

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
20. Juni 2002 (20.06.2002)

PCT

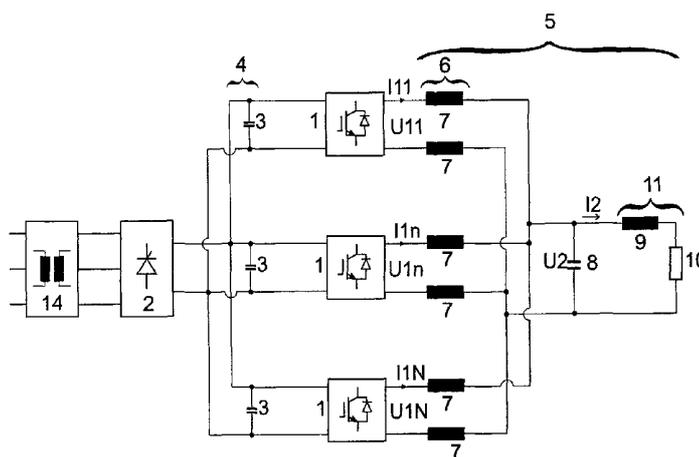
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 02/49197 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: H02M 7/00
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE01/04533
- (22) Internationales Anmeldedatum:
5. Dezember 2001 (05.12.2001)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
100 62 317.4 14. Dezember 2000 (14.12.2000) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): OTTO JUNKER GMBH [DE/DE]; Jägerhausstrasse 22, 52152 Simmerath (DE).
- (72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SCHÖNKNECHT, Andreas [DE/DE]; Goethestrasse 15, 52064 Aachen (DE). DE DONCKER, Rik, W. [BE/BE]; Lei 21, B-3000 Leuven (BE).
- (74) Anwälte: KÖNIG, Werner, E. usw.; König & Kollegen, Kackerstrasse 10, 52072 Aachen (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (national): JP, US.
- (84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).
- Veröffentlicht:
— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR SUPPLYING AN INDUCTIVE LOAD WITH SOFT-SWITCHING INVERTERS WHICH ARE CONNECTED IN PARALLEL

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR SPEISUNG EINER INDUKTIVEN LAST MIT PARALLELGESCHALTETEN WEICH-SCHALTENDEN WECHSELRICHTERN



Topologie des Leistungsteils

TOPOLOGY OF POWER PART

(57) Abstract: The invention relates to a method and a device for supplying an inductive load in the form of an inductor or an induction furnace with a high frequency-power product, using any number of soft-switching inverters which are connected in parallel and which are supplied by at least one rectifier. A capacitor is connected in parallel, upstream of each inverter and is connected to at least one voltage link. The outputs of the inverters are linked to at least one $L_1C_1L_2R$ -parallel oscillating circuit, which consists of the ohmic-inductive load L_2R and a resonant capacitor C_1 and the total inductance L_1 of the resonance reactors. The inverters are connected synchronously and are controlled with the resonant frequency (f_0) of the $L_1C_1L_2R$ -parallel oscillating circuit or slightly above or below the resonance frequency (f_0) with the switching frequency (f_s).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 02/49197 A2



Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Speisung einer induktiven Last in Form eines Induktors oder Induktionsofens mit einem hohen Frequenz-Leistungsprodukt. Dies wird mit parallelgeschalteten weichschaltenden Wechselrichtern beliebiger Anzahl erreicht, die von zumindest einem Gleichrichter gespeist werden, wobei jedem Wechselrichter zumindest ein Kondensator parallel vorgeschaltet wird, der an zumindest einem Spannungszwischenkreis angeschlossen wird. Die Ausgänge der Wechselrichter werden an zumindest einen $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis, der aus der ohmsch-induktiven Last L_2R und einem Resonanzkondensator C_1 und der Gesamtinduktivität L_1 der Resonanzdrosseln besteht, angekoppelt. Die Wechselrichter werden synchron geschaltet und mit der Resonanzfrequenz (f_0) des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises bzw. geringfügig oberhalb oder unterhalb der Resonanzfrequenz (f_0) mit der Schaltfrequenz (f_s) angesteuert.

Verfahren zur Speisung einer induktiven Last mit parallelgeschalteten weichschaltenden Wechselrichtern

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Speisung einer induktiven Last mit parallelgeschalteten weichschaltenden Wechselrichtern beliebiger Anzahl, die von zumindest einem Gleichrichter gespeist werden, wobei jedem Wechselrichter zumindest eine Kondensatorbank parallel vorgeschaltet wird, die an zumindest einen Spannungszwischenkreis angeschlossen wird und die Ausgänge der Wechselrichter an die induktive Last angekoppelt werden.

Die Anpassung von ohmsch-induktiven Lasten an einen einzelnen Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis mittels LCL-Kreis und eine dafür geeignete Regelstrategie sind bereits aus Doht, H.C.; Birk, G.; Fischer, G.L.: Control mode for inverters with resonance transformation in induction heating applications, Power Conversion, Juni 1994, Tagungsband, S. 57-67 und aus Dieckerhoff, S.; Ryan, M.J.; De Doncker, R.W.: Design of an IGBT-Based LCL-Resonant Inverter for High-Frequency Induction Heating“, IAS'99, Phoenix bekannt.

Die dort beschriebene $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis-Topologie besitzt einige Vorteile gegenüber Topologien mit nur zwei Energiespeichern (Serienschwingkreis oder Parallelschwingkreis). So kann durch Anpassung der Resonanzdrossel L_1 und des Resonanzkondensators C_1 die Eingangsimpedanz Z_1 des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises (vgl. Fig. 3) optimal an die Spezifikationen des Wechselrichters angepasst werden, was den Einsatz eines Hochfrequenztransformators am Ausgang

des Wechselrichters überflüssig macht und eine erhebliche Kostenersparnis bedeutet. Im Gegensatz zum Parallelschwingkreis ohne Drossel L_1 sind bei dieser Topologie Induktivitäten der Leitungen vom Wechselrichter zum $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis, die gerade bei der Parallelschaltung von Wechselrichtern zwangsläufig entstehen, unkritisch.

Die maximal an der Last zur Verfügung stehende Leistung ist bei der $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis-Topologie bisher durch die Maximalleistung einer einzelnen Wechselrichtereinheit, bestehend aus einem Wechselrichter und zugeordneter Resonanzdrossel, begrenzt.

Ein Problem beim Parallelschalten von Wechselrichtern mit Spannungszwischenkreis stellen zum einen Querströme, die durch nicht exakt gleichzeitiges Schalten der Wechselrichter zwischen den verschiedenen Wechselrichtereinheiten fließen, zum anderen die gleichmäßige Verteilung der Ströme und damit der Leistung auf die Wechselrichtereinheiten dar. Es wurden bereits Konzepte zur Lösung dieser Probleme bei der Parallelschaltung von Wechselrichtern in der EP 0 511 344 B1 und der DE 196 51 666 A1 erarbeitet.

So sind der EP 0 511 344 B1 ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Parallelschalten von Wechselrichtern zu entnehmen. Die dort verwendeten Ausgangsdrosseln der Wechselrichter sind allein Symmetrierdrosseln, die ausschließlich zur Vermeidung von Querströmen zwischen den einzelnen Wechselrichtern dienen und für eine gleichmäßige Aufteilung der Ströme sorgen. Weiterhin ist in der Regel ein aufwendiger Steueralgorithmus erforderlich, um dies zu erreichen. Dies bedeutet grundsätzlich einen Mehraufwand, der durch die Parallelschaltung entsteht. Dabei muss ein Kompromiss zwischen der Größe und damit dem Aufwand der Symmetrierdrossel und gleichmäßiger Verteilung der Leistung bzw. der Größe der Querströme gefunden werden.

DE 196 51 666 A1 beschreibt ein Verfahren, mit dem eine gleichmäßige Stromverteilung mittels einer besonderen Art von Symmetrierdrosseln bei mehreren parallel geschalteten Wechselrichtern erreicht werden kann. Das Verfahren zeichnet sich durch eine besondere Verschaltung der Symmetrierdrosseln aus, mit dem

Ferritkern-Material eingespart werden kann. Dieses Verfahren hat wie bei der EP 0 511 344 B1 den Nachteil, dass die verwendeten Symmetrierdrosseln einen Zusatzaufwand bedeuten und zu höheren Kosten führen.

Aufgabe der Erfindung ist es nun, ein Verfahren zur Speisung einer ohmsch-induktiven Last in Form eines Induktors oder Induktionsofens mit einem hohen Frequenz-Leistungsprodukt mit parallelgeschalteten Wechselrichtern zu schaffen, welches sich dadurch auszeichnet, dass sich eine Parallelschaltung von beliebig vielen Wechselrichtern ohne zusätzlichen Hardwareaufwand und ohne aufwendige Steuerungstechnik möglich ist.

Diese Aufgabe wird bei einer Vorrichtung der eingangs erwähnten Art durch den kennzeichnenden Teil des Hauptanspruchs gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind Gegenstand der Unteransprüche.

Bei dieser Art der Aufteilung des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises auf die parallelgeschalteten Wechselrichter WR werden die sonst für eine Parallelschaltung notwendigen Symmetrierdrosseln eingespart. Anders ausgedrückt: Die Drosseln am Ausgang der einzelnen Wechselrichter WR sind keine Symmetrierdrosseln sondern Teil des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises.

Die Stromverteilung der Wechselrichter WR ist proportional zum Wert der Induktivitäten der jeweiligen Resonanzdrosseln L_{1n} , die am Ausgang der WR angeordnet sind. Eine gleichmäßige Stromverteilung ist gewährleistet, wenn alle Ausgangsdrosseln L_{1n} die gleiche Induktivität haben.

Mit dieser Topologie können beliebig viele Wechselrichter parallelgeschaltet werden. Besonders vorteilhaft ist hierbei die induktive Ankopplung der Wechselrichtereinheiten an eine gemeinsame Kondensatorbank, d.h. eine Gruppe von Kondensatoren, die über Stromschienen miteinander verbunden sind, so dass Zuleitungsinduktivitäten in der Regel keine große Rolle spielen.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren können Induktoren oder Induktionsöfen mit einem hohen Frequenz-Leistungsprodukt gespeist werden, beispielsweise können

damit Stahlbänder mit Hilfe eines Induktors mit Leistungen von mehreren MW bei Frequenzen von mehr als 20 kHz induktiv erwärmt werden.

Somit eignet sich das Verfahren insbesondere für induktive Lasten mit niedrigem Leistungsfaktor, die mit Wechselströmen bei einer festen Frequenz und mit Leistungen von ca. 100kW bis einigen MW versorgt werden müssen. An einer ohmsch-induktiven Last L_2R werden beispielsweise zur induktiven Erwärmung von Stahlbändern Leistungen von mehreren MW bei Frequenzen von ca. 100 kHz benötigt. Um dieses hohe Frequenz-Leistungsprodukt zu erzielen, ist die Parallelschaltung der Wechselrichtereinheiten, d.h. der Wechselrichter samt zugeordneter Resonanzdrosseln, erforderlich. Unter Wechselrichter werden hierbei die Leistungshalbleiter mit Treibern und Steuerung verstanden.

Die Ausgangsleistung verteilt sich gleichmäßig auf die Wechselrichtereinheiten. Es fließen bei nicht-synchronem Schalten der Wechselrichtereinheiten keine unzulässig hohen Querströme zwischen den Wechselrichtereinheiten. Der Materialaufwand steigt durch die Parallelschaltung gegenüber einem Ein-Wechselrichtersystem nur geringfügig an. Es sind zusätzliche Schutzmechanismen, die in der Steuerung realisiert werden, erforderlich. Im Verhältnis zu den Gesamtkosten des Systems spielen diese jedoch eine untergeordnete Rolle. Auf einen relativ teuren Hochfrequenztransformator kann verzichtet werden. Zudem kann eine nach diesem System arbeitende Vorrichtung modular ausgebildet sein, d.h. die Anzahl der Wechselrichtereinheiten kann beliebig an die erforderliche Ausgangsleistung angepasst werden. Aufgrund der weich schaltenden Wechselrichter wird die Verlustleistung minimiert.

Selbstverständlich können verschiedenste konstante und/oder variable Lasten vorgesehen sein. Die Gleichrichter können beliebiger Topologie sein.

Zu A2: Vorteilhaft an dieser Bauform sind die entstehende magnetische Kopplung der Drosseln und die sich ergebende Einsparung an Kernmaterial.

Zu A3: Vorteilhaft an einem eigenen unabhängigen GR ist:

- a) Redundanz: Wenn ein Gleichrichter ausfällt, kann weitergearbeitet werden.
- b) Modulgedanke: Ein Gleichrichter ist mit seiner Leistung auf einen Wechselrichter ausgelegt und bildet mit diesem zusammen ein Modul. Man schaltet dann einfach so

viele dieser Standardmodule wie nötig parallel, bis die geforderte Leistung erreicht wird. Hierdurch wird der für die Leistungsanpassung nötige Projektierungsaufwand minimiert, so dass eine deutliche Verringerung der Anlagenkosten zu erwarten ist.

Da nun jedem WR ein eigener GR zugeordnet ist, hat jeder WR seinen eigenen Spannungszwischenkreis.

Zu A4: Für (höhere) Frequenzen von ca. 100 kHz bis ca. 1 MHz ist der Einsatz von MOSFET-Leistungshalbleitern vorstellbar. IGCT-Leistungshalbleiter werden eher bei niedrigeren Frequenzen eingesetzt. Von einigen Firmen werden 100 kHz-Umrichter mit MOSFET-Halbleitern realisiert. Erst seit relativ kurzer Zeit dringt der IGBT in diesen hohen Frequenzbereich ein.

Zu A5: Stellt ein defekter Wechselrichter einen Kurzschluss dar, so muss sichergestellt werden, dass dieser vom Spannungszwischenkreis getrennt wird. Dies kann während des Betriebs durch Leistungshalbleiter (wie z.B. IGCTs) oder nach Abschalten der Anlage durch mechanisches Trennen erfolgen. Das Trennen vom Zwischenkreis kann z.B. durch Anbringen von Sicherungen erfolgen, die im Kurzschlussfall automatisch auslösen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Wechselrichtereinheiten mit unabhängigen Gleichrichtern zu speisen. In diesem Fall ist ein Kurzschluss, z.B. am Ausgang eines oder mehrerer Wechselrichtereinheiten unkritisch für eine Fortsetzung des Betriebs der intakten Wechselrichtereinheiten. Neben einem Kurzschluss am Ausgang des Wechselrichters können auch die Leistungshalbleiter des Wechselrichters selbst sowie der Zwischenkreiskondensator infolge eines Defekts kurzgeschlossen sein. Fällt ein Wechselrichter aus, kann der zugehörige Gleichrichter abgeschaltet und die Schaltung mit den überbleibenden Wechselrichtern betrieben werden.

Zu A6: Bei Ausfall eines Wechselrichters ist eine Trennung vom $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis immer erforderlich. Es kann sowohl nach Abschalten der Anlage mechanisch als auch im Betrieb (und dann gegebenenfalls natürlich auch nach Abschalten der Anlage) elektrisch, d.h. mit einem Leistungshalbleiter getrennt werden. Die elektrische Trennung kann derart erfolgen, dass der entsprechende

Leistungsschalter beim Wiedereinschalten der Anlage nicht eingeschaltet wird, sofern der betreffende Wechselrichter von den anderen getrennt bleiben soll. Das heißt, dass beim Anschalten nur die Wechselrichter dem $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis zugeschaltet werden, die einwandfrei funktionieren.

Theoretisch reicht eine Trennung vom Zwischenkreis für den weiteren Betrieb des noch intakten Teils der Anlage. Beim defekten Wechselrichter würden jedoch unter Umständen sehr hohe Spannungen auftreten, die zu einer vollständigen Zerstörung des Wechselrichters führen würden und sogar Personen an der Anlage gefährden könnten. Aus diesem Grund ist es sehr sinnvoll, immer auch vom $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis zu trennen.

Bei Ausfall einer Wechselrichtereinheit, bestehend aus Wechselrichter und zugeordneter Resonanzdrossel inklusive der Steuerung, kann der Betrieb der restlichen intakten Einheiten fortgesetzt werden (Redundanz). Hierzu kann ein Reserve-Wechselrichter vorgesehen sein, der zugeschaltet werden kann. Im Einsatz sind Wechselrichter von je 200 kW vorstellbar. Da zumeist im Megawattbereich gearbeitet werden soll, kann mit einem Bedarf von zumindest 10 Wechselrichtern gerechnet werden. Wird aufgrund eines Wechselrichterausfalls bis zu dessen Reparatur, z.B. bei einer Banderwärmungsanlage die gewünschte Leistung nicht erzielt, so kann dies vorübergehend durch eine Verlangsamung der Bandgeschwindigkeit ausgeglichen werden.

Zu A7: Mit dem Verfahren kann eine Vorrichtung dezentral, also ohne Master-Schaltung, gesteuert werden. Eine für den Betrieb notwendige Kommunikation zwischen den Steuerungen der Wechselrichtereinheiten findet nicht statt. Dadurch wird das Gesamtsystem unanfälliger gegen Störungen. Fällt im Betrieb eine der individuellen Steuerungen aus, so können die restlichen Steuerungen ungehindert weiterarbeiten.

Die Steuerung hat folgende Aufgaben:

1. Überwachung des Wechselrichters und Abschalten bei Auftreten einer Störung,
2. Ansteuern des Wechselrichters in der Nähe der oben genannten Resonanzfrequenz f_0 mit der Schaltfrequenz f_s , und
3. Synchronisation der Wechselrichter ohne Kommunikation mit Steuerungen anderer Wechselrichter.

Zu A8-A10: Die Differenz zwischen f_0 und f_s hängt von den Parametern des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises ab. Mit steigender Differenz der Frequenzen wird der Winkel φ zwischen U_1 und I_1 größer. Der ideale Winkel φ ist der, bei dem die Verluste in den Leistungshalbleitern des Wechselrichters minimal werden. Der Winkel φ hängt dabei vom genauen Typ der Leistungshalbleiter und den Parametern des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises ab.

Zu A11-A18: Prinzipiell handelt es sich um ein Standardregelungsverfahren. Das besondere ist, dass mit diesem Standardregelungsverfahren mit der hier gewählten Auslegung eine dezentrale Regelung ohne Kommunikation der einzelnen Steuerungen miteinander und ohne Master möglich ist. Bisher erfolgte eine solche Regelung immer durch einen Master, der die einzelnen Wechselrichter gleichzeitig ansteuert. Der Vorteil dieser Regelung ist, dass keine störanfällige Kommunikation nötig ist. Außerdem wird eine Redundanz der Steuerung erreicht. Das bedeutet dass eine Fortsetzung des Betriebs der Wechselrichter 1 mit funktionierender Steuerung möglich ist, wenn eine beliebige Steuerung ausfällt.

Zu A19 Dem Gleichrichter kann noch ein Netztransformator vorgeschaltet sein.

Im Folgenden wird das erfindungsgemäße Verfahren und eine nach dem Verfahren arbeitende Vorrichtung anhand von 7 Figuren erläutert: Dabei zeigt

- Fig. 1: eine Topologie des Leistungsteils,
- Fig. 2: den prinzipiellen Aufbau eines IGBT-Wechselrichters mit Spannungszwischenkreis,
- Fig. 3: einen $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis,
- Fig. 4: simulierte Spannungen und Ströme am Ausgang von zwei exakt gleichzeitig schaltenden Wechselrichtern,
- Fig. 5: simulierte Spannungen und Ströme am Ausgang von zwei nicht gleichzeitig schaltenden Wechselrichtern (Winkelverschiebung 30°),
- Fig. 6: ein verteiltes Steuerkonzept, und
- Fig. 7: ein Regelkonzept.

Figur 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Leistungsteils. Dieser besteht aus N parallel geschalteten IGBT-Wechselrichtern 1 (Es sind hiervon drei explizit dargestellt.) mit jeweils individuell zugeordneter Kondensatorbank 3 und gemeinsamen Spannungszwischenkreis, die von einem Gleichrichter 2 mit beliebiger Topologie gespeist werden. Selbstverständlich ist auch der Einsatz mehrerer Gleichrichter 2 vorstellbar.

Figur 2 zeigt die Topologie für eine IGBT-Wechselrichtereinheit mit Spannungszwischenkreis (und Kondensatorbank) 3. Am Ausgang des Wechselrichters 1 ist ein $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis angeschlossen (vgl. **Figur 3**), da ein L_1C_1 -Glieder eine ohmsch-induktive Last 11 an den Wechselrichter 1 anpasst, wobei selbstverständlich auch mehrere ohmsch-induktive Lasten vorgesehen sein können. Bei der Parallelschaltung wurde die Gesamtinduktivität der Resonanzdrosseln 6 auf die N parallel geschalteten Wechselrichter 1 aufgeteilt. Um die Gesamtimpedanz (= Eingangsimpedanz des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises Z_1) des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises 5 durch die Parallelschaltung nicht zu verändern, muss gelten

$$\left(\sum_n \frac{1}{L_{1n}} \right)^{-1} = L_1 \quad (1)$$

mit L_{1n} : Resonanzdrossel, d.h. Ausgangsdrossel 7 des n -ten Wechselrichters 1

L_1 : Gesamtinduktivität 6 der Resonanzdrosseln, die sich aus der Parallelschaltung der einzelnen Resonanzdrosseln 7 ergibt.

Dabei muss die jeweilige Resonanzdrossel 7 symmetrisch angeordnet sein, z.B. teilt sich Resonanzdrossel 7 in zwei Teildrosseln zu je $L_{1n}/2$ auf.

Die Wechselrichter 1 werden in der Nähe der Resonanzfrequenz f_0 des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises 5 mit der Schaltfrequenz f_s betrieben, die sich aus der Parallelschaltung der Gesamtinduktivität 6 der Resonanzdrosseln und der Gesamtinduktivität 9 der ohmsch-induktiven Last 11 mit dem Resonanzkondensator 8₁ ergibt (vgl. **Figur 3**). Unter Vernachlässigung der Dämpfung gilt für diese Frequenz:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 \cdot L_1 \cdot L_2 / (L_1 + L_2)}} \quad (2)$$

Bei dieser Frequenz f_0 hat der Betrag der Eingangsimpedanz $|Z_1|$ des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises ein lokales Minimum.

Figur 4 zeigt die sich aufgrund des dadurch entstehenden Bandpaßcharakters in diesem Betriebspunkt beispielsweise ergebenden Spannungs- und Stromverläufe an den Ausgängen von zwei parallel geschalteten Wechselrichtern 1 bei ideal gleichzeitigem Schalten und bei identisch ausgelegten Resonanzdrosseln. Der jeweilige Ausgangsstrom I_{11} und I_{12} der Wechselrichter 1 ist aufgrund des Bandpaßcharakters des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises sinusförmig trotz der jeweiligen rechteckförmigen Ausgangsspannungen U_{11} und U_{12} .

Die Ausgangsleistung des Wechselrichtersystems, d.h. aller parallelgeschalteter Wechselrichter, wird vom Gleichrichter 2 über die Spannung U_{dc} des Gleichspannungszwischenkreises bzw. an dem Kondensator 3 gesteuert.

Figur 5 zeigt, dass bei nicht synchronem Schalten die Ausgangsströme I_{1n} , hier I_{11} und I_{12} , der einzelnen Wechselrichtereinheiten in Phase sind und lediglich unterschiedliche Amplitude haben.

Figur 6 zeigt das Prinzip des dezentralen Steuerkonzepts. Um eine hohe Zuverlässigkeit und Modularität des Systems zu erreichen, soll die Steuerung dezentral aufgebaut und keine Kommunikation zwischen Steuerungen 13 verschiedener Wechselrichter 1 stattfinden. Jede Steuerung 13 misst also nur Größen innerhalb des zugeordneten Wechselrichters 1, das sind die Ausgangsspannung U_{1n} und der Ausgangsstrom I_{1n} des Wechselrichters 1. Für verbesserte Regeleigenschaften kann außerdem die Spannung U_2 an der ohmsch-induktiven Last 11 verwendet werden.

Ein Gleichrichter 2 mit vorgeschaltetem Transformator 14 speist einen Gleichspannungszwischenkreis U_{dc} bzw. einen Kondensator 3, an den N parallel geschaltete Wechselrichter 1 angeschlossen sind. Bei dem Transformator 14 handelt es sich um einen Netztransformator 14, der die Aufgabe hat, die Netzspannung auf einen für den Gleichrichter 2 vernünftigen Wert herunter zu transformieren. Je nach Gleichrichtertyp und Netzeinspeisung kann auf diesen Transformator 14 verzichtet

werden. Alle Wechselrichter 1 sind über ebenfalls parallel geschaltete Resonanzdrosseln 7, die aus Symmetriegründen in zwei Resonanzdrosseln mit der Induktivität $L_{1n}/2$ aufgeteilt werden müssen, an einen gemeinsamen Resonanzkondensator 8 angeschlossen.

Jeder dieser Wechselrichter 1 verfügt über einen eigenen niederinduktiv an den Wechselrichter 1 angeschlossenen Gleichspannungszwischenkreis in Form eines Kondensators 3. Alle Wechselrichter 1 werden unabhängig voneinander angesteuert, ohne dass die Steuerungen unterschiedlicher Wechselrichter 1 miteinander kommunizieren. Dazu werden von den einzelnen Steuerungen 13 die Ausgangsspannung des jeweiligen Wechselrichters U_{1n} , der Ausgangsstrom des jeweiligen Wechselrichters I_{1n} sowie die Spannung U_2 an der ohmsch-induktiven Last 11 erfasst. Mit Hilfe dieser Größen steuert jede Steuerung 13 ihren jeweiligen Wechselrichter 1 mit der Frequenz f_s an, bei der der Winkel φ den jeweiligen Sollwert φ^* hat.

Figur 7 stellt ein Beispiel für das Regelkonzept aus Figur 6 vor, mit dem die jeweilige Steuerung 13 in der Lage ist, den zugeordneten Wechselrichter 1 in der Nähe der Resonanzfrequenz f_0 mit der Schaltfrequenz f_s zu schalten und gleichzeitig mit den anderen Wechselrichtern 1 zu synchronisieren, so dass sie zum gleichen Zeitpunkt schalten.

Die Regelgröße ist die Frequenz f_0 , mit der der Wechselrichter 1 angesteuert wird. Diese Frequenz ist z.B. daran zu erkennen, dass die Wechselrichterausgangsspannung U_{1n} und der Wechselrichterausgangsstrom I_{1n} in Phase sind. Da es zwei Resonanzfrequenzen gibt, für die dies zutrifft, ist es sinnvoll, eine weitere Messgröße hinzuzunehmen, z. B. die Winkelverschiebung zwischen den Spannungen U_{1n} und U_2 .

Aufgabe der Regelung ist es nun, den Wechselrichter 1 mit der Schaltfrequenz f_s , die in der Nähe der Betriebsfrequenz f_0 ist, anzusteuern, so dass der Winkel φ_n zwischen Wechselrichterausgangsspannung U_1 und -strom I_1 einen vorgegebenen Sollwert φ_n^* einnimmt. Dazu wurde eine Regelung mit zwei überlagerten Regelschleifen entwickelt, die auf dem Prinzip einer sogenannten *Phase-Locked-Loop (PLL)* beruht.

Mittels Spannungs- und Stromwandlern werden die Wechselrichterausgangsspannungen U_{1n} und die Spannung U_2 an der ohmsch-induktiven Last 11 sowie der Wechselrichterausgangsstrom I_{1n} erfasst. Winkeldetektoren 16 ermitteln daraus den Winkel θ_n , d.h. die Winkelverschiebung zwischen U_{1n} und U_2 , sowie den Winkel φ_n , d.h. die Winkelverschiebung zwischen U_{1n} und I_{1n} .

Eine innere Regelschleife subtrahiert den erfassten Winkel θ_n von dem von der äußeren Regelschleife vorgegebenen Sollwert θ_n^* . Die sich daraus ergebende Differenz wird an den Eingang eines PI-Reglers 21 gegeben, an dessen Ausgang der Sollwert für die Schaltfrequenz f_s anliegt. Ein spannungsgeregelter Oszillator (VCO, "Voltage Controlled Oscillator") 18 wandelt diesen Sollwert in Schaltsignale um, die an die Treiber 12 des Wechselrichters 1 übertragen werden. Dabei steuert jede Steuerung 13 den ihr zugeordneten Wechselrichter 1 an.

Eine äußere Regelschleife dient zur Nachführung von θ_n^* bei sich verändernder ohmsch-induktiver Last 11, so dass sich der vom Benutzer vorgegebene Winkel φ_n^* einstellt. Dabei wird der erfasste Winkel φ_n von dem Sollwert φ_n^* subtrahiert und an einen weiteren PI-Regler oder einen I-Regler 17 gegeben. Am Ausgang liegt der Sollwert θ_n^* an, der an die innere Regelschleife übergeben wird.

Bei sich nicht verändernder ohmsch-induktiver Last 11 kann die äußere Regelschleife weggelassen werden.

Bezugszeichenliste

1	WR	Wechselrichter
2	GR	Gleichrichter
3	C_{dc}	Kondensator
4	U_{dc}	Spannungszwischenkreis
5	$L_1C_1L_2R$	Schwingkreis
6	L_1	Gesamtinduktivität der Resonanzdrosseln
7	L_{1n}	Resonanzdrossel des n-ten Wechselrichters
8	C_1	Resonanzkondensator
9	L_2	Gesamtinduktivität der ohmsch-induktiven Last(en)
10	R	ohmscher Widerstand der ohmsch-induktiven Last(en)
11	L_2R	Ohmsch-induktive Last
12		Treiber
13		Steuerung
14		Netztransformator
15		Spannungswandler
16		Phasendetektor
17		PI-Regler
18	VCO	"Voltage Controlled Oscillator": Spannungsgeregelter Oszillator; Erzeugt ein rechteckförmiges Schaltsignal mit spannungsabhängiger Frequenz
19		Treiber des IGBT
20		Treiber des Gleichrichters
21		PI-Regler
	f_o	Resonanzfrequenz
	f_s	Schaltfrequenz des Wechselrichters
	I_{1n}	Wechselrichterausgangsstrom
	I_1	Gesamtwechselrichterausgangsstrom
	U_{dc}	Spannung am Kondensator C_{dc}
	U_{1n}	Wechselrichterausgangsspannung des n-ten Wechselrichters
	U_1	Wechselrichterausgangsspannung bei einem Ein-

	Wechselrichtersystem
U_2	Spannung an der/den ohmsch-induktiven Last(en) L_2R
Z_1	Eingangsimpedanz des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises eines Ein- Wechselrichtersystems
φ_n	Winkel zwischen U_{1n} und I_{1n}
φ_n^*	Sollwert des Winkels zwischen U_{1n} und I_{1n}
θ_n	Winkel zwischen U_{1n} und U_2
θ_n^*	Sollwert des Winkels zwischen U_{1n} und U_2

Ansprüche

1. Anwendung eines Verfahrens zur Speisung einer induktiven Last (11) mit parallelgeschalteten weichschaltenden Wechselrichtern (1) beliebiger Anzahl, die von zumindest einem Gleichrichter (2) gespeist werden, wobei jedem Wechselrichter (1) zumindest eine Kondensatorbank (3) parallel vorgeschaltet wird, die an zumindest einen Spannungszwischenkreis angeschlossen wird und die Ausgänge der Wechselrichter (1) an eine Last angekoppelt werden,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Last (11) in Form eines Induktors oder eines Induktionsofens Bestandteil eines $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises (5), bestehend aus Drosseln (7) mit einer Gesamtinduktivität (6), zumindest einem Kondensator (8) und zumindest der ohmsch-induktiven Last (11), ist, dass die Wechselrichter (1) mit der Resonanzfrequenz (f_0) des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises (5) oder geringfügig oberhalb oder unterhalb der Resonanzfrequenz (f_0) mit der Schaltfrequenz (f_s) angesteuert werden, wobei die Resonanzfrequenz (f_0) sich aus der Parallelschaltung aller Gesamtinduktivitäten (6, 9) mit dem Resonanzkondensator (8) unter Vernachlässigung der Dämpfung wie folgt berechnet

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 \cdot L_1 \cdot L_2 / (L_1 + L_2)}}$$

dass für die Gesamtinduktivität (6) Resonanzdrosseln (7) eingesetzt werden, die derart auf die parallel geschalteten Wechselrichter (1) aufzuteilen sind, dass gilt

$$\left(\sum_n \frac{1}{L_{1n}} \right)^{-1} = L_1 \quad \text{mit } L_{1n}: \text{ Resonanzdrossel am Ausgang des } n\text{-ten Wechselrichters}$$

(1), und

L_1 : Gesamtinduktivität der Resonanzdrosseln, die sich aus der Parallelschaltung der einzelnen Resonanzdrosseln (7) ergibt,

und dass jede Resonanzdrossel (7) auf beide Ausgänge des jeweiligen Wechselrichters (1) in Form zweier unabhängiger Resonanzdrosseln mit gleich großer oder ungefähr gleich großer Induktivität aufgeteilt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Resonanzdrosseln (7) auf beide Ausgänge des jeweiligen Wechselrichters (1) in Form zweier Drosseln (6) gleich großer oder ungefähr gleich großer Induktivität aufgeteilt sind, deren Wicklungen auf einem gemeinsamen Kern aufgebracht sind.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass jedem Wechselrichter (1) ein eigener unabhängiger Gleichrichter (2) zwischen Wechselrichter (1) und Kondensator (3) vorgeschaltet wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Wechselrichter (1) aus abschaltbaren Leistungshalbleitern, insbesondere IGCT-, IGBT- und/oder MOSFET-Leistungshalbleitern, aufgebaut sind.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei Ausfall eines Wechselrichters (1) dieser elektrisch durch einen Leistungshalbleiter und/oder durch mechanisches Trennen vom speisenden Spannungszwischenkreis U_{dc} getrennt wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei Ausfall eines Wechselrichters (1) dieser ausgangsseitig elektrisch vom $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis (5) getrennt wird.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Wechselrichter (1) mit eigenen unabhängigen Steuerungen versehen werden, die ohne miteinander zu kommunizieren die Wechselrichter (1) synchron schalten und jeweils mit der Resonanzfrequenz (f_0) des $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreises (5) oder geringfügig oberhalb oder unterhalb der Resonanzfrequenz (f_0) mit der Schaltfrequenz (f_s) ansteuern.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Wechselrichter (1) mit einer Schaltfrequenz (f_s), die maximal 10 % oberhalb oder unterhalb der Resonanzfrequenz (f_0) liegt, angesteuert werden.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Wechselrichter (1) mit einer Schaltfrequenz (f_s), die maximal 5 % oberhalb oder unterhalb der Resonanzfrequenz (f_0) liegt, angesteuert werden.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Wechselrichter (1) mit einer Schaltfrequenz (f_s), die maximal 1 % oberhalb oder unterhalb der Resonanzfrequenz (f_0) liegt, angesteuert werden.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass den Steuerungen (13) der Wechselrichter (1) zur Berechnung der Schaltfrequenz (f_s) jeweils die Messgröße Wechselrichterausgangsspannung (U_{1n}) und zusätzlich zumindest eine der beiden Messgrößen Wechselrichterausgangsstrom (I_{1n}) und / oder Spannung (U_2) an der/den ohmsch-induktiven Last(en) (11) zur Verfügung gestellt werden.
12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Phase (φ_n) zwischen Wechselrichterausgangsspannung (U_{1n}) und –strom (I_{1n}) mittels Winkeldetektoren (16) ermittelt wird.
13. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Phase (θ_n) zwischen Wechselrichterausgangsspannung (U_{1n}) und der Spannung (U_2) an der Last (11) mittels Winkeldetektoren (16) ermittelt wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 – 13, dadurch gekennzeichnet, dass an Stelle der Messung der Wechselrichterausgangsspannung (U_{1n}) die in der Steuerung (13) vorhandenen Steuerimpulse zur Ermittlung der Phasenwinkel (φ_n) und (θ_n) verwendet werden.
15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 11 - 13, dadurch gekennzeichnet, dass bei konstanter/-n ohmsch-induktiver/-n Last(en) (11) das Verfahren um eine Regelschleife nach dem Prinzip der Phase-Locked-Loop (PLL) ergänzt wird, wobei der erfasste Winkel (θ_n) von einem vorgegebenen Sollwert (θ_n^*)

subtrahiert und die sich daraus ergebende Differenz an den Eingang eines Reglers (17) gegeben wird, so dass an dessen Ausgang der Sollwert für die Schaltfrequenz (f_s) anliegt, der über einen spannungsgeregelten Oszillator (18) an die Treiber (19) der Wechselrichter (1) übertragen wird und der Steuerung (13) der Sollwert (θ_n^*) vorgegeben wird, so dass sich bei der/den gegebenen konstanten Last(en) der gewünschte Winkel (φ_n) einstellt.

16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 11 - 13, dadurch gekennzeichnet, dass bei variabler/-n ohmsch-induktiver/-n Last(en) (11) das Verfahren um eine Regelschleife nach dem Prinzip der Phase-Locked-Loop (PLL) ergänzt wird, wobei der erfasste Winkel (φ_n) von einem vorgegebenen Sollwert (φ_n^*) subtrahiert und die sich daraus ergebende Differenz an dem Eingang eines Reglers (17) gegeben wird, so dass an dessen Ausgang der Sollwert für die Schaltfrequenz (f_s) anliegt, der über einen spannungsgeregelten Oszillator (18) an die Treiber der Wechselrichter (12) übertragen wird.

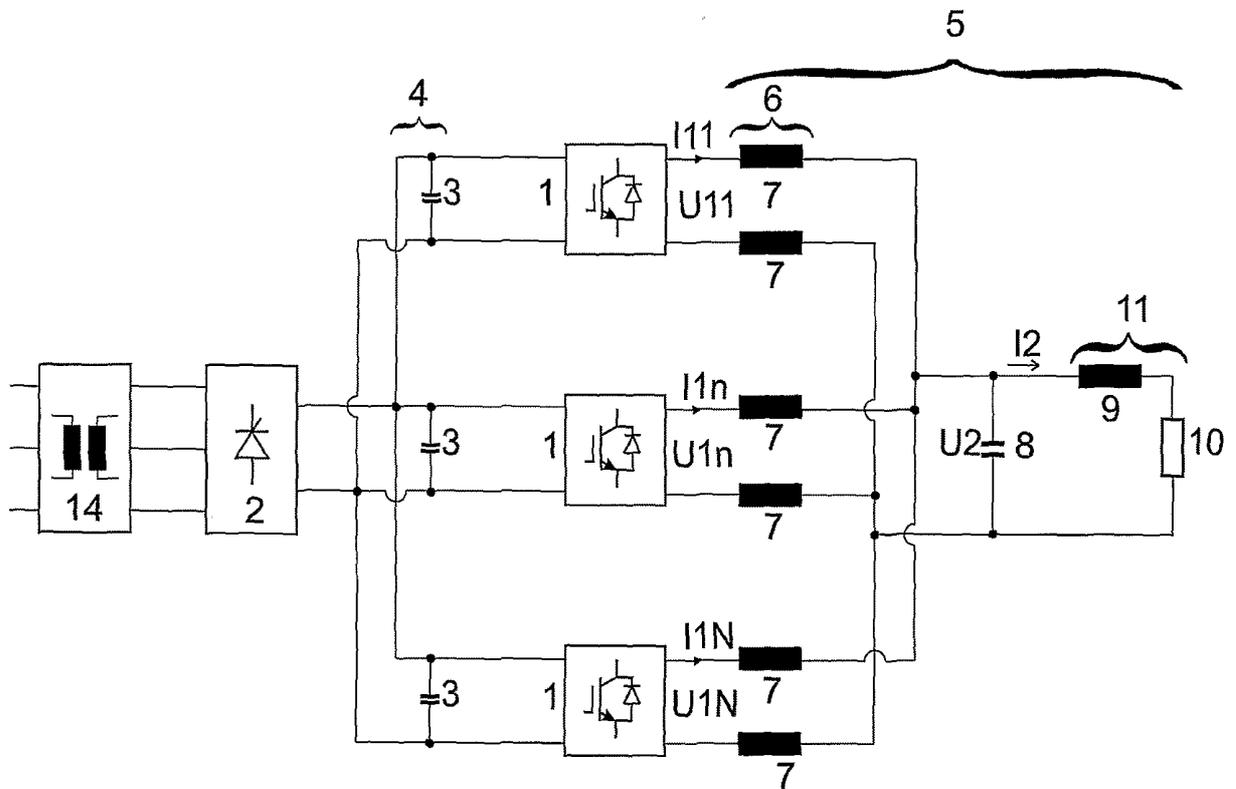
17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 11 - 14, dadurch gekennzeichnet, dass bei variabler/-n ohmsch-induktiver Last(en) (11) das Verfahren um zwei sich überlagernde Regelschleifen nach dem Prinzip der Phase-Locked-Loop (PLL) ergänzt wird, wobei

- die äußere Regelschleife zur Nachführung des Sollwertes (θ_n^*) bei sich verändernder/-n ohmsch-induktiven Last(en) (11) dient, worauf sich der vom Benutzer vorgegebene Winkel (φ_n^*) einstellt, von dem der erfasste Winkel (φ_n) subtrahiert und die so ermittelte Differenz an einen Regler (17) gegeben wird, so dass an dessen Ausgang der Sollwert (θ_n^*) anliegt, der an die innere Regelschleife übergeben wird, und
- die innere Regelschleife den erfassten Winkel (θ_n) von dem von der äußeren Regelschleife vorgegebenen Sollwert (θ_n^*) subtrahiert und die sich daraus ergebende Differenz an den Eingang eines weiteren Reglers (21) gegeben wird, so dass an dessen Ausgang der Sollwert für die Schaltfrequenz (f_s) anliegt, der über einen

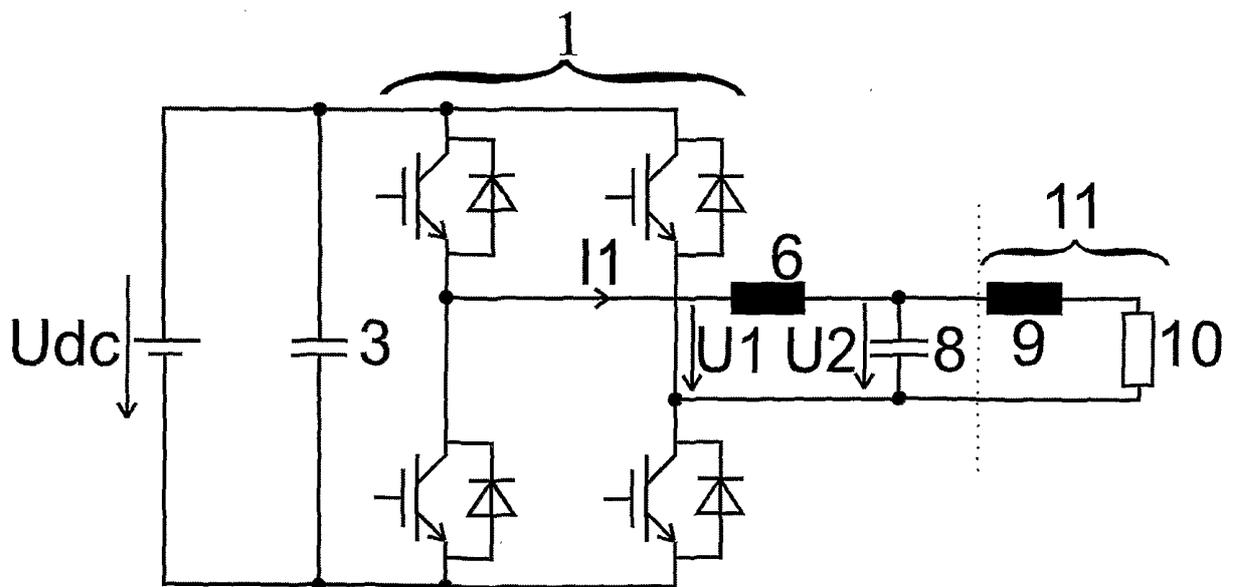
spannungsgeregelten Oszillator (18) an die Treiber (12) der Wechselrichter (1) übertragen wird.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 – 17, dadurch gekennzeichnet, dass für den Regler (17, 21) ein PI-Regler verwendet wird.

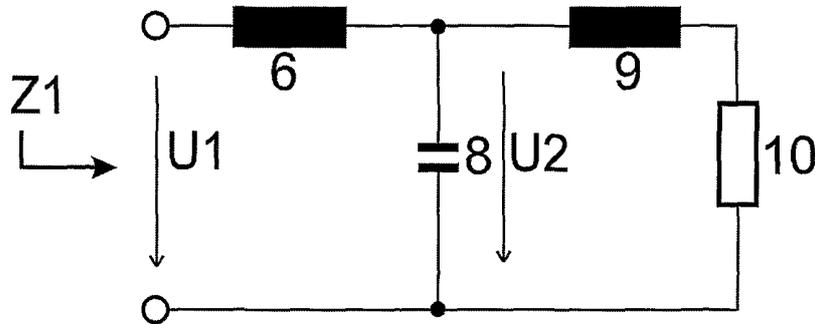
19. Vorrichtung zur Anwendung des Verfahrens nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass für parallelgeschaltete weichschaltende Wechselrichter (1) beliebiger Anzahl zumindest ein die Wechselrichter (1) speisender Gleichrichter (2) vorgesehen ist, wobei jedem Wechselrichter (1) zumindest ein Spannungszwischenkreis U_{dc} parallel vorgeschaltet ist und die Ausgänge der Wechselrichter (1) an zumindest einen $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis (5) bestehend aus Drosseln (7) mit einer Gesamtinduktivität (6), zumindest einem Kondensator (8) und zumindest einer ohmsch-induktiven Last (11), angekoppelt sind und zudem zumindest eine Steuerung vorgesehen ist.



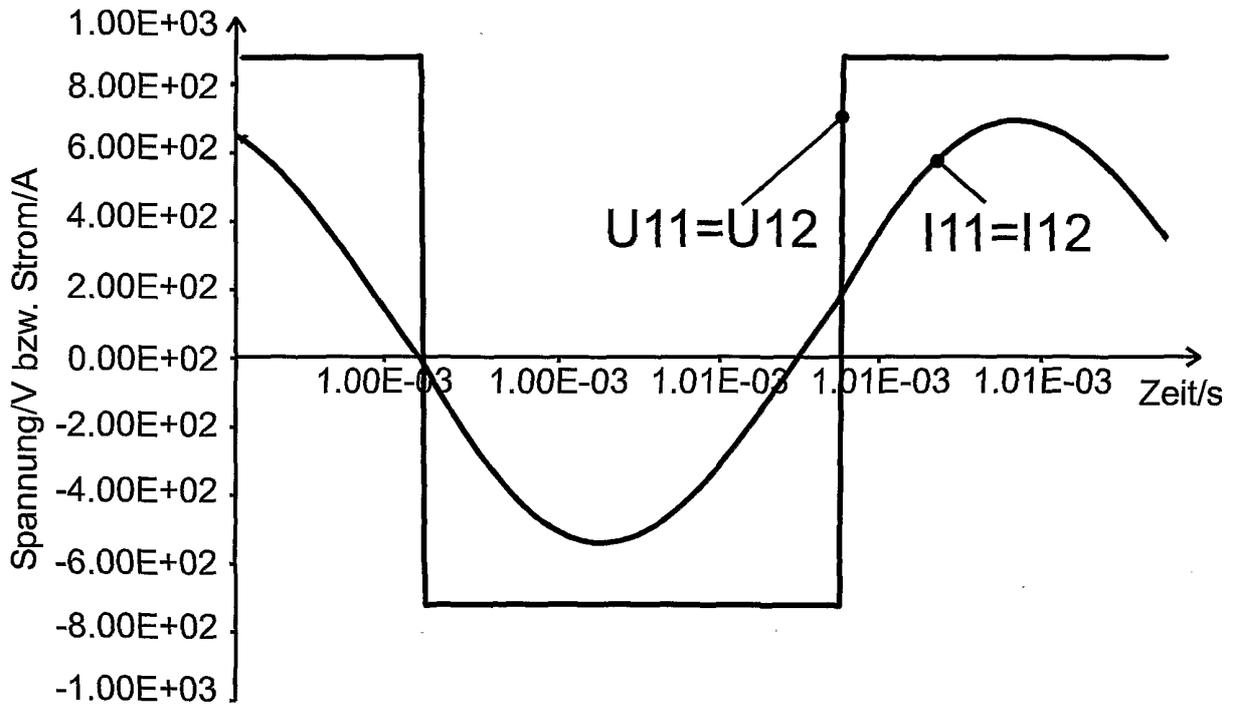
Figur 1: Topologie des Leistungsteils



Figur 2: Prinzipieller Aufbau eines IGBT-Wechselrichters mit Spannungswidenerkreis

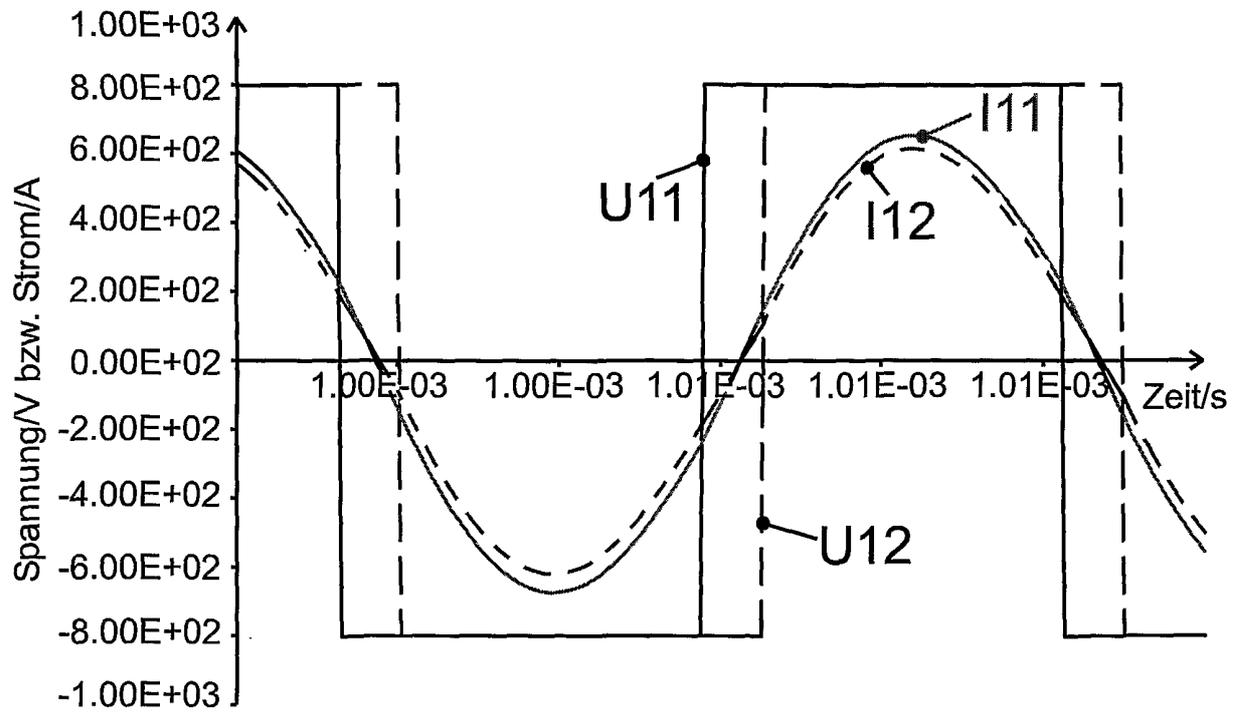


Figur 3: $L_1C_1L_2R$ -Parallelschwingkreis

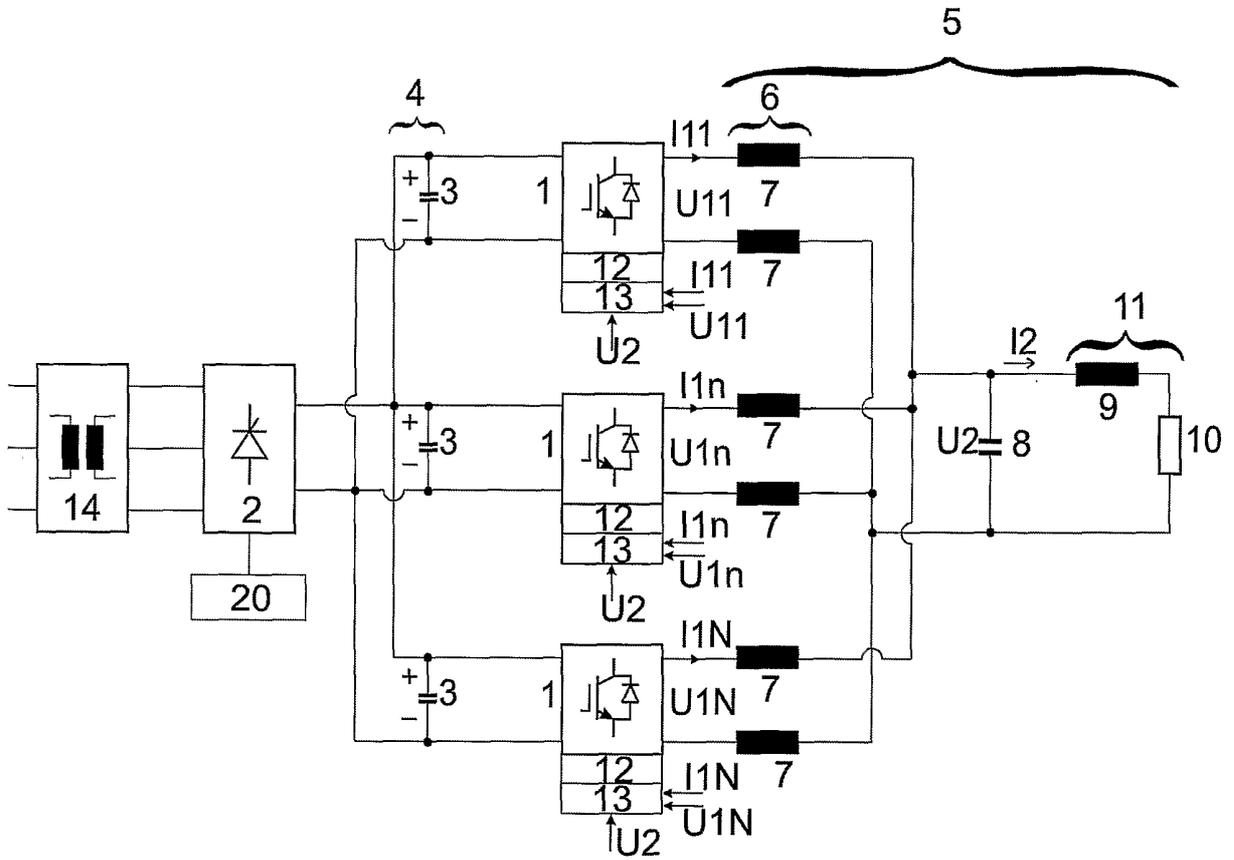


Figur 4: Simulierte Spannungen und Ströme am Ausgang von zwei exakt gleichzeitig schaltenden Wechselrichtern

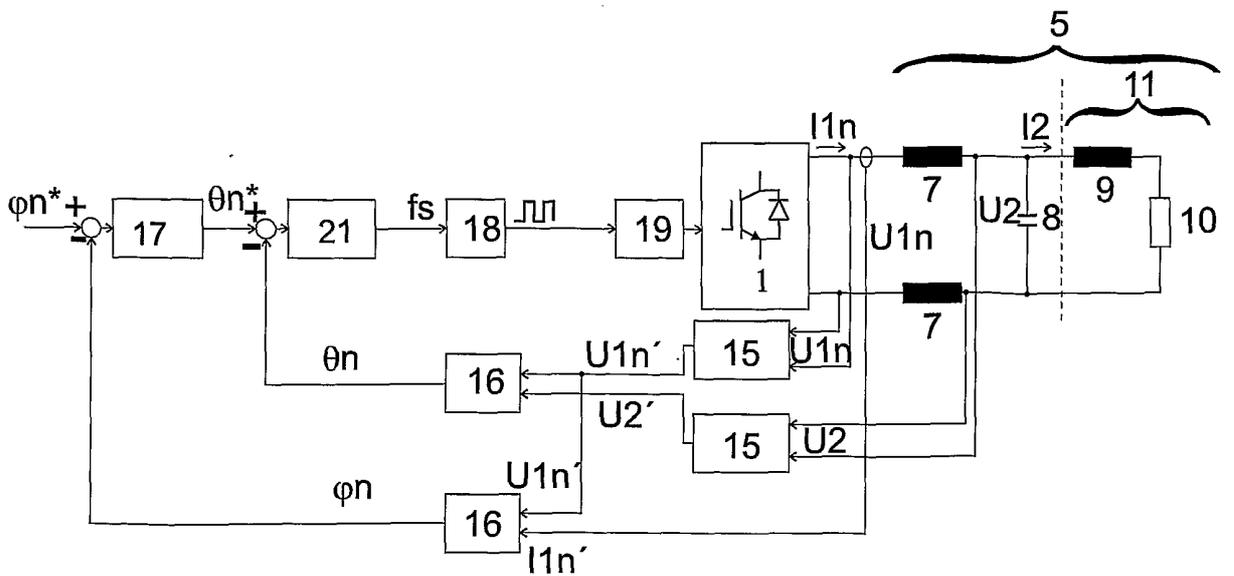
3 / 4



Figur 5: Simulierte Spannungen und Ströme am Ausgang von zwei nicht gleichzeitig schaltenden Wechselrichtern (Winkelverschiebung 30°)



Figur 6: Verteiltes Steuerkonzept



Figur 7: Regelkonzept