

SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft  
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 707 553 B1

(51) Int. Cl.: H02M 3/325 (2006.01)  
G06F 17/17 (2006.01)

**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

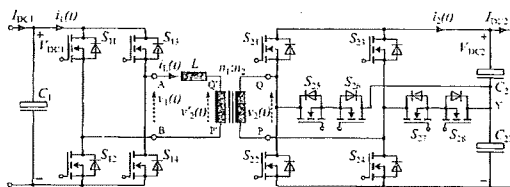
(12) PATENTSCHRIFT

<p>(21) Anmeldenummer: 00402/13</p>	<p>(73) Inhaber: ETH Zürich ETH Transfer, HG E 47-49 Rämistrasse 101 8092 Zürich ETH-Zentrum (CH)</p>
<p>(22) Anmeldedatum: 04.02.2013</p>	
<p>(43) Anmeldung veröffentlicht: 15.08.2014</p>	<p>(72) Erfinder: Jordi Everts, 3640 Kinrooi (BE) Johann Walter Kolar, 8044 Zürich (CH)</p>
<p>(24) Patent erteilt: 14.07.2017</p>	
<p>(45) Patentschrift veröffentlicht: 14.07.2017</p>	<p>(74) Vertreter: Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach 1771 8032 Zürich (CH)</p>

(54) Elektrischer Leistungswandler zur DC/DC-Wandlung mit dualen aktiven Brücken.

(57) Die Erfindung betrifft einen elektrischen DC/DC-Wandler mit dualen aktiven Brücken und ein Verfahren zum Bestimmen eines Steuerverfahrens zur Steuerung von aktiven Schaltelementen in einem solchen Wandler.

Ein dualer aktiver Brückenrichter weist eine erste Brückenschaltung ( $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}$ ) zur Wandlung einer ersten Gleichspannung in eine erste Wechselspannung  $v_1(t)$  und eine zweite Brückenschaltung ( $S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{25}, S_{26}, S_{27}, S_{28}$ ) zur Wandlung einer zweiten Gleichspannung in eine zweite Wechselspannung  $v_2(t)$  auf. Die beiden Wechselspannungen liegen an einem Wechselspannungszwischenkreis an, und die beiden Brückenschaltungen weisen gesteuerte Schaltelemente auf. Dabei ist mindestens eine der beiden Brückenschaltungen eine mehrstufige Brückenschaltung ( $S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{25}, S_{26}, S_{27}, S_{28}$ ), mit welcher die entsprechende Wechselspannung aus aufeinanderfolgenden Abschnitten mit jeweils gleich bleibender Spannung erzeugbar ist, wobei mindestens fünf unterschiedlich hohe Gleichspannungen an die entsprechende Seite (Q, P) des Wechselspannungszwischenkreises anlegbar sind.



## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen elektrischen DC/DC-Wandler mit dualen aktiven Brücken, ein Verfahren zum Bestimmen eines Steuerverfahrens zur Steuerung von aktiven Schaltelementen in einem solchen Wandler.

### Duale aktive Brückenwandler

[0002] Die Erfindung bezieht sich auf einen Wandler, welcher eine Gleichspannungsleistung auf der einen Seite des Wandlers in eine geregelte oder gesteuerte Gleichspannungsleistung auf der anderen Seite des Wandlers bei einer vorgegebenen Spannungs- und/oder Stromstufe umwandelt. Eine Eingangsbrücke des DC/DC-Wandlers weist eine Eingangsbrückenschaltung zur Wandlung der Eingangsgleichspannung in eine Wechselspannung  $v_1(t)$  auf. Diese Wechselspannung ist einem hochfrequenten Wechselspannungskreis zugeführt, welcher einen Transformator und optional eine externe serielle Induktivität aufweist. Eine Ausgangswechselspannung  $v_2(t)$  des Wechselspannungszwischenkreises ist einer Ausgangsbrückenschaltung zugeführt, welche zum Gleichrichten der Ausgangswechselspannung  $v_1(t)$  und zum geregelten Speisen einer Last angeordnet ist. Die Eingangs- wie auch die Ausgangsbrückenschaltung weisen aktive (Gate-)gesteuerte Schaltelemente mit oder ohne passiv gesteuerten Dioden auf und können mit «Soft-Switching» zur Reduktion von Schaltverlusten gesteuert sein. Die aktiven Brücken können geregelt sein, um einen vorgegebenen Eingangsgleichstrom und/oder Ausgangsgleichstrom zu erreichen (im Folgenden  $I_{DC1}$  und  $I_{DC2}$ ), um die Ausgangsspannung an der Last zu halten. Ein solcher Wandler wird als «Dualer aktiver Brückenwandler» bezeichnet, kurz DAB-Wandler («Dual Active Bridge Converter», «DAB Converter»).

[0003] Bei der herkömmlichen Realisierung von DAB-Wandlern (Fig. 1–4) sind die Schaltelemente der aktiven Brücke (Eingangs- und Ausgangsseite) entweder mit einer Halbbrückenkonfiguration (Fig. 1), einer Vollbrückenkonfiguration (Fig. 4) oder einer Kombination aus Vollbrückenkonfiguration und Halbbrückenkonfiguration (Fig. 2, 3) verbunden. Des Weiteren wird bei allen Realisierungen das Schalten von Schaltelementen in Eingangs- und Ausgangsbrücken so gesteuert, dass Rechteckspannungen mit resonanten Übergängen ( $v_1(t)$  und  $v_2(t)$ ) an den Anschlüssen Knoten A, B, Q, P der hochfrequenten Wechselspannungszwischenkreise entstehen, diese werden im Weiteren als Quasirechteckspannungen bezeichnet. Dabei nimmt man an, dass die Übergangsdauer deutlich kürzer ist als die Periode der Quasirechteckspannung. Im Idealfall einer unendlich grossen magnetischen Induktivität des Transformators und eines Nullwiderstandes des Wechselspannungszwischenkreises kann der Wechselspannungszwischenkreis als eine äquivalente serielle Induktivität  $L_{eq}$  dargestellt werden, bei welcher die an die Induktivität angelegten Spannungen die Anschlussspannungen des Zwischenkreises sind, welche auf die eine oder die andere Seite des Transformators bezogen sind (z.B.  $v_1(t)$  und  $v_L'(t) = * n_1/n_2$ , wenn sie auf die Eingangsseite bezogen sind, siehe Fig. 5). Der Wert der äquivalenten Induktivität wird durch die Streuinduktivität des Transformators und im Falle einer zusätzlichen externen seriellen Induktivität durch den Wert der externen Induktivität bestimmt. Der Wechselstrom  $i_L(t)$  im Zwischenkreis wird durch die entsprechende Spannung  $v_L(t) = v_1(t) - v_2(t)$  über die äquivalente serielle Induktivität  $L_{eq}$  und ihren Induktivitätswert bestimmt (Fig. 5). Sowohl die aktive Eingangsbrücke als auch die aktive Ausgangsbrücke wirken auf ihrer Gleichspannungsseite als AC/DC-Wandler, wobei der Wechselspannungszwischenkreisstrom auf der jeweiligen Seite in Nettogleichströme umgewandelt werden. Der hochfrequente Anteil dieser Ströme kann mit Hilfe von Hochfrequenz-Filterkapazitäten  $C_{1x}$  and  $C_{2x}$ , gefiltert werden, wodurch die Glättung der Gleichströme  $I_{DC1}$  und  $I_{DC2}$  und Gleichspannungen  $V_{DC1}$  und  $V_{DC2}$  verbessert wird. Durch geeignete Modulation der Quasirechteckspannungen  $v_1(t)$  und  $v_2(t)$ , welche mit Hilfe der aktiven Brücken auf die Anschlüsse A, B, Q, P des Zwischenkreises angelegt werden, können die Stromwerte  $I_{DC1}$  und  $I_{DC2}$  gesteuert werden.

### Regelziele und Grenzen für DAB-Wandler gemäss dem Stand der Technik

[0004] Die wissenschaftlichen Bemühungen konzentrierten sich hauptsächlich auf die Entwicklung von Strategien zum Erreichen eines vorgegebenen Eingangsgleichstroms und/oder Ausgangsgleichstroms und auf die möglichst effiziente Aufrechterhaltung des Ausgangsspannungsniveaus, das auf die Last wirkt. Bei jeder Realisierung der DAB-Wandler können die Betriebsbereiche identifiziert und durch Gleichungen beschrieben werden, welche einen Soft-Switching-Betrieb für alle Geräte in beiden aktiven Brücken ermöglichen (Erklärung von Soft-Switching: siehe unten) mit quasi keinen Schaltverlusten. Meistens versuchen die vorgeschlagenen Strategien, die Spannungen  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  an den Anschlüssen des Zwischenkreises, welche durch die aktiven Brücken erzeugt werden, so zu modulieren, so dass der RMS-Wert des Zwischenkreisstroms minimiert wird, ohne dass die Grenzen des Soft-Switching überschritten werden. Der RMS-Wert ist für die Leitungsverluste des Schaltkreises verantwortlich. Diese Bedingungen sind im ganzen Betriebsbereich des Wandlers zu erfüllen. Jedoch hängt der Umfang, in dem dies erzielt werden kann, von den für die Modulation von  $v_1(t)$  und  $v_2(t)$  verfügbaren Freiheitsgraden ab. Daher besteht auch eine Abhängigkeit von den Freiheitsgraden für die Modulationsspannung, welche über die äquivalente serielle Induktivität  $L_{eq}$  auftritt, und für die Wellenformung des entsprechenden Zwischenkreisstroms  $i_L(t)$ . Die Realisierungen der herkömmlichen DAB-Wandler beinhalten meist Vollbrücken, d.h. die Vollbrücke – Vollbrücken-DAB-Wandler (Fig. 4) bieten die höchste Flexibilität zur Erreichung dieser Ziele. Demzufolge ermöglicht das Hinzufügen von Freiheitsgraden zur Modulation der Spannungen  $v_1(t)$  und  $v_2(t)$  am Zwischenkreis mehr Flexibilität bei der Erreichung der Regel- oder Steuerziele (z.B. minimale RMS-Werte des Wechselspannungszwischenkreisstroms und Soft-Switching-Betrieb). Das Letztere ist besonders wichtig, wenn ein grosser Betriebsspannungsbereich für den Wandler benötigt wird (z.B. ein Gleichspannungseingang im Bereich von 0 V bis 400 V).

**Beschreibung des Soft-Switching-Prinzips (Nullspannungsschaltung/Zero Voltage Switching, ZVS)**

**[0005]** Die aktiven Schaltvorrichtungen des DAB-Wandlers können durch eine Vielzahl von herkömmlich verwendeten Schaltelementen mit Gate-gesteuerter Ausschaltfähigkeit realisiert werden. Ein Beispiel einer im Allgemeinen benutzten Schaltungskomponente für Spannungen bis zu 600 V ist ein Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET, Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) (Fig. 7A). Dadurch kann ein Schaltelement  $S_x$  durch einen Leistungstransistor  $T_x$ , eine Diode  $D_x$  und einen nichtlinearen parasitären Kondensator  $C_x$  dargestellt werden. Soft-Switching-Betrieb eines Brückenzeigs (Fig. 7B) findet statt, wenn ein Wechsel der Drain-to-Source-Spannung ( $v_{DS}$ ) des Transistors durch das Ausschalten des entsprechenden Schalters initiiert wird, beispielsweise des Schalters  $S_{12}$ , wobei der Strom vom Transistor  $T_{12}$  zu der gegenüberliegenden Diode  $D_{11}$  des Brückenzeigs («Bridge Leg», Fig. 7B) kommutiert. Quasi verlustfreies Ausschalten des Transistors  $T_{12}$  wird erreicht, wenn sich der leitende Kanal zwischen Drain- und Source-Anschlüssen des Transistors  $T_{12}$  öffnet, bevor die parasitären Kondensatoren aufgeladen, beziehungsweise entladen, sind und bevor die Spannung zwischen den Drain- und Source-Anschlüssen des Transistors auf ein höheres Niveau angestiegen ist (Zero Voltage Switching, ZVS). Nachdem der leitende Kanal vollständig geöffnet ist, werden die parasitären Kapazitäten weiter durch den Strom  $i_{leg1-2}$ , welcher in den Brückenzeig fliesst, geladen respektive entladen. Sobald dieser kurzzeitige resonante Übergang (Quasi-Resonanz-ZVS) abgeschlossen ist, kann der gegenüberliegende Transistor  $T_{11}$  unter ZVS eingeschaltet werden (die anti-parallele Diode  $D_{11}$  leitet,  $T_{11}$  wird mit ZVS eingeschaltet). Um das Einschalten des Transistors  $T_{11}$  unter Nullspannung zu erreichen, ist es wichtig, dass die Übergangsdauer des resonanten Übergangs kleiner/kürzer ist als die Totzeit des Brückenzeigs. Deshalb wird ein minimaler Kommutierungsstrom über eine gewisse Zeit, genauer gesagt, eine minimale Kommutierungsladung ( $Q_{comm} \geq Q_{comm,min}$ ) benötigt. Diese minimale Kommutierungsladung hängt vom Wert der nichtlinearen parasitären Ausgangskapazitäten  $C_{11}$  und  $C_{12}$  der Halbleiterschalter ab und muss im Brückenzeigstrom  $i_{leg1-2}$  (Fig. 7B) während des Kommutierungsintervalles geliefert werden, um den resonanten Übergang während der Totzeit des Brückenzeigs abzuschliessen.

**[0006]** Es ist Aufgabe der Erfindung, einen verbesserten DAB-Wandler zu schaffen. Diese Aufgabe löst ein DAB-Wandler mit den Merkmalen des ersten Patentanspruchs.

**[0007]** Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren für die Bestimmung eines Verfahrens zum Betreiben von aktiven Brücken eines DAB-Wandlers zu schaffen und insbesondere ein Verfahren zum Betrieb einer elektronischen Datenverarbeitungseinrichtung zur Bestimmung eines Steuerverfahrens zur Ansteuerung eines solchen Brückenumrichters.

**[0008]** Ein solcher dualer aktiver Brückenumrichter weist also eine erste Brückenschaltung zur Wandlung einer ersten Gleichspannung in eine erste Wechselformung  $v_1(t)$ , und eine zweite Brückenschaltung zur Wandlung einer zweiten Gleichspannung in eine zweite Wechselformung  $v_2(t)$ , und einen Wechselformungszwischenkreis mit einem Transformator, wobei die erste Wechselformung einer ersten Seite des Wechselformungszwischenkreises anliegt und die zweite Wechselformung einer zweiten Seite des Wechselformungszwischenkreises anliegt, und wobei sowohl die erste Brückenschaltung als auch die zweite Brückenschaltung gesteuerte Schaltelemente aufweisen. Dabei ist mindestens eine der beiden Brückenschaltungen eine mehrstufige Brückenschaltung, mit welcher die entsprechende Wechselformung aus aufeinanderfolgenden Abschnitten mit jeweils gleich bleibender Spannung erzeugbar ist (typischerweise als unterschiedliche Anteile der entsprechenden Gleichspannung) und dabei mindestens fünf unterschiedlich hohe Gleichspannungen an die entsprechende Seite des Wechselformungszwischenkreises anlegbar sind.

**[0009]** Gemäss einer Ausführungsform sind mit der mehrstufigen Brückenschaltung (respektive den mehrstufigen Brückenschaltungen) jeweils ausgehend von einer Gleichspannung die volle positive und die volle negative Gleichspannung, die halbe positive und die halbe negative Gleichspannung, sowie die Spannung Null an die entsprechende Seite des Wechselformungszwischenkreises anlegbar.

**[0010]** Ein Unterschied zur herkömmlichen Realisierung von DAB-Wandlern liegt somit in den unterschiedlichen Amplituden und Formen der Quasirechteckspannungen  $v_1(t)$  and  $v_2(t)$ , welche von jeder aktiven Brücke erzeugt und an die Anschlüsse des Wechselformungszwischenkreises angelegt werden können. Durch die Verwendung einer Halbbrückenkonfiguration kann eine aktive Brücke eine zweistufige ( $+V_{DC}/2$  Volt,  $-V_{DC}/2$  Volt) Anschlussformung erzeugen, mit einem Tastverhältnis (respektive Einschaltdauer oder «Duty-Cycle») von 50% und mit einer Amplitude gleich der halben Gleichspannung über der entsprechenden Brücke. Durch die Verwendung einer Vollbrückenkonfiguration kann eine aktive Brücke eine dreistufige ( $+V_{DC}$  Volt, Null,  $-V_{DC}$  Volt) Anschlussformung erzeugen, mit einem Tastverhältnis  $\leq 50\%$  und einer Amplitude gleich der Gleichspannung über der entsprechenden Brücke. Insgesamt können also mehrstufige Quasirechteckspannungen erzeugt werden. Daraus folgt, dass die zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade zur Formungsmodulation  $v_L(t)$ , welche über die äquivalente serielle Induktivität wirken, und demzufolge die zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade zur Wellenformung des resultierenden Zwischenkreisstroms mit der Anzahl der verwendeten Vollbrücken im DAB-Wandler ansteigt. Darüber hinaus verringert sich im Allgemeinen der Zwischenkreisstrom mit der Anzahl der Vollbrücken, da die von der Vollbrücke erzeugte Anschlussformungsdauer doppelt so gross ist wie die erzeugte Amplitude durch eine Halbbrücke, und zur Erreichung der gleichen Leistungsübertragung somit der Strom halbiert werden kann. Fig. 6A–6C zeigen einige Beispiele für typische Formungs- und Stromwellenformen für drei der oben erwähnten Realisierungen für DAB-Wandler gemäss dem Stand der Technik. Tabelle 1 (A–C) gibt einen Überblick über die Freiheitsgrade für die Modulation dieser Wellenformen (die Modulationsparameter können unabhängig voneinander definiert werden). Es ist festzuhalten, dass abhängig von der zeitlichen Abfolge der fallenden und steigenden Formungsflanken  $v_1(t)$  and  $v_2(t)$  ebenfalls unterschiedlich geformte Zwischenkreisströme  $i_L(t)$  ermöglicht werden, diese werden auch als «Switching Modes» oder Schalt-

modi des DAB-Wandlers bezeichnet. Die mögliche Anzahl an unterschiedlichen Switching Modes für einen DAB-Wandler steigt mit den vorhandenen Freiheitsgraden zur Modulation der Spannungs- und Stromwellenformen, und daher mit der Anzahl an verwendeten Vollbrücken im DAB-Wandler. In allen Realisierungen des Stands der Technik, wie in Fig. 1–4 gezeigt, ist ein bidirektionaler Leistungsfluss möglich und sind Ein- und Ausgangsseite galvanisch voneinander getrennt.

**Tabelle 1 Überblick über die Freiheitsgrade zur Modulation der Spannung  $v_L(t)$  und zur Wellenformung des Zwischenkreisstroms für die in Fig. 6 gezeigten Beispiele**

[0011]

Implementation	Freiheitsgrade
A) Halbbrücken-Halbbrücken DAB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\phi</math> (Phasen-shift-Modulation)</li> <li>→ 1 Freiheitsgrad</li> </ul>
B) Halbbrücken-Vollbrücken DAB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\phi</math> (Phasen-shift-Modulation)</li> <li>• <math>\tau</math> (Modulation des Tastgrades von <math>v'_2(t)</math>)</li> <li>→ 2 Freiheitsgrade</li> </ul>
C) Vollbrücken-Vollbrücken DAB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\phi</math> (Phasen-shift-Modulation)</li> <li>• <math>\tau_1</math> (Modulation des Tastgrades von <math>v_1(t)</math>)</li> <li>• <math>\tau_2</math> (Modulation des Tastgrades von <math>v'_2(t)</math>)</li> <li>→ 3 Freiheitsgrade</li> </ul>
D) Hybrider aktiver Brückenumrichter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\phi_1, \phi_2</math> (zweifache Phasen-shift-Modulation)</li> <li>• <math>\tau_1</math> (Modulation des Tastgrades von <math>v_1(t)</math>)</li> <li>• <math>\tau_2</math> und <math>\tau_3</math> (zweifache Modulation des Tastgrades von <math>v'_2(t)</math>)</li> <li>→ 5 Freiheitsgrade</li> </ul>

[0012] Insbesondere wird an der Eingangs- und/oder Ausgangsseite des DAB-Wandlers ein Brückenschaltkreis verwendet, welcher eine Quasirechteckspannung  $v_x(t)$  mit zweifach moduliertem Einschaltzyklus (spannungsniveaumoduliert; z.B. eine Spannung mit fünf verschiedenen Spannungsniveaus) erzeugt (z.B.  $v'_2(t)$  in Fig. 6D). Im Vergleich zur herkömmlichen Realisierung des DAB-Wandlers ergeben sich eine grössere Flexibilität und mehr Freiheitsgrade für die Modulation der Spannung  $v_L(t)$ , welche über die äquivalenten seriellen Induktivitäten entstehen, und daher auch für die Wellenformung des entstehenden Zwischenkreisstroms  $i_L(t)$ , sowie für das Erreichen der erhofften Regel- oder Steuerziele (z.B. minimale RMS-Werte des Wechselspannungszwischenkreisstroms und Soft-Switching-Betrieb). Durch die Verwendung eines fünfstufigen Brückenschaltkreises, wie in Fig. 8 gezeigt, wird es möglich

- eine dreistufige Spannung  $v_x(t)$  ( $+V_{DC}/2$  Volt, 0 Volt,  $-V_{DC}/2$  Volt) am Zwischenkreis zu erzeugen, mit einem Tastverhältnis  $\leq 50\%$  und einer Amplitude entsprechend der halben Brückenspannung,
- eine dreistufige Spannung  $v_x(t)$  ( $+V_{DC}$  Volt, 0 Volt,  $-V_{DC}$  Volt) am Zwischenkreis zu erzeugen, mit einem Tastverhältnis  $\leq 50\%$  und einer Amplitude gleich der Brückenspannung,
- oder eine beliebige Kombination dieser Spannungen.

[0013] Dadurch wird es möglich, an den entsprechenden Zwischenkreisanschlüssen des DAB-Wandlers eine fünfstufige ( $+V_{DC}$  Volt,  $+V_{DC}/2$  Volt, 0 Volt,  $-V_{DC}/2$  Volt,  $-V_{DC}$  Volt) bezüglich der Einschaltdauer zweifach modulierte Spannung  $v_x(t)$  bereitzustellen.

[0014] Bei der Verwendung von fünfstufigen Brückenschaltkreisen auf der Eingangs- sowie der Ausgangsseite des Wandlers beträgt der Gesamtfreiheitsgrad zur Spannungsmodulierung  $v_L(t)$ , welche über der äquivalenten seriellen Induktivität  $L_{eq}$  erscheint, und damit zur Wellenformung des entstehenden Wechselspannungszwischenkreisstroms  $i_L(t)$ , sieben, wohingegen bei der Verwendung von zwei Vollbrücken der Freiheitsgrad drei beträgt. Daher steigt die Flexibilität für das Erreichen der angestrebten Steuerziele (z.B. minimale RMS-Werte des Wechselspannungszwischenkreisstroms ohne Überschreitung der Soft-Switching-Grenzen) beachtlich und erlaubt einen effizienteren Betrieb des Wandlers, insbesondere falls ein grosser Betriebsspannungsbereich des Wandlers mit Soft-Switching erforderlich ist (z.B. ein Gleichspannungseingang im Bereich von 0 V bis 400 V). Beispielsweise lassen sich die Spannungen am Eingang und/oder Ausgang in einem Bereich von theoretisch 0% bis 100% der jeweiligen Maximalspannung variieren, praktisch in einem Bereich von beispielsweise 5% oder 10% bis 100%. Da der fünfstufige Brückenschaltkreis jede Kombination der dreistufigen und zweistufigen Anschlussspannungen bereitstellen kann, wird diese Art von Brückenschaltung im Folgenden auch als Zweistufig-Dreistufig (Two-Level – Three-Level; 2L3L) hybride aktive Brücke bezeichnet, oder als hybride aktive Brücke mit gemischtem Niveau. Ein DAB-Wandler, der diese hybride Brücke an der Eingangs- und/oder Ausgangsseite aufweist, wird im Folgenden als Hybrider Dualer Aktiver Brückenwandler («Hybrid-Dual-Active-Bridge-Converter», HDAB-Wandler) bezeichnet.

**[0015]** Gemäss einer Ausführungsform weisen die mehrstufige Brückenschaltung respektive die mehrstufigen Brückenschaltungen jeweils einen ersten Brückenweig zum wahlweisen Verbinden eines ersten Anschlusses (Q) des Wechselspannungszwischenkreises mit einem positiven oder einem negativen Gleichspannungsanschluss auf, einen zweiten Brückenweig zum wahlweisen Verbinden eines zweiten Anschlusses (P) des Wechselspannungszwischenkreises mit dem positiven oder dem negativen Gleichspannungsanschluss, und mindestens einen weiteren Pfad zur ein- und ausschaltbaren Verbindung eines der Anschlüsse des Wechselspannungszwischenkreises mit einem Anschluss (Y) mit Spannung Null.

**[0016]** Dieser Anschluss mit Spannung Null ist beispielsweise ein künstlicher Mittelpunkt zwischen dem entsprechenden positiven und negativen Gleichspannungsanschluss. Er kann mit einem kapazitiven Spannungsteiler erzeugt werden. Ein solcher weiterer Pfad kann als Teil eines Brückenweiges betrachtet werden.

**[0017]** Gemäss einer Ausführungsform sind mindestens eine der beiden Brückenschaltungen, sowie eine Steuerung des Umrichters, für «Soft-Switching» zur Reduktion von Schaltverlusten ausgelegt.

**[0018]** Gemäss einer Ausführungsform weist der Brückenumrichter eine Steuerung auf, welche dazu ausgelegt ist, für jede der an einer oder beiden Seiten des Wechselspannungszwischenkreises angelegten Spannungen sowohl einen Einschaltzeitpunkt als auch einen Ausschaltzeitpunkt zu variieren (als Ausschaltzeitpunkt kann der Zeitpunkt des Umschaltens auf eine andere Spannung verstanden werden). Damit kann an einer oder beiden Seiten des Wechselspannungszwischenkreises jeweils ein zweifach modulierter Einschaltzyklus realisiert werden, insbesondere mit einer Modulation von Spannungsniveaus, z.B. eine Spannung mit fünf verschiedenen Spannungsniveaus.

**[0019]** Die erhöhte Flexibilität des HDAB-Wandlers, in Bezug auf die Spannungsmodulation  $v_L(t)$ , welche über die äquivalente serielle Induktivität auftritt (und daher für die Wellenformung des resultierenden Wechselspannungszwischenkreisstroms  $i_L(t)$  zur Verfügung steht) und in Bezug auf die Erreichung der vorgegebenen Ziele der Ansteuerung, bietet im Vergleich zum traditionellen DAB-Wandler bei einer typischen Anwendung dieser Art von Wandlern keine Vorteile: Bislang werden DAB-Wandler typischerweise als isolierte DC/DC-Wandler mit einem relativ schmalen Eingangsspannungsbereich eingesetzt, wobei die Wandlung sehr effizient erfüllt werden kann, und mit dem HDAB-Wandler keine deutliche/erhebliche Verbesserung erreicht werden kann. Daher gab es für die Benutzer des DAB-Wandlers keinen unmittelbaren Bedarf einer aktiven Suche nach weiteren Schaltkreisverbesserungen.

**[0020]** Durch die Einführung des HDAB-Wandlers ist nun eine Erweiterung des Anwendungsbereiches möglich. Insbesondere kann eine Wandlung, bei welcher sehr grosse Eingangsspannungsbereiche benötigt werden, nun mit einer sehr hohen Effizienz und grosser Leistungsdichte durchgeführt werden. Beispielsweise kann ein HDAB-Wandler in Serie mit einem synchronen Gleichrichter verwendet werden, wobei nur eine kleine hochfrequenzfilternde Kapazität dazwischengeschaltet ist. Dadurch wird ein einstufiger, isolierter, bidirektionaler Wechselspannungs-Gleichspannungswandler mit Leistungsfaktor eins realisiert, der eine hohe Leistungsdichte und einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Einstufige «Solid State Transformatoren» können in ähnlicher Weise realisiert werden.

**[0021]** In dem Verfahren zum Betrieb einer elektronischen Datenverarbeitungseinrichtung zur Bestimmung eines Steuerungsverfahrens zur Ansteuerung eines HDAB-Brückenumrichters werden durch die Datenverarbeitungseinrichtung die folgenden Schritte ausgeführt:

- Erfassen von Parametern des Brückenumrichters;
- Erfassen von Randbedingungen zum Betrieb des Brückenumrichters nach Massgabe eines Betriebsmodus des Brückenumrichters;
- Erfassen einer Zielfunktion; und
- Bestimmen eines optimalen Steuerungsverfahrens durch Optimieren der Zielfunktion unter Erfüllung der Randbedingungen und unter Variation von Modulationsparametern, welche Schaltzeitpunkte definieren, an denen die beiden Brückenschaltungen zwischen den jeweils zur Verfügung stehenden Gleichspannungen umschalten.

**[0022]** Das Optimieren der Zielfunktion kann ein Maximieren oder Minimieren beinhalten, je nach Definition der Zielfunktion.

**[0023]** Ein Betriebsmodus spezifiziert dabei, mit welcher Sequenz von Schaltvorgängen die zu erzeugende quasirechteckförmige respektive treppenförmige Wechselspannung mit der jeweiligen Brückenschaltung realisiert wird: je nach Topologie der Brückenschaltung kann dies auf unterschiedliche Weise geschehen.

**[0024]** In einer Variante des Verfahrens geschieht

- ein Wiederholen der Schritte «Erfassen von Randbedingungen», «Erfassen einer Zielfunktion» und «Bestimmen eines optimalen Steuerungsverfahrens» für verschiedene Betriebsmodi,

- ein Vergleich der optimierten Werte der Zielfunktion für die verschiedenen Betriebsmodi und
- eine Auswahl desjenigen Betriebsmodus, welcher den besten Wert der Zielfunktion liefert, sowie des optimalen Steuerverfahrens für diesen Betriebsmodus.

**[0025]** Der beste Wert kann ein grösster oder kleinster Wert sein, je nachdem, ob das Ziel der Optimierung die Maximierung oder die Minimierung der Zielfunktion war.

**[0026]** In einer Variante des Verfahrens weist der Schritt des Erfassens der Randbedingungen das Erfassen einer oder mehrerer der folgenden Randbedingungen auf:

- Abhängigkeit von Ein- und Ausgangsströmen respektive Zwischenkreisströmen und/oder von Ein- und Ausgangsleistungen respektive in den Zwischenkreis fliessenden Leistungen von den Modulationsparametern;
- Physikalische Grenzen der Modulationsparameter;
- durch den Betriebsmodus bestimmte Grenzen der Modulationsparameter; und
- aus Anforderungen von Soft-Switching stammende Randbedingungen an die Modulationsparameter.

**[0027]** In einer Variante des Verfahrens weist der Schritt des Erfassens der Zielfunktion das Erfassen mindestens einer der folgenden Grössen als Anteil der Zielfunktion auf:

- RMS-Wert eines Zwischenkreisstromes; und
- Schaltverluste.

**[0028]** Unter «Erfassen» kann verstanden werden, dass Gleichungen zur Berechnung einer Grösse in maschinenlesbarer Form eingelesen werden und dadurch durch das computerimplementierte Optimierungsverfahren verarbeitbar sind. Ausgabegrösse des Optimierungsverfahrens sind die Modulationsparameter für die optimale Lösung und/oder entsprechende Schaltzeitpunkte.

**[0029]** In einer Variante des Verfahrens variiert der Schritt des Bestimmens des optimalen Steuerverfahrens für mindestens eine der beiden Brückenschaltungen mindestens die folgenden Modulationsparameter:

- Phasenverschiebung  $\varphi_1$  eines ersten Zeitabschnittes, während dem die von der Brückenschaltung an den Zwischenkreis angelegte Spannung gleich oder höher einer ersten Spannungsstufe ist, gegenüber dem periodischen Verlauf der Spannung der jeweils anderen Brückenschaltung;
- Phasenverschiebung  $\varphi_2$  eines zweiten Zeitabschnittes, während dem die von der Brückenschaltung an den Zwischenkreis angelegte Spannung gleich oder höher einer zweiten Spannungsstufe ist, gegenüber dem periodischen Verlauf der Spannung der jeweils anderen Brückenschaltung;
- Dauer des ersten Zeitabschnittes; und
- Dauer des zweiten Zeitabschnittes.

**[0030]** Die Schaltzeitpunkte sind durch diese Parameter eindeutig bestimmt und umgekehrt. Die Optimierung dieser Parameter entspricht also auch einer Optimierung durch Variation der Schaltzeitpunkte. Gemäss einer Variante des Verfahrens wird auch die Schaltfrequenz bei der Optimierung variiert.

**[0031]** Das Datenverarbeitungssystem zur Bestimmung des Steuerverfahrens weist Speichermittel mit darin gespeicherten Computerprogrammcodemitteln auf, welche ein Computerprogramm beschreiben, und Datenverarbeitungsmittel zur Ausführung des Computerprogramms, wobei die Ausführung des Computerprogramms zur Durchführung des Verfahrens gemäss der Erfindung führt.

**[0032]** Das Computerprogramm zur Bestimmung des Steuerverfahrens ist in einen internen Speicher einer digitalen Datenverarbeitungseinheit ladbar und weist Computerprogrammcodemittel auf, welche, wenn sie in einer digitalen Datenverarbeitungseinheit ausgeführt werden, diese zur Ausführung des erfindungsgemässen Verfahrens bringen. In einer Ausführungsform der Erfindung weist ein Computerprogrammprodukt einen Datenträger respektive ein computerlesbares Medium auf, auf welchem die Computerprogrammcodemittel gespeichert sind.

**[0033]** Im Folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand von Ausführungsbeispielen, welche in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt sind, näher erläutert. Es zeigen jeweils schematisch:

- Fig. 1 Halbbrücken-Halbbrücken-Realisierung eines DAB-Wandlers gemäss dem Stand der Technik;
- Fig. 2 Halbbrücken-Vollbrücken-Realisierung eines DAB-Wandlers gemäss dem Stand der Technik;
- Fig. 3 Vollbrücken-Halbbrücken-Realisierung eines DAB-Wandlers gemäss dem Stand der Technik;
- Fig. 4 Vollbrücken-Vollbrücken-Realisierung eines DAB-Wandlers gemäss dem Stand der Technik;
- Fig. 5 Vereinfachte Darstellung eines hochfrequenten Wechselspannungszwischenkreises durch eine äquivalente serielle Induktivität  $L_{eq}$ . Die Schaltkreiselemente, die Spannungen und die Ströme beziehen sich auf die Eingangsseite;
- Fig. 6 Beispiele für typische Spannungs- und Stromwellenformen für A: eine, wie in Fig. 1 gezeigte, Halbbrücken-Halbbrücken-Realisierung eines DAB-Wandlers, B: eine, wie in Fig. 2 gezeigte, Halbbrücken-Vollbrücken-Realisierung eines DAB-Wandlers, C: eine, wie in Fig. 4 gezeigte Vollbrücken-Vollbrücken-Realisierung eines DAB-Wandlers, und D: eine, wie in Fig. 9 gezeigte, Vollbrücken-hybride Brücke-Realisierung eines DAB-Wandlers;
- Fig. 7 Darstellung eines aktiven Schaltelements  $S_x$  (A). Beispiel eines Brückenverzweiges (B).
- Fig. 8 Drei mögliche Realisierungen einer hybriden Brückenschaltung zur Verwendung in einem hybriden dualen aktiven Brückenwandler. Die hybride Brückenschaltung kann an der Eingangs- und/oder der Ausgangsseite angeordnet sein, hier ist beispielhaft eine Ausgangsseite gezeigt;
- Fig. 9 Beispiel für eine mögliche Realisierung eines HDAB-Wandlers mit einer Vollbrücke am Eingang und einer hybriden aktiven Brücke am Ausgang;
- Fig. 10 Alternative Realisierungen eines Brückenzweiges in einer hybriden aktiven Brücke zur Verwendung im HDAB-Wandler;
- Fig. 11 Überblick über das Verfahren zum Bestimmen eines Steuerverfahrens für beide aktiven Brücken eines HDAB-Wandlers;
- Fig. 12 Resultierende Spannungs- und Stromverläufe zum Vergleich: Fig. 12A für einen Vollbrücken-Vollbrücken-DAB-Wandler gemäss Fig. 4, Fig. 12B für einen HDAB-Wandler gemäss Fig. 9;
- Fig. 13 Resultierende Spannungs- und Stromverläufe für einen HDAB-Wandler mit einer Vollbrücke am Eingang und einer hybriden aktiven Brücke gemäss Fig. 8A (oder auch 8C) am Ausgang; und
- Fig. 14 Resultierende Spannungs- und Stromverläufe für einen FIDAB-Wandler mit einer Vollbrücke am Eingang und einer hybriden aktiven Brücke gemäss Fig. 8C (oder auch 8A oder 8B) am Ausgang.

**[0034]** Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche oder analoge Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen. In einigen der Figuren ist sowohl eine Darstellung mit Ersatzschaltbildern der aktiven Schaltelemente als auch eine vereinfachte Darstellung mit Schaltern anstelle der aktiven Schaltelemente angegeben.

**[0035]** Fig. 8 zeigt drei mögliche Realisierungen eines hybriden Brückenschaltkreises zur Verwendung in einem HDAB-Wandler. Es sei angemerkt, dass die in diesem Beispiel gezeigten aktiven Schaltelemente Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors, MOSFETs) sind, diese können jedoch durch jegliche herkömmlich verwendeten Schaltelemente mit gatengesteuerter Abschaltfähigkeit realisiert werden. Es sei ebenfalls erwähnt, dass die Brückenschaltkreise in diesem Beispiel willkürlich an der Ausgangsseite des HDAB-Wandlers angeordnet sind. Analog kann also auch der Brückenschaltkreis nur an der Eingangsseite und sowohl an der Eingangsseite wie an der Ausgangsseite des HDAB-Wandlers angeordnet sein. Gemäss Fig. 8A kann eine dreistufige ( $+V_{DC}$  Volt, 0 Volt,  $-V_{DC}$  Volt) Anschlussspannung  $v_2(t)$  mit  $\leq 50\%$  Tastverhältnis und mit einer Amplitude entsprechend der Gleichspannung  $V_{DC2}$  der Brücke bereitgestellt werden, indem die Schalter  $S_{21}$ – $S_{24}$  zum Erzeugen der Spannung  $v_2(t)=+V_{DC}$  Volt sowie die Schalter  $S_{22}$ – $S_{23}$  zum Erzeugen der Spannung  $v_2(t)=-V_{DC}$  Volt betrieben werden. Zum Erzeugen einer Spannung von  $v_2(t)=0$  Volt befinden sich die Schalter  $S_{21}$  –  $S_{23}$  oder die Schalter  $S_{22}$ – $S_{24}$  im leitenden Zustand. Die Schalter  $S_{25}$  und  $S_{26}$  sind immer im nicht-leitenden Zustand. Eine dreistufige ( $V_{DC}/2$  Volt, 0 Volt,  $-V_{DC}/2$  Volt) Anschlussspannung  $v_2(t)$  mit  $\leq 50\%$  Tastverhältnis kann mit einer Amplitude entsprechend der halben Gleichspannung  $V_{DC2}/2$  der Brücke bereitgestellt werden, indem die Schalter  $S_{21}$ – $S_{25}$ – $S_{26}$  zum Erzeugen der Spannung  $v_2(t)=+V_{DC}/2$  Volt sowie die Schalter  $S_{22}$ – $S_{25}$ – $S_{26}$  zum Erzeugen der Spannung  $v_2(t)=-V_{DC}/2$  Volt betrieben werden. Die Schalter  $S_{23}$  und  $S_{24}$  sind im nicht-leitenden Zustand. Zum Erzeugen einer Spannung von  $v_2(t)=0$  Volt befinden sich die Schalter  $S_{21}$ – $S_{23}$ , oder die Schalter  $S_{22}$ – $S_{24}$  im leitenden Zustand, wobei die anderen Schalter im nicht-leitenden Zustand sind. Demzufolge kann jede Kombination der zweistufigen und dreistufigen Spannungen (beispielsweise eine fünfstufige, bezüglich des Tastverhältnisses zweifach modulierte Anschlussspannung  $v_2(t)$ ) an den Wechselspannungszwischenkreisanschlüssen des FIDAB-Wandlers, durch Betreiben

der entsprechenden Schalter, bereitgestellt werden. Die in den Fig. 8B und 8C gezeigten Brückenschaltkreise können in analoger Weise betrieben werden.

[0036] Fig. 9 zeigt eine erste Umsetzung des HDAB-Wandlers, wobei eine Vollbrücke an der Eingangsseite des Wandlers und eine hybride aktive Brücke auf der Ausgangsseite des Wandlers angeordnet ist. Fig. 6D zeigt ein Beispiel typischer Spannungs- und Stromwellenformen für eine solche Umsetzung des HDAB-Wandlers. Die Freiheitsgrade für die Modulation dieser Spannungs- und Stromwellenformen sind in Tabelle 1 angegeben. Es sei angemerkt, dass in Abhängigkeit der zeitlichen Abfolge der fallenden und steigenden Spannungsfanken  $v_1(t)$  und  $v_2(t)$  ebenfalls unterschiedlich geformte Wechselspannungszwischenkreisströme möglich sind, diese werden auch als Schaltmodi («Switching Modes») des HDAB-Wandlers bezeichnet. Es ist festzustellen, dass die Freiheitsgrade von drei auf fünf zunehmen, wenn die Ausgangsbrücke des Vollbrücken-Vollbrücken-DAB-Wandlers (Fig. 4) durch eine hybride aktive Brücke ersetzt wird. Die Freiheitsgrade stehen zur Modulation der Spannung  $v_L(t)$ , welche über die äquivalente serielle Induktivität wirkt, und daher zur Wellenformung des entsprechenden Wechselspannungszwischenkreisstroms  $i_L(t)$  zur Verfügung. Die zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade nehmen auf sieben zu, falls die beiden Brücken des Vollbrücken-Vollbrücken-DAB-Wandlers (Fig. 4) jeweils durch eine hybride aktive Brücke ersetzt werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Schaltelemente, welche im Laufe der verschiedenen Zeitintervalle in einer halben Schaltperiode ( $T_s/2$ ) aktiviert werden, um die in Fig. 6D (HDAB-Wandler mit einer Vollbrücke auf der Eingangsseite und einer aktiven Mischbrücke auf der Ausgangsseite, wie in Fig. 9 dargestellt) gezeigten Wellenformen zu erzeugen. Es sei daran erinnert, dass die in Fig. 6D gezeigten Wellenformen nur einen einzigen Betriebsmodus des HDAB-Wandlerbetriebs repräsentieren, welcher Fig. 9 entspricht.

[0037] Tabelle 2 zeigt Zeitintervalle einer halben Schaltperiode ( $T_s/2$ ) und die Schaltelemente, welche während der entsprechenden Zeitintervalle zur Wellenformung wie in Fig. 6D (HDAB-Wandler mit einer Vollbrücke auf der Eingangsseite und einer aktiven Mischbrücke auf der Ausgangsseite, wie in Fig. 9 dargestellt) aktiv sind

[0038]

	Zeitintervalle	Eingangsseite	Ausgangsseite
$t_0 - t_1$	$0 - \frac{\pi - \tau_1}{2\pi f_s}$	$S_{12}, S_{14}$ OR $S_{11}, S_{13}$	$S_{22}, S_{23}$
$t_1 - t_2$	$\frac{\pi - \tau_1}{2\pi f_s} - \frac{\phi_2}{2\pi f_s}$	$S_{12}, S_{13}$	$S_{22}, S_{27}$
$t_2 - t_3$	$\frac{\phi_2}{2\pi f_s} - \frac{\phi_1}{2\pi f_s}$	$S_{12}, S_{13}$	$S_{22}, S_{27}, S_{25}$ OR $S_{23}, S_{25}, S_{26}$
$t_3 - t_4$	$\frac{\phi_1}{2\pi f_s} - \frac{\pi + \phi_1 - \tau_2}{2\pi f_s}$	$S_{12}, S_{13}$	$S_{22}, S_{24}$ OR $S_{21}, S_{23}$
$t_4 - t_5$	$\frac{\pi + \phi_1 - \tau_2}{2\pi f_s} - \frac{\pi + \phi_2 - \tau_3}{2\pi f_s}$	$S_{12}, S_{13}$	$S_{24}, S_{25}, S_{26}$ OR $S_{21}, S_{27}, S_{28}$
$t_5 - t_6$	$\frac{\pi + \phi_2 - \tau_3}{2\pi f_s} - \frac{\pi}{2\pi f_s}$	$S_{12}, S_{13}$	$S_{21}, S_{24}$

[0039] Bemerkungen:

1. Die Schalter  $S_{25}$ ,  $S_{26}$ ,  $S_{27}$ , und  $S_{28}$  (Fig. 8A–8C) müssen nur für die halbe Gleichspannung  $V_{DC2}/2$  ausgelegt sein und werden im Weiteren auch als Tiefspannungs- oder Niederspannungsschaltelemente bezeichnet. Dadurch wird es möglich, Schaltelemente mit besseren Schalteigenschaften und einem niedrigen Widerstand im eingeschalteten Zustand zu verwenden. Die Schaltelemente  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{23}$ , und  $S_{24}$  müssen im Gegensatz dazu der gesamten Gleichspannung  $V_{DC2}$  standhalten und werden daher auch als Hochspannungsschaltelemente bezeichnet.
2. Aus Tabelle 2 ist zu erkennen, dass die Einschaltelemente, welche während eines jeden Zeitintervalls aktiv sind, immer eine Kombination aus zwei Hochspannungsschaltelementen oder aus einem Hochspannungsschaltelement und zwei Niederspannungsschaltelementen sind. Beide Kombinationen weisen die im Wesentlichen gleiche Performance auf.
3. Alternativ kann der Brückenzeit  $S_{23}$ – $S_{24}$ – $S_{25}$ – $S_{26}$  von Fig. 10A durch den Brückenzeit  $S_{23}$ – $S_{24}$ – $S_{25}$ – $S_{26}$ – $D_{21}$ – $D_{22}$  von Fig. 10B ersetzt werden. In diesem Fall müssen die Schalter  $S_{23}$  und  $S_{24}$  nur für den halben Gleichspannungsstrom  $V_{DC2}/2$  ausgelegt sein, wodurch Niederspannungsschaltelemente verwendet werden können. Wenn jeder Brückenzeit der hybriden aktiven Brücke auf diese Weise ersetzt wird, kann



die Gleichspannung der Brücke doppelt so gross sein wie die Spannung, für welche die in der Brücke verwendeten Schaltelemente ausgelegt sind. Dies macht den HDAB-Wandler geeignet für Mittel- oder Hochspannungsanwendungen (heutzutage ist es schwierig, einen einzelnen Leistungshalbleiterschalter direkt mit einem Mittelspannungsnetz zu verbinden.) Darüber hinaus erhöht dieses Merkmal den Leistungsfluss der Brücke für ein gegebenes Leistungshalbleiterelement signifikant. Die Dioden  $D_{21}$ – $D_{22}$  müssen ebenfalls für die halbe Gleichspannung  $V_{DC2}/2$  ausgelegt sein und können beispielsweise als Hochleistungs-Siliconkarbid-Dioden realisiert werden.

4. In einer weiteren Alternative kann der Brückenzweig  $S_{23}$ – $S_{24}$ – $S_{25}$ – $S_{26}$  aus Fig. 10A durch einen der in Fig. 10C gezeigten Brückenzweige (bekannt aus dem Vienna-Gleichrichter) ersetzt werden. Dies ist zulässig, wenn ein Leistungsfluss nur in einer Richtung benötigt wird.

#### Verfahren für die Bestimmung eines Steuerverfahrens zum Betrieb beider aktiven Brücken des HDAB-Wandlers

**[0040]** Die Vorrichtung weist also mindestens einen hybriden aktiven Brückeschaltkreis an der Eingangs- und/oder Ausgangsseite des DAB-Wandlers auf, wodurch ein HDAB-Wandler (Hybrid-Dual-Active-Bridge-Wandler) verwirklicht wird. Anschliessend wird ein Verfahren für die Bestimmung eines Verfahrens zum Betrieb der beiden aktiven Brücken des HDAB-Wandlers beschrieben:

**[0041]** Dieses Verfahren ist allgemein anwendbar, wobei die Allgemeinheit in ihrer Unabhängigkeit von der Realisierungsweise des HDAB-Wandlers begründet liegt. Mögliche Realisierungen des HDAB-Wandlers sind (nicht abschliessend) folgende Kombinationen:

- Halbbrücke auf der Eingangsseite des Wandlers, hybride Brücke auf der Ausgangsseite
- Vollbrücke auf der Eingangsseite des Wandlers, hybride Brücke auf der Ausgangsseite
- hybride Brücke auf der Eingangsseite des Wandlers, hybride Brücke auf der Ausgangsseite
- hybride Brücke auf der Eingangsseite des Wandlers, Halbbrücke auf der Ausgangsseite
- hybride Brücke auf der Eingangsseite des Wandlers, Vollbrücke auf der Ausgangsseite

**[0042]** Entsprechend der zeitlichen Abfolge der fallenden und steigenden Spannungsflanken  $v_1(t)$  and  $v_2(t)$ , welche an den Zwischenkreisanschlüssen der aktiven Brücke anliegen, kann man eine Vielzahl von verschiedenen Schaltungsbetriebsarten oder Betriebsmodi realisieren. Diese Betriebsarten oder Betriebsmodi sind bei jeder Realisierung des HDAB-Wandlers verschieden, wobei für jede mögliche Realisierung die Betriebsart bei negativem Leistungsfluss analog zur Betriebsart mit positivem Leistungsfluss ist.

**[0043]** Das weiter unten erklärte Verfahren für die Bestimmung eines Verfahrens zum Betrieb beider aktiven Brücken des HDAB-Wandlers ermöglicht es, eine «effizienteste» Betriebsart und die Parameter für den «effizientesten» Betrieb zu ermitteln. Die «Effizienz» ist jeweils durch eine Kostenfunktion oder Zielfunktion beschrieben.

**[0044]** Diese Betriebsparameter werden im Weiteren auch als Modulationsparameter  $\vec{x} = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  bezeichnet. Es sind dies beispielsweise die Phasenverschiebungswinkel und die Tastverhältnisse der Quasirechteckspannungen, welche von den aktiven Brücken erzeugt werden und an den Zwischenkreisanschlüssen des HDAB-Wandlers bereitgestellt werden, und beispielsweise auch die Schaltfrequenz  $f_s$ . Die Modulationsparameter können im Wesentlichen, innerhalb von physikalisch sinnvollen Grenzen, frei gewählt werden.

**[0045]** Die schlussendliche Betriebsart und die Modulationsparameter resultieren aus einem Optimierungsalgorithmus und sind von den Systemspezifikationen (z.B. Eingangsspannung, Leistungsniveau, Umwandlungsverhältnis, äquivalente serielle Induktivität, Schaltfrequenz (falls fest vorgegeben),...), von einer Zielfunktion, welche frei definierbar ist (z.B. Minimierung des RMS-Wertes des Wechselfeldspannungszwischenkreisstroms  $i_L(t)$ , um die Leitungsverluste des Schaltkreises zu minimieren), und von Randbedingungen abhängig. Die Randbedingungen können in Funktionen unterteilt werden, welche die Beziehung zwischen den Modulationsparametern und den Leistungsniveaus des Wandlers (z.B.  $I_{DC1}$ ,  $I_{DC2}$ ,  $P_{DC1}$ , or  $P_{DC2}$ ) beschreiben, in Einschränkungen der Modulationsparameter aufgrund von physikalischen Randbedingungen des Systems (z.B. die Tastverhältnisse der Quasirechteckspannungen können nicht grösser als 50% werden), in Randbedingungen der unterschiedlichen möglichen Betriebsarten, sowie in frei definierbare Funktionen (z.B. Randbedingungen für den Soft-Switching-Betrieb). Dabei sind die Zielfunktion und mindestens einige der Randbedingungen abhängig vom Betriebsmodus. Für jeden Betriebsmodus wird ein Optimierer angewendet, um ein Minimum oder ein Maximum der Zielfunktion zu finden, wobei die Randbedingungen für diesen Betriebsmodus erfüllt werden. Dies wird im Allgemeinen auch nicht-lineare Optimierung unter Randbedingungen («Constrained Nonlinear Optimization») oder nichtlineare Programmierung («Nonlinear Programming») genannt. Für die Bestimmung, welcher Betriebsmodus die Randbedingungen erfüllt und den «besten Wert» für die Zielfunktion liefert, wird eine Selektionsfunktion verwendet. Diese wählt aus den durch Optimierung gefundenen optimalen Betriebsmodi denjenigen Betriebsmodus mit dem besten Wert und liefert diesen Betriebsmodus und die entsprechenden Modulationsparameter  $\vec{x}^{opt}$ . Die allgemeine Vorgehensweise zum Finden eines Verfahrens zum Betrieb beider aktiven Brücken des HDAB-Wandlers ist auch in einem Überblicksdiagramm in Fig. 11 dargestellt.

**[0046]** Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte, welche für das Finden der endgültigen Modulationsparameter und des Betriebsmodus zum Betreiben des HDAB-Wandlers durchgeführt werden können, wird in den folgenden Abschnitten gegeben. Diese Vorgehensweise ist für jede Realisierung des HDAB-Wandlers gültig und anwendbar.

**[0047]** Schritt 1: Definition der Systemspezifikationen

- Eingangsspannung ( $V_{DC1}$ )
- Ausgangsspannung ( $V_{DC2}$ )
- Leistungsniveau (beispielsweise  $I_{DC1}$ ,  $I_{DC2}$ ,  $P_{DC1}$ , or  $P_{DC2}$ )
- Umwandlungsverhältnis des Transformators ( $n_1/n_2$ )
- Äquivalente serielle Induktivität ( $L_{eq}$ )
- Ausgangskapazität der Halbleiterschalter ( $C_x$ )
- Schaltfrequenz ( $f_s$ ) – nur falls fest vorgegeben und nicht zur Optimierung verwendbar
- Optional: minimale Kommutierungsladung ( $Q_{comm.min}$ )

**[0048]** Schritt 2: Bestimmung der Randbedingungen für jede Betriebsart

- a. Funktionen, welche die Beziehung zwischen den Modulationsparametern und den Leistungsniveaus des Wandlers (z.B.  $I_{DC1}$ ,  $I_{DC2}$ ,  $P_{DC1}$ , or  $P_{DC2}$ ) beschreiben

**[0049]** Zuerst werden die verschiedenen Betriebsarten und die entsprechenden Leistungsflussgleichungen für eine gegebene Realisierung (also Schaltungstopologie) des HDAB-Wandlers bestimmt. In Abhängigkeit der zeitlichen Abfolge der fallenden und steigenden Spannungsflanken  $v_1(t)$  und  $v_2(t)$ , welche an den Zwischenkreisanschlüssen der aktiven Brücke anliegen, kann eine Vielzahl von verschiedenen Betriebsarten unterschieden werden. Fig. 6D zeigt ein solches Beispiel für eine einzelne Betriebsart für eine Vollbrücken-Hybridbrückenrealisierung des HDAB-Wandlers, dargestellt in Fig. 9. Es ist ersichtlich, dass die aktive Eingangsbrücke (Vollbrücke) eine dreistufige ( $+V_{DC}$  Volt, 0 Volt,  $-V_{DC}$  Volt), Anschlussspannung  $v_1(t)$  mit modulierbarem Tastverhältnis am Zwischenkreis des HDAB-Wandlers anlegen respektive bereitstellen kann. Die aktive Ausgangsbrücke (eine zweistufige (2-Level/2L) – dreistufige (3-Level/3L) hybride aktive Brücke (2L3L Brücke)) kann eine fünfstufige ( $+V_{DC}$  Volt,  $+V_{DC}/2$  Volt, 0 Volt,  $-V_{DC}/2$  Volt,  $-V_{DC}$  Volt), und bezüglich des Tastverhältnisses zweifach modulierte Anschlussspannung  $v_2(t)$  am Zwischenkreis des HDAB-Wandlers bereitstellen. Für diese Realisierung des HDAB-Wandlers ergeben sich somit fünf Modulationsparameter:

- o  $\phi_1, \phi_2$ : zweifache Phasenverschiebungsmodulation, entspricht auch einer Amplitudenmodulation
- o  $\tau_1$ : Modulation des Tastverhältnisses von  $v_1(t)$
- o  $\tau_2$  und  $\tau_3$  zweifache Modulation der Tastverhältnisse von  $v_2(t)$

**[0050]** Der Zwischenkreisstrom (ein Wechselstrom)  $i_L(t)$  im Zwischenkreis wird durch die sich über die äquivalenten seriellen Induktivitäten  $L_{eq}$  ergebenden Spannungen  $v_L(t) = v_1(t) - v_2(t)$  und durch deren Induktivitätswert bestimmt. Daraus resultiert eine stückweise lineare Gleichung für den Zwischenkreisstrom  $i_L(t)$ , welcher in jeder Betriebsart verschieden ist. Die Dynamik des Stroms durch die Induktivität  $i_L(t)$  kann durch die folgende Gleichung dargestellt werden:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_L(t)}{L}$$

**[0051]** Die Ausdrücke für  $i_L(t)$  für verschiedene Schaltvorgänge der Schaltelemente ergeben sich aus dem Lösen der Gleichungen für  $i_L(t)$  in jedem der Zeitintervalle, die durch die zeitliche Abfolge der fallenden und steigenden Spannungsflanken  $v_1(t)$  und  $v_2(t)$ , welche an den Zwischenkreisanschlüssen der aktiven Brücke anliegen, definiert sind, und aus der Auswertung des resultierenden Gleichungssystems. Diese Ausdrücke unterscheiden sich je nach der Betriebsart. Die Ströme  $i_1(t)$  und  $i_2(t)$  können, durch eine Analyse der Leitungszustandes der Schalter  $S_{xx}$  auf der entsprechenden Eingangs- und Ausgangsseite der aktiven Brücke des HDAB-Wandlers, von  $i_L(t)$  abgeleitet werden. Durch eine Mittelung der stückweisen Funktionen für  $i_1(t)$  und  $i_2(t)$  über eine Schaltperiode  $T_s = 1/f_s$  ergeben sich die Funktionen für die entsprechenden Eingangs- und Ausgangsströme ( $I_{DC1}$  beziehungsweise  $I_{DC2}$ ), welche für die Berechnung der Eingangs- und Ausgangsleistung ( $P_{DC1}$  beziehungsweise  $P_{DC2}$ ) verwendet werden können.

**[0052]** Diese Ausdrücke sind Funktionen der Modulationsparameter, sie sind typischerweise nicht linear und können zu einer nichtlinearen Gleichung

$$ceq(\vec{x}) = 0$$

als Basis für die Optimierung umgeformt werden.

[0053]

$$I_{DC1} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_1(t) dt$$

$$I_{DC1} = f(\vec{x})$$

$$ceq(\vec{x}) = 0$$

- b. Funktionen, welche die Einschränkungen der Modulationsparameter aufgrund von physikalischen Randbedingungen des Systems beschreiben

Diese Gleichungen respektive Funktionen stellen sicher, dass die erhaltenen Modulationsparameter innerhalb der physikalischen Randbedingungen des Systems liegen, z.B. können die Tastverhältnisse der Quasirechteckspannungen nicht grösser als 50% werden.

Typischerweise wird eine Reihe von unteren und oberen Grenzen

$$(\vec{l}_b$$

respektive  $\vec{u}_b$ ) für die Modulationsparameter (oder Designvariablen) in  $\vec{x}$  definiert, damit die Lösung der Optimierung immer im Bereich

liegt, wobei  $\vec{x}$ ,  $\vec{l}_b$  und  $\vec{u}_b$  Vektoren sind.

[0054] Beispiel für eine Gleichung entsprechend einer physikalischen Randbedingung:

$$0 \leq \tau_1 \leq \pi$$

- c. Funktionen, welche die die Randbedingungen der unterschiedlichen möglichen Betriebsarten beschreiben

Der Optimierer für die Modulationsparameter für eine einzelne Betriebsart kann nur einen Satz an gültigen Modulationsparametern liefern, solange sichergestellt ist, dass diese Modulationsparameter nicht zu einer anderen Betriebsart führen. Typischerweise resultiert daraus ein Satz von linearen Ungleichungen:

$$A \cdot \vec{x} \leq \vec{b},$$

wobei  $\vec{x}$  und  $\vec{b}$  Vektoren sind und A eine Matrix ist.

- d. Funktionen, welche frei definiert werden können (z.B. die Randbedingungen für den Soft-Switching-Betrieb)

Die Eingangs- sowie die Ausgangsbrückenschaltkreise des HDAB-Wandlers können in einer Soft-Switching-Weise geschaltet werden, wodurch eine Verringerung der Schaltverluste ermöglicht wird. Um das zu erreichen, werden Gleichungen benötigt, welche die Grenzen des Soft-Switching-Betriebs beschreiben. Das Soft-Switching eines Brückenweiges (Fig. 7B) tritt auf, wenn der Übergang der Drain-Source Spannung durch das Ausschalten des entsprechenden Schalters initiiert wird, beispielsweise kommutiert der Schalter  $S_{12}$  den Strom vom Transistor  $T_{12}$  zur gegenüberliegenden Diode  $D_u$  des Brückenweiges. Wie schon weiter oben beschrieben, wird eine minimale Kommutierungsladung ( $Q_{comm} \geq Q_{comm,min}$ ) benötigt um den resonanten Übergang innerhalb des Totzeitintervalls zu beenden, wobei ein «hartes» Einschalten, ein Durchschliessen («Shoot Through») und eine Spannungsübergangsverzögerung vermieden werden. Durch die Auswertung dieser Randbedingungen, welche den Brückenweigestrom  $i_{leg1-2}$ strom betreffen, wobei die Ausdrücke für  $i_L(t)$  in den verschiedenen Schaltzeitpunkten der Schaltelemente verwendet werden, können die Randbedingungen zum Realisieren des Soft-Switching-Betriebs hergeleitet werden. Wie bereits erwähnt, sind diese Funktionen für jede Betriebsart verschieden. Typischerweise resultiert daraus ein Satz von nichtlinearen Ungleichungen:

$$C \cdot \vec{x} \leq \vec{d},$$

wobei  $\vec{x}$  und  $\vec{d}$  Vektoren sind und C eine Matrix ist. Es sei erwähnt, dass der Betrieb des HDAB-Wandlers vorteilhafterweise ein Soft-Switching-Betrieb ist, jedoch ist er nicht zwingend darauf beschränkt. Daher sind die Einschränkungsfunktionen des Soft-Switching willkürlich im Optimierungsalgorithmus. Nebst den Funktionen, welche die Soft-Switching-Grenzen beschreiben, können auch beliebige andere Randbedingungen definiert werden.

[0055] Schritt 3: Bestimmung der Zielfunktion

[0056] Das Ziel beim Finden eines Verfahrens zum Betrieb beider aktiven Brücken des HDAB-Wandlers besteht in der Bestimmung der «effektivsten» Betriebsart und der «effektivsten» Betriebsparameter. Um den «effektivsten» Betrieb zu spezifizieren, kann eine Zielfunktion definiert werden. Dies kann grundsätzlich frei respektive willkürlich geschehen.

[0057] Eine typische Zielfunktion ist beispielsweise ein gewichteter RMS («Root Mean Square»)-Wert des Zwischenkreisstroms, welcher so klein wie möglich sein soll, um die Leitungsverluste des HDAB-Wandlers zu verringern. Die Wahl die-

ser Zielfunktion («Objective Function») kann durch die Tatsache gerechtfertigt werden, dass im Soft-Switching-Betrieb in erster Linie diese Leitungsverluste zu den Gesamtverlusten beitragen und die Schaltungsverluste vergleichsweise gering sind. Zum Beispiel ist die Zielfunktion

$$\text{objective function, } f(\vec{x}) = \frac{R_{eq,prim} \cdot I_{L,RMS}^2 + R_{eq,sec} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot I_{L,RMS}^2}{R_{eq,prim} + R_{eq,sec}}$$

$$\min_{\vec{x}} f(\vec{x})$$

[0058] Es ist zu betonen, dass die Wahl der Zielfunktion grundsätzlich frei ist. Die verwendete Zielfunktion kann auch Schaltungsverluste oder andere schaltungsspezifische Grössen beinhalten.

[0059] Schritt 4: Lösen des Optimierungsproblems für jede der Betriebsarten

[0060] Die gesuchten (effizientesten) Modulationsparameter jeweils für eine Betriebsart kann durch das Finden eines Minimums (oder Maximums) des Optimierungsproblems bestimmt werden. Das Optimierungsproblem kann beschrieben sein durch:

$$\min_{\vec{x}} f(\vec{x})$$

so dass:

- $ceq(\vec{x}) = 0$
- $\vec{l}_b \leq \vec{x} \leq \vec{u}_b$
- $A \cdot \vec{x} \leq \vec{b}$
- $C \cdot \vec{x} \leq \vec{d}$

[0061] Wenn eine Lösung gefunden werden kann, dass heisst, wenn sie den Randbedingungen gerecht wird, gibt der Modulationsparameteroptimierer die optimalen Modulationsparameter für diese Betriebsart und die entsprechenden Werte der Zielfunktion aus:

- $f(\vec{x}_{opt})|_{mode\ m}$
- $\vec{x}_{opt}|_{mode\ m}$

[0062] Schritt 5: Finden/Bestimmen der «effektivsten» Betriebsart

[0063] Ein Selektor respektive eine Selektionsfunktion (mit anderen Worten: ein Auswahlverfahren) wird verwendet, um zu ermitteln welche Betriebsart den Einschränkungsfunktionen gerecht wird und den besten Wert (ein Maximum oder Minimum, je nach Problemstellung) für die Zielfunktion hat. Der Selektor gibt die endgültigen Modulationsparameter

$$\vec{x}_{opt}$$

und die Betriebsart aus.

[0064] Vergleich: Beispiel

[0065] Um die Vorteile der zusätzlichen Freiheitsgrade des HDAB-Wandlers aufzuzeigen, wird die in Fig. 9 gezeigte HDAB-Realisierung mit dem Vollbrücken-Vollbrücken-DAB-Wandler aus Fig. 4 gemäss dem Stand der Technik verglichen. Die Freiheitsgrade stehen für die Spannungsmodulation  $u_L(t)$ , welche über die äquivalenten seriellen Induktivitäten anliegt, und daher für die Wellenformung des resultierenden Zwischenkreisstroms  $i_L(t)$  zur Verfügung steht. Das Verfahren für die Bestimmung eines Verfahrens zum Betrieb beider aktiven Brücken des HDAB-Wandlers, wie oben beschrieben, wird für das Bestimmen der effektivsten Betriebsart und der entsprechenden effektivsten Modulationsparameter verwendet. Jedes System wird optimiert, um die unten angegebene Zielfunktion («Objective Function») zu minimieren (dass heisst, eine vereinfachte Darstellung der Hauptleitungsverluste im Schaltkreis), wobei ein Soft-Switching in jedem Schaltelement sichergestellt wird (es wird ein minimaler Kommutierungsstrom  $I_{comm,min}$  von 2 Ampere in jedem Schalter angenommen).

$$\text{objective function} = I_{L,RMS}^2 + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot I_{L,RMS}^2$$

[0066] Für jeden Wandler werden die gleichen Betriebsbedingungen und Schaltkreiselemente vorausgesetzt, welche in Tabelle 3 aufgelistet sind. Die resultierenden Modulationsparameter, der RMS-Wert der der primären und der sekundären Seite zugeordneten Zwischenkreisströme ( $I_{RMS,prim}$  beziehungsweise  $I_{RMS,sec}$ ) und die Spitzenwerte des Zwischenkreisstromes  $i_L(t)$  sind in Tabelle 4 für jeden Wandler angegeben. In Fig. 12 sind die resultierenden Spannungs- und Stromwellenformen für den Vollbrücken-Vollbrücken-DAB-Wandler (Fig. 12A) und den HDAB-Wandler (Fig. 12B) gezeigt. Es

ist klar ersichtlich, dass der HDAB-Wandler den Vollbrücken-Vollbrücken-DAB-Wandler übertrifft, da die Zwischenkreis-RMS-Ströme niedriger sind. Die Werte für die Zielfunktion des HDAB-Wandlers sind um 34% niedriger als die Werte des Vollbrücken-Vollbrücken-DAB-Wandlers, was wesentlich kleineren Leitungsverlusten entspricht. Des Weiteren ist der Spitzenstrom im Zwischenkreis des HDAB-Wandlers um 44% niedriger. Dies kann auch aus den in Fig. 12 gezeigten Stromwellenformen gefolgert werden.

**[0067]** Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt Betriebsbedingungen und Schaltkreiselemente, welche im Vergleich des HDAB-Wandlers (Fig. 9) und des Vollbrücken-Vollbrücken-DAB-Wandlers gemäss dem Stand der Technik (Fig. 4) Verwendung finden

$I_{DC1}$	15 Ampere
$V_{DC1}$	150 Volt
$V_{DC2}$	400 Volt
$n_1/n_2$	0.85
$L_{cq}$	8e-6 Henry

**[0068]** Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt resultierenden Modulationswinkel, RMS-Werte der primären und der sekundären Seite zugeordneten Zwischenkreisströme ( $I_{RMS,prim}$  beziehungsweise  $I_{RMS,sec}$ ) und Spitzenwerte des Zwischenkreisstromes  $i_L(t)$

	Vollbrücken-Vollbrücken-DAB-Wandler	HDAB-Wandler
$\tau_1$	2.94 rad	3.14 rad
$\tau_2$	1.23 rad	2.83 rad
$\tau_3$	–	0.49 rad
$\varphi_1$	-0.175 rad	0.2 rad
$\varphi_2$	–	0.2 rad
$I_{RMS,prim}$	19.1 Ampere	15.5 Ampere
$I_{RMS,sec}$	16.3 Ampere	13.2 Ampere
$i_{L,peak}$	36.3 Ampere	20.41 Ampere

### Bemerkungen

**[0069]**

- Die Magnetisierungsinduktivität des Transformators kann zur Vergrößerung des Ausschaltstroms («Turn-off Current») der Schalter verwendet werden. Dadurch wird das Soft-Switching beschleunigt und/oder der Soft-Switching-Betriebsbereich des Wandlers vergrößert.
- Zusätzliche Induktivitäten auf der primären und/oder sekundären Seite (jeweils zwischen den primären Zwischenkreisanschlüssen A, B beziehungsweise zwischen den sekundären Zwischenkreisanschlüssen Q, P) können für die Vergrößerung des Ausschaltstroms der Schalter verwendet werden, wodurch das Soft-Switching beschleunigt wird und/oder der Soft-Switching-Betriebsbereich des Wandlers vergrößert wird.
- Die mehrstufige hybride aktive Brücke, welche in einem HDAB-Wandler verwendet wird, bietet den Vorteil eines «Stapelns» der Schaltelemente in Reihe, womit eine höhere Gleichspannungsbussspannung erhalten wird als mit jeder anderen Realisierung eines konventionellen DAB-Wandlers. Daher ist der HDAB-Wandler insbesondere für Hochspannungs- und Hochleistungsanwendungen von Interesse. Darüber hinaus gestattet die bessere Steuerbarkeit (mit mehr Freiheitsgraden) einen effizienteren Betrieb, wenn ein grosser Eingangs- und/oder Ausgangsspannungsbereich benötigt wird (z.B. einstufiger Wechselspannungs-Gleichspannungs-, Gleichspannungs-Wechselspannungs- und Wechselspannungs-Wechselspannungs-Wandler («Solid-State Transformator»))
- Die Nachteile des HDAB-Wandlers sind:
  - o erhöhte Komplexität der Steuerung

- o evtl. Probleme mit Ungleichgewicht der Brückenteilspannungen (an den Kapazitäten), diese erfordern eine Neutralpunktbalancierung
  - eine zu grosse/hohe Spannung könnte an den Schaltelementen anliegen
- o höhere Anzahl an Schaltern, Klemmdioden, Gatetreibern ...

[0070] Um die in Fig. 6D gezeigte Wellenform mit ZVS zu realisieren, kann eine wie in Fig. 8C gezeigte Brücke verwendet werden. Um die in Fig. 12B (ganzer Schritt in  $V_{DC}$  in einigen Flanken) gezeigte Wellenform mit ZVS zu realisieren, kann eine wie in Fig. 8A oder 8B gezeigte Brücke verwendet werden. Zudem kann die in Fig. 12B gezeigte Wellenform auch durch eine Brücke realisiert werden, wie sie in Fig. 8C gezeigt ist. Sind solche wie in Fig. 12B gezeigten, ganzen  $V_{DC}$ -Schritte zu realisieren, müssen die Schalter für die volle Gleichspannung ausgelegt sein, auch wenn zwei NPC («Neutral Point Clamped»)-Brückenzweige verwendet werden. Zum Beispiel: bei Kommutation von unteren zu oberen Schaltern, entsprechend Fig. 10B, wird die Spannung über  $S_{26}$  zu  $V_{DC}$ , weil man nicht  $S_{24}$  gleichzeitig mit  $S_{26}$  öffnen kann. Ausser, es wird erst  $S_{24}$  geöffnet →  $D_{22}$  wird leitend → danach sofortiges Öffnen von  $S_{26}$  → ergibt ein kleines Plateau mit  $V_{DC}/2$ .

[0071] Es ist natürlich auch möglich, die hybride aktive Brücke des HDAB-Wandlers mit zwei, drei oder vier Niveaus anstatt mit fünf Niveaus zu schalten. Diese Bedingungen sind grundsätzlich im Verfahren für die Bestimmung eines Verfahrens zum Betrieb beider aktiven Brücken des HDAB-Wandlers inbegriffen.

### Patentansprüche

1. Dualer aktiver Brückenumrichter, aufweisend eine erste Brückenschaltung ( $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}$ ) zur Wandlung einer ersten Gleichspannung in eine erste Wechselspannung  $v_1(t)$  und eine zweite Brückenschaltung ( $S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{25}, S_{26}, S_{27}, S_{28}$ ) zur Wandlung einer zweiten Gleichspannung in eine zweite Wechselspannung  $v_2(t)$ , und einen Wechselspannungszwischenkreis mit einem Transformator, wobei die erste Wechselspannung an einer ersten Seite des Wechselspannungszwischenkreises anliegt und die zweite Wechselspannung an einer zweiten Seite des Wechselspannungszwischenkreises anliegt und wobei sowohl die erste Brückenschaltung ( $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}$ ) als auch die zweite Brückenschaltung ( $S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{25}, S_{26}, S_{27}, S_{28}$ ) gesteuerte Schaltelemente aufweisen, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine der beiden Brückenschaltungen eine mehrstufige Brückenschaltung ( $S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{25}, S_{26}, S_{27}, S_{28}$ ) ist, mit welcher die entsprechende Wechselspannung aus aufeinanderfolgenden Abschnitten mit jeweils gleich bleibender Spannung erzeugbar ist und dabei mindestens fünf unterschiedlich hohe Gleichspannungen an die entsprechende Seite des Wechselspannungszwischenkreises anlegbar sind.
2. Brückenumrichter gemäss Anspruch 1, wobei mit der mehrstufigen Brückenschaltung respektive den mehrstufigen Brückenschaltungen jeweils ausgehend von einer Gleichspannung die volle positive und die volle negative Gleichspannung, die halbe positive und die halbe negative Gleichspannung sowie die Spannung Null an die entsprechende Seite des Wechselspannungszwischenkreises anlegbar sind.
3. Brückenumrichter gemäss Anspruch 1 oder 2, wobei die mehrstufige Brückenschaltung respektive die mehrstufigen Brückenschaltungen jeweils einen ersten Brückenzweig ( $S_{21}, S_{22}$ ) zum wahlweisen Verbinden eines ersten Anschlusses (Q) des Wechselspannungszwischenkreises mit einem positiven oder einem negativen Gleichspannungsanschluss aufweisen, einen zweiten Brückenzweig ( $S_{23}, S_{24}$ ) zum wahlweisen Verbinden eines zweiten Anschlusses (P) des Wechselspannungszwischenkreises mit dem positiven oder dem negativen Gleichspannungsanschluss, und mindestens einen weiteren Pfad ( $S_{25}, S_{26}, S_{27}, S_{28}$ ) zur ein- und ausschaltbaren Verbindung eines der Anschlüsse des Wechselspannungszwischenkreises mit einem Anschluss (Y) mit Spannung Null.
4. Brückenumrichter gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei mindestens eine der beiden Brückenschaltungen, sowie eine Steuerung des Umrichters, für weiches Schalten, auch «Soft-Switching» genannt, zur Reduktion von Schaltverlusten ausgelegt sind.
5. Brückenumrichter gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3, aufweisend eine Steuerung des Umrichters, welche dazu ausgelegt ist, für jede der anliegenden Wechselspannungen sowohl einen Einschaltzeitpunkt als auch einen Ausschaltzeitpunkt zu variieren.
6. Verfahren zum Betrieb einer elektronischen Datenverarbeitungseinrichtung zur Bestimmung eines Steuerverfahrens zur Ansteuerung eines Brückenumrichters gemäss einem der Ansprüche 1 bis 5, in welchem durch die Datenverarbeitungseinrichtung die folgenden Schritte ausgeführt werden
  - Erfassen von Parametern des Brückenumrichters;
  - Erfassen von Randbedingungen zum Betrieb des Brückenumrichters nach Massgabe eines Betriebsmodus des Brückenumrichters;
  - Erfassen einer Zielfunktion; und
  - Bestimmen eines optimalen Steuerverfahrens durch Optimieren der Zielfunktion unter Erfüllung der Randbedingungen und unter Variation von Modulationsparametern, welche Schaltzeitpunkte definieren, an denen die beiden Brückenschaltungen zwischen den jeweils zur Verfügung stehenden Gleichspannungen umschalten.

7. Verfahren gemäss Anspruch 6, mit
  - Wiederholen der Schritte «Erfassen von Randbedingungen», «Erfassen einer Zielfunktion» und «Bestimmen eines optimalen Steuerverfahrens» für verschiedene Betriebsmodi,
  - Vergleich der optimierten Werte der Zielfunktion für die verschiedenen Betriebsmodi und
  - Auswahl desjenigen Betriebsmodus, welcher den besten Wert der Zielfunktion liefert, sowie des optimalen Steuerverfahrens für diesen Betriebsmodus.
8. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 6 oder 7, wobei der Schritt des Erfassens der Randbedingungen das Erfassen einer oder mehrerer der folgenden Randbedingungen aufweist:
  - Abhängigkeit von Zwischenkreisströmen und/oder von in den Zwischenkreis fliessenden Leistungen von den Modulationsparametern;
  - Abhängigkeit von Ein- und Ausgangsströmen und/oder von Ein- und Ausgangsleistungen von den Modulationsparametern;
  - physikalische Grenzen der Modulationsparameter;
  - durch den Betriebsmodus bestimmte Grenzen der Modulationsparameter; und
  - aus Anforderungen für weiches Schalten, auch Soft-Switching genannt, stammende Randbedingungen an die Modulationsparameter.
9. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 6 bis 8, wobei der Schritt des Erfassens der Zielfunktion das Erfassen mindestens einer der folgenden Grössen als Anteil der Zielfunktion aufweist:
  - RMS-Wert eines Zwischenkreisstromes; und
  - Schaltverluste.
10. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 6 bis 9, wobei der Schritt des Bestimmens des optimalen Steuerverfahrens für mindestens eine der beiden Brückenschaltungen mindestens die folgenden Modulationsparameter variiert:
  - Phasenverschiebung ( $\varphi_1$ ) eines ersten Zeitabschnittes, während dem die von einer Brückenschaltung an den Wechselspannungszwischenkreis angelegte Spannung gleich oder höher einer ersten Spannungsstufe ist, gegenüber dem periodischen Verlauf der Spannung der jeweils anderen Brückenschaltung;
  - Phasenverschiebung ( $\varphi_2$ ) eines zweiten Zeitabschnittes, während dem die von einer Brückenschaltung an den Wechselspannungszwischenkreis angelegte Spannung gleich oder höher einer zweiten Spannungsstufe ist, gegenüber dem periodischen Verlauf der Spannung der jeweils anderen Brückenschaltung;
  - Dauer des ersten Zeitabschnittes; und
  - Dauer des zweiten Zeitabschnittes.

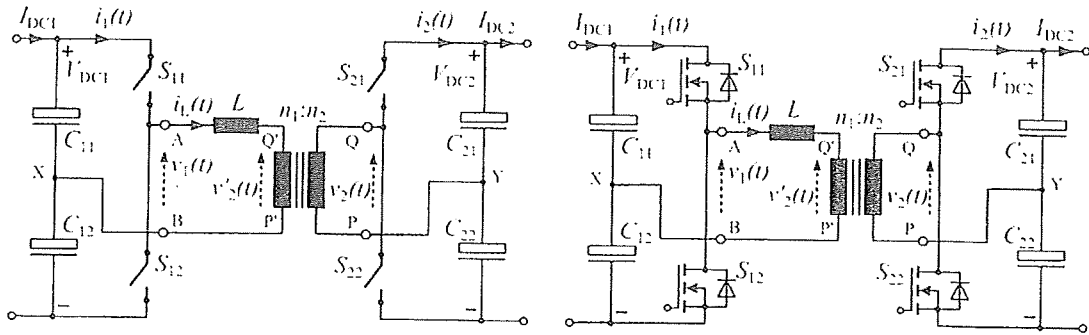


Fig. 1

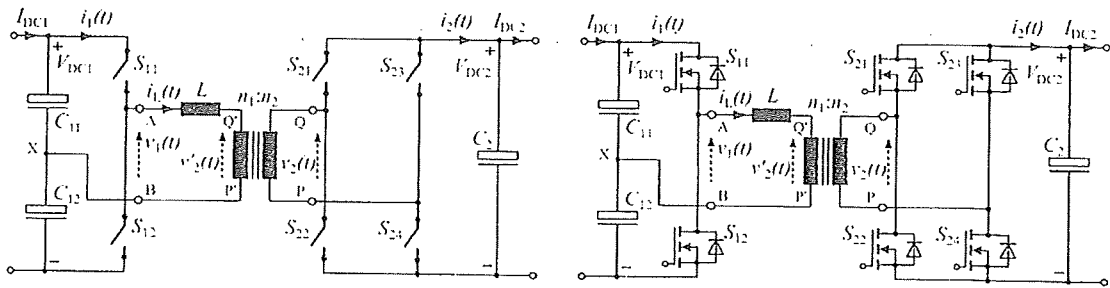


Fig. 2

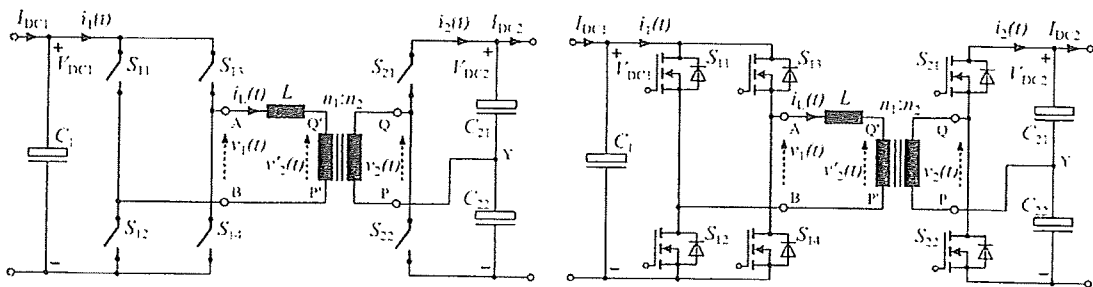


Fig. 3



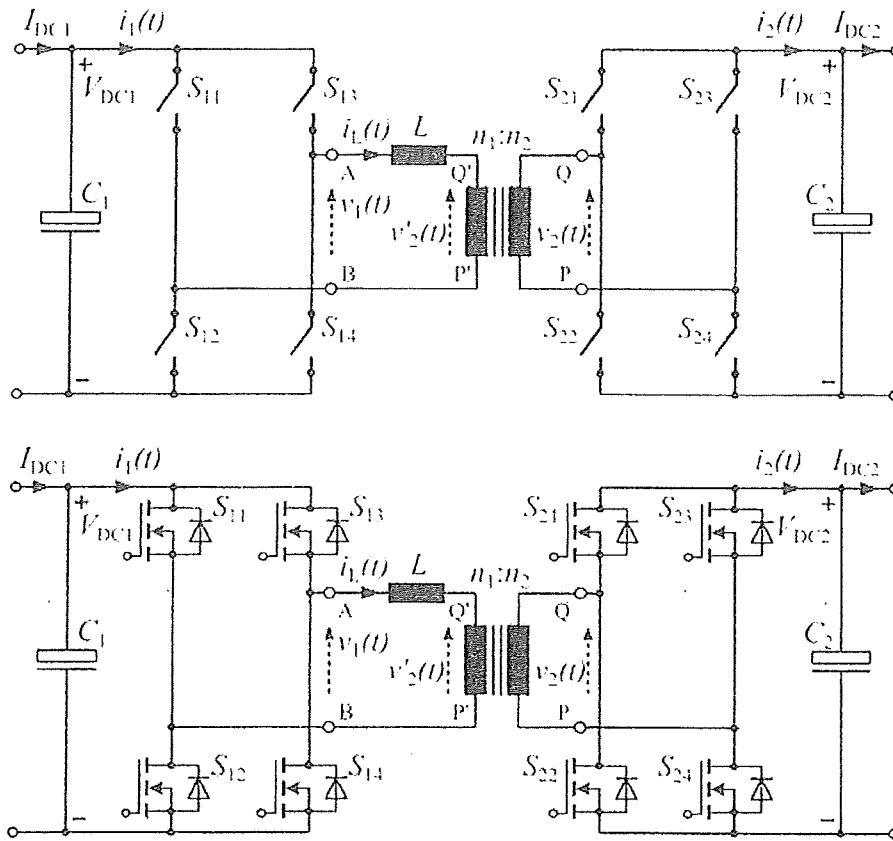


Fig. 4

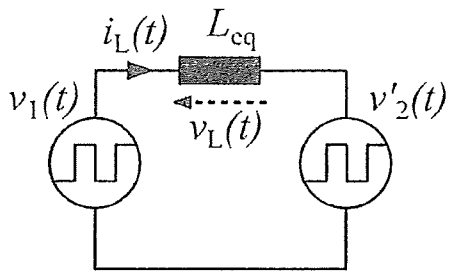


Fig. 5

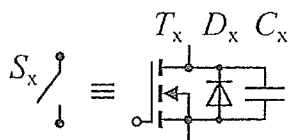


Fig. 7A

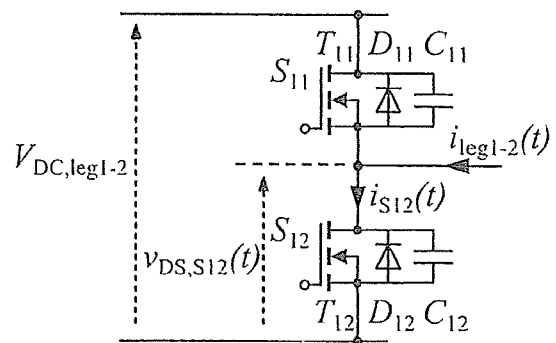


Fig. 7B

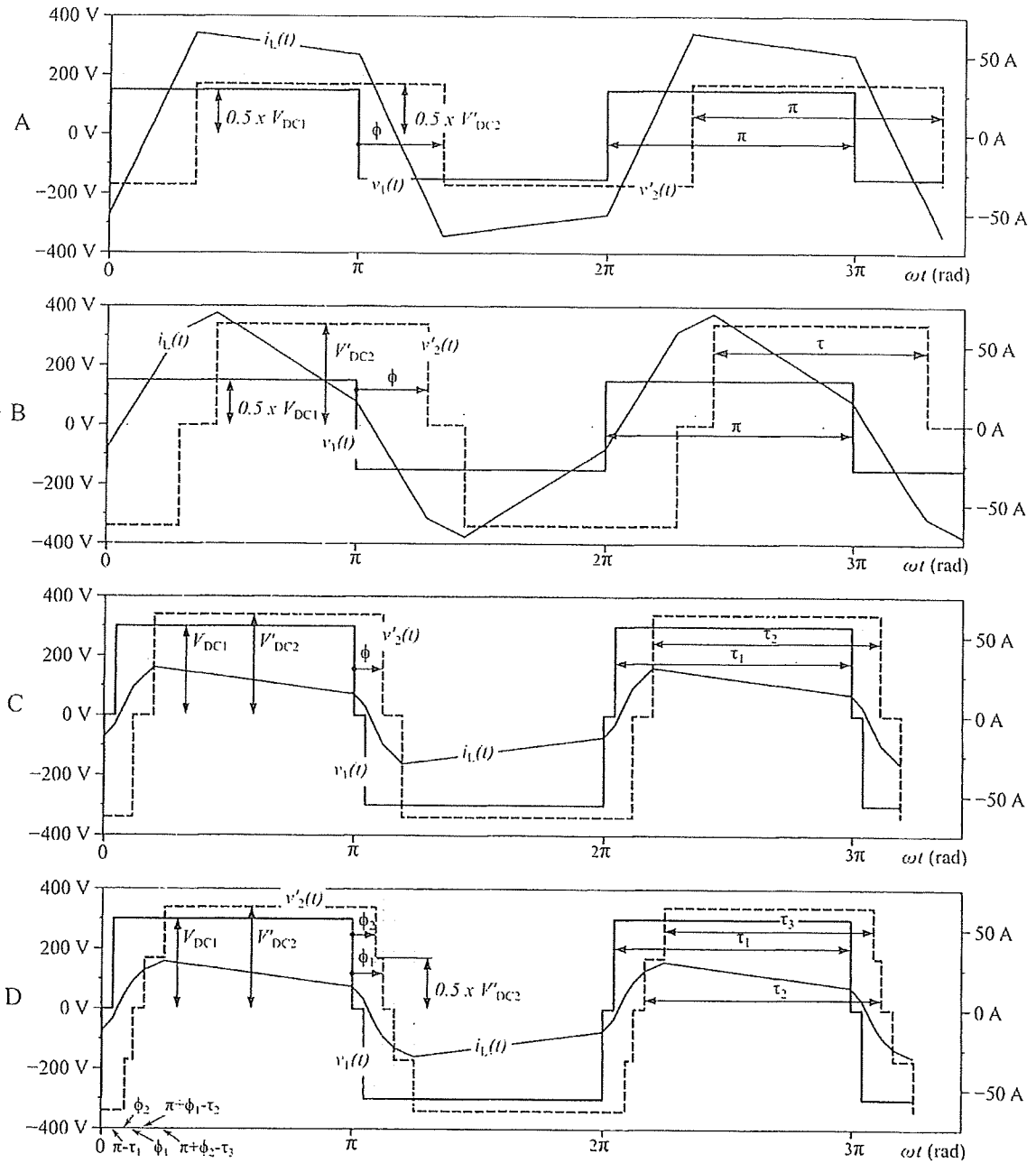


Fig. 6

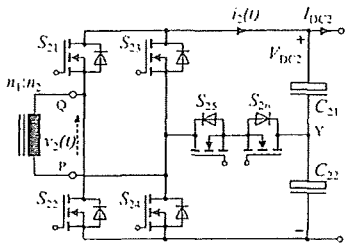


Fig. 8A

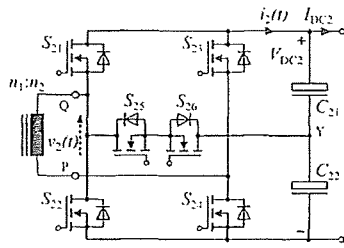


Fig. 8B

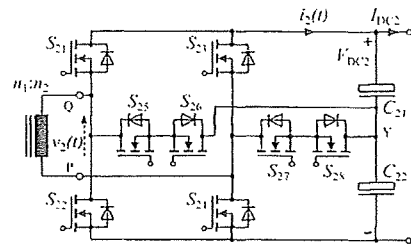


Fig. 8C

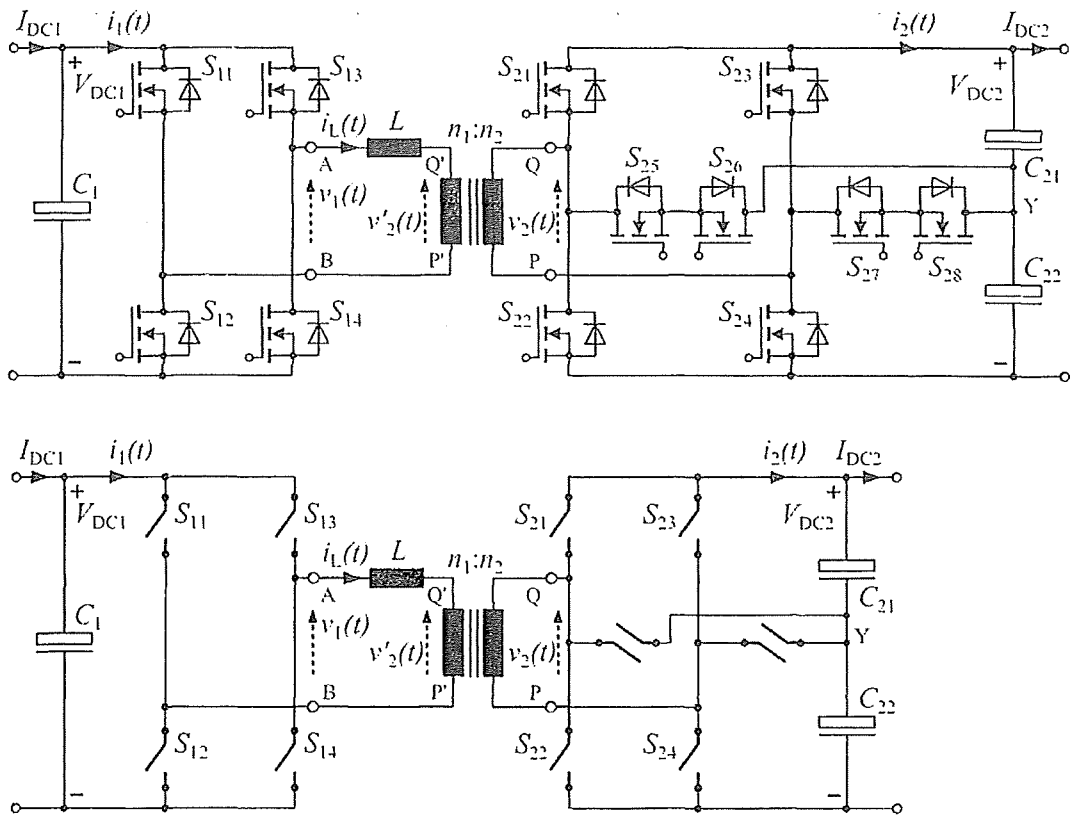


Fig. 9

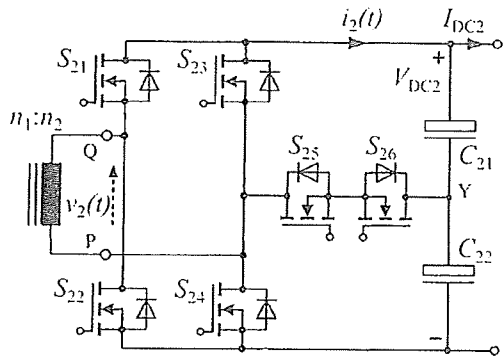


Fig. 10A

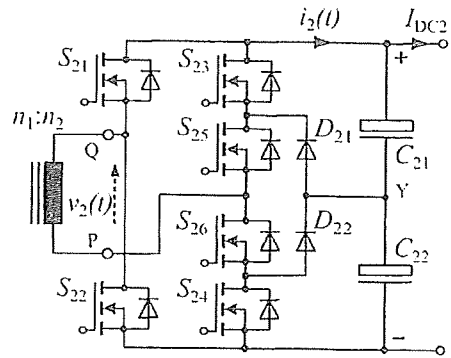


Fig. 10B

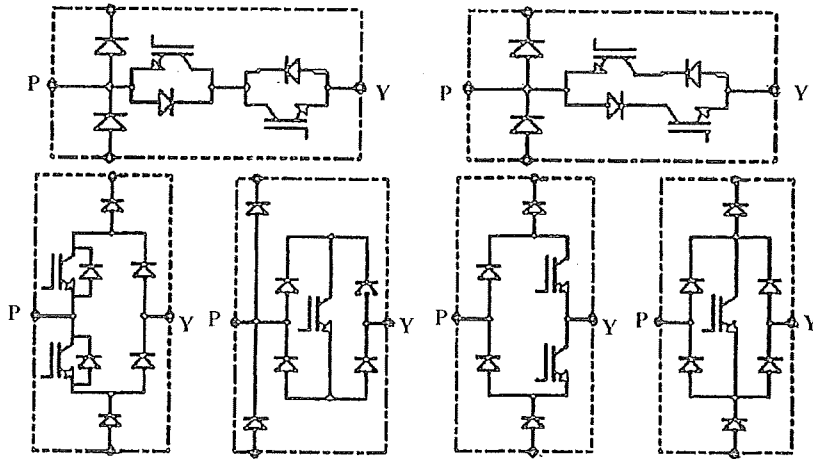


Fig. 10C

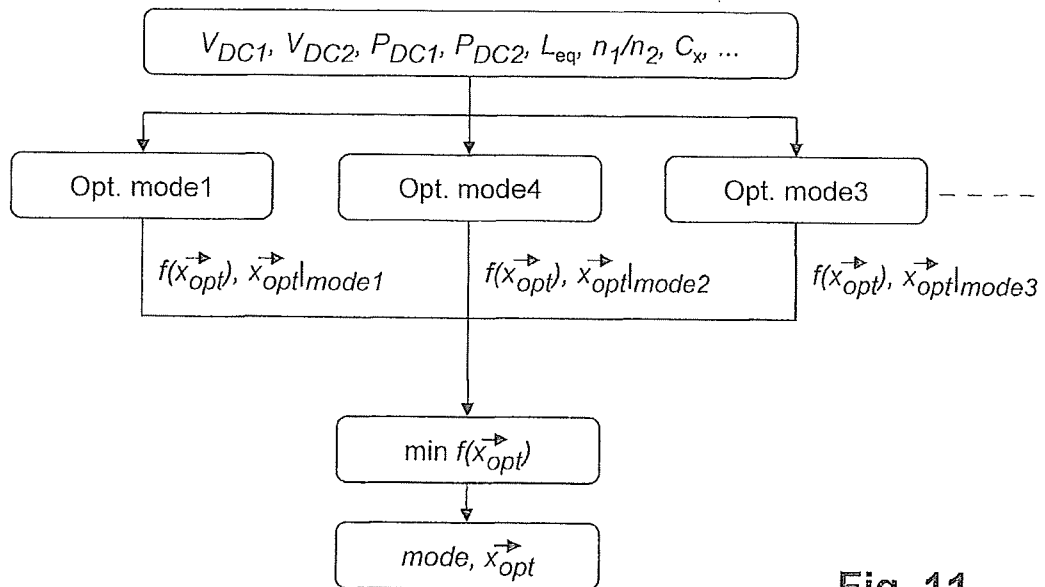


Fig. 11

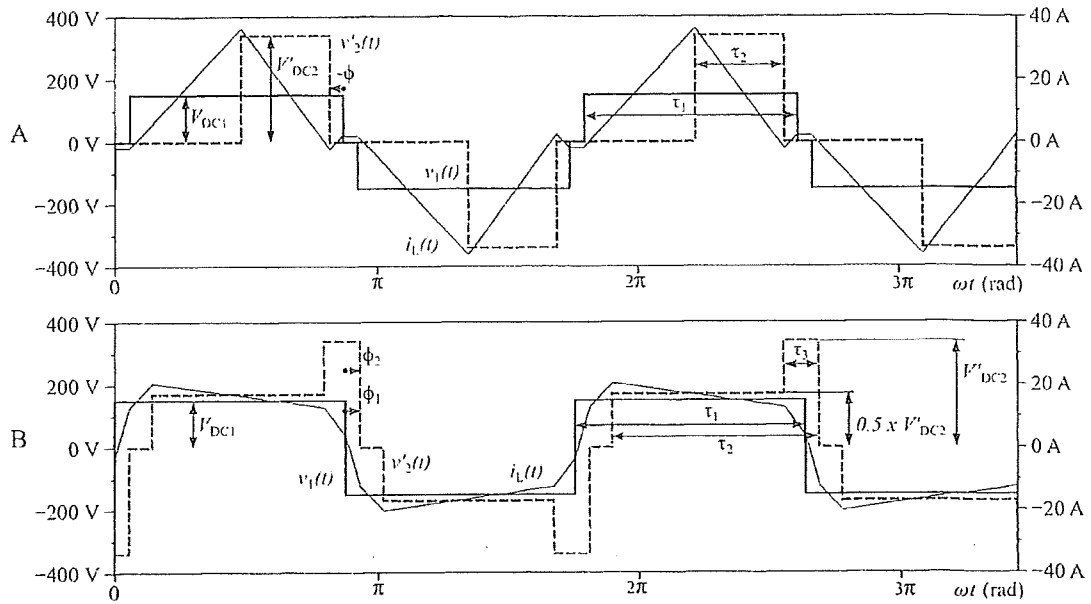


Fig. 12

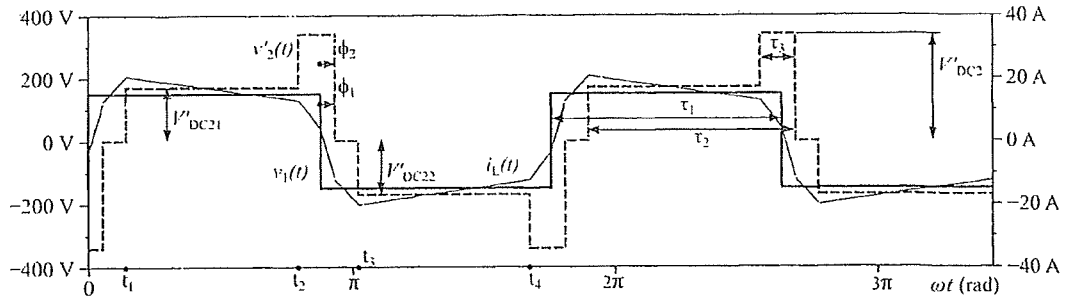


Fig. 13

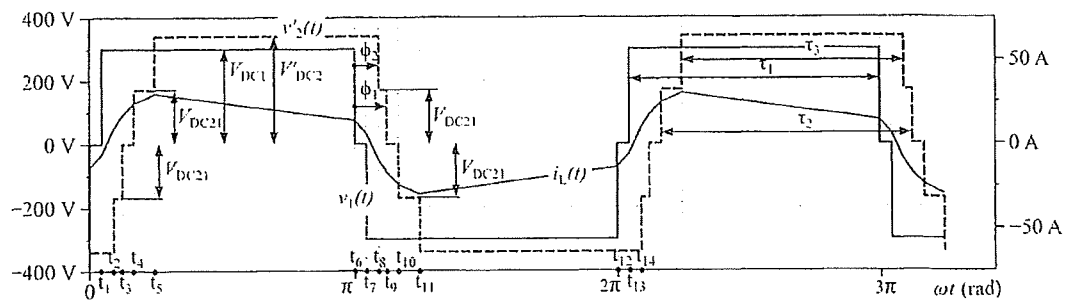


Fig. 14

