



(10) **DE 11 2022 003 262 T5** 2024.04.25

(12) **Veröffentlichung**

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2022/271413**
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
IntPatÜbkG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2022 003 262.6**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2022/031425**
(86) PCT-Anmeldetag: **27.05.2022**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **29.12.2022**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **25.04.2024**

(51) Int Cl.: **H02M 3/158** (2006.01)

H02M 3/155 (2006.01)

H02M 3/335 (2006.01)

H02M 3/337 (2006.01)

H02M 3/00 (2006.01)

H02M 1/00 (2007.01)

(30) Unionspriorität:
63/214,474 **24.06.2021** **US**
17/559,945 **22.12.2021** **US**

(74) Vertreter:
**Bals & Vogel Patentanwälte PartG mbB, 44801
Bochum, DE**

(71) Anmelder:
PSEMI Corporation, San Diego, CA, US

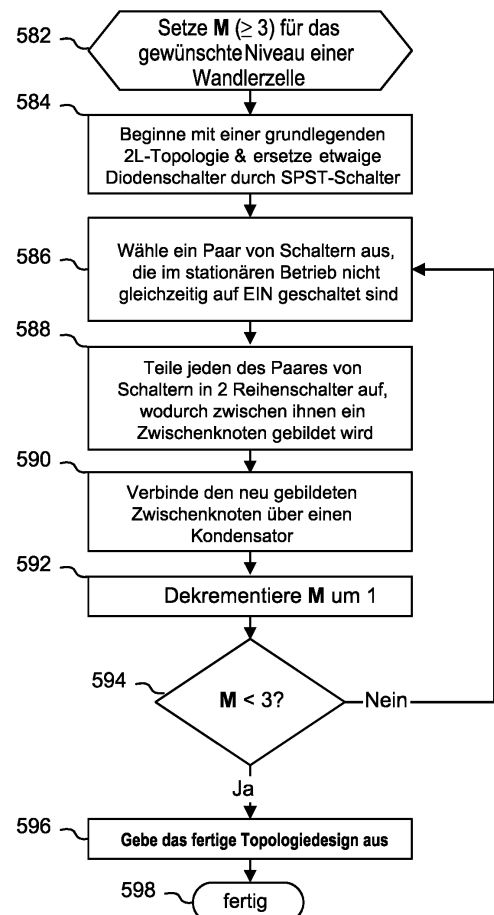
(72) Erfinder:
Giuliano, David M., San Diego, CA, US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Multi-Niveau-Strukturen und Verfahren für Schaltnetzteile**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur Modifizierung von Wandlerzellen für Schaltnetzteile und entsprechende Stromwandlerzellen. Die modifizierten Wandlerzellen weisen geringere Induktivitätsanforderungen auf, ermöglichen die Verwendung niedrigerer Spannungen und kleinerer Schalter, bieten eine verbesserte Energiedichte und einen höheren Wirkungsgrad und sorgen für einen verbesserten dynamischen Eingangs-/Ausgangsspannungsbereich. Ausführungsformen der Verfahren erzeugen Wandlerzellentopologien mit 3 oder mehr Knotenspannungsniveaus durch aufeinanderfolgende Anwendung eines „Split-Switches-and-Connect-through-a-Capacitor“-Verfahrens. Die erfindungsgemäßen Verfahren oder Varianten dieser Verfahren können auf Wandlerzellentopologien angewandt werden, die 2-Niveau-Wandlerzellen mit mindestens einer Induktivität und zwei Schaltern sind, und insbesondere 2-Niveau-Wandlerzellen, die entweder (1) eine Ordnung von mindestens 3 (d.h. 3 oder mehr Energiespeicherelemente in einer Kombination von Induktivitäten und Kapazitäten, aber mit mindestens einer Induktivität) und mindestens 2 Schalter oder (2) mindestens eine eingebaute Induktivität und mindestens 4 Schalter enthalten.

580



Beschreibung**QUERVERWEIS AUF VERWANDTE ANWENDUNGEN**

[0001] Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der am 24. Juni 2021 eingereichten provisorischen US-Anmeldung Nr. 63/214,474 für „Multi-Level Structures and Methods for Switched Mode Power Supplies“ und der am 22. Dezember 2021 eingereichten US-Patentanmeldung Nr. 17/559,945 für „Multi-Level Structures and Methods for Switched-Mode Power Supplies“, die beide hier durch Bezugnahme im vollen Umfang einbezogen sind.

HINTERGRUND**(1) Technisches Gebiet**

[0002] Diese Erfindung bezieht sich auf elektronische Schaltungen und insbesondere auf Stromwandler-Schaltungen, einschließlich Gleichstrom-Gleichstrom-Wandlerschaltungen (DC-DC-Wandlerschaltungen).

(2) Hintergrund

[0003] Viele elektronische Produkte, insbesondere mobile Computer- und/oder Kommunikationsprodukte und -komponenten (z.B. Mobiltelefone, Notebooks, Ultrabook-Computer, Tablet-Geräte, LCD- und LED-Anzeigen) benötigen mehrere Spannungsniveaus. So können z.B. Hochfrequenz-(HF-)Sender-Leistungsverstärker relativ hohe Spannungen (z.B. 12 V oder mehr) benötigen, während Logikschaltungen ein niedriges Spannungsniveau (z.B. 1 - 3 V) erfordern können. Wieder andere Schaltungen können eine mittlere Spannung erfordern (z.B. 5-10 V).

[0004] Gleichstromwandler werden häufig eingesetzt, um eine niedrigere oder höhere Spannung aus einer gemeinsamen Stromquelle wie Batterien, Solarzellen, Brennstoffzellen und gleichgerichteten Wechselstromquellen zu erzeugen. Stromwandler, die aus einer Stromquelle mit höherer Eingangsspannung eine niedrigere Ausgangsspannung erzeugen, werden allgemein als Abwärtswandler bezeichnet, da die Ausgangsspannung V_{OUT} niedriger ist als die Eingangsspannung V_{IN} und der Wandler daher die Eingangsspannung „abwärts wandelt“. Stromwandler, die aus einer Stromquelle mit niedrigerer Eingangsspannung eine höhere Ausgangsspannung erzeugen, werden gemeinhin als Aufwärtswandler bezeichnet, da V_{OUT} größer als V_{IN} ist. Einige Stromwandler können entweder ein Abwärtswandler oder ein Aufwärtswandler sein, je nachdem, welche Anschlüsse für Eingang und Ausgang verwendet werden. Einige Stromwandler können einen invertierten Ausgang liefern.

[0005] Es wäre vorteilhaft, Wandlerzellentopologien für Stromwandler zu entwickeln, die eine geringere Spannungswelligkeit aufweisen, die Verwendung kleinerer und leistungssärmerer Schalter ermöglichen, eine höhere Energiedichte und einen besseren Wirkungsgrad bieten und einen verbesserten dynamischen Eingangs-/Ausgangsspannungsbereich ermöglichen.

KURZDARSTELLUNG

[0006] Die vorliegende Erfindung umfasst modifizierte Wandlerzellen für Schaltnetzteile, die geringere Induktivitätsanforderungen aufweisen, die Verwendung niedrigerer Spannungen und kleinerer Schalter ermöglichen, eine verbesserte Leistungsdichte und einen höheren Wirkungsgrad bieten und einen verbesserten dynamischen Eingangs-/Ausgangsspannungsbereich ermöglichen. Die vorliegende Erfindung umfasst ferner Verfahren zur Erzeugung von Wandlerzellentopologien mit drei oder mehr Knotenspannungsniveaus durch sukzessive Anwendung einer „Schalteraufteilungs- und Verbinde-über-einen-Kondensator-Operation“, die mit einer 2-Niveau-Wandlerzelle beginnen kann.

[0007] Die erfindungsgemäßen Verfahren oder Varianten dieser Verfahren können auf Wandlerzellentopologien angewendet werden, die 2-Niveau-Wandlerzellen mit mindestens einer Induktivität und zwei Schaltern sind. Eine nützliche Untergruppe solcher 2-Niveau-Wandlerzellen umfasst entweder (1) eine Anordnung von mindestens 3 eingebauten Energiespeicherelementen (d.h. 3 oder mehr Energiespeicherelemente in einer Kombination von eingebauten Induktivitäten und/oder Kapazitäten, aber einschließlich mindestens einer Induktivität) und mindestens 2 Schaltern oder (2) mindestens einer Induktivität und mindestens 4 Schaltern. Solche 2-Niveau-Wandlerzellen können einen Transformator oder gekoppelte Induktoren umfassen.

[0008] Eine Ausführungsform der Erfindung umfasst ein Verfahren zum Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle mit mindestens einer Induktivität und zwei Schaltern, wobei das Verfahren umfasst: Ersetzen von Diodenschaltern in der 2-Niveau-Wandlerzelle durch einpolige Einzelstellungsschalter; Auswählen eines Paares von Schaltern in der 2-Niveau-Wandlerzelle, die im stationären Betrieb nicht gleichzeitig leitend sind; Aufteilen jedes der beiden ausgewählten Schalter in 2 in Reihe geschaltete Schalter, wodurch ein Zwischenknoten zwischen den beiden in Reihe geschalteten ausgewählten Schaltern gebildet wird; und Verbinden der neu gebildeten Zwischenknoten durch einen Kondensator. In einigen Ausführungsformen umfasst das Aufteilen jedes der beiden ausgewählten Schalter in 2 in Reihe geschaltete Schalter das Beibehalten jedes der beiden ausgewählten Schalter und das Verbinden jedes der beiden ausgewählten Schalter in Reihe mit einem jeweiligen hinzugefügten Schalter.

[0009] Die Einzelheiten einer oder mehrerer Ausführungsformen der Erfindung sind in den beigefügten Zeichnungen und der nachfolgenden Beschreibung dargestellt. Weitere Merkmale, Gegenstände und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und den Zeichnungen sowie aus den Ansprüchen.

BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Fig. 1 ist ein Blockdiagramm einer Schaltung, die einen Stromwandler gemäß dem Stand der Technik enthält.

Fig. 2A ist ein schematisches Diagramm eines Teils einer 2-Niveau-Gleichspannung-zu-Gleichspannung-Abwärtswandlerschaltung gemäß dem Stand der Technik, die eine bestimmte Wandlerzelle enthält.

Fig. 2B ist ein Diagramm, das für die Schaltung von **Fig. 2A** das Spannungsniveau am Knoten Lx als Funktion der Zeit zeigt.

Fig. 3A ist ein schematisches Diagramm eines Teils einer 3-Niveau-Gleichspannung-zu-Gleichspannung-Abwärtswandlerschaltung gemäß dem Stand der Technik, die eine bestimmte Wandlerzelle enthält.

Fig. 3B ist ein Diagramm, das für die Schaltung von **Fig. 3A** das Spannungsniveau am Knoten Lx als Funktion der Zeit zeigt.

Fig. 4 ist eine symbolische Darstellung einer Wandlerzelle mit 3 Anschlüssen.

Fig. 5A ist ein Prozessablaufdiagramm, das ein erstes Verfahren zur Modifizierung einer ausgewählten 2-Niveau-Wandlerzelle in eine M-Niveau-Wandlerzelle darstellt, wobei $M \geq 3$ ist.

Fig. 5B ist ein Prozessablaufdiagramm, das ein zweites Verfahren zur Modifizierung einer ausgewählten 2-Niveau-Wandlerzelle in eine M-Niveau-Wandlerzelle darstellt, wobei $M \geq 3$ ist.

Fig. 5C ist ein Prozessablaufdiagramm, das ein drittes Verfahren zur Modifizierung einer ausgewählten 2-Niveau-Wandlerzelle in eine M-Niveau-Wandlerzelle beschreibt, wobei $M \geq 3$ ist.

Fig. 6 ist ein schematisches Diagramm einer nicht isolierten 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle gemäß dem Stand der Technik.

Fig. 7A ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen, nicht isolierten 3-Niveau-Cuk-Wandlerzelle.

Fig. 7B ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen nicht isolierten 4-Niveau-Cuk-Wandlerzelle.

Fig. 8 ist ein schematisches Diagramm einer isolierten 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle gemäß dem Stand der Technik.

Fig. 9A ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen isolierten 3-Niveau-Cuk-Wandlerzelle.

Fig. 9B ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen isolierten 4-Niveau-Cuk-Wandlerzelle.

Fig. 10A ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle gemäß dem Stand der Technik.

Fig. 10B ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle gemäß dem Stand der Technik.

Fig. 11A ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 3-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzelle.

Fig. 11 B ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 4-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzelle.

Fig. 12A ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle gemäß dem Stand der Technik.

Fig. 12B ist ein schematisches Diagramm einer Variante einer 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle gemäß dem Stand der Technik.

Fig. 12C ist ein schematisches Diagramm einer weiteren Variante einer 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle.

Fig. 13A ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 3-Niveau-Flyback-Wandlerzelle mit einer Topologie, die aus der Schaltung von **Fig. 12A** durch Anwendung von Verfahren, wie sie in den **Fig. 5A-5C** beschrieben sind, erzeugt wurde.

Fig. 13B ist ein schematisches Diagramm einer Flyback-Wandlerzelle mit zwei Schaltern.

Fig. 13C ist ein schematisches Diagramm einer Flyback-Wandlerzelle mit zwei Schaltern auf der Grundlage von **Fig. 12C**, dargestellt nach einer zweifachen Anwendung eines der Verfahren der vorliegenden Erfindung.

Fig. 14 ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle gemäß dem Stand der Technik.

Fig. 15A ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 3-Niveau-Vorwärtswandlerzelle mit einer Topologie, die aus der Schaltung von **Fig. 14** durch Anwendung von Verfahren wie den in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen erzeugt wurde.

Fig. 15B ist ein schematisches Diagramm einer Vorwärtswandlerzelle mit zwei Schaltern.

Fig. 15C ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle mit zwei Schaltern nach der Umwandlung in eine 3-Niveau-Topologie in Übereinstimmung mit Verfahren, wie sie in den **Fig. 5A-5C** beschrieben sind.

Fig. 16 ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Wandlerzelle der Ordnung 1 gemäß dem Stand der Technik mit 4 Schaltern.

Fig. 17 ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 3-Niveau-Wandlerzelle mit einer Topologie, die aus der Schaltung von **Fig. 16** durch Anwendung von Verfahren, wie sie in den **Fig. 5A-5C** beschrieben sind, erzeugt wurde.

Fig. 18 ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Wandlerzelle der Ordnung 1 mit 4 Schaltern, die eingekreiste zugehörige Paare von Schaltern zeigt, die jeweils in neue Paare von Schaltern aufgeteilt und durch einen Kondensator zwischen den Knoten zwischen den neuen Paaren von Schaltern verbunden werden können.

Fig. 19-30 sind schematische Diagramme einiger Beispiele von Wandlerzellen-Schaltungstopologien, die durch Anwendung der in **Fig. 5A-5C** dargestellten Verfahren oder von Varianten dieser Verfahren in Wandlerzellen mit mehr Niveaus umgewandelt werden können.

Fig. 31-33 sind schematische Diagramme einiger Beispiele für komplexere Wandlerzellentopologien, die durch Anwendung der in **Fig. 5A-5C** dargestellten Verfahren oder von Varianten dieser Verfahren in Wandlerzellen mit mehr Niveaus umgewandelt werden können.

Fig. 34 ist ein Blockdiagramm, das ein Beispiel für eine Mehrzellenkonfiguration zeigt, die zwei oder mehr parallel geschaltete Wandlerzellen 1-n mit gemeinsamen Eingängen V_{IN} und gemeinsamen Ausgängen V_{OUT} umfasst.

Fig. 35 ist ein Blockdiagramm einer Ausführungsform der Steuerschaltung für eine M-Niveau-Wandlerzelle, die mit einem Ausgangsblock verbunden ist, der einen Induktor L und einen Ausgangskondensator C_{OUT} umfasst (konzeptionell kann der Induktor L auch als Bestandteil der M-Niveau-Wandlerzelle betrachtet werden).

[0010] Gleiche Bezugsnummern und Bezeichnungen in den verschiedenen Zeichnungen bezeichnen gleiche Elemente.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0011] Die vorliegende Erfindung umfasst modifizierte Wandlerzellen für Schaltnetzteile, die geringere Induktivitätsanforderungen aufweisen (aufgrund niedrigerer an die Anschlüsse der Induktoren angelegter Spannungen), die die Verwendung niedrigerer Spannungen und kleinerer Schalter ermöglichen, die eine höhere

Energiedichte und einen besseren Wirkungsgrad bieten und die für einen verbesserten dynamischen Eingangs-/Ausgangsspannungsbereich sorgen. Die vorliegende Erfindung umfasst ferner Verfahren zur Erzeugung von Wandlerzellentopologien mit drei oder mehr Knotenspannungsniveaus durch sukzessive Anwendung einer „Schalteraufteilungs- und Verbinde-über-einen-Kondensator-Operation“, die mit einer 2-Niveau-Wandlerzelle beginnen kann.

Schaltnetzteile

[0012] Fig. 1 ist ein Blockdiagramm einer Schaltung, die einen Stromwandler 100 gemäß dem Stand der Technik enthält. In dem dargestellten Beispiel umfasst der Stromwandler 100 eine Wandlerzelle 102 und eine Steuerung 104. Die Wandlerzelle 102 ist dazu konfiguriert, eine Eingangsspannung V_{IN} von einer Spannungsquelle 106 (z.B. einer Batterie) über die (gemeinsamen) Anschlüsse N1, N3 erhält und die Eingangsspannung V_{IN} in eine Ausgangsspannung V_{OUT} über die (gemeinsamen) Anschlüsse N2, N3 umwandelt. Die Ausgangsspannung V_{OUT} wird im Allgemeinen über einen Ausgangskondensator C_{OUT} verbunden, über den eine hier als äquivalenter Widerstand R dargestellte Last angeschlossen sein kann. In einigen Ausführungsformen des Stromwandlers 100 können auch (nicht dargestellte) Hilfsschaltungen vorhanden sein, wie z.B. Vorspannungsgenerator(en), ein Taktgenerator, eine Spannungssteuerungsschaltung usw., die mit der Wandlerzelle 102 und der Steuerung 104 verbunden sind.

[0013] Die Steuerung 104 empfängt einen Satz von Eingangssignalen und erzeugt einen Satz von Ausgangssignalen. Einige dieser Eingangssignale kommen über einen mit der Wandlerzelle 102 verbundenen Signalweg 110. Einige Eingangssignale enthalten Informationen, die den Betriebszustand der Wandlerzelle 102 anzeigen. Die Steuerung 104 empfängt im Allgemeinen auch mindestens ein Takt-/Zeitsignal CLK und ein oder mehrere externe Eingangs-/Ausgangssignale I/O, die analog, digital (kodierte oder direkte Signalleitungen) oder eine Kombination von beidem sein können. Auf der Grundlage der empfangenen Eingangssignale erzeugt die Steuerung 104 eine Reihe von Steuersignalen, die über den Signalpfad 110 an die Wandlerzelle 102 zurückgegeben werden und die die internen Komponenten der Wandlerzelle 102 steuern (z.B. interne integrierte oder externe diskrete Schalter wie FETs, insbesondere MOSFETs), um die Wandlerzelle 102 zu veranlassen, V_{IN} in V_{OUT} umzuwandeln.

[0014] In einigen Ausführungen von Stromwandlern verwendet die Wandlerzelle 102 einen Induktor als Energiespeicherelement. Fig. 2A ist beispielsweise ein schematisches Diagramm eines Teils einer 2-Niveau-Gleichstrom-zu-Gleichstrom-Abwärtswandlerschaltung 200 gemäß dem Stand der Technik, die eine bestimmte Wandlerzelle 102a enthält. Innerhalb der Wandlerzelle 102a ist ein Satz von zwei Schaltern QH, QL zwischen V_{IN} (angelegt an Anschluss N1) und eine gemeinsame Referenzspannung (z.B. Schaltungsmasse GND, gekoppelt an Anschluss N3) in Reihe geschaltet. Ein Energiespeicherinduktor L ist von einem Knoten L_x zwischen den Satz von Schaltern QH, QL mit einem Ausgangskondensator C_{OUT} verbunden, der für die Glättung hoher Frequenzen (z.B. Schaltfrequenz) und die Energiespeicherung sorgt. Die Spannung am Ausgangskondensator C_{OUT} vom Anschluss N2 beträgt V_{OUT} und ist mit einer Last R verbunden.

[0015] Eine Funktion des Induktors L und des Ausgangskondensators C_{OUT} ist die Energieübertragung und -speicherung. Ein Teil der Steuerschaltung für die Wandlerzelle 102a umfasst im Allgemeinen eine Pulsweitenmodulations-(PWM)-Tastgrad-Steuerung (nicht dargestellt), die mit Steuereingängen der Schalter QH, QL (z.B. den Gates von MOSFETs) gekoppelt ist, um die Schalter QH, QL abwechselnd zu aktivieren (zu schließen oder auf „EIN“ zu schalten) und zu deaktivieren (zu öffnen oder auf „AUS“ zu schalten), um den Energiefluss zur Last R zu steuern. Die PWM-Tastgrad-Steuerung empfängt im Allgemeinen ein Takt- oder Zeitsignal und V_{OUT} als Rückkopplungsspannung. Die Rückkopplungsspannung ermöglicht es der PWM-Tastgrad-Steuerung, den Tastgrad eines PWM-Steuersignals für die Schalter QH, QL zu variieren, um Änderungen der Last R auszugleichen, wodurch V_{OUT} geregelt wird.

[0016] In dem in Fig. 2A dargestellten Beispiel schaltet die Wandlerzelle 102a zwischen zwei Schaltzuständen um: QH geschlossen und QL offen (Spannungsniveau am Knoten $L_x = V_{IN}$) oder QH offen und QL geschlossen (Spannungsniveau am Knoten $L_x = GND$). Fig. 2B ist ein Diagramm, das das Spannungsniveau am Knoten L_x als Funktion der Zeit für die Schaltung von Fig. 2A zeigt. Die Diagrammlinie 202 ist das durchschnittliche Spannungsniveau am Knoten L_x , wenn die Schalter QH und QL zwischen den beiden verfügbaren Schalterzuständen umschalten (d.h. QH geschlossen und QL offen für einen Ladezustand oder QH offen und QL geschlossen für einen Entladezustand). Die PWM-Tastgrad-Steuerung legt die Dauer in jedem Schaltzustand fest, was die Amplitude der durchschnittlichen Spannung am Knoten L_x bestimmt. Wandler 100, die auf solchen Wandlerzellen 102 basieren, werden auch als Schaltnetzteile (SMPS) bezeichnet.

[0017] Wie durch Betrachtung von **Fig. 2B** ersichtlich, erfährt der Induktor L große Spannungssprünge am Knoten L_x , von GND zu V_{IN} und zurück zu GND. Die sich daraus ergebende Spannung (oder Spannungswelligkeit) an dem Induktor L erfordert eine umfangreiche Filterung, um eine gleichmäßige V_{OUT} zu erzeugen, was im Allgemeinen bedeutet, dass C_{OUT} eine große Kapazität haben muss (was normalerweise ein großes Bauteil erfordert). Darüber hinaus müssen die Schalter QH und QL möglicherweise dem gesamten Spannungsbereich von V_{IN} bis GND standhalten, was im Allgemeinen bedeutet, dass die Schalter QH, QL physisch groß sind, wenn sie als FETs implementiert sind (z.B. weil jeder Schalter einen großen Driftbereich oder mehrere FETs umfasst, die in Reihe geschaltet - „gestapelt“ - sind, um dem gesamten Spannungsbereich standzuhalten).

[0018] Die Spannungswelligkeit an dem Induktor L und der Spannungshub an einem beliebigen Schalter können durch Hinzufügen weiterer Serienschalter und Ladungstransferkondensatoren als Energiespeicherelemente zur Übertragung von Ladung von V_{IN} auf V_{OUT} verringert werden. Solche Ladungstransferkondensatoren sind allgemein als „fliegende Kondensatoren“ oder „Pumpkondensatoren“ bekannt und können externe Komponenten sein, die mit einer Ausführungsform einer integrierten Schaltung einer Wandlerschaltung verbunden sind.

[0019] **Fig. 3A** ist beispielsweise ein schematisches Diagramm eines Teils einer 3-Niveau-Gleichstrom-zu-Gleichstrom-Abwärts-wandler-Schaltung 300 gemäß dem Stand der Technik, der eine bestimmte Wandlerzelle 102b enthält. Ein Satz von vier Schaltern, QH2, QH1, QL1, QL2, ist in Reihe zwischen V_{IN} (angelegt an Anschluss N1) und eine gemeinsame Referenzspannung (z.B. Schaltungsmasse GND, gekoppelt an Anschluss N3) geschaltet. Ein fliegender Kondensator C1 ist von einem „High-Side“-Knoten N_H zwischen den Schaltern QH2 und QH1 mit einem „Low-Side“-Knoten N_L zwischen den Schaltern QL1 und QL2 verbunden. Ein Energiespeicherinduktor L ist von einem Knoten L_x zwischen dem innersten Satz von Schaltern QH1, QL1 an einen Ausgangskondensator C_{OUT} gekoppelt. Auch hier beträgt die Spannung über den Ausgangskondensator C_{OUT} am Anschluss N2 V_{OUT} .

[0020] Im dargestellten Beispiel ermöglicht das Vorhandensein des fliegenden Kondensators C1 in der Wandlerschaltung 200 vier Schaltzustände, die jeweils einen von drei „Knoten“-Spannungsniveaus am Knoten L_x erzeugen, wie in TABELLE 1 unten dargestellt.

TABELLE 1

Spannungsniveau	QH2-Zustand	QH1-Zustand	QL1-Zustand	QL2-Zustand	L_x Spannung
1	offen	offen	geschlossen	geschlossen	0 V
2	geschlossen	offen	geschlossen	offen	$V_{IN}/2$
2	offen	geschlossen	offen	geschlossen	$V_{IN}/2$
3	geschlossen	geschlossen	offen	offen	V_{IN}

[0021] **Fig. 3B** ist ein Diagramm, das das Spannungsniveau am Knoten L_x als Funktion der Zeit für die Schaltung von **Fig. 3A** zeigt. Diagrammlinie 302 ist das durchschnittliche Spannungsniveau am Knoten L_x , wenn die Schalter zwischen GND und den beiden Niveau-2-Schalterzuständen (d.h. $V_{IN}/2$) zyklisch wechseln, und hat denselben Wert wie Diagrammlinie 202 in **Fig. 2B**. Wie durch Betrachtung von **Fig. 3B** ersichtlich, erfährt der Induktor L viel geringere Sprünge im Spannungsniveau am Knoten L_x , die von GND (Stufe 1) nur auf $V_{IN}/2$ (Stufe 2) und zurück zu GND gehen. Die sich daraus ergebende geringere Spannungswelligkeit über den Induktor L erfordert eine wesentlich geringere Filterung, um eine V_{OUT} mit geringer Spannungswelligkeit zu erzeugen.

[0022] Die Topologie der Wandlerzelle 102b in **Fig. 3A** ist allgemein als „Multi-Niveau-Wandler“ bekannt (genauer gesagt als 3-Niveau-Multi-Niveau-Wandler). Es gibt jedoch viele Dutzend verschiedener Arten von Wandlerzellentopologien, die in einem Stromwandler ähnlich dem in **Fig. 1** gezeigten verwendet werden könnten.

[0023] Es wäre vorteilhaft, Wandlerzellentopologien in Schaltnetzteilen zu verwenden, die jedoch so modifiziert sind, dass sie (eine) geringere Spannungswelligkeit und/oder Induktivitätsanforderungen aufweisen, die Verwendung von niedrigeren Spannungen und kleineren Schaltern ermöglichen, eine höhere Energiedichte

und einen besseren Wirkungsgrad bieten und einen verbesserten dynamischen Eingangs-/Ausgangsspannungsbereich aufweisen.

Verallgemeinerte Wandlerzellen

[0024] Eine Wandlerzelle kann definiert werden als eine topologische Kombination aus mindestens einer eingebauten (d.h. nicht parasitären) Induktivität oder einer gestalteten parasitären Induktivität und mindestens einem Paar komplementärer Schalter (einschließlich Schalteräquivalenten, wie Dioden in einigen Ausführungen), die so angeordnet sind, dass, wenn eine Eingangsspannungsquelle und eine Ausgangsspannungslast angeschlossen werden, der Tastgrad die Ausgangsspannung steuert. Es kann auch Zeiten geben, in denen das Paar von komplementären Schaltern gleichzeitig ausgeschaltet ist (z.B. Totzeit oder überschneidungsfreie Zeit).

[0025] Wandlerzellen ohne Transformator können als Gerät mit drei Anschlüssen (Eingangsspannungsquelle, Ausgangsspannungslast und gemeinsame Leitung) modelliert werden, das auf 3 oder 6 verschiedene Arten (je nach Symmetrie der Wandlerzelle) an eine Eingangsspannungsquelle, eine Ausgangsspannungslast und eine gemeinsame Leitung angeschlossen werden kann, um verschiedene Wandler zu erzeugen, während die in **Fig. 1** gezeigte allgemeine Stromwandlerstruktur erhalten bleibt. Wandlerzellen, die eine Induktivität in Form eines Transformators enthalten, können als Gerät mit 4 Anschlüssen und separater Masse modelliert werden, wobei die nachstehend beschriebenen Verfahren weiterhin gelten. Eine Wandlerzelle kann eine oder mehrere vorgesehene interne oder externe Kapazitäten enthalten, die verbunden sind (oder über einen Schalter verbindbar sind) mit (1) zwei Anschlüssen der Wandlerzelle und (2) in Reihe mit mindestens einer eingebauten Induktivität.

[0026] **Fig. 4** ist eine symbolische Darstellung einer Wandlerzelle 400 mit 3 Anschlüssen. Je nach Verbindung kann einer der Anschlüsse N1, N2 oder N3 mit einer Quelle mit einer Eingangsspannung verbunden sein. Einer der verbleibenden Anschlüsse würde mit einer Last gekoppelt und würde eine entsprechende Umwandlungsausgangsspannung abgeben, und der letzte verbleibende Anschluss würde mit einer gemeinsamen Leitung verbunden. Beispielsweise kann N3 mit einer gemeinsamen Leitung (z.B. Schaltungsmasse), N1 mit einer Eingangsspannungsquelle V1 und N2 mit einer Ausgangsspannungslast gekoppelt sein, der eine Ausgangsspannung V2 zugeführt werden soll. Wenn $V2 > V1$ ist, befindet sich die Wandlerzelle 400 in einer Aufwärts-Konfiguration. Wenn $V2 < V1$ ist, befindet sich die Wandlerzelle 400 in einer Abwärtskonfiguration. Durch Schaltkopplungen für die Anschlüsse kann bei einigen Wandlerzellentopologien eine invertierende Konfiguration oder eine Abwärts-Aufwärts-Konfiguration verfügbar sein, bei der der Tastgrad der Schalter innerhalb der Wandlerzelle 400 bestimmt, ob die Wandlerzelle 400 eine zugeführte Eingangsspannung verringert oder vergrößert. Die Anschlüsse N1, N2, N3 können entweder direkt oder über einen oder mehrere Schalter und/oder Kondensatoren mit einem Induktor L innerhalb der Wandlerzelle 400 verbunden sein.

[0027] Ein wesentlicher Aspekt der Wandlerzellen, die Gegenstand des erfindungsgemäßen Verfahrens sind, besteht darin, dass mindestens ein Paar komplementärer Schalter einen Ausgangsanschluss über ein Energiespeicherelement der Wandlerzelle intermittierend an ein erstes Potenzial (letztlich von einem Eingangsanschluss) und an ein zweites Potenzial (letztlich von einem gemeinsamen Anschluss) koppelt - d.h. solche Wandlerzellen sind mindestens 2-Niveau-Geräte. Die tatsächliche Ausgangsspannung, die an dem betreffenden Anschluss verfügbar ist, ist eine Funktion des Schalttastgrads, der von einer Steuerschaltung außerhalb der Wandlerzelle eingestellt wird.

[0028] Die Topologie einer 2-Niveau-Wandlerzelle kann auch nach ihrer Ordnung klassifiziert werden, die die Anzahl der verwendeten Energiespeicherelemente (eingebaute Induktivitäten und Kondensatoren) angibt, sowie nach der Anzahl der verwendeten einpoligen Einzelstellungsschalter (SPST). Bei einer Aufzählung von 2-Niveau-Wandlerzellen werden beispielsweise 4 Klassen von Wandlerzellen identifiziert, wobei jede Klasse ein oder mehrere „Bauteile einer Familie“ umfasst und jedes Bauteil einer Familie mehrere Varianten einer grundlegenden Wandlerzellentopologie enthält, wie in TABELLE 2 dargestellt.

TABELLE 2

Ordnung	Anzahl von Schaltern	Anzahl der Bauteile der Familie
1	2	1
1	4	1
3	2	5

Ordnung	Anzahl von Schaltern	Anzahl der Bauteile der Familie
3	4	7

[0029] Man beachte, dass diese Aufzählung grundlegende Wandlerzellen identifiziert und daher geringfügige Varianten, die das grundlegende Verhalten einer zugrundeliegenden grundlegenden Wandlerzelle nicht verändern, nicht berücksichtigt. Grundlegende Wandlerzellen, Varianten solcher Wandlerzellen und komplexere Wandlerzellen können jedoch für eine Modifizierung gemäß der vorliegenden Erfindung in Frage kommen, solange sie mindestens 2-Niveau-Wandlerzellen mit mindestens einer Induktivität und zwei komplementären Schaltern sind. Eine zweckmäßige Untergruppe von 2-Niveau-Wandlerzellen umfasst entweder (1) eine Anordnung von mindestens 3 eingebauten Energiespeicherelementen (d.h. 3 oder mehr Energiespeicherelemente in einer Kombination von vorgesehenen Induktivitäten und/oder Kapazitäten, aber einschließlich mindestens einer Induktivität) und mindestens 2 Schaltern oder (2) mindestens eine Induktivität und mindestens 4 Schalter. Solche 2-Niveau-Wandlerzellen können einen Transformator oder gekoppelte Induktoren enthalten.

Allgemeines Verfahren zur Modifizierung von 2-Niveau-Wandlerzellen zu M-Niveau-Wandlerzellen

[0030] Fig. 5A ist ein Prozessablaufdiagramm 500, das ein erstes Verfahren zur Modifizierung einer ausgewählten 2-Niveau-Wandlerzelle in eine M-Niveau-Wandlerzelle darstellt, wobei $M \geq 3$ ist. Das dargestellte Verfahren umfasst die folgenden Schritte, von denen einige in einer anderen Reihenfolge ausgeführt werden können.

[0031] Block 502: Der Wert von M (die Anzahl der Knotenspannungen) wird (z.B. von einem Schaltungsentwickler) auf einen Wert von 3 oder mehr gesetzt.

[0032] Block 504: Beginnend mit der ausgewählten 2-Niveau-Wandlerzellentopologie wird jeder Diodenschalter (falls in der 2-Niveau-Wandlerzellentopologie enthalten), der den Ausgang der Wandlerzelle beeinflusst, durch einen SPST-Schalter ersetzt. Wenn in einer Wandlerzellentopologie keine Diodenschalter vorhanden sind, kann dieser Schritt natürlich entfallen.

[0033] Block 506: Wähle ein Paar von Schaltern aus, die im stationären Betrieb nicht gleichzeitig auf EIN geschaltet (d.h. die nicht leitend und somit auf AUS geschaltet) sind, so dass ein Kurzschluss zur Erde geschaffen werden kann. Darüber hinaus sollte das ausgewählte Paar von Schaltern die Wandlerzelle in die Lage versetzen, eine brauchbare Gleichstrom-Gleichstrom-Wandlung zu liefern. Dieser Schritt umfasst 2-Niveau-Wandlerzellen, die anfangs mehr als zwei Schalter haben können (z.B. ein Vorwärtswandler). Wenn mehrere Paare solcher Schalter vorhanden sind, kann ein beliebiges Paar ausgewählt werden.

[0034] Block 508: „Teile“ jedes der beiden ausgewählten Schalter in 2 in Reihe geschaltete Schalter auf, wodurch ein Zwischenknoten zwischen jedem Paar der 2 in Reihe geschalteten Schalter gebildet wird. Konzeptionell bedeutet „aufteilen“, dass beide ausgewählte Schalter durch ein entsprechendes Paar von in Reihe geschalteten Schaltern ersetzt werden. In der Praxis können die ursprünglichen Schalter (nach dem Ersetzen jedes Diodenschalters durch einen SPST-Schalter) einfach neu benannt werden, und dann würden zwei neue Schalter mit den neu benannten Schaltern in Reihe geschaltet, um ein Paar in Reihe geschalteter Schalter zu bilden.

[0035] Block 510: Verbinde die neu gebildeten Zwischenknoten über einen Kondensator. Die hinzugefügten Schalter und der Kondensator fügen der Wandlerzelle ein weiteres Knotenspannungsniveau hinzu.

[0036] Block 512: Das fertige 3-Niveau-Topologiedesign kann an dieser Stelle ausgegeben werden. Für einige Anwendungen kann eine 3-Niveau-Topologie im Vergleich zu einer 2-Niveau-Topologie so viele Vorteile bieten, dass der Prozess als abgeschlossen betrachtet werden kann.

Block 514: Prüfe, ob M größer als 3 ist.

Block 516: Wenn M nicht größer als 3 ist, ist der Prozess abgeschlossen.

Block 518: Wenn M größer als 3 ist, dann wird ein Niveauzähler $n = 3$ gesetzt.

Block 520: Inkrementiere den Niveauzähler $n = n + 1$.

Block 522: „Teile“ jedes der nächsten Paare von Schaltern innerhalb oder außerhalb der vorherigen Über-Kondensator-Schleife in 2 in Reihe geschaltete Schalter auf und bilde so einen Zwischenknoten zwischen jedem Paar der beiden in Reihe geschalteten Schalter. Man beachte, dass an dieser Stelle nicht vorgeschrieben ist, nur innere oder nur äußere Schalter zur Aufteilung zu verwenden - es kann auch eine Mischung verwendet werden. Wenn z.B. eine 3-Niveau-Topologie durch Aufteilung der inneren Schalter einer 2-Niveau-Topologie erzeugt wird, kann eine 4-Niveau-Topologie durch Aufteilung der äußeren Schalter der erzeugten 3-Niveau-Topologie erzeugt werden.

Block 524: Verbinde die neu gebildeten Zwischenknoten über einen Kondensator. Die hinzugefügten Schalter und der Kondensator fügen der Wandlerzelle ein weiteres Knotenspannungsniveau hinzu.

Block 526: Das fertige n-Niveau-Topologiedesign kann an dieser Stelle ausgegeben werden.

Block 528: Prüfung, ob M größer als n ist; wenn nicht, Schleife zu Block 520.

Block 530: Wenn M größer als n ist, ist der Prozess abgeschlossen.

[0037] Variationen des obigen Verfahrens können mit demselben Effekt verwendet werden. **Fig. 5B** ist beispielsweise ein Prozessablaufdiagramm 550, das ein zweites Verfahren zur Umwandlung einer ausgewählten 2-Niveau-Wandlerzelle in eine M -Niveau-Wandlerzelle beschreibt, wobei $M \geq 3$ ist. Das dargestellte Verfahren umfasst die folgenden Schritte, von denen einige in einer anderen Reihenfolge durchgeführt werden können.

Block 552: Der Wert von M (die Anzahl der Knotenspannungen) wird (z.B. von einem Schaltungsentwickler) auf einen Wert von 3 oder mehr gesetzt.

Block 554: Beginnend mit der ausgewählten 2-Niveau-Wandlerzellentopologie wird jeder Diodenschalter (falls in der 2-Niveau-Wandlerzellentopologie enthalten), der den Ausgang der Wandlerzelle beeinflusst, durch einen SPST-Schalter ersetzt. Wenn in einer Wandlerzellentopologie keine Diodenschalter vorhanden sind, kann dieser Schritt natürlich entfallen.

Block 556: Wähle ein Paar von Schaltern aus, die im stationären Betrieb nicht gleichzeitig auf EIN geschaltet (d.h. nicht leitend und somit auf AUS geschaltet) sind, so dass ein Kurzschluss zur Erde geschaffen werden kann. Darüber hinaus sollte das gewählte Paar von Schaltern die Wandlerzelle in die Lage versetzen, eine brauchbare Gleichstrom-Gleichstrom-Wandlung zu liefern. Dieser Schritt ermöglicht die Entwicklung von 2-Niveau-Wandlerzellen, die anfangs mehr als zwei Schalter haben können (z.B. ein Vorwärtswandler).

Block 558: „Teile“ jeden der beiden ausgewählten Schalter in 2 Serienschalter auf, wodurch ein Zwischenknoten zwischen jedem Paar der 2 Serienschalter gebildet wird.

Block 560: Verbinde die neu gebildeten Zwischenknoten über einen Kondensator. Die hinzugefügten Schalter und der Kondensator fügen der Wandlerzelle ein weiteres Knotenspannungsniveau hinzu.

Block 562: Dekrementiere M um 1.

Block 564: Prüfe, ob M kleiner als 3 ist.

Block 566: Wenn M nicht kleiner als 3 ist, wähle ein entsprechendes Paar geteilter Schalter aus (das können die Schalter sein, die den in Block 556 ausgewählten Schaltern entsprechen) und gehe zu Block 558. Wenn also zum Beispiel ein Paar von Schaltern A und B in A1-A2 und B1-B2 „aufgeteilt“ wird, können entweder A1 und B1 oder A2 und B2 für die weitere „Aufteilung“ ausgewählt werden.

Block 568: Wenn M kleiner als 3 ist, kann das endgültige fertige Topologiedesign ausgegeben werden.

Block 570: Der Prozess ist abgeschlossen.

[0038] Als weiteres Beispiel für eine Variante des in **Fig. 5A** gezeigten Verfahrens ist in **Fig. 5C** ein Prozessablaufdiagramm 580 dargestellt, das ein drittes Verfahren zur Modifizierung einer ausgewählten 2-Niveau-Wandlerzelle zu einer M -Niveau-Wandlerzelle beschreibt, wobei $M \geq 3$ ist. Das dargestellte Verfahren umfasst die folgenden Schritte, von denen einige in einer anderen Reihenfolge ausgeführt werden können.

Block 582: Der Wert von M (die Anzahl der Knotenspannungen) wird (z.B. von einem Schaltungsentwickler) auf einen Wert von 3 oder mehr eingesetzt.

Block 584: Beginnend mit der ausgewählten 2-Niveau-Wandlerzellentopologie wird jeder Diodenschalter (falls in der 2-Niveau-Wandlerzellentopologie enthalten), der den Ausgang der Wandlerzelle beeinflusst,

durch einen SPST-Schalter ersetzt. Wenn in einer Wandlerzellentopologie keine Diodenschalter vorhanden sind, kann dieser Schritt natürlich ausgelassen werden.

Block 586: Wähle ein Paar von Schaltern aus, die im stationären Betrieb nicht gleichzeitig auf EIN geschaltet (d.h. nicht leitend und somit auf AUS geschaltet) sind, so dass ein Kurzschluss zur Erde geschaffen werden kann. Darüber hinaus sollte das gewählte Paar von Schaltern die Wandlerzelle in die Lage versetzen, eine brauchbare Gleichstrom-Gleichstrom-Wandlung zu liefern. Dieser Schritt ermöglicht die Entwicklung von 2-Niveau-Wandlerzellen, die anfangs mehr als zwei Schalter haben können (z.B. ein Vorwärtswandler).

Block 588: „Teile“ jedes der beiden ausgewählten Schalter in 2 Serienschalter auf, wodurch ein Zwischenknoten zwischen jedem Paar der 2 Serienschalter gebildet wird.

Block 590: Verbinde die neu gebildeten Zwischenknoten über einen Kondensator. Die hinzugefügten Schalter und der Kondensator fügen der Wandlerzelle ein weiteres Knotenspannungsniveau hinzu.

Block 592: Dekrementiere M um 1.

Block 594: Prüfe, ob M kleiner als 3 ist, und wenn M nicht kleiner als 3 ist, Schleife zu Block 586.

Block 596: Wenn M kleiner als 3 ist, kann das endgültige fertige Topologiedesign ausgegeben werden.

Block 598: Der Prozess ist abgeschlossen.

[0039] Es sollte klar sein, dass andere Variationen der oben genannten Verfahren mit dem gleichen Effekt verwendet werden können. Beispielsweise können alle Verfahren mit einer Wandlerzellentopologie beginnen, die ein höheres Niveau als eine 2-Niveau-Wandlerzelle aufweist (z.B. eine 3-Niveau-Wandlerzelle).

[0040] Nachfolgend werden Beispiele für die Anwendung der oben genannten Verfahren auf eine Vielzahl von 2-Niveau-Wandlerzellen aufgeführt, die mindestens eine eingebaute Induktivität und mindestens ein Paar komplementärer Schalter (einschließlich Schalteräquivalenten, wie Dioden in einigen Ausführungen) enthalten. Eine nützliche Untergruppe solcher 2-Niveau-Wandlerzellen umfasst entweder (1) eine Anordnung von mindestens 3 eingebauten Energiespeicherelementen (d.h. 3 oder mehr Energiespeicherelemente in einer Kombination von vorgesehenen Induktivitäten und/oder Kondensatoren, aber einschließlich mindestens einer Induktivität) und mindestens 2 Schaltern oder (2) mindestens eine Induktivität und mindestens 4 Schalter. Solche 2-Niveau-Wandlerzellen können einen Transformator oder gekoppelte Induktoren enthalten.

Nicht-isolierte Ćuk-Wandlerzellen-Ausführungsformen

[0041] Fig. 6 ist ein schematisches Diagramm einer nicht isolierten 2-Niveau-Ćuk-Wandlerzelle 600 gemäß dem Stand der Technik. Im dargestellten Beispiel umfasst die Wandlerzelle 600 ein erster Induktor L1, der mit einem Kondensator C0 in Reihe geschaltet ist, der wiederum mit einem zweiten Induktor L2 in Reihe geschaltet ist. Eine umzuwandelnde Spannung kann an den Anschluss N1 angelegt werden, wobei die umgewandelte Ausgabe am Anschluss N2 zur Verfügung steht. Ein erster Schalter QL ist von einem Knotenpunkt zwischen L1 und C0 mit dem Anschluss N3 gekoppelt (im gezeigten Beispiel ist der Anschluss N3 mit einem Bezugspotenzial wie z.B. der Schaltungsmasse verbunden). Ein zweiter Schalter QR in Form einer Diode ist von einem Knotenpunkt zwischen C0 und L2 mit dem Anschluss N3 verbunden. In alternativen Ausführungsformen kann QR durch einen Schalter wie QL ersetzt werden.

[0042] Der Hauptvorteil einer nicht isolierten Ćuk-Wandlerzelle liegt bekanntlich in den kontinuierlichen Strömen am Eingang und am Ausgang der Wandlerzelle. Der Hauptnachteil ist die hohe Strombelastung für den Schalter QL.

[0043] Die Beanspruchung des Schalters QL kann gemildert und die Größe einiger Komponenten reduziert werden, indem die Topologie der Schaltung in Fig. 6 gemäß Verfahren wie den in Fig. 5A-5C beschriebenen geändert wird. Fig. 7A ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen nicht isolierten 3-Niveau-Ćuk-Wandlerzelle 700. Ausgehend von der 2-Niveau-Schaltung in Fig. 6 wird der Diodenschalter QR durch einen einpoligen Einzelstellungsschalter (SPST) ersetzt. Dann werden sowohl der QL als auch der QR-Schalter in zwei in Reihe geschaltete Schalter „aufgeteilt“, d.h. sie werden beide durch ein Paar entsprechender in Reihe geschalteter Schalter QL1, QL2 und QR1, QR2 „ersetzt“. Aus einem anderen Blickwinkel betrachtet, werden die ursprünglichen Schalter aus Fig. 6 (nachdem der Diodenschalter QR durch einen SPST-Schalter ersetzt wurde) mit „QL1“ und „QR1“ bezeichnet, und zwei neue Schalter, QL2 und QR2, werden mit den neu bezeichneten Schaltern in Reihe geschaltet. Ein Kondensator C1 wird dann von einem Knoten zwischen QL1 und QL2 zu einem Knoten zwischen QR1 und QR2 verbunden.

[0044] Die sich daraus ergebende Topologie liefert 3 Spannungsniveaus am Knoten Lx der Wandlerzelle 700. Infolgedessen werden die Ausgangsspannungswelligkeit der Wandlerzelle 700 und der Spannungshub über einem beliebigen Schalter reduziert (unter der Annahme gleicher passiver Komponenten). Der geringere Spannungshub an den Schaltern ermöglicht die Verwendung kleinerer Schalter in erheblichem Umfang. So kann beispielsweise die 3-Niveau-Wandlerzelle von **Fig. 7A** im Vergleich zur 2-Niveau-Wandlerzelle von **Fig. 6** um das 2- bis 4-fache verkleinert werden. Eine solche Verkleinerung bedeutet im Allgemeinen auch eine Verringerung des Energieverbrauchs beim Schalten. Sowohl eine geringere Baugröße als auch eine bessere Energieeffizienz sind besonders wichtig für die Implementierung von Energieumwandlungslösungen in Anwendungen wie batteriebetriebenen tragbaren elektronischen Geräten (z.B. Mobiltelefonen).

[0045] Das Verfahren, das in Bezug auf die nicht isolierte Cuk-Wandlerzelle 700 von **Fig. 7A** angewandt wurde, kann iterativ angewandt werden, um Topologien mit mehr als 3 Knotenspannungen zu erzeugen. **Fig. 7B** ist zum Beispiel ein schematisches Diagramm einer neuartigen nicht isolierten 4-Niveau-Cuk-Wandlerzelle 710. In Bezug auf das in **Fig. 5A** gezeigte Verfahren ist M auf 4 gesetzt.

[0046] Da die 3-Niveau-Modifikation in **Fig. 7A** dargestellt ist (d.h. die Blöcke 502-512 wurden abgeschlossen), kann der Prozess mit dieser Schaltung beginnen. Ausgehend von der 3-Niveau-Schaltung in **Fig. 7A** wird der Prozess also bei Block 518 von **Fig. 5A** fortgesetzt. Nach der Einstellung und Inkrementieren von n wird ein entsprechendes Paar der „geteilten“ Schalter ausgewählt (z.B. QL1 und QR1 für eine „äußere Teilung“ oder QL2 und QR2 für eine „innere Teilung“). Jeder der ausgewählten Schalter wird in zwei in Reihe geschaltete Schalter „geteilt“ (aus einem anderen Blickwinkel betrachtet, werden zwei neue Schalter mit einem neu bezeichneten Paar vorhandener Schalter in Reihe geschaltet). In **Fig. 7B** wird beispielsweise das „innere“ Paar von Schaltern QL2 und QR2 in entsprechende Paare von in Reihe geschalteten Schaltern QL21, QL22 und QR21, QR22 „aufgeteilt“. Ein Kondensator C2 wird dann von einem Knoten zwischen QL21 und QL22 an einen Knoten zwischen QR21 und QR22 gekoppelt.

[0047] Die sich daraus ergebende Topologie liefert 4 Spannungsniveau am Knoten Lx der Wandlerzelle 710. Infolgedessen werden die Ausgangsspannungswelligkeit der Wandlerzelle 710 und der Spannungshub über einem beliebigen Schalter im Vergleich zur 3-Niveau-Wandlerzelle 700 von **Fig. 7A** weiter reduziert (unter der Annahme gleicher Induktivitäten und Kapazitäten). Der verringerte Spannungshub an den Schaltern ermöglicht die Verwendung in erheblichem Maße noch kleinerer Schalter. Zusätzliche Topologien mit mehr als 4 Knotenspannungsniveaus lassen sich durch iterative Anwendung von Verfahren wie denen in **Fig. 5A** oder 5B auf die Topologie von **Fig. 7B** erzeugen.

[0048] Die Spannungsniveaus am Knoten Lx für die Wandlerzellen 700, 710 werden erreicht, indem die verschiedenen Schalter jeder Topologie so geschaltet werden, dass der Anschluss N2 über ein oder mehrere Paare von Schaltern entweder mit dem Anschluss N1 oder dem Anschluss N3 verbunden ist.

Isolierte Cuk-Wandlerzellen in Ausführungsformen

[0049] **Fig. 8** ist ein schematisches Diagramm einer isolierten 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle 800 gemäß dem Stand der Technik. Im gezeigten Beispiel umfasst die Wandlerzelle 800 einen ersten Induktor L1, der in Reihe mit einem Kondensator C0_L geschaltet ist, der wiederum wie gezeigt in Reihe mit einer ersten Seite eines Trenntransformators T1 geschaltet ist. Ein erster Schalter QL ist von einem Knotenpunkt zwischen L1 und C0_L an ein erstes Bezugspotenzial gekoppelt. Die erste Seite des Trenntransformators T1 ist wie gezeigt ebenfalls mit dem ersten Bezugspotenzial gekoppelt. Eine umzuwandelnde Spannung kann an den Anschluss N1 angelegt werden, wobei die umgewandelte Ausgabe am Anschluss N2 zur Verfügung steht. Im dargestellten Beispiel ist der Anschluss N3 mit einem Bezugspotenzial (z.B. Schaltungsmasse) verbunden.

[0050] Ein zweiter Induktor L2 ist mit einem Kondensator C0_R in Reihe geschaltet, der wiederum wie gezeigt mit einer zweiten Seite des Trenntransformators T1 in Reihe geschaltet ist. Ein zweiter Schalter QR in Form einer Diode ist von einem Knotenpunkt zwischen C0_R und L2 mit einem zweiten Bezugspotenzial gekoppelt. Die zweite Seite des Trenntransformators T1 ist wie gezeigt ebenfalls mit dem zweiten Bezugspotenzial verbunden.

[0051] **Fig. 9A** ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen isolierten 3-Niveau-Cuk-Wandlerzelle 900. Die isolierte 3-Niveau-Cuk-Wandlerzelle 900 hat eine Topologie, die durch Anwendung von Verfahren wie den in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen erzeugt wird. Ausgehend von der 2-Niveau-Schaltung in **Fig. 6** wird der Diodenschalter QR durch einen SPST-Schalter ersetzt. Dann werden sowohl die QL- als auch die QR-

Schalter in zwei in Reihe geschaltete Schalter „aufgeteilt“, so dass ein Paar von in Reihe geschalteten Schaltern QL1, QL2 und QR1, QR2 entsteht. Ein Kondensator C1 wird dann von einem Knoten zwischen QL1 und QL2 mit einem Knoten zwischen QR1 und QR2 verbunden.

[0052] Die resultierende Topologie bietet 3 interne Spannungsniveaus. Infolgedessen werden die Ausgangsspannungswelligkeit der Wandlerzelle 900 und der Spannungshub über einem einzelnen Schalter reduziert. Auch hier ermöglicht der reduzierte Spannungshub die Verwendung in erheblichem Maße kleinerer Schalter.

[0053] Das in Bezug auf die isolierte Cuk-Wandlerzelle 900 von **Fig. 9A** angewandte Verfahren kann iterativ angewandt werden, um Topologien mit mehr als 4 Knotenspannungen zu erzeugen. **Fig. 9B** ist zum Beispiel ein schematisches Diagramm einer neuartigen isolierten 4-Niveau-Cuk-Wandlerzelle 910. Ausgehend von der 3-Niveau-Schaltung in **Fig. 9A** wird ein entsprechendes Paar von „geteilten“ Schaltern ausgewählt (z.B. QL1 und QR1 für eine „äußere Teilung“ oder QL2 und QR2 für eine „innere Teilung“). Jeder der ausgewählten Schalter wird dann in zwei in Reihe geschaltete Schalter „geteilt“. In **Fig. 9B** wird beispielsweise das „innere“ Paar von Schaltern QL2 und QR2 in entsprechende Paare von in Reihe geschalteten Schaltern QL21, QL22 und QR21, QR22 „aufgeteilt“. Ein Kondensator C2 wird dann von einem Knoten zwischen QL21 und QL22 mit einem Knoten zwischen QR21 und QR22 verbunden.

[0054] Die sich ergebende Topologie bietet 4 interne Spannungsniveaus. Infolgedessen sind die Ausgangsspannungswelligkeit der Wandlerzelle 910 und der Spannungshub über einem beliebigen Schalter im Vergleich zur 3-Niveau-Wandlerzelle 900 von **Fig. 9A** weiter reduziert. Der verringerte Spannungshub an den Schaltern ermöglicht die Verwendung in erheblichem Maße noch kleinerer Schalter. Zusätzliche Topologien mit mehr als 4 Knotenspannungsniveaus können durch iterative Anwendung von Verfahren wie denen der **Fig. 5A** oder **5B** auf die Topologie von **Fig. 9B** erzeugt werden.

Zeta/SEPIC-Ausführungsformen

[0055] **Fig. 10A** ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle 1000 gemäß dem Stand der Technik. In dem dargestellten Beispiel umfasst die Wandlerzelle 1000 einen ersten Schalter QL, der mit einem Kondensator C0 in Reihe geschaltet ist, der wiederum mit einem ersten Induktor L1 in Reihe geschaltet ist. Eine umzuwandelnde Spannung kann an den Anschluss N1 angelegt werden, wobei die umgewandelte Ausgabe am Anschluss N2 verfügbar ist. Ein zweiter Induktor L2 ist von einem Knotenpunkt zwischen QL und C0 an den Anschluss N3 gekoppelt (im gezeigten Beispiel ist der Anschluss N3 mit einem Bezugspotenzial wie z.B. der Schaltungsmasse verbunden). Ein zweiter Schalter QR in Form einer Diode ist von einem Knotenpunkt zwischen C0 und L1 mit dem Anschluss N3 verbunden. In alternativen Ausführungsformen kann die Diode QR durch einen Schalter wie QL ersetzt werden.

[0056] **Fig. 10B** ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle 1010 gemäß dem Stand der Technik. In dem dargestellten Beispiel umfasst die SEPIC-(was für „single-ended primary-inductor converter“ steht)-Wandlerzelle 1010 einen ersten Induktor L1, der mit einem Kondensator C0 in Reihe geschaltet ist, der wiederum mit einem ersten Schalter QR in Form einer Diode in Reihe geschaltet ist. Eine umzuwandelnde Spannung kann an den Anschluss N1 angelegt werden, wobei die umgewandelte Ausgabe am Anschluss N2 zur Verfügung steht. Ein zweiter Schalter QL ist von einem Knoten zwischen L1 und C0 an den Anschluss N3 gekoppelt (im gezeigten Beispiel ist der Anschluss N3 mit einem Bezugspotenzial wie z.B. der Schaltungsmasse verbunden). Ein zweiter Induktor L2 ist von einem Knotenpunkt zwischen C0 und QR mit dem Anschluss N3 verbunden. In alternativen Ausführungsformen kann die Diode QR durch einen Schalter wie QL ersetzt werden.

[0057] Die SEPIC-Wandlerzelle 1010 ist im Wesentlichen eine spiegelbildliche oder umgekehrte Version der Zeta-Wandlerzelle 1000, was konzeptionell am einfachsten zu erkennen ist, wenn die Diodenschalter durch SPST-Schalter ersetzt werden.

[0058] **Fig. 11A** ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 3-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzelle 1100. Die 3-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzelle 1100 hat eine Topologie, die durch Anwendung von Verfahren wie den in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen erzeugt wird. Ausgehend von der 2-Niveau-Schaltung der **Fig. 11A** oder **11B** wird der Diodenschalter QR durch einen SPST-Schalter ersetzt. Dann wird jeder der Schalter QL und QR in zwei in Reihe geschaltete Schalter „aufgeteilt“ und durch ein Paar entsprechender in Reihe geschalteter Schalter QL1, QL2 und QR1, QR2 ersetzt. Ein Kondensator C1 wird dann von einem Knoten zwischen QL1 und QL2 mit einem Knoten zwischen QR1 und QR2 gekoppelt.

[0059] Fig. 11 B ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 4-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzelle 1110. Die 4-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzelle 1110 weist eine Topologie auf, die durch iterative Anwendung von Verfahren, wie sie in den Fig. 5A-5C beschrieben sind, auf die 3-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzelle 1100 von Fig. 11A erzeugt wurde.

[0060] Zusätzliche Topologien, die mehr als 4 Knotenspannungsniveaus bereitstellen, können durch iterative Anwendung von Verfahren wie denen von Fig. 5A oder 5B auf die Topologie von Fig. 11 B erzeugt werden.

[0061] Ein bemerkenswertes Merkmal von Multi-Niveau-Wandlerzellentopologien wie den in Fig. 11A und 11 B gezeigten 3-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzellen 1100, 1110 ist, dass sie selektiv in einem Abwärts- oder Aufwärtsmodus betrieben werden können, indem sie durch ausgewählte Einstellungen ihrer Schaltzustände unter Verwendung einer geeigneten Steuerschaltung sequenziert werden. Beispielsweise können für die in Fig. 11A gezeigte 3-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzelle 1100 die Schaltzustände in der zugehörigen Steuerschaltung wie in TABELLE 3 angegeben definiert werden.

TABELLE 3

Schalterzustand	QL2-Zustand	QL1-Zustand	QR1 Zustand	QR2 Zustand
A	geschlossen	offen	offen	geschlossen
B	offen	offen	geschlossen	geschlossen
C	geschlossen	geschlossen	offen	offen
D	offen	offen	offen	offen

[0062] Diese Schaltzustände können dann in einer bestimmten Reihenfolge angeordnet werden, um die Zeta/SEPIC-Wandlerzelle 1100 entweder in einem Abwärts- oder einem Aufwärtsmodus zu betreiben. In einigen Fällen kann der Schaltastgrad ein Faktor sein, der den Abwärts- oder Aufwärtsmodus bestimmt. TABELLE 4 zeigt zum Beispiel Sequenzen, die entweder 3 oder 4 der Schaltzustände aus TABELLE 3 und die sich daraus ergebende Betriebsart beinhalten.

TABELLE 4

Sequenz	Modus
CACB	aufwärts
BCBA	aufwärts
DADB	abwärts
DBDA	abwärts
CAB	aufwärts
DAB	abwärts

[0063] Das Konzept der wählbaren Abwärts- oder Aufwärtsmodi kann auf Zeta/SEPIC-Wandlerzellen höherer Niveaus ausgedehnt werden, wie z.B. die in Fig. 11 B gezeigte 4-Niveau-Zeta/SEPIC-Wandlerzelle 1110.

Ausführungsformen von Flyback-Wandlerzellen

[0064] Fig. 12A ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle 1200 gemäß dem Stand der Technik, die manchmal auch als „Flycap“-Wandler bezeichnet wird. Der Anschluss N1 wie gezeigt mit einer ersten Seite eines Transformators T1 verbunden. Ein erster Schalter QL ist zwischen die erste Seite des Transformators T1 und ein erstes Referenzpotential in Reihe geschaltet. Ein zweiter Schalter QR in Form einer Diode ist - wie gezeigt - zwischen eine zweite Seite des Transformators T1 und den Anschluss N2 in Reihe geschaltet. Die zweite Seite des Transformators T1 ist - wie gezeigt - ebenfalls mit dem zweiten Bezugspotenzial verbunden. In alternativen Ausführungsformen kann die Diode QR durch einen Schalter wie QL ersetzt werden.

[0065] Fig. 12B ist ein schematisches Diagramm einer Variante einer 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle 1220 gemäß dem Stand der Technik. In dieser Ausführungsform ist die Diode QR (oder ein gleichwertiger Schalter)

an den „unteren“ Schenkel der zweiten Seite des Transformators T1 gekoppelt und nicht an den „oberen“ Schenkel wie in **Fig. 12A** gezeigt.

[0066] **Fig. 12C** ist ein schematisches Diagramm einer weiteren Variante der 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle 1240. In dieser Ausführungsform ist die Diode QR1 (oder ein gleichwertiger Schalter) mit dem „oberen“ Schenkel der zweiten Seite des Transformators T1 verbunden, wie in **Fig. 12A** gezeigt, und die Diode QR2 (oder ein gleichwertiger Schalter) ist mit dem „unteren“ Schenkel der zweiten Seite des Transformators T1 verbunden, wie in **Fig. 12B** gezeigt.

[0067] **Fig. 13A** ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 3-Niveau-Flyback-Wandlerzelle 1300 mit einer Topologie, die aus der Schaltung von **Fig. 12A** durch Anwendung von Verfahren wie den in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen erzeugt wurde. Insbesondere wird der Schalter QL in die Schalter QL1 und QL2 „aufgeteilt“, und der Schalter QR wird in die Schalter QR1 und QR2 „aufgeteilt“. Ein Kondensator C1 wird dann von einem Knoten zwischen QL1 und QL2 mit einem Knoten zwischen QR1 und QR2 verbunden. Ein ähnliches Verfahren kann auf die in **Fig. 12B** dargestellte Topologie angewandt werden.

[0068] **Fig. 13B** ist ein schematisches Diagramm einer Flyback-Wandlerzelle 1320 mit zwei Schaltern. Zusätzlich zu der in **Fig. 12A** dargestellten Topologie ist ein Schalter QT zwischen den Anschluss N1 und einen „oberen“ Anschluss auf der ersten Seite des Transformators T1 geschaltet, der Schalter QL ist ebenfalls über eine Diode D1 mit dem Anschluss N1 verbunden, und das Bezugspotenzial ist über eine Diode D2 mit dem „oberen“ Anschluss auf der ersten Seite des Transformators T1 verbunden. Eine ähnliche Ergänzung der Schaltung auf der ersten Seite des Transformators T1 kann auf **Fig. 12B** oder **12C** beruhen. Die Beispielkonfiguration in **Fig. 13B** zeigt eingekreiste zugehörige Paare von Schaltern (einschließlich einer Diode QR, die in einen SPST-Schalter umgewandelt würde), die jeweils in neue Paare von Schaltern aufgeteilt und durch einen Kondensator zwischen neu gebildeten Zwischenschaltknoten gemäß Verfahren wie den in **Fig. 5A-5C** beschriebenen gekoppelt werden können. Die eingekreisten zugehörigen Paare von Schaltern sind QT und QR (verbunden durch Linie 1322) und QL und QR (verbunden durch Linie 1324). Ein ähnlicher Zuordnungsprozess kann auf die in den **Fig. 12B** und **12C** dargestellten Topologien angewendet werden.

[0069] **Fig. 13C** ist ein schematisches Diagramm einer Flyback-Wandlerzelle 1340 mit zwei Schaltern auf der Grundlage von **Fig. 12C**, dargestellt nach einer zweifachen Anwendung eines der Verfahren der vorliegenden Erfindung. Ein Schalter QT, der zwischen den Anschluss N1 und einen „oberen“ Anschluss auf der ersten Seite des Transformators T1 geschaltet ist, kann in ein Paar von Schaltern QT1 und QT2 aufgeteilt werden. Der Schalter QL kann in ein Paar von Schaltern QL1 und QL2 aufgeteilt werden. Die Diode QR1 aus **Fig. 12C** kann in ein Paar von Schaltern QR11 und QR12 aufgeteilt werden. In ähnlicher Weise kann die Diode QR1 aus **Fig. 12C** in ein Paar von Schaltern QR21 und QR22 aufgeteilt werden. Das dargestellte Beispiel zeigt, dass ein Kondensator C1 mit den Zwischenknoten der Paare von Schaltern QL1-QL2 und QR21-QR22 gekoppelt sein kann, und dass ein Kondensator C2 mit den Zwischenknoten der Paare von Schaltern QT1-QT2 und QR11-QR12 gekoppelt sein kann. Wie aus dieser Offenbarung hervorgehen sollte, können auch andere Verbindungen von geteilten Paaren von Schaltern mit einem Kondensator gekoppelt werden.

[0070] Wie in den oben beschriebenen Ausführungsformen können Verfahren wie die in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen iterativ angewandt werden, um Flyback-Wandlerzellentopologien mit mehr als 4 Knotenspannungen zu erzeugen.

Vorwärtswandlerzellen- Ausführungsformen

[0071] **Fig. 14** ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle 1400 gemäß dem Stand der Technik. Der Anschluss N1 ist wie dargestellt mit einer ersten Seite eines Transformators T1 verbunden. Ein erster Schalter QL ist zwischen die erste Seite des Transformators T1 und ein erstes Referenzpotential in Reihe geschaltet. Ein zweiter Schalter QH in Form einer Diode ist in Reihe zwischen eine zweite Seite des Transformators T1 und einen Induktor L1 geschaltet, der wie gezeigt wiederum in Reihe mit dem Anschluss N2 geschaltet ist. Ein dritter Schalter QR in Form einer Diode ist zwischen den Anschluss N2 und ein zweites Bezugspotenzial geschaltet. Die zweite Seite des Transformators T1 ist wie gezeigt ebenfalls mit dem zweiten Bezugspotenzial verbunden.

[0072] **Fig. 15A** ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 3-Niveau-Vorwärtswandlerzelle 1500 mit einer Topologie, die aus der Schaltung von **Fig. 14** durch Anwendung von Verfahren, wie sie in den **Fig. 5A-5C** beschrieben sind, erzeugt wurde. In Bezug auf **Fig. 15A** ist zu beachten, dass die 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle 1400 drei Schalter, QL, QH und QR, hat, die den Ausgang beeinflussen. Durch Anwendung von

Block 506 von **Fig. 5A** („Wählen Sie ein Paar von Schaltern, die im stationären Betrieb nicht gleichzeitig auf EIN geschaltet sind“) werden jedoch die Schalter QH und QR für die „Aufteilung“ ausgewählt. Dementsprechend wird der Schalter QH in die Schalter QH1 und QH2 und der Schalter QR in die Schalter QR1 und QR2 „geteilt“. Ein Kondensator C1 wird dann von einem Knoten zwischen QH1 und QH2 mit einem Knoten zwischen QR1 und QR2 verbunden.

[0073] In einer alternativen Ausführungsform kann das erste Paar ausgewählter zu ändernder Schalter QL und QR sein. Dementsprechend würde der Schalter QL in die Schalter QL1 und QL2 und der Schalter QR in die Schalter QR1 und QR2 „aufgeteilt“ werden. Ein Kondensator C1 wird dann von einem Knoten zwischen QL1 und QL2 mit einem Knoten zwischen QR1 und QR2 verbunden.

[0074] **Fig. 15B** ist ein schematisches Diagramm einer Vorwärtswandlerzelle 1520 mit zwei Schaltern. Zusätzlich zu der in **Fig. 14** gezeigten Topologie ist ein Schalter QT zwischen den Anschluss N1 und einen „oberen“ Anschluss auf der ersten Seite des Transformators T1 geschaltet, der Schalter QL ist ebenfalls über eine Diode D1 mit dem Anschluss N1 verbunden, und das Bezugspotenzial ist über eine Diode D2 mit dem „oberen“ Anschluss auf der ersten Seite des Transformators T1 verbunden. Das dargestellte Beispiel zeigt eingekreiste zugehörige Paare von Schaltern (einschließlich einer Diode QR, die in einen SPST-Schalter umgewandelt würde), die jeweils in neue Paare von Schaltern aufgeteilt und durch einen Kondensator zwischen neu gebildeten Zwischenschaltknoten gemäß Verfahren wie den in **Fig. 5A-5C** beschriebenen gekoppelt werden können. Die eingekreisten zugehörigen Paare von Schaltern sind QT und QR sowie QL und QR.

[0075] **Fig. 15C** ist ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle 1540 mit zwei Schaltern nach der Umwandlung in eine 3-Niveau-Topologie gemäß den in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen Verfahren. Im dargestellten Beispiel wurden der Schalter QT und der Schalter QR (nach Umwandlung der Diode in einen SPST-Schalter) in die Paare von Schaltern QT1, QT2 bzw. QR1, QR2 aufgeteilt, und ihre jeweiligen Knotenpunkte zwischen den Schaltern wurden über einen Kondensator C1 verbunden.

[0076] Wie in den oben beschriebenen Ausführungsformen können Verfahren wie die in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen iterativ angewandt werden, um Vorwärtswandler-Zelltopologien mit mehr als 4 Knotenspannungen zu erzeugen.

Abwärts-Aufwärts-Ausführungsformen mit vier Schaltern

[0077] Die meisten der oben beschriebenen Ausführungsformen von Wandlerzellen waren alle mindestens der Ordnung 3 (d.h. mit 3 oder mehr Energiespeicherelementen in einer Kombination von Induktivitäten und Kapazitäten, aber mit mindestens einer Induktivität). Die Verfahren der vorliegenden Erfindung können auch auf Wandlerzellen der Ordnung 1 mit mindestens 2 Schaltern angewendet werden. **Fig. 16** ist beispielsweise ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Wandlerzelle 1600 der Ordnung 1 gemäß dem Stand der Technik mit 4 Schaltern. Solche Wandlerzellen können auch als Vier-Schalter-Abwärts-Aufwärts-Wandlerzellen bezeichnet werden.

[0078] Im dargestellten Beispiel umfasst die Wandlerzelle 1600 einen ersten Schalter Q1, der mit einem Induktor L1 in Reihe geschaltet ist, der wiederum mit einem zweiten Schalter Q4 in Reihe geschaltet ist. Eine umzuwandelnde Spannung kann an den Anschluss N1 angelegt werden, wobei die umgewandelte Ausgabe am Anschluss N2 verfügbar ist. Ein dritter Schalter Q2 ist von einem Knotenpunkt zwischen Q1 und L1 mit dem Anschluss N3 verbunden (im gezeigten Beispiel ist der Anschluss N3 mit einem Bezugspotenzial wie z.B. der Schaltungsmasse verbunden). Ein vierter Schalter Q3 ist von einem Knoten zwischen L1 und Q4 mit dem Anschluss N3 verbunden.

[0079] **Fig. 17** ist ein schematisches Diagramm einer neuartigen 3-Niveau-Wandlerzelle 1700 mit einer Topologie, die aus der Schaltung von **Fig. 16** durch Anwendung von Verfahren, wie sie in den **Fig. 5A-5C** beschrieben sind, erzeugt wurde. In dem dargestellten Beispiel ist Q1 in die Schalter Q11 und Q12 „aufgeteilt“, und der Schalter Q2 ist in die Schalter Q21 und Q22 „aufgeteilt“. Ein Kondensator C1 wird dann von einem Knoten Q11 und Q12 mit einem Knoten zwischen Q21 und Q22 verbunden.

[0080] In alternativen Ausführungsformen können andere Paare von Schaltern aus **Fig. 16** in zwei Paare von zwei Schaltern aufgeteilt und ein Kondensator zwischen die neu gebildeten Knoten zwischen den neuen Paaren von Schaltern eingefügt werden. **Fig. 18** ist beispielsweise ein schematisches Diagramm einer 2-Niveau-Wandlerzelle 1800 der Ordnung 1 mit 4 Schaltern, das Beispiele für eingekreiste zugehörige Paare von

Schaltern zeigt, die jeweils in neue Paare von Schaltern aufgeteilt und durch einen Kondensator zwischen den neu gebildeten Knoten zwischen den Schaltern verbunden werden können. Die eingekreisten verbundenen Paare von Schaltern sind: Q1 und Q2 (wie in **Fig. 17** dargestellt) [Linie 1]; Q3 und Q4 [Linie 2]; Q1 und Q4 [Linie 3]; und Q2 und Q3 [Linie 4].

[0081] Zusätzliche Topologien, die mehr als 3 Knotenspannungsniveaus bereitstellen, können durch iterative Anwendung von Verfahren wie denen von **Fig. 5A** oder **5B** auf die Topologie von **Fig. 17** erzeugt werden. Beispielsweise kann eine 4-Niveau-Wandlertopologie aus der Schaltung von **Fig. 17B** durch Anwendung von Verfahren, wie sie in **Fig. 5A-5C** beschrieben sind, erzeugt werden, indem die folgenden Gruppen von Paaren von Schaltern aufgeteilt und die neu gebildeten Zwischenknoten mit entsprechenden Kondensatoren verbunden werden: Q1 und Q2 [Linie 1802] plus Q3 und Q4 [Linie 1804] oder Q1 und Q4 [Linie 1806] plus Q2 und Q3 [Linie 1808].

[0082] Ein bemerkenswertes Merkmal von Multi-Niveau-Wandlerzellentopologien wie der in **Fig. 17** gezeigten 3-Niveau-Abwärts-Aufwärts-Wandlerzelle ist, dass sie durch ausgewählte Einstellungen ihrer Schalterzustände unter Verwendung einer geeigneten Steuerschaltung als Wandlerzelle mit niedrigerem Niveau betrieben werden können. Beispielsweise kann die in **Fig. 17** gezeigte 3-Niveau-Topologie als 2-Niveau-Aufwärtswandlerzelle betrieben werden, indem die Schalter Q11 und Q12 geschlossen, die Schalter Q21 und Q22 geöffnet und die Schalter Q3 und Q4 mit unterschiedlichen Frequenzen geschaltet werden. Als weiteres Beispiel kann die in **Fig. 17** gezeigte 3-Niveau-Topologie als 3-Niveau-Abwärtswandlerzelle betrieben werden, indem der Schalter Q4 geschlossen, der Schalter Q3 geöffnet und die Schalter Q11, Q12, Q21 und Q22 mit einer Frequenz und einer ausgewählten Zustandssequenz betrieben werden, so dass eine 3-Niveau-Abwärtswandlerzelle entsteht.

Weitere Ausführungsformen von Wandlerzellen

[0083] Man versteht, dass die in den **Fig. 5A-5C** dargestellten Verfahren oder Varianten dieser Verfahren auch auf andere Wandlerzellentopologien angewandt werden können. Solche 2-Niveau-Wandlerzellen können einen Transformator oder gekoppelte Induktoren enthalten.

[0084] **Fig. 19-30** sind beispielsweise schematische Diagramme einiger Schaltungstopologien von 2-Niveau-Wandlerzellen, die durch Anwendung der in **Fig. 5A-5C** dargestellten Verfahren oder Varianten dieser Verfahren in Wandlerzellen mit höheren Niveaus umgewandelt werden können. Jede Figur zeigt Beispiele für eingekreiste zugehörige Paare von Schaltern, die durch eine gebogene Doppelpfeil-Verbindungsline verbunden sind. Durch Anwendung der Verfahren der vorliegenden Offenbarung können die zugehörigen Paare von Schaltern jeweils in neue Paare von Schaltern aufgeteilt und über einen Kondensator zwischen den neu gebildeten Knoten, die sich zwischen den neuen Paaren von Schaltern befinden, verbunden werden, um 3-Niveau-Wandlerzellen zu bilden. Es dürfte klar sein, dass die Verfahren der vorliegenden Offenbarung iterativ auf die neu umgewandelten Topologien angewandt werden können, um noch Wandlerzellen mit sogar noch mehr Niveaus (z.B. 4-Niveau und 5-Niveau) zu erzeugen.

[0085] Die vorliegende Erfindung ist nicht auf einfache Wandlerzellen-Schaltungstopologien beschränkt. Beispielsweise sind die **Fig. 31-33** schematische Diagramme einiger Beispiele für komplexere Wandlerzellen-Schaltungstopologien, die durch Anwendung der in den **Fig. 5A-5C** dargestellten Verfahren oder Varianten dieser Verfahren in Wandlerzellen höherer Ebene umgewandelt werden können. Jede Abbildung zeigt Beispiele für eingekreiste, einander zugeordnete Paare von Schaltern, die durch eine gebogene Doppelpfeil-Verbindungsline verbunden sind. Durch Anwendung der Verfahren der vorliegenden Offenbarung können die zugehörigen Paare von Schaltern jeweils in neue Paare von Schaltern aufgeteilt und über einen Kondensator verbunden werden, der in die neu gebildeten Knoten zwischen den neuen Paaren von Schaltern eingefügt wird. Es dürfte klar sein, dass die Verfahren der vorliegenden Offenbarung iterativ auf die neu umgewandelten Topologien angewendet werden können, um noch Wandlerzellen mit noch mehr Niveaus (z.B. 4-Niveau und 5-Niveau) zu erzeugen.

Konfigurationen von mehreren Wandlerzellen

[0086] **Fig. 34** ist ein Blockdiagramm 3400, das ein Beispiel für eine Mehrzellenkonfiguration 3402 zeigt, die zwei oder mehr parallel geschaltete Wandlerzellen 1-n mit gemeinsamen Eingängen V_{IN} und gemeinsamen Ausgängen V_{OUT} umfasst. Mindestens eine der Wandlerzellen 1-n ist eine modifizierte 2-Niveau-Wandlerzelle, die gemäß den Lehren dieser Offenbarung verbessert wurde, um eine M-Niveau-Wandlerzelle zu sein. Die Mehrzellenkonfiguration 3402 ist mit einer Steuerung 3404 gekoppelt, das Rückkopplungs- und Überwa-

chungssignale von den Wandlerzellen 1-n empfängt und Schaltsignale an die Wandlerzellen 1-n liefert. Bei den Rückkopplungs- und Überwachungssignalen kann es sich beispielsweise um die Kondensatorspannungen in den Wandlerzellen 1-n, den Wert von V_{IN} und/oder V_{OUT} , den Strom durch jede Wandlerzelle usw. handeln. Die Steuerung 3404 kann über Eingangs-/Ausgangssignale (I/O) mit anderen Schaltungen verbunden sein. Die Steuerung 3404 in **Fig. 34** ist eine vereinfachte Darstellung einer Steuerung, die dazu konfiguriert werden kann, andere Multi-Niveauarchitekturen einschließlich einer oder mehrerer Multi-Niveau-Wandlerzellen der in dieser Offenbarung beschriebenen Arten.

[0087] In einigen Ausführungsformen sind zwei oder mehr ausgewählte Wandlerzellen 1-n über entsprechende optionale Induktoren L1-Ln (allgemein als „Lx“ bezeichnet) mit dem Ausgabeanschluss verbunden. Die Induktoren L1-Ln können extern zu den entsprechenden Wandlerzellen 1-n oder intern zu den entsprechenden Wandlerzellen 1-n angeordnet sein. Die Induktoren L1-Ln sind nur beispielhaft als extern zu den entsprechenden Wandlerzellen 1-n dargestellt.

[0088] In einer ersten Ausführungsform der Mehrzellenkonfiguration 3402 werden zwei oder mehr ausgewählte Wandlerzellen 1-n (über die Steuerung 3404) mit differentiellen Taktphasen betrieben, was bedeutet, dass die Schaltsignale zu jeder ausgewählten Wandlerzelle zeitlich versetzt zu den Schaltsignalen zu jeder anderen ausgewählten Wandlerzelle sind. Eine Ausführungsform der Mehrzellenkonfiguration 3402 kann beispielsweise mit 4 Phasen arbeiten, wobei jede Phase um 90 Grad zu den anderen versetzt ist. Als weiteres Beispiel kann eine Ausführungsform der Mehrzellenkonfiguration 3402 mit 5 Phasen betrieben werden, wobei jede Phase um 60 Grad zu den anderen versetzt ist. Eine solche „mehrphasige“ Konfiguration trägt dazu bei, die Spannungswelligkeit von V_{OUT} zu verringern.

[0089] In einer zweiten Ausführungsform der Mehrzellenkonfiguration 3402, die entsprechende Induktoren Lx für mindestens zwei ausgewählte Wandlerzellen 1-n umfasst, können mindestens zwei der Induktoren optional magnetisch gekoppelt sein. Im dargestellten Beispiel zeigt eine Kopplungslinie 3406 an, dass die Induktoren L1 und L2, die der Wandlerzelle 1 und der Wandlerzelle 2 entsprechen, mit entgegengesetzten Polen magnetisch gekoppelt sind. In einer solchen Konfiguration mit gekoppelten Induktoren ist es im Allgemeinen wünschenswert, dass der Kopplungsfaktor (d.h. das Verhältnis von einfallender Energie zu gekoppelter Energie, beide gemessen in dB) für die magnetisch gekoppelten Induktoren hoch ist (z.B. näher bei 1 - ideale Kopplung - als bei Null).

[0090] Die Induktoren Lx widerstehen Stromänderungen. Im stationären Betrieb, wenn die Last für die Mehrzellenkonfiguration 3402 relativ stabil ist, tragen großvolumige Induktoren zur Stabilisierung der Ausgabe der parallelen Wandlerzellen 1-n bei. Unter transienten Bedingungen, z.B. bei schwankender Last, widersetzen sich groß dimensionierte Induktoren jedoch schnellen Änderungen der Ausgangsleistung der parallelen Wandlerzellen 1-n, da diese versuchen, sich an die neuen Lastbedingungen anzupassen. Ein Vorteil einer Konfiguration mit gekoppelten Induktoren besteht darin, dass sich die magnetisch gekoppelten Induktoren während transients Ereignisse im Wesentlichen gegenseitig aufheben, was effektiv zu einer „dynamischen“ niedrigen Induktivität an den jeweiligen Ausgängen der gekoppelten Wandlerzellen führt und dadurch eine schnellere Anpassung der Wandlerzellen 1-n an die neuen Lastbedingungen ermöglicht.

[0091] Eine dritte Ausführungsform der Mehrzellenkonfiguration 3402 kombiniert eine Mehrphasenkonfiguration mit einer Koppelinduktorkonfiguration.

[0092] Eine vierte Ausführungsform der Mehrzellenkonfiguration 3402 kombiniert eine Mehrphasenkonfiguration mit einer Koppelinduktorkonfiguration unter Verwendung herkömmlicher Wandlerzellendesigns (d.h. Wandlerzellentopologien, die nicht durch Verfahren wie die in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen modifiziert wurden).

Beispiel-Steuerschaltung für eine M-Niveau-Wandlerzelle

[0093] **Fig. 35** ist ein Blockdiagramm einer Ausführungsform einer Steuerschaltung 3500 für eine M-Niveau-Wandlerzelle 3502, die mit einem Ausgabeblock 3504 gekoppelt ist, der einen Induktor L und einen Ausgangskondensator C_{OUT} umfasst (konzeptionell kann der Induktor L auch als in der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 enthalten betrachtet werden). Dieses Beispiel einer Steuerschaltung 3500 ist an die Lehren angepasst, die in der am 8. November 2021 eingereichten US-Patentanmeldung Serial No. 63276923 mit dem Titel „Controlling Charge-Balance and Transients in a Multi-Level Power Converter“ [Anwaltsaktenzeichen PER-370-PROV] dargelegt sind, die dem Zessionar der vorliegenden Erfindung übertragen wurde und deren

Inhalt durch Bezugnahme einbezogen ist. Allerdings kann die vorliegende Erfindung in Kombination mit anderen Arten von Steuerschaltungen für eine M-Niveau-Wandlerzelle 3502 verwendet werden.

[0094] Die Steuerschaltung 3500 funktioniert als Regelkreis, der mit der Ausgabe der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 und den Schaltsteuereingängen der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 verbunden ist. Im Allgemeinen ist die Steuerschaltung 3500 dazu konfiguriert, die Ausgabe (z.B. Spannung und/oder Strom) der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 zu überwachen und dynamisch einen Satz von Schaltsteuereingaben für die M-Niveau-Wandlerzelle 3502 zu erzeugen, die versuchen, die Ausgangsspannung und/oder den -strom bei bestimmten Werten zu stabilisieren, wobei Schwankungen von V_{IN} und der Ausgangslast berücksichtigt werden. In alternativen Ausführungsformen kann die Steuerschaltung 3500 dazu konfiguriert sein, den Eingang der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 (z.B. Spannung und/oder Strom) und/oder einen internen Knoten der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 (z.B. die Spannung an einem oder mehreren fliegenden Kondensator(en) oder den Strom durch einen oder mehrere Leistungsschalter) zu überwachen. Dementsprechend kann die Steuerschaltung 3500 im Allgemeinen dazu konfiguriert sein, die Spannung und/oder den Strom eines Knotens (z.B. eines Eingangsanschlusses, eines internen Knotens oder eines Ausgangsanschlusses) der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 zu überwachen. Die Steuerschaltung 3500 kann in die übergeordnete Steuerung 104 für einen Stromwandler 100, der die M-Niveau-Wandlerzelle 3502 enthält, integriert oder von dieser getrennt sein.

[0095] Ein erster Block umfasst eine Rückkopplungssteuerung 3506, bei der es sich um eine herkömmliche Steuerung handeln kann, wie z.B. eine Festfrequenz-Spannungssteuerung oder eine Stromsteuerung, eine Steuerung mit konstanter Einschaltdauer, eine hysteretische Steuerung oder eine andere Variante. Die Rückkopplungssteuerung 3506 ist mit V_{OUT} von der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 verbunden. In alternativen Ausführungsformen kann die Rückkopplungssteuerung 3506 dazu konfiguriert sein, den Eingang der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 und/oder einen internen Knoten der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 zu überwachen. Die Rückkopplungssteuerung 3506 erzeugt ein Signal, das direkt oder indirekt die Spannung an V_{OUT} anzeigt und allgemein bestimmt, was in der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 getan werden muss, um die gewünschten Werte für V_{OUT} aufrechtzuerhalten: Laden, Entladen oder Tri-Zustand (d.h. offen, ohne Stromfluss).

[0096] Im dargestellten Beispiel umfasst die Rückkopplungssteuerung 3506 eine Rückkopplungsschaltung 3508, eine Kompensationsschaltung 3510 und einen PWM-Generator 3512. Die Rückkopplungsschaltung 3508 kann beispielsweise einen Spannungsdetektor für die Rückkopplungsschleife enthalten, der V_{OUT} (oder eine abgeschwächte Version von V_{OUT}) mit einer Referenzspannung vergleicht, die eine gewünschte Zielspannung V_{OUT} darstellt (die dynamisch sein kann), und ein Steuersignal ausgibt, um anzuzeigen, ob V_{OUT} über oder unter der Zielspannung liegt. Der Spannungsdetektor mit Rückkopplungsschleife kann mit einem Vergleichsgerät, z.B. einem Operationsverstärker oder einem Transkonduktanzverstärker (gm-Verstärker), realisiert werden.

[0097] Die Kompensationsschaltung 3510 ist dazu konfiguriert, das Regelverhalten der Rückkopplungssteuerung 3506 zu stabilisieren, indem sie die unbeabsichtigte Erzeugung einer positiven Rückkopplung verhindert, die zu Schwingungen führen kann, und indem sie Überschwingen und Klingeln in der Sprungantwort der Rückkopplungssteuerung 3506 steuert. Die Kompensationsschaltung 3510 kann auf bekannte Weise implementiert werden und kann LC- und/oder RC-Schaltungen umfassen.

[0098] Der PWM-Generator 3512 erzeugt das eigentliche PWM-Steuersignal, das letztlich den Tastgrad der Schalter der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 festlegt. In einigen Ausführungsformen kann der PWM-Generator 3512 zusätzliche optionale Steuersignale CTRL weitergeben, die z.B. die Größe der Differenz zwischen V_{OUT} und der Referenzspannung (und damit anzeigen, dass einige Niveaus der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 überbrückt werden sollten, um zu höheren oder niedrigeren Niveaus zu gelangen) und die Richtung dieser Differenz (z.B., dass V_{OUT} größer oder kleiner als die Referenzspannung ist) angeben. In anderen Ausführungsformen können die optionalen Steuersignale CTRL vom Ausgang der Kompensationsschaltung 3510 oder vom Ausgang der Rückkopplungsschaltung 3508 oder von einem separaten Komparator (nicht dargestellt) abgeleitet werden, der z.B. mit V_{OUT} gekoppelt ist. Ein Zweck der optionalen Steuersignale CTRL ist für fortgeschrittene Steueralgorithmen, wenn es von Vorteil sein kann, zu wissen, wie weit V_{OUT} von einer Ziel-Ausgangsspannung entfernt ist, um so ein schnelleres Aufladen des Induktors L zu ermöglichen, wenn die V_{OUT} stark unterregelt ist.

[0099] Ein zweiter Block besteht aus einer M-Niveau-Steuerung 3514, deren Hauptfunktion darin besteht, die Schaltzustände auszuwählen, die eine gewünschte V_{OUT} erzeugen, während ein Ladungsausgleichszustand an den fliegenden Kondensatoren innerhalb der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 jedes Mal aufrechterhalten

ten wird, wenn ein Ausgangsspannungsniveau ausgewählt wird, unabhängig davon, welcher Schaltzustand oder welche Schaltzustände in der Vergangenheit verwendet wurden.

[0100] Die M-Niveau-Steuerung 3514 umfasst einen Spannungsniveaurewähler 3516, der das PWM-Steuer-signal und die zusätzlichen Steuersignale CTRL empfängt, falls vorhanden. Darüber hinaus kann der Spannungsniveaurewähler 3516 mit V_{OUT} und/oder V_{IN} und, in einigen Ausführungsformen, mit HOCH/NIEDRIG-Statussignalen $C_{Fx_H/L}$ von Spannungsdetektoren gekoppelt sein, die mit entsprechenden fliegenden Kondensatoren C_{Fx} innerhalb der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 verbunden sind. Eine Funktion des Spannungsniveaurewählers 3516 besteht darin, die empfangenen Signale in einen Ziel-Ausgangsspannungsniveau umzuwandeln (z.B. auf einer Zyklus-zu-Zyklus-Basis). Der Spannungsniveaurewähler 3516 berücksichtigt in der Regel mindestens V_{OUT} und V_{IN} , um zu bestimmen, welches Zielniveau den Ausgang der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 mit einer gewünschten Rate laden oder entladen soll.

[0101] Der Ausgang des Spannungsniveaurewählers 3516 ist mit einem M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 gekoppelt, der im Allgemeinen mit den Statussignalen $C_{Fx_H/L}$ von den Kondensatorspannungsdetektoren für die fliegenden Kondensatoren C_{Fx} gekoppelt ist. Unter Berücksichtigung des vom Spannungsniveaurewähler 3516 erzeugten Zielniveaus bestimmt der M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518, welcher Schaltzustand für das gewünschte Ausgangsniveau für den Ladungsausgleich der Kondensatoren am besten sein sollte. Der M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 kann z.B. als Nachschlagetabelle (LUT) oder als Vergleichsschaltung und kombinatorische Logik oder allgemeinere Prozessorschaltung implementiert werden. Der Ausgang des M-Niveau-Schaltzustandswählers 3518 ist mit den Schaltern der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 gekoppelt (über geeignete Niveaushiftschaltungen und Treiberschaltungen, wie sie für eine bestimmte Wandlerzelle erforderlich sein können) und enthält die vom M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 bestimmten Schaltzustandseinstellungen (der die Konfiguration der Schalter innerhalb der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 entsprechend einem ausgewählten Zielniveau auswählt).

[0102] Im Allgemeinen (aber nicht immer) ändern der Spannungsniveaurewähler 3516 und der M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 ihren Zustand nur, wenn sich das PWM-Signal ändert. Wenn das PWM-Signal beispielsweise hoch ist, wählt der Spannungsniveaurewähler 3516 aus, welches Niveau zum Laden des Induktors L führt, und der M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 legt fest, welche Version dieses Niveaus zu verwenden ist. Wenn das PWM-Signal dann auf „niedrig“ geht, wählt der Spannungsniveaurewähler 3516 aus, welches Niveau den Induktor L entladen soll, und der M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 legt fest, welche Version dieses Niveaus zu verwenden ist. Somit ändern der Spannungsniveaurewähler 3516 und der M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 im Allgemeinen nur dann ihren Zustand, wenn sich das PWM-Signal ändert (das PWM-Signal ist in Wirklichkeit ihr Taktsignal). Es kann jedoch Situationen oder Ereignisse geben, in denen es wünschenswert ist, dass die CTRL-Signale den Zustand des Spannungsniveaurewählers 3516 ändern. Darüber hinaus kann es Situationen oder Ereignisse geben, bei denen es wünschenswert ist, dass das/die Statussignal(e) $C_{Fx_H/L}$ von Spannungsdetektoren, die mit den fliegenden Kondensatoren C_{Fx} innerhalb der M-Niveau-Wandlerzelle 3502 gekoppelt sind, den M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 veranlassen, eine bestimmte Konfiguration von Energieschaltereinstellungen auszuwählen, z.B. wenn ein starkes Ungleichgewicht in der Mitte des Zyklus auftritt. In einigen Ausführungsformen kann es sinnvoll sein, eine Zeitgebungsfunktion einzubauen, die den M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 zwingt, die optimale Version des Zustands periodisch neu zu bewerten, um beispielsweise zu vermeiden, dass er für eine sehr lange Zeit auf einem Niveau „feststeckt“, was möglicherweise Ladungsungleichgewichte verursacht.

[0103] In Ausführungsformen, die die in der oben genannten Patentanmeldung mit dem Titel „Controlling Charge-Balance and Transients in a Multi-Level Power Converter“ dargelegten Lehren nutzen, implementiert die M-Niveau-Steuerung 3514 ein Steuerverfahren für die M-Niveau-Wandlerzelle 3502, das einen im Wesentlichen optimalen Schaltzustand auswählt, der die fliegenden Kondensatoren C_{Fx} jedes Mal in Richtung eines Ladungsausgleichszustandes bewegt, wenn ein Spannungsniveau am Knoten Lx ausgewählt wird, unabhängig davon, welcher Schaltzustand oder welche Schaltzustände in der Vergangenheit verwendet wurden. Dementsprechend steht es solchen Multi-Niveau-Wandler-Schaltungen frei, in jedem Schaltzyklus einen anderen Schaltzustand oder Lx Spannungsniveau zu wählen, ohne dass ein früherer Schaltzustand oder eine frühere Abfolge von Schaltzuständen beachtet werden muss.

[0104] Ein bemerkenswerter Vorteil der in **Fig. 35** gezeigten Steuerschaltung besteht darin, dass sie die Erzeugung von Spannungen in Grenzbereichen zwischen den Spannungsniveaus ermöglicht, die für herkömmliche Multi-Niveau-Gleichstrom-Gleichstrom-Wandlerschaltungen unerreichbare Ausgangsspannungen darstellen.

[0105] In alternativen Ausführungsformen von unregelmäßigen Ladepumpen können die Rückkopplungssteuerung 3506 und der Spannungsniveauregler 3516 weggelassen werden, und stattdessen kann ein Taktsignal CLK an den M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 angelegt werden. Der M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 würde ein Muster von Schaltzustandseinstellungen erzeugen, die periodisch die fliegenden Kondensatoren C_{Fx} aufladen, unabhängig davon, welcher Schaltzustand oder welche Schaltzustände in der Vergangenheit verwendet wurden (im Gegensatz zum Durchlaufen einer vordefinierten Sequenz von Zuständen). Dadurch wird sichergestellt, dass das System bei Änderungen von V_{IN} oder beim Auftreten anomaler Gleichgewichte im Allgemeinen immer einen Ladungsausgleich für die fliegenden Kondensatoren C_{Fx} anstrebt.

[0106] In einigen Ausführungsformen kann der M-Niveau-Schaltzustandswähler 3518 den durch den Induktor L fließenden Strom I_L über einen optionalen Strommesseingang 3520 berücksichtigen, der auf herkömmliche Weise implementiert werden kann.

[0107] Während **Fig. 35** eine besondere Ausführungsform der Steuerschaltung für eine M-Niveau-Wandlerzelle zeigt, wie sie gemäß der vorliegenden Erfindung modifiziert wurde, sollte verstanden werden, dass andere Steuerschaltungen angepasst oder entwickelt werden können, um geeignete Schaltsignale für die Schalter innerhalb einer Wandlerzelle bereitzustellen.

Gemeinsame Schaltungsdetails für Multi-Niveau-Wandler

[0108] In Stromwandlern, insbesondere in Multi-Niveau-Stromwandlern, können die Leistungsschalter mit FETs, insbesondere MOSFETs, realisiert werden. Für jeden Leistungs-FET sind in der Regel ein Niveauschieber und eine Treiberschaltung erforderlich, um massebezogene logische EIN/AUS-Signale mit niedriger Spannung von einer analogen oder digitalen Steuerung in ein Signal mit demselben Spannungshub, aber bezogen auf die Source-Spannung des Leistungs-FET, den das Signal ansteuert, zu übersetzen, um das Gate des Leistungs-FET zu laden oder zu entladen und dadurch den leitenden oder sperrenden Zustand des Leistungs-FET zu steuern. In einigen Anwendungen können die Funktionen eines Niveauschiebers und einer Treiberschaltung in einer Schaltung zusammengefasst werden.

Allgemeine Vorteile

[0109] Im Vergleich zu herkömmlichen 2-Niveau-Wandlerzellen bieten M-Niveau-Topologien, die durch Anwendung von Verfahren wie den in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen erzeugt werden, eine höhere Energiedichte und/oder einen höheren Wirkungsgrad bei einem breiten dynamischen Bereich von Eingangs-/Ausgangsspannungen. So kann beispielsweise die Größe einer modifizierten 3-Niveau-Wandlerzelle im Vergleich zur zugrundeliegenden 2-Niveau-Wandlerzelle um das 2- bis 4-fache reduziert werden. Wie bereits erwähnt, bedeutet eine solche Größenreduzierung im Allgemeinen auch eine Verringerung des Energieverbrauchs beim Schalten. Sowohl die geringere Größe, als auch die bessere Energieeffizienz sind besonders wichtig für die Umsetzung von Energieumwandlungslösungen in Anwendungen wie batteriebetriebenen tragbaren elektronischen Geräten (z.B. Mobiltelefonen).

[0110] M-Niveau-Topologien, die durch Anwendung von Verfahren wie den in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen erzeugt werden, ermöglichen auch eine Verringerung der Belastung passiver Elemente und Schalter (z.B. FET-Bauelemente) durch Reduzierung der Spannung an vielen Knotenpunkten. Infolgedessen können Schalter, Kondensatoren und/oder Induktoren kleiner dimensioniert werden.

[0111] Mithin kann, scheinbar paradox, durch Hinzufügen von Schaltern und Kondensatoren mittels der in den **Fig. 5A-5C** beschriebenen Verfahren die Gesamtzahl der Komponenten im Vergleich zu einem mit einem anderen Verfahren hergestellten Multi-Niveau-Wandler tatsächlich abnehmen. Bei einer geringeren Spannungsexposition kann ein Schalter beispielsweise einen viel geringeren Grad an Stapelung von Transistoren erfordern, wodurch ein oder mehrere Transistoren eingespart werden können. Ein solcher Multi-Niveau-Wandler kann auch weniger Kapazität benötigen, so dass weniger parallele Kondensatoren erforderlich sind, um die Kapazitätsanforderungen zu erfüllen.

Zusätzliche Steuerungs- und Betriebsüberlegungen

[0112] Es kann wünschenswert sein, zusätzliche Steuer- und Betriebsschaltungen (oder eine oder mehrere Abschaltprozeduren) vorzusehen, die einen zuverlässigen und effizienten Betrieb eines Stromwandlers ermöglichen, der eine gemäß der vorliegenden Offenbarung konzipierte Multi-Niveau-Wandlerzelle verwendet. Bei einem Abwärtswandler ist beispielsweise die Ausgangsspannung einer Wandlerzelle geringer als die

Eingangsspannung der Wandlerzelle. Das Abschalten oder Deaktivieren (z.B. aufgrund eines Fehlerereignisses, wie eines Kurzschlusses) einer Wandlerzelle mit einer an den Ausgang angeschlossenen Induktivität, während der Ausgangslaststrom ungleich Null ist, erfordert im Allgemeinen einige Mittel zum Entladen des Induktorenstroms. In einigen Ausführungsformen kann ein Bypass-Schalter parallel zu einer an den Ausgang einer Wandlerzelle angeschlossenen eingebauten Induktivität geschaltet und so gesteuert werden, dass er im Normalbetrieb geöffnet und beim Abschalten der Wandlerzelle oder bei Auftreten eines Fehlers geschlossen ist. Idealerweise kann der Bypass-Schalter vor dem Abschalten der Wandlerzelle geschlossen werden, um transientes Klingeln zu verhindern und eine sichere Entladung des Induktorenstroms zu gewährleisten. In alternativen Ausführungsformen, bei denen MOSFETs für die Hauptschalter des Wandlers verwendet werden, kann die inhärente Body-Diode, die zwischen den Body- und Drain-Anschlüssen jedes MOSFET angeschlossen ist, auch den Induktorenstrom entladen. Einzelheiten dieser Lösungen sowie alternative Abschaltlösungen werden in dem am 16. Juni 2020 erteilten US-Patent Nr. 10.686.367 mit dem Titel „Apparatus and Method for Efficient Shutdown of Adiabatic Charge Pumps“ beschrieben, das dem Anmelder der vorliegenden Erfindung übertragen wurde und dessen Inhalt durch Bezugnahme aufgenommen wird.

[0113] Eine weitere Überlegung bei der Parallelschaltung von Wandlerzellen ist das Steuern mehrerer parallel geschalteter Stromwandler, um Einschaltstromstöße (z.B. während einer Soft-Start-Periode für die Stromwandler) und/oder eine Überlastung des Schalters zu vermeiden, wenn nicht alle Stromwandler voll funktionsfähig sind, wie z.B. beim Start oder beim Auftreten eines Fehlers. Das bedingte Steuern kann durch die Verwendung von Knotenstatusdetektoren erreicht werden, die mit ausgewählten Knoten innerhalb der parallel geschalteten Stromwandler gekoppelt sind, um Spannung und/oder Strom zu überwachen. Solche Knotenstatusdetektoren können in einigen Ausführungsformen so konfiguriert werden, dass sie parallel zu einem Ausgangsstatusdetektor arbeiten, der die Ausgangsspannung eines zugehörigen Stromwandlers während des Starts misst. Die Knotenzustandsdetektoren stellen sicher, dass die Spannungen an wichtigen Komponenten (z.B. fliegenden Kondensatoren und/oder Schaltern) innerhalb der Wandlerzelle(n) der Stromwandler innerhalb der gewünschten Bereiche liegen, bevor sie den stationären Betrieb der parallelen Stromwandler mit voller Leistung ermöglichen, und verhindern ansonsten den stationären Betrieb mit voller Leistung. Die Knotenstatusdetektoren können mit einer Hauptsteuerung gekoppelt sein, die einen oder mehrere der parallelen Stromwandler unter Verwendung eines oder mehrerer gemeinsamer Steuersignale steuert. Im Rahmen einer Hauptsteuerungs-Konfiguration kann jeder der parallelen Wandler ein Energie-Gut-Signal (Pgood) melden, wenn er bereit ist, eine Startphase für den stationären Betrieb mit voller Energie zu verlassen. Die Hauptsteuerung kann im Wesentlichen alle derartigen Pgood-Signale miteinander „UND“ verknüpfen, möglicherweise zusammen mit einem oder mehreren Statussignalen von anderen Schaltungen, so dass die Hauptsteuerung den stationären Betrieb mit voller Energie für keinen der parallelen Wandler freigibt, wenn nicht alle parallelen Wandler für diesen Zustand bereit sind. Im Wesentlichen sind die Pgood-Signale der einzelnen parallelen Stromwandler alle miteinander verbunden, so dass die parallelen Stromwandler erst dann aus der Startphase in den Dauerbetrieb übergehen können, wenn alle Pgood-Signale anzeigen, dass sie für den Übergang in den Dauerbetrieb bereit sind. Ändert sich das Pgood-Signal aufgrund eines Fehlers in einem oder mehreren der parallelen Stromwandler, können die parallelen Stromwandler von einem stationären Betrieb in einen automatischen Neustart oder eine Abschaltung übergehen. Einzelheiten dieser Lösungen sowie alternative Abschaltlösungen sind in dem am 27. April 2021 erteilten US-Patent Nr. 10.992.226 mit dem Titel „Startup Detection for Parallel Power Converters“ beschrieben, das dem Zessionar der vorliegenden Erfindung übertragen wurde und dessen Inhalt durch Bezugnahme aufgenommen wird.

[0114] Eine weitere Überlegung beim Betrieb von Multi-Niveau-Wandlerzellen ist die Erzielung (d.h. Vorladung) und Aufrechterhaltung der Spannungen von fliegenden Kondensatoren, die im Wesentlichen vollständig proportional ausgeglichen sind, so dass alle Schalter einer ähnlichen Spannungsbelastung ausgesetzt sind, da asymmetrische fliegende Kondensatoren zum Ausfall eines Schalters (insbesondere FET-Schalter) führen können, wenn dieser hohen Spannungen ausgesetzt ist. Eine Lösung sowohl für das Vorladen von Kondensatorspannungen als auch für den betrieblichen Ausgleich von Kondensatorspannungen in einer Multi-Niveau- Gleichspannung-zu-Gleichspannung-Wandlerschaltung besteht darin, eine parallele „Schatten“-Schaltung bereitzustellen, die einen fliegenden Kondensator bedingt an eine Spannungsquelle oder eine andere Schaltung koppelt, um diesen Kondensator vorzuladen, oder der zwei oder mehr fliegenden Kondensatoren bedingt miteinander koppelt, um Ladung von einem Kondensator mit höherer Spannung auf einen Kondensator mit niedrigerer Spannung zu übertragen, oder der einen fliegenden Kondensator bedingt an eine Spannungssenke koppelt, um diesen Kondensator zu entladen, und zwar alles unter der Kontrolle von Echtzeit-Kondensatorspannungsmessungen. Jede parallele „Schatten“-Schaltung kann einen Schalter und einen Widerstand umfassen, die parallel zu einem Hauptschalter geschaltet sind, der Teil einer Multi-Niveau-Wandlerzelle ist (in einigen Fällen kann ein Schalter-Widerstands-Paar zwei in Reihe geschaltete Schalter überbrücken). Diese spezielle Lösung zum Vorladen und/oder Ausgleichen der Ladung von fliegen-

den Kondensatoren ist sehr schnell, ermöglicht ein langsames Vorladen der fliegenden Kondensatoren während einer Vorladeperiode, schützt die Schalter vor Einschaltstrom und liefert stabile Spannungen für die Schalter der Wandlerzelle. Einzelheiten dieser Lösung sowie alternative Vorlade- und Ladungsausgleichslösungen sind in dem am 21. Juli 2020 erteilten US-Patent Nr. 10.720.843 mit dem Titel „Multi-Level DC-DC Converter with Lossy Voltage Balancing“ beschrieben, das dem Zessionar der vorliegenden Erfindung übertragen wurde und dessen Inhalt durch Bezugnahme aufgenommen wird.

[0115] Eine weitere Lösung für den Ausgleich von Kondensatorspannungen in einer Multi-Niveau-Gleichspannung-zu-Gleichspannung-Wandlerschaltung besteht darin, eine verlustfreie Lösung für den Spannungsausgleich bereitzustellen, bei der Zustandsübergänge außerhalb der Ordnung einer Multi-Niveau-Gleichspannung-zu-Gleichspannung-Wandlerzelle während des normalen Betriebs stattfinden können. Der Nettoeffekt von Zustandsübergängen außerhalb der Ordnung besteht darin, dass die Spannung an bestimmten fliegenden Kondensatoren erhöht oder verringert wird, wodurch eine Spannungsüberlastung der Hauptschalter des Gleichspannungswandlers verhindert wird. In einigen Ausführungsformen wird die Gesamtsequenz der Zustandsübergänge eingeschränkt, um das Umschalten von Übergangszuständen zu reduzieren oder zu vermeiden, so dass jeder Kondensator die Möglichkeit hat, seine Spannung nach Bedarf zu steuern, anstatt dass ein Kondensator vor dem Spannungsabgleich eines anderen Kondensators spannungsabgeglichen wird. Einzelheiten dieser Lösung sowie alternative Lösungen für den Ladungsausgleich sind in dem am 8. September 2020 erteilten US-Patent Nr. 10.770.974 mit dem Titel „Multi-Level DC-DC Converter with Lossless Voltage Balancing“ beschrieben, das dem Zessionar der vorliegenden Erfindung übertragen wurde und dessen Inhalt durch Bezugnahme einbezogen wird.

[0116] Eine zusätzliche Überlegung bei einigen Ausführungsformen besteht darin, den Betrieb von Multi-Niveau-Wandlerzellen so zu ermöglichen, dass Spannungen in Grenzbereichen zwischen den Spannungsniveaus erzeugt werden können. „Grenzbereiche“ stellen unerreichbare Ausgangsspannungen für herkömmliche Multi-Niveau-Gleichstrom-zu-Gleichstrom-Wandlerschaltungen dar. Um Ausgangsspannungen innerhalb einer Grenzzone zu erzeugen, alternieren (wechseln) einige Ausführungsformen im Wesentlichen zwischen benachbarten (oder sogar nahe gelegenen) Zonen, indem sie die Zustände der Wandlerzellenschalter in einem Grenzzonenübergangsmuster einstellen. Beispielsweise kann eine 3-Niveau-Gleichstrom-zu-Gleichstrom-Wandlerschaltung für eine ausgewählte Zeit in Zone 1 und für eine ausgewählte Zeit in der benachbarten Zone 2 arbeiten. Somit werden die Zonen 1 und 2 als eine einzige „Superzone“ behandelt. Generell kann es in einigen Fällen sinnvoll sein, Superzonen mit nicht benachbarten Zonen oder mit mehr als zwei (benachbarten und/oder nicht benachbarten) Zonen zu schaffen. Einzelheiten dieser Lösung werden in dem am 21. Juli 2020 erteilten US-Patent Nr. 10.720.842 mit dem Titel „Multi-Level DC-DC Converter with Boundary Transition Control“ beschrieben, das dem Zessionar der vorliegenden Erfindung übertragen wurde und dessen Inhalt durch Bezugnahme einbezogen wird.

[0117] Eine weitere Ausführungsform ist der Schutz der Hauptleistungsschalter und anderer Komponenten innerhalb eines Stromwandlers vor Stressbedingungen, insbesondere vor Spannungen, die die Durchbruchspannung solcher Schalter (insbesondere FET-Schalter) überschreiten. Ein Mittel zum Schutz eines Multi-Niveau-Wandlers verwendet mindestens einen Hochspannungs-FET-Schalter, während alle oder die meisten anderen Hauptleistungsschalter Niederspannungs-FET-Schalter sein können.

[0118] In Stromwandlern, insbesondere in Multi-Niveau-Stromwandlern, können die Leistungsschalter mit FETs, insbesondere MOSFETs, realisiert werden. Für jeden Energie-FET ist im Allgemeinen eine Treiberschaltung erforderlich. Bei einigen Leistungs-FETs kann außerdem ein Niveauschieber erforderlich sein, um massebezogene logische EIN/AUS-Signale mit niedriger Spannung von einer analogen oder digitalen Steuerung in ein Signal mit demselben Spannungshub zu übersetzen, das jedoch auf die Source-Spannung des Leistungs-FETs bezogen ist, den das Signal ansteuert, um das Gate des Leistungs-FETs zu laden oder zu entladen und dadurch den leitenden oder sperrenden Zustand des Leistungs-FETs zu steuern. In einigen Anwendungen können die Funktionen eines Niveauschiebers und einer Treiberschaltung in einer Schaltung zusammengefasst werden.

[0119] Es sollte klar sein, dass die in dieser Offenbarung beschriebenen Ausführungsformen der Multi-Niveau-Stromwandler synergetisch mit den Lehren einer oder mehrerer der in diesem Abschnitt beschriebenen zusätzlichen Steuer- und Betriebsschaltungen und Verfahren kombiniert werden können.

Allgemeiner Nutzen und Vorteile von Multi-Niveau-Stromwandlern

[0120] Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung verbessern die Leistungsdichte und/oder die Energieeffizienz von integrierten Schaltungen und Schaltungsmodulen oder -blöcken. Wie ein Fachmann verstehen sollte, wird eine Systemarchitektur durch die Verwendung von Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung in entscheidender Weise vorteilhaft beeinflusst, einschließlich geringerer Energie und/oder längerer Batterielebensdauer. Die vorliegende Erfindung umfasst daher insbesondere Ausführungsformen auf Systemebene, die durch Einbeziehung in ein großes Systemdesign und eine Anwendung kreativ ermöglicht werden.

[0121] Insbesondere bieten oder ermöglichen Multi-Niveau-Stromwandler zahlreiche Vorteile, darunter:

- Anpassungsfähigkeit an Anwendungen, bei denen die Eingangs- und/oder Ausgangsspannungen einen großen dynamischen Bereich aufweisen können (z.B. schwankende Batterie-Eingangsspannungsniveau, schwankende Ausgangsspannungen);
- Effizienzsteigerungen bei der Laufzeit von Geräten, die mit tragbaren elektrischen Energiequellen betrieben werden (Batterien, Generatoren oder Brennstoffzellen mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen, Solarzellen usw.);
- Effizienzverbesserungen, wenn die Effizienz für das Wärmemanagement wichtig ist, insbesondere um andere Komponenten (z.B. Displays, benachbarte ICs) vor übermäßiger Hitze zu schützen;
- Ermöglichung von Konstruktionsoptimierungen in Bezug auf den Wirkungsgrad, die Leistungsdichte und den Formfaktor des Stromwandlers - so können z.B. kleinere Multi-Niveau-Stromwandler die Platzierung von Stromwandlern in unmittelbarer Nähe zu den Verbrauchern ermöglichen, was den Wirkungsgrad erhöht und/oder die Gesamtmaterialekosten senkt;
- die Möglichkeit, die Leistung kleinerer Niederspannungstransistoren zu nutzen;
- Anpassungsfähigkeit an Anwendungen, bei denen die Energiequellen stark variieren können, wie z.B. Batterien, andere Wandler, Generatoren oder Brennstoffzellen mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen, Solarzellen, Netzspannung (AC) und Gleichspannungsquellen (z.B. USB, USB-C, Power-over-Ethernet usw.);
- Anpassungsfähigkeit an Anwendungen, bei denen die Lasten stark variieren können, wie z.B. ICs im Allgemeinen (einschließlich Mikroprozessoren und Speicher-ICs), Elektromotoren und Aktuatoren, Transducer, Sensoren und Anzeigen (z.B. LCDs und LEDs aller Art);
- die Fähigkeit, in einer Reihe von IC-Technologien (z.B. MOSFETs, GaN, GaAs und Bulk-Silizium) und Packungstechnologien (z.B. Flip-Chips, Ball-Grid-Arrays, Wafer-Level-Scale-Chip-Packages, Wide-Fan-Out-Packaging und Embedded-Packaging) eingesetzt zu werden.

[0122] Die Vorteile und der Nutzen von Multi-Niveau-Stromwandlern ermöglichen den Einsatz in einem breiten Spektrum von Anwendungen. Zu den Anwendungen von Multi-Niveau-Wandlern gehören beispielsweise tragbare und mobile Computer- und/oder Kommunikationsprodukte und -komponenten (z.B. Notebooks, Ultrabook-Computer, Tablet-Geräte und Mobiltelefone), Displays (z.B. LCDs, LEDs), funkbasierte Geräte und Systeme (z.B., Mobilfunksysteme, WiFi, Bluetooth, Zigbee, Z-Wave und GPS-basierte Geräte), drahtgebundene Netzwerkgeräte und -systeme, Datenzentren (z.B. für Batterie-Backup-Systeme und/oder Energieumwandlung für Verarbeitungssysteme und/oder elektronische/optische Netzwerksysteme), Internet-der-Dinge-Geräte (IOT) (z.B., intelligente Schalter und Leuchten, Sicherheitssensoren und Sicherheitskameras), Haushaltsgeräte und Elektronik (z.B. Set-Top-Boxen, batteriebetriebene Staubsauger, Geräte mit eingebauten Funksendern wie Waschmaschinen, Trockner und Kühlschränke), Wechselstrom-Gleichstrom-Wandler, Elektrofahrzeuge aller Art (z.B. für Antriebsstränge, Steuersysteme und/oder Infotainmentsysteme) und andere Geräte und Systeme, die tragbare Stromerzeugungsquellen nutzen und/oder eine Energieumwandlung benötigen.

[0123] Die Nutzung von Funksystemen umfasst drahtlose Hochfrequenzsysteme (einschließlich Basisstationen, Relaisstationen und tragbare Sende- und Empfangsgeräte), die verschiedene Technologien und Protokolle verwenden, darunter verschiedene Arten von orthogonalem Frequenzmultiplexing („OFDM“), Quadraturamplitudenmodulation („QAM“), Code-Division Multiple Access („CDMA“), Time-Division Multiple Access („TDMA“), Wide Band Code Division Multiple Access („W-CDMA“), Global System for Mobile Communications („GSM“), Long Term Evolution („LTE“), 5G, und WiFi (z.B. 802.11a, b, g, ac, ax), sowie andere Funkkommunikationsstandards und -protokolle.

[0124] In verschiedenen Ausführungsformen von Multi-Niveau-Stromwandlern kann es von Vorteil sein, bestimmte Arten von Kondensatoren zu verwenden, insbesondere für die fliegenden Kondensatoren. Beispielsweise ist es im Allgemeinen nützlich, dass solche Kondensatoren einen niedrigen äquivalenten Reihenwiderstand (ESR), eine geringe Gleichstrom-Vorspannungsdegradation, eine hohe Kapazität und ein kleines Volumen aufweisen. Ein niedriger ESR-Wert ist besonders wichtig für Multi-Niveau-Stromwandler, die zusätzliche Schalter und fliegende Kondensatoren enthalten, um die Anzahl der Spannungsniveaus zu erhöhen. Die Auswahl eines bestimmten Kondensators sollte unter Berücksichtigung der Spezifikationen für Energie, Wirkungsgrad, Größe usw. getroffen werden. Es können verschiedene Kondensatortechnologien verwendet werden, z.B. Keramikkondensatoren (einschließlich Keramik-Vielschichtkondensatoren), Elektrolytkondensatoren, Folienkondensatoren (einschließlich Leistungsfolienkondensatoren) und IC-basierte Kondensatoren. Die Dielektrika der Kondensatoren können je nach Bedarf für bestimmte Anwendungen variieren und können paraelektrische Dielektrika wie Siliziumdioxid (SiO_2), Hafniumdioxid (HfO_2) oder Aluminiumoxid Al_2O_3 umfassen. Darüber hinaus können bei Multi-Niveau-Stromwandlern intrinsische parasitäre Kapazitäten (z.B. in den Leistungs-FETs) in Verbindung mit oder anstelle von Kondensatoren verwendet werden, um die Schaltungsgröße zu verringern und/oder die Schaltungsleistung zu erhöhen. Bei der Auswahl von Kondensatoren für Multi-Niveau-Stromwandler können auch Faktoren wie Schwankungen der Kondensatorkomponenten, eine geringere effektive Kapazität bei Gleichstromvorspannung und Temperaturkoeffizienten von Keramikkondensatoren (minimale und maximale Temperaturbetriebsgrenzen und Kapazitätsschwankungen bei Temperatur) berücksichtigt werden.

[0125] Ebenso kann es in verschiedenen Ausführungsformen von Multi-Niveau-Stromwandlern von Vorteil sein, bestimmte Arten von Induktoren zu verwenden. Zum Beispiel ist es im Allgemeinen nützlich, dass die Induktoren einen niedrigen Gleichstrom-Äquivalenzwiderstand, eine hohe Induktivität und ein geringes Volumen haben.

[0126] Die Steuerung(en), die zum Steuern der Inbetriebnahme und des Betriebs eines Multi-Niveau-Stromwandlers verwendet wird (werden), kann (können) als Mikroprozessor, Mikrocontroller, digitaler Signalprozessor (DSP), Register-Transfer-Niveau-Schaltung (RTL) und/oder kombinatorische Logik implementiert werden.

[0127] Der Begriff „MOSFET“, wie er in dieser Offenbarung verwendet wird, umfasst jeden Feldeffekttransistor (FET) mit einem isolierten Gate, dessen Spannung die Leitfähigkeit des Transistors bestimmt, und schließt isolierte Gates mit einer Metall- oder metallähnlichen, Isolator- und/oder Halbleiterstruktur ein. Die Begriffe „Metall“ oder „metallähnlich“ umfassen mindestens ein elektrisch leitendes Material (wie Aluminium, Kupfer oder ein anderes Metall oder hochdotiertes Polysilizium, Graphen oder einen anderen elektrischen Leiter), „Isolator“ umfasst mindestens ein isolierendes Material (wie Siliziumoxid oder ein anderes dielektrisches Material), und „Halbleiter“ umfasst mindestens ein Halbleitermaterial.

[0128] Im Rahmen dieser Offenbarung bezieht sich der Begriff „Hochfrequenz“ (HF) auf eine Schwingungsrate im Bereich von etwa 3 kHz bis etwa 300 GHz. Dieser Begriff umfasst auch die in drahtlosen Kommunikationssystemen verwendeten Frequenzen. Eine HF-Frequenz kann die Frequenz einer elektromagnetischen Welle oder einer Wechselspannung oder eines Wechselstroms in einer Schaltung sein.

[0129] In den Figuren, auf die in dieser Offenbarung Bezug genommen wird, sind die Abmessungen der verschiedenen Elemente nicht maßstabsgetreu; einige Abmessungen sind zur Verdeutlichung oder Hervorhebung vertikal und/oder horizontal stark übertrieben worden. Darüber hinaus sind Hinweise auf Ausrichtungen und Richtungen (z.B. „oben“, „unten“, „oben“, „unten“, „seitlich“, „vertikal“, „horizontal“ usw.) relativ zu den Beispielzeichnungen und nicht unbedingt absolute Ausrichtungen oder Richtungen.

[0130] Verschiedene Ausführungsformen der Erfindung können so umgesetzt werden, dass sie eine Vielzahl von Spezifikationen erfüllen. Sofern oben nicht anders angegeben, ist die Auswahl geeigneter Komponentenwerte eine Frage der Designwahl. Verschiedene Ausführungsformen der Erfindung können in jeder geeigneten integrierten Schaltung (IC) Technologie (einschließlich, aber nicht beschränkt auf MOSFET-Strukturen), oder in hybriden oder diskreten Schaltungsformen implementiert werden. Ausführungsformen integrierter Schaltungen können auf allen geeigneten Substraten und Prozessen hergestellt werden, einschließlich, aber nicht beschränkt auf Standard-Silizium, CMOS mit hohem Widerstand, Silizium-auf-Isolator (SOI) und Silizium-auf-Saphir (SOS). Sofern oben nicht anders angegeben, können Ausführungsformen der Erfindung auch in anderen Transistortechnologien wie Bipolar-, BiCMOS-, LDMOS-, BCD-, GaAs-HBT-, GaN-HEMT-, GaAs-pHEMT- und MESFET-Technologien eingesetzt werden. Ausführungsformen der Erfindung sind jedoch

besonders nützlich, wenn sie mit einem SOI- oder SOS-basierten Prozess hergestellt werden oder wenn sie mit Prozessen mit ähnlichen Eigenschaften hergestellt werden. Die Herstellung in CMOS unter Verwendung von SOI- oder SOS-Prozessen ermöglicht Schaltungen mit geringem Energieverbrauch, der Fähigkeit, während des Betriebs aufgrund der FET-Stapelung hohen Leistungssignalen standzuhalten, guter Linearität und Hochfrequenzbetrieb (d.h. Hochfrequenzen bis zu und über 300 GHz). Die monolithische IC-Implementierung ist besonders nützlich, da die parasitären Kapazitäten im Allgemeinen durch sorgfältiges Design niedrig gehalten werden können (oder zumindest gleichmäßig über alle Einheiten verteilt werden können, so dass sie kompensiert werden können).

[0131] Die Spannungsniveaus können angepasst und/oder die Spannungs- und/oder Logiksignalpolaritäten umgekehrt werden, je nach Spezifikation und/oder Implementierungstechnologie (z.B. NMOS, PMOS oder CMOS und Transistorbauelemente im Anreicherungs- oder Verarmungsmodus). Die Spannungs-, Strom- und Energieaufnahmefähigkeit der Komponenten kann je nach Bedarf angepasst werden, z.B. durch Anpassung der Bauteilgrößen, seriell „Stapeln“ von Komponenten (insbesondere FETs), um höheren Spannungen standzuhalten, und/oder parallele Verwendung mehrerer Komponenten, um höhere Ströme zu verarbeiten. Zusätzliche Schaltungskomponenten können hinzugefügt werden, um die Fähigkeiten der offengelegten Schaltungen zu verbessern und/oder um zusätzliche Funktionen bereitzustellen, ohne die Funktionalität der offengelegten Schaltungen wesentlich zu verändern.

[0132] Schaltungen und Vorrichtungen gemäß der vorliegenden Erfindung können allein oder in Kombination mit anderen Komponenten, Schaltungen und Vorrichtungen verwendet werden. Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung können als integrierte Schaltungen (ICs) hergestellt werden, die in IC-Gehäusen und/oder in Modulen zur einfacheren Handhabung, Herstellung und/oder verbesserten Leistung untergebracht werden können. Insbesondere werden IC-Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung häufig in Modulen verwendet, in denen ein oder mehrere solcher ICs mit anderen Schaltungskomponenten oder Blöcken (z.B. Filtern, Verstärkern, passiven Komponenten und möglicherweise zusätzlichen ICs) in einem Gehäuse kombiniert sind. Die ICs und/oder Module werden dann in der Regel mit anderen Komponenten kombiniert, oft auf einer Leiterplatte, um Teil eines Endprodukts wie eines Mobiltelefons, eines Laptops oder eines elektronischen Tablets zu werden, oder um ein übergeordnetes Modul zu bilden, das in einer Vielzahl von Produkten wie Fahrzeugen, Testgeräten, medizinischen Geräten usw. verwendet werden kann. Durch verschiedene Konfigurationen von Modulen und Baugruppen ermöglichen solche ICs in der Regel einen Kommunikationsmodus, häufig eine drahtlose Kommunikation.

Programmierte Ausführungsformen

[0133] Einige oder alle Aspekte der Erfindung können in Hardware oder Software oder einer Kombination aus beidem (z.B. programmierbare Logik-Arrays) implementiert werden. Sofern nicht anders angegeben, sind die Verfahren, die Teil der Erfindung sind, nicht von Natur aus auf einen bestimmten Computer oder ein anderes Gerät bezogen. Insbesondere können verschiedene Allzweck-Computer mit Programmen verwendet werden, die in Übereinstimmung mit den hierin enthaltenen Lehren geschrieben wurden, oder es kann zweckmäßiger sein, einen Spezialcomputer oder Spezialhardware (wie integrierte Schaltungen) zu verwenden, um bestimmte Funktionen auszuführen. So können Ausführungsformen der Erfindung in einem oder mehreren Computerprogrammen (d.h. einem Satz von Anweisungen oder Codes) implementiert werden, die auf einem oder mehreren programmierten oder programmierbaren Computersystemen (die verschiedene Architekturen aufweisen können, wie z.B. verteilte, Client/Server- oder Grid-Architekturen) ausgeführt werden, die jeweils mindestens einen Prozessor, mindestens ein Datenspeichersystem (das flüchtige und nicht-flüchtige Speicher und/oder Speicherelemente umfassen kann), mindestens eine Eingabevorrichtung oder einen Anschluss und mindestens eine Ausgabevorrichtung oder einen Anschluss umfassen. Programmieranweisungen oder -codes werden auf Eingabedaten angewendet, um die hier beschriebenen Funktionen auszuführen und Ausgabeinformationen zu erzeugen. Die Ausgabeinformationen werden in bekannter Weise an ein oder mehrere Ausgabegeräte weitergeleitet.

[0134] Jedes derartige Computerprogramm kann in einer beliebigen Computersprache (einschließlich Maschinen-, Assembler- oder prozeduralen Hochsprachen, logischen Sprachen, objektorientierten Programmiersprachen oder einer benutzerdefinierten Sprache/Skript) implementiert werden, um mit einem Computersystem zu kommunizieren, und kann in einer verteilten Weise implementiert werden, bei der verschiedene Teile der durch die Software spezifizierten Berechnungen von verschiedenen Prozessoren ausgeführt werden. In jedem Fall kann es sich bei der Computersprache um eine kompilierte oder interpretierte Sprache handeln. Computerprogramme, die einen Teil oder die Gesamtheit der Erfindung implementieren, können ein oder mehrere Module eines größeren Programms oder Systems von Programmen bilden. Einige oder alle

Elemente des Computerprogramms können als Datenstrukturen, die in einem computerlesbaren Medium gespeichert sind, oder als andere organisierte Daten, die einem in einem Datenspeicher gespeicherten Datenmodell entsprechen, implementiert werden.

[0135] Jedes derartige Computerprogramm kann auf einem greifbaren, nicht transitorischen Speichermedium oder -gerät (z.B. Festkörperspeichermedien oder -geräte oder magnetische oder optische Medien) für einen bestimmten Zeitraum (z.B. die Zeit zwischen den Auffrischungsperioden eines dynamischen Speichers, wie eines dynamischen RAM, oder semipermanent oder permanent) gespeichert oder heruntergeladen werden (z.B. durch Codierung in einem übertragenen Signal und Übertragung über ein Kommunikationsmedium wie ein Netzwerk), die Zeit zwischen Auffrischungsperioden einer dynamischen Speichervorrichtung, wie einem dynamischen RAM, oder semipermanent oder permanent), wobei die Speichermedien oder -vorrichtungen von einem programmierbaren Computer für allgemeine oder spezielle Zwecke gelesen werden können, um den Computer zu konfigurieren und zu betreiben, wenn die Speichermedien oder -vorrichtungen von dem Computersystem gelesen werden, um die oben beschriebenen Verfahren durchzuführen. Das erfindungsgemäße System kann auch als ein nicht-transitorisches, computerlesbares Speichermedium betrachtet werden, das mit einem Computerprogramm konfiguriert ist, wobei das so konfigurierte Speichermedium ein Computersystem veranlasst, in einer spezifischen oder vordefinierten Weise zu arbeiten, um die oben beschriebenen Funktionen auszuführen.

Schlussfolgerung

[0136] Es wurde eine Reihe von Ausführungsformen der Erfindung beschrieben. Es versteht sich, dass verschiedene Änderungen vorgenommen werden können, ohne von Geist und Umfang der Erfindung abzuweichen. Zum Beispiel können einige der oben beschriebenen Schritte unabhängig von der Reihenfolge sein und können daher in einer anderen Reihenfolge als der beschriebenen durchgeführt werden. Ferner können einige der oben beschriebenen Schritte optional sein. Verschiedene Aktivitäten, die in Bezug auf die oben genannten Verfahren beschrieben sind, können wiederholt, seriell und/oder parallel ausgeführt werden.

[0137] Es versteht sich, dass die vorstehende Beschreibung der Veranschaulichung dient und nicht der Einschränkung des Umfangs der Erfindung, die durch den Umfang der folgenden Ansprüche definiert ist, und dass andere Ausführungsformen innerhalb des Umfangs der Ansprüche liegen. Insbesondere umfasst der Anwendungsbereich der Erfindung alle möglichen Kombinationen von einem oder mehreren der in den nachstehenden Ansprüchen aufgeführten Verfahren, Maschinen, Herstellungsverfahren oder Stoffzusammensetzungen. (Es ist zu beachten, dass die in Klammern gesetzten Bezeichnungen für die Anspruchselemente dazu dienen, die Bezugnahme auf diese Elemente zu erleichtern, und an sich keine bestimmte erforderliche Reihenfolge oder Aufzählung der Elemente angeben; ferner können diese Bezeichnungen in abhängigen Ansprüchen als Verweise auf zusätzliche Elemente wiederverwendet werden, ohne dass dies als Beginn einer widersprüchlichen Bezeichnungsfolge angesehen wird).

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 63214474 f [0001]
- US 17559945 f [0001]
- US 63276923 [0093]
- US 10686367 [0112]
- US 10992226 [0113]
- US 10720843 [0114]
- US 10770974 [0115]
- US 10720842 [0116]

Patentansprüche

1. Wandlerzelle mit mindestens 3 Knotenspannungsniveaus und hergestellt durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle, die entweder (1) mindestens 3 eingebaute Energiespeicherelemente, von denen mindestens eines eine Induktivität ist, und mindestens 2 Schalter oder (2) mindestens 1 eingebaute Induktivität und mindestens 4 Schalter enthält, wobei die Wandlerzelle ein erstes Paar und ein zweites Paar von Schaltern enthält, die jeweils eines von einem Paar von Schaltern innerhalb der 2-Niveau-Wandlerzelle ersetzen, die im stationären Betrieb nicht gleichzeitig leitend sind, wobei ein erster Zwischenknoten zwischen dem ersten Paar von Schaltern und ein zweiter Zwischenknoten zwischen dem zweiten Paar von Schaltern dazu konfiguriert sind, mit einem Kondensator zu verbinden.
2. Wandlerzelle nach Anspruch 1, wobei einer der Schalter in einem ersetzten Paar von Schaltern eine Diode ist, die als Schalter funktioniert.
3. Wandlerzelle nach Anspruch 1, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine nicht isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.
4. Wandlerzelle nach Anspruch 1, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.
5. Wandlerzelle nach Anspruch 1, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder eine 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle oder eine 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle ist.
6. Wandlerzelle nach Anspruch 1, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle ist.
7. Wandlerzelle nach Anspruch 1, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle ist.
8. Wandlerzelle nach Anspruch 1, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle umfasst:
 - (a) einen ersten Schalter, der mit einem ersten Anschluss eines Induktors verbunden ist,
 - (b) einen zweiten Schalter, der mit einem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,
 - (c) einen dritten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem ersten Schalter und dem Induktor verbunden ist, und
 - (d) einen vierten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem Induktor und dem zweiten Schalter verbunden ist.
9. Wandlerzelle nach Anspruch 1, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine der in **Fig. 12A, 12B, 12C, 13B, 15B, 18** oder 19-33 gezeigten Schaltungen ist.
10. Verfahren zum Aufbauen einer 3-Niveau-Wandlerzelle durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle, die mindestens eine eingebaute Induktivität und mindestens zwei Schalter enthält, wobei das Verfahren umfasst:
 - (e) Auswählen eines Paares von Schaltern innerhalb der 2-Niveau-Wandlerzelle, die im stationären Betrieb nicht gleichzeitig leitend sind,
 - (f) Aufteilen jedes der beiden ausgewählten Schalter in 2 in Reihe geschaltete Schalter, wodurch ein Zwischenknoten zwischen den beiden in Reihe geschalteten ausgewählten Schaltern gebildet wird, und
 - (g) Verbinden der neu gebildeten Zwischenknoten über einen Kondensator.
11. Verfahren nach Anspruch 10, ferner umfassend das Ersetzen von Diodenschaltern innerhalb der 2-Niveau-Wandlerzelle, falls vorhanden, durch entsprechende einpolige Einzelstellungsschalter einschließt.
12. Verfahren nach Anspruch 10, wobei das Aufteilen eines ausgewählten Schalters in 2 in Reihe geschaltete Schalter das Beibehalten des ausgewählten Schalters und das Verbinden des ausgewählten Schalters in Reihe mit einem zusätzlichen Schalter umfasst.
13. 3-Niveau-Wandlerzelle, hergestellt durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle gemäß dem Verfahren nach Anspruch 10, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder (1) mindestens 2 eingebaute Induktivitäten und mindestens 2 Schalter oder (2) mindestens 1 eingebaute Induktivität und mindestens 3 Schalter enthält.

14. 3-Niveau-Wandlerzelle, hergestellt durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle gemäß dem Verfahren des Anspruchs 10, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder (1) mindestens 3 eingebaute Energiespeicherelemente, von denen mindestens eines eine Induktivität ist, und mindestens 2 Schalter oder (2) mindestens eine eingebaute Induktivität und mindestens 4 Schalter enthält.

15. Wandlerzelle nach Anspruch 14, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine nicht isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

16. Wandlerzelle nach Anspruch 14, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

17. Wandlerzelle nach Anspruch 14, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder eine 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle oder eine 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle ist.

18. Wandlerzelle nach Anspruch 14, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle ist.

19. Wandlerzelle nach Anspruch 14, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle ist.

20. Wandlerzelle nach Anspruch 14, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle umfasst:
 (h) einen ersten Schalter, der mit einem ersten Anschluss eines Induktors verbunden ist,
 (i) einen zweiten Schalter, der mit einem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,
 (j) einen dritten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem ersten Schalter und dem Induktor verbunden ist, und
 (k) einen vierten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem Induktor und dem zweiten Schalter verbunden ist.

21. Verfahren zum Aufbauen einer 3-Niveau-Wandlerzelle durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle, die entweder (1) mindestens 3 eingebaute Energiespeicherelemente, von denen mindestens eines eine Induktivität ist, und mindestens 2 Schalter oder (2) mindestens 1 eingebaute Induktivität und mindestens 4 Schalter enthält, wobei das Verfahren umfasst:

(a) Auswählen eines Paares von Schaltern innerhalb der 2-Niveau-Wandlerzelle, die im stationären Betrieb nicht gleichzeitig leitend sind,
 (b) Aufteilen jedes der beiden ausgewählten Schalter in 2 in Reihe geschaltete Schalter, wodurch ein Zwischenknoten zwischen den beiden in Reihe geschalteten ausgewählten Schaltern gebildet wird, und
 (c) Verbinden der neu gebildeten Zwischenknoten über einen Kondensator.

22. Verfahren nach Anspruch 21, ferner umfassend das Ersetzen von Diodenschaltern innerhalb der 2-Niveau-Wandlerzelle, falls vorhanden, durch entsprechende einpolige Einzelstellungsschalter.

23. Verfahren nach Anspruch 21, wobei das Aufteilen eines ausgewählten Schalters in 2 in Reihe geschaltete Schalter das Beibehalten des ausgewählten Schalters und das Koppeln des ausgewählten Schalters in Reihe mit einem zusätzlichen Schalter umfasst.

24. 3-Niveau-Wandlerzelle, hergestellt durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle gemäß dem Verfahren nach Anspruch 21, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder (1) mindestens 3 eingebaute Energiespeicherelemente, von denen mindestens eines eine Induktivität ist, und mindestens 2 Schalter oder (2) mindestens eine eingebaute Induktivität und mindestens 4 Schalter enthält.

25. Wandlerzelle nach Anspruch 24, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine nicht isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

26. Wandlerzelle nach Anspruch 24, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

27. Wandlerzelle nach Anspruch 24, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder eine 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle oder eine 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle ist.

28. Wandlerzelle nach Anspruch 24, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle ist.
29. Wandlerzelle nach Anspruch 24, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle ist.
30. Wandlerzelle nach Anspruch 24, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle umfasst:
 (d) einen ersten Schalter, der mit einem ersten Anschluss eines Induktors verbunden ist,
 (e) einen zweiten Schalter, der mit einem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,
 (f) einen dritten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem ersten Schalter und dem Induktor verbunden ist, und
 (g) einen vierten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem Induktor und dem zweiten Schalter verbunden ist.
31. Verfahren zum Aufbau einer M-Niveau-Wandlerzelle durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle, die entweder (1) mindestens 3 eingebaute Energiespeicherelemente, von denen mindestens eines eine Induktivität ist, und mindestens 2 Schalter oder (2) mindestens 1 eingebaute Induktivität und mindestens 4 Schalter enthält, wobei $M \geq 3$ ist, wobei das Verfahren umfasst:
 (h) Auswählen eines Paares von Schaltern innerhalb der 2-Niveau-Wandlerzelle, die nicht gleichzeitig leitend sind,
 (i) Aufteilen jedes der beiden ausgewählten Schalter in 2 in Reihe geschaltete Schalter, wodurch ein Zwischenknoten zwischen den beiden in Reihe geschalteten ausgewählten Schaltern gebildet wird,
 (j) Verbinden der neu gebildeten Zwischenknoten über einen Kondensator und
 (k) wenn M größer als 3 ist, dann:
 (1) Auswählen eines entsprechenden Paares von Schaltern aus den zuvor aufgeteilten Schaltern,
 (2) Aufteilen jedes der beiden ausgewählten entsprechenden Schalter in zwei in Reihe geschaltete Schalter, wodurch ein Zwischenknoten zwischen den beiden in Reihe geschalteten ausgewählten Schaltern gebildet wird,
 (3) Verbinden der neu gebildeten Zwischenknoten über einen Kondensator,
 (4) dekrementieren M um 1 und
 (5) Wiederholen von Schritt (d).
32. Verfahren nach Anspruch 31, ferner umfassend das Ersetzen von Diodenschaltern innerhalb der 2-Niveau-Wandlerzelle, falls vorhanden, durch entsprechende einpolige Einzelstellungsschalter.
33. Verfahren nach Anspruch 31, wobei das Aufteilen eines ausgewählten Schalters in 2 in Reihe geschaltete Schalter das Beibehalten des ausgewählten Schalters und das Verbinden des ausgewählten Schalters in Reihe mit einem zusätzlichen Schalter umfasst.
34. M-Niveau-Wandlerzelle, hergestellt durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle gemäß dem Verfahren nach Anspruch 31.
35. Wandlerzelle nach Anspruch 34, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine nicht isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.
36. Wandlerzelle nach Anspruch 34, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.
37. Wandlerzelle nach Anspruch 34, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder eine 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle oder eine 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle ist.
38. Wandlerzelle nach Anspruch 34, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle ist.
39. Wandlerzelle nach Anspruch 34, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle ist.
40. Wandlerzelle nach Anspruch 34, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle umfasst:
 (l) einen ersten Schalter, der mit einem ersten Anschluss eines Induktors verbunden ist,
 (m) einen zweiten Schalter, der mit einem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,

- (n) einen dritten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem ersten Schalter und dem Induktor verbunden ist, und
- (o) einen vierten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem Induktor und dem zweiten Schalter verbunden ist.

41. Nicht isolierter Cuk-Wandler mit mindestens 3 Niveaus, umfassend:

- (p) einen ersten Induktor, der mit einem ersten Anschluss eines ersten Kondensators verbunden ist,
- (q) einen zweiten Induktor, der mit einem zweiten Anschluss des ersten Kondensators verbunden ist,
- (r) einen ersten Schalter, der mit einem Knoten zwischen dem ersten Induktor und dem ersten Anschluss des ersten Kondensators verbunden ist,
- (s) einen zweiten Schalter, der mit einem Knoten zwischen dem zweiten Induktor und dem zweiten Anschluss des ersten Kondensators verbunden ist,
- (t) einen dritten Schalter, der mit dem ersten Schalter gekoppelt ist,
- (u) einen vierten Schalter, der mit dem zweiten Schalter gekoppelt ist, und
- (v) einen zweiten Kondensator, der von einem Knoten zwischen dem ersten und dem dritten Schalter mit einem Knoten zwischen dem zweiten und dem vierten Schalter verbunden ist.

42. Isolierte Cuk-Wandlerzelle mit mindestens 3 Niveaus, umfassend:

- (w) einen ersten Induktor, der mit einem ersten Anschluss eines ersten Kondensators verbunden ist,
- (x) einen zweiten Induktor, der mit einem ersten Anschluss eines zweiten Kondensators verbunden ist,
- (y) einen ersten Schalter, der mit einem Knoten zwischen dem ersten Induktor und dem ersten Anschluss des ersten Kondensators verbunden ist,
- (z) einen zweiten Schalter, der mit einem Knoten zwischen dem zweiten Induktor und dem ersten Anschluss des zweiten Kondensators verbunden ist,
- (aa) einen Transformator mit einem ersten Anschluss, der mit einem zweiten Anschluss des ersten Kondensators verbunden ist, einem zweiten Anschluss, der mit einem zweiten Anschluss des zweiten Kondensators verbunden ist, einem dritten Anschluss und einem vierten Anschluss,
- (bb) einen dritten Schalter, der zwischen den ersten Schalter und den dritten Anschluss des Transformators geschaltet ist,
- (cc) einen vierten Schalter, der zwischen den zweiten Schalter und den vierten Anschluss des Transformators geschaltet ist, und
- (dd) einen dritten Kondensator, der von einem Knoten zwischen dem ersten und dem dritten Schalter mit einem Knoten zwischen dem zweiten und dem vierten Schalter verbunden ist.

43. Zeta/SEPIC-Wandlerzelle mit mindestens 3 Niveaus, umfassend:

- (ee) einen ersten Induktor, der mit einem ersten Anschluss eines ersten Kondensators verbunden ist,
- (ff) einen zweiten Induktor, der mit einem zweiten Anschluss des ersten Kondensators verbunden ist,
- (gg) einen ersten Schalter, der mit dem zweiten Anschluss des ersten Kondensators verbunden ist,
- (hh) einen zweiten Schalter, der mit dem ersten Schalter verbunden ist,
- (ii) einen dritten Schalter, der mit einem Knoten zwischen dem ersten Induktor und dem ersten Anschluss des ersten Kondensators verbunden ist,
- (jj) einen vierten Schalter, der mit dem dritten Schalter verbunden ist, und
- (kk) einen zweiten Kondensator, der von einem Knoten zwischen dem ersten und dem zweiten Schalter mit einem Knoten zwischen dem dritten und dem vierten Schalter verbunden ist.

44. Flyback-Wandlerzelle mit mindestens 3 Niveaus, umfassend:

- (ll) einen ersten Schalter,
- (mm) einen zweiten Schalter, der mit dem ersten Schalter gekoppelt ist,
- (nn) einen Transformator mit einem ersten Anschluss und einem zweiten Anschluss, die von einem dritten Anschluss und einem vierten Anschluss isoliert sind, wobei der zweite Anschluss mit dem zweiten Schalter verbunden ist,
- (oo) einen dritten Schalter, der mit dem dritten Anschluss des Transformators verbunden ist,
- (pp) einen vierten Schalter, der mit dem dritten Schalter verbunden ist,
- (qq) einen ersten Kondensator, der zwischen den vierten Schalter und den vierten Anschluss des Transformators geschaltet ist, und
- (rr) einen zweiten Kondensator, der von einem Knoten zwischen dem ersten und dem zweiten Schalter mit einem Knoten zwischen dem dritten und dem vierten Schalter verbunden ist.

45. Vorwärtswandlerzelle mit mindestens 3 Niveaus, umfassend:

- (ss) einen ersten Schalter,

(tt) einen Transformator mit einem ersten Anschluss und einem zweiten Anschluss, die von einem dritten Anschluss und einem vierten Anschluss isoliert sind, wobei der zweite Anschluss mit dem zweiten Schalter verbunden ist,
 (uu) einen zweiten Schalter, der mit dem dritten Anschluss des Transformators verbunden ist,
 (vv) einen dritten Schalter, der mit dem zweiten Schalter verbunden ist,
 (ww) einen Induktor, der mit dem dritten Schalter verbunden ist,
 (xx) einen vierten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem dritten Schalter und dem Induktor verbunden ist,
 (yy) einen fünften Schalter, der zwischen dem vierten Schalter und dem vierten Anschluss des Transformators geschaltet ist, und
 (zz) einen zweiten Kondensator, der von einem Knoten zwischen dem zweiten und dem dritten Schalter mit einem Knoten zwischen dem vierten und dem fünften Schalter verbunden ist.

46. Wandlerzelle mit mindestens 3 Niveaus, umfassend:

(aaa) einen Induktor mit einem ersten Anschluss und einem zweiten Anschluss,
 (bbb) einen ersten Schalter, der mit dem ersten Anschluss des Induktors verbunden ist,
 (ccc) einen zweiten Schalter, der mit dem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,
 (ddd) einen dritten Schalter, der mit dem ersten Anschluss des Induktors verbunden ist,
 (eee) einen vierten Schalter, der mit dem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,
 (fff) einen fünften Schalter, der mit einem von dem ersten, zweiten, dritten oder vierten Schalter verbunden ist,
 (ggg) einen sechsten Schalter, der mit einem von dem ersten, zweiten, dritten oder vierten Schalter verbunden ist, wobei der fünfte und der sechste Schalter nicht mit denselben der ersten, zweiten, dritten und vierten Schalter gekoppelt sind, und
 (hhh) einen ersten Kondensator, der von einem Knotenpunkt zwischen dem fünften Schalter und seinem gekoppelten ersten, zweiten, dritten oder vierten Schalter mit einem Knotenpunkt zwischen dem sechsten Schalter und seinem gekoppelten ersten, zweiten, dritten oder vierten Schalter verbunden ist.

47. Stromwandler, umfassend:

(iii) eine M-Niveau-Wandlerzelle, die durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle gemäß dem Verfahren nach Anspruch 31 hergestellt ist, wobei die M-Niveau-Wandlerzelle dazu konfiguriert ist, eine Eingangsspannung zu empfangen und die empfangene Eingangsspannung in eine Ausgangsspannung zu wandeln,
 (jjj) einen Spannungsregler, der mit der M-Niveau-Wandlerzelle gekoppelt und dazu konfiguriert ist, ein Signal zu erzeugen, das die Ausgangsspannung der M-Niveau-Wandlerzelle anzuzeigen,
 (kkk) eine M-Niveau-Steuerung, die mit dem Spannungsregler und der M-Niveau-Wandlerzelle gekoppelt ist und dazu konfiguriert ist, einen Satz von Schaltzuständen innerhalb der M-Niveau-Wandlerzelle auszuwählen, die eine gewünschte Ausgangsspannung für die M-Niveau-Wandlerzelle in Reaktion auf das vom Spannungsregler erzeugte Signal erzeugen.

48. Stromwandler nach Anspruch 47, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine nicht isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

49. Stromwandler nach Anspruch 47, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

50. Stromwandler nach Anspruch 47, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder eine 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle oder eine 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle ist.

51. Stromwandler nach Anspruch 47, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle ist.

52. Stromwandler nach Anspruch 47, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle ist.

53. Stromwandler nach Anspruch 47, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle umfasst:

(III) einen ersten Schalter, der mit einem ersten Anschluss eines Induktors verbunden ist,
 (mmm) einen zweiten Schalter, der mit einem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,
 (nnn) einen dritten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem ersten Schalter und dem Induktor verbunden ist, und

(ooo) einen vierten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem Induktor und dem zweiten Schalter verbunden ist.

54. Stromwandler nach Anspruch 47, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine der in **Fig.** 12A, 12B, 12C, 13B, 15B, 18 oder 19-33 gezeigten Schaltungen ist.

55. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen, die in einer mehrphasigen Konfiguration parallel geschaltet sind, in der mindestens zwei ausgewählte M-Niveau-Wandlerzellen mit differentiellen Taktphasen betrieben werden, wobei jede der M-Niveau-Wandlerzellen dazu konfiguriert ist, eine Eingangsspannung zu empfangen und die empfangene Eingangsspannung in eine Ausgangsspannung umzuwandeln, und wobei die mindestens zwei ausgewählten M-Niveau-Wandlerzellen durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle gemäß dem Verfahren von Anspruch 31 hergestellt sind.

56. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 55, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine nicht-isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

57. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 55, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

58. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 55, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder eine 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle oder eine 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle ist.

59. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 55, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle ist.

60. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 55, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle ist.

61. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 55, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle umfasst:

(ppp) einen ersten Schalter, der mit einem ersten Anschluss eines Induktors verbunden ist,

(qqq) einen zweiten Schalter, der mit einem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,

(rrr) einen dritten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem ersten Schalter und dem Induktor verbunden ist, und

(sss) einen vierten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem Induktor und dem zweiten Schalter verbunden ist.

62. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 55, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine der in **Fig.** 12A, 12B, 12C, 13B, 15B, 18 oder 19-33 dargestellten Schaltungen ist.

63. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen, die in einer Konfiguration parallel geschaltet sind, in der mindestens zwei ausgewählte M-Niveau-Wandlerzellen über Induktoren, die mit jeweiligen M-Niveau-Wandlerzellen verbunden sind, magnetisch gekoppelt sind, wobei jede der M-Niveau-Wandlerzellen dazu konfiguriert ist, eine Eingangsspannung zu empfangen und die empfangene Eingangsspannung in eine Ausgangsspannung umzuwandeln, und wobei die mindestens zwei ausgewählten M-Niveau-Wandlerzellen durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle gemäß dem Verfahren nach Anspruch 31 hergestellt sind.

64. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 63, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine nicht-isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

65. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 63, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

66. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 63, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder eine 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle oder eine 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle ist.

67. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 63, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle ist.

68. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 63, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle ist.

69. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 63, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle umfasst:

(ttt) einen ersten Schalter, der mit einem ersten Anschluss eines Induktors verbunden ist,

(uuu) einen zweiten Schalter, der mit einem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,

(vvv) einen dritten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem ersten Schalter und dem Induktor verbunden ist, und

(www) einen vierten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem Induktor und dem zweiten Schalter verbunden ist.

70. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 63, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine der in **Fig. 12A, 12B, 12C, 13B, 15B, 18 oder 19-33** dargestellten Schaltungen ist.

71. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen, die in einer mehrphasigen Koppelinduktor-Konfiguration parallel geschaltet sind, bei der mindestens erste zwei ausgewählte M-Niveau-Wandlerzellen über Induktoren, die mit jeweiligen M-Niveau-Wandlerzellen verbunden sind, magnetisch gekoppelt sind, und bei der mindestens zweite zwei ausgewählte M-Niveau-Wandlerzellen mit unterschiedlichen Taktphasen betrieben werden, wobei jede der M-Niveau-Wandlerzellen dazu konfiguriert ist, eine Eingangsspannung zu empfangen und die empfangene Eingangsspannung in eine Ausgangsspannung umzuwandeln, und wobei die mindestens zwei ausgewählten M-Niveau-Wandlerzellen durch Modifizieren einer 2-Niveau-Wandlerzelle gemäß dem Verfahren von Anspruch 31 hergestellt sind.

72. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 71, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine nicht-isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

73. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 71, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine isolierte 2-Niveau-Cuk-Wandlerzelle ist.

74. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 71, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle entweder eine 2-Niveau-SEPIC-Wandlerzelle oder eine 2-Niveau-Zeta-Wandlerzelle ist.

75. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 71, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Flyback-Wandlerzelle ist.

76. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 71, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine 2-Niveau-Vorwärtswandlerzelle ist.

77. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 71, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle umfasst:

(xxx) einen ersten Schalter, der mit einem ersten Anschluss eines Induktors verbunden ist,

(yyy) einen zweiten Schalter, der mit einem zweiten Anschluss des Induktors verbunden ist,

(zzz) einen dritten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem ersten Schalter und dem Induktor verbunden ist, und

(aaaa) einen vierten Schalter, der mit einem Knotenpunkt zwischen dem Induktor und dem zweiten Schalter verbunden ist.

78. Mehrzahl von M-Niveau-Wandlerzellen nach Anspruch 71, wobei die 2-Niveau-Wandlerzelle eine der in **Fig. 12A, 12B, 12C, 13B, 15B, 18 oder 19-33** dargestellten Schaltungen ist.

Es folgen 25 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

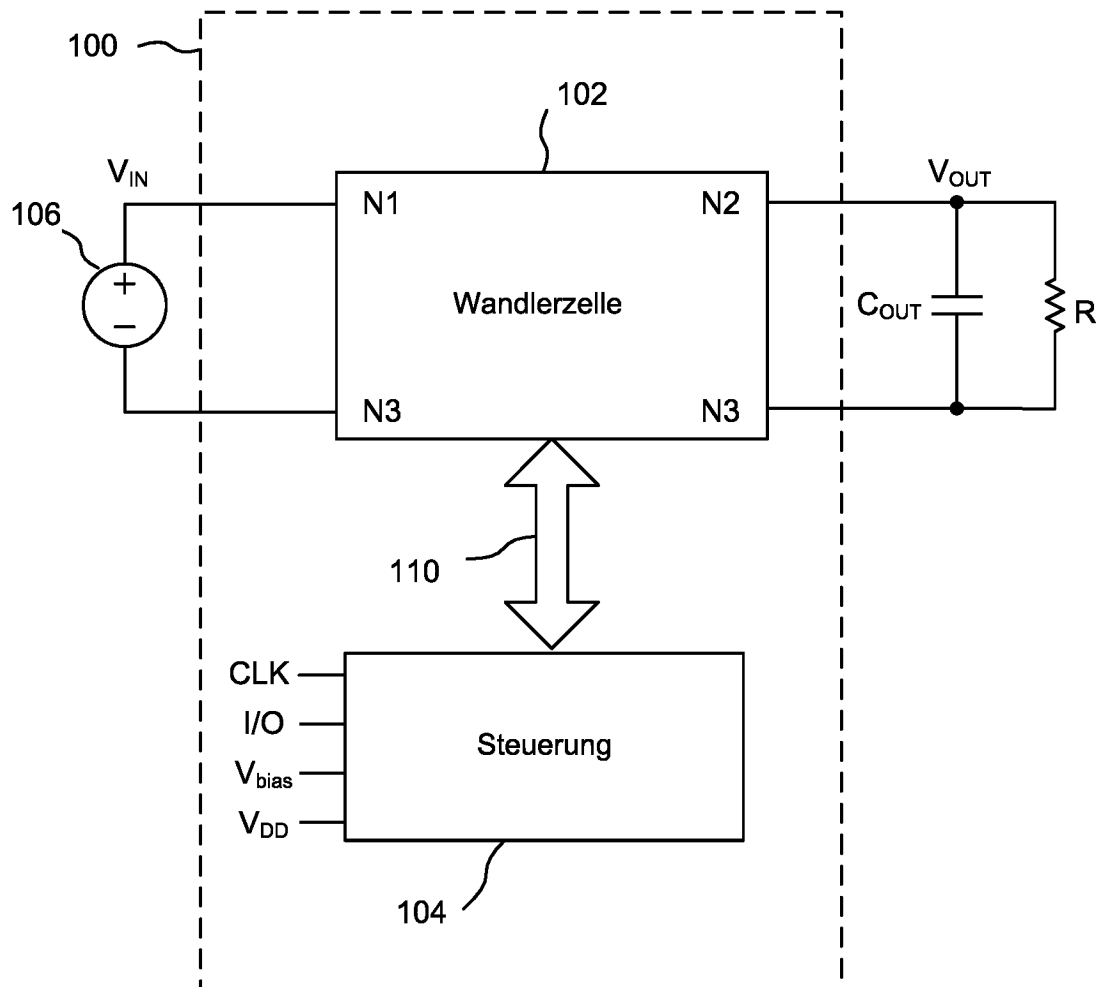


FIG. 1
(Stand der Technik)

200

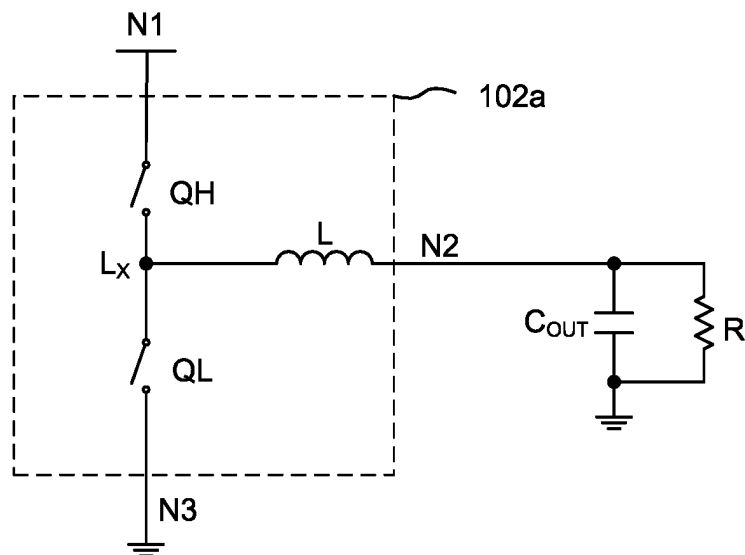


FIG. 2A
(Stand der Technik)

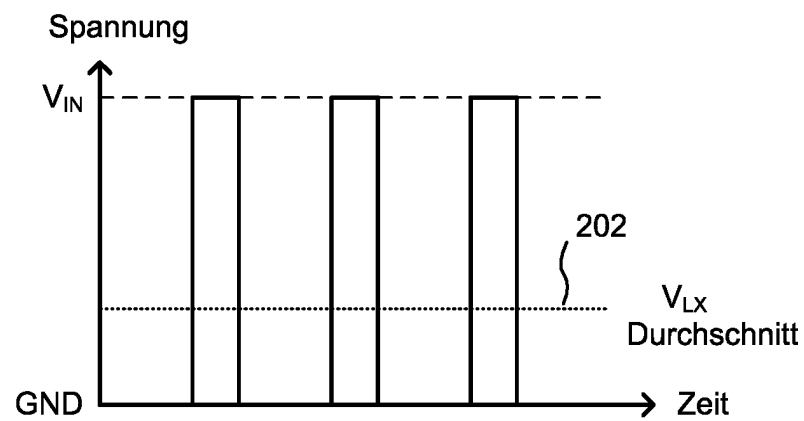


FIG. 2B
(Stand der Technik)

300

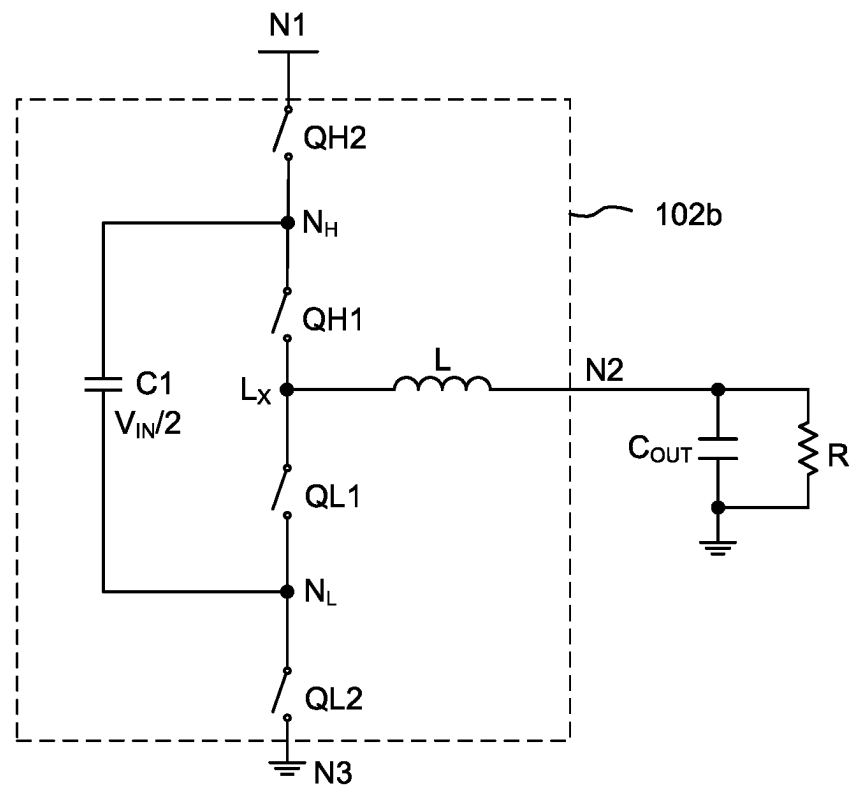


FIG. 3A
(Stand der Technik)

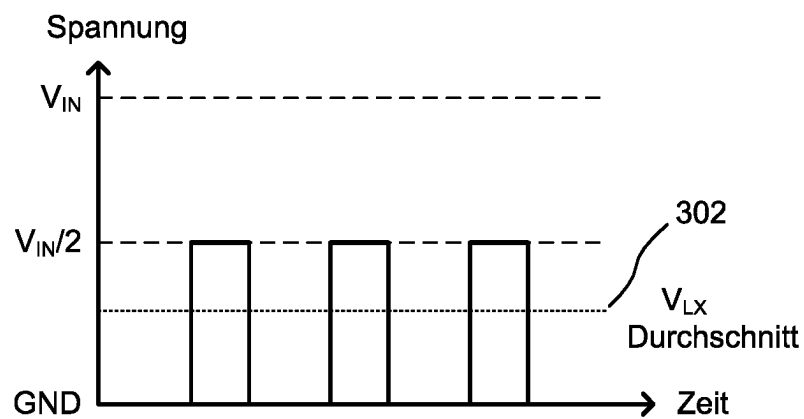


FIG. 3B
(Stand der Technik)

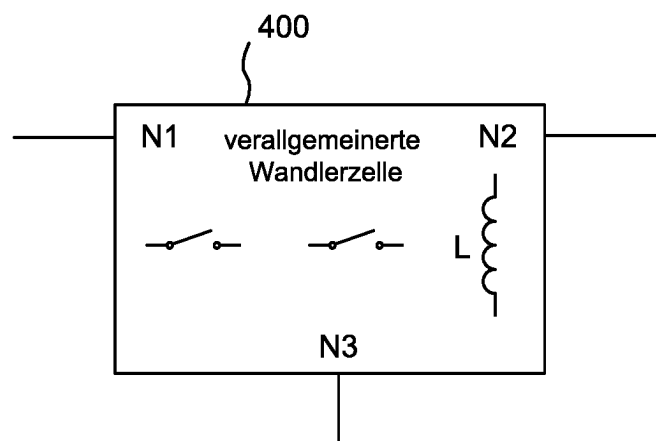


FIG. 4

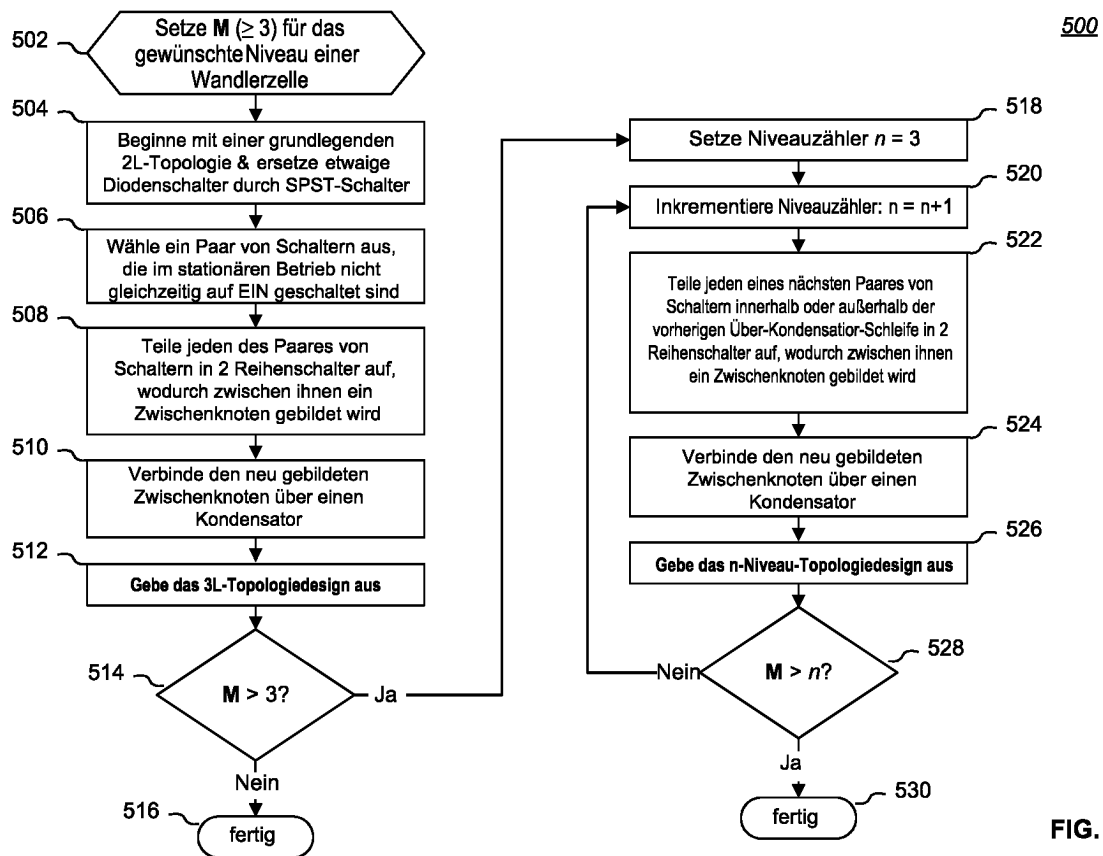


FIG. 5A

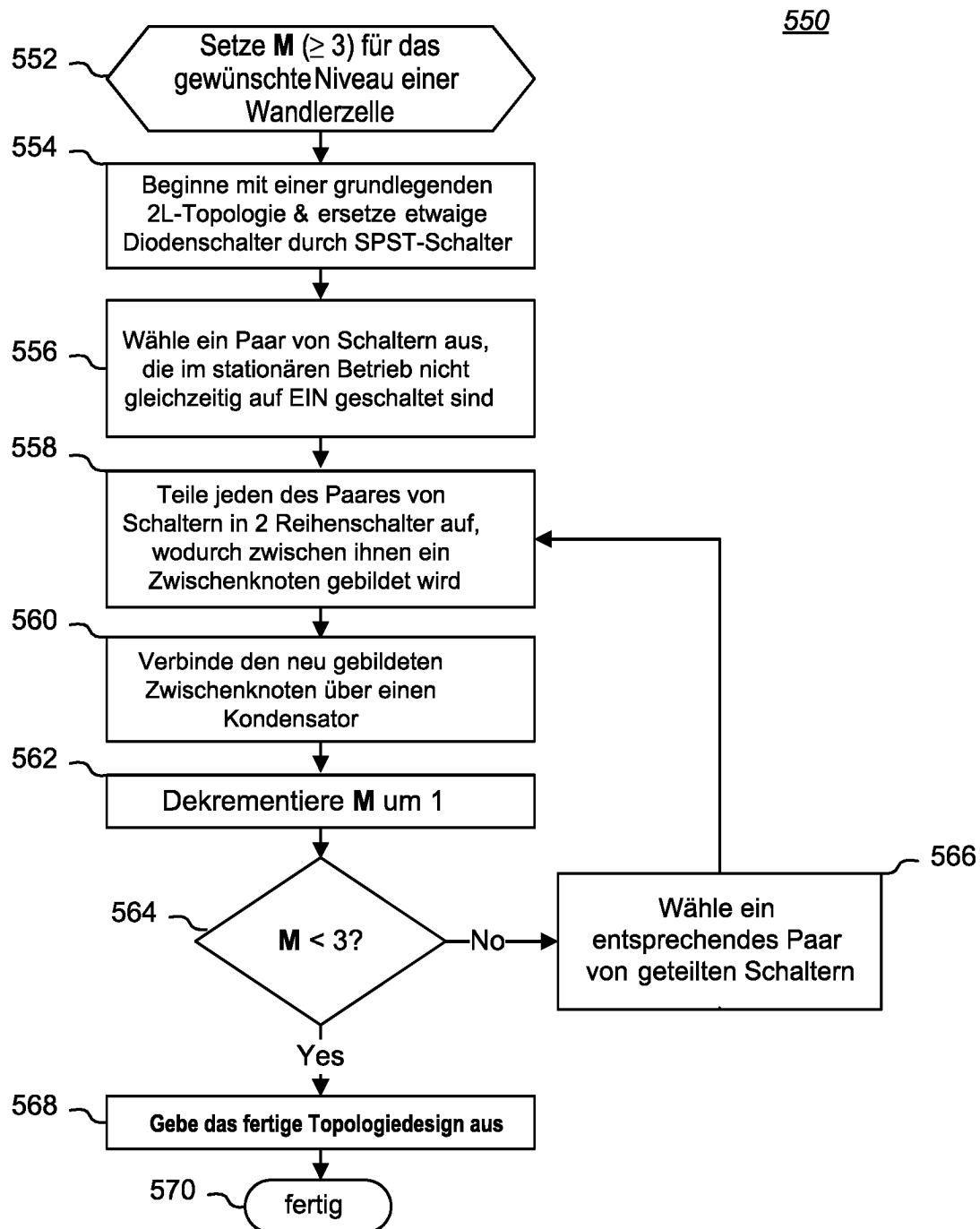
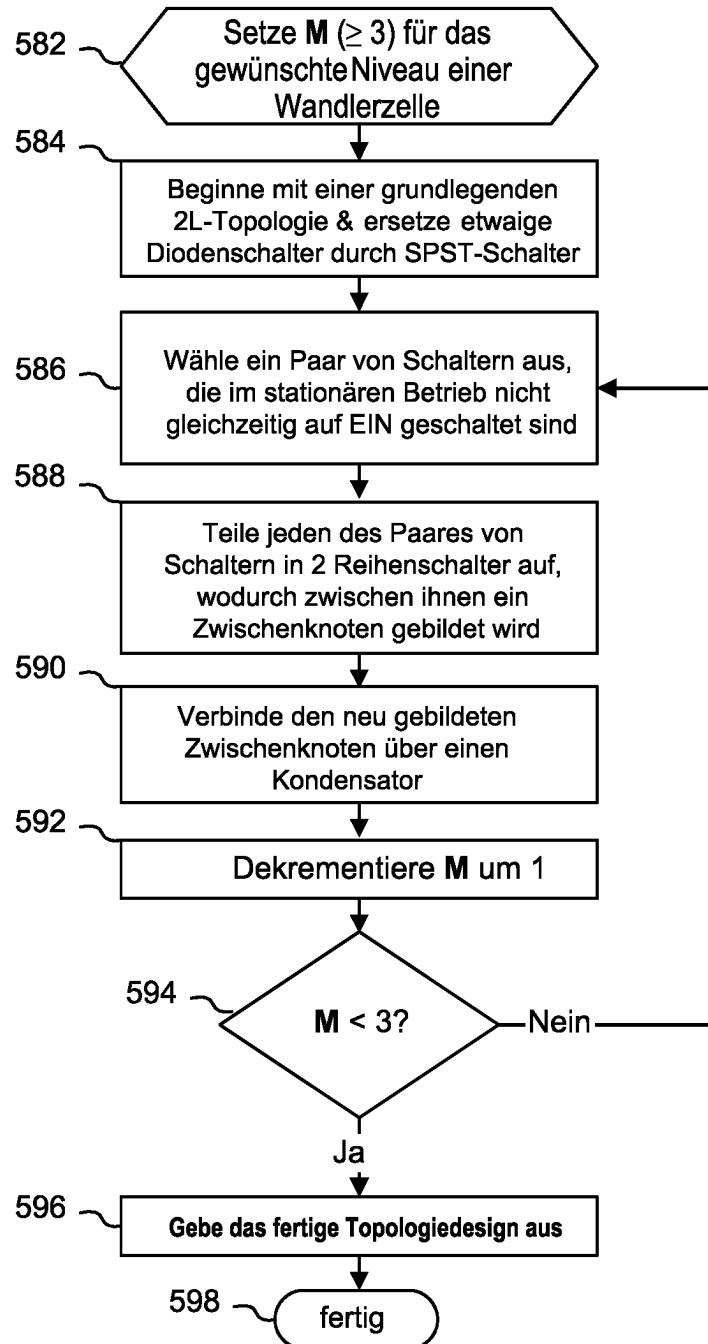


FIG. 5B

580**FIG. 5C**

600

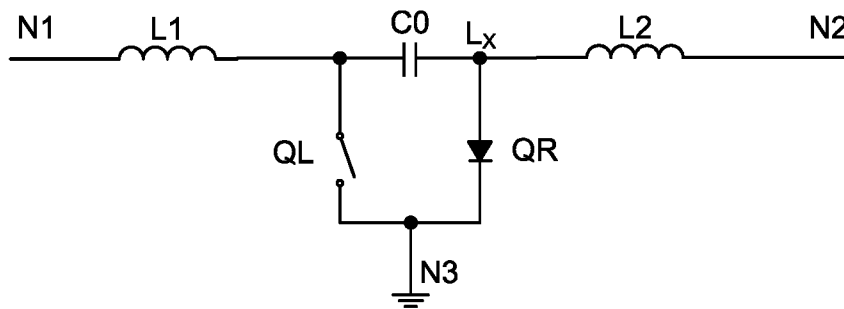


FIG. 6

Stand der Technik

700

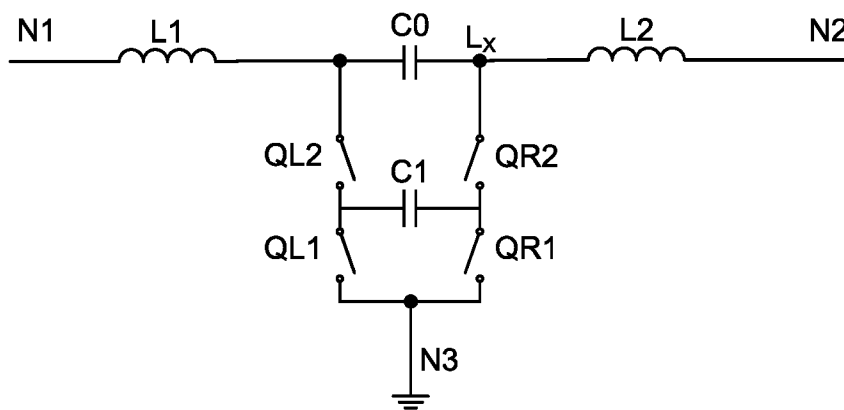


FIG. 7A

710

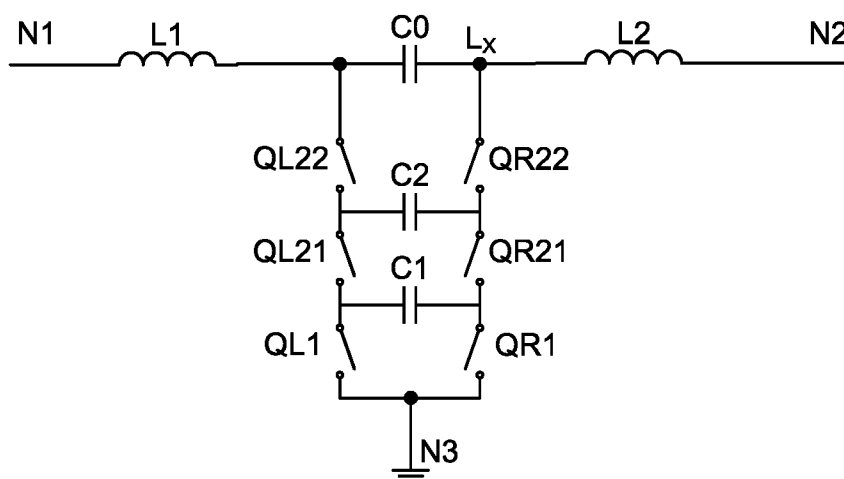


FIG. 7B

800

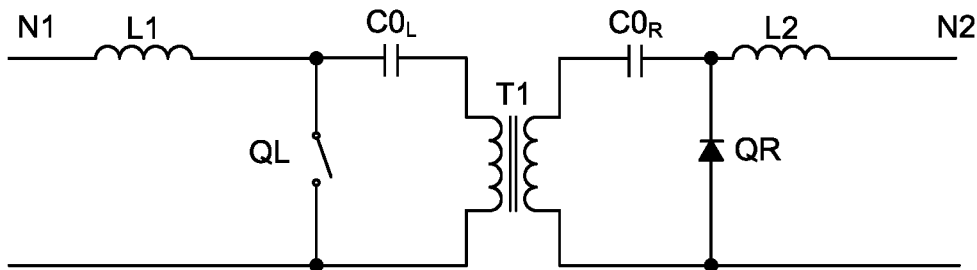


FIG. 8
(Stand der Technik)

900

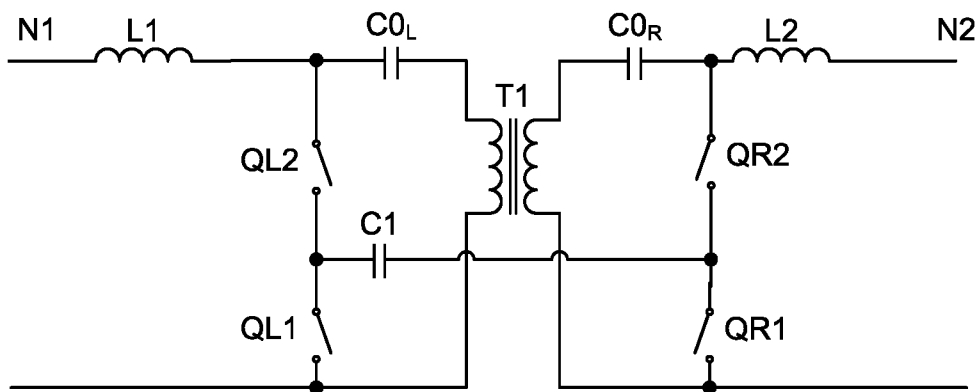


FIG. 9A

910

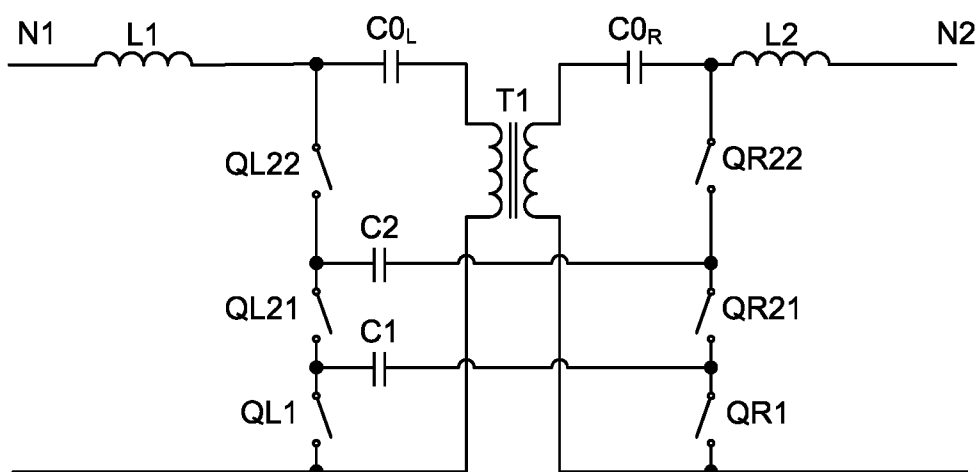


FIG. 9B

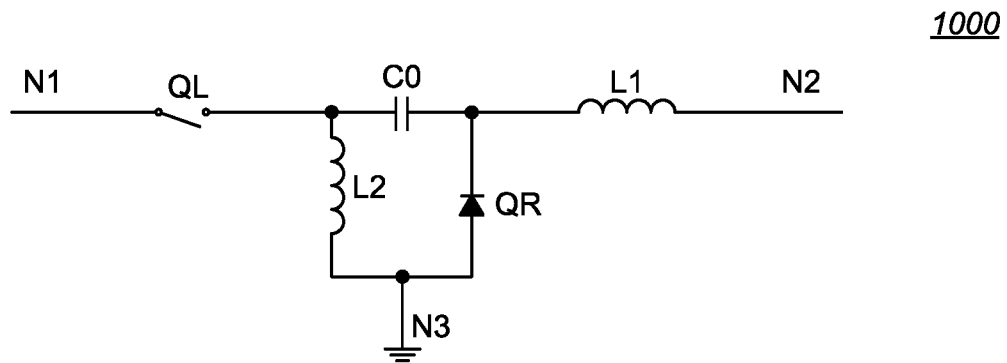


FIG. 10A
(Stand der Technik)

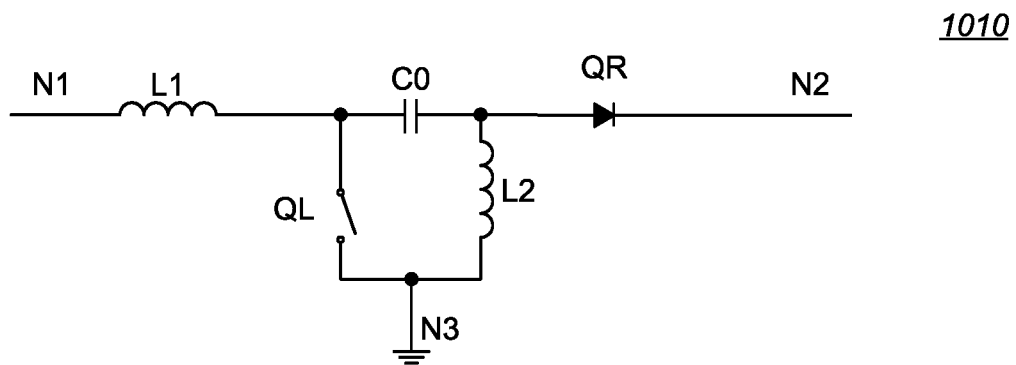


FIG. 10B
(Stand der Technik)

1100

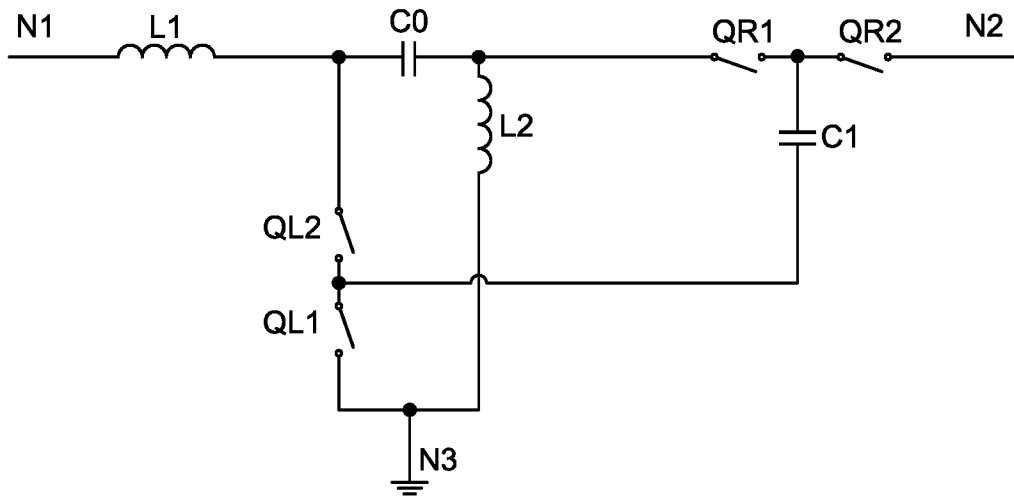


FIG. 11A

1110

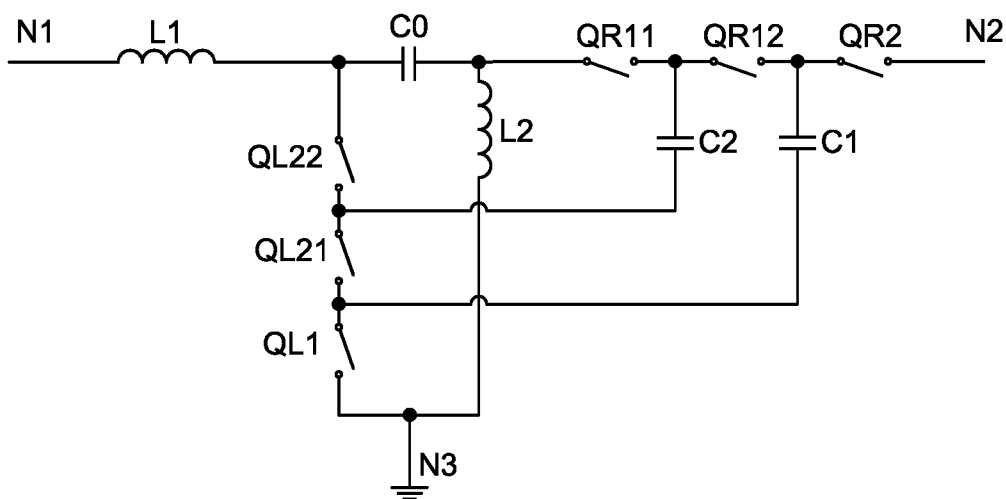


FIG. 11B

1200

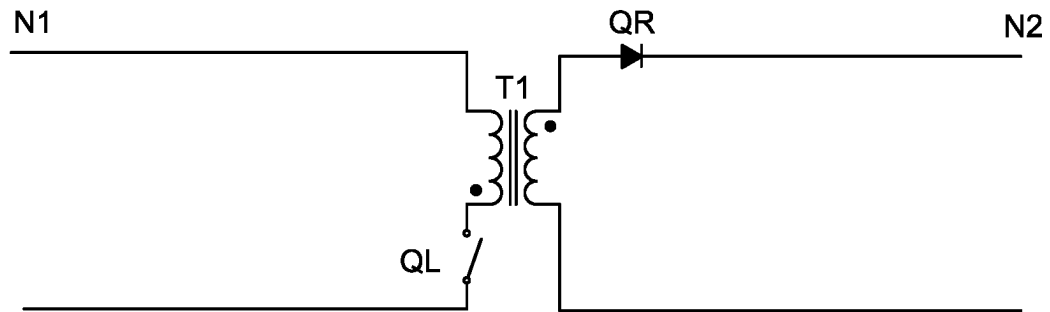


FIG. 12A
(Stand der Technik)

1220

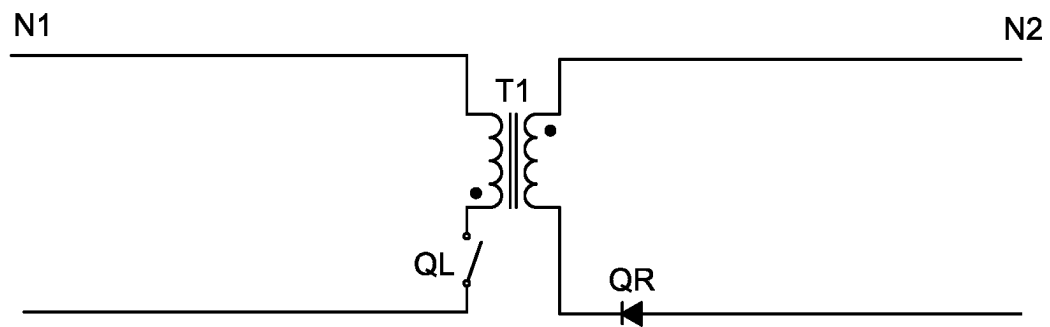


FIG. 12B
(Stand der Technik)

1240

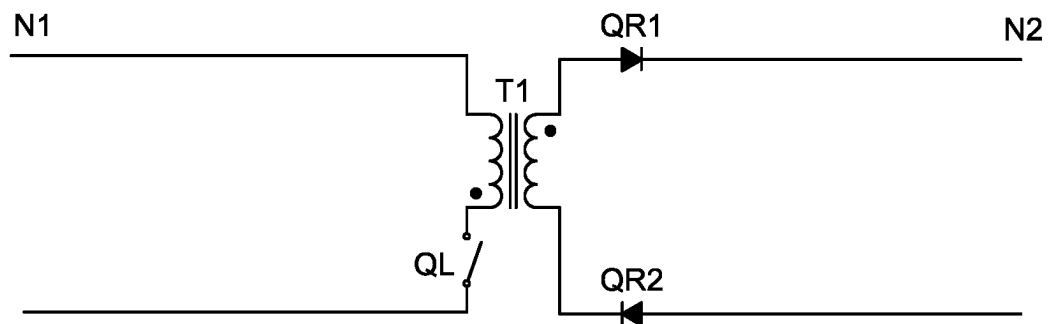


FIG. 12C

1300

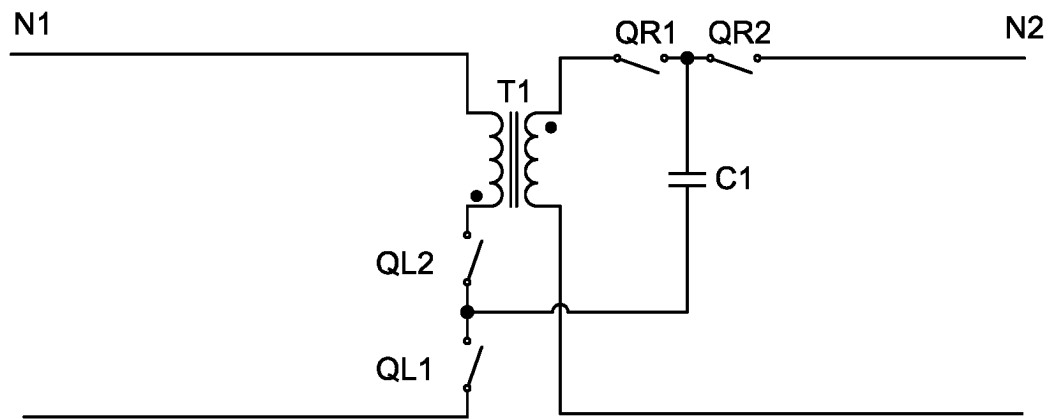


FIG. 13A

1320

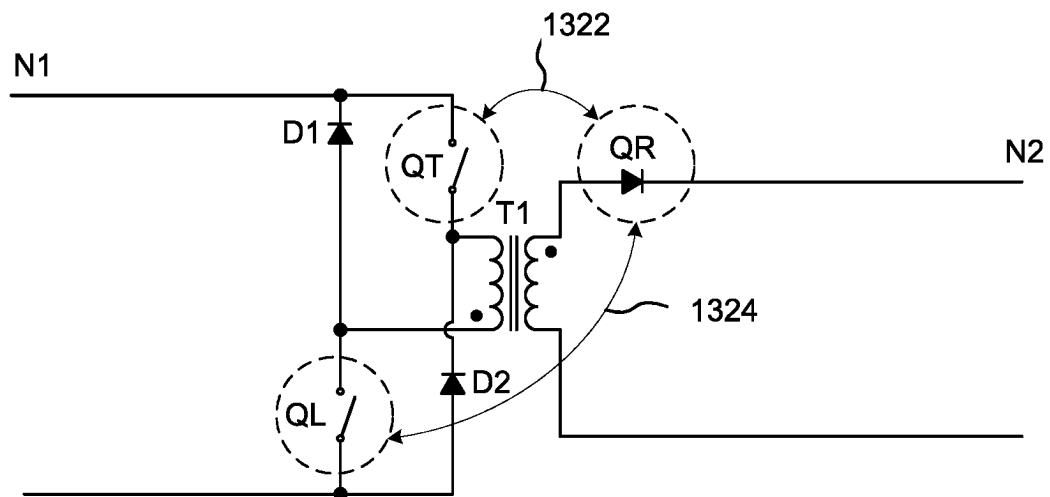


FIG. 13B

1340

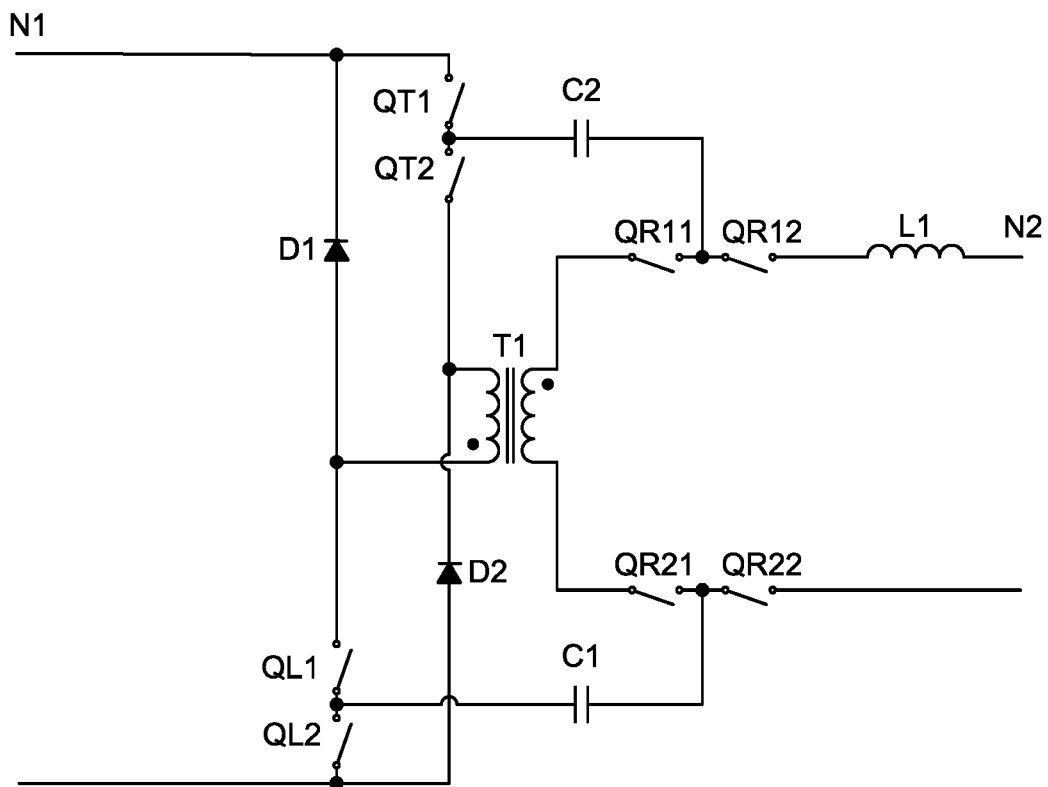


FIG. 13C

1400

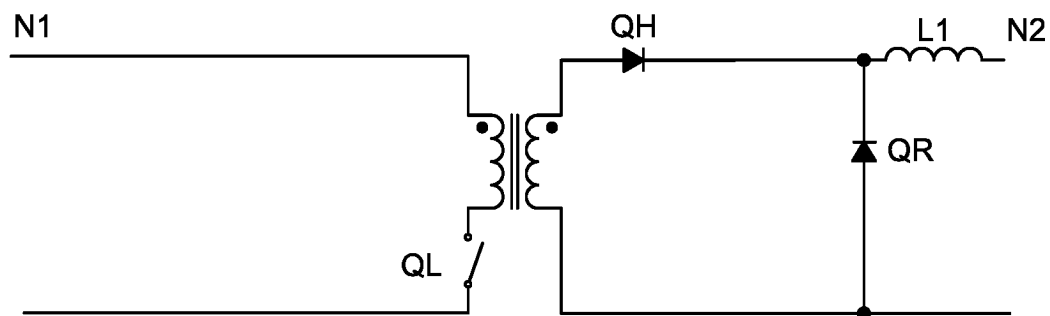


FIG. 14
(Stand der Technik)

1500

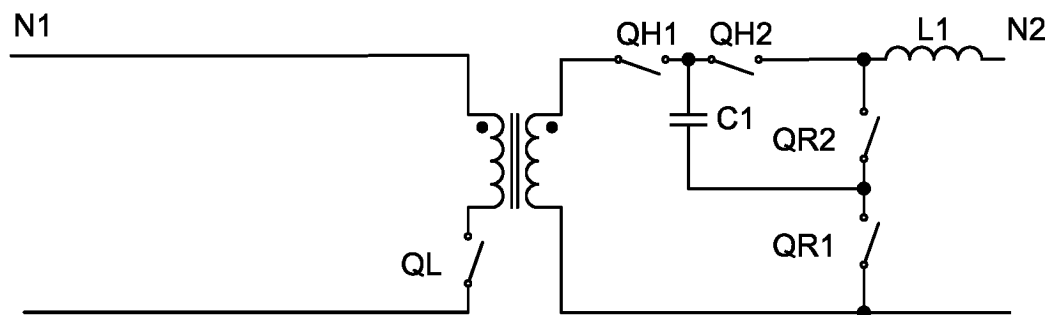


FIG. 15A

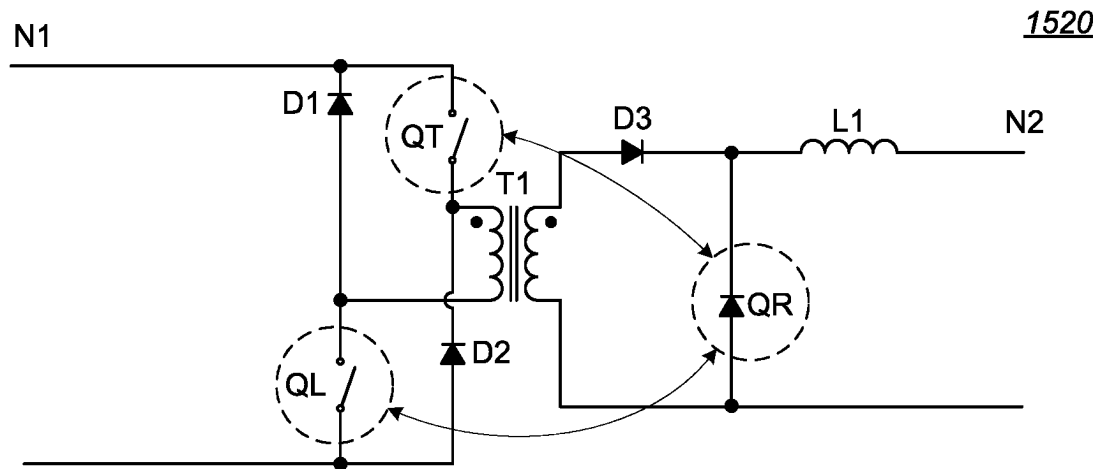


FIG. 15B

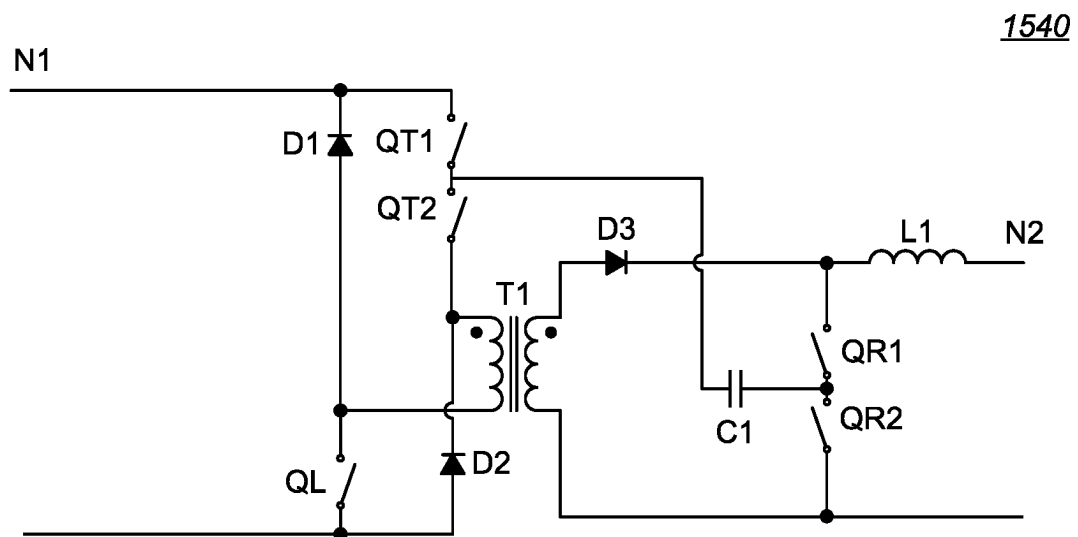


FIG. 15C

1600

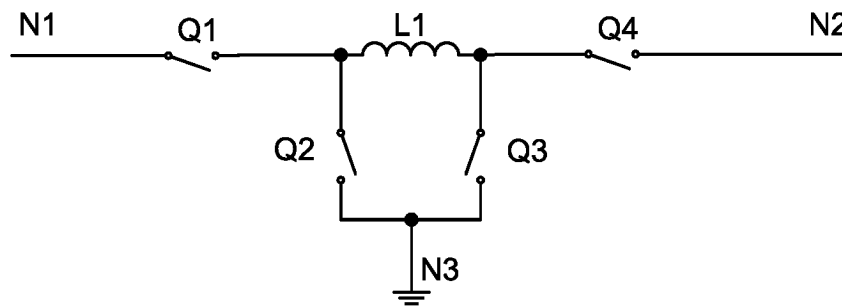


FIG. 16
(Stand der Technik)

1700

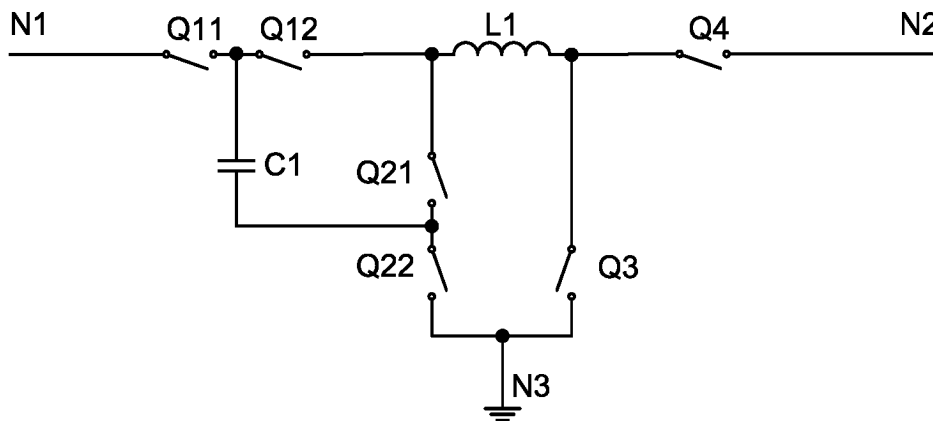


FIG. 17

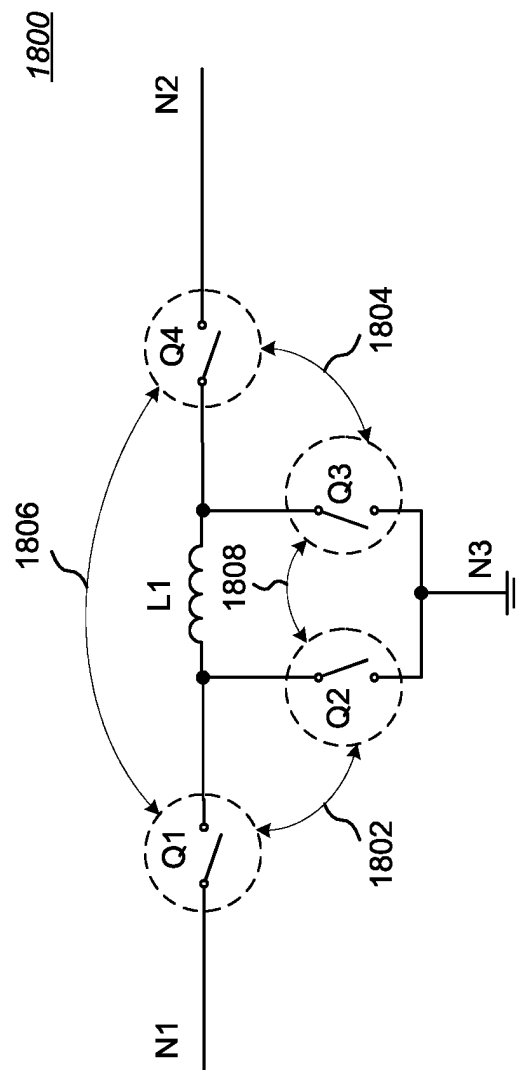


FIG. 18

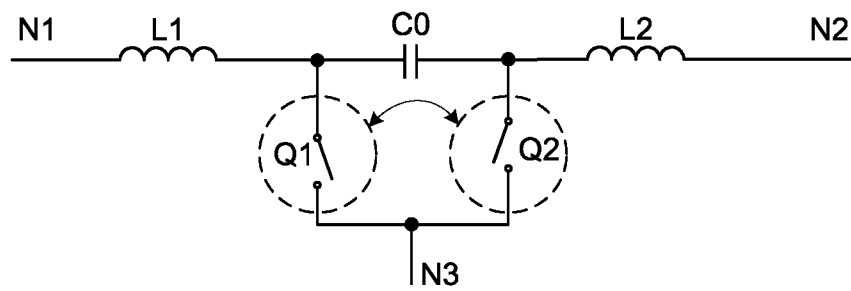


FIG. 19

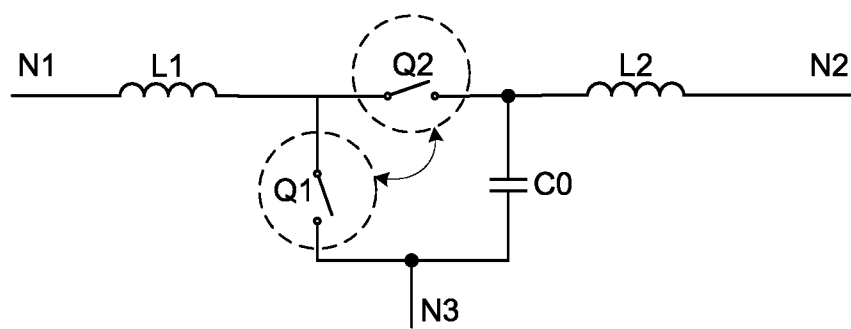


FIG. 20

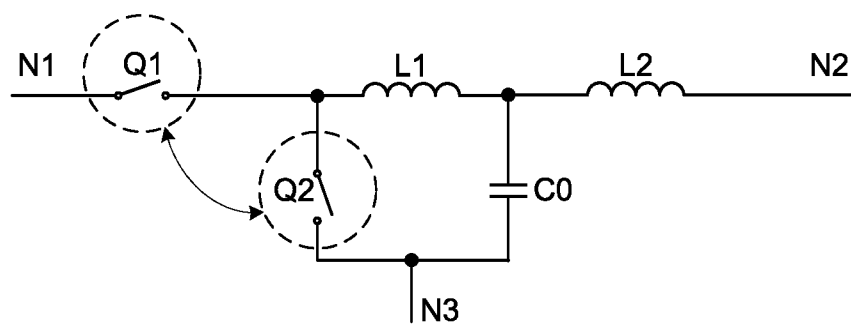


FIG. 21

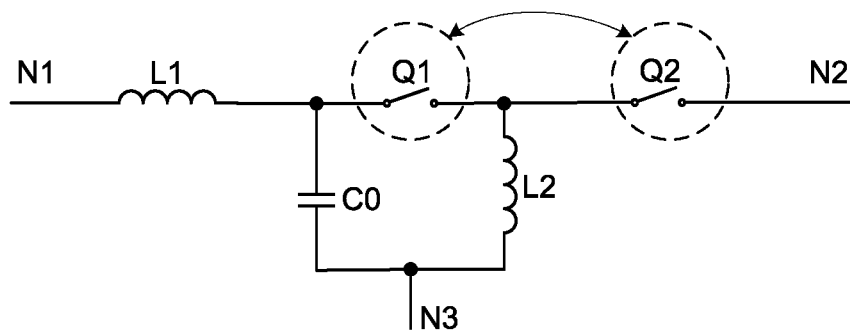


FIG. 22

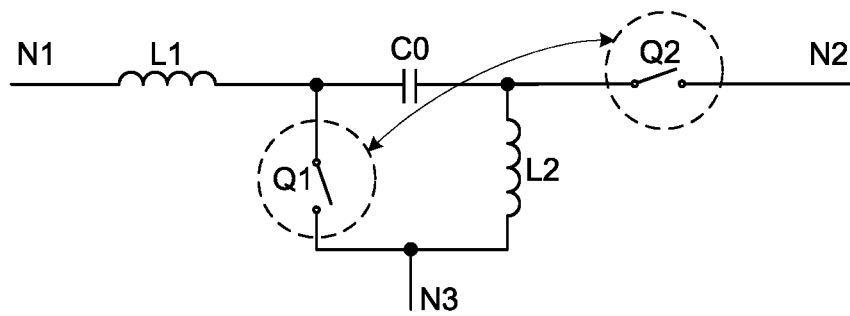


FIG. 23

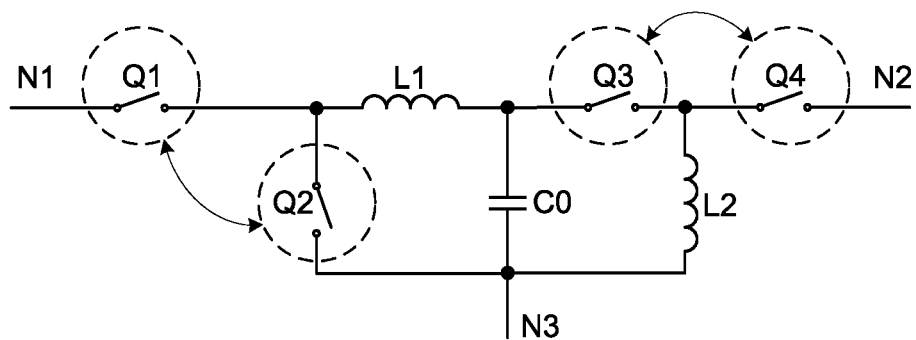


FIG. 24

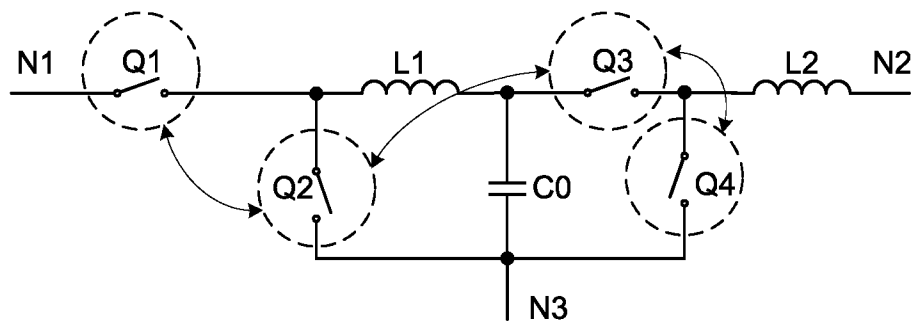


FIG. 25

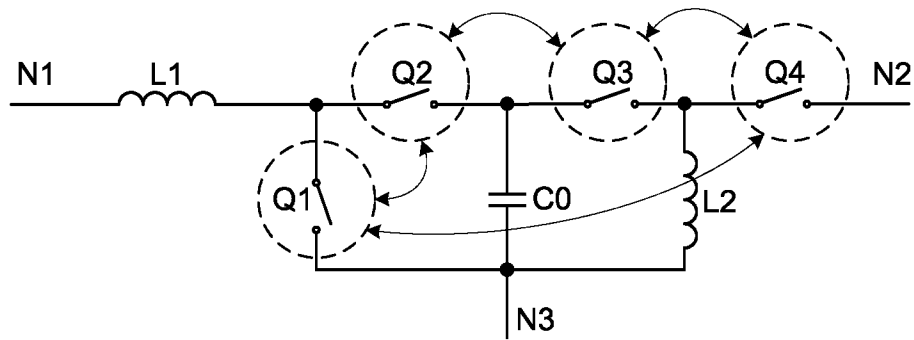


FIG. 26

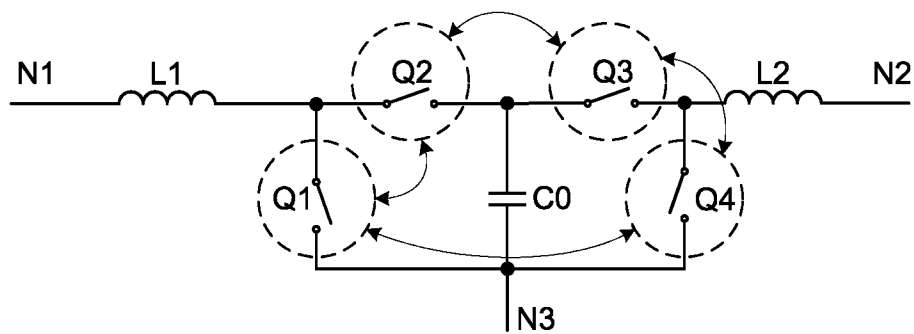


FIG. 27

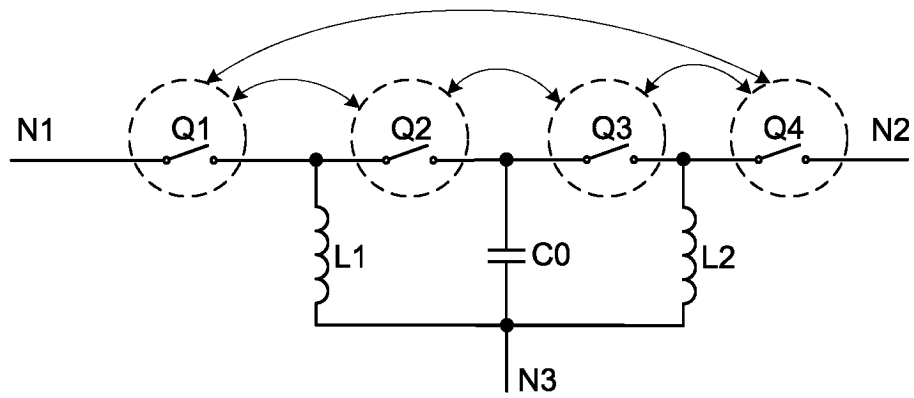


FIG. 28

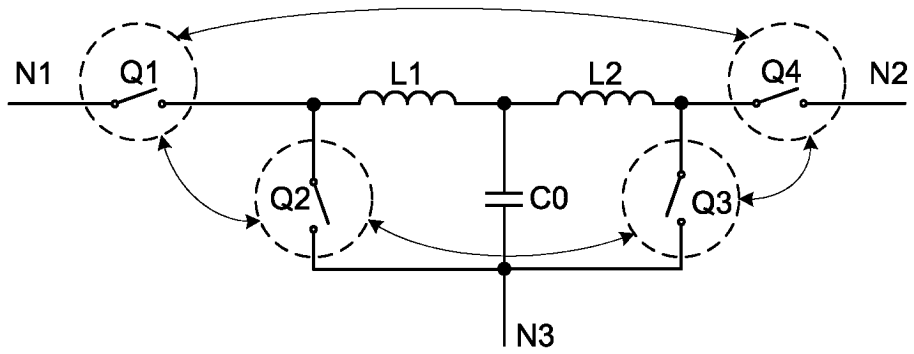


FIG. 29

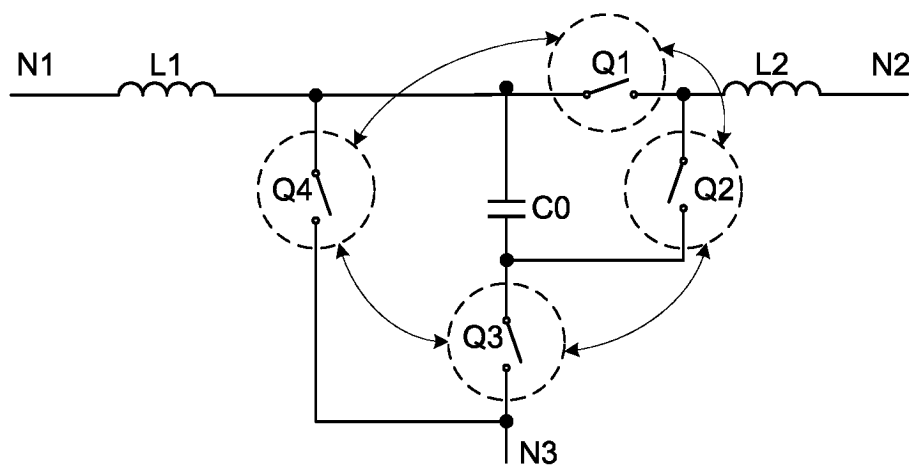


FIG. 30

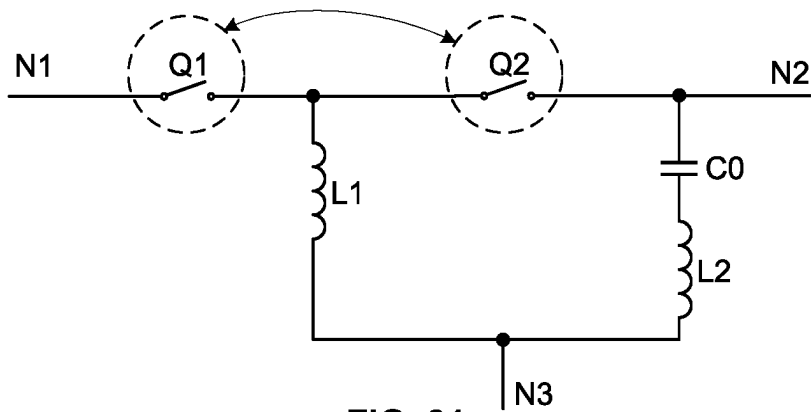


FIG. 31

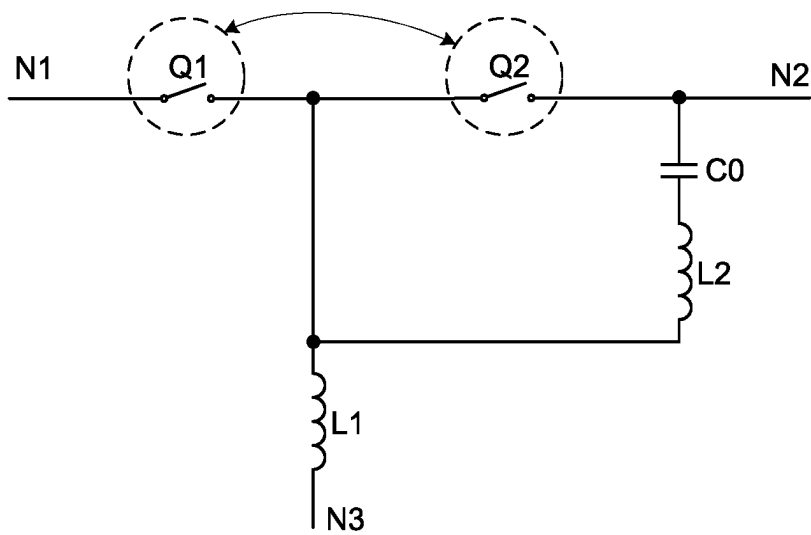


FIG. 32

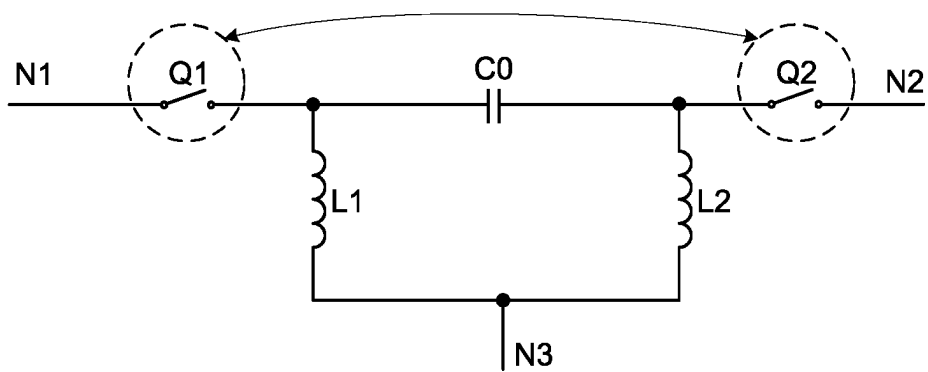


FIG. 33

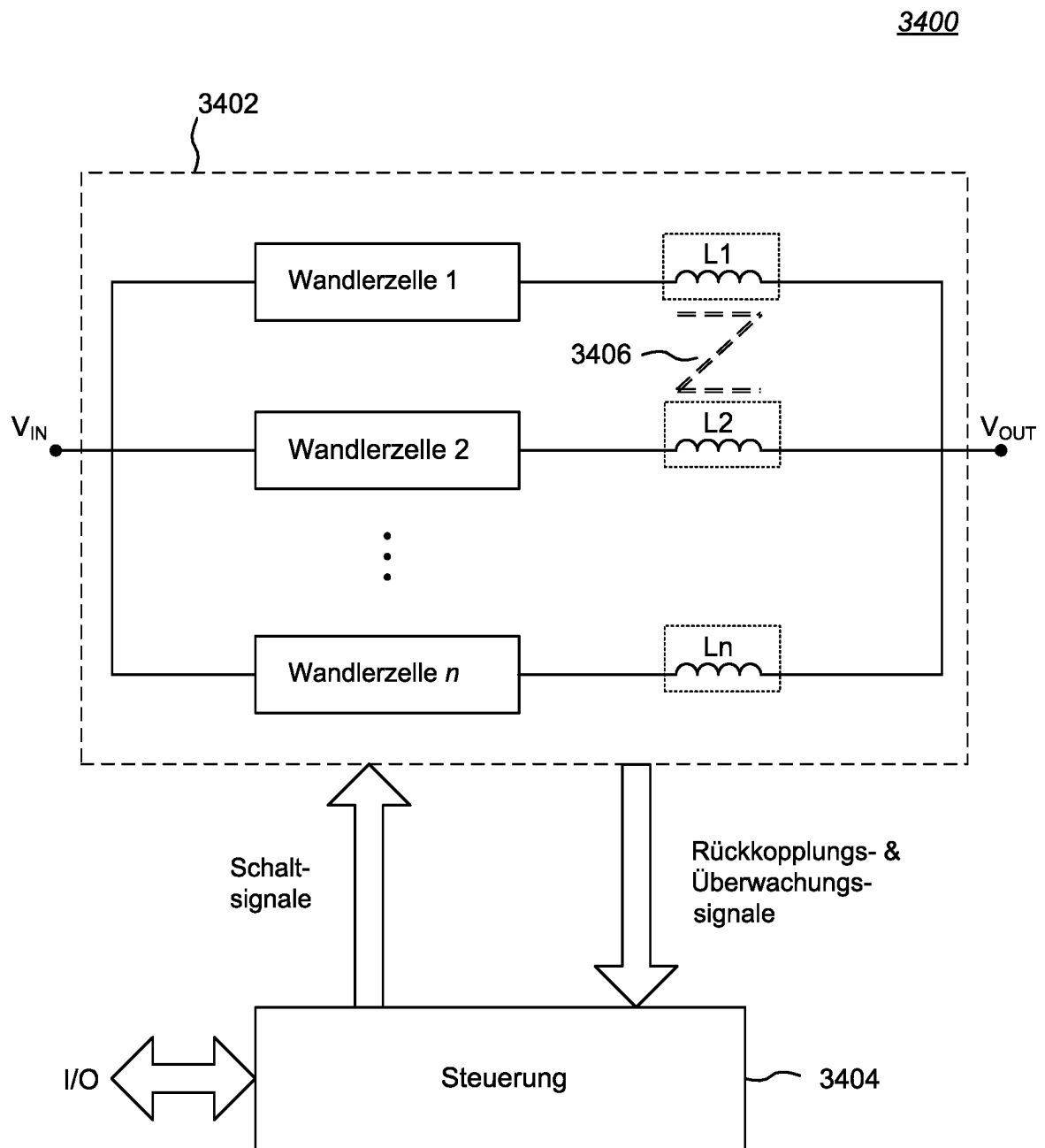
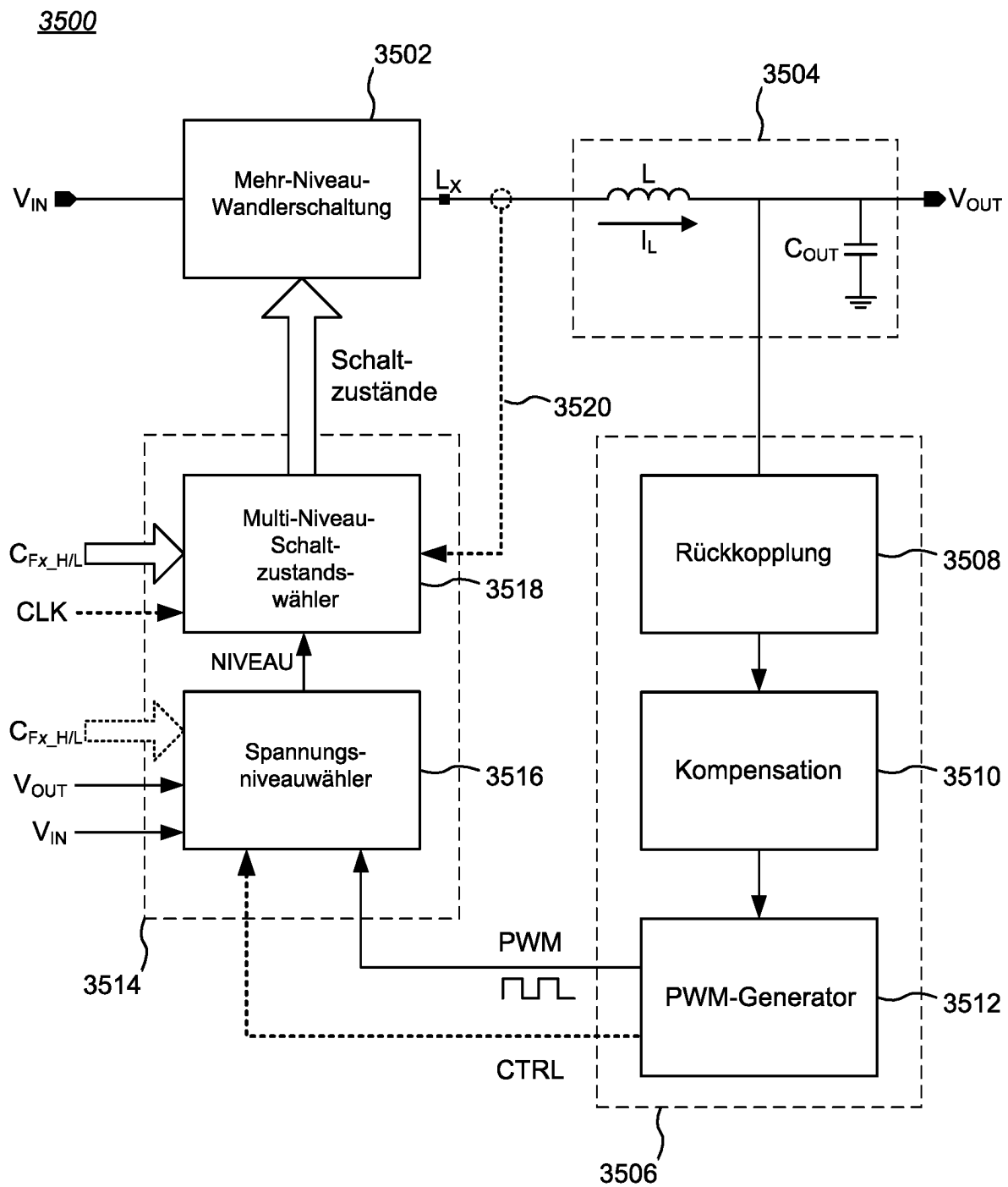


FIG. 34

**FIG. 35**