



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) **CH** **701 759 B1**

(51) Int. Cl.: **H02M 1/15** (2006.01)
H02M 3/335 (2006.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 01405/09

(22) Anmeldedatum: 10.09.2009

(43) Anmeldung veröffentlicht: 15.03.2011

(24) Patent erteilt: 13.12.2013

(45) Patentschrift veröffentlicht: 13.12.2013

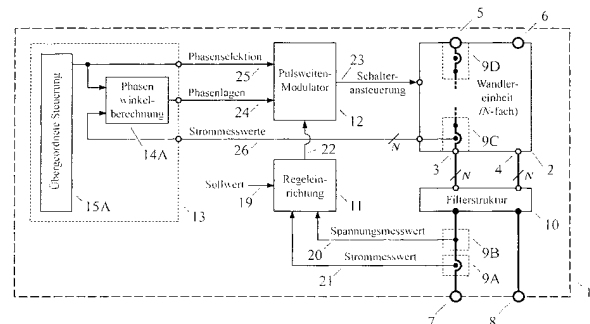
(73) Inhaber:
ETH Zürich, ETH transfer HG E 47-49 Rämistrasse 101
8092 Zürich (CH)

(72) Erfinder:
Stefan Waffler, 8051 Zürich (CH)

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

(54) **Verfahren zur Reduktion der Ausgangsspannungswelligkeit von mehrphasigen leistungselektronischen Wandlern.**

(57) Zur Reduktion der Spannungs- und Stromrestwelligkeit an einem Betriebsspannungsanschluss (7.8) eines Gleichstromwandlers (1), bestehend aus drei oder mehr identischen, parallel oder in Serie geschalteten Wandler-Einheiten (2) (Phasen), werden die Phasenlagen durch die erfindungsgemässen Ausführungsformen eines Phasenwinkel-Stellers (13) entweder durch Auswerten der Stellgrösse (22) einer analogen oder vorzugsweise digitalen Regeleinrichtung (11) oder durch Auswerten von mindestens einer der Regelgrössen der Regeleinrichtung (11) oder einer Kombination dieser Grössen eingestellt. Dazu wird aus diesen Grössen entweder Rückschluss auf die in den Wandler-Einheiten vorliegenden Bauteil- oder Ansteuer-Toleranzen und somit den Längen von Rippelzeigern geschlossen und durch ein Sortierverfahren und trigonometrische Rechnung mittels der Rippelzeiger die Phasenlagen für die Wandler-Einheiten (2) bestimmt, die zu einer Auslöschung der Grundschiwingung der Welligkeit führen, oder es wird die Welligkeit gemessen, bewertet und mit Hilfe eines iterativen Suchverfahrens zur schrittweisen Korrektur der Phasenlagen, das im Betrieb zyklisch und fortlaufend auf alle Wandler-Einheiten (2) angewandt wird, ein globales Minimum der Welligkeit gefunden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Reduktion der Welligkeit der Ausgangsspannung von leistungselektronischen Wandlern mit drei oder mehr Phasen gemäss dem Oberbegriff von Patentanspruch 1.

Stand der Technik

[0002] Getaktete Gleichspannungs-Wandler, wie Hochsetzsteller, Tiefsetzsteller oder Hochsetz-Tiefsetzsteller, die beispielsweise Anwendung finden bei der Stabilisierung von gleichgerichteten Wechsellspannungen, als Drehzahlsteller für Gleichstrommotoren, als Akkumulatorladegeräte oder als einstellbare Spannungsquellen, sind mit geschalteten Leistungshalbleitern aufgebaut, die eine eingangsseitige Gleichspannung als Zwischengrösse in ein pulsweitenmoduliertes Signal mit fester oder variabler Taktfrequenz umwandeln. Die dadurch ausgangsseitig verursachten Rippelströme und die Ausgangsspannungswelligkeit werden vorzugsweise durch Filterkondensatoren ausreichender Kapazität auf ein zulässiges Mass begrenzt. Dabei ist der erforderliche Kapazitätswert abhängig von einer während einer Schaltperiode zwischenspeichernden Ladungsmenge und daher umso geringer, je höher die Schaltfrequenz gewählt wird.

[0003] Da der Kapazitätswert bestimmend ist für das Kondensatorbauvolumen, das zu einem wesentlichen Anteil zum Gesamtvolumen des Wandlers beiträgt, ist es vorteilhaft, einen Wandler bei möglichst hoher Schaltfrequenz zu betreiben, um eine kompakte Bauform zu erhalten. In der Praxis jedoch existiert eine obere Schranke für die Wahl der Schaltfrequenz, die unter anderem bedingt ist durch die dynamischen Verluste der Leistungshalbleiter und die Realisierbarkeit der nötigen Treiberschaltungen.

[0004] Vorzugsweise werden daher mehrphasige Wandler eingesetzt, die aus einer Parallel- oder Reihenschaltung mehrerer Wandler-Einheiten (Phasen) bestehen, und die einzelnen Wandler-Einheiten mit gleicher Taktfrequenz betrieben, aufeinander synchronisiert und die Phasenlagen über die Schaltperiode gleichmässig verteilt. Dies führt idealerweise zu einer Verschiebung der Frequenzanteile der Welligkeit zu einem Vielfachen der Schaltfrequenz und zu einer Auslöschung der grundfrequenten Anteile.

[0005] In der Praxis jedoch wird eine vollständige Auslöschung der grundfrequenten Anteile aufgrund von Fertigungstoleranzen der magnetischen Bauelemente wie Drosseln, der Streuung der elektrischen Parameter der Leistungshalbleiter oder sich unterscheidende Signallaufzeiten oder Schaltzeiten nicht erreicht. Diese Toleranzen führen dazu, dass die pulsweitenmodulierten Ströme, die von den Wandler-Einheiten an den Filterkondensator geliefert werden, unterschiedliche Amplituden aufweisen. Wie in Fig. 1 beispielhaft für fünf Phasen und in Fig. 4 beispielhaft für drei Phasen mit Hilfe von Rippelzeigern grafisch veranschaulicht, wobei die Phasenwinkel der Rippelzeiger der Phasenlage der Wandler-Einheiten entsprechen und die Länge der Rippelzeiger der Amplituden der Grundschnitungen der pulsweitenmodulierten Ströme entsprechen, verbleibt eine grundfrequente Restwelligkeit.

[0006] Bei bekannten Amplituden der Rippelzeiger bietet es sich an, die Rippelzeiger ihrer Länge nach zu sortieren und die Phasenlagen, wie in Fig. 2 dargestellt, systematisch anzuordnen, so dass eine Reduktion der Grundschnitungsamplitude der Welligkeit resultiert. Jedoch lässt sich das Sortierverfahren nicht auf Wandler bestehend aus drei Wandler-Einheiten anwenden und liefert für Wandler mit mehr als drei Wandler-Einheiten nicht das bestmögliche Ergebnis.

Darstellung der Erfindung

[0007] Es ist deshalb Aufgabe der Erfindung, bei Wandlern der eingangs genannten Art ein Verfahren zur weiteren Reduktion der Restwelligkeit bereitzustellen.

[0008] Das Verfahren dient also zum Minimieren von Rippelströmen in einem Gleichstrom-Wandler, wobei der Gleichstrom-Wandler drei oder mehr identische Wandler-Einheiten mit jeweils einem ersten Anschluss mit zwei Anschlusspolen und einem zweiten Anschluss mit zwei Anschlusspolen aufweist, wobei die ersten Anschlüsse der Wandler-Einheiten mit einer Filteranordnung verbunden sind, und diese Filteranordnung einen Betriebsspannungsanschluss des Gleichstrom-Wandlers aufweist respektive diesen Betriebsspannungsanschluss speist.

[0009] Das Verfahren weist die folgenden Schritte auf:

- Ansteuern der Wandler-Einheiten mit jeweils einem pulsweitenmodulierten Steuersignal und dadurch Erzeugen jeweils eines Rippelstromes durch die Wandler-Einheiten, wobei die Steuersignale der Wandler-Einheiten die gleiche Frequenz aufweisen und wobei eine Phasenlage der Steuersignale verstellbar ist; sowie
- Bestimmen einer Phasenlage der Steuersignale, bei welcher die Amplitude der Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{ss,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel möglichst klein ist;
- Ansteuern der Wandler-Einheiten mit der derart bestimmten Phasenlage der Steuersignale.

[0010] Die Wandler-Einheiten sind beispielsweise in einer Serieschaltung oder einer Parallelschaltung an die Filteranordnung angeschlossen, oder über Elemente der Filteranordnung miteinander und mit dem Betriebsspannungsanschluss verbunden. Die Filteranordnung weist vorzugsweise einen Glättungskondensator zur Glättung der Spannung am Betriebsspannungsanschluss und optional weitere passive Bauelemente auf.

[0011] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung weist der Schritt des Bestimmens der Phasenlage der Steuersignale, bei welcher die Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{ss,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel möglichst klein ist, die folgenden Schritte auf:

- Bestimmen der Amplituden von drei repräsentativen Puls-Vektoren, wobei ein repräsentativer Puls-Vektor ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) (auch Rippelzeiger genannt) jeweils die Amplitude und die Phasenlage des Rippelstromes einer Wandler-Einheit oder der Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{S3,\Sigma}$) mehrerer Wandler-Einheiten repräsentiert;
- Berechnen der drei Winkel, unter welchen die drei repräsentativen Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) ein Dreieck bilden;
- Wahl der Phasenlage der Steuersignale entsprechend dieser drei Winkel.

[0012] Die Amplituden der Puls-Vektoren variieren, entsprechend dem Modulationsgrad oder Aussteuerungsgrad der einzelnen Wandler-Einheiten, synchron zueinander. Dabei bleibt das Verhältnis der Amplituden zueinander konstant, also auch das Verhältnis der Längen der Basis-Puls-Vektoren und der repräsentativen Puls-Vektoren. Die Amplituden sind jeweils auf einen Referenz-Betriebszustand mit einem Referenz-Aussteuerungsgrad bezogen. Falls die Amplituden in einem anderen Betriebszustand gemessen werden, lassen sich daraus ohne weiteres die Amplituden im Referenz-Betriebszustand berechnen.

[0013] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung werden genau drei Wandler-Einheiten angesteuert, und die drei repräsentativen Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) repräsentieren die Amplitude und die Phasenlage des Rippelstromes dieser drei Wandler-Einheiten. Alternativ werden mehr als drei Wandler-Einheiten angesteuert, und ist mindestens einer der drei repräsentativen Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) die Vektorsumme von mindestens zwei Basis-Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}, \vec{i}_{S3,4}, \vec{i}_{S3,5}$), und repräsentieren die Basis-Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}, \vec{i}_{S3,4}, \vec{i}_{S3,5}$) jeweils die Amplitude und die Phasenlage des Rippelstromes einer der angesteuerten Wandler-Einheiten.

[0014] Zum Bestimmen der Amplituden der drei repräsentativen Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) wird gemäss einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung bei jeder der Wandler-Einheiten jeweils der Strom durch diese Wandler-Einheit gemessen. Der Strom wird also entweder direkt gemessen, wenn nur drei Basis-Puls-Vektoren vorliegen, welche somit mit den repräsentativen Puls-Vektoren identisch sind, oder indirekt, indem zwei oder mehr der Basis-Puls-Vektoren zu einem repräsentativen Puls-Vektor addiert werden.

[0015] In einer anderen bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird zum Bestimmen der Amplituden der drei repräsentativen Puls-Vektoren in einer Kalibrierungsphase reihum jeweils nur eine Wandler-Einheit pulswellenmoduliert angesteuert und wird ein Strom durch die Filteranordnung und/oder die Spannung am Betriebsspannungsanschluss gemessen. Der betrachtete Strom durch die Filteranordnung ist beispielsweise der Strom, der sich über den Betriebsspannungsanschluss schliesst. Die einzelnen Wandler-Einheiten werden dabei vorzugsweise mit demselben Modulationsgrad angesteuert, so dass die gemessenen Ströme unmittelbar proportional zu den Amplituden der Puls-Vektoren sind. Alternativ sind die Modulationsgrade verschieden und werden die Ströme entsprechend dem jeweiligen Modulationsgrad skaliert.

[0016] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird zum Bestimmen der Amplituden der repräsentativen Puls-Vektoren in einer Kalibrierungsphase reihum jeweils nur eine Wandler-Einheit pulswellenmoduliert angesteuert und wird der zur Speisung einer Last mit der jeweils angesteuerten Wandler-Einheit erforderliche Modulationsgrad tabellarisiert. Dieser Modulationsgrad wird im Betrieb der Wandler-Einheit durch eine Regelung eingestellt, um sich an eine Last anzupassen. In einem gleich bleibenden Arbeitspunkt stellt sich bei den verschiedenen Wandler-Einheiten, aufgrund deren Unterschiede, durch die Regelung ein unterschiedlicher Modulationsgrad ein. Aus den unterschiedlichen Modulationsgraden kann jeweils zurück auf die Stromamplitude der einzelnen Wandler-Einheiten gerechnet werden, oder es kann direkt ein zur Amplitude der Basis-Puls-Vektoren proportionaler Wert errechnet werden. Mit den Basis-Puls-Vektoren sind auch die repräsentativen Puls-Vektoren bestimmt.

[0017] Vorzugsweise findet die Kalibrierungsphase gemäss den obigen Ausführungsformen bei Inbetriebnahme und/oder im Betrieb des Gleichstrom-Wandlers statt, und zwar in einem Betriebszustand in welchem eine einzelne dieser Wandler-Einheiten ausreicht, um eine Last zu speisen. So können die Wandler-Einheiten unabhängig voneinander ausgemessen werden.

[0018] Eine weitere Variante des Verfahrens respektive eine weitere Ausführungsform des Phasenwinkel-Stellers bezieht sich auf einen Gleichstrom-Wandler ohne besondere Anforderungen an das vom Pulsweitenmodulator erzeugte Pulsmuster. Darin werden im Schritt des Bestimmens der Phasenlage der Steuersignale, bei welcher die Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{S3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel möglichst klein ist, die folgenden Schritte zur iterativen Suche der Phasenlage ausgeführt:

- Wahl einer der Wandler-Einheiten;
- Variieren der Phasenlage des Steuersignales dieser Wandler-Einheit und Messen der Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{S3,\Sigma}$), bis die Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{S3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel ein lokales Minimum aufweist;
- Falls die Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{S3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel ein vorgegebenes Mass überschreitet oder falls ein anderes Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, Wahl einer anderen Wandler-Einheit und Ausführen des vorangehenden Schrittes;
- Falls die Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{S3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel ein vorgegebenes Mass überschreitet oder falls ein anderes Abbruchkriterium erfüllt ist, Beenden der iterativen Suche.

[0019] In einem Phasenwinkel-Steller zur Realisierung der beschriebenen Verfahrensvarianten zum Minimieren von Rippelströmen in einem Gleichstrom-Wandler weist also der Gleichstrom-Wandler drei oder mehr identische Wandler-Einheiten mit jeweils einem ersten Anschluss mit zwei Anschlusspolen und einem zweiten Anschluss mit zwei Anschlusspolen auf, wobei die ersten Anschlüsse der Wandler-Einheiten mit einer Filteranordnung verbunden sind, und diese Filteranordnung an einen Betriebsspannungsanschluss des Gleichstrom-Wandlers angeschlossen ist respektive diesen Betriebsspannungsanschluss speist.

[0020] Dabei sind die Wandler-Einheiten mit jeweils einem pulsweitenmodulierten Steuersignal ansteuerbar, zum Erzeugen jeweils eines Rippelstromes durch die Wandler-Einheiten, wobei die Steuersignale der Wandler-Einheiten die gleiche Frequenz aufweisen und wobei eine Phasenlage der Steuersignale verstellbar ist. Ferner ist der Phasenwinkel-Steller zur Bestimmung einer Phasenlage der Steuersignale, bei welcher die Amplitude der Summe der Rippelströme ($\bar{i}_{s3,2}$) im zeitlichen Mittel möglichst klein ist, ausgebildet, und sind die Wandler-Einheiten mit der derart bestimmten Phasenlage der Steuersignale ansteuerbar.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0021] Im Folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen, welche in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt sind, näher erläutert. Es zeigen jeweils schematisch:

- Fig. 1 und 2 Rippelzeiger und Summenzeiger der Grundswingungsamplitude der Welligkeit für N=5 Phasen ohne und mit Sortierung der Rippelzeiger;
- Fig. 3 Struktur eines mehrphasigen Wandlers mit Filteranordnung;
- Fig. 4 und 5 Rippelzeiger und Summenzeiger der Grundswingungsamplitude der Welligkeit für N=3 Phasen ohne und mit Berechnung der optimierter Rippelzeiger:
- Fig. 6 Struktur eines mehrphasigen Wandlers mit Phasenwinkel-Steller einer ersten Ausführungsform:
- Fig. 7 Struktur eines mehrphasigen Wandlers mit Phasenwinkel-Steller einer zweiten Ausführungsform;
- Fig. 8 Struktur eines mehrphasigen Wandlers mit Phasenwinkel-Steller einer dritten Ausführungsform; und
- Fig. 9 Struktur eines mehrphasigen Wandlers mit Phasenwinkel-Steller einer vierten Ausführungsform;
- Fig. 10 Zeitverlauf des Spulenstroms und der pulsweitenmodulierten Spannungen eines Tiefsetzstellers mit toleranzbehafteter Induktivität bei Ansteuerung mit gleichen Schaltzeiten;
- Fig. 11 Zeitverlauf des Spulenstroms und der pulsweitenmodulierten Spannungen eines Tiefsetzstellers mit toleranzbehafteter Induktivität bei Ansteuerung für gleichen Spulenstrommittelwert, und
- Fig. 12 Zeitverlauf des Rippeistroms mit und ohne Anwendung des erfindungsgemässen Verfahrens zur Minimierung der Welligkeit.

[0022] Die in den Zeichnungen verwendeten Bezugszeichen und deren Bedeutung sind in der Bezugszeichenliste zusammengefasst aufgelistet. Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0023] Die erfindungsgemässen Verfahren dienen der Reduktion der Spannungs- und Stromrestwelligkeit eines Gleichstrom-Wandlers 1, wie in Fig. 3 dargestellt, bestehend aus drei oder mehr identischen Wandler-Einheiten 2 (Phasen), jeweils mit einem ersten Anschluss 3, 4 und einem zweiten Anschluss 5, 6, die an mindestens einem Betriebsspannungsanschluss 7, 8 des Gleichstrom-Wandlers 1 verbunden sind. Die Verbindung der Wandler-Einheiten 2 wird vorzugsweise durch Parallelschaltung des jeweils ersten Anschlusses 3,4 der Wandler-Einheiten 2 an einer Filteranordnung 10, bestehend aus einem zwischen dem ersten Anschluss 3,4 liegenden Kondensator oder mehreren passiven Bauelementen, realisiert oder durch eine Reihenschaltung der ersten Anschlüsse 3, 4. In Fig. 3 ist eine beispielhafte Realisierung dieser Filteranordnung in Form eines Pi-Filters dargestellt und die pulsweitenmodulierten Ströme, die zwischen den Wandler-Einheiten 2 und der Filteranordnung 10 fliessen, sind als Stromquellen modelliert.

[0024] Die in Fig. 6 bis Fig. 9 dargestellten Ausführungsformen der Erfindung sehen eine analoge oder vorzugsweise digitale Regeleinrichtung 11 zur Realisierung einer Strom- und/oder Spannungsregelung vor, wobei für die Regelgrössen der Regeleinrichtung 11 vorzugsweise ein Spannungsmesswert 20, der durch eine Spannungsmessvorrichtung 9B am Betriebsspannungsanschluss 7, 8 des Gleichstrom-Wandlers 1 gewonnen wird, oder ein Strommesswert 21, der durch eine Strommessvorrichtung 9A am Betriebsspannungsanschluss 7, 8 gewonnen wird und/oder durch eine entsprechende für jede der Wandler-Einheiten 2 getrennt an den ersten Anschlüssen 3, 4 ausgeführte erste Messvorrichtung 9C oder eine an den zweiten Anschlüssen 5, 6 ausgeführte zweite Messvorrichtung 9D gewonnen wird und eine Stellgrösse 22 ein Ausgangssignal der Regeleinrichtung 11 darstellt.

[0025] Daten zur Phasenselektion 25, über die eine Teil- oder die Gesamtmenge der verfügbaren Wandler-Einheiten 2 eingeschaltet werden können und die einzustellenden Phasenlagen 25 der Wandler-Einheiten 2, die von einem Phasenwinkel-Steller 13 zur Verfügung gestellt werden, sowie die Stellgrösse 22 der Regeleinrichtung 11 werden mindestens einem Pulsweitenmodulator 12 zugeführt, der die zur Ansteuerung der Leistungsschalter der Wandler-Einheiten 2 nötigen Steuersignale 23 generiert und an die Wandler-Einheiten 2 angeschlossen ist. Dabei weisen die vom Pulsweitenmodula-

tor 12 für die einzelnen Wandler-Einheiten erzeugten Pulsmuster zueinander die vom Phasenwinkel-Steller 13 erzeugten Phasenlagen 25 und die gleiche Periodendauer auf.

[0026] Die Phasenlagen 25 werden durch die erfindungsgemässen Ausführungsformen des Phasenwinkel-Stellers 13 entweder durch Auswerten der Stellgrösse 22 der Regeleinrichtung 11 oder durch Auswerten von mindestens einer der Regelgrössen der Regeleinrichtung 11 oder einer Kombination dieser Grössen derart eingestellt, dass eine Reduktion der Spannungswelligkeit an dem gemeinsamen Betriebsspannungsanschluss 7, 8 des Gleichstrom-Wandlers 1 resultiert.

[0027] Eine erste, in Fig. 6 dargestellte, Ausführungsform des Phasenwinkel-Stellers 13 bezieht sich auf Wandler-Einheiten 2 mit dem Merkmal, dass das vom Pulsweitenmodulator 12 erzeugte Pulsmuster zu einem Betrieb der Wandler-Einheiten 2 führt, bei dem der Mittelwert des Stroms durch den ersten Anschluss 3, 4 eine Proportionalität zur Länge eines der Wandler-Einheit 2 zuzuordnenden Rippelzeigers (oder Puls-Vektors) aufweist, die vorzugsweise begründet ist durch die in der Wandler-Einheit 2 vorliegenden Toleranzen. Beim in Fig. 10 dargestellten Beispiel eines Tiefsetzstellers mit Eingangsspannung U_1 und Ausgangsspannung U_2 , wird im Zeitintervall $t_1 < t < t_2$ die Differenzspannung $U_1 - U_2$ und im Zeitintervall $t_2 < t < t_3$ die Spannung $-U_2$ an eine Induktivität L angelegt, so dass sich während der Schaltperiode T_p ein diskontinuierlicher Spulenstrom i_L mit Mittelwert I_2 einstellt. Für einen Induktivitätswert L_n der n-ten Wandler-Einheit grösser dem Nennwert L stellt sich bei unveränderten Schaltzeitpunkten t_1 bis t_3 wegen der geringeren Stromanstiegsgeschwindigkeit ebenfalls ein geringerer, zum Wert der Induktivität umgekehrt proportionaler, mittlerer Strom I_2 ein. Gleichzeitig weist der durch eine Fourier-Entwicklung der Zeitfunktion i_L des Spulenstroms berechenbare Rippelzeiger eine geringere Amplitude auf, so dass zusammenfassend eine direkte Proportionalität zwischen dem messbaren Strommittelwert I_2 und der Rippelzeigeramplitude existiert. Bei gleichzeitiger Messung der Ströme aller Wandler-Einheiten 2 durch die erste Messvorrichtung 9C kann daher durch Rechnung auf die tatsächliche Länge der Rippelzeiger oder eine entsprechende normierte Länge geschlossen werden und in Verbindung mit den bekannten Phasenlagen 24 ein Zeigerdiagramm konstruiert und der Summenzeiger der Welligkeit berechnet werden.

[0028] Zur Umsetzung eines Verfahrens zur Reduktion der Welligkeit bei der ersten Ausführungsform des Phasenwinkel-Stellers 13 werden die Strommesswerte der ersten Messvorrichtung 9C und die Daten zur Selektion einer Teil- oder der Gesamtmenge der verfügbaren Wandler-Einheiten 2, die von einer übergeordneten Steuerung 15A geliefert werden, dem Pulsweitenmodulator 12 und einer Einheit zur Berechnung der Phasenwinkel 14A zur Verfügung gestellt, die ebenfalls mit dem Pulsweitenmodulator 12 verbunden ist.

[0029] Während des Betriebs von genau drei Wandler-Einheiten 2 bestimmt die Einheit zur Berechnung der Phasenwinkel 14A die Winkel der Rippelzeiger und somit die Phasenlagen 24 der Wandler-Einheiten 2 wie in Fig. 5 dargestellt durch Konstruktion eines Dreiecks, dessen Seitenlängen den Längen der drei Rippelzeiger entsprechen, und trigonometrische Berechnung der Winkel der Rippelzeiger zueinander, dass der Summenzeiger der Welligkeit und somit die Grundschiebungsamplitude der Welligkeit ausgelöscht wird. Während des Betriebs von mehr als drei Wandler-Einheiten 2 erfolgt die Berechnung der Phasenlagen vorzugsweise durch eine Vorsortierung der Rippelzeiger mit Ausnahme zweier Rippelzeiger, anschliessendem Bilden eines Summenrippelzeigers der vorsortierten Rippelzeiger und abschliessender Dreiecks-konstruktion und trigonometrischer Berechnung der Winkel der verbleibenden Rippelzeiger relativ zum Winkel des Summenrippelzeigers der vorsortierten Rippelzeiger, so dass wiederum eine Auslöschung der Grundschiebungsamplitude der Welligkeit erfolgt. Bei bekannten Längen $\hat{I}_{S3,1}$, $\hat{I}_{S3,2}$ und $\hat{I}_{S3,3}$ der Rippelzeiger der drei Wandler-Einheiten 2 können die Phasenlagen ϕ_1 , ϕ_2 und ϕ_3 berechnet werden mit

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 0 \\ \phi_2 &= \pi - 2 \cdot \arctan \frac{r}{s - \hat{I}_{S3,3}} \\ \phi_3 &= \pi + 2 \cdot \arctan \frac{r}{s - \hat{I}_{S3,2}} \end{aligned}$$

wobei

$$r = \sqrt{\frac{(s - \hat{I}_{S3,1})(s - \hat{I}_{S3,2})(s - \hat{I}_{S3,3})}{s}}, \quad s = \frac{\hat{I}_{S3,1} + \hat{I}_{S3,2} + \hat{I}_{S3,3}}{2}$$

[0030] Es erfolgt demnach entweder eine direkte Berechnung der Phasenlagen, wenn nur drei Rippelzeiger (Basis-Puls-Vektoren) vorliegen, welche somit mit für die Berechnung repräsentativen Puls-Vektoren identisch sind, oder indirekt, indem zwei oder mehr der Basis-Puls-Vektoren zu einem repräsentativen Puls-Vektor addiert werden.

[0031] Fig. 12 zeigt beispielhaft eine durch das erfindungsgemässe Verfahren erreichte Reduktion des Rippelstroms $i_{C2,0}$ im Kondensator $C_{2,0}$ eines Gleichstromwandlers gemäss Fig. 3 bestehend aus drei Wandler-Einheiten 2 mit den Spulenströmen $i_{L,1}$, $i_{L,2}$ und $i_{L,3}$.

[0032] Eine zweite, in Fig. 7 dargestellte, Ausführungsform des Phasenwinkel-Stellers 13 findet Anwendung bei Gleichstromwandlern 1, wie für die erste Ausführungsform des Phasenwinkel-Stellers 13 beschrieben, jedoch mit der Ausnahme, dass anstelle von für jede Wandler-Einheit 2 getrennt durchgeführten Strommessungen lediglich ein gemeinsamer Strommesswert 21, der am Betriebsspannungsanschluss 7, 8 des Gleichstromwandlers 1 durch eine Strommessvorrichtung 9A ermittelt wird, zur Verfügung steht. Bei der Realisierung eines mehrphasigen Wandlers ist dies Praxis um die Anzahl der benötigten Stromsensoren und somit die Kosten des Wandlers gering zu halten.

[0033] In diesem Fall kann dennoch eine Minimierung der Welligkeit mit dem oben beschriebenen Verfahren zu Vorsortierung der Rippelzeiger und trigonometrischer Berechnung der Phasenlagen 24 durchgeführt werden, wenn der Strommesswert 21 einer im Phasenwinkel-Steller 13 implementierten übergeordneten Steuerung 15B zugeführt wird und die übergeordnete Steuerung 15B die Eigenschaft besitzt, dass sie während einer Kalibrierungsprozedur mit einer Kalibriergröße 27 anstelle der Stellgröße 22 der Regeleinrichtung 11 den Pulsweitenmodulator 12 steuern kann und eine Speichereinrichtung 16B während der Kalibrierungsprozedur mit aus dem Strommesswert 21 gewonnenen Kalibrierdaten gefüllt wird, die während des regulären Betriebs von einer Einheit zur Phasenwinkelberechnung 14B gleicher Funktionalität der Einheit zur Phasenwinkelberechnung 14A genutzt, werden, um die Phasenlagen 24 zu berechnen.

[0034] Der Ablauf der Kalibrierungsprozedur gestaltet sich wie folgt: Unter der Bedingung von konstanten Spannungen an den zweiten Anschlüssen 5,6 der Wandler-Einheiten 2 und am Betriebsspannungsanschluss 7,8 betreibt die übergeordnete Steuerung 15B durch Vorgabe der Phasenselektion 25 und der Kalibriergröße 27 an den Pulsweitenmodulator 12 eine einzelne Wandler-Einheit 2 jeweils mit den gleichen Schaltzeiten. Wie in Fig. 10 am Beispiel eines Tiefsetzstellers dargestellt, führt dies bei Toleranzen zwischen den Wandler-Einheiten 2 zu sich unterscheidenden, von der Strommessvorrichtung 9A gemessenen Strömen, im Falle von Fig. 10 einem unterschiedlichen Mittelwert des Stromes I_2 aus dem die Länge des Rippelzeigers der Wandler-Einheit durch Rechnung abgeleitet werden kann. Im Verlauf der Kalibrierungsprozedur werden die Strommesswerte 21 der Strommessvorrichtung 9A für jede Wandler-Einheit 2 in der Speichereinrichtung 16B abgelegt. Die während der Kalibrierungsprozedur bestimmten Amplituden der Rippelzeiger sind also jeweils auf einen Referenz-Betriebszustand mit einem Referenz-Aussteuerungsgrad, gegeben durch die Kalibriergröße 27, bezogen und variieren, entsprechend dem Modulationsgrad oder Aussteuerungsgrad der einzelnen Wandler-Einheiten 2, der im regulären Betrieb durch die Stellgröße 22 der Regeleinrichtung 11 vorgegeben wird, synchron zueinander. Dabei bleibt das Verhältnis der Amplituden zueinander konstant, also auch das Verhältnis der Längen der Rippelzeiger. Aus Gründen dieser Proportionalität lassen sich aus den Kalibrierungsdaten auch in einem anderen Betriebszustand, abweichend vom Referenz-Betriebszustand, ohne weiteres durch die Einheit zur Phasenwinkelberechnung 14B die Phasenlagen 24 berechnen.

[0035] Vorzugsweise wird die Kalibrierungsprozedur in einer Initialisierungsphase nach Einschalten des Wandlers einmalig durchgeführt, wobei sich eine Wiederholung der Kalibrierung zu einem späteren Zeitpunkt ebenfalls als vorteilhaft erweisen kann, um Veränderungen der Toleranzen während des Betriebs des Wandlers (beispielsweise in Folge von Temperatureinflüssen) Rechnung zu tragen.

[0036] Eine dritte, in Fig. 8 dargestellte, Ausführungsform des Phasenwinkel-Stellers 13 findet analog zur zweiten Ausführungsform des Phasenwinkel-Stellers Anwendung bei Gleichstrom-Wandlern 1, wie für die erste Ausführungsform des Phasenwinkel-Stellers 13 beschrieben, jedoch mit der Ausnahme, dass anstelle von für jede Wandler-Einheit 2 getrennt durchgeführten Strommessungen lediglich ein gemeinsamer Strommesswert 21, der am Betriebsspannungsanschluss 7, 8 des Gleichstromwandlers 1 durch eine Strommessvorrichtung 9A ermittelt wird, zur Verfügung steht. Jedoch wird der Nachteil, dass die Stellgröße 22 der Regeleinrichtung 11 während der Kalibrierungsprozedur verändert werden muss, was die Durchführung der Kalibrierung während des regulären Betriebs des Gleichstrom-Wandlers 1 erschwert, durch eine geänderte Kalibrierungsprozedur umgangen.

[0037] Hierzu wird die Stellgröße 22 der Regeleinrichtung 11 einer im Phasenwinkel-Steller 13 implementierten übergeordneten Steuerung 15C zugeführt, die die Eigenschaft besitzt, dass sie durch Vorgabe der Phasenselektion 25 an den Pulsweitenmodulator 12 im Verlauf einer Kalibrierungsprozedur eine einzelne zu betreibende Wandler-Einheit auswählen kann und eine Speichereinrichtung 16C während der Kalibrierungsprozedur mit den aus der Stellgröße 22 gewonnenen Kalibrierdaten gefüllt wird, die während des regulären Betriebs des Gleichstromwandlers 1 von einer Einheit zur Phasenwinkelberechnung 14C gleicher Funktionalität der Einheit zur Phasenwinkelberechnung 14A genutzt werden, um die Phasenlagen 24 zu berechnen.

[0038] Der Ablauf der Kalibrierungsprozedur gestaltet sich wie folgt: Die übergeordnete Steuerung 15C koordiniert den Ablauf der Kalibrierungsprozedur, wobei sie in einem durch die Regeleinrichtung 11 geregelten Teillastarbeitspunkt, für den die Leistung an den Betriebsspannungsklemmen 7, 8 durch eine einzelne Wandler-Einheit 2 geliefert werden kann, durch Vorgabe der Phasenselektion 25 an den Pulsweitenmodulator 12 sequentiell jeweils eine einzelne der verfügbaren Wandler-Einheiten 2 betreibt und die Stellgröße 22 der Regeleinrichtung 11, die eine Proportionalität zu den Toleranzen der Wandler-Einheiten und somit zur Länge des Rippelzeigers aufweist, in der Speichereinrichtung 16C zur späteren Verwendung durch die Einheit zur Phasenwinkelberechnung 14C tabellarisiert. Die Proportionalität zwischen Stellgröße 22 und Länge des Rippelzeigers ist in Fig. 11 beispielhaft für einen Tiefsetzsteller dargestellt und dadurch begründet, dass für gleiche Lastverhältnisse durch die Regeleinrichtung 11 der gleiche Strommittelwert I_2 eingeregelt wird, dazu jedoch sich unterscheidende Schaltzeitpunkte zur Ansteuerung der leistungselektronischen Schalter oder respektive eine andere Stellgröße 22 erforderlich sind.

[0039] Die Kalibrierungsprozedur wird vorteilhaft während des regulären Betriebs des Gleichstrom-Wandlers 1 in geeigneten Teillastarbeitspunkten wiederholt, um Veränderungen der Toleranzen während des Betriebs des Wandlers Rechnung zu tragen. Dabei bleibt das Verhalten des Gleichstrom-Wandlers 1 am Betriebsspannungsanschluss 7, 8 im Idealfall unverändert.

[0040] Eine vierte, in Fig. 9 dargestellte, Ausführungsform des Phasenwinkel-Stellers 13 bezieht sich auf einen Gleichstrom-Wandler 1 ohne besondere Anforderungen an das vom Pulsweitenmodulator 12 erzeugte Pulsmuster zur Schal-

teransteuerung 23, bei der mindestens eine der von der Strommesseinrichtung 9A und der Spannungsmesseinrichtung 9B gemessenen Grössen im Phasenwinkel-Steller 13 durch eine Welligkeitsbewertung 17 analysiert und der Grad der Welligkeit festgestellt wird und eine Einheit zur Phasenwinkelanpassung 18 durch ein iteratives Verfahren schrittweise die Phasenlagen 24 der im Betrieb befindlichen Wandler-Einheiten 2 verändert, bis durch die Welligkeitsbewertung 17 eine minimale Welligkeit festgestellt wird.

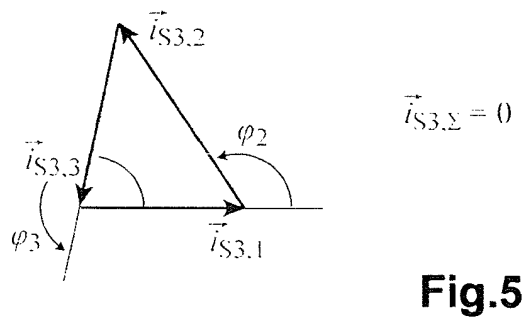
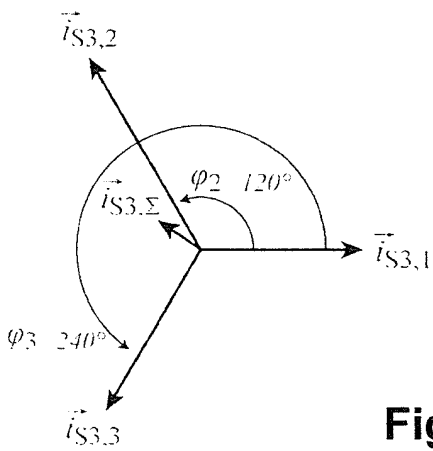
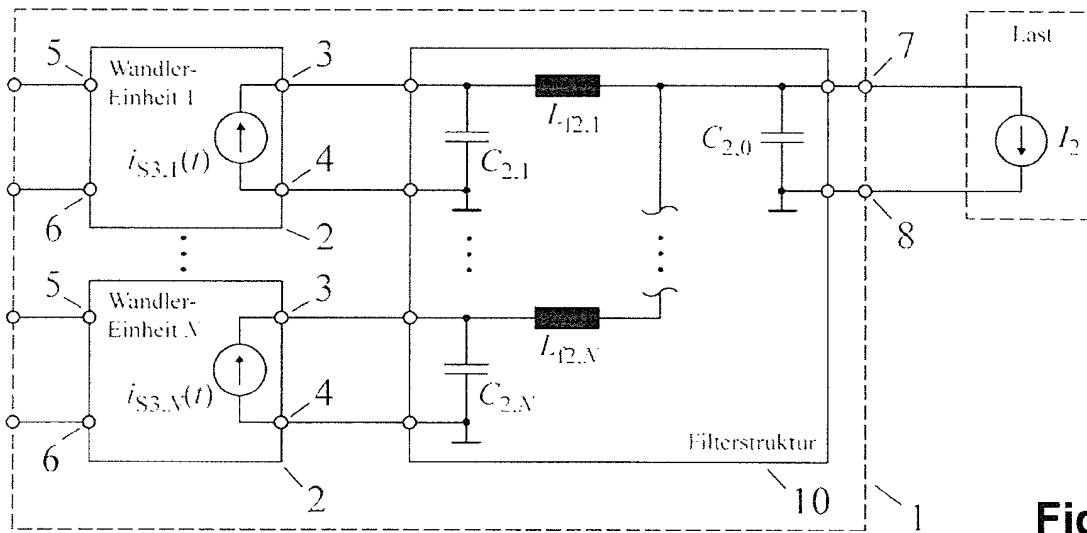
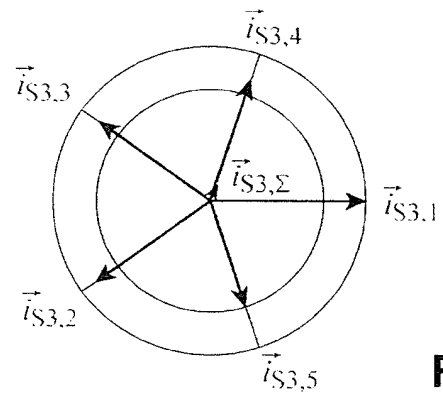
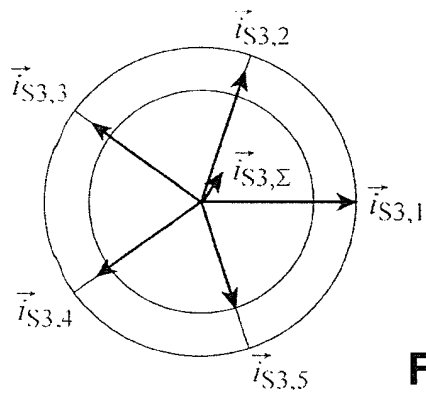
[0041] Die Welligkeitsbewertung 17 ist vorzugsweise als Spitze-Spitzwert-Messung oder als Effektivwertmessung ausgeführt.

[0042] Für das iterative Verfahren werden die Phasenlagen 24 der Wandler-Einheiten 2 vorteilhaft zunächst mit über der Schaltperiode gleichmässig verteilten Winkeln initialisiert. Anschliessend erfolgt, beginnend mit einer ersten Wandler-Einheit 2, in einem Zeitraaster, das einem ganzzahligen Vielfachen der Schaltperiode entspricht, eine fortlaufende, schrittweise Korrektur der Phasenlage dieser Wandler-Einheit um einen festen Winkelbetrag in Form eines Suchverfahrens mit Hysterese, wobei die Suchrichtung durch die Auswirkung auf die Welligkeit (Verbesserung oder Verschlechterung) bestimmt wird, bis durch die Welligkeitsbewertung 17 keine Verbesserung der Welligkeit mehr festgestellt wird, also ein lokales Optimum für die Phasenlage der Wandler-Einheit ermittelt wurde. Das Suchverfahren wird zyklisch und fortlaufend auf alle weiteren Wandler-Einheiten 2 angewandt, bis ein globales Optimum der Welligkeit gefunden wird.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Minimieren von Rippelströmen in einem Gleichstrom-Wandler (1), wobei der Gleichstrom-Wandler (1) drei oder mehr identische Wandler-Einheiten (2) mit jeweils einem ersten Anschluss (3, 4) mit zwei Anschlusspolen und einem zweiten Anschluss (5, 6) mit zwei Anschlusspolen aufweist, wobei die ersten Anschlüsse (3, 4) der Wandler-Einheiten (2) mit einer Filteranordnung (10) verbunden sind, und diese Filteranordnung einen Betriebsspannungsanschluss (7,8) des Gleichstrom-Wandlers (1) aufweist, wobei das Verfahren den folgenden Schritt aufweist:
 - Ansteuern der Wandler-Einheiten (2) mit jeweils einem pulswertenmodulierten Steuersignal und dadurch Erzeugen jeweils eines Rippelstromes durch die Wandler-Einheiten (2), wobei die Steuersignale der Wandler-Einheiten (2) die gleiche Frequenz aufweisen und wobei eine Phasenlage der Steuersignale verstellbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren die weiteren Schritte aufweist:
 - Bestimmen einer Phasenlage der Steuersignale, bei welcher die Amplitude der Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{S3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel möglichst klein ist;
 - Ansteuern der Wandler-Einheiten (2) mit der derart bestimmten Phasenlage der Steuersignale.
2. Verfahren gemäss Anspruch 1, wobei der Schritt des Bestimmens der Phasenlage der Steuersignale, bei welcher die Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{S3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel möglichst klein ist, die folgenden Schritte aufweist:
 - Bestimmen der Amplituden von drei repräsentativen Puls-Vektoren, wobei ein repräsentativer Puls-Vektor ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) jeweils die Amplitude und die Phasenlage des Rippelstromes einer Wandler-Einheit (2) oder der Summe der Rippelströme ($\vec{i}_{S3,\Sigma}$) mehrerer Wandler-Einheiten (2) repräsentiert;
 - Berechnen der drei Winkel, unter welchen die drei repräsentativen Pulsvektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) ein Dreieck bilden;
 - Wahl der Phasenlage der Steuersignale entsprechend dieser drei Winkel.
3. Verfahren gemäss Anspruch 2, wobei genau drei Wandler-Einheiten (2) angesteuert werden, und die drei repräsentativen Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) die Amplitude und die Phasenlage des Rippelstromes dieser drei Wandler-Einheiten (2) repräsentieren.
4. Verfahren gemäss Anspruch 2, wobei mehr als drei Wandler-Einheiten (2) angesteuert werden, und mindestens einer der drei repräsentativen Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) die Vektorsumme von mindestens zwei Basis-Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}, \vec{i}_{S3,4}, \vec{i}_{S3,5}$) ist und die Basis-Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}, \vec{i}_{S3,4}, \vec{i}_{S3,5}$) jeweils die Amplitude und die Phasenlage des Rippelstromes einer der angesteuerten Wandler-Einheiten (2) repräsentieren.
5. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 2 bis 4, wobei zum Bestimmen der Amplituden der drei repräsentativen Puls-Vektoren ($\vec{i}_{S3,1}, \vec{i}_{S3,2}, \vec{i}_{S3,3}$) bei jeder der Wandler-Einheiten (2) jeweils der Strom durch diese Wandler-Einheit (2) gemessen wird.
6. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei zum Bestimmen der Amplituden der drei repräsentativen Puls-Vektoren in einer Kalibrierungsphase reihum jeweils nur eine Wandler-Einheiten (2) pulswertenmoduliert angesteuert wird und ein Strom durch die Filteranordnung (10) und/oder die Spannung am Betriebsspannungsanschluss (7, 8) gemessen wird.
7. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 2 bis 4, wobei zum Bestimmen der Amplituden der drei repräsentativen Puls-Vektoren in einer Kalibrierungsphase reihum jeweils nur eine Wandler-Einheit (2) pulswertenmoduliert angesteuert wird und der zur Speisung einer Last mit der jeweils angesteuerten Wandler-Einheit (2) erforderliche Modulationsgrad tabellarisiert wird.
8. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 6 bis 7, wobei die Kalibrierungsphase im Betrieb des Gleichstrom-Wandlers (1) stattfindet und in einem Betriebszustand, in welchem eine einzelne dieser Wandler-Einheiten (2) ausreicht, um eine Last zu speisen.

9. Verfahren gemäss Anspruch 1, wobei der Schritt des Bestimmens der Phasenlage der Steuersignale, bei welcher die Amplitude der Summe der Rippleströme ($\bar{i}_{s3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel möglichst klein ist, die folgenden Schritte zur iterativen Suche der Phasenlage aufweist:
- Wahl einer der Wandler-Einheiten (2):
 - Variieren der Phasenlage des Steuersignales dieser Wandler-Einheit (2) und Messen der Summe der Rippleströme ($\bar{i}_{s3,\Sigma}$), bis die Summe der Rippleströme ($\bar{i}_{s3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel ein lokales Minimum aufweist:
 - Falls die Summe der Rippleströme ($\bar{i}_{s3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel ein vorgegebenes Mass überschreitet, oder falls ein anderes Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, Wahl einer anderen Wandler-Einheit (2) und Ausführen des vorangehenden Schrittes:
 - Falls die Summe der Rippleströme ($\bar{i}_{s3,\Sigma}$) im zeitlichen Mittel ein vorgegebenes Mass überschreitet, Beenden der iterativen Suche.



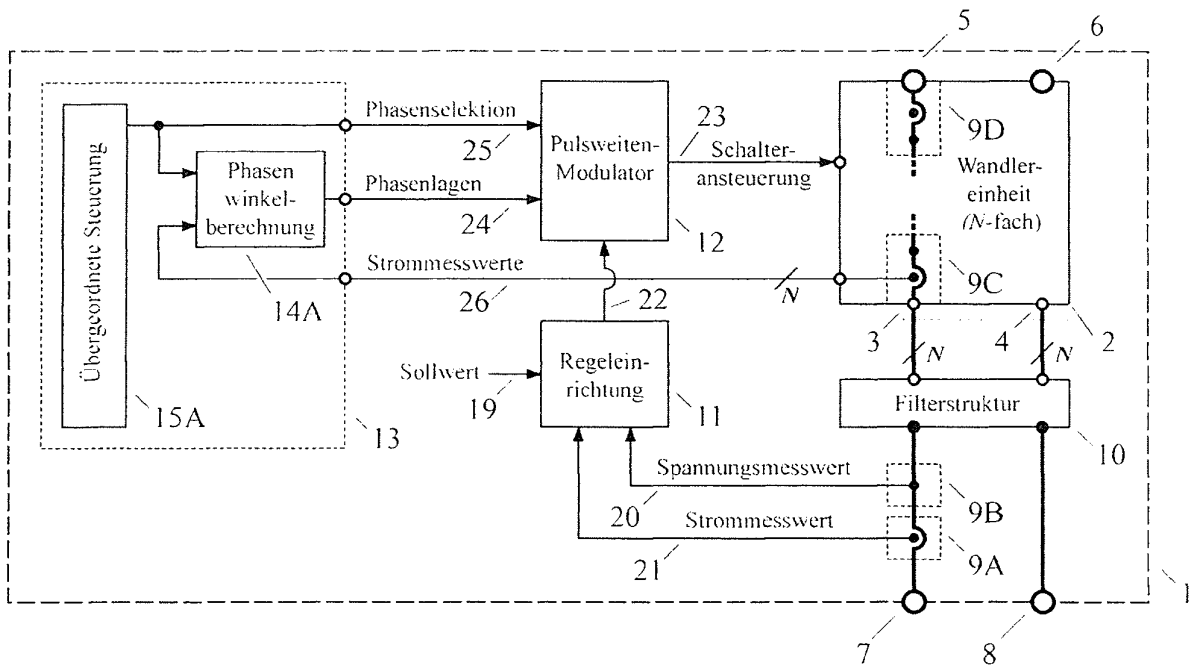


Fig.6

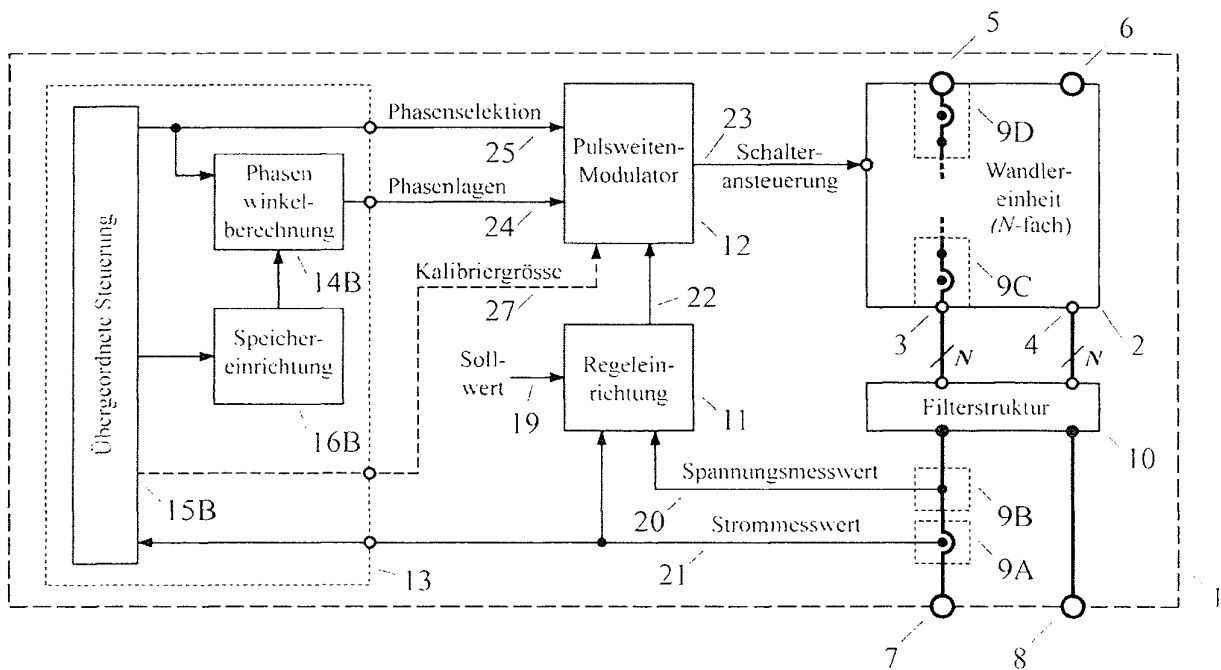


Fig.7

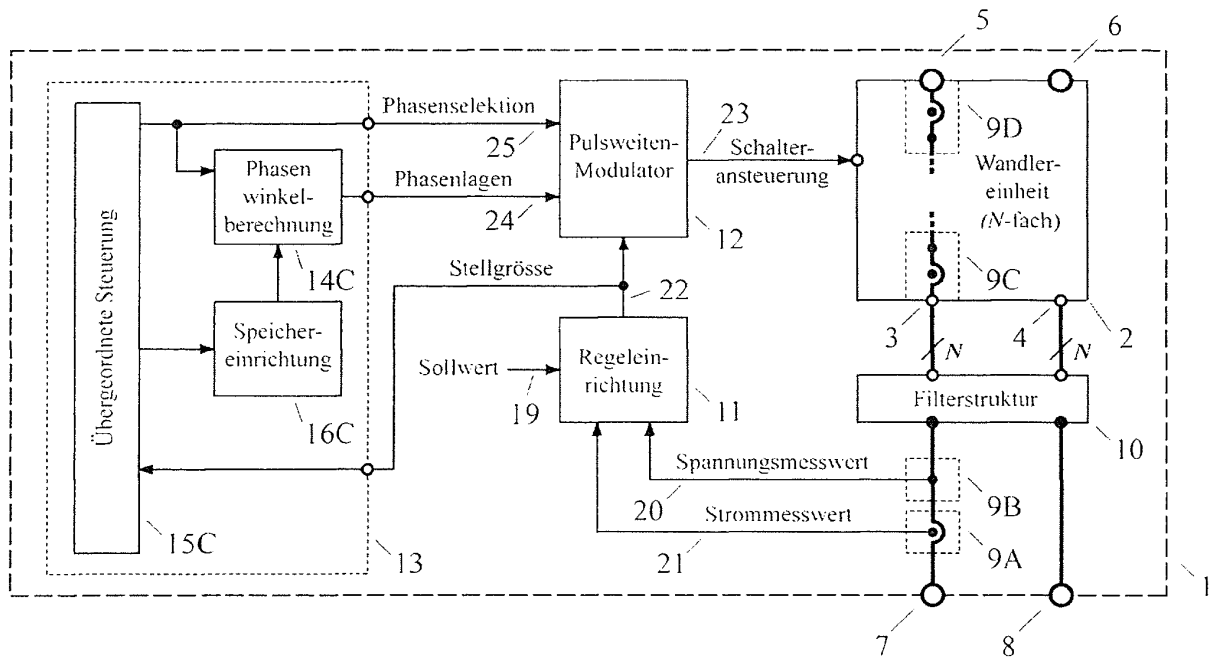


Fig.8

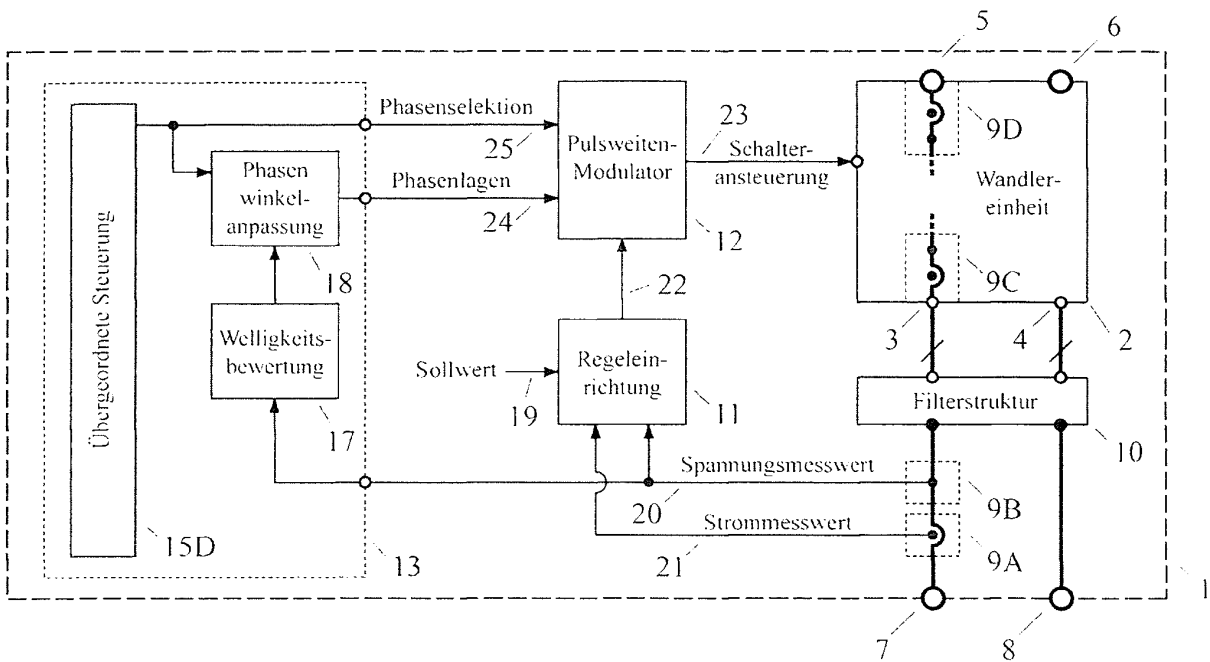


Fig.9

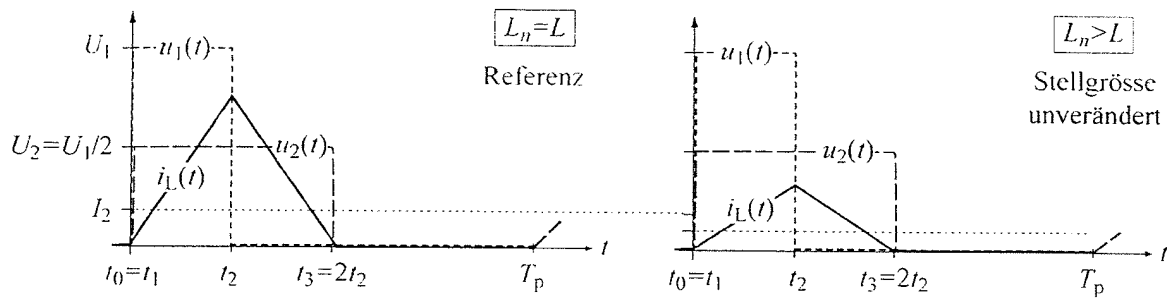


Fig.10

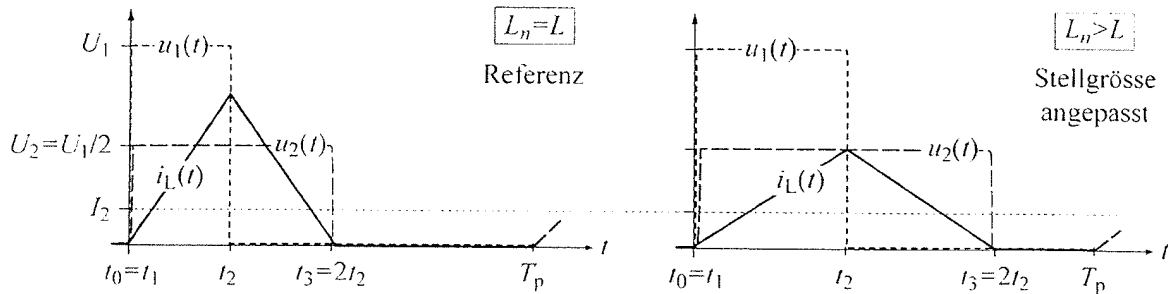


Fig.11

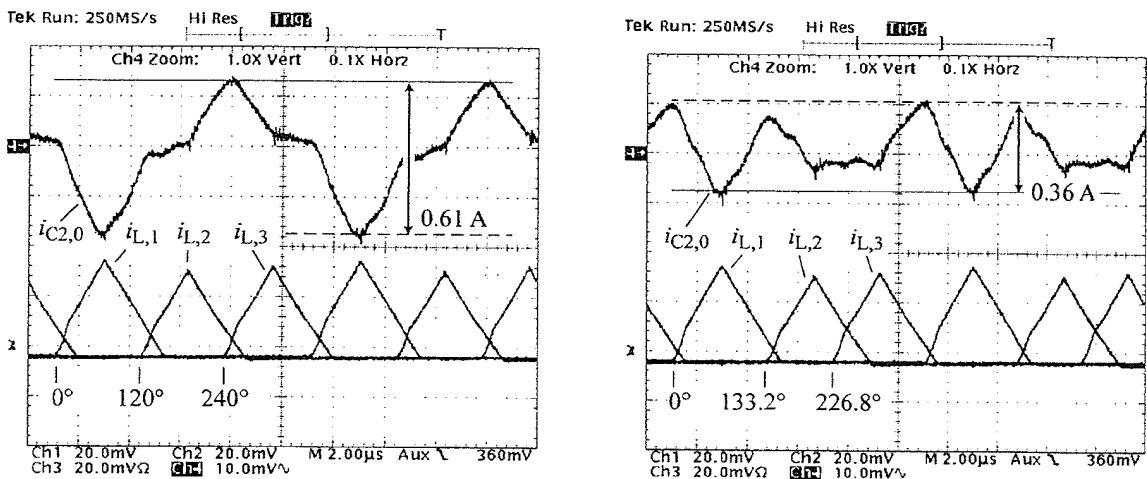


Fig.12