



(10) **DE 10 2020 201 810 A1** 2021.08.19

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 201 810.3**
 (22) Anmeldetag: **13.02.2020**
 (43) Offenlegungstag: **19.08.2021**

(51) Int Cl.: **H02M 7/538 (2007.01)**
H02M 7/5395 (2006.01)

(71) Anmelder:
Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München, DE

(72) Erfinder:
Döbler, Fabian, 91710 Gunzenhausen, DE;
Fromme, Christopher, 90763 Fürth, DE; Malane,
Dominic, 85072 Eichstätt, DE; Tannhäuser,
Marvin, 91353 Hausen, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

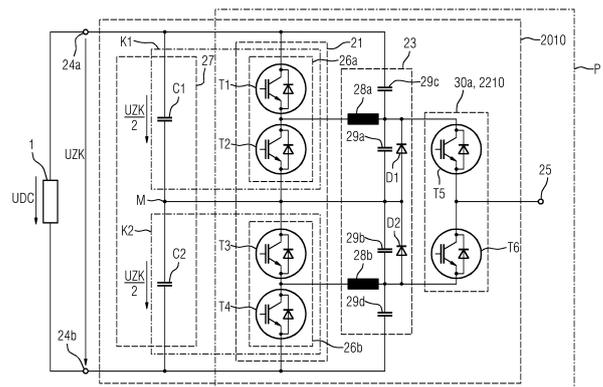
| | | |
|----|------------------|----|
| DE | 41 35 680 | A1 |
| DE | 10 2016 224 310 | A1 |
| DE | 10 2016 224 312 | A1 |
| US | 2019 / 0 013 743 | A1 |
| EP | 3 174 190 | A1 |
| WO | 2015/ 006 111 | A1 |

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Stromrichter-Schaltung**

(57) Zusammenfassung: Es wird eine Stromrichter-Schaltung für ein- oder mehrphasige Anwendungen mit nativ sinusförmigem Wechselspannungsausgang angegeben. Die Schaltung umfasst parallel zum geteilten Zwischenkreis einen oder mehrere zueinander parallele Arme mit jeweils einer ersten Schaltung, einer zweiten Schaltung und einer zwischen erste und zweite Schaltung geschalteten Filterschaltung, wobei die erste Schaltung zwei in Serie geschaltete erste Halbbrücken umfasst, die Filterschaltung eine Serienschaltung mit einer ersten Filter-Induktivität, wenigstens einem Filterkondensator und einer zweiten Filterinduktivität umfasst, die parallel zu den Mittelpunkten der beiden ersten Halbbrücken des jeweiligen Arms geschaltet ist und die zweite Schaltung eine oder zwei parallele zweite Halbbrücken aufweist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Schaltung für einen Stromrichter für ein- und dreiphasige Systeme.

[0002] Eine solche Schaltung kommt beispielsweise in einem Wechselrichter für die Verwendung in der Photovoltaik zum Einsatz. Andere Einsatzfelder für Stromrichter sind beispielsweise elektrische Maschinen, Generatoren, Elektrofahrzeuge, Hybridfahrzeuge, Fahrzeuge für den Schienenverkehr und auch Ladesäulen für Elektrofahrzeuge. Weiterhin werden Stromrichter in Energiespeicheranwendungen, beispielsweise im Umfeld erneuerbarer Energien verwendet oder bei Hilfsspannungsversorgungen und in Netzteilen.

[0003] Als Stromrichter wird hier eine Anordnung zur Umwandlung einer elektrischen Stromart in eine andere bezeichnet. Ein derartiger Stromrichter kommt bevorzugt bei der Zusammenschaltung eines Gleichspannungssystems, beispielsweise mit einer Gleichspannung von 450 V, mit einem dreiphasigen Wechselspannungssystem, beispielsweise mit einer Sternspannung von 230 V, zum Einsatz, wobei je nach Leistungsflussrichtung der Stromrichter als Wechselrichter oder als Gleichrichter betrieben wird. Ein Wechselrichter ist ein elektrisches Gerät, welches Gleichspannung in Wechselspannung konvertiert. Ein Gleichrichter ist ein elektrisches Gerät, welches Wechselspannung in Gleichspannung konvertiert. Der Stromrichter kann hier sowohl als Gleichrichter als auch als Wechselrichter verwendet werden. Das dreiphasige Wechselspannungssystem umfasst drei einzelne Wechselspannungen mit vom Prinzip her gleicher Frequenz und Amplitude, die gegeneinander phasenverschoben sind um 120° bzw. 240°.

[0004] Aus der EP 2 136 465 A1 ist ein einphasiger Wechselrichter zur Einspeisung einer Leistung einer Gleichspannungsquelle, insbesondere eines Photovoltaikgenerators, in ein Wechselspannungsnetz mit einer asymmetrisch getakteten Brückenschaltung mit mindestens zwei mit Netzfrequenz getakteten ersten Schaltern und mit mindestens zwei mit einer höheren Taktfrequenz getakteten zweiten Schaltern bekannt.

[0005] In der WO 2016/146171 A1 wird eine Stromrichter-Schaltung für einphasige Systeme vorgeschlagen, welche einen 3-Punkt-Stromrichter und einen nachgeschalteten 2-Punkt-Stromrichter aufweist.

[0006] Aus der EP 2 306 629 A1 ist eine 5-Punkt-Stromrichter-Schaltung für dreiphasige Systeme bekannt, die drei Halbbrücken sowie einen AC-Schalter kombiniert.

[0007] Aus der DE 10 2012 020036 A1 ist eine Stromrichter-Schaltung mit zwei funktional gekoppelten Wechselschaltern und einer Kommutierungszelle bekannt.

[0008] Aus der DE 10 2016 224312 A1 und der DE 10 2016 224310 A1 sind Stromrichter-Schaltungen bekannt mit einem geteilten Zwischenkreis mit einer Serienschaltung von zwei Kondensatoren, zwischen denen ein Zwischenkreismittelpunkt gebildet ist, parallel zum Zwischenkreis einen oder mehrere zueinander parallele Arme mit jeweils einer ersten, zweiten und Filterschaltung, wobei die erste Schaltung zwei in Serie geschaltete erste Halbbrücken umfasst, deren Verbindungspunkt mit dem Zwischenkreismittelpunkt verbunden ist, die Filterschaltung eine Serienschaltung mit einer ersten Filter-Induktivität, wenigstens einem Filterkondensator und einer zweiten Filterinduktivität umfasst, die parallel zu den Mittelpunkten der beiden ersten Halbbrücken des jeweiligen Arms geschaltet ist, die zweite Schaltung jedes Arms eine oder zwei parallele zweite Halbbrücken aufweist, deren Mittelpunkte Wechselspannungsausgänge bilden und die äußeren Potentialpunkte der zweiten Halbbrücken parallel zum Filterkondensator geschaltet sind.

[0009] Nachteilig an den bekannten Schaltungen ist, dass es bei bestimmten Arbeitspunkten, nämlich nahe der Schaltvorgänge der zweiten Halbbrücken zu erhöhten Störungen des Ausgangsstroms kommt.

[0010] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Stromrichter-Schaltung anzugeben, bei der der genannte Nachteil vermindert oder behoben ist. Diese Aufgabe wird durch eine Stromrichter-Schaltung mit den Merkmalen von Anspruch 1 gelöst.

[0011] Die erfindungsgemäße Stromrichter-Schaltung umfasst einen geteilten Zwischenkreis mit einer Serienschaltung von zwei Kondensatoren, zwischen denen ein Zwischenkreismittelpunkt gebildet ist. Parallel zum Zwischenkreis weist die Stromrichter-Schaltung einen Arm oder mehrere zueinander parallele Arme auf, wobei die Arme jeweils eine erste Schaltung, eine zweite Schaltung und eine Filterschaltung umfassen.

[0012] Die erste Schaltung umfasst zwei in Serie geschaltete erste Halbbrücken, deren Verbindungspunkt mit dem Zwischenkreismittelpunkt verbunden ist. Die Filterschaltung umfasst eine Serienschaltung mit einer ersten Filter-Induktivität, wenigstens einem Filterkondensator und einer zweiten Filterinduktivität, die parallel zu den Mittelpunkten der beiden ersten Halbbrücken des jeweiligen Arms geschaltet ist. Die zweite Schaltung jedes Arms weist eine zweite Halbbrücke oder zwei parallele zweite Halbbrücken auf, deren Mittelpunkte Wechselspannungsausgänge bilden, wobei die äußeren Potentialpunkte der zweiten

Halbbrücken parallel zum Filterkondensator geschaltet sind.

[0013] Schließlich umfasst die Stromrichter-Schaltung eine parallel zu den Filterkondensatoren geschaltete Serienschaltung zweier Halbleiterbauelemente.

[0014] Die Halbleiterbauelemente sind jeweils entweder eine Diode oder ein steuerbarer Halbleiterschalter. Im Falle der Diode ist die Schleusenspannung der Diode geringer als die Einsatzspannung des rückwärts leitenden Elements der Leistungshalbleiter der zweiten Halbbrücken. Sind diese Leistungshalbleiter MOSFETs, ist das rückwärts leitende Element die Bodydiode des MOSFETs. Sind diese Leistungshalbleiter IGBTs, haben diese in der Regel eine extra parallel geschaltete Diode; dann ist diese Diode das rückwärts leitende Element. Handelt es sich um GaN HEMTs, sind diese intrinsisch rückwärts leitfähig mit einem Spannungsabfall, der dann die Einsatzspannung für die Rückwärtsleitung darstellt.

[0015] Die Stromrichter-Schaltung und das Verfahren der Erfindung kommen vorzugsweise bei Netzanwendungen, beispielsweise Photovoltaik und Energiespeicher-Anwendungen sowie in Elektrofahrzeugen, Hybridfahrzeugen und Fahrzeugen für den Schienenverkehr zum Einsatz. Weitere Einsatzgebiete sind Hilfsspannungsversorgungen und Netzteile. Die Schaltung kann durch die erfindungsgemäße Schaltungstopologie bidirektional, das heißt je nach Leistungsfluss als Gleichrichter und/oder als Wechselrichter, betrieben werden.

[0016] Die Erfindung schafft eine Stromrichter-Schaltung mit einer nativ sinusförmigen Ausgangsspannung, die ohne Weiteres für eine Parallelschaltung mit weiteren, beispielsweise gleichartigen Stromrichter-Schaltungen geeignet ist. Dadurch ist der mit der Schaltung erreichbare Leistungsbereich - bei Beibehaltung der verwendeten Bauteile - deutlich erweitert.

[0017] Vorteilhaft sind bei der erfindungsgemäßen Stromrichter-Schaltung durch die Dioden oder steuerbaren Leistungshalbleiter spezielle Freilaufpfade geschaffen, die das eingangs genannte Problem von erhöhten Störungen des Ausgangsstroms an bestimmten Arbeitspunkten vermindern.

[0018] Dafür wurde erkannt, dass die Störungen des Ausgangsstroms bei der Umschaltung der Leistungshalbleiter der zweiten Halbbrücke auftreten. Die Störungen werden teilweise dadurch bewirkt, dass der Ausgangsstrom der Schaltung, der einen positiven oder negativen Wert wie beispielsweise 3 A hat, also nicht Null oder nahe Null ist, zum Zeitpunkt der Umschaltung von einer der Filterinduktivitäten zur anderen kommutiert werden muss. Die Abschaltung

des Stroms in einer der Filterinduktivitäten funktioniert nicht schlagartig. Stattdessen werden resonante Schwingungen im System aus der Filterinduktivität und den jeweils nächstliegenden Kondensatoren wie dem Filterkondensator oder den Filterkondensatoren angeregt. Diese Schwingungen führen dazu, dass für einen Teil der Zeit die rückwärts leitenden Elemente der Leistungshalbleiter der zweiten Halbbrücke leitend werden. Dadurch wiederum wird der Ausgangsstrom der Stromrichter-Schaltung direkt beeinflusst.

[0019] Die Auswirkungen sind in der Simulation gemäß **Fig. 1** dargestellt. Zum Umschaltzeitpunkt t_u bei $t \approx 20 \mu\text{s}$ fällt der Strom I_{L1} einer Filterinduktivität im abgeschalteten Zweig ab und der Strom I_{L2} durch die Filterinduktivität im eingeschalteten Zweig beginnt zu steigen. In einer idealen Situation würde der Ausgangsstrom **lout** der Stromrichter-Schaltung, der hier 3 A beträgt, zum Zeitpunkt der Umschaltung ohne Verzögerung von der Filterinduktivität im eingeschalteten Zweig übernommen, wodurch der Strom durch die Filterinduktivität im abgeschalteten Zweig auf 0 A fallen würde. Das reale Verhalten der Induktivitäten bedingt aber, dass der Strom I_{L1} durch die Filterinduktivität im abgeschalteten Zweig absinkt und dann überschwingt bis zu einem Wert von etwa -2,8 A. Auch der Strom I_{L2} schwingt über bis zu einem Stromwert von etwa 6,2 A. Beide Ströme schwingen in der Folgezeit für einen Zeitraum im ms-Bereich und lösen eine komplexe überlagerte Schwingung im Ausgangsstrom **lout** der Stromrichter-Schaltung aus.

[0020] Aufgrund der Spannungsverhältnisse ist es nicht möglich, zur Verminderung der Schwingungen einen klassischen Freilaufpfad aufzubauen, der einen Stromfluss in derjenigen Stromrichtung zulässt, die für die Abschaltung der Filterinduktivitäten geeignet ist. Für die Erfindung wurde erkannt, dass ein Pfad für den Stromfluss in die entgegengesetzte Richtung zur Verfügung gestellt werden kann. Durch die resonante Schwingung zwischen einer Filterinduktivität und den jeweils nächstliegenden Kondensatoren, wechselt der Strom durch die Filterinduktivität sein Vorzeichen und kann dann über diesen Freilaufpfad abgebaut werden. Da dieser Freilaufpfad eine Verbindung zum Zwischenkreis herstellt, wird dadurch der Einfluss auf den Ausgangsstrom nahezu völlig vermieden.

[0021] Werden als Halbleiterbauelemente Dioden verwendet, dann haben diese eine kleinere Schleusenspannung als die rückwärts leitenden Elemente der Leistungshalbleiter der zweiten Halbbrücke. Wie bereits beschrieben, hängt es vom Typ des Leistungshalbleiters der zweiten Halbbrücke ab, welches Element das rückwärts leitende Element ist und es kann sich um eine Bodydiode, eine extern dazugeschaltete Diode oder eine intrinsische Rückwärtsleitung handeln. Dadurch wird sichergestellt, dass der Stromfluss nahezu vollständig über die Halbleiter-

baulemente läuft, also den Freilaufpfad und nicht die rückwärts leitenden Elemente der Leistungshalbleiter der zweiten Halbbrücke. Beim Einsatz von unipolaren, steuerbaren Halbleitern, wie FETs, ergibt sich diese Problematik nicht, da ihre Leitspannung in der Regel sehr viel geringer ist als die von bipolaren Halbleitern.

[0022] Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Stromrichter-Schaltung gehen aus den von Anspruch 1 abhängigen Ansprüchen hervor. Dabei kann die Ausführungsform nach Anspruch 1 mit den Merkmalen eines der Unteransprüche oder vorzugsweise auch mit denen aus mehreren Unteransprüchen kombiniert werden. Demgemäß können für die Stromrichter-Schaltung noch zusätzlich folgende Merkmale vorgesehen werden:

- Bei den steuerbaren Halbleiterschaltern kann es sich um FETs (Feldeffekt-Transistor) oder Thyristoren kleiner Leistung handeln.
- Die Filterschaltung kann einen zusätzlichen, also insgesamt zwei Filterkondensatoren umfassen, deren Verbindungspunkt mit dem Zwischenkreismittelpunkt verbunden ist.
- Die Filterschaltung kann zwei weitere Filterkondensatoren umfassen. Von diesen ist ein erster parallel zu der Serie aus einem oberen Leistungshalbleiter einer oberen der ersten Halbbrücken und der ersten Filterinduktivität geschaltet. Der zweite ist parallel zu der Serie aus einem unterem Leistungshalbleiter einer unteren der ersten Halbbrücken und der zweiten Filterinduktivität geschaltet.
- Die Stromrichter-Schaltung kann eine Steuereinrichtung aufweisen, die derart ausgestaltet ist, dass die Leistungshalbleiter der zweiten Schaltungen mit einer Taktung mit einer Grundfrequenz im Hertz-Bereich betrieben werden. Durch eine Betriebsweise, in der nur die Leistungshalbleiter der ersten Halbbrücken hochfrequent betrieben werden, hat die Stromrichter-Schaltung eine hohe elektromagnetische Verträglichkeit, da die hochfrequenten Spannungen auf den kurzen Leiterbereich zwischen den ersten Halbbrücken und den Filterinduktivitäten beschränkt bleiben.
- Die Steuereinrichtung kann ausgestaltet sein, innerhalb eines Arms vor einem Einschalten eines unteren Leistungshalbleiters der zweiten Halbbrücke einen unteren Leistungshalbleiter einer unteren der ersten Halbbrücken für eine erste Zeitspanne einzuschalten und nach Ablauf der ersten Zeitspanne den unteren Leistungshalbleiter der unteren ersten Halbbrücke abzuschalten. Mit anderen Worten wird noch vor dem Einschalten des unteren Leistungshalbleiters der zweiten Halbbrücke der untere

Leistungshalbleiter der ersten Halbbrücke eingeschaltet und später, aber ebenfalls noch vor dem Einschalten des unteren Leistungshalbleiters der zweiten Halbbrücke wieder abgeschaltet.

[0023] Dabei liegt der Zeitpunkt, zu dem dieser Leistungshalbleiter wieder abgeschaltet wird, bevorzugt eine zweite Zeitspanne vor dem Einschalten des unteren Leistungshalbleiters der zweiten Halbbrücke. Der Zeitpunkt, zu dem der untere Leistungshalbleiter der unteren ersten Halbbrücke eingeschaltet wird, liegt also um die erste plus die zweite Zeitspanne vor dem Einschalten des unteren Leistungshalbleiters der zweiten Halbbrücke.

[0024] Es wurde erkannt, dass neben dem Ausschaltvorgang, in dem die Filterinduktivitäten ihren Strom verlieren sollen, auch die Einschaltvorgänge, bei dem die Filterinduktivitäten mit einem ansteigenden Strombetrag beaufschlagt werden, zu Störungen des Ausgangsstroms der Stromrichter-Schaltung führen.

[0025] Durch das vorgezogene kurze Einschalten des Leistungshalbleiters der ersten Halbbrücke wird vorteilhaft erreicht, dass vor dem Zeitpunkt, zu dem die zweite Filterinduktivität den Ausgangsstrom führen müsste, ein Stromfluss durch diese Induktivität bewirkt wird. Der bewirkte Stromfluss ist durch die Spannungsverhältnisse aber auf einen Stromfluss in der entgegengesetzten Richtung beschränkt. Solange der Zeitpunkt der Umschaltung des Leistungshalbleiters der zweiten Halbbrücke noch nicht erreicht ist, wird aber nach Abschaltung des Leistungshalbleiters der ersten Halbbrücke eine resonante Schwingung ausgelöst. Diese führt bei geeigneter Wahl von erster und zweiter Zeitspanne genau beim Zeitpunkt der Umschaltung des Leistungshalbleiter der zweiten Halbbrücke zu einem passenden, d.h. dem Ausgangsstrom der Schaltung entsprechenden, Stromfluss durch die zweite Filterinduktivität. Dadurch werden die Schwingungen, die nach dem Umschalten auftreten, vermieden. Da die vorab induzierten resonanten Schwingungen nur auf den Zwischenkreis wirken, werden so Störungen des Ausgangsstroms deutlich verringert.

[0026] Die Steuereinrichtung kann ferner ausgestaltet sein, in analoger Weise innerhalb eines Arms vor einem Einschalten eines oberen Leistungshalbleiters der zweiten Halbbrücke einen oberen Leistungshalbleiter einer oberen der ersten Halbbrücken einzuschalten und nach Ablauf der ersten Zeitspanne den oberen Leistungshalbleiter der ersten Halbbrücke abzuschalten. So wird ein verbessertes Einschalten auch bei der ersten, also oberen Filterinduktivität erreicht.

[0027] Die Steuereinrichtung kann weiterhin ausgestaltet sein, nach Ablauf der zweiten Zeitspanne den oberen Leistungshalbleiter der unteren ersten Halbbrücke einzuschalten. Zweckmäßig wird das gemacht, wenn zu dieser Zeit der untere Leistungshalbleiter der unteren ersten Halbbrücke abgeschaltet wird, wenn also mit anderen Worten die zweite, also untere, Filterinduktivität mit Strom beaufschlagt werden soll.

[0028] Analog kann die Steuereinrichtung ausgestaltet sein, nach Ablauf der zweiten Zeitspanne den unteren Leistungshalbleiter der oberen ersten Halbbrücke einzuschalten; zweckmäßig wird das gemacht, wenn zu dieser Zeit der obere Leistungshalbleiter der oberen ersten Halbbrücke abgeschaltet wird, wenn also mit anderen Worten die erste, also obere, Filterinduktivität mit Strom beaufschlagt werden soll.

[0029] Bevorzugt ist die zweite Zeitspanne gleich einer halben Periodendauer einer resonanten Schwingung von der ersten oder zweiten Filterinduktivität und den jeweils direkt angeschlossenen Filterkondensatoren. Damit wird dem Strom erlaubt, auf die passende Höhe, also die des Ausgangsstroms, zu schwingen.

- Die Steuereinrichtung kann ausgestaltet sein, als erste Zeitspanne eine Zeitspanne der Größe

$$t_1 = L \cdot \frac{I_{out}}{V_{DC}}$$

zu verwenden. Dabei bezeichnet L die Induktivität der ersten, also oberen, Filterinduktivität. Diese stimmt zweckmäßig mit der Induktivität der unteren, also zweiten Filterinduktivität überein. I_{out} ist der der Ausgangsstrom der Stromrichter-Schaltung. Idealerweise wird dabei der Ausgangsstrom verwendet, der zum Zeitpunkt der Umschaltung der Leistungshalbleiter der zweiten Halbbrücken vorliegt. Da sich der Ausgangsstrom aber im Zeitrahmen der ersten und zweiten Zeitspanne nur sehr geringfügig ändert, kommt es auf die genaue zeitliche Lage nicht an. V_{DC} bezeichnet die treibende Spannung, also die halbe Zwischenkreisspannung.

- Die Steuereinrichtung kann weiterhin ausgestaltet sein, als zweite Zeitspanne eine Zeitspanne der Größe

$$t_2 = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

zu verwenden. C bezeichnet dabei die Kapazität der an der Schwingung beteiligten Kapazitäten. Dies sind zumindest der Filterkondensator oder im Falle mehrerer Filterkondensatoren der

oder die jeweils nächstliegenden Filterkondensatoren.

- Soll die Stromrichter-Schaltung in einem einphasigen System verwendet werden, umfasst sie zweckmäßig genau einen Arm und zwei parallel geschaltete zweiten Halbbrücken, deren Mittelpunkte die Wechselspannungsausgänge bilden.

- Soll die Stromrichter-Schaltung in einem dreiphasigen System verwendet werden, umfasst sie zweckmäßig drei parallel geschaltete Arme, die jeweils einer Phase zugeordnet sind und genau eine zweite Halbbrücke in jedem der Arme, deren Mittelpunkt den Wechselspannungsausgang zur jeweiligen Phase bildet.

- Die beiden in Serie geschalteten Kondensatoren des Zwischenkreises, an denen die Zwischenkreisspannung, beispielsweise 400 V, abfällt, können jeweils auch aus mehreren, beispielsweise in Serie oder parallel geschalteten Kondensatoren, bestehen. Dies kann notwendig sein wenn es keinen Kondensator gibt, der für den geforderten Strom und/oder die geforderte Spannung spezifiziert ist.

- Die Kondensatoren können gleiche Kapazitätswerte aufweisen. Der durch die Verwendung von gleichen Kapazitätswerten symmetrisch geteilte Zwischenkreis teilt die Zwischenkreisspannung um den Mittelpunkt symmetrisch. Daher können in den ersten Halbbrücken die gleichen Leistungshalbleiter verwendet werden, welche gleichmäßig und optimal angesteuert werden. Dies erhöht den Wirkungsgrad der Stromrichter-Schaltung und reduziert die Komplexität.

- Die ersten Schaltungen können Leistungshalbleiter aufweisen, die für eine Modulation der Wechselspannung vorgesehen sind. Die zweiten Schaltungen können Leistungshalbleiter aufweisen, die für eine Taktung mit einer tieferen Grundfrequenz vorgesehen sind. Während die Modulationsfrequenz der Wechselspannung beispielsweise im Bereich von mehreren kHz bis zu mehreren MHz liegt, liegt die Grundfrequenz beispielsweise bei 50 Hz. Da die Leistungshalbleiter für unterschiedliche Aufgaben bei unterschiedlichen Frequenzen innerhalb der Stromrichter-Schaltung vorgesehen sind, erlaubt die angegebene Schaltungstopologie eine Verwendung von angepassten Leistungshalbleitern. Dies ist vorteilhaft, weil sich durch die Verwendung an die Aufgabe angepasster Leistungshalbleiter der Wirkungsgrad der Stromrichter-Schaltung erhöht.

- Die Leistungshalbleiter der ersten Schaltungen können hinsichtlich geringer Schaltverluste optimiert sein. Die Leistungshalbleiter der zweiten Schaltungen können hinsichtlich geringer

Durchlassverluste optimiert sein. Ein wesentlicher Faktor zur Begrenzung des erreichbaren Wirkungsgrades liegt in den Verlusten, die in den verwendeten Leistungshalbleitern auftreten. Dabei spielen die Schaltverluste, die im Moment des Öffnens und Schließens des Schalters auftreten und mit der verwendeten Schaltfrequenz ansteigen, sowie die Durchlassverluste, die im leitenden Zustand des Schalters auftreten, eine Rolle. Die Leistungshalbleiter wie beispielsweise MOSFETs, IGBTs oder GaN-HEMT-Schalter weisen bezüglich der Schaltverluste und Durchlassverluste verschiedene Eigenschaften auf. Darüber hinaus gibt es auch innerhalb jedes Typs von Leistungshalbleiter verschiedene Ausprägungen, die sich bezüglich der genannten Eigenschaften unterscheiden. Dabei ist typischerweise eine Optimierung der Schaltverluste nicht gleichzeitig mit einer Optimierung der Durchlassverluste zu erreichen, vielmehr stehen die Ziele im Widerstreit miteinander. Bei bekannten Topologien ist die Auswahl der Leistungshalbleiter daher ein Kompromiss. Hingegen können bei der Stromrichter-Schaltung vorteilhaft die schnell schaltenden Leistungshalbleiter der ersten Schaltungen, die für die Modulation der Wechselspannung vorgesehen sind, hinsichtlich geringer Schaltverluste optimiert sein, während die vergleichsweise langsam schaltenden Leistungshalbleiter der zweiten Schaltungen, die für eine Taktung mit einer Grundfrequenz vorgesehen sind, hinsichtlich geringer Durchlassverluste optimiert sein können. Damit ist trotz des Konflikts zwischen Schaltverlusten und Durchlassverlusten eine optimale Auswahl der Leistungshalbleiter möglich, die bei anderen Topologien nicht getroffen werden kann.

- Die Leistungshalbleiter der ersten Schaltungen können eine Spannungsfestigkeit aufweisen, die wenigstens der halben Zwischenkreisspannung entspricht. Die Leistungshalbleiter der zweiten Schaltungen können eine Spannungsfestigkeit aufweisen, die wenigstens der ganzen Zwischenkreisspannung entspricht. Dies wird durch die Schaltungstopologie mit dem geteilten Zwischenkreis ermöglicht, welcher als ein kapazitiver Spannungsteiler wirkt und bei bevorzugt gleichen Kapazitätswerten die Zwischenkreisspannung um den Mittelpunkt symmetrisch teilt. Bei gegebener Schaltfrequenz erzeugen Leistungshalbleiter, die eine höhere Spannungsfestigkeit aufweisen und daher zum Schalten höherer Spannungen geeignet sind, signifikant höhere Schaltverluste als Leistungshalbleiter, welche eine geringere Spannungsfestigkeit aufweisen. Die angegebene Schaltungstopologie erlaubt es, dass die Leistungshalbleiter der ersten Schaltung nur eine Spannungsfestigkeit aufweisen müssen, welche der halben Zwischenkreisspannung entspricht. Da so die angepas-

ten Leistungshalbleiter jeweils optimal eingesetzt werden, ergibt sich ein hoher Wirkungsgrad der Stromrichter-Schaltung.

- Als Leistungshalbleiter der ersten Schaltungen kommen bevorzugt GaN-Schalter zum Einsatz. Diese erlauben sehr hohe Schaltgeschwindigkeiten und ermöglichen es daher, die Baugröße der Filterelemente zu verringern.

- Die Leistungshalbleiter der ersten Schaltungen können mit einer Frequenz von mehr als 100 kHz, insbesondere einer Frequenz von mehr als 300 kHz, angesteuert werden. Eine hohe Schaltgeschwindigkeit ermöglicht es, die Baugröße der Filterelemente zu verringern.

- Der erste Kondensator und die oberen ersten Halbbrücken können als eine erste Kommutierungszelle ausgebildet sein; der zweite Kondensator und die unteren ersten Halbbrücken können als eine zweite Kommutierungszelle ausgebildet sein. Als Kommutierung bezeichnet man in der Leistungselektronik den Vorgang, bei dem ein Stromfluss von einem Zweig zum anderen übergeht. In der vorliegenden Ausführungsform findet die Kommutierung, beispielsweise im Betrieb als Wechselrichter, vom ersten Kondensator zu den parallel dazu geschalteten ersten Halbbrücken und vom zweiten Kondensator zu den parallel dazu geschalteten zweiten Halbbrücken statt. Die Ausbildung einer Kommutierungszelle insbesondere durch eine niederinduktive Anordnung der Bauelemente ist vorteilhaft, da so ein sehr gutes Kommutierungsverhalten und Schaltverhalten erreicht wird, was die Effizienz der vorliegenden Schaltung erhöht.

- Die Leistungshalbleiter der ersten Schaltungen werden bevorzugt mit einer Pulsweiten-Modulation angesteuert und die Leistungshalbleiter der zweiten Schaltungen mit einer tieferen Grundfrequenz umgepolt.

- Für die Pulsweiten-Modulation werden die ersten Halbbrücken zweckmäßig stets so geschaltet, dass einer der Leistungshalbleiter eingeschaltet ist, während der andere Leistungshalbleiter ausgeschaltet ist.

- Die Leistungshalbleiter innerhalb einer oder mehrerer der ersten Schaltungen können derart angesteuert werden, dass sie synchron schalten. Mit anderen Worten passiert für eine oder mehrere der ersten Schaltungen ein Umschalten der Leistungshalbleiter der beiden ersten Halbbrücken dieser ersten Schaltung gleichzeitig. Bevorzugt wird die synchrone Schaltung in allen drei Armen vorgenommen, d.h. die Arme verhalten sich gleichartig, wobei ein Leistungshalbleiter eines ersten und ein Leistungshalbleiter eines zweiten Arms meist nicht gleichzeitig schalten. In diesem Betriebsmodus wechselt die

Spannung zwischen der ersten Schaltung und der Filterschaltung eines Arms daher stets zwischen dem vollen Wert der Zwischenkreisspannung und Null, d.h. einem Zusammenschluss des Mittelpunkts-Potentials. Dabei sind zu einer Zeit entweder die beiden äußeren Leistungshalbleiter der beiden ersten Halbbrücken eingeschaltet oder die beiden inneren Leistungshalbleiter der beiden ersten Halbbrücken eingeschaltet. Durch diesen Schaltbetrieb werden vorteilhaft Gleichtakt-Störungen der Stromrichter-Schaltung stark verringert. Besonders vorteilhaft ist, dass dieser Betriebsmodus, der von einphasigen Schaltungen her bekannt ist, nun auch bei einer dreiphasigen Schaltung mit ihren drei parallelen Armen verwendbar ist.

- Alternativ können Leistungshalbleiter einer oder mehrerer der ersten Schaltungen derart angesteuert werden, dass die Leistungshalbleiter der oberen ersten Halbbrücke eines Arms im Wechsel mit den Leistungshalbleitern der unteren ersten Halbbrücke dieses Arms schalten. Bei einer Ansteuerung der Leistungshalbleiter mittels Trägersignal kann das beispielsweise durch eine entsprechende Phasenverschiebung des Trägersignals für die untere erste Halbbrücke gegenüber der oberen ersten Halbbrücke erreicht werden. Die am Eingang der Filterschaltung anliegende Spannung wechselt in diesem Schaltmodus zwischen der vollen Zwischenkreisspannung, der halben Zwischenkreisspannung und Null. Die dadurch vorliegende Schaltfrequenz ist gegenüber der Schaltfrequenz bei synchronem Schalten der Halbbrücken verdoppelt. Dadurch kann die Baugröße der in der Filterschaltung verwendeten Filter-Induktivitäten verringert werden, da die Filterwirkung invers proportional mit der Frequenz des Signals zusammenhängt. Besonders vorteilhaft ist, dass dieser Betriebsmodus, der von einphasigen Schaltungen her bekannt ist, nun auch bei einer dreiphasigen Schaltung mit ihren drei parallelen Armen verwendbar ist. Das bei zwei parallelen Halbbrücken beispielsweise als diagonale Taktung bezeichnete Schaltkonzept ist nicht auf entsprechende dreiphasige Schaltungen wie den klassischen Brückenumrichter übertragbar. Die spezielle Topologie des erfindungsgemäßen Stromrichters erlaubt aber den beschriebenen Betriebsmodus und erlaubt somit, die Vorteile der Frequenzverdoppelung auch bei einer dreiphasigen Schaltung zu erreichen.

[0030] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele näher beschrieben und erläutert.

[0031] Es zeigen schematisch:

Fig. 1 ein Diagramm mit simulierten Strom- und Spannungsverläufen für eine Stromrichter-Schaltung,

Fig. 2 ein Blockschaltbild eines Ausschnitts einer Photovoltaik-Anlage,

Fig. 3 einen Schaltplan einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen Stromrichter-Schaltung für einphasige Systeme,

Fig. 4 bis Fig. 7 ein Zeitablaufdiagramm des Schaltzustands für verschiedene Halbbrücken der Stromrichter-Schaltung,

Fig. 8 ein Zeitablaufdiagramm einer innerhalb der Stromrichter-Schaltung erzeugten Spannung,

Fig. 9 ein weiteres Blockschaltbild eines Ausschnitts einer Photovoltaik-Anlage,

Fig. 10 einen Schaltplan einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen Stromrichter-Schaltung für dreiphasige Systeme und

Fig. 11 ein Diagramm mit simulierten Strom- und Spannungsverläufen für eine verbesserte Stromrichter-Schaltung.

[0032] **Fig. 2** zeigt ein Blockschaltbild eines Ausschnitts einer Photovoltaik-Anlage **10**. Die Photovoltaik-Anlage **10** umfasst eine Reihe von Solarmodulen **11a**, **11b**, von denen hier der Übersicht wegen nur zwei dargestellt sind. Jedes der Solarmodule **11a**, **11b** ist über einen DC/DC-Wandler **12** mit MPP-Tracking mit einer Stromrichter-Schaltung **20** gemäß einer Ausführungsform der Erfindung verbunden, die aus dem Gleichstrom des jeweiligen Solarmoduls **11a**, **11b** eine einphasige Wechselspannung erzeugt. Die einphasige Wechselspannung hat bevorzugt die Frequenz f_G des Versorgungsnetzwerks, beispielsweise 50 Hz oder 60 Hz. Die Wechselspannungsausgänge **25a**, **25b** der Stromrichter-Schaltungen **20** sind zueinander parallel geschaltet.

[0033] In **Fig. 3** ist ein Schaltplan einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen Stromrichter-Schaltung **20** für einphasige Systeme dargestellt, wobei die Stromrichter-Schaltung **20** eine erste Schaltung **21**, eine zweite Schaltung **22** und eine Filterschaltung **23** umfasst. Die Stromrichter-Schaltung **20** ist zwischen ein Gleichspannungssystem **1** und ein in **Fig. 3** nicht dargestelltes Wechselspannungssystem geschaltet. Dabei umfasst die Stromrichter-Schaltung **20** Anschlusskontakte **24a**, **24b** zur Verbindung mit dem Gleichspannungssystem **1** und Wechselspannungskontakte **25a**, **25b** zur Verbindung mit dem Wechselspannungssystem.

[0034] Die erste Schaltung **21** umfasst zwei in Reihe geschaltete Halbbrücken **26a**, **26b**. Parallel zu den Halbbrücken **26a**, **26b** ist ein Zwischenkreis **27** angeordnet, der eine Serienschaltung von zwei Kon-

densatoren **C1**, **C2** aufweist. Die äußeren Anschlüsse der beiden Halbbrücken **26a**, **26b** sind mit den Anschlusskontakten **24a**, **24b** verbunden und bilden somit den Gleichspannungseingang der Stromrichter-Schaltung **20**. Der Zwischenkreis **27** ist als geteilter Zwischenkreis ausgeführt und zur Herstellung eines Mittelpunkts **M** einer Zwischenkreisspannung UZK am zwischen den Kondensatoren **C1**, **C2** und den Halbbrücken **26a**, **26b** befindlichen Potentialpunkt vorgesehen. Dabei ist der erste Kondensator **C1** parallel zu der oberen Halbbrücke **26a** geschaltet und der zweite Kondensator **C2** parallel zu der unteren Halbbrücke **26b** geschaltet. Der erste Kondensator **C1** und die erste Halbbrücke **26a** sind als eine erste Kommutierungszelle K1 ausgebildet und der zweite Kondensator **C2** und die zweite Halbbrücke **26b** sind als eine zweite Kommutierungszelle K2 ausgebildet, wodurch sich parasitäre Effekte minimieren, welche hauptsächlich durch parasitäre Induktivitäten zwischen einem Kondensator **C1**, **C2** und der dazu parallel geschalteten Halbbrücke **26a**, **26b** verursacht werden.

[0035] Die Filterschaltung **23** umfasst eine erste und zweite Filter-Induktivität **28a**, **28b**. Ein erster Anschluss der ersten Filter-Induktivität **28a** ist mit dem Potentialpunkt zwischen den Leistungshalbleitern **T1**, **T2** der ersten Halbbrücke **26a** verbunden. Ein erster Anschluss der zweiten Filter-Induktivität **28b** ist mit dem Potentialpunkt zwischen den Leistungshalbleitern **T3**, **T4** der zweiten Halbbrücke **26b** verbunden. Die jeweils anderen Anschlüsse der Filter-Induktivitäten **28a**, **28b** sind über einen ersten und zweiten Filter-Kondensator **29a**, **29b** zusammengeschlossen. Die Filter-Induktivitäten **28a**, **28b** weisen zweckmäßig die gleiche Induktivität auf. Die Filterschaltung **23** umfasst ferner einen dritten und vierten Filterkondensator **29c**, **d**. Der dritte Filterkondensator **29c** ist zwischen den Anschlusskontakt **24a** und den Potentialpunkt zwischen der ersten Filterinduktivität **28a** und dem Filterkondensator **29** geschaltet. Der vierte Filterkondensator **29d** ist zwischen den Anschlusskontakt **24b** und den Potentialpunkt zwischen der zweiten Filterinduktivität **28b** und dem zweiten Filterkondensator **29b** geschaltet. Der Potentialpunkt zwischen dem erste und zweiten Filterkondensator **29a**, **b** ist mit dem Mittelpunkt **M** des Zwischenkreises elektrisch verbunden.

[0036] Die zweite Schaltung **22** umfasst eine Vollbrücke aus zwei parallelen Halbbrücken **30a**, **30b**. Der obere äußere Anschluss der Halbbrücken **30a**, **30b** ist mit dem Potentialpunkt zwischen der ersten Filter-Induktivität **28a** und dem ersten Filter-Kondensator **29a** verbunden. Der untere äußere Anschluss der Halbbrücken **30a**, **30b** ist mit dem Potentialpunkt zwischen der zweiten Filter-Induktivität **28a** und dem zweiten Filter-Kondensator **29b** verbunden. Mit anderen Worten ist die Vollbrücke parallel zu den beiden Filterkondensatoren **29a**, **29b** geschaltet. Der Poten-

tialpunkt zwischen den Leistungshalbleitern **T5**, **T6** der ersten Halbbrücke **30a** ist verbunden mit dem ersten Wechselspannungskontakt **25a**, während der Potentialpunkt zwischen den Leistungshalbleitern **T7**, **T8** der zweiten Halbbrücke **30a** mit dem zweiten Wechselspannungskontakt **25b** verbunden ist.

[0037] Die Stromrichter-Schaltung **20** arbeitet mit leistungselektronischen Schaltern **T1...8**, die beispielsweise als Insulated Gate Bipolar Transistoren (IGBT), Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET) oder Galliumnitrid-High Electron Mobility Transistoren (GaN-HEMT) ausgeführt sein können. Die Figuren zeigen IGBTs als leistungselektronische Schalter **T1...8**, das ist aber beispielhaft und es können andere Schaltertypen verwendet werden. Dabei können sich insbesondere die verwendeten Schalter **T1...8** auch unterscheiden, beispielsweise können in den Halbbrücken **26a**, **26b** der ersten Schaltung **21** schnell schaltende GaN-Schalter verwendet werden, während in den Halbbrücken **30a**, **30b** der zweiten Schaltung **22** IGBTs zum Einsatz kommen.

[0038] Die Leistungshalbleiter **T1**, **T2**, **T3**, **T4** der ersten Schaltung **21** sind für eine Modulation, vorzugsweise eine Pulsweitenmodulation, kurz PWM, mit einem Takt vorgesehen, welcher eine signifikant höhere Frequenz aufweist als die Grundfrequenz fG. Bei dieser hohen Taktfrequenz von beispielsweise 10 kHz, 100 kHz oder 250 kHz sind die Schaltverluste der Leistungshalbleiter **T1**, **T2**, **T3**, **T4** der ersten Schaltung **21** dominant gegenüber den Durchlassverlusten und daher werden Leistungshalbleiter **T1**, **T2**, **T3**, **T4** für die erste Schaltung **21** ausgewählt, die hinsichtlich geringer Schaltverluste optimiert sind. Die Schaltungstopologie der Stromrichter-Schaltung **20** erlaubt es weiterhin, für die erste Schaltung **21** Leistungshalbleiter **T1**, **T2**, **T3**, **T4** zu verwenden, welche eine Spannungsfestigkeit aufweisen, die der halben Zwischenkreisspannung UZK entspricht.

[0039] Die Leistungshalbleiter **T5**, **T6**, **T7**, **T8** der zweiten Schaltung **22** sind für eine Taktung mit der Grundfrequenz fG vorgesehen. Da bei dieser deutlich geringeren Schaltfrequenz fG die Durchlassverluste der Leistungshalbleiter **T5**, **T6**, **T7**, **T8** im Vergleich zu den Schaltverlusten dominant sind, werden Leistungshalbleiter **T5**, **T6**, **T7**, **T8** für die zweite Schaltung **22** ausgewählt, welche hinsichtlich geringer Durchlassverluste optimiert sind. Aufgrund der Schaltungstopologie werden für die zweite Schaltung **22** Leistungshalbleiter **T5**, **T6**, **T7**, **T8** mit einer Spannungsfestigkeit verwendet, die der ganzen Zwischenkreisspannung UZK entspricht. Dies ist aber nicht von Nachteil, da die Leistungshalbleiter **T5**, **T6**, **T7**, **T8** der zweiten Schaltung **22** nicht schnell schalten müssen.

[0040] Die Fig. 4 bis Fig. 7 zeigen den Ablauf der Schaltzustände der Halbbrücken **26a**, **26b** der ersten Schaltung **21** sowie der Halbbrücken **30a**, **30b**

der zweiten Schaltung **22** über einen Zeitraum, der einer Periode der Grundfrequenz f_G entspricht, d.h. $20 \mu\text{s}$ bei einer Grundfrequenz von 50 Hz. Dabei zeigt **Fig. 4** den Verlauf **41** der Schaltzustände des jeweiligen oberen Leistungshalbleiters **T1**, **T3** der aktiven der Halbbrücken **26a**, **b** und **Fig. 5** den Verlauf **51** der Schaltzustände des jeweiligen unteren Leistungshalbleiters **T2**, **T4** der aktiven der Halbbrücken **26a**, **b**. **Fig. 6** zeigt den Verlauf **61** für den Schaltzustand der Halbbrücke **30a**, wobei ein Wert von 1 bedeutet, dass der obere Leistungshalbleiter **T5** eingeschaltet ist und der untere Leistungshalbleiter **T6** ausgeschaltet. **Fig. 7** zeigt den Verlauf **71** für den Schaltzustand der Halbbrücke **30b**, wobei ein Wert von 1 bedeutet, dass der obere Leistungshalbleiter **T7** eingeschaltet ist und der untere Leistungshalbleiter **T8** ausgeschaltet.

[0041] Die Halbbrücken **26a**, **26b** werden gemäß **Fig. 4** und **Fig. 5** mit einer PWM betrieben, deren Frequenz zur besseren Darstellung nur 4 kHz beträgt. Die **Fig. 4** bis **Fig. 7** zeigen in horizontaler Richtung eine übereinstimmende Zeitachse **Z**. In vertikaler Richtung befindet sich eine normierte Achse **S**, die den Schaltzustand der jeweiligen Halbbrücke **26a**, **26b**, **30a**, **30b** angibt. Der Schaltzustand umfasst dabei den Zustand der beiden Leistungshalbleiter **T1...8** der jeweiligen Halbbrücke **26a**, **26b**, **30a**, **30b**, wobei von den Leistungshalbleitern **T1...8** einer Halbbrücke **26a**, **26b**, **30a**, **30b** jeweils einer eingeschaltet und der andere ausgeschaltet ist.

[0042] In den **Fig. 4** und **Fig. 5** ist erkennbar, dass die Halbbrücken **26a**, **26b** der ersten Schaltung **21** stets im Gleichtakt, also synchron, und gegenläufig schalten. Die sich ergebende Spannungsdifferenz an den Ausgängen der Halbbrücken **26a**, **26b** entspricht also entweder der Zwischenkreisspannung U_{ZK} oder Null (kurzgeschlossene Ausgänge). Beim Filter-Kondensator 29, also aus Sicht der Halbbrücken **26a**, **26b** hinter den Filter-Induktivitäten **28a**, **28b** ist dadurch ein geglätteter Spannungsverlauf realisiert, der einer gleichgerichteten sinusförmigen Wechselspannung entspricht, d.h. eine Folge von positiven Halbwellen. Dieser Spannungsverlauf ist in normierter Form in **Fig. 8** dargestellt. **Fig. 8** verwendet dabei die gleiche Zeitachse **Z** wie die **Fig. 4** bis **Fig. 7**. Die verwendete PWM ist dabei derart gestaltet, dass nach Filterung hoher Frequenzen eine Folge von Halbwellen verbleibt. Sie unterscheidet sich somit im genauen Verlauf etwas von einer PWM zur Erzeugung eines vollständigen Sinusverlaufs.

[0043] In den **Fig. 6** und **Fig. 7** ist erkennbar, dass die Halbbrücken **30a**, **30b** der zweiten Schaltung **22** mit der Grundfrequenz f_G umgepolt werden, d.h. mit einer verhältnismäßig niedrigen Frequenz von beispielsweise 50 Hz. Dadurch wird jede zweite der positiven Halbwellen im Spannungsverlauf des Filter-Kondensators 29 umgeklappt und somit ein vollständiger Sinusverlauf als Ausgangsspannung erzeugt.

Das Umpolen der Halbbrücken **30a**, **30b** erfolgt dabei ebenfalls synchron und die Halbbrücken **30a**, **30b** werden stets gegenphasig geschaltet.

[0044] Der somit in den **Fig. 4** und **Fig. 5** gezeigte Schaltmodus verwendet also eine synchrone Schaltung der Leistungshalbleiter **T1...4** der Halbbrücken **26a**, **26b**. Durch einen derartigen Betrieb ist die Spannung auf den beiden Ausgangsleitungen der Halbbrücken **26a**, **26b** daher stets symmetrisch in Bezug auf das Spannungsniveau in der Mitte des Zwischenkreises, also zwischen den beiden Halbbrücken **26a**, **26b**. Ist dieser Punkt mit Erde verbunden, ändert sich daher das Spannungsniveau der zweiten Schaltung **22** in Bezug auf Erde durch die Schalthandlungen in der Halbbrücken **26a**, **26b** nicht. Gleichtaktstörungen (common mode) werden dadurch vorteilhaft deutlich vermindert oder ganz vermieden.

[0045] In einem alternativen Betriebsmodus werden die Halbbrücken **26a**, **26b** der ersten Schaltung **21** versetzt zueinander geschaltet. Wenn eine der Halbbrücken **26a**, **26b** umschaltet, schaltet in diesem Betriebsmodus die jeweils andere Halbbrücke **26a**, **26b** nicht. Das Umschalten kann mit einer beliebigen Phasenverschiebung zueinander geschehen, insbesondere mit einer Phasenverschiebung von 180° . Beispielsweise kann bei einem Betrieb mit Trägersignal das Trägersignal für eine der Halbbrücken **26a**, **26b** gegenüber dem Trägersignal für die andere Halbbrücke entsprechend phasenverschoben werden. Werden die Halbbrücken **26a**, **26b** versetzt zueinander umgeschaltet, dann liegt für einen Teil der Zeit neben den Spannungen Null und dem Wert der Zwischenkreisspannung U_{ZK} auch die Hälfte der Zwischenkreisspannung U_{ZK} am Ausgang der Halbbrücken **26a**, **26b** an. Da die Halbbrücken **26a**, **26b** abwechselnd, aber insgesamt genauso häufig umschalten wie beim synchronen Betrieb, verdoppelt sich die Häufigkeit der Spannungswechsel am Ausgang der Halbbrücken **26a**, **26b**. Die effektive Frequenz des Signals, das die Filterschaltung **23** erreicht, ist daher doppelt so hoch wie beim synchronen Betrieb. Vorteilhaft erlaubt das, die Komponenten der Filterschaltung **23**, insbesondere die Filter-Induktivität 29, für eine höhere Frequenz auszulegen und somit zu verkleinern. Da die Komponenten der Filterschaltung **23** und gerade die Filter-Induktivitäten **29a...d** besonders große und klobige Bauteile darstellen, ist dies von besonderem Vorteil.

[0046] Die Schaltung **20** gemäß **Fig. 3** umfasst als weitere Komponenten eine erste und zweite Filterdiode **D1**, **D2**. Die erste Filterdiode **D1** ist parallel zur ersten Filterinduktivität **29a** angeordnet. Die zweite Filterdiode **D2** ist parallel zur zweiten Filterinduktivität **29b** angeordnet. Dabei sind die Filterdioden **D1**, **D2** so ausgerichtet wie die Body-Dioden der Leistungs-

Halbleiter **T1...8**, d.h. sie blockieren unter den normalen Spannungsverhältnissen in der Stromrichter-Schaltung **20**. Die Filterdioden **20** sind aber so gewählt, dass sie eine geringere Schleusenspannung aufweisen als die Body-Dioden der Leistungshalbleiter **T5...8** der zweiten Schaltung **22**.

[0047] Im Folgenden wird ein weiteres Ausführungsbeispiel für die Erfindung beschrieben, bei dem die Stromrichter-Schaltung 2010 für einen dreiphasigen Betrieb ausgestaltet ist. **Fig. 9** zeigt ein weiteres Blockschaltbild eines Ausschnitts einer Photovoltaik-Anlage **10**. Die Photovoltaik-Anlage **10** umfasst eine Reihe von Solarmodulen **11**, die in Reihenschaltungen, sog. Strings, organisiert sind. Der Übersicht wegen sind in **Fig. 1** nur zwei dieser Strings dargestellt. Jeder der Strings umfasst einen eigenen DC/DC-Wandler **12**, über den der String mit einem DC-Bus **13** verbunden ist. Der DC-Bus **13** ist wiederum mit einer Ausführung der erfindungsgemäßen Stromrichter-Schaltung 2010 verbunden, die aus dem Gleichstrom des DC-Busses **13** eine dreiphasige Wechselspannung erzeugt. Ausgangsseitig ist der Stromrichter 2010 mit dem Versorgungsnetzwerk **14** verbunden. Die dreiphasige Wechselspannung hat die Frequenz f_G des Versorgungsnetzwerks, beispielsweise 50 Hz oder 60 Hz.

[0048] In **Fig. 10** ist ein Schaltplan einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen Stromrichter-Schaltung **20** für dreiphasige Systeme dargestellt, wobei aus Gründen der Übersicht nur ein Teil der Schaltung 2010 gezeigt ist. Dabei entspricht die Schaltung weitgehend derjenigen der **Fig. 3**, also der einphasigen Variante, mit den folgend beschriebenen Unterschieden. Die erste, zweite und die Filterschaltung **21**, **2210** und **23** bilden zusammen einen Arm **P**, der einer Phase zugeordnet. Die Schaltung 2010 umfasst daher drei parallele solche Arme **P**, von denen nur einer dargestellt ist. Weiterhin umfasst jeder der Arme in der zweiten Schaltung **2210** nur eine Halbbrücke **30a**, die somit gleich der zweiten Schaltung **2210** ist. Bei einem typischen Drehstromnetz sind die Wechselströme der drei Phasen zueinander um 120° bzw. 240° phasenverschoben. Die Steuerung der ersten Schaltungen erfolgt daher für jeden der Arme zweckmäßig so, dass die entstehenden Halbwellen ebenfalls bereits eine derartige Phasenverschiebung zueinander aufweisen. Da die zweite Schaltung **2210** nur eine Halbbrücke umfasst, findet der Verlauf 71 der **Fig. 7** in dieser Schaltung keine Anwendung.

[0049] Für die Funktion der Filterdioden **D1**, **D2** wird im Folgenden der Nulldurchgang von positiver zu negativer Spannung mit positivem Ausgangsstrom **I_{out}** als Arbeitspunkt betrachtet. In den **Fig. 4** bis **Fig. 7** entspricht das dem Zeitpunkt $t = 1/4 f_G$, bei dem sich die Schaltstellung der Halbbrücke(n) der zweiten Schaltung **22**, **2210** ändert. Dieser Nulldurchgang tritt

einmal pro Periode der Grundfrequenz f_G auf, also bei 50 Hz als Netzfrequenz alle 20 ms.

[0050] In diesem Arbeitspunkt führt die erste Filterinduktivität **28a** zum Zeitpunkt des Spannungsnulldurchgangs einen deutlichen, positiven Strom, nämlich den Ausgangsstrom **I_{out}** der Schaltung **20**, 2010. Dieser wird hier beispielhaft mit 3A angenommen. Idealerweise schaltet der obere Leistungshalbleiter **T5** der Halbbrücke **30a** zeitlich exakt zum Spannungsnulldurchgang ab und der untere Leistungshalbleiter **T6** nach kurzer Totzeit zu. Da der Strom in der ersten Filterinduktivität **28a** nicht schlagartig abgebaut werden kann, werden resonante Schwingungen angeregt und somit Störungen verursacht. In der direkten Folge der Abschaltung steigt die Spannung hinter der ersten Filterinduktivität **28a**, d.h. am oberen Anschlusspunkt der Halbbrücke **30a** an. Nach kurzer Zeit, die durch die Werte von Induktivität und Kapazität der beteiligten Elemente bestimmt ist, fällt die Spannung und schwingt in negativer Richtung über. Dabei kann sie so tief fallen, dass - wenn die Filterdioden **D1**, **D2** nicht vorhanden sind - ein jeweiliges rückwärts leitendes Element des oberen Leistungshalbleiters **T5** der Halbbrücke **30a** leitend wird. Dieses Element ist je nach Typ von Leistungshalbleiter die Body-Diode, eine externe Diode oder ein intrinsischer Leitmechanismus. Da dieses rückwärts leitende Element direkt mit der Ausgangsleitung der Schaltung **20**, 2010 verbunden ist, entstehen dadurch Störungen im Ausgangsstrom.

[0051] In analoger Weise entstehen Störungen beim Nulldurchgang von negativer zu positiver Spannung mit positivem Ausgangsstrom **I_{out}** als Arbeitspunkt betrachtet. In den **Fig. 4** bis **Fig. 7** entspricht das dem Zeitpunkt $t = 3/4 f_G$, bei dem sich die Schaltstellung der Halbbrücke(n) der zweiten Schaltung **22**, **2210** ändert. Hierbei führt die zweite Filterinduktivität **28b** den Ausgangsstrom **I_{out}** und wird vom Stromfluss abgetrennt.

[0052] Da die Filterdioden **D1**, **D2** eine geringere Schleusenspannung aufweisen als das rückwärts leitende Element der Leistungshalbleiter **T5...T8**, wird in den Schaltungen **20**, 2010 statt der rückwärts leitenden Elemente der Leistungshalbleiter **T5...T8** eine der Filterdioden **D1**, **D2** leitend und begrenzt damit den Spannungsaufbau oder -abfall. Da die Filterdioden **D1**, **D2** nicht direkt mit der Ausgangsleitung der Schaltung **20**, 2010 verbunden sind, sondern mit dem Mittelpunkt (**M**) des Zwischenkreises, führt eine Stromleitung über sie nicht zu einer Störung des Ausgangsstroms **I_{out}**. Die bei der Abschaltung des Stroms in einer der Filterinduktivitäten **28a**, **b** auftretenden Störungen werden dadurch weitgehend unterbunden.

[0053] Analoge Störungen treten beim Zuschalten der jeweils anderen Filterinduktivität **28a**, **b** auf, da

dort der Strom auch nicht stufenartig ansteigen kann. Um diesen Störungen zu begegnen, wird in den Schaltungen **20**, **2010** eine besondere Ansteuerung der Leistungshalbleiter **T1...4** der ersten Schaltung **21** verwendet. Für die Steuerung der Schaltvorgänge der Leistungshalbleiter **T1...T8** der Schaltung **20**, **2010** in der Weise, die in den **Fig. 4** bis **Fig. 7** dargestellt ist, ist eine Steuereinrichtung vorhanden. Die Steuereinrichtung ist in den Figuren nicht dargestellt. Die besondere Ansteuerung zur Verminderung der Störungen wird ebenfalls von der Steuereinrichtung umgesetzt.

[0054] Für die besondere Ansteuerung wird im Folgenden der Nulldurchgang von positiver zu negativer Spannung mit positivem Ausgangsstrom **I_{out}** als Arbeitspunkt betrachtet. In den **Fig. 4** bis **Fig. 7** entspricht das wieder dem Zeitpunkt $t = 1/4 f_G$, bei dem sich die Schaltstellung der Halbbrücke(n) der zweiten Schaltung **22**, **2210** ändert. Dieser Nulldurchgang tritt einmal pro Periode der Grundfrequenz **f_G** auf, also bei 50 Hz als Netzfrequenz alle 20 ms.

[0055] In diesem Arbeitspunkt führt die zweite Filterinduktivität **28b** keinen Strom. Idealerweise schaltet der obere Leistungshalbleiter **T5** der Halbbrücke **30a** zeitlich exakt zum Spannungsnulldurchgang ab und der untere Leistungshalbleiter **T6** der Halbbrücke **30a** nach kurzer Totzeit zu. Da der Strom durch die zweite Filterinduktivität **28b** nicht schlagartig auf den Betrag des Ausgangsstroms **I_{out}** aufgebaut werden kann, werden Oszillationen des Schwingkreises aus der zweite Filterinduktivität **28b** und den angrenzenden Filterkondensatoren **29b**, **29d** angeregt und somit Störungen verursacht.

[0056] Die Steuereinrichtung setzt nun ein spezielles Modulationsverfahren um, um diese Störungen zu vermindern. Damit der Ausgangsstrom **I_{out}** der Schaltung **20**, **2010** direkt von der zweiten Filterinduktivität **28b** übernommen werden kann, wird diese unmittelbar vor dem Umschalten vom oberen zum unteren Leistungshalbleiter **T5**, **T6** „vorgeladen“. Da nur eine negative Spannung über die zweite Filterinduktivität **28b** gestellt und damit auch nur ein negativer Strom aufgebaut werden kann, zum Umschaltzeitpunkt allerdings ein positiver Strom benötigt wird, wird eine resonante Schwingung zwischen der zweiten Filterinduktivität **28b** und den angrenzenden Filterkondensatoren **29b**, **29d** erzeugt und zeitlich so abgestimmt, dass zum Umschaltzeitpunkt der gewünschte positive Strom fließt.

[0057] Dazu wird der untere Leistungshalbleiter **T4** der unteren ersten Halbbrücke **26b** für eine Dauer Δt_1 eingeschaltet, sodass in der zweiten Filterinduktivität **28b** ein Strom aufgebaut wird. Die Dauer wird so gewählt, dass der Strom etwa bis auf den Betrag des Ausgangsstroms **I_{out}** aufgebaut wird. Danach wird der untere Leistungshalbleiter **T4** ab- und

der obere Leistungshalbleiter **T3** der unteren ersten Halbbrücke **26b** eingeschaltet, wodurch die resonante Schwingung beginnt. Eine weitere Zeitdauer Δt_2 später erfolgt dann die Umschaltung der Halbbrücke **30a**, d.h. vom oberen Leistungshalbleiter **T5** auf den unteren Leistungshalbleiter **T6**. Die Verzögerung Δt_2 entspricht dabei einer halben Periodendauer der angeregten resonanten Schwingung. Die Zeiten lassen sich in guter Näherung wie folgt berechnen:

$$\Delta t_1 = L \cdot \left| \frac{I_{out}}{V_{DC}} \right|$$

[0058] Dabei bezeichnet **L** die Induktivität der zweiten Filterinduktivität **28b**, wobei diese zweckmäßig gleich der Induktivität der ersten Filterinduktivität **28a** ist. **I_{out}** ist der der Ausgangsstrom der Stromrichter-Schaltung **20**, **2010**. Idealerweise wird dabei der Ausgangsstrom verwendet, der zum Zeitpunkt der Umschaltung der Leistungshalbleiter **T5**, **T6** der zweiten Halbbrücke **30a** vorliegt. Da sich der Ausgangsstrom **I_{out}** aber im Zeitrahmen der ersten und zweiten Zeitspanne nur sehr geringfügig ändert, kann auch der Ausgangsstrom zum Zeitpunkt des Einschaltens des Leistungshalbleiters **T4** verwendet werden. **V_{DC}** bezeichnet die treibende Spannung, also die halbe Zwischenkreisspannung **U_{ZK}**.

$$\Delta t_2 = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

[0059] **C** bezeichnet dabei die Kapazität der an der Schwingung beteiligten Kapazitäten, also im Aufbau gemäß den Figuren die Kapazität einer Parallelschaltung der Filterkondensatoren **29b**, **29d**. Der Vorgang des Vorladens beginnt also zu einem Zeitpunkt, der um $\Delta t_1 + \Delta t_2$ vor dem Umschaltzeitpunkt der Halbbrücke **30a** liegt.

[0060] **Fig. 11** zeigt ein Simulationsergebnis für die Stromrichter-Schaltung **20**, **2010**. Es ist erkennbar, dass die deutlichen Störungen, die in **Fig. 1** sichtbar waren, durch die beschriebenen Maßnahmen weitgehend unterbunden werden. In dem Diagramm der **Fig. 11** liegt der Zeitpunkt der Umschaltung zwischen den Leistungshalbleitern **T5**, **T6** der Halbbrücke **30a** wie in **Fig. 1** bei etwa $t_U \approx 20 \mu s$.

[0061] Aus dem Verlauf der Spannung **V_H** und dem Verlauf des Stroms **I_{L1}** der ersten Filterinduktivität **28a** ist der Einfluss der Filterdioden **D1**, **D2** erkennbar. Nach dem Umschaltzeitpunkt t_U sind in beiden Verläufen deutlich Ausschläge erkennbar. Bei Erreichen der - im Diagramm negativen - Schleusenspannung wird die Spannung **V_H** durch die jeweils betroffene Filterdiode **D1**, **D2** bei diesem Wert festgehalten. Der Strombetrag $|I_{L1}|$ fällt daraufhin etwa linear ab und weitere Schwingungen unterbleiben.

[0062] Weiterhin ist aus dem Verlauf des Stroms I_{L2} der zweiten Filterinduktivität **28b** der Einfluss des Steuerverfahrens sichtbar. Bereits vor dem Umschaltzeitpunkt t_U wird mit der „Vorladung“ der zweiten Filterinduktivität **28b** begonnen. Da eine Bestromung mit der richtigen Stromrichtung (positive Wert im Diagramm) nicht möglich ist, wird wie beschrieben ein Strom in der Gegenrichtung aufgeprägt und die nachfolgende Schwingung ausgenutzt. Dazu wird der untere Leistungshalbleiter **T4** der unteren ersten Halbbrücke **26b** beim Zeitpunkt $t = 0 \mu s$ eingeschaltet. Nach Erreichen eines Stromwerts von $I_{L2} \approx -3 A$ wird der Leistungshalbleiter **T4** abgeschaltet und der obere Leistungshalbleiter **T3** der unteren ersten Halbbrücke **2b** eingeschaltet. Daraufhin schwingt der Strom I_{L2} zu positiven Stromwerten zurück und erreicht - bei geeignetem Timing - den Wert des Ausgangsstroms, also $3 A$ gerade beim Umschaltzeitpunkt t_U . Da der Strom durch die zweite Filterinduktivität **28b** gerade den Wert des Ausgangsstroms **lout** hat, den sie zum Umschaltzeitpunkt weitertragen muss, finden keine weiteren Schwingungen statt. Dabei ist zu beachten, dass der Umschaltzeitpunkt t_U durch das Schaltschema der Stromrichter-Schaltung **20**, **2010** festliegt. Das Vorladen der Filterinduktivität muss sich daran anpassen und entsprechend vorher passieren.

[0063] Im Ergebnis zeigt der Vergleich der Diagramme der **Fig. 11** und **Fig. 1**, dass die Schwingungen der Stromrichter-Schaltung **20**, **2010** durch die beschriebenen Maßnahmen fast völlig unterbunden werden.

| | |
|----------------------|--|
| 27 | Zwischenkreis |
| M | Mittelpunkt |
| 26a, b | erste Halbbrücken |
| 28a, b | Filterinduktivitäten |
| 29a...d | Filterkondensatoren |
| D1, D2 | Filterdioden |
| 21 | erste Schaltung |
| 22 | zweite Schaltung |
| 23 | Filterschaltung |
| 30a, b | zweite Halbbrücken |
| 25a, b | Wechselspannungsanschlüsse |
| 41, 51 | Verläufe der Schaltzustände in den ersten Halbbrücken |
| 61, 61 | Verläufe der Schaltzustände in den zweiten Halbbrücken |
| Z | Zeitachse |
| f_G | Grundfrequenz |
| S | Schaltsignal |
| 81 | Spannungsverlauf |
| 14 | Versorgungsnetzwerk |
| 13 | DC-Bus |
| 2210 | zweite Schaltung |
| P | Phasenarm |

Bezugszeichenliste

| | |
|-----------------------|---|
| I_{L1} | Strom durch die erste Filterinduktivität |
| I_{L2} | Strom durch die zweite Filterinduktivität |
| lout | Ausgangsstrom der Schaltung |
| t_U | Umschaltzeitpunkt |
| 10 | Photovoltaik-Anlage |
| 11a, b | Solarmodul |
| 12 | DC/DC-Wandler |
| 20 | Stromrichter-Schaltung |
| 1 | Gleichspannungsnetzwerk |
| 24a, 24b | Gleichspannungsanschlüsse |
| U_{ZK} | Zwischenkreisspannung |
| C1, C2 | Zwischenkreis-Kondensatoren |
| T1...T4 | Leistungshalbleiter der ersten Halbbrücken |
| T5...T8 | Leistungshalbleiter der zweiten Halbbrücken |

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

- EP 2136465 A1 [0004]
- WO 2016/146171 A1 [0005]
- EP 2306629 A1 [0006]
- DE 102012020036 A1 [0007]
- DE 102016224312 A1 [0008]
- DE 102016224310 A1 [0008]

Patentansprüche

1. Stromrichter-Schaltung (20), umfassend
 - einen geteilten Zwischenkreis (27) mit einer Serienschaltung von zwei Kondensatoren (C1, C2), zwischen denen ein Zwischenkreismittelpunkt (M) gebildet ist,
 - parallel zum Zwischenkreis (27) einen Arm (P) oder mehrere zueinander parallele Arme (P) mit jeweils einer ersten Schaltung (21), einer zweiten Schaltung (22, 2210) und einer Filterschaltung (23), wobei
 - die erste Schaltung (21) zwei in Serie geschaltete erste Halbbrücken (26a, b) umfasst, deren Verbindungspunkt mit dem Zwischenkreismittelpunkt (M) verbunden ist,
 - die Filterschaltung (23) eine Serienschaltung mit einer ersten Filter-Induktivität (28a), wenigstens einem Filterkondensator (29a) und einer zweiten Filterinduktivität (28b) umfasst, die parallel zu den Mittelpunkten der beiden ersten Halbbrücken (26a, b) des jeweiligen Arms (P) geschaltet ist,
 - die zweite Schaltung (22, 2210) jedes Arms (P) eine zweite Halbbrücke (30a) oder zwei parallele zweite Halbbrücken (30a, b) aufweist, deren Mittelpunkte Wechselspannungsausgänge (25) bilden,
 - die äußeren Potentialpunkte der zweiten Halbbrücken (30a, b) parallel zum Filterkondensator (29a) geschaltet sind, **gekennzeichnet durch**
 - eine parallel zum Filterkondensator (29a) geschaltete Serienschaltung zweier Halbleiterbauelemente (D1, D2), wobei die Halbleiterbauelemente (D1, D2) Dioden oder steuerbare Halbleiterschalter sind, wobei im Falle von Dioden deren Schleusenspannung geringer ist als die Einsatzspannung von rückwärts leitenden Elementen der Leistungshalbleiter (T5...8) der zweiten Halbbrücken (30a, b), und wobei der Potentialpunkt zwischen den Dioden (D1, D2) oder steuerbaren Halbleiterschaltern mit dem Zwischenkreismittelpunkt (M) verbunden ist.

2. Stromrichter-Schaltung (20) nach Anspruch 1, bei der die Filterschaltung (23) zwei Filterkondensatoren (29a, 29b) umfasst, deren Verbindungspunkt mit dem Zwischenkreismittelpunkt (M) verbunden ist.

3. Stromrichter-Schaltung (20) nach Anspruch 1 oder 2, bei der die Filterschaltung (23) zwei weitere Filterkondensatoren (29c, d) umfasst, von denen ein erster parallel zu der Serie aus einem oberen Leistungshalbleiter (T1) einer oberen der ersten Halbbrücken (26a) und der ersten Filterinduktivität (28a) geschaltet ist und von denen ein zweiter parallel zu einer Serie aus einem unteren Leistungshalbleiter (T4) einer unteren der ersten Halbbrücken (26b) und der zweiten Filterinduktivität (28b) geschaltet ist.

4. Stromrichter-Schaltung (20) nach einem der vorangehenden Ansprüche mit einer Steuereinrichtung, die derart ausgestaltet ist, dass die Leistungshalbleiter (T5...8) der zweiten Schaltung (22, 2210) mit einer

Taktung mit einer Grundfrequenz im Hertz-Bereich betrieben werden.

5. Stromrichter-Schaltung (20) nach Anspruch 4, bei der die Steuereinrichtung ausgestaltet ist, innerhalb eines Arms (P) vor einem Einschalten eines unteren Leistungshalbleiters (T6, T8) der zweiten Halbbrücke (30a, b) einen unteren Leistungshalbleiter (T4) einer unteren der ersten Halbbrücken (26a) einzuschalten und nach Ablauf einer ersten Zeitspanne den unteren Leistungshalbleiter (T4) der unteren ersten Halbbrücke (26b) abzuschalten.

6. Stromrichter-Schaltung (20) nach Anspruch 5, bei der die Steuereinrichtung ausgestaltet ist, den unteren Leistungshalbleiter (T4) der unteren ersten Halbbrücke (26b) eine zweite Zeitspanne vor dem Einschalten des unteren Leistungshalbleiters (T6, T8) der zweiten Halbbrücke (30a, 30b) abzuschalten.

7. Stromrichter-Schaltung (20) nach Anspruch 5 oder 6, bei der die Steuereinrichtung ausgestaltet ist, innerhalb eines Arms (P) vor einem Einschalten eines oberen Leistungshalbleiters (T5, T7) der zweiten Halbbrücke (30a, b) einen oberen Leistungshalbleiter (T1) einer oberen der ersten Halbbrücken (26a) einzuschalten und nach Ablauf einer ersten Zeitspanne den oberen Leistungshalbleiter (T1) der ersten Halbbrücke (26a) abzuschalten.

8. Stromrichter-Schaltung (20) nach einem der Ansprüche 5 bis 7, bei der die Steuereinrichtung ausgestaltet ist, nach Ablauf der ersten Zeitspanne den oberen Leistungshalbleiter (T3) der unteren ersten Halbbrücke (26b) einzuschalten.

9. Stromrichter-Schaltung (20) nach einem der Ansprüche 5 bis 8, bei der die Steuereinrichtung ausgestaltet ist, nach Ablauf der ersten Zeitspanne den unteren Leistungshalbleiter (T2) der oberen ersten Halbbrücke (26a) einzuschalten.

10. Stromrichter-Schaltung (20) nach einem der Ansprüche 5 bis 9, bei der die Steuereinrichtung ausgestaltet ist, als erste Zeitspanne eine Zeitspanne der Größe

$$t_1 = L \cdot \frac{I_{out}}{V_{DC}}$$

zu verwenden, wobei

L die Induktivität einer der Filterinduktivitäten (28a, b), I_{out} der Ausgangsstrom der Stromrichter-Schaltung (20),

V_{DC} die halbe Zwischenkreisspannung (U_{ZK}) ist.

11. Stromrichter-Schaltung (20) nach einem der Ansprüche 5 bis 10, bei der die Steuereinrichtung

ausgestaltet ist, als zweite Zeitspanne eine Zeitspanne der Größe

$$t_2 = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

zu verwenden, wobei

L die Induktivität einer der Filterinduktivitäten (28a, b), C die Kapazität der an der Filterinduktivität (28a, b) anliegenden Filterkapazitäten (29a...d) ist.

12. Einphasige Stromrichter-Schaltung (20) nach einem der vorangehenden Ansprüche mit genau einem Arm (P) und zwei parallel geschalteten zweiten Halbbrücken (30a, b), deren Mittelpunkte die Wechselspannungsausgänge (25) bilden.

13. Dreiphasige Stromrichter-Schaltung (20) nach einem der Ansprüche 1 bis 11 mit drei parallel geschalteten Armen (P), die jeweils einer Phase zugeordnet sind und genau einer zweiten Halbbrücke (30a) in jedem der Arme (P), deren Mittelpunkt den Wechselspannungsausgang (25) zur jeweiligen Phase bildet.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

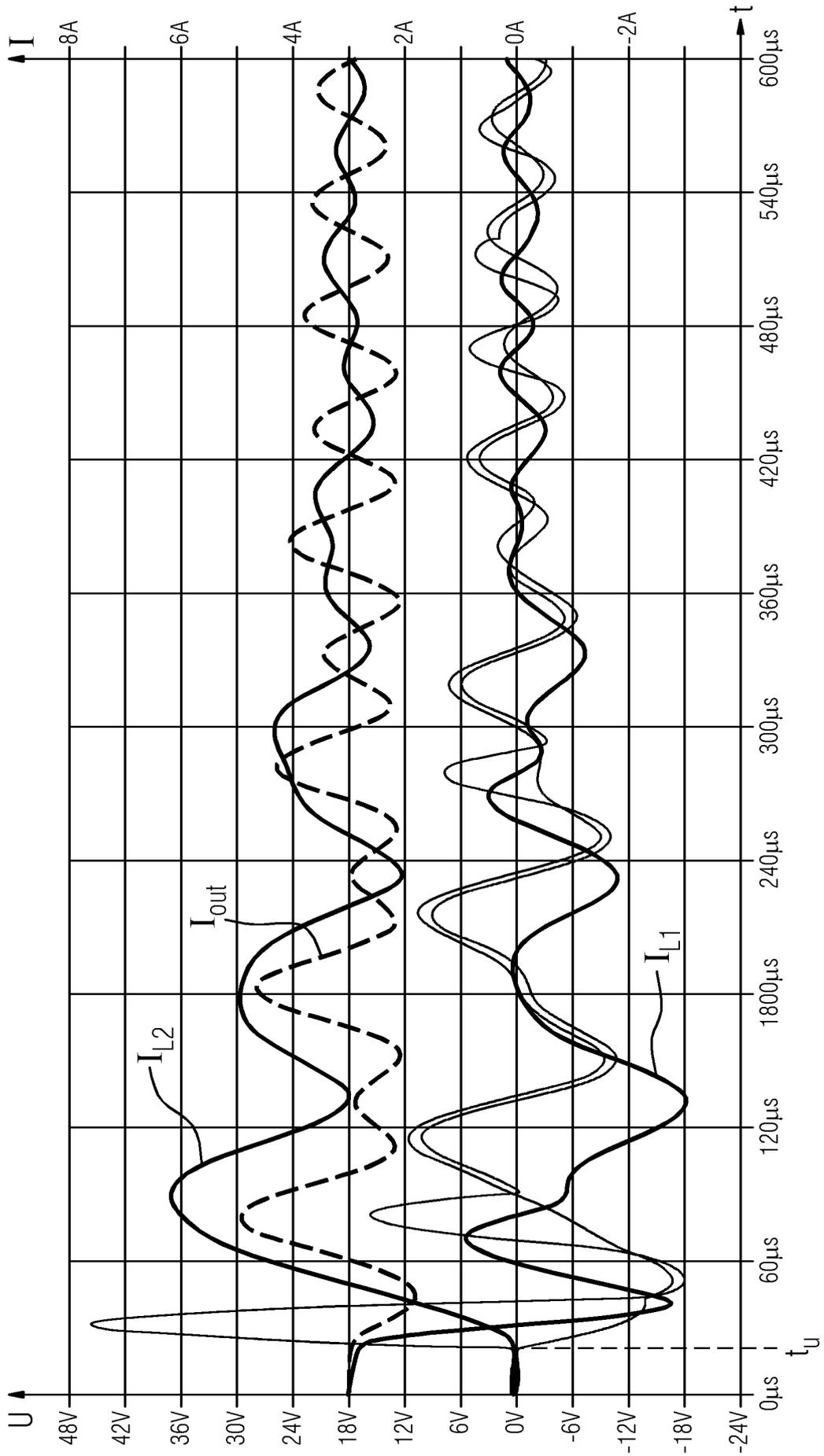


FIG 2

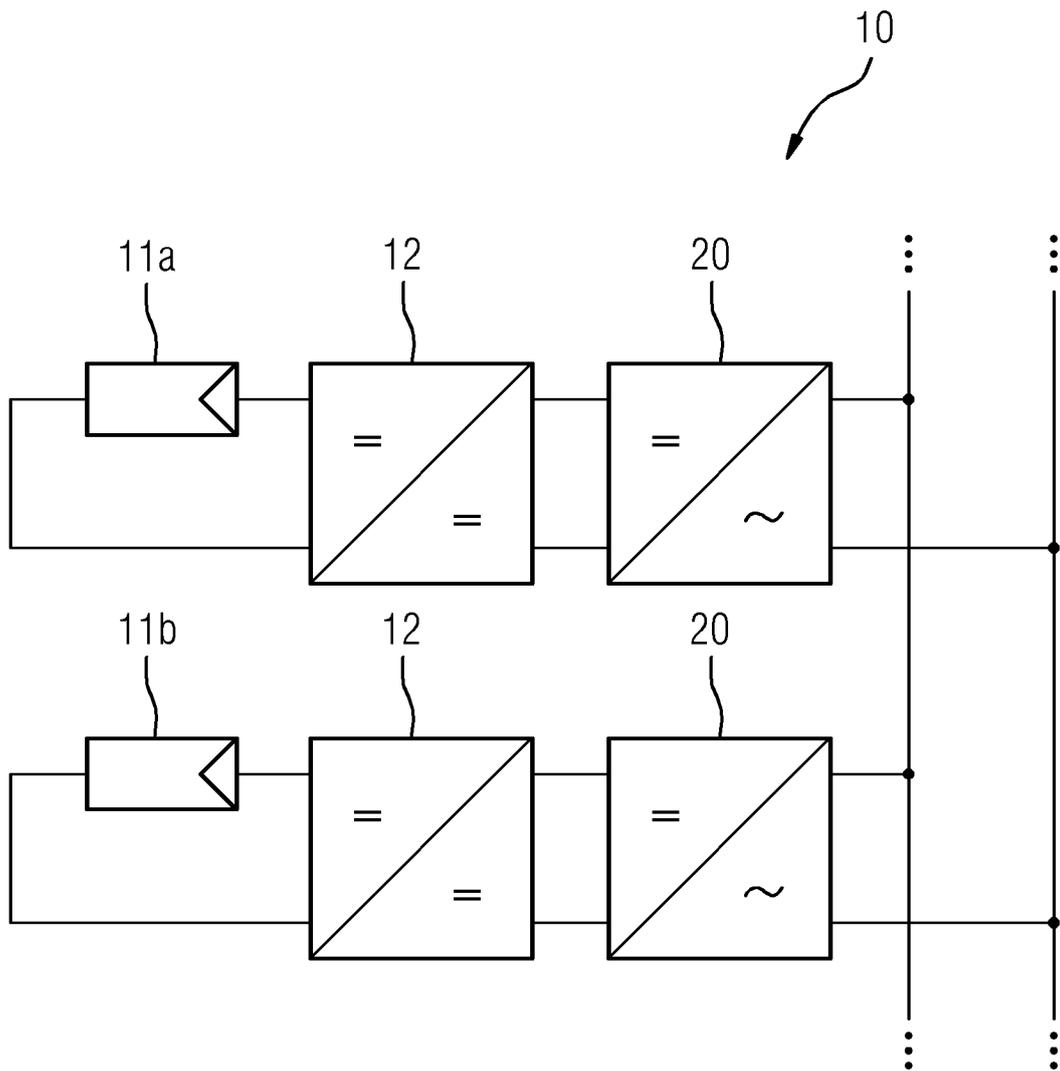


FIG 3

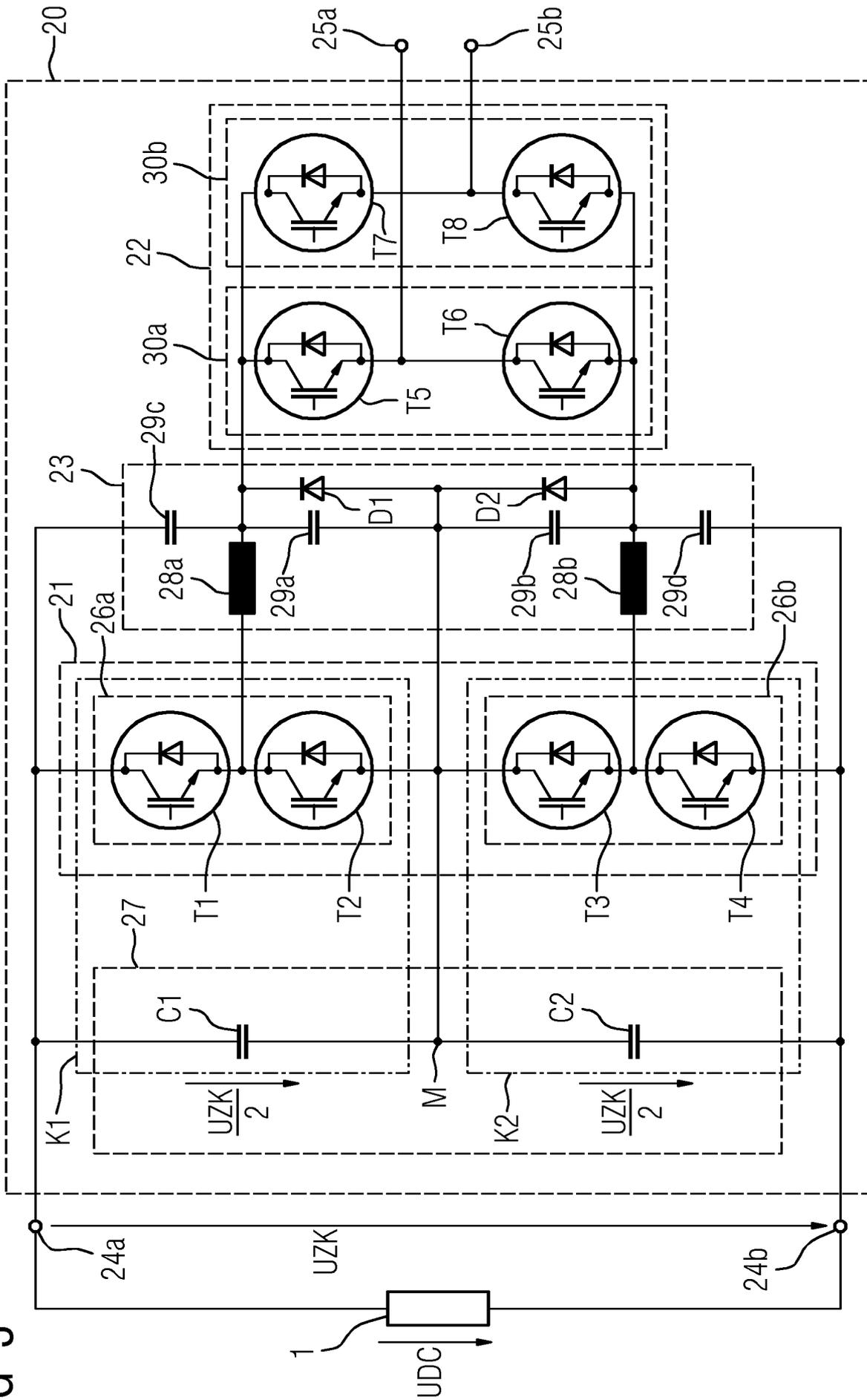


FIG 4

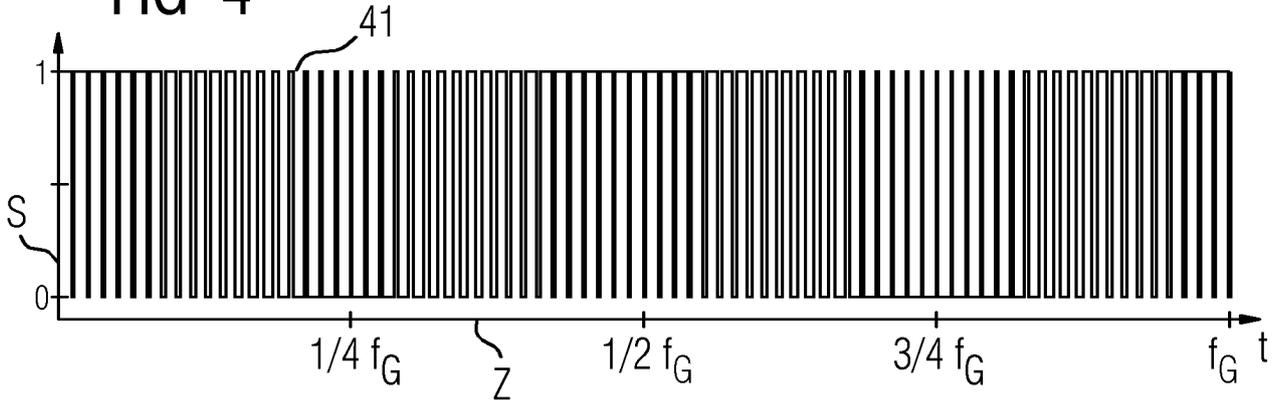


FIG 5

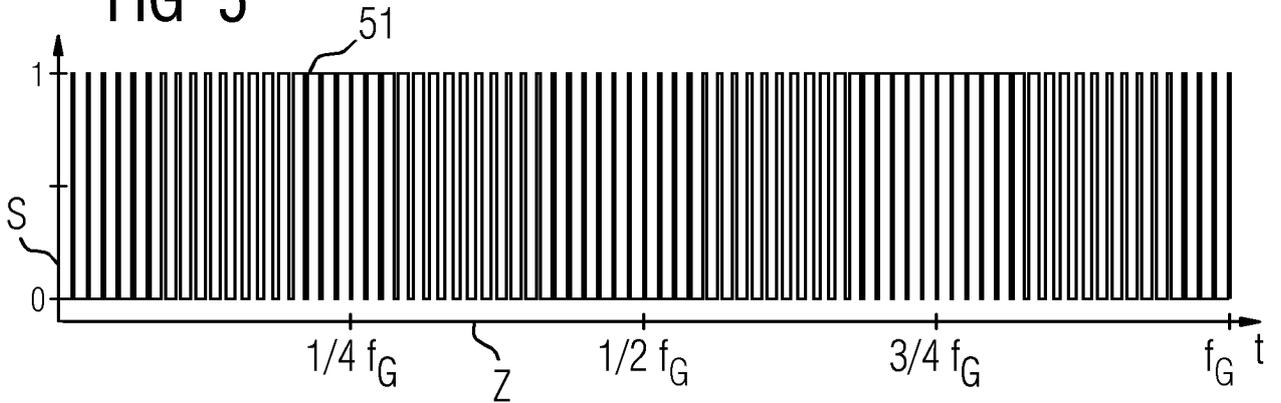


FIG 6

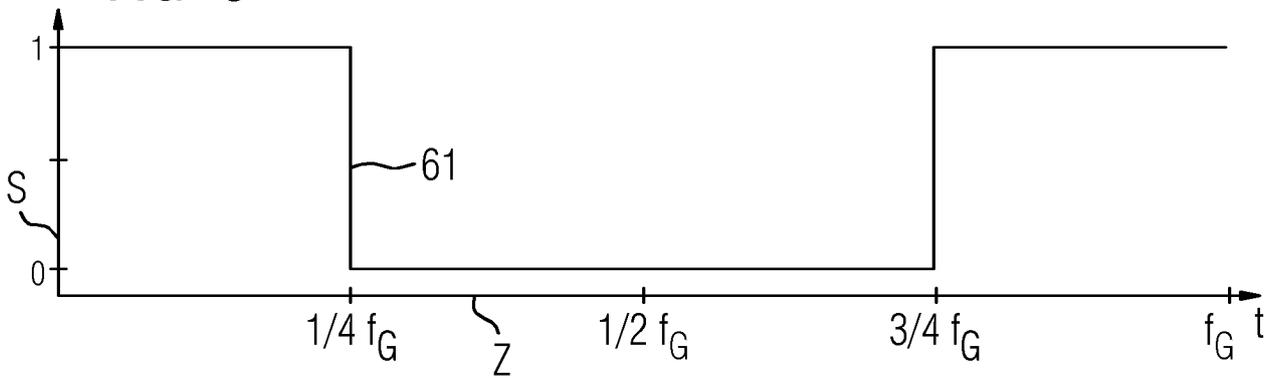


FIG 7

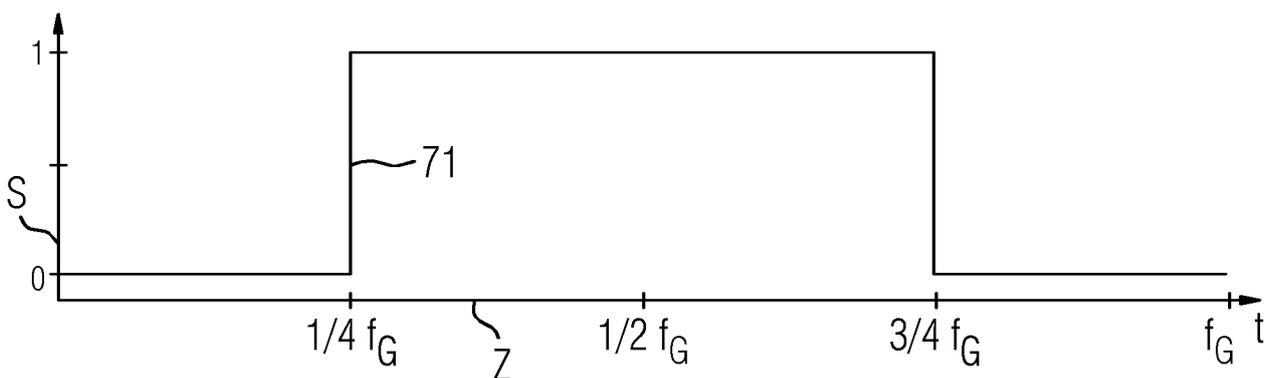


FIG 8

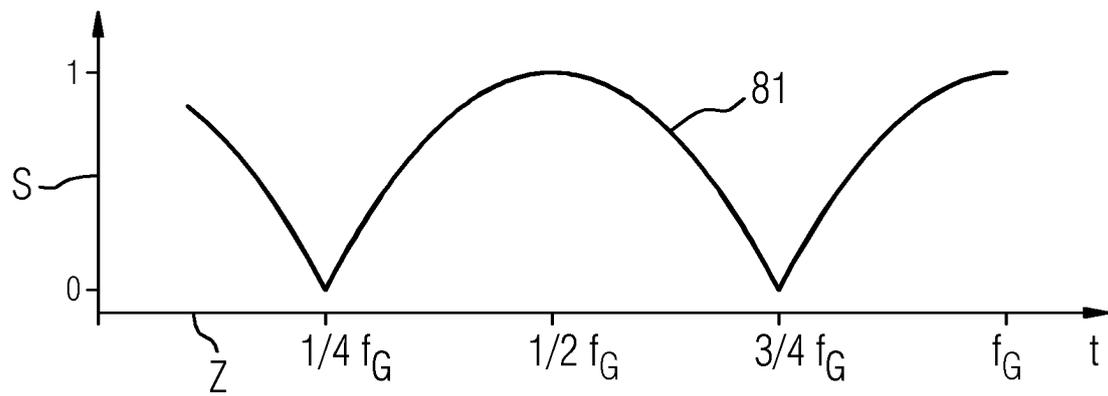
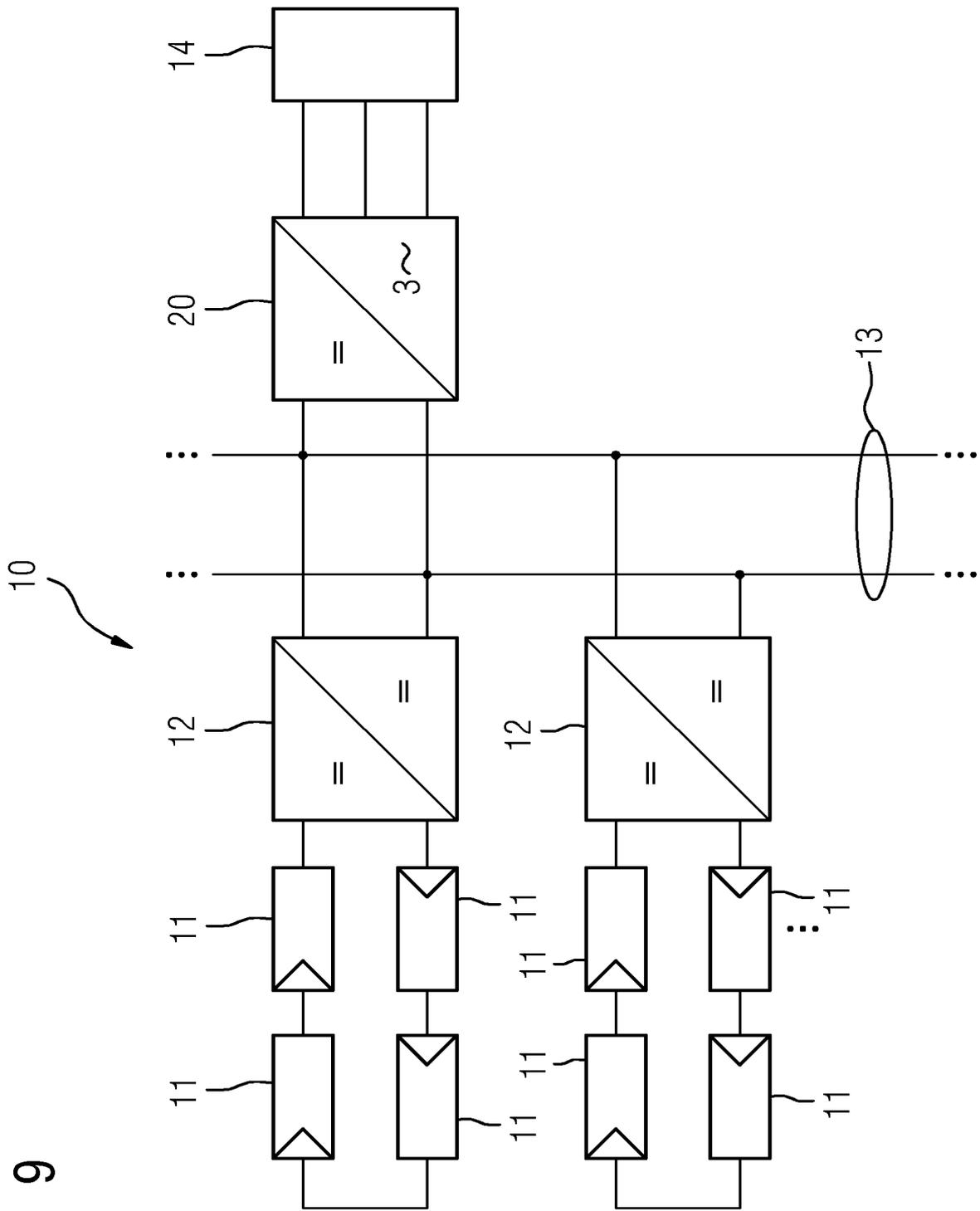


FIG 9



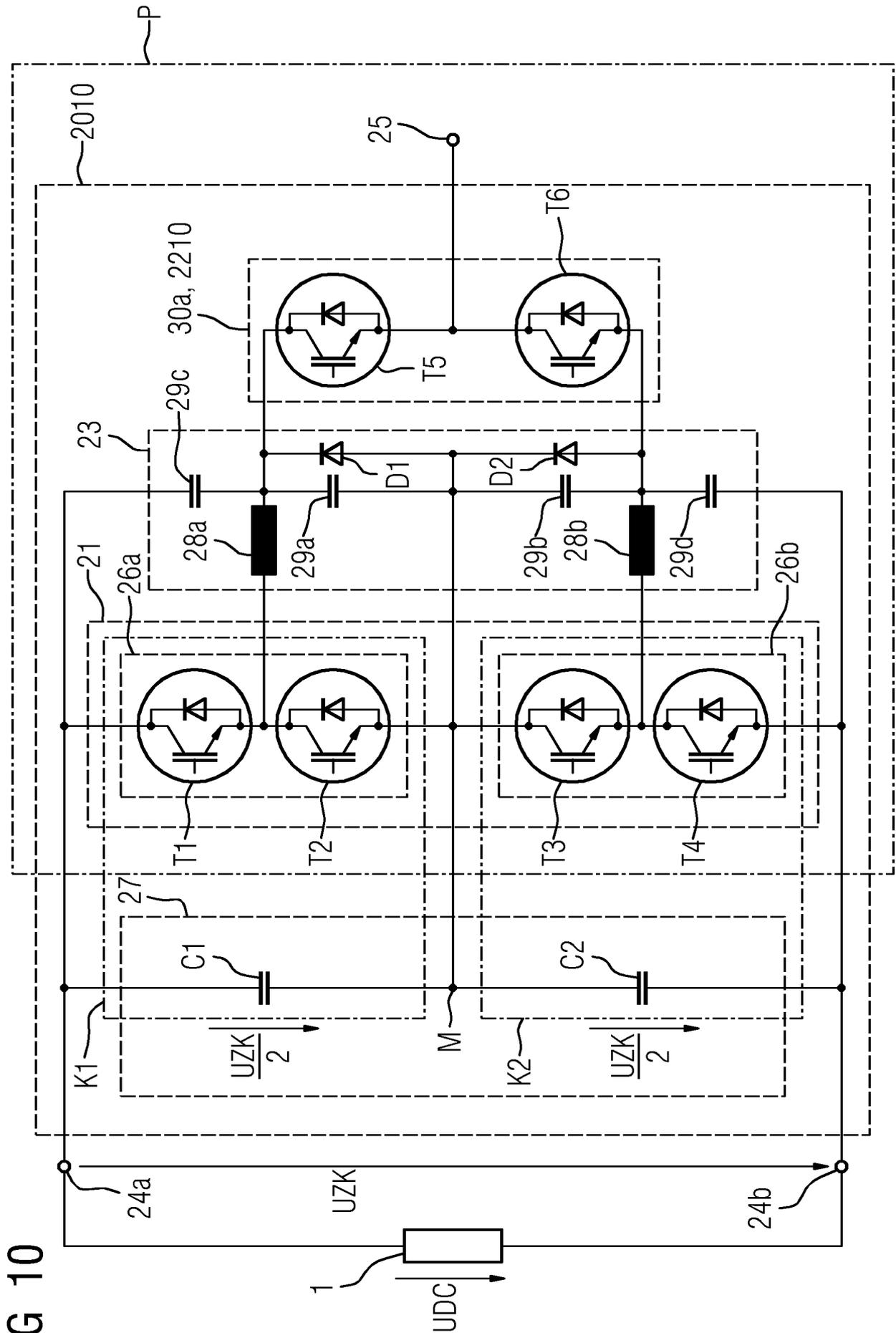


FIG 10

FIG 11

