, dass zwei oder mehr Sekundärwicklungsanordnungen vorgesehen sind, die jeweils drei in Stern- oder Dreieckskonfiguration geschaltete Sekundärwicklungen umfassen. Die Sekundärwicklungsanordnungen können insbesondere dazu ausgebildet sein, um einen Winkel  $\Delta\phi$  phasenverschobene Ausgangsspannungen zu erzeugen. Dies erlaubt die Anwendung mehrerer separater Gleichrichter für die phasenverschobenen Ausgangsspannungen, sodass die Ausgangs-Wechselspannung niedrigeren Ripple und niedrigere harmonische Netzurückwirkungen aufweist. Auf die Verwendung einer Drosselspule zur Glättung des Ausgangs-Gleichstroms kann in diesem Fall möglicherweise verzichtet werden.

**[0022]** Erfindungsgemäß kann vorgesehen sein, dass die Ausgangsspannungen der Sekundärwicklungsanordnungen um einen Phasenwinkel von  $\Delta\phi > 0^\circ$  phasenverschoben sind.

**[0023]** Der Wert von  $\Delta\phi$  berechnet sich dabei aus  $\Delta\phi = 60^\circ$  gebrochen durch die Anzahl der Sekundärwicklungsanordnungen. Bei vier Sekundärwicklungsanordnungen ist der Wert  $\Delta\phi$  somit etwa  $15^\circ$ .

**[0024]** Erfindungsgemäß kann vorgesehen sein, dass drei, vier, fünf oder sechs Sekundärwicklungsanordnungen vorgesehen sind. Diese können in Sternkonfiguration oder in Dreieckskonfiguration geschaltete Sekundärwicklungen aufweisen, welche mit einer Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  so verschalten werden, dass sich die auf der Primärseite erzeugten Oberschwingungen möglichst gut auslöschen.

**[0025]** Vorzugsweise ist für jede Sekundärwicklungsanordnung ein separater Gleichrichter vorgesehen. Die Gleichrichter können in Serienschaltung geschaltet sein, um die Ausgangs-Gleichspannung zu erzeugen. Die Gleichrichter können aber auch in Parallelschaltung geschaltet sein, um die Ausgangs-Gleichspannung zu erzeugen.

**[0026]** Die Gleichrichter können als mehrphasige Dioden-Brückengleichrichter, insbesondere als Sechspuls-Bückenschaltung mit 6 Dioden (B6U-Schaltung) ausgebildet sein. Die Anzahl der B6U-Schaltungen kann von den jeweiligen Anforderungen an die Qualität der Ausgangs-Gleichspannung und des Ausgangs-Gleichstroms abhängen. Beispielsweise können zur Erreichung eines Ripple-Werts des Ausgangs-Gleichstroms von unter 1,2% vier B6U-Schaltungen vorgesehen sein, was eine effektive Pulszahl von 24 ergibt. In diesem Fall kann sich die Verwendung einer Drosselspule auf der Sekundärseite erübrigen.

**[0027]** Für eine Pulszahl von 12 können zwei phasenverschobene Sekundärwicklungsanordnungen

gen vorgesehen sein. Für eine Pulszahl von 18 können drei phasenverschobene Sekundärwicklungsanordnungen vorgesehen sein. Für eine Pulszahl von 24 können vier phasenverschobene Sekundärwicklungsanordnungen vorgesehen sein. Für eine Pulszahl von 30 können fünf phasenverschobene Sekundärwicklungsanordnungen vorgesehen sein. Für eine Pulszahl von 36 können sechs phasenverschobene Sekundärwicklungsanordnungen vorgesehen sein.

**[0028]** Die Sekundärwicklungsanordnungen können dabei jeweils eine Sternkonfiguration oder eine Dreieckskonfiguration aufweisen, mit entsprechender Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  zur Auslöschung harmonischer Netzurückwirkungen.

**[0029]** Die Eingangs-Wechselspannung kann beispielsweise eine Amplitude von über 10 kV, insbesondere etwa 20 kV - 30 kV aufweisen. Die Ausgangs-Gleichspannung kann, abhängig vom Stack-Typ und der Anzahl der zu versorgenden Elektrolysezellen, eine Höhe von 300 V bis 1500 V, beispielsweise etwa 625V, haben.

**[0030]** Das Transformationsverhältnis kann beispielsweise um einen Nennwert von etwa  $N1:N2 = 48$  einstellbar sein. Selbstverständlich sind auch andere, insbesondere höhere Werte des Transformationsverhältnisses möglich. Beispielsweise kann zur Transformation einer Eingangs-Wechselspannung von etwa 30 kV auf eine Ausgangs-Wechselspannung von etwa 160 V ein Transformationsverhältnis von  $N1:N2 = 190$  vorgesehen sein. Der einstellbare Bereich kann beispielsweise  $\pm 10\%$  sein. Es kann auch eine Grobjustierung von  $\pm 10\%$  und eine Feinjustierung von  $\pm 1\%$  vorgesehen sein, wobei in beiden Fällen eine Zahl  $M, N > 15$  Stufen vorgesehen sein kann. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass für die Grobjustierung etwa 20 - 40 Windungen je Stufe geschaltet werden. Zur Ermöglichung einer Feinjustierung kann vorgesehen sein, dass der Laststufenschalter zur Umschaltung einer einzigen Windung je Stufe ausgebildet ist.

**[0031]** Der Transformator kann, abhängig vom Elektrolyse-Stack, eine elektrische Nennleistung von etwa 6 MVA aufweisen. Bei der Aufteilung der Sekundärseite in mehrere Sekundärwicklungsanordnungen kann die Nennleistung entsprechend aufgeteilt werden, sodass beispielsweise drei oder vier Sekundärwicklungsanordnungen mit einer Nennleistung von jeweils etwa 2 MVA bzw. 1,5 MVA vorgesehen sind.

**[0032]** Die Erfindung betrifft ferner die Verwendung einer erfindungsgemäßen Gleichrichteranordnung zur Generierung eines Ausgangs-Gleichstroms IDC von mehr als etwa 600 A, vorzugsweise mehr als etwa 2000 A bei einer Ausgangs-Gleichspannung im Bereich von etwa 300 V bis etwa 1500 V für die Wasserstoff-Elektrolyse, insbesondere die PEM-Elektrolyse oder Alkalische Elektrolyse.

**[0033]** Weitere erfindungsgemäße Merkmale ergeben sich aus den Ansprüchen, der Beschreibung der Ausführungsbeispiele und den Figuren. Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Figuren erläutert, welche exemplarische Ausführungsbeispiele zeigen:

**[0034]** Fig. 1 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel einer Gleichrichteranordnung;

**[0035]** Fig. 2 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Gleichrichteranordnung;

**[0036]** Fig. 3 zeigt ein drittes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Gleichrichteranordnung;

**[0037]** Fig. 4 zeigt ein viertes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Gleichrichteranordnung;

**[0038]** Fig. 5 zeigt ein fünftes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Gleichrichteranordnung.

**[0039]** Fig. 1 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel einer Gleichrichteranordnung für die Wasserstoff-Elektrolyse. Diese umfasst einen Transformator 1 mit einer Primärwicklung 2 zum Anschluss einer Eingangs-Wechselspannung  $U_1$  und einer Sekundärwicklung 3 zur Bereitstellung einer Ausgangs-Wechselspannung  $U_2$ , sowie einen an der Sekundärwicklung 3 angeschlossenen Gleich-

richter 4 zur Erzeugung eines Ausgangs-Gleichstroms  $I_{DC}$  und einer Ausgangs-Gleichspannung  $U_{DC}$ . Am Ausgang des Gleichrichters ist ein (nicht dargestellter) PEM-Stack zur Erzeugung von Wasserstoff angeschlossen.

**[0040]** An der Primärwicklung 2 des Transformators 1 sind eine Zahl  $N = 8$  Wicklungsanzapfungen 5 vorgesehen. Es ist ein mit einem Regler 7 verbundener Laststufenschalter 6 vorgesehen, der zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen 5 ausgebildet ist, sodass das Transformationsverhältnis des Transformators 1 über den Regler 7 in 8 Stufen schaltbar ist. Der Regler 7 ist über Datenleitungen mit einem Voltmeter 14 und einem Amperemeter 15 auf der Ausgangsseite des Gleichrichters 4 verbunden.

**[0041]** Der Gleichrichter 4 ist in diesem Ausführungsbeispiel als einphasiger Dioden-Brückengleichrichter ausgebildet. Der Regler 7 erhält als Zielgröße einen gewünschten Ausgangs-Gleichstrom und stellt den Laststufenschalter 6 an der Primärseite des Transformators 1 derart ein, dass dieser Wert am Ausgang des Gleichrichters 4 erreicht wird.

**[0042]** Fig. 2 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Gleichrichteranordnung. In diesem Ausführungsbeispiel umfasst die Primärwicklung 2 eine erste Teilwicklung 8 und eine zweite Teilwicklung 9, wobei an der ersten Teilwicklung 8 eine Zahl  $N = 8$  Wicklungsanzapfungen 10 vorgesehen sind, und an der zweiten Teilwicklung 9 eine Zahl  $M = 6$  Wicklungsanzapfungen 11 vorgesehen sind.

**[0043]** Es ist ein erster Laststufenschalter 12 vorgesehen ist, der mit einem Regler 7 verbunden und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen 10 der ersten Teilwicklung 8 ausgeführt ist. Ferner ist ein zweiter Laststufenschalter 13 vorgesehen, der mit dem Regler 7 verbunden und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen 11 der zweiten Teilwicklung 9 ausgeführt ist. Der Regler 7 ist über Datenleitungen mit beiden Laststufenschaltern 12, 13 verbunden und kann diese betätigen.

**[0044]** Die erste Teilwicklung 8 ist über den zweiten Laststufenschalter 13 in Serie mit der zweiten Teilwicklung 9 geschaltet. Dadurch sind die Teilwicklungen 8, 9 kaskadiert, sodass das Transformationsverhältnis des Transformators 1 in  $8 \times 6 = 48$  Stufen schaltbar ist. Die Anzahl der Wicklungen der ersten Teilwicklung 8 ist in diesem Beispiel zudem niedriger als die Anzahl der Wicklungen der zweiten Teilwicklung 9, sodass der zweite Laststufenschalter 13 eine Grobeinstellung und der zweite Laststufenschalter eine Feineinstellung des Transformationsverhältnisses  $U_1:U_2$  bewirkt.

**[0045]** Der Gleichrichter 4 ist in diesem Ausführungsbeispiel als einphasiger Dioden-Brückengleichrichter ausgebildet. Der Regler 7 ist über Datenleitungen mit einem Voltmeter 14 und einem Amperemeter 15 auf der Ausgangsseite des Gleichrichters 4 verbunden.

**[0046]** Der Regler 7 erhält als Zielgröße eine gewünschte Ausgangs-Gleichspannung oder einen gewünschten Ausgangs-Gleichstrom und stellt die Laststufenschalter 12, 13 an der Primärseite des Transformators 1 derart ein, dass diese Werte am Ausgang des Gleichrichters 4 erreicht werden.

**[0047]** Fig. 3 zeigt ein drittes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Gleichrichteranordnung. In diesem Ausführungsbeispiel wird ein dreiphasiger Transformator eingesetzt, um eine dreiphasige Eingangs-Wechselspannung  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{13}$  in eine dreiphasige Ausgangs-Wechselspannung  $U_{12}'$ ,  $U_{23}'$ ,  $U_{13}'$  zu transformieren. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel sind die Primärwicklungen 2, 2', 2'' und die Sekundärwicklungen 3, 3', 3'' in Dreieckskonfiguration geschaltet. Wiederum sind an jeder Primärwicklung 2, 2', 2'' eine Zahl  $N = 8$  Wicklungsanzapfungen 5, 5', 5'' vorgesehen.

**[0048]** Drei mit dem Regler 7 verbundene Laststufenschalter 6, 6', 6'' sind zur unterbrechungsfreien Umschaltung dieser Wicklungsanzapfungen 5, 5', 5'' an der Primärseite des Transformators ausgebildet, sodass der Regler 7 das Transformationsverhältnis des Transformators  $U_{12}:U_{12}' = U_{23}:U_{23}' = U_{13}:U_{13}'$  in  $N = 8$  Stufen einstellen kann, wobei die Stufen unterschiedlich groß sind.

**[0049]** Die drei Sekundärwicklungen 3, 3', 3'' sind in Dreieckskonfiguration geschaltet und bilden

eine Sekundärwicklungsanordnung 16. In einer nicht dargestellten Ausführungsform der Erfindung sind die Primärwicklungen 2, 2', 2'' und auch die Sekundärwicklungen 3, 3', 3'' in Sternkonfiguration geschaltet.

**[0050]** Der Gleichrichter 4 ist in diesem Ausführungsbeispiel als dreiphasiger Dioden-Brückengleichrichter ausgebildet. Der Regler 7 ist wiederum über Datenleitungen mit einem Voltmeter 14 und einem Amperemeter 15 auf der Ausgangsseite des Gleichrichters 4 verbunden. Der Regler 7 erhält als Zielgröße eine gewünschte Ausgangs-Gleichspannung oder einen gewünschten Ausgangs-Gleichstrom und stellt die Laststufenschalter 6, 6', 6'' an der Primärseite des Transformators 1 derart ein, dass diese Werte am Ausgang des Gleichrichters 4 erreicht werden.

**[0051]** Fig. 4 zeigt ein viertes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Gleichrichteranordnung. In diesem Ausführungsbeispiel wird ein dreiphasiger Transformator eingesetzt, um eine dreiphasige Eingangs-Wechselspannung in eine dreiphasige Ausgangs-Wechselspannung zu transformieren. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel sind die Primärwicklungen 2, 2', 2'' und die Sekundärwicklungen 3, 3', 3'' in Dreieckskonfiguration geschaltet.

**[0052]** Die Primärwicklungen 2, 2', 2'' umfassen jeweils eine erste Teilwicklung 8, 8', 8'' und eine zweite Teilwicklung 9, 9', 9''. An den ersten Teilwicklungen 8, 8', 8'' sind jeweils eine Zahl  $N = 4$  Wicklungsanzapfungen 10, 10', 10'' vorgesehen. An den zweiten Teilwicklungen 9, 9', 9'' sind jeweils eine Zahl  $M = 8$  Wicklungsanzapfungen 11, 11', 11'' vorgesehen. Jede Teilwicklung kann selbst wiederum in mehrere Einzelwicklungen unterteilt sein.

**[0053]** Es sind drei erste Laststufenschalter 12, 12', 12'' vorgesehen, die mit dem Regler 7 über Datenleitungen verbunden sind und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen 10, 10', 10'' der ersten Teilwicklungen 8, 8', 8'' ausgebildet sind. Die drei ersten Laststufenschalter 12, 12', 12'' können auch als einziger dreiphasiger Laststufenschalter realisiert sein.

**[0054]** Ferner sind drei zweite Laststufenschalter 13, 13', 13'' vorgesehen, die mit dem Regler 7 über Datenleitungen verbunden sind und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen 11, 11', 11'' der zweiten Teilwicklung 9, 9', 9'' ausgebildet sind. Die drei zweiten Laststufenschalter 13, 13', 13'' können ebenfalls als einziger dreiphasiger Laststufenschalter realisiert sein.

**[0055]** Die ersten Teilwicklungen 8, 8', 8'' sind über die ersten Laststufenschalter 12, 12', 12'' in Serie mit den zweiten Teilwicklungen 9, 9', 9'' geschaltet, sodass sich eine Kaskadierung der ersten und zweiten Teilwicklungen ergibt, und das Transformationsverhältnis des Transformators 1 in  $M \times N = 8 \times 4 = 32$  Stufen schaltbar ist. Somit kann der Regler 7 das Transformationsverhältnis des Transformators 1 in 32 Stufen einstellen, wobei die Stufen unterschiedlich groß sind.

**[0056]** In nicht dargestellten Ausführungsformen der Erfindung sind die Werte von  $N$  und  $M$  größer als 15, insbesondere größer als 20, sodass der Regler 7 das Transformationsverhältnis des Transformators 1 in über 225, insbesondere in über 400 Stufen einstellen kann.

**[0057]** Bei der dargestellten Ausführungsform sind die Primärwicklungen 2, 2', 2'' in Dreieckskonfiguration geschaltet. Auf der Sekundärseite sind vier um jeweils  $15^\circ$  elektrisch phasenversetzte Sekundärwicklungsanordnungen 16, 16', 16'', 16''' vorgesehen. Die Phasenverschiebungen betragen beispielsweise  $+22,5^\circ$ ,  $+7,5^\circ$ ,  $-7,5^\circ$ ,  $-22,5^\circ$  relativ zur Primärseite. Die Sekundärwicklungen 3, 3', 3'' der ersten beiden Sekundärwicklungsanordnungen 16, 16' sind in Dreieckskonfiguration geschaltet. Die Sekundärwicklungen 3, 3', 3'' der dritten und vierten Sekundärwicklungsanordnungen 16'', 16''' sind in Sternkonfiguration geschaltet.

**[0058]** Jede der vier Sekundärwicklungsanordnungen 16, 16', 16'', 16''' ist mit einem Gleichrichter 4, 4', 4'', 4''' verbunden. Die Gleichrichter 4, 4', 4'', 4''' sind in diesem Ausführungsbeispiel als dreiphasige Dioden-Brückengleichrichter mit je sechs Dioden ausgebildet, sodass sich eine 24-pulsige Gleichrichtung der Eingangs-Wechselspannung ergibt.

**[0059]** In nicht dargestellten Ausführungsformen der Erfindung können zwei, drei, fünf oder sechs Sekundärwicklungsanordnungen mit je einem dreiphasigen Dioden-Brückengleichrichter mit je sechs Dioden kombiniert werden, sodass sich eine 12-, 18-, 30- oder 36-pulsige Gleichrichtung

der Eingangs-Wechselspannung ergibt.

**[0060]** Der Transformator 1 hat in diesem Ausführungsbeispiel eine elektrische Nennleistung von etwa 6 MVA, bei einer Eingangsspannung von etwa 30 kV. Durch die Aufteilung der Sekundärseite in vier Sekundärwicklungsanordnungen 16, 16', 16'', 16''' wird die Nennleistung in jeweils etwa 1,5 MVA je aufgeteilt.

**[0061]** Der Regler 7 ist wiederum über Datenleitungen mit einem Voltmeter 14 und einem Amperemeter 15 auf der Ausgangsseite des Gleichrichters 4 verbunden.

**[0062]** Der Regler 7 erhält als Zielgröße eine gewünschte Ausgangs-Gleichspannung oder einen gewünschten Ausgangs-Gleichstrom und stellt die ersten Laststufenschalter 12, 12', 12'' und die zweiten Laststufenschalter 13, 13', 13'' an der Primärseite des Transformators 1 derart ein, dass die gewünschten Werte am Ausgang des Gleichrichters 4 erreicht werden.

**[0063]** Fig. 5 zeigt ein fünftes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Gleichrichteranordnung. Das Ausführungsbeispiel entspricht jenem aus Fig. 4 mit dem Unterschied, dass die Sekundärwicklungsanordnungen 16, 16', 16'', 16''' parallel geschaltet sind. Dadurch ist die Spannung der Sekundärwicklungsanordnungen höher, und es ist ein niedrigeres Transformationsverhältnis  $N1:N2$  erforderlich. Wiederum sind die Sekundärwicklungsanordnungen 16, 16', 16'', 16''' mit einem Phasenversatz von jeweils  $15^\circ$  ausgebildet. Die Gleichrichter 4, 4', 4'', 4''' sind wieder als dreiphasige Dioden-Brückengleichrichter mit je sechs Dioden ausgebildet, sodass sich eine 24-pulsige Gleichrichtung der Eingangs-Wechselspannung ergibt. In den Ausgangsleitungen sind Zwischenphasentransformatoren (Inter Phase Transformer, IPT) mit Spulen 17, 17', 17'', 17''' vorgesehen, um die von den vier parallel geschalteten, phasenverschobenen Gleichrichtern gelieferten Gleichströme auszugleichen, bevor sie zusammengeführt werden.

**[0064]** Die Erfindung beschränkt sich nicht auf die vorliegend dargestellten Ausführungsbeispiele, sondern umfasst jegliche Gleichrichteranordnung im Rahmen der nachfolgenden Patentansprüche.



## BEZUGSZEICHENLISTE

1	Transformator
2, 2', 2''	Primärwicklung
3, 3', 3''	Sekundärwicklung
4, 4', 4'', 4'''	Gleichrichter
5, 5', 5''	Wicklungsanzapfungen der Primärwicklungen
6, 6', 6''	Laststufenschalter der Primärwicklungen
7	Regler
8, 8', 8''	Erste Teilwicklung
9, 9', 9''	Zweite Teilwicklung
10, 10', 10''	Wicklungsanzapfungen der ersten Teilwicklung
11, 11', 11''	Wicklungsanzapfungen der zweiten Teilwicklung
12, 12', 12''	Laststufenschalter der ersten Teilwicklung
13, 13', 13''	Laststufenschalter der zweiten Teilwicklung
14	Voltmeter
15	Amperemeter
16, 16', 16'', 16'''	Sekundärwicklungsanordnung
17, 17', 17'', 17'''	Zwischenphasentransformatorspule

## Patentansprüche

1. Gleichrichteranordnung für die Wasserstoff-Elektrolyse, umfassend
  - a. einen Transformator (1) mit einer Primärwicklung (2) zum Anschluss einer Eingangs-Wechselspannung und einer Sekundärwicklung (3) zur Bereitstellung einer Ausgangs-Wechselspannung, sowie
  - b. einen an der Sekundärwicklung (3) angeschlossenen Gleichrichter (4) zur Erzeugung eines Ausgangs-Gleichstroms  $I_{DC}$  und einer Ausgangs-Gleichspannung  $U_{DC}$ , wobei
  - c. die Gleichrichter (4, 4', 4'', 4''') als einphasige oder mehrphasige Dioden-Brückengleichrichter ausgebildet sind,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass
    - d. die Primärwicklung (2) eine erste Teilwicklung (8) und eine zweite Teilwicklung (9) umfasst, wobei
    - e. an der ersten Teilwicklung (8) eine Zahl  $N > 1$  Wicklungsanzapfungen (10) vorgesehen sind, und an der zweiten Teilwicklung (9) eine Zahl  $M > 1$  Wicklungsanzapfungen (11) vorgesehen sind, wobei
    - f. ein erster Laststufenschalter (12) vorgesehen ist, der mit einem Regler (7) verbunden und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen (10) der ersten Teilwicklung (8) ausgeführt ist, und
    - g. ein zweiter Laststufenschalter (13) vorgesehen ist, der mit einem Regler (7) verbunden und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen (11) der zweiten Teilwicklung (9) ausgeführt ist, wobei
    - h. die erste Teilwicklung (8) über den zweiten Laststufenschalter (13) in Serie mit der zweiten Teilwicklung (9) geschaltet ist, sodass das Transformationsverhältnis des Transformators (1) in  $N \times M$  Stufen schaltbar ist.
2. Gleichrichteranordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wicklungszahl der ersten Teilwicklung (8) höher ist als die Wicklungszahl der zweiten Teilwicklung (9), oder die Anzahl  $N$  größer als die Anzahl  $M$  ist, sodass das Transformationsverhältnis über die Laststufenschalter (12, 13) in  $N$  groben Stufen und  $M$  feinen Stufen verstellbar ist.
3. Gleichrichteranordnung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Transformator (1) als mehrphasiger, insbesondere als dreiphasiger Transformator mit in Stern- oder Dreieckskonfiguration geschalteten Primärwicklungen (2, 2', 2'') und in Stern- oder Dreieckskonfiguration geschalteten Sekundärwicklungen (3, 3', 3'') ausgebildet ist, wobei an jeder Primärwicklung (2, 2', 2'') eine Zahl  $N > 1$  Wicklungsanzapfungen (5, 5', 5'') vorgesehen sind, und mehrere, vorzugsweise drei mit dem Regler (7) verbundene Laststufenschalter (6, 6', 6'') vorgesehen sind, die zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen (5, 5', 5'') ausgebildet sind.
4. Gleichrichteranordnung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass
  - a. die Primärwicklungen (2, 2', 2'') jeweils eine erste Teilwicklung (8, 8', 8'') und eine zweite Teilwicklung (9, 9', 9'') umfassen, wobei
  - b. an den ersten Teilwicklungen (8, 8', 8'') jeweils eine Zahl  $N > 1$  Wicklungsanzapfungen (10, 10', 10'') vorgesehen sind, und
  - c. an den zweiten Teilwicklungen (9, 9', 9'') jeweils eine Zahl  $M > 1$  Wicklungsanzapfungen (11, 11', 11'') vorgesehen sind, wobei
  - d. erste Laststufenschalter (12, 12', 12'') vorgesehen sind, die mit dem Regler (7) verbunden und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen (10, 10', 10'') der ersten Teilwicklungen (8, 8', 8'') ausgebildet sind, und
  - e. zweite Laststufenschalter (13, 13', 13'') vorgesehen sind, die mit dem Regler (7) verbunden und zur unterbrechungsfreien Umschaltung der Wicklungsanzapfungen (11, 11', 11'') der zweiten Teilwicklung (9, 9', 9'') ausgebildet sind, wobei
  - f. die ersten Teilwicklungen (8, 8', 8'') über die ersten Laststufenschalter (12, 12', 12'') in Serie mit den zweiten Teilwicklungen (9, 9', 9'') geschaltet sind, sodass das Transformationsverhältnis des Transformators (1) in  $M \times N$  Stufen schaltbar ist.

5. Gleichrichteranordnung nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwei oder mehr Sekundärwicklungsanordnungen (16, 16', 16'', 16''') umfassend jeweils drei in Stern- oder Dreieckskonfiguration geschaltete Sekundärwicklungen (3, 3', 3'') vorgesehen sind, wobei die Sekundärwicklungsanordnungen (16, 16', 16'', 16''') dazu ausgebildet sind, um einen Winkel  $\Delta\varphi$  phasenverschobene Ausgangsspannungen zu erzeugen.
6. Gleichrichteranordnung nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausgangsspannungen der Sekundärwicklungsanordnungen (16, 16', 16'', 16''') um einen Winkel von  $\Delta\varphi$  phasenverschoben sind, wobei  $\Delta\varphi$  gleich  $60^\circ$  gebrochen durch die Anzahl der Sekundärwicklungsanordnungen (16, 16', 16'', 16''') ist.
7. Gleichrichteranordnung nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass drei, vier, fünf oder sechs Sekundärwicklungsanordnungen (16, 16', 16'', 16''') vorgesehen sind.
8. Gleichrichteranordnung nach einem der Ansprüche 5 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass für jede Sekundärwicklungsanordnung (16, 16', 16'', 16''') ein separater Gleichrichter (4, 4', 4'', 4''') vorgesehen ist, wobei die Gleichrichter (4, 4', 4'', 4''') in Serienschaltung geschaltet sind.
9. Gleichrichteranordnung nach einem der Ansprüche 5 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass für jede Sekundärwicklungsanordnung (16, 16', 16'', 16''') ein separater Gleichrichter (4, 4', 4'', 4''') vorgesehen ist, wobei die Gleichrichter (4, 4', 4'', 4''') in Parallelschaltung geschaltet sind.
10. Gleichrichteranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Regler (7) mit einem Amperemeter (15) des Ausgangsstroms  $I_{DC}$  und gegebenenfalls mit einem Voltmeter (14) zur Messung der Ausgangsspannung  $U_{DC}$  verbunden ist.
11. Gleichrichteranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Eingangs-Wechselspannung eine Amplitude von über 10 kV, insbesondere etwa 20 kV bis 30 kV, und die Ausgangs-Gleichspannung einen Nennwert von etwa 300 V bis etwa 1500 V, beispielsweise etwa 625V aufweist.
12. Gleichrichteranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Transformationsverhältnis um einen Nennwert von zumindest etwa  $N1:N2 = 48$ , insbesondere  $N1:N2 = 190$  einstellbar ist.
13. Gleichrichteranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Transformator (1) eine elektrische Nennleistung von über etwa 1 MVA, vorzugsweise über etwa 6 MVA aufweist.
14. Gleichrichteranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Ermöglichung einer Feinjustierung die Laststufenschalter (6, 12, 13) zur Umschaltung einer einzigen Windung je Stufe ausgebildet sind.
15. Verwendung einer Gleichrichteranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 14 zur Generierung eines Ausgangs-Gleichstroms  $I_{DC}$  von mehr als etwa 600 A, vorzugsweise mehr als etwa 2000 A bei einer Ausgangs-Gleichspannung im Bereich von etwa 300 V bis 1500 V für die Wasserstoff-Elektrolyse, insbesondere PEM-Elektrolyse oder Alkalische Elektrolyse.

**Hierzu 4 Blatt Zeichnungen**

1/4

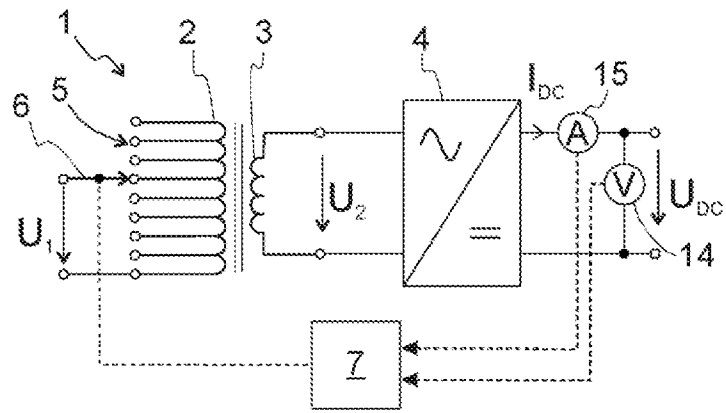


Fig. 1

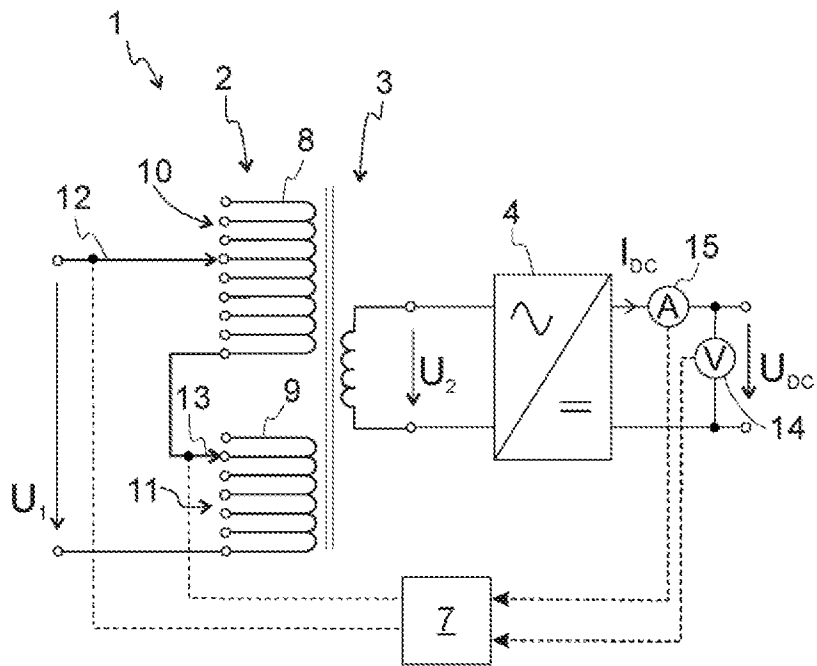


Fig. 2

2/4

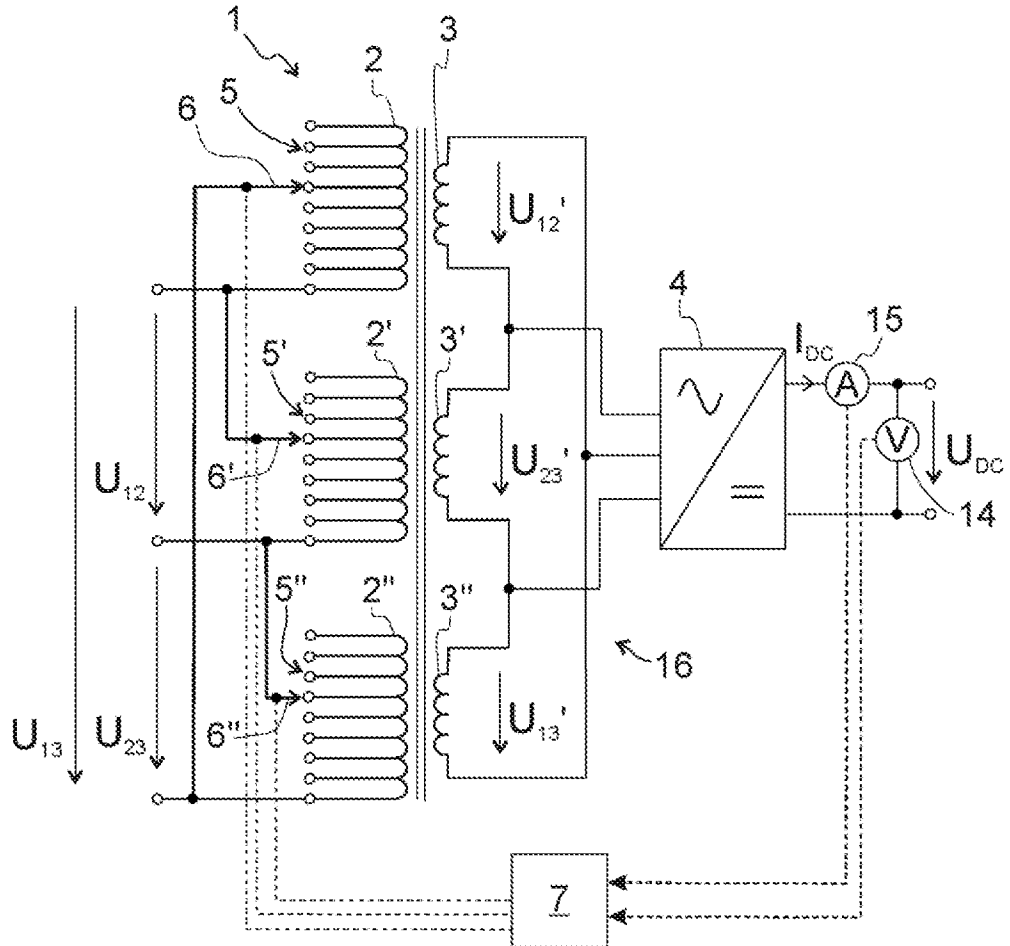


Fig. 3

3/4

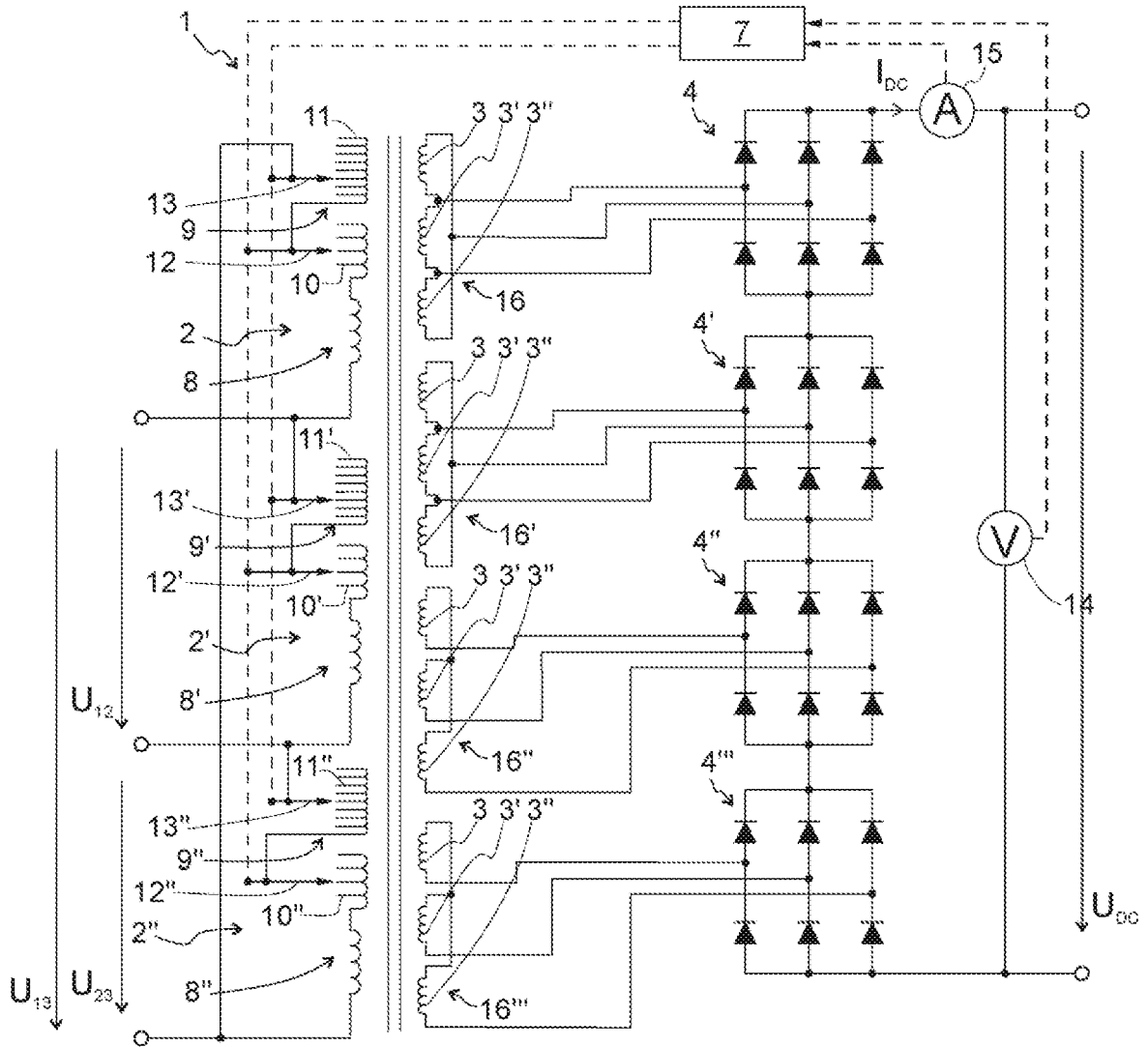


Fig. 4

4/4

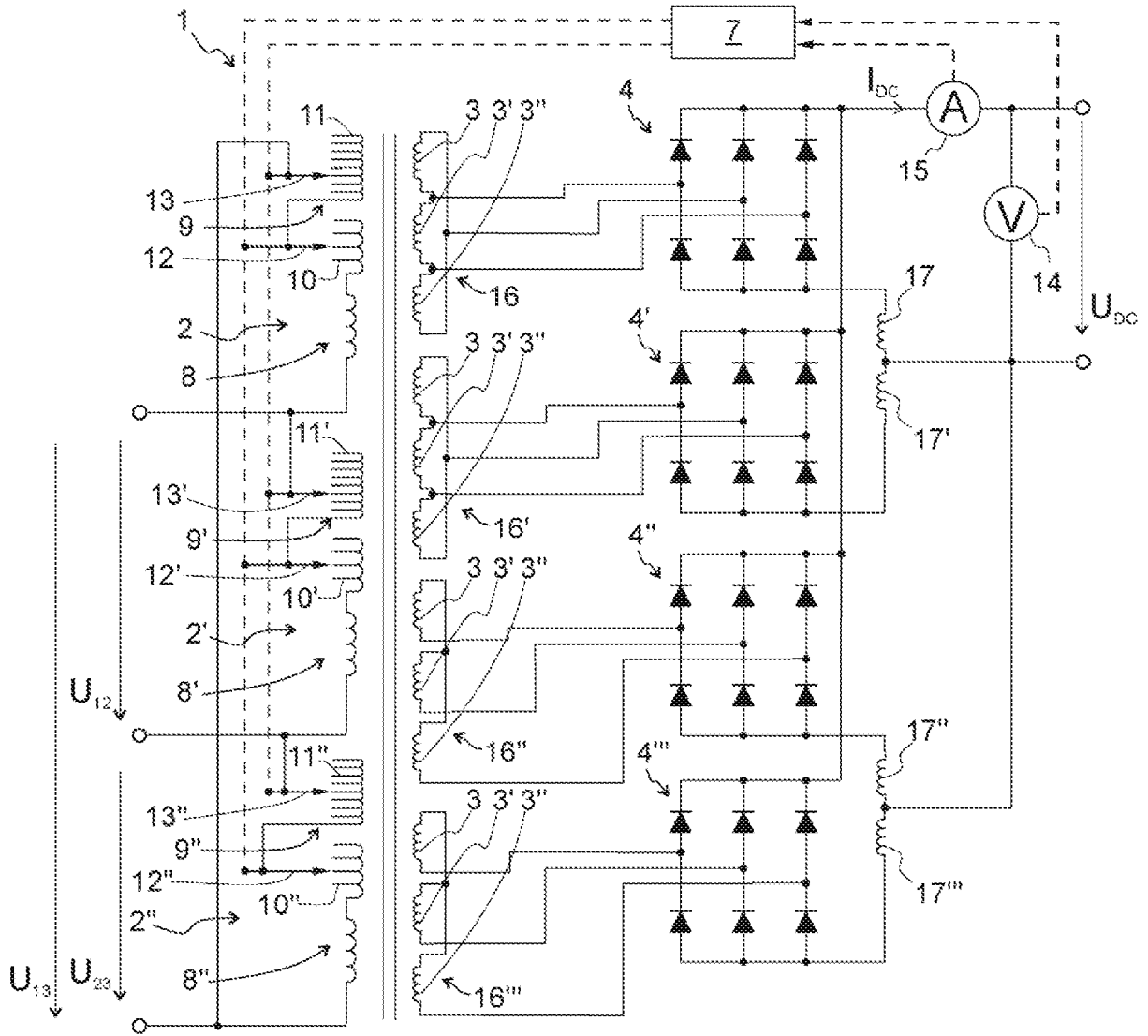


Fig. 5