

SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 705 817 B1

(51) Int. Cl.: H02M 3/28 (2006.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 01836/11

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

(22) Anmeldedatum: 16.11.2011

(43) Anmeldung veröffentlicht: 31.05.2013

(72) Erfinder:
Johann Walter Kolar, 8044 Zürich (CH)
Gabriel Ignacio Oritz, 8052 Zürich (CH)
Florian Krismer, 8952 Schlieren (CH)

(24) Patent erteilt: 15.01.2016

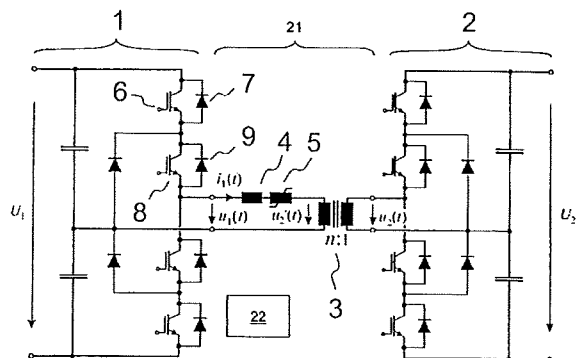
(74) Vertreter:
Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach 1771
8032 Zürich (CH)

(45) Patentschrift veröffentlicht: 15.01.2016

(54) **Elektrischer Wandler und Verfahren für dessen Betrieb.**

(57) Ein elektrischer Wandler weist wenigstens eine aktive Brücke (1, 2) auf, die elektrisch mit einem AC-Zwischenkreis (21) verbunden ist, wobei eine erste aktive Brücke (1) wenigstens einen aktiven Halbleiterschalter (6, 8) aufweist, mittels welchem die erste aktive Brücke (1) in unterschiedliche Schaltkonfigurationen gebracht werden kann, um dadurch unterschiedliche Spannungen an die Primäranschlüsse des AC-Zwischenkreises (21) anzulegen. Der AC-Zwischenkreis (21) weist einen Transformator (3) mit wenigstens einer mit den Primäranschlüssen verbundenen Primärwicklung und wenigstens einer Sekundärwicklung auf.

Der AC-Zwischenkreis (21) weist eine Hauptinduktivität (4) in Reihenschaltung zu der Primär- oder der Sekundärwicklung und eine Sättigungsspule (5) in Reihenschaltung zu der Primär- oder der Sekundärwicklung auf. Die Sättigungsspule (5) ermöglicht es, Nullstromschalten mit reduzierten Schaltverlusten zu implementieren, indem ein hoher interner Trägerrekombinationsgrad in Halbleiterschaltern und/oder Dioden der aktiven Brücken ermöglicht wird.



Beschreibung

[0001] Der Nullstromschaltbetrieb ist ein attraktives Merkmal für die Mittelfrequenz-Hochleistungs-DC/DC-Umwandlung, wobei wenigstens eine DC-Seite Hochspannungs-Bipolarhalbleiterelemente verwendet, da sie höhere Schaltfrequenzen und somit höhere Energiedichten mit moderaten Schaltverlusten ermöglicht. Nullstromschalten garantiert jedoch keine Null-Verlust-Kommutation der Halbleiterbauelemente, da die während des Leitbetriebs aufgebauten Ladungsträger extern entfernt werden müssen, wenn das Halbleiterbauelement in den Blockierungszustand eintritt, was Schaltverluste selbst bei nullgeschaltetem Strom bewirkt.

[0002] Bidirektionale Hochleistungs-DC/DC-Wandler werden herkömmlicherweise unter Verwendung von zwei aktiven Brücken aufgebaut, die über einen Mittelfrequenztransformator gekoppelt sind. Typischerweise werden diese Hochleistungs-DC/DC-Wandler dazu verwendet, einen Niederspannungs- mit einem Mittelspannungs-DC-Bus oder alternativ zwei Mittelspannungs-DC-Busse zu verbinden. Dieses bedeutet, dass wenigstens eine von den aktiven Brücken unter Verwendung von Hochspannungs-Bipolarhalbleiterbauelementen aufgebaut sein muss, welche mit den herkömmlichen Modulationsverfahren aufgrund relativ hoher Schaltverluste nicht bei hohen Schaltfrequenzen betrieben werden können und somit die Systemleistungsdichte beeinträchtigen.

[0003] Um dieses Problem zu überwinden, wurden Topologien und Modulationsverfahren, welche Nullstromschalten in wenigstens einer von den aktiven Brücken erzielen, bereits vorgeschlagen. Beispielsweise wird in H. Reinold and M. Steiner, «Characterization of Semiconductor Losses in Series Resonant DC-DC Converters for High Power Applications using Transformers with Low Leakage Inductance», 8th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE) 1990 eine Nullstromschalten-Resonanztopologie untersucht. Hier wird ein Schwingkreis (LC-Schaltung) auf die Schaltfrequenz des Wandlers abgestimmt; und daher fliesst ein sinusförmiger Stromimpuls während der halben Schaltperiode durch den Transformator. Auf diese Weise wird Nullstromschalten in beiden aktiven Brücken an dem Ende eines halben Schaltzyklus erreicht.

[0004] Alternativ wird in N. Schibli, «Symmetrical multilevel converters with two quadrant DC-DC feeding», «Ph.D. dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), 2000, Seiten 125–128 eine Nullstromschalten-Modulationsstrategie für eine Doppelaktivbrücke ohne Resonanzschwingkreis vorgeschlagen. Hier wird eine von den aktiven Brücken dazu genutzt, den Strom durch den Transformator zu einer Dreieckswellenform zu formen, während die andere aktive Brücke an den Nulldurchgangszeitpunkten des Stroms geschaltet wird, was Nullstromschalten in dieser aktiven Brücke erzielt.

[0005] Jedoch garantiert der Schaltvorgang in den Hochspannungshalbleiterbauelementen bei einem Strom von null keine verlustlose Kommutation. Wie in P. Renstad «On Dynamic Effects Influencing IGET Losses in Soft-Switching Converters», IEEE Transactions on Power Electronics, vol 26 No. 1 Juli 2010, beschrieben, besitzen bipolare Halbleiterbauelemente eine begrenzte Trägerlebensdauer, was bedeutet, dass nachdem Strom durch das Halbleiterbauelement geleitet worden ist, Ladungen in dem Übergang gespeichert bleiben, bis eine totale Rekombination erreicht wird oder bis der Schalter in den Blockierungszustand gezwungen wird. In diesem letzteren Falle werden die Ladungen extern entfernt und somit die Energie in dem Schaltkreis abgebaut, selbst wenn ein Nullstrom durch das Halbleiterbauelement geschaltet wird. Es sei angemerkt, dass diese Phänomene in gesteuerten bipolaren Halbleiterbauelementen, wie z.B. in IGBTs, IGCTs oder GTOs sowie in Gleichrichterioden vorhanden sind.

[0006] Eine Aufgabe der Erfindung ist die Schaffung eines elektrischen Wandlers und eines Betriebsverfahrens dafür u.a. gemäss dem vorstehend erwähnten Typ, welcher die vorstehend erwähnten Nachteile überwindet.

[0007] Diese Aufgabe wird durch einen elektrischen Wandler und dessen Betriebsverfahren gemäss den entsprechenden unabhängigen Ansprüchen gelöst.

[0008] Der elektrische Wandler weist wenigstens eine aktive Brücke auf, die elektrisch mit einem AC-Zwischenkreis verbunden ist, wobei die wenigstens eine aktive Brücke wenigstens einen aktiven Halbleiterschalter aufweist, mittels welchem die wenigstens eine aktive Brücke in unterschiedliche Schaltkonfigurationen gebracht werden kann, um dadurch unterschiedliche Spannungen an die Primäranschlüsse des AC-Zwischenkreises anzulegen, was zu einem durch die Primäranschlüsse fliessenden Primärstrom führt. Der AC-Zwischenkreis weist einen Transformator mit wenigstens einer mit den Primäranschlüssen verbundenen Primärwicklung und wenigstens einer Sekundärwicklung auf. Darin weist der AC-Zwischenkreis ferner eine Hauptspule in Reihenschaltung zu der Primär- oder der Sekundärwicklung und eine Sättigungsspule in Reihenschaltung zu der Primär- oder der Sekundärwicklung auf.

[0009] Die aktiven Brücken sind von irgendeiner Art von Topologien, welche wenigstens zwei Spannungspegel an die Anschlüsse des AC-Zwischenkreises anlegen kann. Dieses beinhaltet Vollbrücken, sternpunktgeklemmte Brücken sowie jede beliebige Art von mehrstufigen Topologien. Beispielsweise ermöglicht eine Dreipunktbrücke das Anlegen einer positiven (Bus-)Spannung, einer negativen (Bus-)Spannung und einer Nullspannung an die entsprechenden Anschlüsse des AC-Zwischenkreises.

[0010] Durch die Verwendung des dargestellten elektrischen Wandlers kann eine längere Rekombinationszeit in den Hochspannungsschaltern erreicht werden, nachdem Strom geleitet worden ist, und somit die Schaltverluste reduziert und ein Betrieb des Systems bei höheren Schaltfrequenzen ermöglicht werden.

[0011] Mit anderen Worten, der Strom durch die Halbleiterbauelemente wird durch die Einführung einer Sättigungsspule in die Schaltung geformt. Diese Sättigungsspule stellt ein zusätzliches Zeitintervall während der Leitphase bereit, bei der der Strom durch die Halbleiterbauelemente niedrig ist und somit ein hoher interner Rekombinationsgrad erreicht werden kann, und somit die Nullstromschaltverluste reduziert werden.

[0012] Die Sättigungsspule ist in Reihe zu dem Transformator des Wandlers geschaltet. Diese Spule hat einen hohen Induktivitätswert im Vergleich zu der Hauptspule in Reihe zu dem Transformator, wenn ihr Strom niedriger als der Sättigungsstrom ist. Nach dem Start eines Schaltzyklus (definiert als der Moment, wenn die nullstromgeschaltete aktive Brücke mit dem Anlegen einer positiven Spannung beginnt) erreicht der Transformatorstrom, somit der Strom der Sättigungsspule, den Sättigungswert und stellt daher eine vernachlässigbare Induktivität dar und beeinflusst somit nicht das Verhalten des Wandlers. Zum Ende eines halben Schaltzyklus hin nimmt der Transformatorstrom ab (um das Nullstromschalten in einer der aktiven Brücken zu erreichen), und wenn er den Sättigungspegel erreicht, verlässt die Sättigungsspule den Sättigungszustand, und ihr Induktivitätswert wird erheblich vergrößert. Sobald die Spule entsättigt ist, wird, wenn der Sättigungsstrom mehrfach kleiner als der Spitzentransformatorstrom des Wandlers gewählt ist, der Strom durch die Halbleiterbauelemente für einen erheblichen Anteil der Schaltperiode niedrig gehalten, bevor das Halbleiterbauelement abgeschaltet wird, was es dem Schalter ermöglicht, eine hohe interne Trägerrekombination zu erreichen.

[0013] In einer Ausführungsform weist der elektrische Wandler eine Steuereinheit auf, die dafür konfiguriert ist, den wenigstens einen aktiven Halbleiterschalter der wenigstens einen aktiven Brücke zu steuern, um einen Fluss elektrischer Energie durch den AC-Zwischenkreis zu erreichen, und Nullstromschalten in der wenigstens einen aktiven Brücke zu implementieren. Es versteht sich, dass der Begriff «Nullstromschalten» auch das Schalten bei Strömen von nahezu null umfasst, was manchmal als Quasi-Nullstromschalten bezeichnet wird.

[0014] Das Ergebnis besteht in der Formung des Stroms durch den Transformator während der Leitphase des Halbleiterbauelementes, um dadurch die Menge von Ladungsträgern zu reduzieren, die entfernt werden muss, wenn die Blockierungsphase erreicht wird. Insbesondere wird die neue Form des Transformatorstroms eine definierte Zeit bei einem niedrigen Pegel aufweisen, bevor die Spannung erneut an das Halbleiterbauelement angelegt wird, womit die meisten während der Leitung aufgebauten Ladungsträger durch interne Rekombination beseitigt werden.

[0015] Zum Beginn und zum Ende einer halben Schaltperiode ist, wenn die Sättigungsspule ungesättigt ist, der Strom durch den Transformator ziemlich niedrig, womit minimale Energie zwischen den aktiven Brücken übertragen wird. Jedoch kann, um den Wandler die Nennleistung übertragen zu lassen, der Spitzenstrom durch den Transformator erhöht werden, was (zumindest) zu einem Anstieg in den Leitungsverlusten in dem Schaltkreis führt.

[0016] In einer Ausführungsform weist der AC-Zwischenkreis einen Schwingkreis auf, und die Steuereinheit ist dafür eingerichtet, den Wandler als Resonanzwandler zu betreiben. Dieses ermöglicht die Anwendung des erfindungsgemässen Prinzips auf einen Resonanzwandler.

[0017] In einer Ausführungsform ist der Stromwert, bei welchem die Sättigungsspule sättigt, wenigstens 20-mal kleiner als der in der Primärwicklung für die maximale Energieübertragung während des Betriebs des Wandlers verwendete Spitzenstrom.

[0018] In einer Ausführungsform ist der Induktivitätswert der Sättigungsspule in ihrem ungesättigten Zustand wenigstens 5-mal oder 15-mal grösser als der Induktivitätswert der Hauptspule.

[0019] Das Verfahren zum Betreiben des elektrischen Wandlers weist die Schritte auf:

- Steuern des Absolutwertes wenigstens eines Stroms durch den Transformator durch Schalten der aktiven Halbleiterschalter des elektrischen Wandlers, dass er zuerst ansteigt und dann abfällt, während sich die Sättigungsspule in einem gesättigten Zustand befindet;
- wenn sich der Strom null annähert, Verringern der Steigung, mit welcher sich der Strom null annähert, indem die Sättigungsspule den gesättigten Zustand verlässt, und dadurch den Induktivitätswert der Sättigungsspule erhöht.

[0020] Eine Ausführungsform der Erfindung ist in einem DC/DC-Wandler implementiert, dessen Hardware und Modulationsverfahren dafür ausgelegt ist, ein Nullstromschalten in einer der aktiven Brücken zu erreichen. Die Erfindung reduziert die Schaltverluste für diesen Wandler,

- wenn die nullstromgeschaltete aktive Brücke im Energieeinspeisemodus arbeitet (Energie von der DC-Seite der nullstromgeschalteten aktiven Brücke in den Transformator übertragen wird). Hier profitieren die aktiven Schalter von der Erfindung, da während der gesamten Schaltperiode diese die den Transformatorstrom leitenden Halbleiterbauelemente sind,
- oder wenn die nullstromgeschaltete aktive Brücke in einem Gleichrichtungsmodus arbeitet (Energie aus dem Transformator in die DC-Seite der nullstromgeschalteten aktiven Brücke übertragen wird). In diesem Falle werden die Dioden dieser aktiven Brücke in einem Nullstrom-Schaltmodus betrieben.

[0021] Somit weist das Verfahren, in einer Ausführungsform, im Falle, wenn elektrische Energie aus der wenigstens einen aktiven Brücke in den Transformator fließt, die Schritte auf:

- Steuern des Wandlers, um Nullstromschalten in der wenigstens einen aktiven Brücke zu implementieren;

– indem die Steigung verringert wird, mit welchem sich der Strom null annähert, was Schaltverluste in den aktiven Schaltern der wenigstens einen aktiven Brücke verringert.

[0022] Oder, in einer Ausführungsform weist das Verfahren, im Falle, wenn elektrische Energie aus dem Transformator in die wenigstens eine aktive Brücke fliesst, die Schritte auf:

- Steuern des Wandlers, um Nullstromschalten in der wenigstens einen aktiven Brücke zu implementieren;
- indem die Steigung verringert wird, mit welchem sich der Strom null annähert, was Schaltverluste in antiparallelen Dioden der aktiven Schalter der wenigstens einen aktiven Brücke verringert.

[0023] Demzufolge können, wenn Energie in jeder Richtung fließen kann, und dort, wo eine entsprechende aktive Brücke sowohl mit der Primärseite als auch der Sekundärseite des Transformators verbunden ist, auf diese Weise die Schaltverluste in den aktiven Schaltern der aktiven Brücke, welche die Energie liefert, und in den Dioden der aktiven Brücke, die in einem Gleichrichtungsmodus arbeiten, verringert werden.

[0024] In einer zweiten Ausführungsform wird die Erfindung in einem Wandler mit aktiven Brücken und einem Resonanzkondensator und einer Resonanzspule in Reihe zu dem Transformator verwendet. Dieser Wandler wird in einem Resonanzmodus, der ein Nullstromschalten in beiden aktiven Brücken erzielt, betrieben. Mit der Erfindung erreicht die einspeisende aktive Brücke eine Schaltverlustreduzierung in ihren aktiven Schaltern, während in der gleichrichtenden aktiven Brücke diese Reduzierung in den Gleichrichterdiolen erzielt wird.

[0025] Somit ist der elektrische Wandler in einer Ausführungsform ein Resonanzwandler, und das Verfahren weist die Schritte auf:

- Steuern des Wandlers, um Nullstromschalten in der wenigstens einen aktiven Brücke zu implementieren;
- indem die Steigung verringert wird, mit welchem sich der Strom null annähert, was Schaltverluste in aktiven Schaltern und in entsprechenden antiparallelen Dioden verringert.

[0026] Um den Einfluss des erhöhten Transformatorspitzenstroms auf das Betriebsverhalten des Wandlers zu minimieren, kann eine Modifikation des Modulationsverfahrens implementiert werden. Dieses neue Modulationsverfahren minimiert oder reduziert die Zeit zwischen dem entsättigten Zustand der Sättigungsspule an dem Beginn jedes halben Schaltzyklus durch Anlegen einer hohen Spannung an die Sättigungsspule während dieser Phase. Mit dieser Modifikation ist nur eine moderate Erhöhung in dem Spitzenstrom durch den Transformator erforderlich, während immer noch eine erhebliche Reduzierung in den Schaltverlusten der Halbleiterbauelemente erzielt wird.

[0027] Somit weist das Verfahren in einer Ausführungsform, zu einer Zeit, nachdem ein Strom durch die Sättigungsspule null war und die Sättigungsspule noch nicht gesättigt ist, die Schritte auf:

- Anlegen einer Anfangsspannung an die Sättigungsspule, um die Sättigungsspule rasch in den gesättigten Zustand zu treiben;
- wenn die Sättigungsspule gesättigt ist, Verringern der an die gesättigte Drossel angelegten Spannung auf ein niedrigeres Niveau und weiteres Erhöhen des Stroms.

[0028] Somit ist diese Anfangsspannung höher als die Spannung, die gemäss dem für die Übertragung von Energie durch den Wandler ausgelegten normalen Modulationsverfahren verwendet wird, um den Strom zu treiben. Die Anfangsspannung ist eine relativ hohe Spannung und kann eine sein von:

- der Summe der Spannungen, die durch aktive Brücken an die Primär- und Sekundärseite des Wandlers angelegt werden;
- der vollen Spannung aus der aktiven Brücke an der Primärseite des Wandlers;
- die volle Spannung aus der aktiven Brücke an der Sekundärseite des Wandlers.

[0029] Weitere Ausführungsformen sind aus den abhängigen Patentansprüchen ersichtlich. Merkmale der Verfahrensansprüche können mit Merkmalen der Vorrichtungsansprüche und umgekehrt kombiniert werden.

[0030] Der Erfindungsgegenstand der Erfindung wird detaillierter in dem nachstehenden Text unter Bezugnahme auf beispielhaften Ausführungsformen beschrieben, welche in den beigefügten Zeichnungen veranschaulicht sind, und darstellen in:

- Fig. 1a eine erste Ausführungsform der Erfindung. Zwei aktive Brücken, in diesem Falle mit einer Sternpunktgeklemmten Struktur aufgebaut, die durch einen Transformator, eine Hauptspule und eine Sättigungsspule gekoppelt sind;
- Fig. 1b–1c Wellenformen, die dem Betrieb des Wandlers entsprechen, der Nullstromschalten von einer der aktiven Brücken durch Verwendung der Sättigungsspule erreicht. Die Wellenformen sind für den Antriebs- bzw. Gleichrichtungsbetrieb dargestellt;
- Fig. 2a eine Ausführungsform der Erfindung in einem Resonanzwandler. Die zwei aktiven Brücken sind über einen Transformator in Reihe mit einem Resonanzkondensator und einer Resonanzspule und der Sättigungsspule verbunden;

Fig. 2b–2c Wellenformen für den Betrieb des Resonanzwandlers unter Nullstromschalten. Die Schaltverluste werden in beiden aktiven Brücken reduziert. Die Wellenformen sind für Energie in beiden Richtungen angezeigt.

[0031] Im Prinzip sind identische Teile mit denselben Bezugszeichen in den Figuren versehen.

[0032] Fig. 1a stellt einen zur Nullstrom-Schaltverlustreduzierung verwendeten ersten Schaltkreis dar. Hier wird ein Spannungen U_1 und U_2 verbindender DC/DC-Wandler dargestellt. Dieser Wandler weist eine erste aktive Brücke 1 und eine zweite aktive Brücke 2 auf, die über einen AC-Zwischenkreis 21 gekoppelt sind, welche einen Transformator 3, eine Hauptspule 4 und eine Sättigungsspule 5 aufweist. In diesem Beispiel basieren die aktiven Brücken 1, 2 auf einer sternpunktgeklemmten Drei-Ebenen-Topologie. Diese aktiven Brücken könnten jedoch auch mit anderen von den bekannten aktiven Brückenstrukturen aufgebaut sein, die bei isolierter DC/DC-Wandlung verwendet werden. Die aktiven Brücken 1, 2 legen Spannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ an ihre entsprechenden Ausgänge an, womit die an die Hauptspule 4 und die Sättigungsspule 5 angelegte Spannung durch die Differenz $u_1(t) - u_2'(t)$ gegeben ist, wobei diese letztere Spannung $u_2'(t)$ der an die zweite aktive Brücke 2 angelegten und auf die Primärseite des Transformators transformierten Spannung $u_2(t)$ entspricht (wobei «Primär» als die Seite definiert ist, auf welcher die Haupt- und die Sättigungsspule 3, 4 in Fig. 1a angeschlossen sind). In der vorliegenden Ausführungsform bilden die Hauptspule 4 und die Sättigungsspule 5 und die Primärwicklung des Transformators 3 eine Reihenschaltung. In weiteren nicht dargestellten Ausführungsformen sind die Hauptspule 4 oder die Sättigungsspule 5 oder beide an einer anderen Position in der Reihenschaltung mit der Primärwicklung oder in einer Reihenschaltung mit der Sekundärwicklung auf der Sekundärseite des Transformators 3 angeordnet.

[0033] In allen Ausführungsformen kann die Hauptspule 4 entweder ein diskretes Element sein oder kann Teil des Transformators 3 beispielsweise auf der Basis einer Streuinduktivität des Transformators 3 sein. Die aktiven Schalter 6, 8 sind mit antiparallelen Dioden 7, 9 verbunden.

[0034] Eine Steuereinheit 22 ist vorgesehen. Sie ist so ausgelegt oder programmiert, dass sie die aktiven Schalter 6, 8 des Wandlers steuernde Signale erzeugt und dadurch den Energiefluss durch den Wandler steuert. Die Steuereinheit 22 kann dafür ausgelegt sein, ein Modulationsverfahren mit Nullstromschalten zu implementieren, indem durch die Sättigungsspule bewirkte Effekte berücksichtigt werden.

[0035] Die Spannungsdifferenz $u_1(t) - u_2'(t)$ definiert die Form des Stroms $i_1(t)$ durch den Transformator durch Einstellen der Arbeitszyklen und der Phasenverschiebung zwischen den aktiven Brücken. Durch Auswählen des korrekten Wicklungsverhältnisses n und durch Einstellen von Steuervariablen des Modulationsverfahrens kann der Transformatorstrom $i_1(t)$ geformt werden, um das gewünschte Nullstromschaltverhalten der Halbleiterbauelemente der ersten aktiven Brücke 1 zu erreichen.

[0036] Das Modulationsverfahren, das Nullstromschalten mit reduzierten Schaltverlusten ermöglicht, ist in Fig. 1b für einen Transfer von Energie von der ersten aktiven Brücke 1 an die zweite aktive Brücke 2 dargestellt. Zum Beginn des Schaltzyklus, zum Startzeitpunkt 10, legt die erste aktive Brücke 1 $+U_1/2$ an, während die zweite aktive Brücke 2 $-U_2/2$ an ihren Ausgang anlegt, womit die an die Spulen angelegte Spannung $U_1/2 + n \cdot U_2/2$ ist, und der Strom durch den Transformator eine positive Steigung hat. Zu einem ersten Zeitpunkt 11, wenn die Sättigungsspule ihren Sättigungsstrom erreicht, wird die zweite aktive Brücke auf Freilauf umgeschaltet, mit einer Spannung von null an ihren Ausgang. Nach dieser Zeit ist die Induktivität der Sättigungsspule vernachlässigbar, wodurch demzufolge die Stromsteigung in dem Transformator 3 nun durch die Hauptspule 4 und die angelegte Spannung definiert ist, welche $+U_1/2$ ist, bis ein zweiter Zeitpunkt 12 erreicht wird. Zu dieser Zeit wird die zweite aktive Brücke 2 geschaltet und ihr Ausgang legt nun $+U_2/2$ an ihren Ausgang an. Die Spannung in der Hauptspule und der Sättigungsspule ist $U_1/2 - n \cdot U_2/2$, was bedeutet, dass eine vergleichsweise kleine Spannung an diese Spulen angelegt ist, was zu einem langsam absinkenden Strom durch den Transformator 3 führt. Während dieses Intervalls wird Energie von der ersten aktiven Brücke 1 an die zweite aktive Brücke 2 übertragen. Zu einem dritten Zeitpunkt 13 erreicht der Transformatorstrom den Sättigungspegel der Sättigungsspule 5, was bedeutet, dass die Induktivität der Sättigungsspule 5 ihren ungesättigten Wert erreicht hat. Dieses verringert die Steigung des Stroms durch den Transformator 3 und demzufolge durch die Halbleiterbauelemente, die sich somit für einen erheblichen Anteil der Schaltperiode auf einem niedrigen Wert befinden. Die erste aktive Brücke 1 wird zu einem vierten Zeitpunkt 14 auf Freilauf gestellt, wodurch ein Quasi-Nullstromschalten erreicht wird. Nach diesem vierten Zeitpunkt 14 ist eine Spannung $-n \cdot U_2/2$ an die Hauptspule und an die Sättigungsspule angelegt. Der halbe Schaltzyklus endet zu einem fünften Zeitpunkt 15, da der Strom $i_1(t)$ durch den Transformator null erreicht, und der analoge Prozess für den negativen Halbzyklus beginnt.

[0037] Es sei erwähnt, dass durch die Verwendung der Sättigungsspule der durch die erste aktive Brücke 1 ausgeschaltete Strom nicht genau null ist, und dieses somit oft als Quasi-Nullschalten bezeichnet wird. Um für den Betrieb mit der Sättigungsspule die Schaltverluste zu reduzieren, reicht es jedoch aus, dass der Strom für einen erheblichen Zeitanteil vor seiner Schaltung niedrig ist, ohne notwendigerweise ein Schalten nur dann zu erreichen, wenn der Strom genau null ist. Daher wird in der vorliegenden Beschreibung der Begriff «Nullstromschalten» so verwendet, dass er auch das Quasi-Nullstromschalten mit umfasst.

[0038] In dem vorstehend beschriebenen Halbzyklus schaltet die erste aktive Brücke 1 aktive Schalter 6, 8 von einem Zweig der ersten Halbbrücke 1 ein, um $+U_1/2$ bis zu dem vierten Zeitpunkt 14 anzulegen. Demzufolge würden diese aktiven Schalter 6, 8 Schaltverluste erzeugen, wenn sie ihre Blockierungszustände an dem vierten Zeitpunkt 14 bzw. dem

fünften Zeitpunkt 15 erreichen. Mit Hilfe der Sättigungsspule 5 wird der Strom durch diese aktiven Schalter 6, 8 für einen erheblichen Anteil des Schaltzyklus niedrig gehalten, bevor ihre Blockierungszustände erreicht werden. Dieses ermöglicht den aktiven Schaltern 6, 8 eine höhere interne Trägerrekombination zu erreichen, was die Notwendigkeit erübrigt, diese Ladungsträger extern zu beseitigen, und somit den Energieverlust während dieses Übergangs reduziert.

[0039] Die Länge des Intervalls zwischen den dritten und vierten Zeitpunkten 13, 14, d.h., die Zeit, während welcher die Sättigungsspule entsättigt wird, bevor der Strom null wird (und ein Schaltvorgang bewirkt wird), ist durch den Sättigungsstrom und den ungesättigten Induktivitätswert der Sättigungsspule bestimmt. Es ist daher möglich, dieses Zeitintervall anzupassen, um eine sehr hohe Trägerrekombination und somit vernachlässigbare Schaltverluste in den aktiven Schaltern zu erzielen. In einer Ausführungsform liegt die Länge dieses Intervalls zwischen der Hälfte und dem Doppelten oder dem Vierfachen der Zeitkonstante des Rekombinationsprozesses. Jedoch ist, solange die Sättigungsspule 5 ungesättigt ist, die übertragene Energie ziemlich niedrig. Dieses bedeutet, dass, je länger die für die Rekombination vorgesehene Zeit ist, der Spitzenstrom durch den Transformator 3 für die nominelle übertragene Energie umso höher wird, und somit die Leitungsverluste in der Schaltung und die Schaltverluste in der zweiten aktiven Brücke 2 erhöht. Um den Spitzenwert dieses Transformatorstroms zu reduzieren, kann die Sättigungsspule 5 zu Beginn des Schaltzyklus rasch in Sättigung gebracht werden, indem die Summe der Ausgangsspannung der aktiven Brücken, $U_1/2 + n \cdot U_2/2$ angelegt wird, bis die Sättigungsspule 5 gesättigt ist. Diese hohe Spannung erhöht die Steigung des Stroms durch den Transformator 3, und somit wird der Sättigungsstrom in der Sättigungsspule 5 rasch erreicht. Das Ergebnis ist eine moderate Zunahme in dem erforderlichen Spitzenstrom durch den Transformator 3, während gleichzeitig eine lange Rekombinationszeit in den aktiven Schaltern der ersten aktiven Brücke 1 erreicht wird.

[0040] Der Betrieb mit in umgekehrter Richtung fließender Energie (Energiefluss von der zweiten aktiven Brücke 2 in die erste aktive Brücke 1) wird mit Fig. 1c beschrieben. Der Schaltzyklus beginnt zum Startzeitpunkt 10 mit der ersten Brücke 1, die Nullspannung an ihren Ausgang anlegt, und der zweiten aktiven Brücke 2, die $+U_2/2$ an ihren Ausgang anlegt. Dieses bedeutet, dass der Strom $i_1(t)$ durch den Transformator 3 negativ ist und abnimmt, und somit die Dioden 7, 9 in einem oberen Zweig der ersten aktiven Brücke leitend sind. Zu einem ersten Zeitpunkt 11 sättigt die Sättigungsspule, und an diesem selben Zeitpunkt wird die erste aktive Brücke 1 geschaltet, um $+U_1/2$ an ihren Ausgang anzulegen; die an die Sättigungsspule und die Hauptspule 4, 5 angelegte Spannung ist nun $+U_1/2 - n \cdot U_2/2$. Die Induktivität der Sättigungsspule 5 fällt auf einen vernachlässigbaren Wert, womit die Stromsteigerung durch den Transformator 3 nun durch die Hauptspule 4 und die angelegte Spannung definiert ist. Der Transformatorspitzenstrom wird zu einem zweiten Zeitpunkt 12 erreicht, wenn die zweite aktive Brücke 2 auf Freilauf geschaltet wird, mit einer Spannung von null an ihren Ausgang. Die Spannung an der Hauptspule und der Sättigungsspule 4, 5 ist nun $+U_1/2$, so dass der Strom des Transformators 3 ansteigt. Der Sättigungsstrom wird zu einem dritten Zeitpunkt 13 erreicht, wenn die Induktivität der Sättigungsspule 5 auf ihren ungesättigten Wert ansteigt, und somit die Steigung des Transformatorstroms reduziert wird, und sich für einen erheblichen Anteil der Schaltperiode auf einem niedrigen Wert befindet. Zu einem vierten Zeitpunkt 14 wird die erste aktive Brücke 1 auf Freilauf umgeschaltet, was Schaltverluste in einer ersten Diode 7 erzeugt. Der erste Halbzyklus endet zu einem fünften Zeitpunkt, 15 und der analoge Prozess für den negativen Halbzyklus beginnt.

[0041] Da der Strom durch den Transformator 3 in dem vorstehend beschriebenen Halbzyklus negativ ist, beginnen die Dioden 7, 9 in dem oberen Zweig der ersten aktiven Brücke 1 während dieses Zeitintervalls zu leiten. Die Sättigungsspule 5 hält den Transformatorstrom auf einem niedrigen Wert, bevor die Dioden 7, 9 bei den vierten bzw. fünften Zeitpunkten 14, 15 in den Blockierungszustand eintreten, was es den Dioden 7, 9 ermöglicht, eine höhere interne Rekombination zu erreichen. Die für die Rekombination bereitgestellte Zeit kann in diesem Falle vergleichsweise kürzer als in dem in Fig. 1b beschriebenen Betrieb sein. Dieses beruht auf der an der Hauptspule und der Sättigungsspule 4, 5 während des Intervalls zwischen den Zeitpunkten 12 und 14 angelegten höheren Spannung.

[0042] Normalerweise (ohne die Sättigungsspule) würde bei diesem Modulationsverfahren der Schaltzyklus damit starten, dass beide Brücken Spannung an ihre Ausgänge (zu dem Startzeitpunkt 10) anlegen, und somit nur die Differenz $+U_1/2 - n \cdot U_2/2$ an die Hauptspule und Sättigungsspule zwischen der Startzeit und dem zweiten Zeitpunkt 10, 12 angelegt wird. In der Topologie mit der Sättigungsspule 5 würde dieses jedoch eine extrem lange Zeit mit der Sättigungsspule 5 ausserhalb der Sättigung bewirken und daher eine lange Dauer mit sehr geringer Energieübertragung an dem Beginn des Schaltzyklus, was zu einem sehr hohen Spitzenstrom durch den Transformator 3 führt. Um dieses Problem zu vermeiden, bleibt die erste aktive Brücke 1 am Beginn des Schaltzyklus solange im Freilauf, wie die Sättigungsspule ungesättigt ist, und reduziert somit den erforderlichen Transformatorspitzenstrom. Sobald der Kern sättigt, wird die erste aktive Brücke geschaltet, und ihre Ausgangsspannung ist $+U_1/2$, so dass Energie aus der zweiten aktiven Brücke 2 an die erste aktive Brücke 1 übertragen wird.

[0043] Die Erfindung kann auch in Topologien angewendet werden, die passiv ein Nullstromschaltverhalten erzielen. Dieses ist beispielsweise bei einer bei Resonanzfrequenz betriebenen Resonanztopologie der Fall, welche in Fig. 2a dargestellt ist. Hier übertragen die aktiven Brücken 1, 2 Energie von/an DC-Busse, deren Spannungen U_1 bzw. U_2 sind. Diese aktiven Brücken sind über den Transformator 3, die Sättigungsspule 5 und einen Schwingkreis 16 gekoppelt, wobei dieser Letztere beispielsweise eine Resonanzspule 17 und einen Resonanzkondensator 18 aufweist. Die aktiven Brücken 1, 2 legen Spannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ an ihre entsprechenden Ausgänge an, womit die an den Schwingkreis 16 und die Sättigungsspule 5 angelegte Spannung durch die Differenz $u_1(t) - u_2(t)$ gegeben ist. Die Spannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ sind durch die Arbeitszyklen der aktiven Brücken 1, 2 plus der Phasenverschiebung zwischen diesen definiert. Mittels einer diese

Steuervariablen einstellenden Steuereinheit 22 wird der Strom durch den Transformator geformt, dass er die gewünschte Energiemenge überträgt. Wie in der vorstehenden Ausführungsform können ein oder mehrere mit der Primärwicklung des Transformators 3 in Reihe geschaltete Elemente auch in einer Reihenanordnung zu der Sekundärwicklung platziert werden.

[0044] Die Spannungs- und Stromwellenformen an dem Transformator sind in Fig. 2b für von der ersten aktiven Brücke 1 an die zweite aktive Brücke übertragenen Energien dargestellt. Der Schaltzyklus beginnt zum Startzeitpunkt 10 damit, dass die erste aktive Brücke eine Spannung $+U_1/2$ an ihren Ausgang anlegt, während die zweite aktive Brücke 2 im Freilauf gehalten wird und somit Nullspannung an ihren Ausgang anlegt. Zu dem ersten Zeitpunkt 11 sättigt die Sättigungsspule, und – idealerweise genau – zu diesem Zeitpunkt wird die zweite aktive Brücke 2 geschaltet, um $+U_2/2$ an ihren Ausgang anzulegen, und daher ist die an den Schwingkreis 16 und die Sättigungsspule 5 angelegte Spannung gleich $+U_1/2 - n \cdot U_2/2$, welche positiv sein muss, um die Energieübertragung von der ersten aktiven Brücke 1 auf die zweite aktive Brücke zu ermöglichen. Der Transformatorstrom steigt mit einer durch die Resonanzfrequenz, die charakteristische Impedanz des Schwingkreises 16 und die Grösse der Differenz $+U_1/2 - n \cdot U_2/2$ definierten sinusartigen Form an. Zu dem dritten Zeitpunkt 13 wird der Sättigungsstrom erreicht, und die Sättigungsspule wird entsättigt, was die Resonanzfrequenz verringert und die charakteristische Impedanz des Schwingkreises 16 in Kombination mit der Sättigungsspule 5 erhöht. Zu dem vierten Zeitpunkt 14 werden die aktiven Brücken 1, 2 auf null geschaltet und verbleiben in diesem Zustand, bis die halbe Schaltperiode zum Zeitpunkt 15 erreicht ist und ein negativer Halbzyklus gestartet wird.

[0045] Bei den vorstehend beschriebenen Wellenformen leiten die aktiven Schalter 6, 8 den Strom in der ersten Brücke 1, während weitere Dioden 19, 20 in der zweiten aktiven Brücke 2 leiten. Wenn der Arbeitszyklus bei den aktiven Brücken 1, 2 an dem dritten Zeitpunkt 13 verstrichen ist, ist eine höhere interne Trägerrekombination in den zuvor leitenden Halbleiterbauelementen der aktiven Brücken 1, 2 durch den Einschluss der Sättigungsspule erreicht, was schliesslich zu reduzierten Nullstromschaltverlusten in den aktiven Brücken 1, 2 führt.

[0046] Die Verwendung der Sättigungsspule 5 führt jedoch Zeitintervalle ein, in welchen der Transformator 3 aufgrund der hohen charakteristischen Impedanz des Schwingkreises 16 bei niedrigen Werten bleibt. Da die zu übertragende erforderliche Energie unverändert bleibt, muss die Amplitude des Stroms durch den Transformator 3 entweder durch Erhöhen der angelegten Spannung $+U_1/2 - n \cdot U_2/2$ oder durch Verringerung der charakteristischen Impedanz des Schwingkreises 16 erhöht werden. Demzufolge werden die Leitungsverluste in den Halbleiterbauelementen und in dem Transformator in Bezug auf den Betrieb ohne die Sättigungsspule 5 erhöht. Um den Einfluss dieser erhöhten Transformatorstromamplitude zu minimieren, wird die zweite aktive Brücke 2 für eine kurze Zeit zwischen dem Startzeitpunkt 10 und dem ersten Zeitpunkt 11 am Beginn des Schaltzyklus im Freilauf gehalten, während die erste aktive Brücke 1 $+U_1/2$ anlegt. Während dieser kurzen Zeit ist die Steigung in dem Strom durch den Transformator hoch, was bedeutet, dass der Sättigungsstrom rasch erreicht wird. Die Folge ist ein moderater Anstieg des Transformatorspitzenstroms und daher ein moderater Anstieg in den Leitungsverlusten durch die Halbleiterbauelemente und den Transformator.

[0047] Um eine Energieübertragung von der zweiten aktiven Brücke 2 an die erste aktive Brücke 1 zu erreichen, muss die an den Schwingkreis 16 und die Sättigungsspule 5 zwischen den Zeitpunkten 9 und 13 angelegte Spannung negativ sein, was einen Stromfluss in der umgekehrten Richtung wie der vorstehend in Verbindung mit Fig. 2c beschriebene ermöglicht. Die Auswirkung der Reduzierung der Nullstromschaltverluste durch Implementieren der Sättigungsspule 5 mit einem modifizierten Modulationsverfahren in der Resonanztopologie bleibt für diesen Betriebsmodus unverändert.

Bezugszeichenliste

[0048]

- 1 aktive Brücke 1
- 2 aktive Brücke 2
- 3 Transformator
- 4 Hauptspule
- 5 Sättigungsspule
- 6 erster aktiver Schalter der aktiven Brücke 1
- 7 erste Diode der Brücke 1
- 8 zweiter aktiver Schalter der aktiven Brücke 1
- 9 zweite Diode der aktiven Brücke 1
- 10 Beginn der Schaltperiode
- 11 Zeitpunkt, an welchem der Strom der Sättigungsspule den Sättigungspegel erreicht

- 12 Schaltmoment in der aktiven Brücke 2
- 13 Zeitpunkt, an welchem die Sättigungsspule entsättigt ist
- 14 Schaltmoment in der aktiven Brücke
- 15 Ende eines Halbzyklus
- 16 Schwingkreis
- 17 Resonanzspule
- 18 Resonanzkondensator
- 19 erste Diode der aktiven Brücke 2
- 20 zweite Diode der aktiven Brücke 2
- 21 AC-Zwischenkreis
- 22 Steuereinheit

Patentansprüche

1. Elektrischer Wandler mit wenigstens einer aktiven Brücke (1, 2), die elektrisch mit einem AC-Zwischenkreis (21) verbunden ist, wobei die wenigstens eine aktive Brücke (1) wenigstens einen aktiven Halbleiterschalter (6, 8) aufweist, mittels welchem die wenigstens eine aktive Brücke (1) in unterschiedliche Schaltkonfigurationen gebracht werden kann, um dadurch unterschiedliche Spannungen an die Primäranschlüsse des AC-Zwischenkreises (21) anzulegen, wobei der AC-Zwischenkreis (21) einen Transformator (3) mit wenigstens einer mit den Primäranschlüssen verbundenen Primärwicklung und wenigstens einer Sekundärwicklung aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass der AC-Zwischenkreis (21) ferner eine Hauptspule (4) in einer Reihenschaltung zu der Primär- oder der Sekundärwicklung und eine Sättigungsspule (5) in einer Reihenschaltung zu der Primär- oder der Sekundärwicklung aufweist.
2. Elektrischer Wandler nach Anspruch 1, mit einer Steuereinheit (22), die dafür konfiguriert ist, den wenigstens einen aktiven Halbleiterschalter (6, 8) der wenigstens einen aktiven Brücke (1, 2) zu steuern, um einen Fluss elektrischer Energie über den AC-Zwischenkreis zu erzielen und um Nullstromschalten in der wenigstens einen aktiven Brücke (1, 2) zu implementieren.
3. Elektrischer Wandler nach Anspruch 2, wobei der AC-Zwischenkreis (21) einen Schwingkreis (16) aufweist und die Steuereinheit (22) dafür konfiguriert ist, den Wandler als Resonanzwandler zu betreiben.
4. Elektrischer Wandler nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Stromwert, bei welchem die Sättigungsspule (5) sättigt, wenigstens 20-mal kleiner als der Spitzenstrom ist, der in der Primärwicklung zur maximalen Energieübertragung während des Betriebs des Wandlers verwendet wird.
5. Elektrischer Wandler nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Induktivitätswert der Sättigungsspule (5) in ihrem ungesättigten Zustand wenigstens 5-mal grösser als der Induktivitätswert der Hauptspule (4) ist.
6. Verfahren zum Betreiben des elektrischen Wandlers nach einem der Ansprüche 2 bis 5, mit den Schritten:
 - Steuern, durch Schalten aktiver Halbleiterschalter des elektrischen Wandlers, des Absolutwertes wenigstens eines Stroms durch den Transformator (3) so, dass er zuerst ansteigt und dann abnimmt, während sich die Sättigungsspule (5) in einem gesättigten Zustand befindet;
 - wenn sich der Strom null annähert, Verringern der Steigung, mit welcher sich der Strom null annähert, mittels der den gesättigten Zustand verlassenden Sättigungsspule (5), um dadurch den Induktivitätswert der Sättigungsspule (5) zu erhöhen.
7. Verfahren nach Anspruch 6, in welchem, wenn elektrische Energie von der wenigstens einen aktiven Brücke (1, 2) in den Transformator (3) fließt, die folgenden Schritte ausgeführt werden:
 - Steuern des Wandlers, um Nullstromschalten in der wenigstens einen aktiven Brücke (1, 2) zu implementieren, indem die Steigung verringert wird, mit welcher sich der Strom null annähert, was Schaltverluste in den aktiven Schaltern (6, 8) der wenigstens einen aktiven Brücke (1, 2) verringert.
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder Anspruch 7, in welchem, wenn elektrische Energie von dem Transformator (3) in die wenigstens eine aktive Brücke (1, 2) fließt, die folgenden Schritte ausgeführt werden:
 - Steuern des Wandlers, um Nullstromschalten in der wenigstens einen aktiven Brücke (1, 2) zu implementieren, indem die Steigung verringert wird, mit welcher sich der Strom null annähert, was Schaltverluste in antiparallelen Dioden (7, 9) der aktiven Schalter (6, 8) der wenigstens einen aktiven Brücke (1, 2) verringert.

CH 705 817 B1

9. Verfahren nach Anspruch 6, wobei der elektrische Wandler ein Resonanzwandler ist, mit den Schritten:
 - Steuern des Wandlers, um Nullstromschalten in der wenigstens einen aktiven Brücke (1, 2) zu implementieren, indem die Steigung verringert wird, mit welcher sich der Strom null annähert, was Schaltverluste in aktiven Schaltern (6, 8) und in entsprechenden antiparallelen Dioden (7, 9) reduziert.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, in welchem, nachdem ein Strom durch die Sättigungsspule (5) null war und die Sättigungsspule (5) nicht mehr gesättigt ist, die folgenden Schritte ausgeführt werden:
 - Anlegen einer Anfangsspannung an die Sättigungsspule (5), um die Sättigungsspule (5) rasch in den gesättigten Zustand zu treiben;
 - wenn die Sättigungsspule (5) gesättigt ist, Reduzieren der an die Sättigungsspule (5) angelegten Spannung auf einen niedrigeren Wert und weiteres Erhöhen des Stroms durch die Sättigungsspule (5).

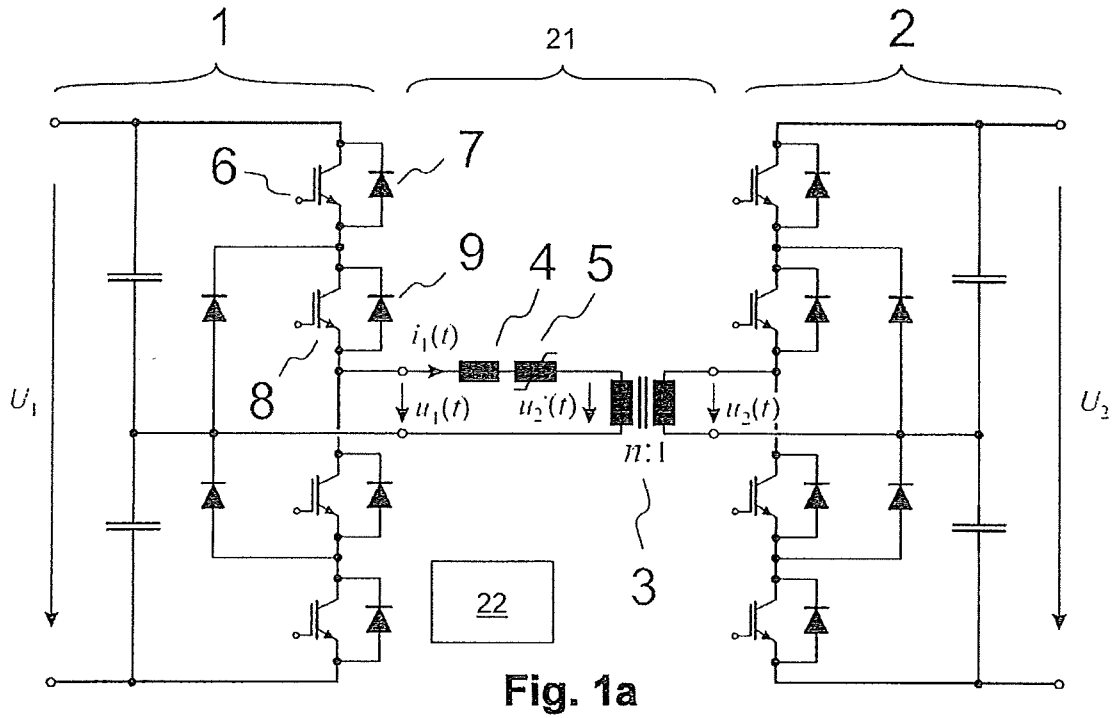


Fig. 1a

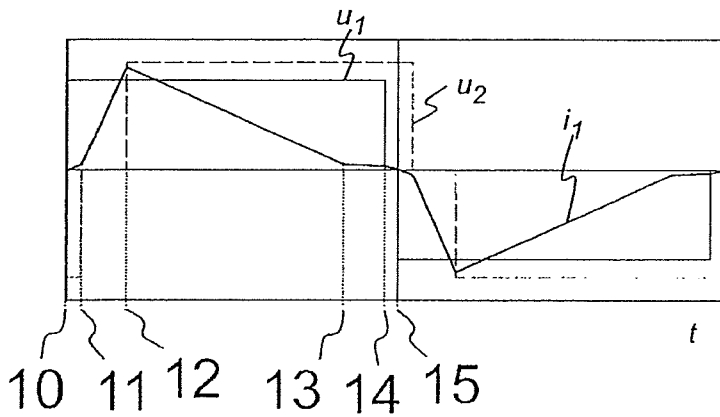


Fig. 1b

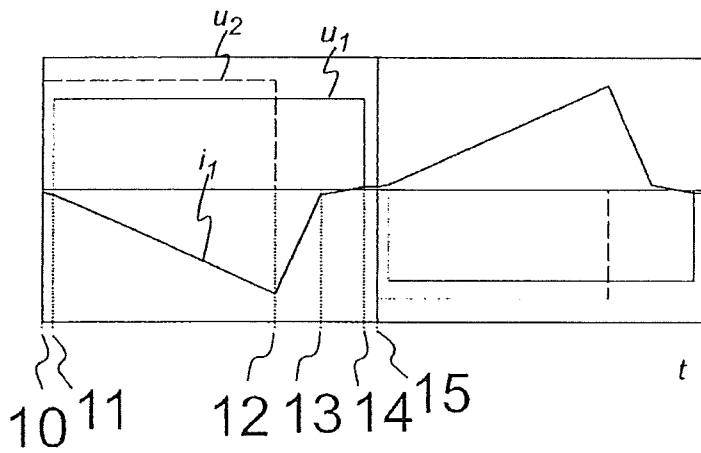


Fig. 1c

