

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50829/2015
(22) Anmeldetag: 01.10.2015
(45) Veröffentlicht am: 15.04.2017

(51) Int. Cl.: **H02M 1/088** (2006.01)
G05F 1/618 (2006.01)
H02M 3/337 (2006.01)

(56) Entgegnungen:
 US 2006221656 A1
 US 2005063205 A1
 CN 102868313 A
 US 2013229829 A1

(73) Patentinhaber:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)

(74) Vertreter:
Patentanwälte Pinter & Weiss OG
1040 Wien (AT)

(54) Verfahren zum Ansteuern eines multiphasigen Synchronwandlers

(57) Ein multiphasiger Synchronwandler, bestehend aus mehreren Halbbrücken, wiederum bestehend aus jeweils einem oberen Leistungsschalter und jeweils einem unteren Leistungsschalter, wird durch eine Pulsweitenmodulation abhängig von einem vorgegebenen Tastgrad im Bereich von null bis hundert Prozent angesteuert. Der multiphasige Synchronwandler erzeugt einen Ausgangsstrom und wird in einem Normalmodus betrieben, in dem die Leistungsschalter mit einer durch eine vorgegebene Normalschaltfrequenz definierte Normalschaltperiode und einer vom aktuellen Tastgrad abhängigen Normalplusdauer schalten. Sobald der Tastgrad eine obere Tastgradschwelle überschreitet oder eine untere Tastgradschwelle unterschreitet, wird der multiphasige Synchronwandler vom Normalmodus in einen Betriebsmodus geschaltet, in dem zumindest einer der Leistungsschalter zumindest einer Halbbrücke über einen Zeitraum, der größer als die Normalschaltperiode ist, permanent deaktiviert.

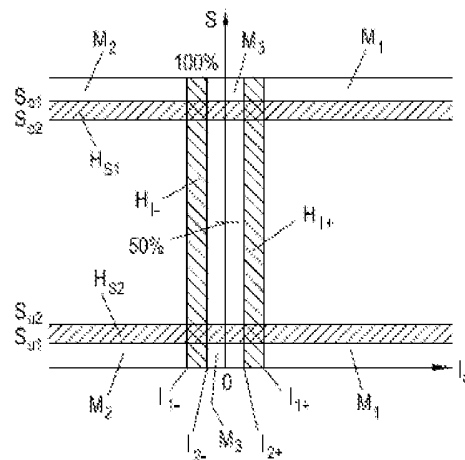


Fig. 4

Beschreibung

VERFAHREN ZUM ANSTEUERN EINES MULTIPHASIGEN SYNCHRONWANDLERS

[0001] Die gegenständliche Erfindung behandelt ein Verfahren zum Ansteuern eines multiphasigen Synchronwandlers, bestehend aus mehreren Halbbrücken wiederum bestehend aus jeweils einem oberen Leistungsschalter und jeweils einem unteren Leistungsschalter, durch eine Pulsweitenmodulation abhängig von einem vorgegebenen Tastgrad im Bereich von null bis hundert Prozent, wobei vom Synchronwandler ein Ausgangsstrom erzeugt wird und der multiphasige Synchronwandler in einem Normalmodus betrieben wird, in dem die Leistungsschalter mit einer durch eine vorgegebene Normalschaltfrequenz definierte Normalschaltperiode und einer vom aktuellen Tastgrad abhängigen Normalplusdauer schalten.

[0002] Die US 2006/0221656 A1 zeigt einen dreiphasigen Inverter, dessen drei Halbbrücken zwecks Spannungsstabilisierung um eine weitere, vierte Halbbrücke ergänzt werden. Um Gleichspannungen in andere Gleichspannungsbereiche zu transformieren sind diverse Gleichspannungswandler, gelegentlich auch Gleichspannungstransformatoren genannt, bekannt. Für bestimmte Anwendungen, wie beispielsweise für Batterieladegeräte oder Batterietestgeräte, sind leistungsfähige Gleichspannungswandler notwendig, die auch bidirektional betrieben werden können. Eine mögliche Realisierung eines bidirektionalen Gleichspannungswandlers stellt ein Synchronwandler dar, welche Tiefsetzsteller darstellen, d.h. welche Eingangsspannungen in Ausgangsspannungen kleiner oder maximal gleich der Eingangsspannungen wandeln, bzw. umgekehrt. Hierzu wird eine Halbbrücke verwendet, wobei die zwei Leistungsschalter der Halbbrücke von einer Steuerung mit Pulsweitenmodulation (PWM-Steuerung) derart angesteuert werden, dass sie innerhalb einer Schaltperiode, welche durch die vorgegebene Schaltfrequenz festgelegt ist, alternierend mit invertierten Schaltpulsen angesteuert, schalten. Somit ist im Grunde immer ein Leistungsschalter einer Halbbrücke leitend, der andere sperrt. Die Höhe der Ausgangsspannung des Synchronwandlers wird durch die Vorgabe des Tastgrades der PWM-Steuerung eingestellt. Der Tastgrad bezeichnet das Verhältnis der Pulsdauer der oberen Leistungsschalter einer Halbbrücke zur Schaltperiode. Diese Synchronwandler können auch als Mehrphasenwandler ausgeführt werden. In dieser Ausführungsform werden bekanntermaßen mehrere Halbbrücken mit jeweils zwei Leistungsschaltern über die Ausgangsdrosseln der Halbbrücken parallel geschaltet und von der PWM-Steuerung der Reihe nach angesteuert. So werden die Leistungsschalter in der Regel um einen Bruchteil der Schaltperiode versetzt getaktet angesteuert, in erster Linie um Ausgangsstromrippel zu reduzieren. Der Ausgangsstrom wird bei mehrphasigen Synchronwandlern mit einer festen Abtastrate bestimmt. Um zu gewährleisten, dass die Abtastpunkte jeweils auf die Strommittelwerte fallen, finden die Taktung der Leistungsschalter jeweils um die Schaltperiodendauer dividiert durch die Anzahl der Halbbrücken versetzt statt. Mit der mehrphasigen Ansteuerung lassen sich größere Ausgangsströme bei kleinerer Stromwelligkeit erzeugen, bzw. kann die Schaltfrequenz des Summenausgangsstroms eines solchen Mehrphasenwandlers reduziert werden, was eine einfachere Filterdimensionierung ermöglicht. Nicht zuletzt können in einem Mehrphasenwandler für den gleichen Leistungsbereich kleinere Kondensatoren verwendet werden.

[0003] Bekanntermaßen dürfen der obere und der untere Leistungsschalter einer Halbbrücke jedoch nicht gleichzeitig leitend geschaltet werden, da sonst der Spannungseingang des Synchronwandlers kurzgeschlossen wird. Aus diesem Grund ist es nicht möglich die beiden Leistungsschalter einer Halbbrücke gleichzeitig bzw. unmittelbar hintereinander zu schalten, da sonst riskiert werden würde, dass beispielsweise aufgrund von Schaltverzögerungen im Nano-/Mikrosekundenbereich dennoch für eine kurze Zeit beide Schalter leitend geschaltet werden und somit der Eingang kurzgeschlossen wird. Abhilfe schafft das Einfügen von Totzeiten zwischen dem Schalten der oberen und unteren Leistungsschalter einer Halbbrücke. Damit kann sichergestellt werden, dass der eine Schalter ausgeschaltet ist, bevor der andere Schalter eingeschaltet wird. Durch das Einfügen von Totzeiten tritt jedoch immer eine Reduktion des erreichbaren Tastgrades auf, da der erreichbare minimale und maximale Tastgrad und damit

die minimale und maximale Ausgangsspannung eingeschränkt werden. Damit wird also der abgedeckte Spannungsbereich des Synchronwandlers bei Ansteuerung mit invertierenden PWM-Signalen reduziert und es ist nicht möglich, besonders kleine oder besonders große Spannungen auszugeben. Das Ansteuern der Halbbrücke mit invertierenden PWM Signalen hat grundsätzlich den Sinn, dass der Strom innerhalb einer Pulsperiode kontinuierlich zwischen positiven und negativen Werten wechseln kann. Da im Normalbetrieb beide Leistungsschalter immer alternierend schalten, kann eine hohe oder niedrige Ausgangsspannung nicht genau eingestellt bzw. erreicht werden, da die Spannung durch die erforderlichen Pulse des anderen Leistungsschalter und die dadurch erzeugten Totzeiten beeinflusst wird. Somit kann auch keine theoretisch maximal oder minimal mögliche Spannung auf Ausgangsseite ausgegeben werden, ohne einen gewissen Fehler zu erhalten. Es sind zwar PWM-Steuerungen bekannt, die es zumindest ermöglichen einen Tastgrad von 100 Prozent zu erzeugen, jedoch gibt es eine Lücke bei Werten knapp unter 100 Prozent.

[0004] Es ist somit Ziel der vorliegenden Erfindung den erzielbaren Spannungsbereich eines Gleichspannungswandlers zu erweitern.

[0005] Dieses Ziel wird erreicht, indem sobald der Tastgrad eine erste obere Tastgradschwelle überschreitet oder eine erste untere Tastgradschwelle unterschreitet, vom Normalmodus in einen Betriebsmodus geschaltet wird, in dem zumindest einer der Leistungsschalter zumindest einer Halbbrücke über einen Zeitraum, der größer als die Normalschaltperiode ist, permanent deaktiviert wird. Dadurch entfällt die sonst erforderliche Totzeit, die zu einer Reduktion des Tastgradbereiches und damit auch des Spannungsbereichs führen würde.

[0006] Falls der Ausgangsstrom größer als eine erste positive Ausgangsstromschwelle oder kleiner als eine erste negative Ausgangsstromschwelle ist, kann der Synchronwandler zusätzlich in einen Sperrmodus geschaltet werden, indem alle unteren Leistungsschalter oder alle oberen Leistungsschalter, also die jeweiligen Leistungsschalter, die im Normalbetrieb noch kurze Pulse pro Periode beisteuern und damit zusätzlich eine Totzeit bewirken würde, permanent deaktiviert werden. „Deaktivieren“ bedeutet, dass der jeweilige Leistungsschalter permanent offen ist und keine Ansteuerpulse an ihm anliegen. Dadurch bestimmt alleine die Pulsweite des gegensätzlichen Leistungsschalters der Halbbrücke die Ausgangsspannung und es muss keine Totzeit zwischen dem Schalten der Leistungsschalter einer Halbbrücke berücksichtigt werden. Da sich die Normalschaltperiode im Sperrmodus nicht ändert kann die Abtastperiode des Ausgangsstroms beibehalten werden.

[0007] Im Extremfall können somit beispielsweise bei positivem Ausgangsstrom die oberen Leistungsschalter (bei mehrphasigen Synchronwandlern versetzt angesteuert) permanent schalten, wogegen alle unteren Leistungsschalter während des Sperrmodus permanent deaktiviert sind und ein Tastgrad von hundert Prozent erreicht wird. Im extremen Gegensatz können dazu können alle oberen Leistungsschalter permanent deaktiviert werden, wogegen alle unteren Leistungsschalter permanent (bei mehrphasigen Synchronwandlern wiederum versetzt) schalten was einen Tastgrad von null Prozent ergibt. Bei negativem Ausgangsstrom sind die Rollen der oberen und unteren Leistungsschalter vertauscht.

[0008] Würden bei niedrigen Ausgangsströmen alle oberen oder alle unteren Leistungsschalter gesperrt sein, dann ist ein Nulldurchgang des Ausgangsstromes nicht möglich. Fließt beispielsweise ein positiver Ausgangsstrom, so werden im Sperrmodus nur die oberen Leistungsschalter geschaltet. Wenn aber die unteren Leistungsschalter gesperrt sind, kann kein Stromwechsel von positiver auf die negative Richtung stattfinden, da die Energie in der Induktivität beim Ausgangsstromnulldurchgang Null ist und die Stromrichtungsumkehr auf negative Ausgangsströme erst passieren, wenn der untere Leistungsschalter durchschaltet und die Ausgangsspannung den Strom durch den unteren Leistungsschalter in die negative Richtung treiben würde. Die Eingangsspannung ist bei einem Synchronwandler größer als die Ausgangsspannung. So passieren Ausgangsstromlücken bei um Null Ampere und es können beispielsweise Oszillationen zwischen dem Sperrmodus für positiven Strom (Deaktivieren aller unteren Leistungsschalter) und dem Sperrmodus für negativen Strom (Deaktivieren aller oberen Leistungsschalter)

auftreten. Bei nicht niedrigen oder nicht hohen Tastgraden muss somit der Normalmodus anstatt des Sperrmodus verwendet werden um einen Nulldurchgang des Ausgangsstroms zu erzeugen. Bei niedrigen oder hohen Tastgraden ergibt der Normalmodus abermals die oben erwähnte Totzeitproblematik und die gewünschten Tastgrade und damit Ausgangsspannungen können nicht erreicht werden.

[0009] Abhilfe schafft hierbei ein Niedrigstrommodus, der aktiviert wird, wenn eine festgelegte zweite positive Ausgangsstromschwelle unterschritten und gleichzeitig eine zweite negative Ausgangsstromschwelle überschritten wird, wenn der Ausgangsstrom also in einem Bereich um den Nulldurchgang liegt. In diesem Niedrigstrommodus werden die Leistungsschalter mit einer Schaltperiode, die von der Abtastperiode um einen Faktor z erhöht wurden, abwechselnd geschaltet.

[0010] Damit reduziert sich der Einfluss der Totzeiten um den selben Faktor z , da z mal seltener umgeschaltet wird. Die Überschreitung der oberen oder unteren ersten Tastgradschwelle wird vorausgesetzt, da sonst der Normalmodus ausreichen würde.

[0011] Zusätzlich können die Pulsdauern zumindest der oberen oder der unteren Leistungsschalter einer Halbbrücke von der Pulsdauer um den Faktor m erhöht werden. Die um den Faktor m angehobene Pulsdauer ermöglicht es, die erforderliche Totzeit bei invertierenden Schalten der Halbbrücke zu berücksichtigen. Es wird erreicht, dass die Pulsbreiten für die sehr kleinen Ausgangsspannungen größer als die Totzeit wird, und somit ausgegeben werden können. Insgesamt ergibt sich nämlich eine höhere aufsummierte Gesamtpulsdauer über die einzelnen Impulse, die z mal seltener auftreten, jedoch m mal breiter sind.

[0012] Vorteilhafterweise wird im Niedrigstrommodus beispielsweise durch Erhöhung der Schaltperiode vorgesehen, dass innerhalb einer Abtastperiode nur eine Halbbrücke schaltet, der mehrphasige Synchronwandler also wie ein einphasiger Synchronwandler betrieben wird, wobei mit jeder Abtastperiode die schaltende Halbbrücke wechselt. Die Stromwelligkeit ist bei niedrigen Ausgangsströmen ohnehin gering, sodass der Verzicht auf ein verschachteltes Schalten der Halbbrücken mit vergrößerter Schaltperiode keine Nachteile für die Filterung des Ausgangsstromrippels mit sich bringt. Pro Abtastperiode kann somit jeweils abwechselnd eine Halbbrücke geschaltet werden.

[0013] Vorteilhafterweise entspricht der Faktor z dem Faktor m , womit einerseits derselbe Tastgrad wie in Normalmodus erreichbar ist, jedoch mit $z=m$ weniger auftretenden Totzeiten. Außerdem wird gewährleistet, dass die Abtastperiode des Ausgangsstrom immer den Mittelwert des gerade aktiven Leistungsschalter trifft und den gewünschten Tastgrad zu justieren.

[0014] Um Oszillationen zwischen Niedrigstrommodus und den Sperrmodus zu vermeiden ist es möglich Hysteresen zwischen erster positiver und zweiter positiver Ausgangsstromschwelle bzw. zwischen erster negativer und zweiter negativer Ausgangsstromschwelle zu erzeugen.

[0015] Wenn sich der Synchronwandler im Sperrmodus befindet, so kann er im Sperrmodus verbleiben, falls der Ausgangsstrom größer als eine zweite positive Ausgangsstromschwelle oder kleiner als eine zweite negative Ausgangsstromschwelle bleibt, je nach Polarität des Ausgangsstromes.

[0016] Wenn sich der Synchronwandler im Niedrigstrommodus befindet, so kann der Synchronwandler im Niedrigstrommodus verbleiben falls der Ausgangsstrom kleiner als die erste positive Ausgangsstromschwelle und größer als die erste negative Ausgangsstromschwelle bleibt verbleibt.

[0017] Falls keine Hysterese erwünscht ist, so können erste und zweite negative Ausgangsstromschwelle, bzw. erste und zweite positive Ausgangsstromschwelle jeweils gleichgesetzt werden.

[0018] Um zwischen Normalmodus und Sperrmodus, bzw. dem Niedrigstrommodus Oszillationen zu vermeiden kann eine weitere Hysterese erzeugt werden, indem zumindest eine weitere Tastgradschwelle festgelegt wird, die näher bei einem Tastgrad von 50% ist, als die obere und

die untere Tastgradschwelle. Ein Überschreiten der zweiten Tastgradschwelle bewirkt in jedem Fall ein Schalten in den Normalbetrieb. Dies ergibt effektiv eine Hysterese zwischen der zumindest einen weiteren Tastgradschwelle und der oberer Tastgradschwelle bzw. der unteren Tastgradschwelle.

[0019] Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 5 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

[0020] Fig.1 den schaltungstechnischen Aufbau eines vierphasigen Synchronwandlers,

[0021] Fig.2 Schaltdiagramme eines mehrphasigen Synchronwandlers in Normalmodus M_0

[0022] Fig.3 Schaltdiagramme eines mehrphasigen Synchronwandlers im Niedrigstrommodus M_3

[0023] Fig.4 eine Darstellung der möglichen Betriebsmodi M_0 , M_1 , M_2 , und M_3

[0024] Fig.5 Schaltdiagramme des Übergangs von Normalmodus und Betriebsmodi M_0 , M_1 , M_3 , M_2 und eine zugehörige Ausgangsstromkennlinie mit Nulldurchgang.

[0025] In Fig. 1 ist ein bekannter mehrphasiger, hier ein vierphasiger, Synchronwandler 1 nach dem Stand der Technik dargestellt. Bekanntermaßen sind Synchronwandler bidirektional, es seien jedoch in Folge die linke Seite beispielsweise als Eingangsseite mit der Eingangsspannung U_1 an der Eingangskapazität C_1 und die rechte Seite als Ausgangsseite mit der Ausgangsspannung U_2 an der Ausgangskapazität C_2 bezeichnet. Ebenso sind, wie bekannt, Induktivitäten X_1 , X_2 , X_3 , X_4 (Drosseln) an den einzelnen Phasen vorgesehen, wobei die Induktivitäten X_1 , X_2 , X_3 , X_4 einerseits zwischen dem oberen und unteren Leistungsschaltern mit jeweils einer Halbbrücke HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 verbunden sind und andererseits miteinander verbunden sind. Die Induktivitäten X_1 , X_2 , X_3 , X_4 bilden gemeinsam mit der Ausgangskapazität C_2 einen Ausgangsfilter des Synchronwandlers 1.

[0026] Die Halbbrücken HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 bestehen aus jeweils einem oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} und jeweils einem unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} und gegebenenfalls zugehörigen Dioden D_{o1} , D_{u1} , D_{o2} , D_{u2} , D_{o3} , D_{u3} , D_{o4} , D_{u4} . Eine PWM-Steuerung 2 (in Fig.1 nur für den Leistungsschalter L_{u1} angedeutet) steuert die Halbbrücken HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 , bzw. die Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} , L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} der Halbbrücken HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 , im Normalmodus M_0 derart an, dass innerhalb einer durch eine vorgegebene Normalschaltfrequenz definierte Normalschaltperiode T_0 die Halbbrücken HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 mit der Normalschaltperiode T_0 , jedoch um die Normalschaltperiode T_0 / x durch die Anzahl der Halbbrücken x versetzt, getaktet werden. Somit werden die oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} versetzt leitend geschaltet und währenddessen die jeweils zugehörigen unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} der betreffenden Halbbrücke HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 gesperrt. Nach einer Pulsdauer t_o der oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} werden jeweils die zuvor leitend geschalteten oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} gesperrt und die zuvor gesperrt geschalteten unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} werden leitend geschaltet. Nach einer Pulsdauer t_u der unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} werden diese wieder gesperrt und die oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} geschaltet. Die Rollen der oberen und unteren Leistungsschalter L_{o1} , L_{u1} , L_{o2} , L_{u2} , L_{o3} , L_{u3} , L_{o4} , L_{u4} der Halbbrücken HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 können natürlich auch vertauscht werden, beispielsweise bei geänderter Ausgangsstromrichtung.

[0027] Um zu verhindern, dass die oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} und unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} der Halbbrücken HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 gleichzeitig leitend geschaltet und dadurch der Spannungsingang kurzgeschlossen wird, wird nach jeder Normalplusdauer t_o , t_u eine Totzeit τ_t zwischen dem Ein/Abschalten des oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} und dem Ab/Einschalten des zugehörigen unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} der Halbbrücke HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 realisiert und umgekehrt. Dabei ergibt sich der nachvollziehbare Zusammenhang: Die Summe der Pulsdauern t_o der oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} und der Pulsdauern t_u der unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} plus zweimal die Totzeit τ_t

ergibt die Normalschaltperiode T_0 . Der Tastgrad S beschreibt dabei das Verhältnis zwischen der Pulsdauer t_o der oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ zur Normalschaltperiode T_0 . Das Verhältnis der Pulsdauern t_o der oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ und der Pulsdauern t_u der unteren Leistungsschalter $L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$ wird somit von der PWM-Steuerung 2 über den Tastgrad S und die Normaltastperiode T_0 bestimmt.

[0028] Ab beispielsweise Tastgraden von 25% ergeben sich bei $n=4$ vorhandenen Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 Überlappungen der Pulsdauern t_o, t_u der oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ bzw. der unteren Leistungsschalter $L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$, je nach Stromrichtung.

[0029] Die Einstellung der Ausgangsspannung U_2 erfolgt bei Synchronwandlern über den Tastgrad S . Ein Tastgrad S von hundert Prozent würde (bei positivem Ausgangsstrom I_a) somit bedeuten, dass die oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ permanent geschaltet ist und die unteren Leistungsschalter $L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$ aller Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 permanent gesperrt ist. Das würde ein Durchschalten der Eingangsspannung U_1 auf die Ausgangsspannung U_2 bewirken. Ein Tastgrad S von null Prozent würde im Gegenzug bedeuten, dass alle unteren Leistungsschalter $L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$ permanent geschaltet sind und die oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ aller Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 permanent gesperrt bzw. permanent deaktiviert sind. Dies bewirkt, eine Ausgangsspannung U_2 von Null. Da innerhalb einer Normalschaltperiode T_0 aufgrund der versetzten Schaltung der oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ und der notwendigen Pulse der zugehörigen unteren Leistungsschalter $L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$ und der damit zweimal benötigten Totzeit T_t nun der Tastgrad S nicht beliebig verkleinert oder vergrößert werden kann, sind diese extremen Tastgrade S normalerweise nicht erreichbar. Im Normalmodus M_0 ist der mögliche Bereich der Ausgangsspannung U_2 daher eingeschränkt.

[0030] In Fig. 2 ist das Schaltdiagramm der Leistungsschalter $L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$ dargestellt, wobei dabei jede der vier Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 versetzt mit der Normalschaltperiode T_0 durch die Anzahl x der Halbbrücken getaktet werden, also hier mit $T_0/4$. Die Abtastperiode T_s des Ausgangsstroms I_a ist dabei so eingestellt, dass sich zum Zeitpunkt der Abtastung ein Stromzweig den aktuellen Strommittelwert führt, was nach mit der Relation $T_s = T_0 \cdot i / (2 \cdot x)$ gewährleistet ist. Dabei stellt x die Anzahl der Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 dar und i eine natürliche Zahl von 1 bis $2x$. Den abgetasteten Ausgangsstromwert benötigt die PWM-Steuerung 2 für die Ansteuerung des Synchronwandlers 1. Es ist ein relativ geringer Tastgrad S dargestellt, d.h. die Pulsdauern t_o der oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ sind deutlich niedriger, als die Pulsdauern t_u der unteren Leistungsschalter $L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$. Die Totzeit T_t ist jeweils zwischen den einzelnen Pulsen ersichtlich. Die minimale Pulsdauer t_o der oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ in einer Normalschaltperiode T_0 ist somit durch die minimal erforderliche Pulsdauer t_o der oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ und in zweifacher Weise durch die Länge der Totzeit T_t begrenzt. Die minimale Pulsdauern t_o, t_u aller Leistungsschalter $L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$ liegen näherungsweise in der Größenordnung der Totzeit T_t . Damit ist der lineare Bereich des Tastgrads S und damit die minimale Ausgangsspannung in annähernd dreifacher Weise durch die Totzeit T_t begrenzt. Bei einem hohen Tastgrad S oder bei einem negativen Ausgangsstrom I_a ergibt sich dasselbe Problem bei vertauschten Rollen der oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ und der unteren Leistungsschalter $L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$.

[0031] Um den Bereich der Ausgangsspannung U_2 , also den Tastgrad auf die sonst nicht erreichbaren Werte knapp unter 100% bzw. knapp über 0% auszuweiten, wird erfindungsgemäß, sobald der Tastgrad S eine obere Tastgradschwelle S_{o1} überschreitet oder eine untere Tastgradschwelle S_{u1} unterschreitet, vom Normalmodus M_0 in einen Betriebsmodus M_1, M_2, M_3 geschaltet, in dem zumindest einer der Leistungsschalter $L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$ zumindest einer Halbbrücke HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 über einen Zeitraum, der größer als die Normalschaltperiode T_0 ist, permanent deaktiviert wird. „Deaktiviert“ bedeutet, dass der Leistungsschalter keine Pulse liefert, also offen ist, und damit die Schaltdauer des gegenüberliegenden Leistungsschalters durch keine Totzeit reduziert wird. Damit wird gegenüber dem Normalmodus M_0 innerhalb eines der Normalschaltperiode T_0 entsprechenden Zeitraums die Totzeit T_t , welche den Spannungsbereich begrenzen würde, annähernd mindestens dreimal eingespart.

[0032] Um die Funktionsweise der beispielhaften Betriebsmodi M_1 , M_2 , M_3 zu beschreiben sollen in Folge als Betriebsmodi Sperrmodi M_1 , M_2 , und ein Niedrigstrommodus M_3 unterschieden (Fig.4) werden.

[0033] Falls der Ausgangsstrom I_a größer als eine erste positive Ausgangsstromschwelle I_{1+} oder kleiner als eine erste negative Ausgangsstromschwelle I_{1-} ist (Fig.4), kann der Synchronwandler 1 in einen Sperrmodus M_1 , M_2 geschaltet werden, indem alle unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} (bei $I_a > I_{1+}$) oder alle oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} (bei $I_a < I_{1-}$) permanent deaktiviert werden solange sich der mehrphasige Synchronwandler 1 im Sperrmodus M_1 , M_2 befindet. Dazu muss, wie oben erwähnt die vom Synchronwandler 1 gewünschte Ausgangsspannung U_2 ein Tastverhältnis größer der ersten oberen Tastgradschwelle S_{o1} oder kleiner der ersten unteren Tastgradschwelle S_{u1} erfordern.

[0034] Falls also die obere oder untere Tastgradschwelle S_{o1} , S_{u1} überschritten wurde und der Ausgangsstrom I_a beispielsweise die erste positive Ausgangsstromschwelle I_{1+} überschreitet, so werden alle unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} aller Halbbrücken HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 permanent deaktiviert, was zum Sperrmodus M_1 führt. Die oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} schalten weiterhin versetzt um die Normalschaltperiode T_0 durch die Anzahl der Halbbrücken HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 mit einer Pulsdauer t_o je nach gewünschtem Tastgrad S . Es gibt jedoch den Vorteil, dass nun höhere und niedrigere Pulsdauern t_o und damit höhere und niedrigere Tastgrade S als im Normalmodus M_0 ermöglicht werden. Da die unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} im Sperrmodus M_1 nicht schalten, sind keine Totzeiten τ_t erforderlich und die Pulsdauern t_o sind nicht eingeschränkt.

[0035] Falls die obere Tastgradschwelle S_{o1} überschritten wurde, ist eine hohe Ausgangsspannung U_2 erwünscht. Diese Ausgangsspannung U_2 kann bei positivem Ausgangsstrom I_a durch Variation der Pulsdauern t_o der oberen Leistungsschaltern L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} beliebig eingestellt werden. Es ist somit auch ein Tastgrad S in einem Bereich knapp unter und bis zu hundert Prozent möglich, was bedeuten würde, dass die oberen Leistungsschaltern L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} fast permanent (im Falle eines mehrphasigen Synchronwandlers 1 abermals versetzt) oder permanent geschaltet sind. In jedem Fall ist die Limitierung durch die zweifache Totzeit τ_t und der mindesten Pulsdauer t_u (die in der Regel annähernd einer Totzeit τ_t entspricht) der unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} nicht mehr gegeben. Damit kann eine höhere Ausgangsspannung U_2 , erzielt werden. Für kleine Tastgrade S gilt ein analoger Sachverhalt. Falls die untere Tastgradschwelle S_{u1} unterschritten wurde, werden ebenso alle unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} aller Halbbrücke HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 permanent deaktiviert. Damit entfallen gleichermaßen Totzeiten τ_t und die Pulsdauern t_o der oberen Leistungsschaltern L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} können beliebig klein (bis zu einer Pulsdauer t_o in der Größenordnung der Totzeit τ_t und selbst bis zu einer Pulsdauer t_o von Null) gewählt werden. Damit sind kleine Tastgrade S möglich, ohne dass beide Totzeiten τ_t oder störende Pulse der unteren Leistungsschaltern L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} beitragen.

[0036] Falls jedoch der Ausgangsstrom I_a die erste negative Ausgangsstromschwelle I_{1-} unterschreitet, so werden alle oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} aller Halbbrücken HB_1 , HB_2 , HB_3 , HB_4 permanent deaktiviert, was zum Sperrmodus M_2 führt. In diesem Sperrmodus M_2 schalten die unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} weiterhin versetzt und mit Pulsdauern t_u je nach gewünschtem Tastgrad S . Somit können auch bei negativem Ausgangsstrom I_a hohe und niedrige Tastgrade S ermöglicht werden, da nun die unteren oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} nicht schalten, und keine Totzeiten τ_t einfließen. Im Vergleich zum zuvor genannten Sperrmodus M_1 , also bei positivem Ausgangsstrom I_a , werden also im Sperrmodus M_2 bei negativem Ausgangsstrom I_a die Rollen der oberen Leistungsschalter L_{o1} , L_{o2} , L_{o3} , L_{o4} und unteren Leistungsschalter L_{u1} , L_{u2} , L_{u3} , L_{u4} vertauscht.

[0037] Für kleine Ausgangsströme I_a , d.h. falls der Ausgangsstrom I_a kleiner als die zweite positive Ausgangsstromschwelle I_{2+} und größer als die zweite negative Ausgangsstromschwelle I_{2-} ist, also wenn der Ausgangsstrom I_a in einem Bereich um den Stromnulldurchgang liegt, kann der Synchronwandler 1 in einen Niedrigstrommodus M_3 als Betriebsmodus geschaltet werden.

Hierbei werden die Leistungsschalter $L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}, L_{31}, L_{32}, L_{41}, L_{42}$ mit einer Schaltperiode T_3 die der um einen Faktor z erhöhten Normalschaltperiode T_0 entspricht, geschaltet. Dies bedeutet, dass die Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 nicht wie im Normalmodus M_0 mit der Normalschaltperiode T_0 getaktet werden. Anders gesagt durchlaufen innerhalb eines der Normalschaltperiode T_0 entsprechenden Zeitraums nicht alle Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 eine Umschaltphase, d.h. es wechseln nicht alle oberen Leistungsschalter $L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$ und unteren Leistungsschalter $L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$ den Zustand, indem sie von leitend auf gesperrt und umgekehrt geschaltet werden. Daraus folgt bei einem Faktor z von zumindest Zwei, dass innerhalb eines der Normalschaltperiode T_0 entsprechenden Zeitraums zumindest einer der Leistungsschalter $L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}, L_{31}, L_{32}, L_{41}, L_{42}$ deaktiviert ist, obwohl er im Normalmodus M_0 schalten würde.

[0038] Vorteilhafterweise kann der Faktor z derart gewählt werden, dass er der Relation $z = x/i$ genügt, wobei i einen Wert von 1 bis $x-1$ darstellt, und x die Anzahl der Halbbrücken darstellt.

[0039] Weiters kann nur eine Halbbrücke HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 pro Tastperiode T_s geschaltet werden, was beispielsweise durch geeignete Wahl des Faktors z und damit der Schaltperiode T_3 erreicht werden kann.

[0040] Um den Sachverhalt zu skizzieren, sei auf Fig.3 verwiesen. Die Schaltperiode T_3 entspricht in diesem Beispiel der $z=4$ -fachen Abtastperiode T_s (mit $x=4, i=1$). Dies bewirkt damit beispielsweise bei einer Abtastperiode T_s von $3/4 T_0$, eine Schaltperiode T_3 von $3T_0$ und bedeutet, dass nur ein Drittel der Totzeiten t_t innerhalb des gleichen Zeitraums auftreten. Es sind im Niedrigstrommodus M_3 nur acht Totzeiten t_t innerhalb der Schaltperiode $T_3 = 3 \cdot T_0$ abzuzählen. Zum Vergleich sind lt. Fig.2 innerhalb desselben Zeitraums 3-mal so viele, also 24 Totzeiten t_t im Normalmodus M_0 zu berücksichtigen. Innerhalb einer Normalschaltperiode T_0 ist im Niedrigstrommodus M_3 immer mindestens einer der Leistungsschalter $L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$ deaktiviert, welcher im Normalmodus M_0 aktiv wäre. In der ersten Normalschaltperiode T_0 betrifft dies hier die Leistungsschalter L_{o1}, L_{o2}, L_{o3} , in der zweiten Normalschaltperiode T_0 die Leistungsschalter L_{o1}, L_{o3}, L_{o4} , usw.

[0041] Vorteilhafterweise können im Niedrigstrommodus M_3 gleichzeitig die Pulsdauern t_o, t_u der Leistungsschalter $L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$ um einen Faktor m erhöht werden. Die um den Faktor m angehobenen Pulsdauern t_o, t_u ermöglichen es beispielsweise bei sehr kleinen Tastgraden S auch kleinere Ausgangsspannungen U_2 auszugeben, da sich die Relation von Pulsdauern t_o, t_u zur Totzeit T_t um den Faktor m verbessert. Insgesamt ergibt sich eine höhere aufsummierte Gesamtpulsdauer über die einzelnen Pulsdauern t_o, t_u , die z mal seltener auftreten, jedoch m mal breiter sind.

[0042] Es kann der Faktor m dem Faktor z gleich gewählt werden, womit sich derselbe Tastgrad S (also dieselbe Summe aller Pulsdauern innerhalb einer Normalschaltperiode T_0) wie im Normalmodus M_0 ergibt, womit gewährleistet ist, dass die Abtastungen des Ausgangsstroms I_a zu einem Zeitpunkt erfolgen, in dem sich eine Phase im Strommittelwert befindet. Gleichfalls ergibt sich dadurch auch, dass die Abtastung des Ausgangsstroms I_a im Niedrigstrommodus M_3 nicht geändert werden muss.

[0043] Um nun Oszillationen zwischen den Sperrmodi M_1, M_2 und dem Niedrigstrommodus M_3 zu vermeiden, kann jeweils eine Hysterese H_{1+} zwischen der ersten positiven Ausgangsstromschwelle I_{1+} und der zweiten positiven Ausgangsstromschwelle I_{2+} und eine Hysterese H_{1-} zwischen der ersten negativen Ausgangsstromschwelle I_{1-} und der zweiten negativen Ausgangsstromschwelle I_{2-} realisiert werden. Dabei muss vorgesehen werden, dass die erste positive Ausgangsstromschwelle I_{1+} größer als die zweite positive Ausgangsstromschwelle I_{2+} , bzw. die erste negative Ausgangsstromschwelle I_{1-} kleiner als die zweite negative Ausgangsstromschwelle I_{2-} ist.

[0044] Falls bei aktivem Sperrmodus M_1, M_2 (d.h. die erste positive Ausgangsstromschwelle I_{1+} wird überschritten bzw. die erste negative Ausgangsstromschwelle I_{1-} wurde unterschritten) der Ausgangsstrom I_a größer als eine zweite positive Ausgangsstromschwelle I_{2+} oder kleiner

als eine zweite negative Ausgangsstromschwelle I_{2-} bleibt, kann der der Synchronwandler 1 also entsprechend der zugehörigen Hysterese H_{I-}, H_{I+} im jeweiligen Sperrmodus M_1, M_2 verbleiben.

[0045] Kreuzt der Ausgangsstrom I_a bei aktivem Sperrmodus M_1, M_2 also die zweite positive Ausgangsstromschwelle I_{2+} oder die zweite negative Ausgangsstromschwelle I_{2-} , nähert sich der Ausgangsstrom I_a also betragsmäßig gegen Null, so wird der Niedrigstrommodus M_3 aktiviert.

[0046] Bleibt bei aktivem Niedrigstrommodus M_3 (d.h. der Ausgangsstrom hat die zweite negative Ausgangsstromschwelle I_{2-} überschritten, bzw. die zweite positive Ausgangsstromschwelle I_{2+} unterschritten) der Ausgangsstrom I_a kleiner als die erste positive Ausgangsstromschwelle I_{1+} und größer als die erste negative Ausgangsstromschwelle I_{1-} , so kann der der Synchronwandler also im Niedrigstrommodus M_3 verbleiben.

[0047] Kreuzt der Ausgangsstrom I_a also bei aktivem Niedrigstrommodus M_3 die erste positive Ausgangsstromschwelle I_{1+} oder die erste negative Ausgangsstromschwelle I_{1-} , so wird der Niedrigstrommodus deaktiviert und je nach Stromrichtung der Sperrmodus M_1 oder M_2 aktiviert.

[0048] Entspricht die erste positive Ausgangsstromschwelle I_{1+} der zweiten positiven Ausgangsstromschwelle I_{1+} und/oder die erste negative Ausgangsstromschwelle I_{1-} der zweiten negativen Ausgangsstromschwelle I_{2-} , so wird auf eine Hysterese H_{I+} , bzw. H_{I-} verzichtet.

[0049] Um Oszillationen auch zwischen dem Normalmodus M_0 und den Betriebsmodi M_1, M_2, M_3 zu verhindern, kann zumindest eine weitere Hysterese H_{S0}, H_{Su} realisiert werden. Hierzu wird zumindest eine weitere Tastgradschwelle S_{02}, S_{u2} vorgesehen, die näher bei einem Tastgrad von $S = 50\%$ liegt als die obere Tastgradschwelle S_{01} und die untere Tastgradschwelle S_{u1} . Nach Kreuzen der weiteren Tastgradschwelle S_{02}, S_{u2} wird der Synchronwandler in jedem Fall in den Normalmodus M_0 geschaltet wird.

[0050] Die möglichen Betriebszustände und realisierbaren Hysteresen $H_{I+}, H_{I-}, H_{S0}, H_{Su}$, sowie mögliche Ausgangsstromschwellen $I_{1-}, I_{2-}, I_{1+}, I_{2+}$ und Tastgradschwellen $S_{01}, S_{02}, S_{u1}, S_{u2}$ sind in Fig 4 über Ausgangsstrom I_a und Tastgrad S aufgetragen.

[0051] Fig.5 zeigt einen Verlauf des Ausgangsstroms I_a durch den Nulldurchgang und somit den Übergang vom Normalmodus M_0 zuerst in den Sperrmodus M_1 , daraufhin in den Niedrigstrommodus M_3 und in weiterer Linie in den Sperrmodus M_2 . Im Normalmodus M_0 werden alle der Leistungsschalter $L_{01}, L_{u1}, L_{02}, L_{u2}, L_{03}, L_{u3}, L_{04}, L_{u4}$ nach einer dem Stand der Technik entsprechenden PWM-Steuerung 2 geschaltet. Da in weiterer Folge der Tastgrad S sinkt und der Ausgangsstrom I_a positiv und ausreichend hoch ist, wird der Sperrmodus M_1 aktiviert, indem die unteren Leistungsschalter $L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$ deaktiviert werden. Bei Annäherung des Ausgangsstroms I_a an den Nulldurchgang wird bei entsprechend niedrig bleibendem Tastgrad S der Niedrigstrommodus M_3 aktiviert. In diesem Modus schalten wieder alle Leistungsschalter $L_{01}, L_{u1}, L_{02}, L_{u2}, L_{03}, L_{u3}, L_{04}, L_{u4}$. Wie jedoch gut zu erkennen ist, wurde die Schaltperiodendauer T_3 auf ein z -faches (hier vierfaches) der Abtastperiode T_s erhöht. Ebenso wurden die Pulsdauern t_o, t_u auf ein m -faches erhöht. Zu beachten ist, dass die Abtastpunkte (unterster Graph) des Synchronwandlers 1 unverändert bleiben, d.h. die Abtastrate T_s ändert sich auch im Niedrigstrommodus M_3 nicht. Die Summe der Pulsdauern t_o, t_u im Niedrigstrommodus M_3 entsprechen bei gleichbleibender Abtastrate T_s dennoch der Summe der Pulsdauern t_o, t_u im Normalmodus M_0 , woraufhin der Tastgrad S bestimmt werden kann. Nachdem der (negative) Ausgangsstrom I_a groß genug wird, wird vom Niedrigstrommodus M_0 auf den Sperrmodus M_2 geschaltet, da der Tastgrad S weiterhin klein genug bleibt. Dies bedeutet erfindungsgemäß, dass alle oberen Leistungsschalter $L_{01}, L_{02}, L_{03}, L_{04}$ permanent deaktiviert werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ansteuern eines multiphasigen Synchronwandlers (1), bestehend aus mehreren Halbbrücken (HB_1, HB_2, HB_3, HB_4), wiederum bestehend aus jeweils einem oberen Leistungsschalter ($L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$) und jeweils einem unteren Leistungsschalter ($L_{u1}, L_{u2}, L_{u3}, L_{u4}$), durch eine Pulsweitenmodulation abhängig von einem vorgegebenen Tastgrad (S) im Bereich von null bis hundert Prozent, wobei vom Synchronwandler (1) ein Ausgangsstrom (I_a) erzeugt wird und der multiphasige Synchronwandler (1) in einem Normalmodus (M_0) betrieben wird, in dem die Leistungsschalter ($L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$) mit einer durch eine vorgegebene Normalschaltfrequenz definierte Normalschaltperiode (T_0) und einer vom aktuellen Tastgrad (S) abhängigen Normalplusdauer (t_0, t_u) schalten, **dadurch gekennzeichnet, dass** sobald der Tastgrad (S) eine obere Tastgradschwelle (S_{o1}) überschreitet oder eine untere Tastgradschwelle (S_{u1}) unterschreitet, der multiphasige Synchronwandler (1) vom Normalmodus (M_0) in einen Betriebsmodus (M_1, M_2, M_3) geschaltet wird, in dem zumindest einer der Leistungsschalter ($L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$) zumindest einer Halbbrücke (HB_1, HB_2, HB_3, HB_4) über einen Zeitraum, der größer als die Normalschaltperiode (T_0) ist, permanent deaktiviert wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** falls der Ausgangsstrom (I_a) größer als eine erste positive Ausgangsstromschwelle (I_{1+}) oder kleiner als eine erste negative Ausgangsstromschwelle (I_{1-}) ist, der mehrphasige Synchronwandler (1) in einen Sperrmodus (M_1, M_2) als Betriebsmodus geschaltet wird, indem alle unteren Leistungsschalter ($L_{12}, L_{22}, L_{32}, L_{42}$) oder alle oberen Leistungsschalter ($L_{o1}, L_{o2}, L_{o3}, L_{o4}$) permanent deaktiviert werden, solange sich der multiphasigen Synchronwandler (1) im Sperrmodus (M_1, M_2) befindet.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine zweite positive Ausgangsstromschwelle (I_{2+}) und eine zweite negative Ausgangsstromschwelle (I_{2-}) vorhanden ist, der Ausgangsstrom (I_a) mit einer Abtastperiode (T_s) abgetastet wird **und dass** falls der Ausgangsstrom (I_a) kleiner als die zweite positive Ausgangsstromschwelle (I_{2+}) und größer als die zweite negative Ausgangsstromschwelle (I_{2-}) ist, der Synchronwandler (1) in einen Niedrigstrommodus (M_3) als Betriebsmodus geschaltet wird, indem die Leistungsschalter ($L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$) mit einer Schaltperiode (T_3), die der um einen Faktor z erhöhten Abtastperiode (T_s) entspricht, geschaltet werden.
4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest die oberen oder die unteren Leistungsschalter ($L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$) mit einer Pulsdauer (t_0, t_u), die der um einen Faktor m erhöhten Pulsdauer (t_0) entspricht, geschaltet werden.
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** innerhalb der Abtastperiode (T_s) des Ausgangsstroms I_a nur die Leistungsschalter ($L_{o1}, L_{u1}, L_{o2}, L_{u2}, L_{o3}, L_{u3}, L_{o4}, L_{u4}$) einer Halbbrücke (HB_1, HB_2, HB_3, HB_4) schalten.
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Faktoren z und m gleichgesetzt werden.
7. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** falls der Ausgangsstrom (I_a) größer als eine zweite positive Ausgangsstromschwelle (I_{2+}) oder kleiner als eine zweite negative Ausgangsstromschwelle (I_{2-}) bleibt, der Synchronwandler (1) im Sperrmodus (M_1, M_2) verbleibt.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** falls der Ausgangsstrom (I_a) kleiner als die eine erste positive Ausgangsstromschwelle (I_{1+}) und größer als die erste negative Ausgangsstromschwelle (I_{1-}) bleibt, der Synchronwandler (1) im Niedrigstrommodus (M_3) verbleibt.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet dass** die erste positive Ausgangsstromschwelle (I_{1+}) der zweiten positiven Ausgangsstromschwelle (I_{2+}) entspricht und/oder dass die erste negative Ausgangsstromschwelle (I_{1-}) der zweiten negativen Ausgangsstromschwelle (I_{2-}) entspricht.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet dass** zumindest eine weitere Tastgradschwelle (S_{o2} , S_{u2}) vorhanden ist, die näher bei 50% liegt als die obere Tastgradschwelle (S_{o1}) und die untere Tastgradschwelle (S_{u1}) **und dass** nach Kreuzen des Tastgrads (S) mit der zweiten weiteren Tastgradschwelle (S_{o2} , S_{u2}) der Synchronwandler (1) in jedem Fall in den Normalmodus (M_0) geschaltet wird.

Hierzu 4 Blatt Zeichnungen

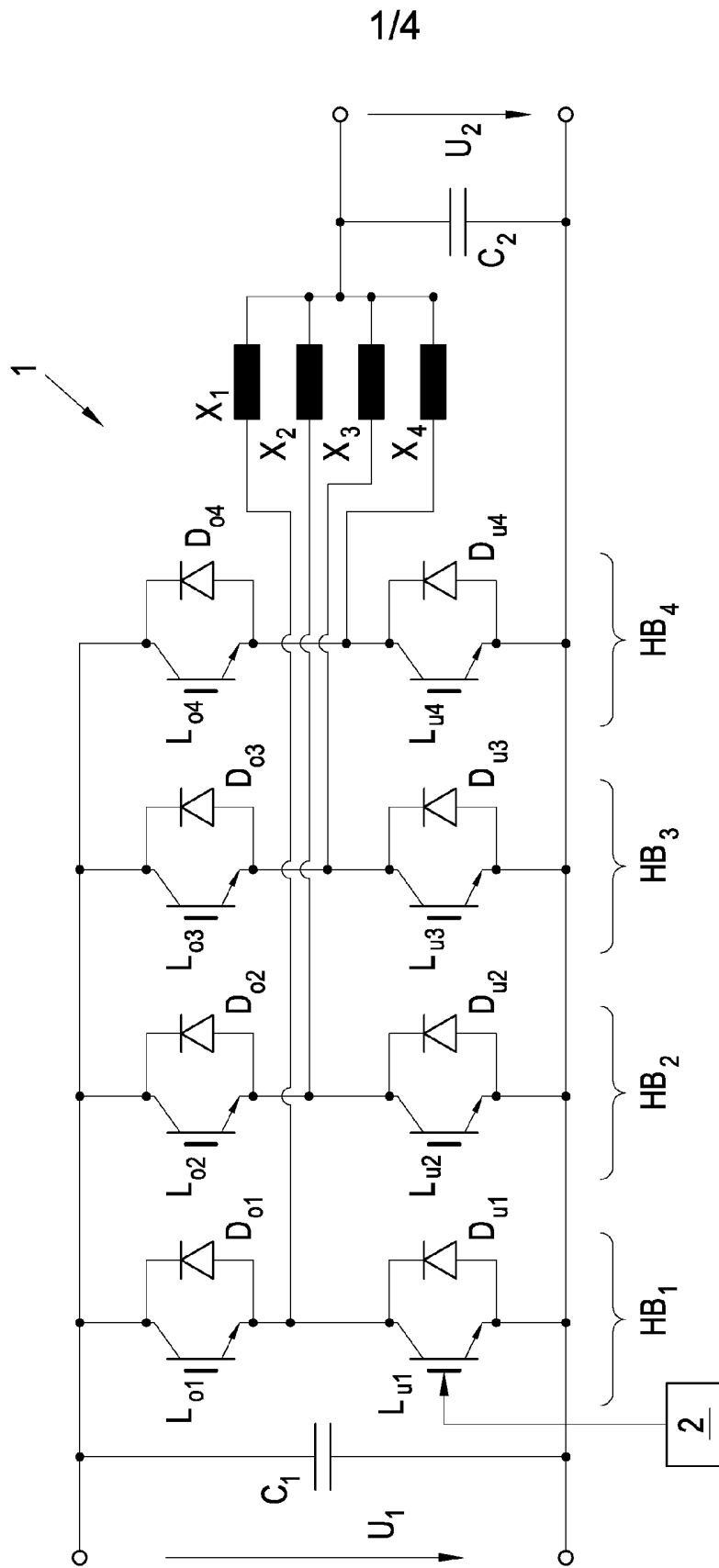


Fig. 1

2/4

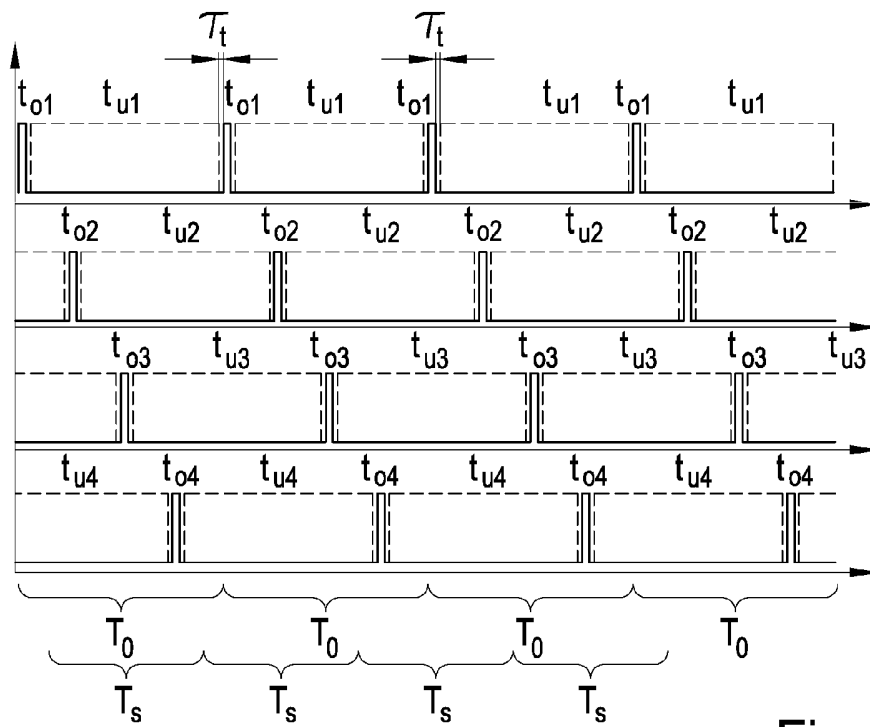


Fig. 2

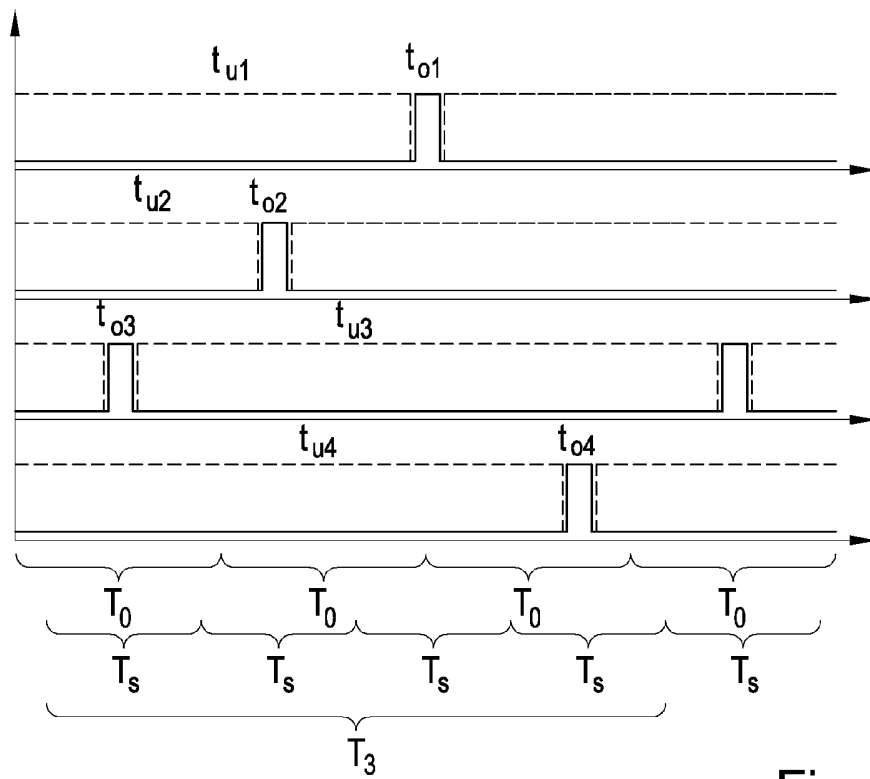


Fig. 3

3/4

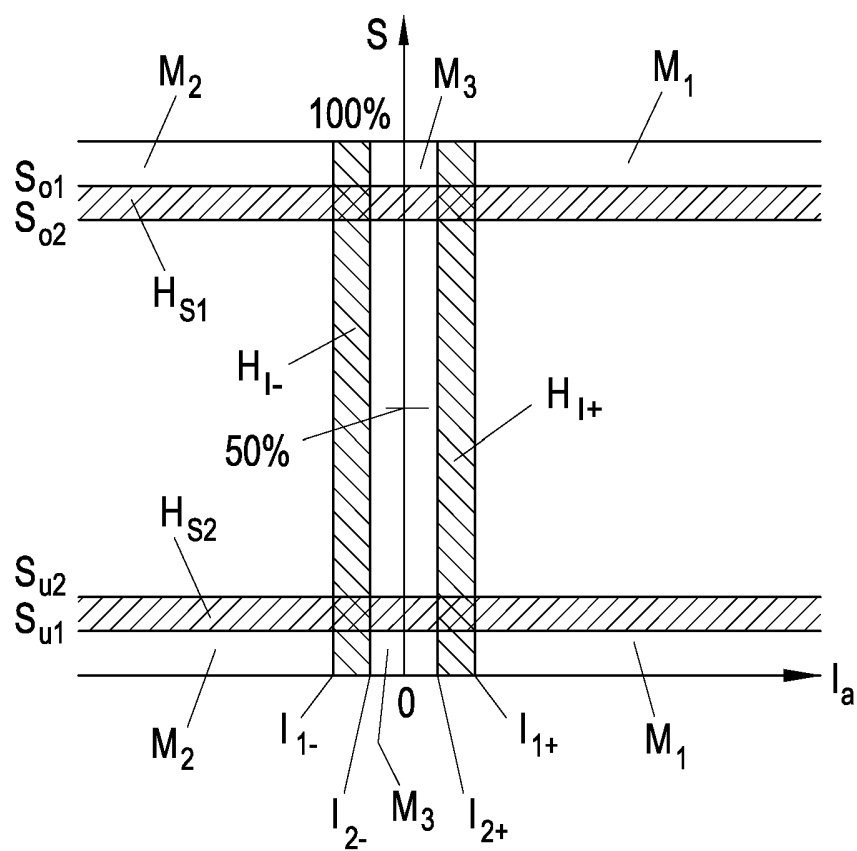


Fig. 4

4/4

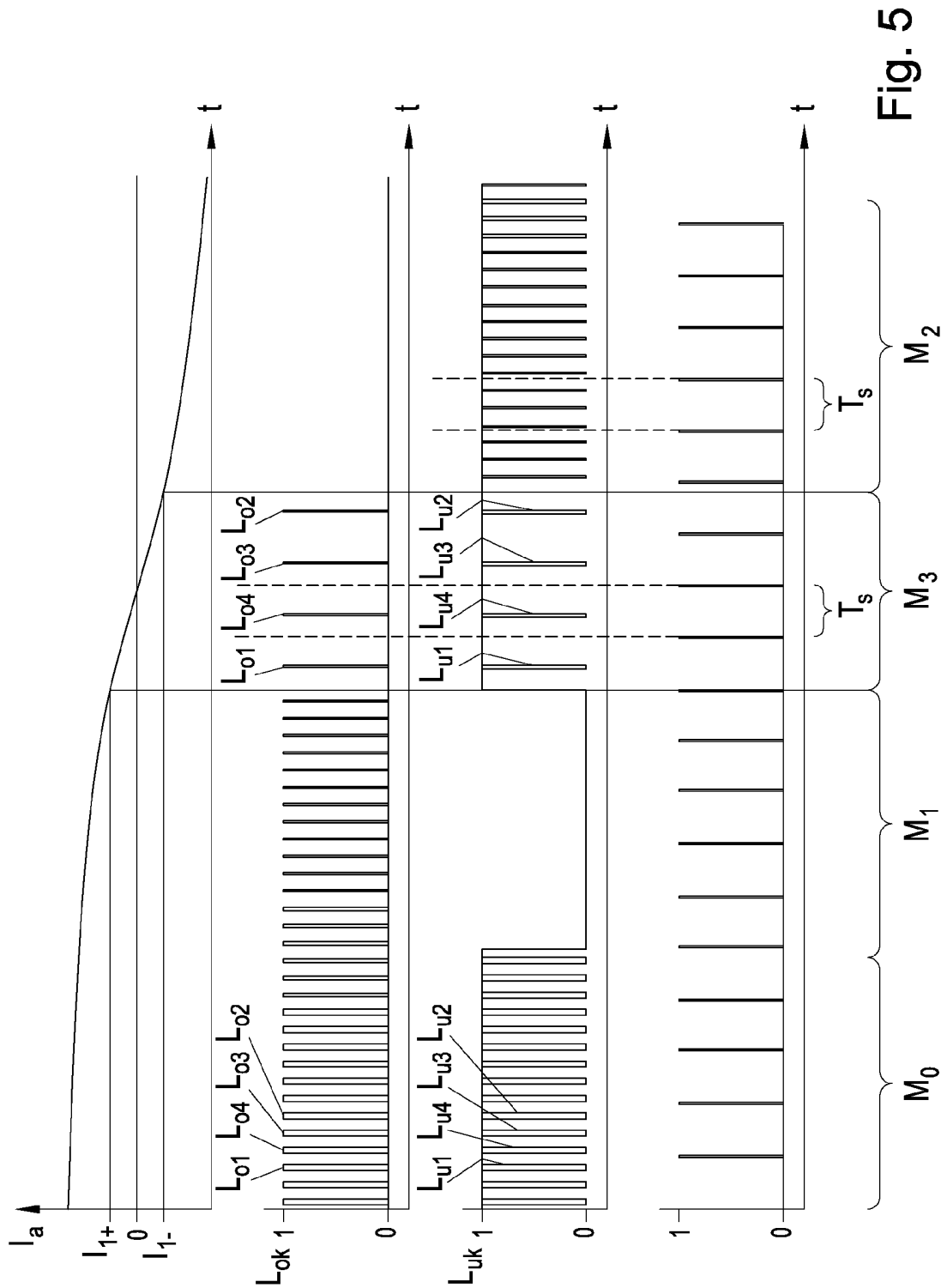


Fig. 5