

SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft
Eidgenössisches Institut für Geistiges Eigentum

(11) CH 704 586 B1

(51) Int. Cl.: H02M 5/458 (2006.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENT SCHRIFT**

| | |
|---|---|
| <p>(21) Anmeldenummer: 00373/11</p> <p>(22) Anmeldedatum: 04.03.2011</p> <p>(43) Anmeldung veröffentlicht: 14.09.2012</p> <p>(24) Patent erteilt: 15.11.2016</p> <p>(45) Patentschrift veröffentlicht: 15.11.2016</p> | <p>(73) Inhaber: ETH Zürich ETH Transfer, HG E 47-49 Rämistrasse 101 8092 Zürich ETH-Zentrum (CH)</p> <p>(72) Erfinder: Johann Walter Kolar, 8044 Zürich (CH) Thomas Friedli, 8044 Zürich (CH) Thiago Soeiro, 8051 Zürich (CH)</p> <p>(74) Vertreter: Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach 1771 8032 Zürich (CH)</p> |
|---|---|

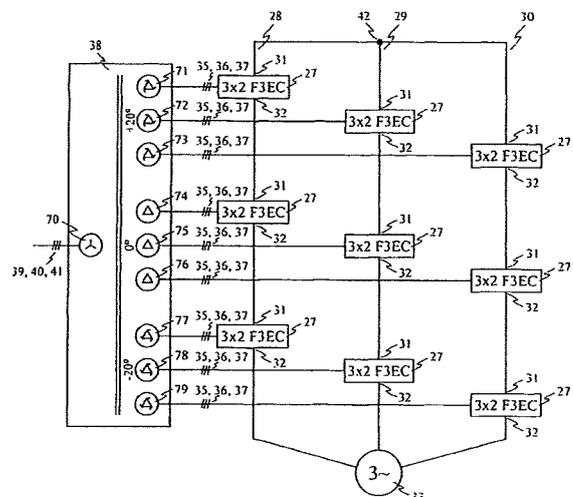
(54) **Modularer bidirektionaler AC/AC-Konverter ohne Energiezwischenspeicher.**

(57) Ein erfindungsgemässer modularer bidirektionaler AC/AC-Konverter, weist einen 6-n-Pulstransformator mit 3-n-k dreiphasigen Abgängen (71–79) auf einer Sekundärseite, sowie modular zu einem Umrichtersystem verschaltete 3-n-k bidirektionale AC/AC-Pulsumrichter (27) ohne Energiezwischenspeicher zur Speisung einer 3-k-phasigen Last (33), wobei

- die 3-n-k dreiphasigen Abgänge (71–79) zusammen ein symmetrisches 6-n-pulsiges Spannungssystem bilden,
- von jedem der AC/AC-Pulsumrichter (27) jeweils drei Eingangsleiter (35, 36, 37) an einen der dreiphasigen Abgänge (71–79) angeschlossen sind.

Dabei weist jeder der AC/AC-Pulsumrichter (27) jeweils als Eingangsstufe zur Verbindung der drei Eingangsleiter (35, 36, 37) mit einem speicherlosen Zwischenkreis einen dreiphasigen bidirektionalen Umrichter mit einer Sechsschalter-Brückenschaltung auf, und als Ausgangsstufe zur Verbindung des Zwischenkreises mit einem oberen und einem unteren Ausgangsleiter (31, 32) einen einphasigen bidirektionalen Umrichter mit einer Vierschalter-Brückenschaltung.

Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Ansteuerung eines modularen bidirektionalen AC/AC-Konverters sowie einen AC/AC-Pulsumrichter.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft das Gebiet der leistungselektronischen Schaltungen und bezieht sich auf einen modularen bidirektionalen AC/AC-Konverter ohne Energiezwischenspeicher unter Verwendung eines mehrpulsigen Transformators.

Stand der Technik

[0002] Gemäss dem Stand der Technik können zur Umformung eines Wechselspannungssystems (Netz) in ein Spannungs- und Stromsystem vorgegebbarer Frequenz und Amplitude AC/AC-Pulsumrichter ohne Energiezwischenspeicher eingesetzt werden. Für Niederspannungsanwendungen werden dabei zwei Schaltungstopologien als besonders vorteilhaft erachtet: der dreiphasige, pulsbreitenmodulierte Matrixumrichter und der dreiphasige Pulswechselrichter mit netzfrequent getakteter Eingangsstufe auch bekannt als «Fundamental Frequency Front End Converter». Eine detaillierte Beschreibung und Herleitung des Pulswechselrichters mit netzfrequent getakteter Eingangsstufe ist zu finden in

K. Göpflich, C. Rebbereh, and L. Sack, «Fundamental Frequency Front End Converter (F3E) – a DC-link Drive Converter without Electrolytic Capacitor», in Proc. 24th Power Electronic/Intelligent Motion/Power Quality Conference PCIM'03, May 20–22, 2003.

[0003] Im Folgenden wird der dreiphasige, pulsbreitenmodulierte Matrixumrichter mit 3 x 3 MC und der dreiphasige Pulswechselrichter mit netzfrequent getakteter Eingangsstufe mit 3 x 3 F3EC abgekürzt. Die Schalter des 3 x 3 MC werden zur Reduktion der Leitverluste üblicherweise mittels rückwärtssperrenden IGBTs (RB-IGBTs) implementiert.

[0004] Beide Umrichter (3 x 3 MC und 3 x 3 F3EC) ermöglichen einen sinusförmigen, geregelten Ausgangsstrom (Laststrom) und einen bidirektionalen Leistungsfluss. Nach Unterdrückung der schaltfrequenten Oberschwingungen durch ein im einfachsten Fall durch Filterkondensatoren und die innere Netzinduktivität gebildetes Eingangsfiler, erlaubt der 3 x 3 MC einen sinusförmigen, der jeweiligen Phasenspannung proportionalen Verlauf des Eingangstromes. Im Gegensatz dazu zeigt der 3 x 3 F3EC, bei Mittelung über eine Schaltperiode des Pulswechselrichters, einen blockförmigen Verlauf des Eingangstromes mit einem niederfrequenten Verzerrungsanteil, was im Allgemeinen als Nachteil zu erachten ist. Der Vorteil des 3 x 3 F3EC im Vergleich zum 3 x 3 MC liegt in seiner einfachen Modulation und sicheren Kommutierung und der Möglichkeit, Standard-Halbleitermodule zu verwenden, welche im Gegensatz zu den RB-IGBT Halbleitern in grosser Anzahl am Markt verfügbar sind.

[0005] Soll nun ein dreiphasiges Umrichtersystem mit höherer Betriebsspannung, beispielsweise für den Mittelspannungsbereich, realisiert werden, können im Sinne eines modularen Ansatzes mehrere Niederspannungsumrichter geeignet verschaltet werden. Dieses modulare Schaltungskonzept wird für einen dreiphasigen Mittelspannungsumrichter zur Speisung einer dreiphasigen stromeinprägenden (induktiven) Last (z.B. dreiphasiger elektrischer Motor) basierend auf einer Verschaltung von Niederspannungs-Matrixumrichtern aufgezeigt in

E. Yamamoto, H. Hara, T. Uchino, T. J. Kume, J. K. Kang, and H. P. Krug, «Development of Matrix Converter and its Applications in Industry», 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON'09, Presentation, Nov. 3–5, 2009.

[0006] Damit ist eine Erhöhung der Betriebsspannung des dadurch resultierenden Umrichtersystems im Vergleich zu den einzelnen AC/AC-Pulsumrichtern möglich. Die resultierende Umrichtertopologie ist in Fig. 1 dargestellt und besteht aus einer Sternschaltung von jeweils drei, pro Lastphase 1, 2, 3 auf ihrer Ausgangsseite in Serie geschalteten Matrixumrichtern 4 zur Speisung einer dreiphasigen Last 5 aus dem dreiphasigen Netz mit den Netzphasen 6, 7, 8. Die Netzanbindung erfolgt dabei über einen 18-Pulstransformator 9. Im Gegensatz zum 3 x 3 MC mit drei Eingangs- und Ausgangsleitern ist nunmehr ein Matrixumrichter 4 mit drei Eingangsleitern 10, 11, 12 (dreiphasiger Eingang) und zwei Ausgangsleitern 13, 14 (einphasiger Ausgang) nötig, welcher nachfolgend mit 3 x 2 MC bezeichnet wird und dessen Schaltungstopologie in Fig. 2 abgebildet ist. Zur Reduktion der Leitverluste ist in Analogie zum 3 x 3 MC auch der 3 x 2 MC vorzugsweise mittels RB-IGBTs zu implementieren. Dazu werden jeweils zwei der insgesamt zwölf antiseriell verbundenen Schalter mit antiparallelen Dioden 15, 16 durch eine Gegenparallelschaltung von zwei RB-IGBTs ersetzt. Für den 3 x 2 MC sind dann zwölf IGBTs und zwölf Dioden oder zwölf RB-IGBTs nötig.

[0007] Der 18-Pulstransformator 9 ist mit einer dreiphasigen in Stern geschalteten Wicklung 17 auf der Primärseite und neun von der Primärseite und untereinander galvanisch getrennten dreiphasigen Abgängen auf der Sekundärseite 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 mit in Dreieck und Polygon geschalteten Wicklungen implementiert. Die insgesamt neun 3 x 2 MC können dabei als in einer Matrix mit drei Zeilen und drei Spalten angeordnet gedacht werden, wobei die drei Spalten den Lastphasen 1, 2, 3 entsprechen. Von oben nach unten beginnend speisen obere drei Abgänge 18, 19, 20 die drei in der oberen, mittlere drei Abgänge 21, 22, 23 die drei in der mittleren und untere drei Abgänge 24, 25, 26 die drei in der unteren Zeile angeordneten 3 x 2 MC. Jeweils drei aufeinanderfolgende Transformatorabgänge auf der Sekundärseite verfügen über die gleiche Wicklungskonfiguration. Die Wicklungen der oberen drei Abgänge 18, 19, 20 sind in Polygon geschaltet mit einer Phasenlage des Spannungszeigers von +20° bezüglich der in Dreieck geschalteten Wicklungen der mittleren drei Abgänge 21, 22, 23. Die Wicklungen der unteren drei Abgänge 24, 25, 26 sind ebenfalls in Polygon geschaltet, aber mit einer Phasenlage des Spannungszeigers von -20° bezüglich der mittleren drei Abgänge 21, 22, 23.

[0008] Der 3 x 2 MC ermöglicht prinzipiell einen sinusförmig pulsbreitenmodulierten Eingangstrom, wobei die Modulationsverfahren aufwändig sind, um eine hinreichend sichere Kommutierung zu ermöglichen, da die Schaltungstopologie über

keinen natürlichen Freilaufpfad verfügt. Aufgrund des einphasigen Ausgangs und der damit verbundenen Leistungspulsation mit doppelter elektrischer Ausgangsfrequenz resultiert in Abhängigkeit der Eingangs- und Ausgangsfrequenz und des Steuerverfahrens eingangsseitig typischerweise eine Verzerrung der Eingangsströme der 3 x 2 MC, welche in den Strömen der Sekundärwicklungen des 18-Pulstransformators wiederzufinden ist. Dem 18-Pulstransformator kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Einerseits stellt er eine galvanisch getrennte Anbindung des Umrichters an das Wechselspannungsnetz sicher und erlaubt eine galvanisch getrennte Verschaltung der einzelnen, auf unterschiedlichem Potential liegenden 3 x 2 MC. Andererseits resultiert aufgrund des oben beschriebenen unterschiedlichen Phasenversatzes der Spannungszeiger auf der Sekundärseite, bei im Mittel symmetrischer Belastung der neun dreiphasigen Abgänge 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 des Transformators, in den Primärwicklungen 17 und damit auch im Netzstrom eine Reduktion der auf der Sekundärseite injizierten Stromharmonischen der 3 x 2 MC.

Darstellung der Erfindung

[0009] Aufgabe der Erfindung ist ein modularer bidirektionaler AC/AC-Konverter, welcher einen geringeren Realisierungsaufwand als das in Fig. 1 gezeigte System aufweist, die Anwendung von einfachen und sicheren Modulationsverfahren ermöglicht und dabei kostengünstig herstellbar ist.

[0010] Diese Aufgabe löst ein modularer bidirektionaler AC/AC-Konverter mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1.

[0011] Der modulare bidirektionaler AC/AC-Konverter weist also einen 6-n-Pulstransformator mit einem dreiphasigen Eingang auf einer Primärseite auf, und 3-n-k dreiphasige, untereinander und von der Primärseite galvanisch getrennte Abgänge auf einer Sekundärseite, wobei n und k natürliche Zahlen sind mit $n = \{2, 3, 4, \dots\}$ und $k = \{1, 2, 3, \dots\}$, sowie modular zu einem Umrichtersystem verschaltete 3-n-k bidirektionale AC/AC-Pulsumrichter ohne Energiezwischenpeicher zur Speisung einer 3-k-phasigen Last, wobei

- auf der Primärseite des 6-n-Pulstransformators drei Eingangsphasenleiter mit Netzphasenleitern verbunden sind und ein Spannungssystem auf der Primärseite bilden, also ein dreiphasiges Netz, und die 3-n-k dreiphasigen Abgänge zusammen ein symmetrisches 6-n-pulsiges Spannungssystem bilden,
- die insgesamt 3-n-k AC/AC-Pulsumrichter bezüglich ihrer Schaltungstopologie als in einer Matrix mit n Zeilen und 3-k Spalten angeordnet gedacht werden können, wobei jede der 3-k Spalten jeweils einer Lastphase des resultierenden Umrichtersystems entspricht (und umgekehrt);
- von jedem der AC/AC-Pulsumrichter jeweils drei Eingangsleiter an einen der dreiphasigen Abgänge angeschlossen sind, wobei die 3-k AC/AC-Pulsumrichter in derselben Zeile und in unterschiedlichen Spalten genau mit denjenigen 3-k dreiphasigen Abgängen verbunden sind, welche untereinander dieselbe Phasenlage des Spannungszeigers aufweisen.

[0012] Dabei weist jeder der AC/AC-Pulsumrichter jeweils als Eingangsstufe zur Verbindung der drei Eingangsleiter mit einem speicherlosen Zwischenkreis einen dreiphasigen bidirektionalen Umrichter mit einer Sechsschalter-Brückenschaltung auf, und als Ausgangsstufe zur Verbindung des Zwischenkreises mit einem oberen und einem unteren Ausgangsleiter einen einphasigen bidirektionalen Umrichter mit einer Vierschalter-Brückenschaltung.

[0013] Die Eingangsstufe kann auch als bidirektionaler, aktiver Gleichrichter oder Wechselrichter oder als Brückenschaltung mit drei Brückenzeigen oder als Sechsschalter-Gleichrichter respektive Sechsschalter-Wechselrichter oder als Sechsschalter-Brückenschaltung bezeichnet werden. Die Ausgangsstufe kann auch als Brückenschaltung mit zwei Halbbrückenzeigen oder als Vollbrückenschaltung oder als einphasiger Zweipunkt-Wechselrichter bezeichnet werden.

[0014] Mit der verwendeten Topologie der AC/AC-Pulsumrichter wird der Einsatz von Standard-Halbleitermodulen ermöglicht, was wiederum eine kostengünstige Herstellung erlaubt. Die AC/AC-Pulsumrichter können in Serie geschaltet werden und somit als Ganzes mit einer höheren Betriebsspannung als die einzelnen AC/AC-Pulsumrichter arbeiten.

[0015] Gemäss einem Aspekt der Erfindung weisen die AC/AC-Pulsumrichter jeweils eine Zusatzschaltung auf, mit welcher wahlweise einer der drei Eingangsleiter mit einem der beiden Ausgangsleiter verbindbar ist. Damit stehen für die Ausgangsleiter drei Spannungspotentiale zur Verfügung. Vorzugsweise weist die Zusatzschaltung drei bidirektionale Schalter auf, mit welchen wahlweise einer der drei Eingangsleiter mit einem Stromknotenpunkt verbindbar ist, und zwei weitere bidirektionale Schalter, mit welchen der Stromknotenpunkt wahlweise mit einem der beiden Ausgangsleiter verbindbar ist. Diese Variante des AC/AC-Pulsumrichters kann auch unabhängig vom vorgängig beschriebenen modularen Konverter realisiert und eingesetzt werden.

[0016] In einem Verfahren zur Ansteuerung des modularen bidirektionalen AC/AC-Konverters erfolgt in den 3-n-k bidirektionalen AC/AC-Pulsumrichtern

- die Umschaltung der Schalter der Sechsschalter-Brückenschaltung der Eingangsstufen mit der Eingangsfrequenz der Spannungen an den Eingangsleitern respektive der Spannungen an der Primärseite des 6-n-Pulstransformators; und

- die Steuerung der Schalter der Vierschalter-Brückenschaltung der Ausgangsstufen zum Erzeugen einer sinusförmigen Ausgangsspannung zwischen den Ausgangsleitern aus der Spannung des Zwischenkreises durch Pulsbreitenmodulation.

[0017] Vorzugsweise erfolgt zudem die Umschaltung der Schalter der Eingangsstufe bei Zwischenkreisstrom null und demzufolge synchronisiert mit einem Schalten der Ausgangsstufe. Damit ist eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades möglich.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0018] Im Folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen, welche in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt sind, näher erläutert. Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen. Es zeigen jeweils schematisch:

- Fig. 1: Eine bekannte Umrichtertopologie zur Speisung einer dreiphasigen Last 5 aus einem dreiphasigen Wechselspannungsnetz bestehend aus neuen 3 x 2 MC 4 und einem 18-Pulstransformator.
- Fig. 2: Schaltungstopologie eines bekannten 3 x 2 MC 4 mit drei Eingangsleitern 10, 11, 12 und zwei Ausgangsleitern 13, 14.
- Fig. 3: Eine modulare Umrichtertopologie gemäss der Erfindung zur Speisung einer dreiphasigen Last 33 aus einem dreiphasigen Wechselspannungsnetz, aufweisend eine Sternschaltung von jeweils drei pro Lastphase 28, 29, 30 in Serie geschalteten 3 x 2 F3EC 27 mit drei Eingangsleitern 35, 36, 37 und zwei Ausgangsleitern 31, 32, welche über einen 18-Pulstransformator 38 mit den drei Netzphasenleitern 39, 40, 41 verbunden sind.
- Fig. 4: Schaltungstopologie eines 3 x 2 F3EC 27 gemäss der Erfindung mit drei Eingangsleitern 35, 36, 37 und zwei Ausgangsleitern 31, 32.
- Fig. 5: Resultierende Ansteuersignale (S1–S10) 61–69 aller zehn Schalter eines 3 x 2 F3EC bei gegebenen Eingangsphasenspannungen 57, 58, 59 und tiefpassgefilterter Ausgangsphasenspannung 60.
- Fig. 6: Simulierte charakteristische Kurvenverläufe der in Fig. 3 vorgeschlagenen Umrichtertopologie.
- Fig. 7: Alternative modulare Umrichtertopologie zur Speisung einer dreiphasigen Last 33 aus einem dreiphasigen Wechselspannungsnetz, bestehend aus sechs 3 x 2 F3EC 27 und einem 12-Pulstransformator 89.
- Fig. 8: Alternative modulare Umrichtertopologie zur Speisung einer Last mit zwei getrennten (Teil-)Lasten 113 pro Lastphase 28, 29, 30 aus einem dreiphasigen Wechselspannungsnetz, bestehend aus sechs 3 x 2 F3EC 27 und einem 12-Pulstransformator 89.
- Fig. 9: Simulierte charakteristische Kurvenverläufe der in Fig. 7 gezeigten Umrichtertopologie.
- Fig. 10: Alternative dreiphasige Last 106 mit insgesamt sechs Anschlusspunkten 107, 108, 109, 110, 111, 112.
- Fig. 11: Alternative Implementierung des 3 x 2 F3EC, bezeichnet mit 3 x 2 F3EC-3L, welche für die Ausgangsleiter 31 und 32 drei unterschiedliche Potentiale zur Verfügung stellt.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0019] Eine Ausführungsform für die Umrichtertopologie ist in Fig. 3 dargestellt. Dabei werden die Matrixumrichter mit drei Eingangsleitern und zwei Ausgangsleitern (3 x 2 MC) 4 der Fig. 1 durch einphasige AC/AC-Pulsumrichter 27 (pulsbreitenmodulierte Vollbrückenschaltung) mit dreiphasiger, netzfrequent getakteter Eingangsstufe, wie in Fig. 4 gezeigt, ersetzt, welche im Folgenden als «3 x 2 F3EC» 27 bezeichnet werden. Damit lässt sich die Anzahl der Halbleiter von 12 IGBTs und 12 Dioden oder 12 RB-IGBTs für jeden 3 x 2 MC auf 10 IGBTs und 10 Dioden oder 10 rückwärtsleitende IGBTs (RC-IGBTs) für jeden 3 x 2 F3EC reduzieren. Die resultierende Umrichtertopologie besteht demnach aus einer Sternschaltung von jeweils drei pro Lastphase 28, 29, 30 über ihre beiden Ausgangsleiter 31, 32 in Serie geschalteten 3 x 2 F3EC 27 zur Speisung einer dreiphasigen Last 33 aus einem dreiphasigen Wechselspannungsnetz. Auf einer Eingangsseite der 3 x 2 F3EC erfolgt eine Spannungseinprägung über Filterkondensatoren 34. Jeweils drei Eingangsleiter 35, 36, 37 der einzelnen 3 x 2 F3EC sind über einen 18-Pulstransformator 38 sekundärseitig untereinander galvanisch getrennt verschaltet und an das dreiphasige Netz mit den drei Netzphasenleitern 39, 40, 41 angebunden. Die insgesamt neun 3 x 2 F3EC können dabei als in einer Matrix mit drei Zeilen (obere, mittlere, untere) und drei Spalten (linke, mittlere, rechte) angeordnet gedacht werden, wobei die drei Spalten den Lastphasen 28, 29, 30 entsprechen. Obere Ausgangsleiter 31 der drei 3 x 2 F3EC in der oberen Zeile sind auf einen gemeinsamen Sternpunkt 42 geführt. Aufgrund der spaltenweisen Serienschaltung sind dann untere Ausgangsleiter 32 der drei 3 x 2 F3EC in der oberen Zeile spaltenweise mit den oberen Ausgangsleitern 31 der drei 3 x

2 F3EC in der mittleren Zeile verbunden. Sodann sind die unteren Ausgangsleiter 32 der drei 3 x 2 F3EC in der mittleren Zeile spaltenweise mit den oberen Ausgangsleitern 31 der drei 3 x 2 F3EC in der unteren Zeile verschaltet. Schliesslich sind die unteren Ausgangsleiter 32 der drei 3 x 2 F3EC in der unteren Zeile mit der dreiphasigen Last verbunden.

[0020] Die dreiphasige Eingangsstufe des 3 x 2 F3EC (siehe Fig. 4) ist identisch mit der eines dreiphasigen, aktiven, bidirektionalen Sechsschalter-Gleichrichters und ist vorzugsweise aus drei vertikal angeordneten Halbbrückenzeigen aufgebaut.

[0021] Dabei wird zwischen einem linken, mittleren und rechten Halbbrückenzeig unterschieden. Jeder Halbbrückenzeig besteht aus einer Serienschaltung von zwei Schaltern, wobei jeder Schalter mit einer antiparallel angeordneten Freilaufdiode versehen ist. Der obere Schalter des Zweiges ist jeweils mit einer auf hohem Potential liegenden oberen Zwischenkreisschiene 43 und der untere Schalter jeweils mit einer auf tiefem Potential liegenden unteren Zwischenkreisschiene 44 verbunden. Wie eingangs erwähnt, ist im Zwischenkreis kein Energiespeicher vorhanden. Ein erster Eingangsleiter 35 ist mit dem linken Halbbrückenzeig der Eingangsstufe zwischen einem oberen Schalter 45 mit einem Steuersignal S1 und einem unteren Schalter 46 mit einem Steuersignal S2 verbunden. Entsprechend ist ein zweiter Eingangsleiter 36 mit dem mittleren Halbbrückenzeig der Eingangsstufe zwischen einem oberen Schalter 47 mit einem Steuersignal S3 und einem unteren Schalter 48 mit einem Steuersignal S4 verbunden. Schliesslich ist ein dritter Eingangsleiter 36 mit dem rechten Halbbrückenzeig der Eingangsstufe zwischen einem oberen Schalter 49 mit einem Steuersignal S5 und einem unteren Schalter 50 mit einem Steuersignal S6 verbunden. Aufgrund der Polarität der Dioden sind nur positive Zwischenkreisspannungen 51 möglich, wohingegen der Zwischenkreisstrom 52 beide Polaritäten annehmen kann. Die Ausgangsstufe des 3 x 2 F3EC ist mittels zwei Halbbrückenzeigen implementiert, welche identisch zu den eben beschriebenen Halbbrückenzeigen der Eingangsstufe aufgebaut sind und entspricht einer Vollbrückenschaltung. Die beiden Halbbrückenzeige werden beispielhaft als vertikal angeordnet angenommen, wobei zwischen dem linken und rechten Halbbrückenzeig unterschieden wird. Die oberen Schalter der Halbbrückenzeige sind wiederum mit der auf hohem Potential liegenden Zwischenkreisschiene 43 und die unteren Schalter mit der auf tiefem Potential liegenden Zwischenkreisschiene 44 verbunden. Der erste oder obere Ausgangsleiter 31 ist mit dem linken Halbbrückenzeig der Ausgangsstufe zwischen einem oberen Schalter 53 mit einem Steuersignal S7 und einem unteren Schalter 54 mit einem Steuersignal S8 verbunden. Entsprechend ist der zweite oder untere Ausgangsleiter 32 mit dem rechten Halbbrückenzeig der Ausgangsstufe zwischen einem oberen Schalter 55 mit einem Steuersignal S9 und einem unteren Schalter 56 mit einem Steuersignal S10 verbunden.

[0022] Die Umschaltung der Eingangsstufe des 3 x 2 F3EC erfolgt mit der Eingangsfrequenz (netzfrequent) so, dass für beide Richtungen des Zwischenkreisstromes 52 die momentan grösste verkettete Eingangsspannung in den Zwischenkreis (zwischen der oberen und der unteren Zwischenkreisschiene 43, 44) geschaltet wird. Demnach werden immer gerade die Schalter über die Steuersignale S1–S6 zu den momentan leitenden Dioden der Eingangsstufe eingeschaltet. Ist der Wert des Steuersignals eins, ist der entsprechende Schalter eingeschaltet; ist der Wert null, so ist er ausgeschaltet. Abgesehen von einer möglichen Ausnahme während des Umschaltintervalls sind gleichzeitig immer nur zwei Schalter der Eingangsstufe eingeschaltet und bleiben während einem Drittel der Periodendauer der Eingangsspannung (120°) im eingeschalteten Zustand. Beide Schalter eines Brückenzeiges sind nie gleichzeitig eingeschaltet. Vorzugsweise wird die Umschaltung der Eingangsstufe so mit dem Schalten der Ausgangsstufe synchronisiert, dass die Umschaltung der Eingangsstufe gerade dann erfolgt, wenn der Zwischenkreisstrom 52 null ist, d.h. der Laststrom zwischen den Ausgangsleitern 31, 32 sich über die Schalter und Dioden der Ausgangsstufe schliesst. Dies ermöglicht ein verlustminimales Schalten der Eingangsstufe bei null Strom und das Einfügen einer Sicherheitszeit zwischen dem Ausschalten eines Schalters und dem Einschalten des nächsten Schalters der Eingangsstufe. Damit wird ein Kurzschliessen von zwei Eingangsphasen aufgrund von Verzerrungen der Netzspannung oder Messfehler gezielt verhindert.

[0023] Für die Steuerung der Ausgangsstufe kann auf bekannte Modulationsverfahren für einphasige Pulswechselrichter basierend auf der Vollbrückenschaltung zurückgegriffen werden. Dabei wird der eine Schalter eines Halbbrückenzeiges typischerweise mit dem invertierten Pulsmuster des anderen Schalters desselben Halbbrückenzeiges angesteuert. Für den Umschaltvorgang innerhalb eines Brückenzeiges ist demnach eine Sicherheitszeit vorzusehen, um einen Brückenkurzschluss zu unterbinden. Damit kann unabhängig vom Momentanwert der Zwischenkreisspannung (51) zwischen den Ausgangsleitern (31, 32), nach Filterung von schaltfrequenten Harmonischen, ein einphasiges Sinusspannungssystem mit einstellbarer Amplitude, Phasenlage und Grundfrequenz gebildet werden, wobei die zwei Schalter desselben Brückenzeiges (53, 54; 55, 56) nie gleichzeitig eingeschaltet sind.

[0024] Zur Pulsmustergenerierung der Ausgangsstufe können beispielhaft zwei symmetrisch-dreieckförmige, mittelwertfreie, um 180° phasenversetzte Trägersignale c_1 und c_2 mit einer auf eins normierten Amplitude verwendet werden, welche mit einer Modulationsfunktion m verglichen werden. Dabei wird c_1 für den linken Halbbrückenzeig der Ausgangsstufe und c_2 für den rechten Halbbrückenzeig der Ausgangsstufe verwendet. Der Kehrwert der Periodendauer der Trägersignale bestimmt die Schaltfrequenz der Ausgangsstufe. Für die Berechnung von m werden der Momentanwert der Zwischenkreisspannung (u) und die gewünschte Amplitude (\hat{U}_2), Frequenz (f_2) und Phasenlage (φ_2) der Ausgangsspannung des 3 x 2 F3EC benötigt. Die minimale Zwischenkreisspannung ist eineinhalbmal so gross wie die Phasenspannung (\hat{U}_1) am Eingang und definiert damit die Amplitude der Ausgangsspannung für Sinusmodulation. Die Modulationsfunktion m wird demzufolge wie folgt berechnet.

$$m = \frac{\hat{U}_2}{u} \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad \hat{U}_2 = \frac{3}{2} M \hat{U}_1 \quad M = [0 \dots 1]$$

M definiert dabei den Aussteuergrad und damit die Amplitude der Ausgangsspannung. Ist m grösser oder gleich dem Betrag des Trägersignals c_1 , so ist der obere Schalter 53 des linken Brückenweiges der Ausgangsstufe eingeschaltet (Steuersignal S7 = 1) und der untere Schalter 54 ausgeschaltet (Steuersignal S8 = 0). Ist m hingegen kleiner als der Betrag von c_1 , ist entsprechend der Schalter 53 ausgeschaltet (Steuersignal S7 = 0) und der Schalter 54 eingeschaltet (Steuersignal S8 = 1). Für den rechten Halbbrückenweig der Ausgangsstufe gilt dieselbe Ansteuerlogik in umgekehrter Weise. Ist der Betrag von m grösser oder gleich dem Betrag des Trägersignals c_2 , so ist der obere Schalter 55 des rechten Brückenweiges der Ausgangsstufe ausgeschaltet (Steuersignal S9 = 0) und der untere Schalter 56 eingeschaltet (Steuersignal S10 = 1). Ist der Betrag von m hingegen kleiner als der Betrag von c_2 , ist entsprechend der Schalter 55 eingeschaltet (Steuersignal S9 = 1) und der Schalter 56 ausgeschaltet (Steuersignal S10 = 0). Ein gleichzeitiges Leiten (Brückenkurzschluss) der Schalter 53, 54 oder der Schalter 55, 56 während des Umschaltvorgangs kann beispielsweise durch Verzögerung des Umschaltvorgangs der Steuersignale von null auf eins um eine gewünschte Sicherheitszeit und ein instantes Umschalten der Steuersignale von eins auf null vermieden werden. Eine sichere Kommutierung des 3 x 2 F3EC ist aufgrund seiner Schaltungstopologie und des einfachen Steuerfahrens immer gewährleistet. Fig. 5 zeigt beispielhaft die Eingangsphasenspannungen 57, 58, 59, die tiefpassgefilterte Ausgangsspannung 60 und die zugehörigen Ansteuer-signale (S1–S10) 61–69 aller zehn Schalter eines 3 x 2 F3EC während einer Periode der Eingangsspannungen und einem Aussteuergrad der Ausgangsstufe von $M = 0.8$. Es wird dabei von einer elektrischen Frequenz am Eingang von 50 Hz, welche der Netzfrequenz auf der Primärseite des 18-Pulstransformators entspricht, und einer elektrischen Frequenz am Ausgang von 25 Hz ausgegangen. Um eine Visualisierung der Pulsmuster zu ermöglichen, wird für die Ausgangsstufe eine Schaltfrequenz von lediglich 450 Hz verwendet; in einer typischen Anwendung liegt die Pulsfrequenz in einem Bereich von 500 Hz bis 10 kHz oder mehr.

[0025] Der 18-Pulstransformator 38 ist beispielhaft mit einer dreiphasigen in Stern geschalteten Wicklung 70 auf der Primärseite und neun von der Primärseite und untereinander galvanisch getrennten dreiphasigen Abgängen auf der Sekundärseite 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79 mit in Dreieck und Polygon geschalteten Wicklungen implementiert. Von oben nach unten beginnend speisen die oberen drei Abgänge 71, 72, 73 die drei in der oberen, die mittleren drei Abgänge 74, 75, 76 die drei in der mittleren und die unteren drei Abgänge 77, 78, 79 die drei in der unteren Zeile angeordneten 3 x 2 F3EC. Jeweils drei aufeinanderfolgende Transformatorabgänge auf der Sekundärseite verfügen über die gleiche Wicklungskonfiguration. Die Wicklungen der oberen drei Abgänge 71, 72, 73 sind in Polygon geschaltet mit einer Phasenlage des Spannungszeigers von $+20^\circ$ bezüglich der in Dreieck geschalteten Wicklungen der mittleren drei Abgänge 74, 75, 76. Die Wicklungen der unteren drei Abgänge 77, 78, 79 sind ebenfalls in Polygon geschaltet mit einer Phasenlage des Spannungszeigers von -20° bezüglich der mittleren drei Abgänge 74, 75, 76. Für die vorgeschlagene Umrichtertopologie kommt dem 18-Pulstransformator eine besondere Bedeutung zu. Einerseits stellt er eine galvanisch getrennte Anbindung des Umrichters an das Wechselspannungsnetz sicher, wie dies im Mittelspannungsbereich oftmals gefordert wird, und erlaubt eine galvanisch getrennte Verschaltung der einzelnen, auf unterschiedlichem Potential liegenden 3 x 2 F3EC. Andererseits werden die niederfrequenten Verzerrungen der Ströme auf der Sekundärseite aufgrund der netzfrequenten Taktung der Eingangsstufen der neun 3 x 2 F3EC durch den 18-Pulstransformator, unter der Bedingung einer symmetrischen Belastung der Abgänge auf der Sekundärseite 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, in den Strömen auf der Primärseite reduziert. Idealerweise treten in einem symmetrischen 18-Pulssystem in den Strömen primärseitig erst Harmonische ab der 17. Ordnung der Grundfrequenz (Netzfrequenz) auf. Es resultiert in den Netzphasenleitern 39, 40, 41 eine Stromqualität, welche für viele industrielle Anwendungen ausreichend ist. Damit kann auf eine Implementierung mittels 3 x 2 MC verzichtet werden, welche in ihren Eingangsleitern 10, 11, 12 sinusförmige Ströme mit geringeren niederfrequenten Verzerrungen ermöglichen. Simulationsergebnisse der Netzphasenspannungen 80, 81, 82, der Netzphasenströme 83, 84, 85 und der Lastphasenströme 86, 87, 88 für die in Fig. 3 vorgeschlagene Umrichtertopologie für eine symmetrische, dreiphasige, stromeinprägende (induktive) Last sind in Fig. 6 gezeigt.

[0026] Die erfindungsgemässe Schaltungstopologie in Fig. 3, bestehend aus einer Verschaltung von neun 3 x 2 F3EC, kann den weiter oben genannten Anforderungen gerecht werden, ermöglicht die Anwendung von Modulationsverfahren geringer Komplexität, eine unproblematische Kommutierung und die Verwendung von Standard-Halbleitermodulen, verglichen mit der Verwendung von 3 x 2 MC.

[0027] Alternativ ist eine Sternschaltung von jeweils zwei pro Lastphase 28, 29, 30 über ihre beiden Ausgangsleiter 31, 32 in Serie geschalteten 3 x 2 F3EC 27 zur Speisung einer dreiphasigen Last 33 aus dem dreiphasigen Wechselspannungsnetz möglich. Die jeweils drei Eingangsleiter 35, 36, 37 der einzelnen 3 x 2 F3EC sind in diesem Fall über einen 12-Pulstransformator 89 untereinander und von der Primärseite galvanisch getrennt verschaltet und an das dreiphasige Netz mit den drei Netzphasenleitern 39, 40, 41 angebunden. Die vorgeschlagene alternative Umrichtertopologie ist Fig. 7 zu entnehmen. Die insgesamt sechs 3 x 2 F3EC können dabei als in einer Matrix mit zwei Zeilen (obere, untere) und drei Spalten (linke, mittlere, rechte) angeordnet gedacht werden, wobei die drei Spalten den Lastphasen 28, 29, 30 entsprechen. Die oberen Ausgangsleiter 31 der drei 3 x 2 F3EC in der oberen Zeile sind wiederum auf einen gemeinsamen Sternpunkt 42 geführt. Aufgrund der Serienschaltung sind dann die unteren Ausgangsleiter 32 der drei 3 x 2 F3EC in der oberen Zeile spaltenweise mit den oberen Ausgangsleitern 31 der drei 3 x 2 F3EC in der unteren Zeile verbunden.

Die verbleibenden unteren Ausgangsleiter 32 der drei 3×2 F3EC in der unteren Zeile sind mit der dreiphasigen Last 33 verbunden. Die Modulation der einzelnen 3×2 F3EC ist identisch wie in Fig. 5 gezeigt.

[0028] Eine alternative Verschaltung von 3×2 F3EC ist in Fig. 8 dargestellt und beispielhaft für ein 12-Pulssystem mit der gleichen Transformatorconfiguration wie in Fig. 7 gezeigt. Die insgesamt sechs 3×2 F3EC 27 können dabei wiederum als in einer Matrix mit zwei Zeilen (obere, untere) und drei Spalten (linke, mittlere, rechte) angeordnet gedacht werden, wobei die drei Spalten den Lastphasen 28, 29, 30 entsprechen. Die jeweils drei Eingangsleiter 35, 36, 37 der einzelnen 3×2 F3EC sind über einen 12-Pulstransformator 89 untereinander und mit der Primärseite galvanisch getrennt verschaltet an das dreiphasige Netz mit den drei Netzphasenleitern 39, 40, 41 angebunden. Die Gesamtlast einer Phase setzt sich spaltenweise aus zwei getrennten (Teil-)Lasten 113 zusammen. Jede Last wird von einem einzelnen 3×2 F3EC versorgt, d.h. die Ausgangsleiter 31, 32 eines 3×2 F3EC sind direkt mit der Last 113 verbunden. Eine entsprechende Last ist beispielsweise eine Maschine, deren Phasenwicklungen in Teilwicklungen aufgeteilt sind. Die einzelnen Lasten in derselben Phase respektive entsprechend in derselben Spalte der Umrichteranordnung führen also denselben Strom.

[0029] Der 12-Pulstransformator ist beispielhaft mit einer dreiphasigen in Stern geschalteten Wicklung 90 auf der Primärseite und sechs untereinander galvanisch getrennten dreiphasigen Abgängen auf der Sekundärseite 91, 92, 93, 94, 95, 96 mit in Stern und Dreieck geschalteten Wicklungen implementiert. Von oben nach unten beginnend speisen obere Abgänge 91, 92, 93 die drei in der oberen und untere Abgänge 94, 95, 96 die drei in der unteren Zeile angeordneten 3×2 F3EC. Jeweils drei aufeinanderfolgende Transformatorabgänge auf der Sekundärseite verfügen über die gleiche Wicklungskonfiguration. Die Wicklungen der unteren Abgänge 94, 95, 96 sind in Dreieck geschaltet mit einer Phasenlage des Spannungszeigers von -30° bezüglich der in Stern geschalteten Wicklungen der Abgänge 91, 92, 93.

[0030] Simulationsergebnisse der Netzphasenspannungen 97, 98, 99, der Netzphasenströme 100, 101, 102 und der Lastphasenströme 103, 104, 105 für die in Fig. 7 vorgeschlagene Umrichtertopologie für eine symmetrische, dreiphasige, stromeinprägende (induktive) Last sind in Fig. 9 dargestellt. Durch Vergleich der Netzstromform in Fig. 6b und Fig. 9b wird ersichtlich, dass die Umrichtertopologie mit 18-Pulstransformator und neun 3×2 F3EC erwartungsgemäss eine höhere Eingangsstromqualität ermöglicht als die Umrichtertopologie mit 12-Pulstransformator und sechs 3×2 F3EC.

[0031] Die Wicklungskonfiguration auf der Primär- und Sekundärseite der benötigten $6 \cdot n$ -Pulstransformatoren, wobei n eine natürlich Zahl ist und im Bereich $n = \{2, 3, 4, \dots\}$ liegt, ist für das Funktionsprinzip der aufgezeigten modularen Verschaltung nicht entscheidend, sofern auf der Primärseite (netzseitig) ein dreiphasiger Eingang und auf der Sekundärseite $3 \cdot n$ -dreiphasige, untereinander galvanisch getrennte Abgänge vorliegen, welche, bezogen auf die Primärseite, zusammen auf der Sekundärseite ein $6 \cdot n$ -pulsiges Spannungssystem bilden. Die in Fig. 7 beispielhaft gezeigte Realisierung eines 12-Pulstransformators ($n = 2$) mit einer in Stern geschalteten Wicklung auf der Primärseite und drei in Stern und drei in Dreieck geschalteten Wicklungen auf der Sekundärseite könnte beispielsweise auch mit einer in Dreieck geschalteten Wicklung auf der Primärseite und identischer Wicklungskonfiguration auf der Sekundärseite implementiert werden.

[0032] Die dreiphasige Last 33 verfügt über drei nach aussen geführte Phasenanschlüsse. Es ist aber auch möglich, dass die Anschlusspunkte der drei Phasen einer alternativen dreiphasigen Last 106, wie in Fig. 10 gezeigt, einzeln zugänglich sind und insgesamt sechs Anschlusspunkte 107, 108, 109, 110, 111, 112 (jeweils zwei pro Phase) vorhanden sind. Auch für solche Lasten können durch geringfügige Modifikationen die in Fig. 3 und Fig. 7 dargestellten Schaltungsgrundstrukturen weiterhin verwendet werden. Dazu wird, beispielhaft erklärt anhand der Topologie in Fig. 7, die Verbindung zwischen 28, 29, 30 inklusive Sternpunkt 42 gelöst und der obere Ausgangsleiter 31 des 3×2 F3EC 27 in der oberen Zeile und linken Spalte mit einem ersten Anschluss 107 einer ersten Teillast der Last 106, der untere Ausgangsleiter 32 des 3×2 F3EC in der unteren Zeile und linken Spalte mit einem zweiten Anschluss 108 der ersten Teillast, der obere Ausgangsleiter 31 des 3×2 F3EC in der oberen Zeile und mittleren Spalte mit einem ersten Anschluss 109 einer zweiten Teillast, der untere Ausgangsleiter 32 des 3×2 F3EC in der unteren Zeile und mittleren Spalte mit einem zweiten Anschluss 110 der zweiten Teillast, der obere Ausgangsleiter 31 des 3×2 F3EC in der oberen Zeile und rechten Spalte mit einem ersten Anschluss 111 einer dritten Teillast und der untere Ausgangsleiter 32 des 3×2 F3EC in der unteren Zeile und rechten Spalte mit einem zweiten Anschluss 112 der dritten Teillast verbunden.

[0033] Sinngemäss können die gezeigten Verschaltungskonzepte für modulare 3×2 F3EC Umrichtersysteme für dreiphasige Lasten auch auf $3 \cdot k$ -phasige Lasten angewendet werden, wobei k eine natürliche Zahl ist und im Bereich $k = \{1, 2, 3, \dots\}$ liegt.

[0034] Abschliessend wird in Fig. 11 eine alternative Implementierung des bidirektionalen AC/AC-Pulsumrichters ohne Energiezwischenspeicher gezeigt, im Folgenden mit 3×2 F3EC-3L bezeichnet, welche mittels einer Zusatzschaltung für die oberen und unteren Ausgangsleiter 31 und 32 drei unterschiedliche Potentiale zur Verfügung stellt. In jeder der bisher beschriebenen modularen Umrichtertopologien können die 3×2 F3EC 27 durch solche 3×2 F3EC-3L 130 ersetzt werden. Es werden nun die zusätzlichen Komponenten der Schaltungstopologie des 3×2 F3EC-3L im Vergleich zur Schaltungstopologie des 3×2 F3EC beschrieben.

[0035] Die Zusatzschaltung weist eine Eingangsstufe und eine Ausgangsstufe auf. Die Eingangsstufe weist für jeden der Eingangsleiter 35, 36, 37 einen bidirektionalen Schalter auf, mit welchem dieser Eingangsleiter 35, 36, 37 mit einem Stromknotenpunkt 125 verbindbar ist. Die Ausgangsstufe weist für jeden der Ausgangsleiter 31, 32 einen bidirektionalen Schalter auf, mit welchem dieser Ausgangsleiter 31, 32 mit dem Stromknotenpunkt 125 verbindbar ist. Ein bidirektionaler Schalter (Vierquadranten-Schalter) ist beispielsweise jeweils gebildet durch eine gegenseitige Verbindung von einzelnen

CH 704 586 B1

er zudem eine Zusatzschaltung aufweist, mit welcher wahlweise einer der drei Eingangsleiter (35, 36, 37) mit einem der beiden Ausgangsleiter (31, 32) verbindbar ist.

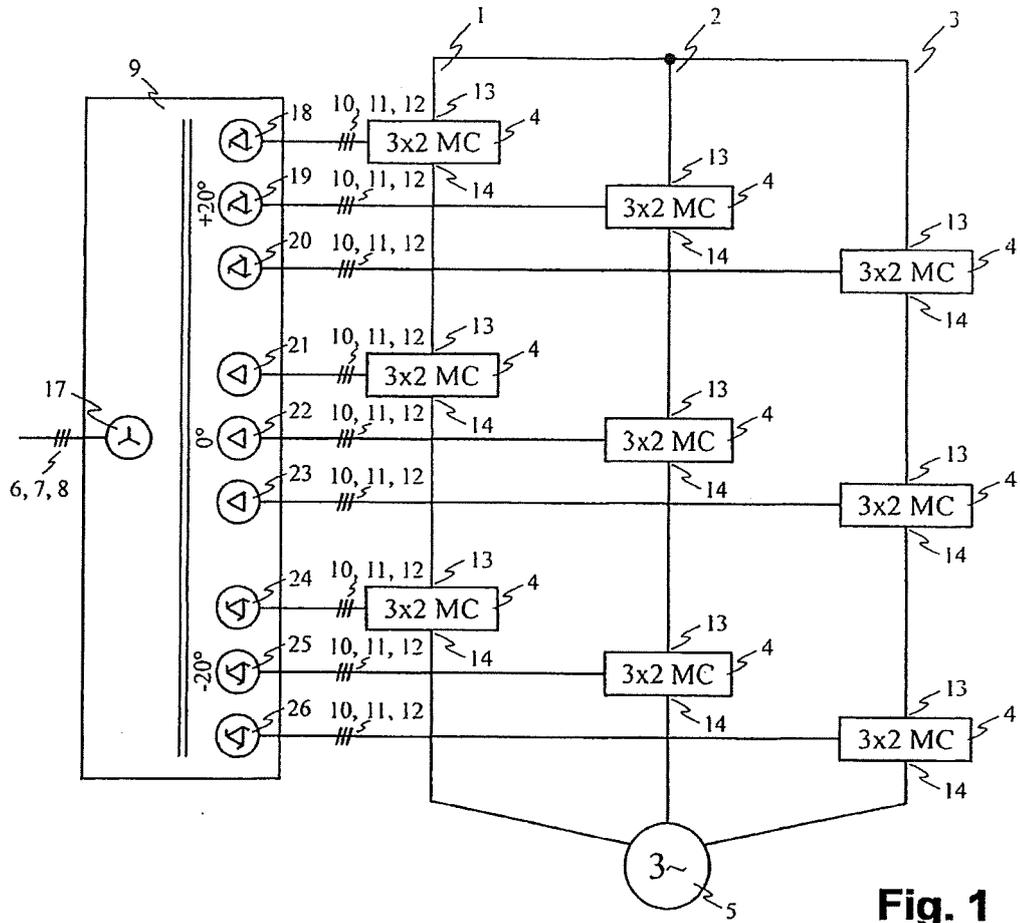


Fig. 1

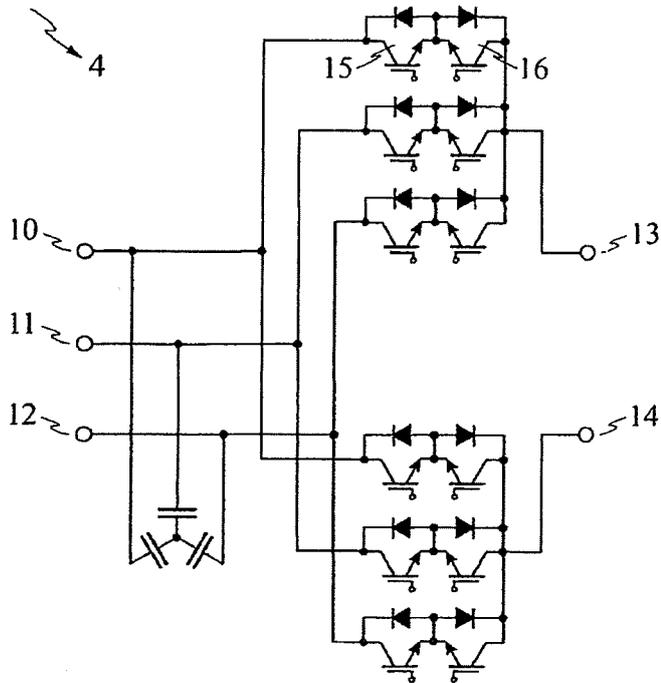


Fig. 2

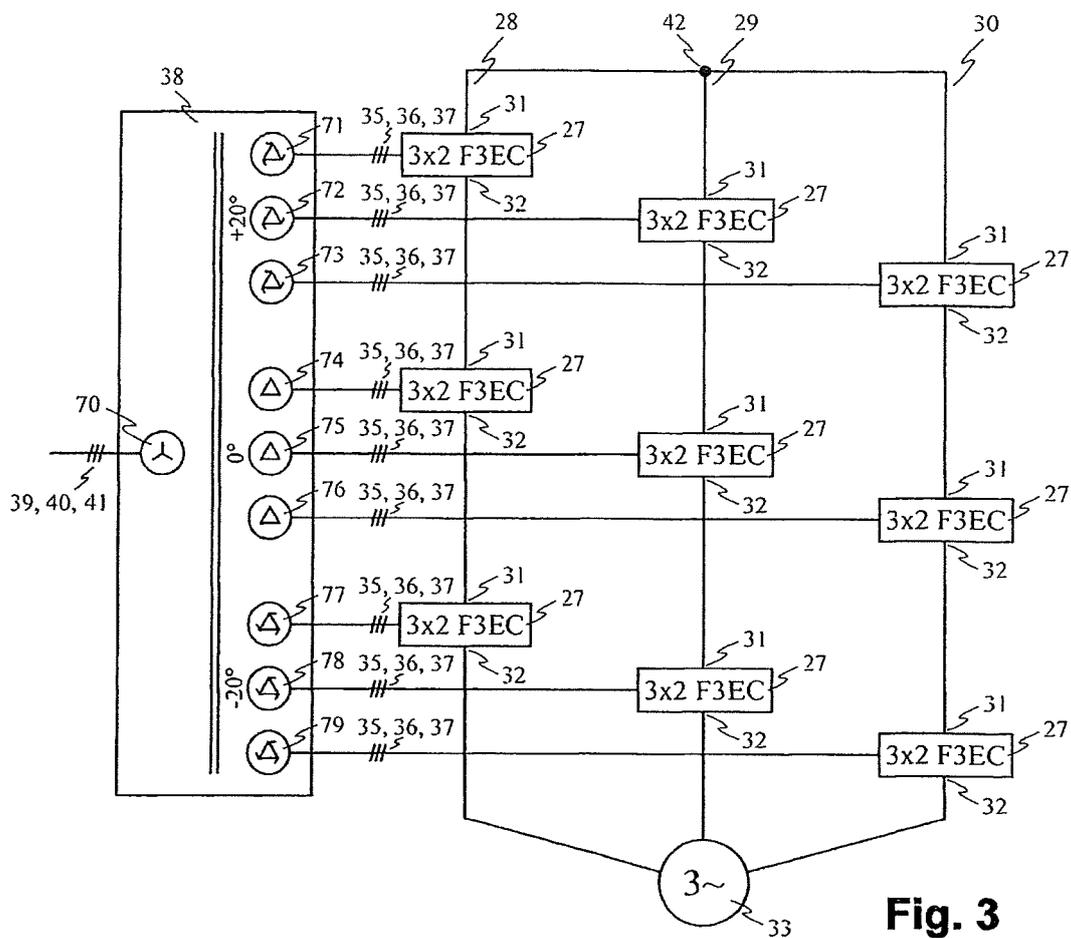


Fig. 3

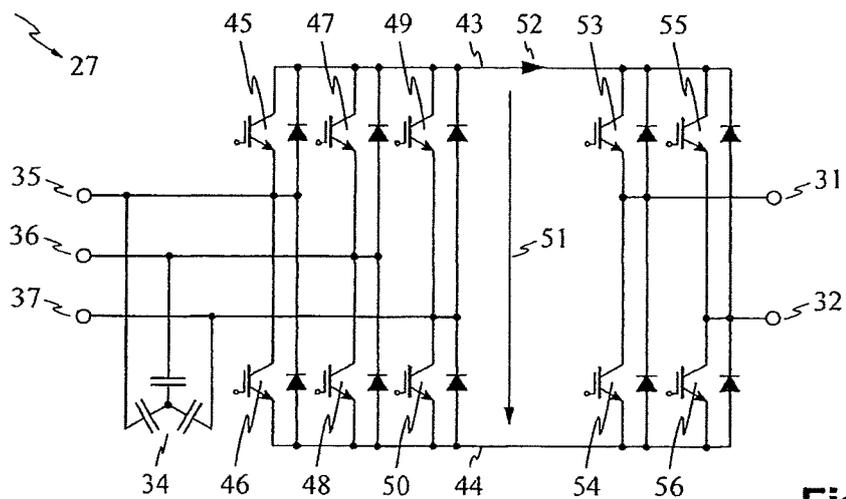


Fig. 4

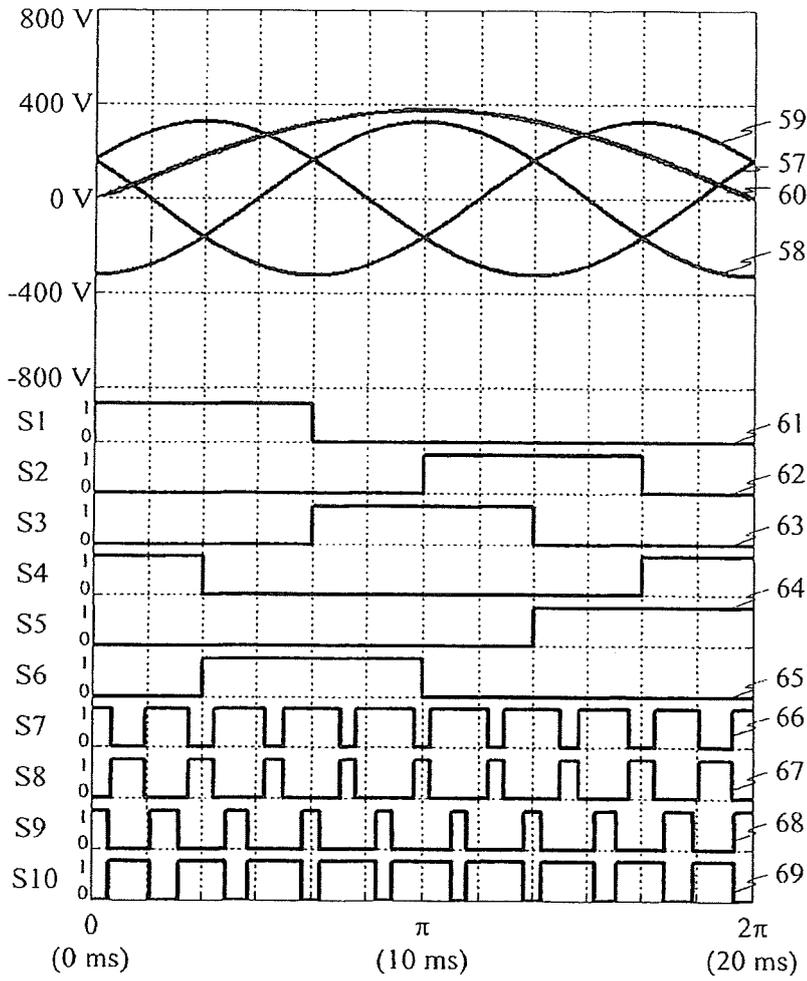


Fig. 5

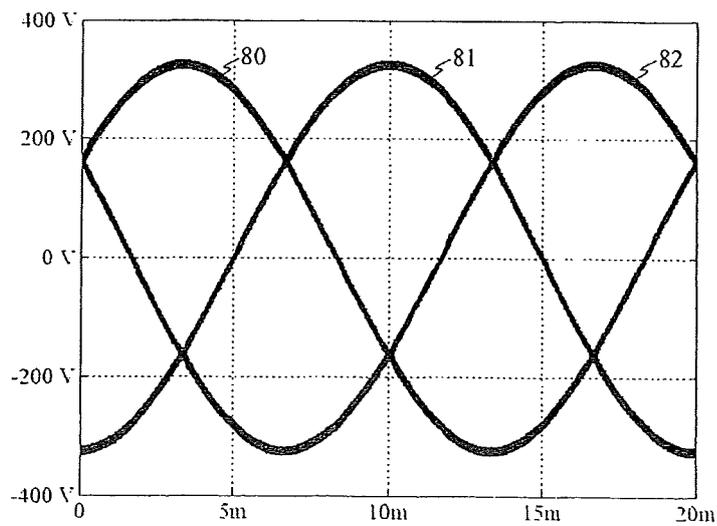


Fig. 6a

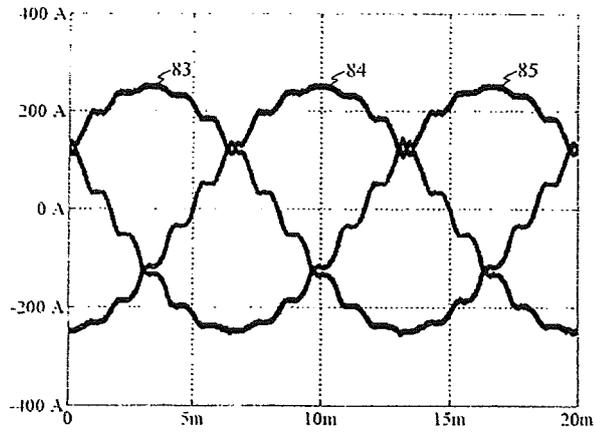


Fig. 6b

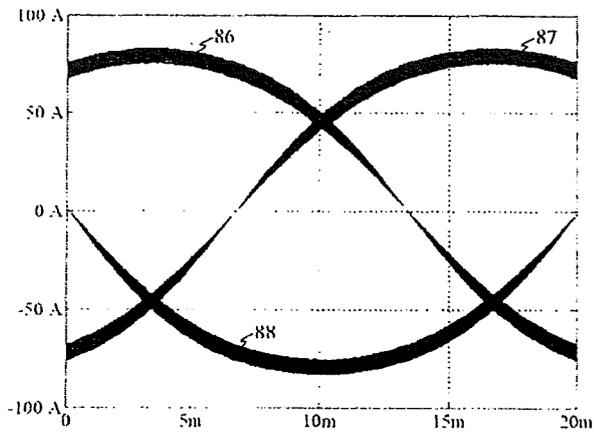


Fig. 6c

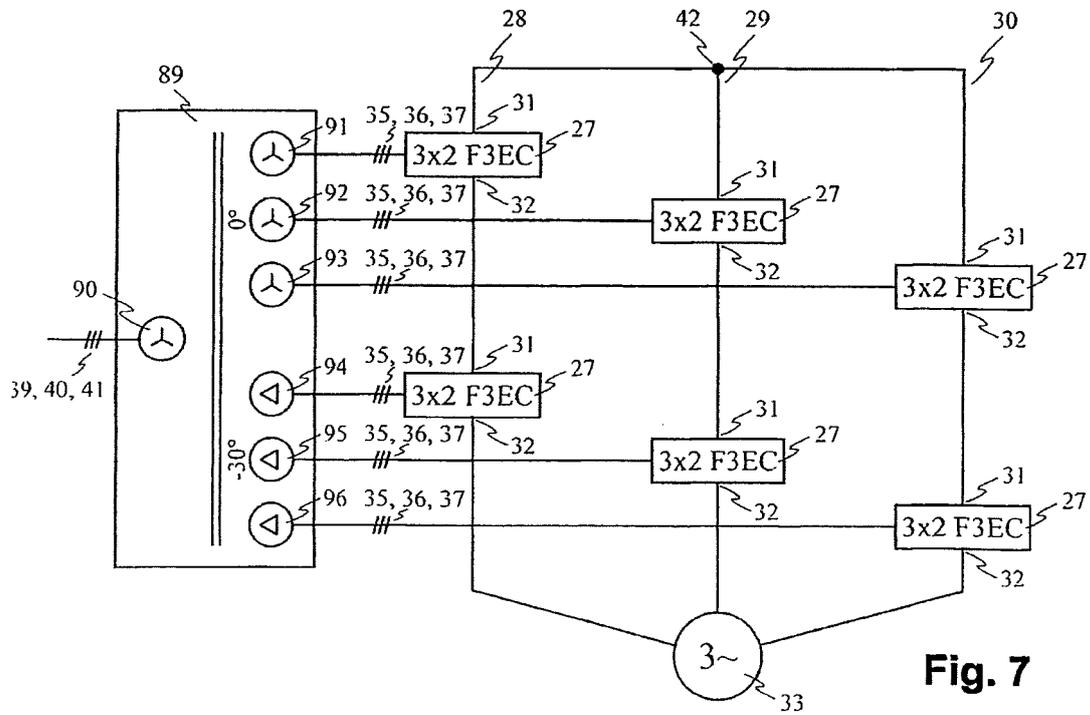


Fig. 7

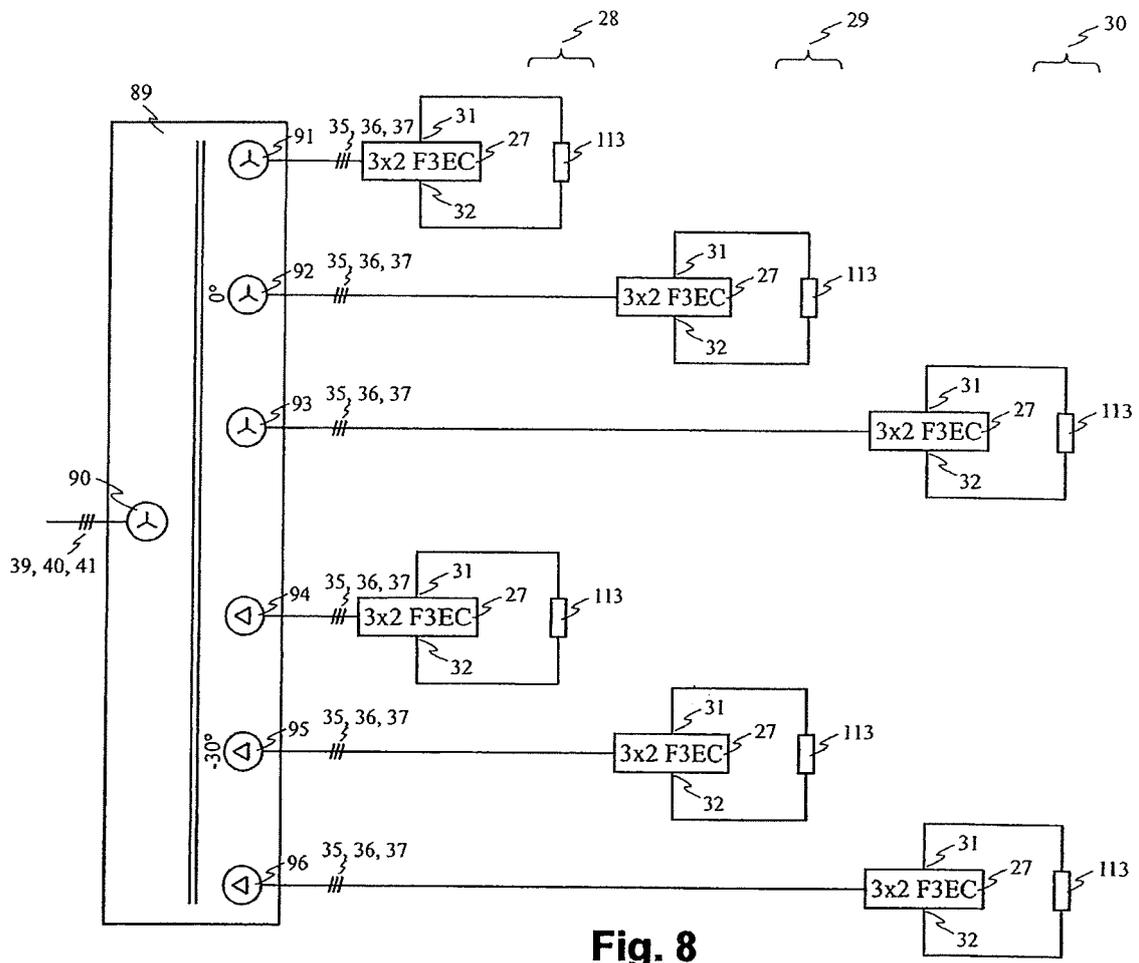


Fig. 8

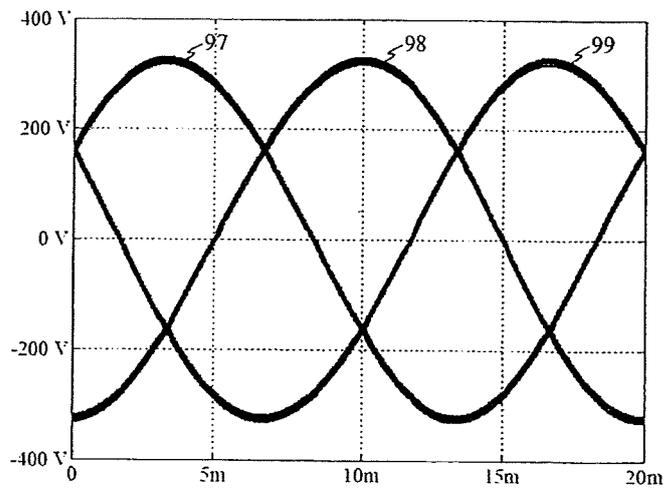


Fig. 9a

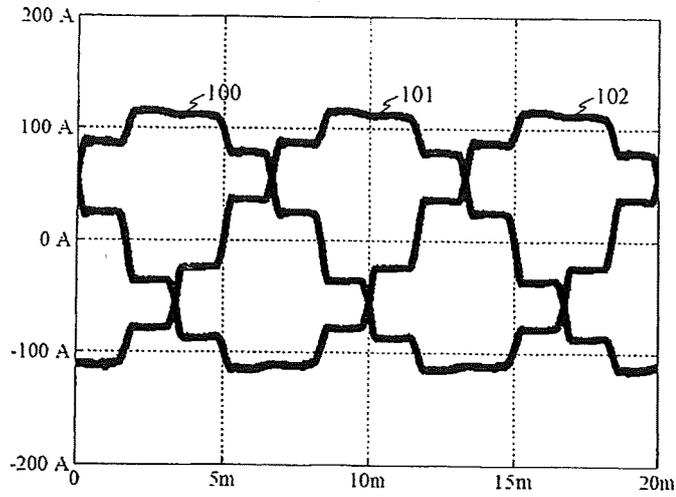


Fig. 9b

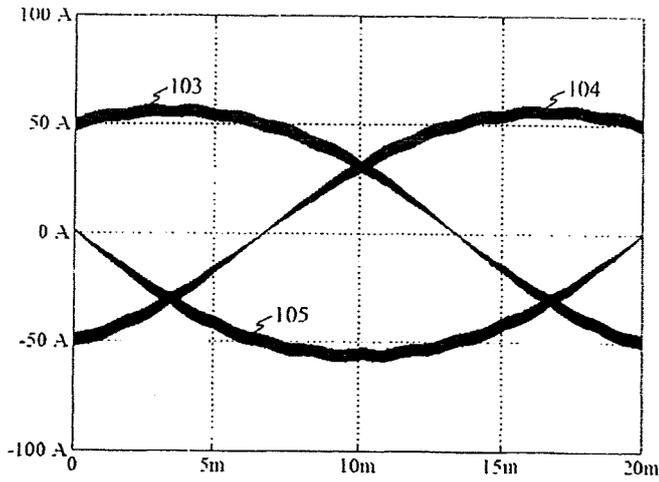


Fig. 9c

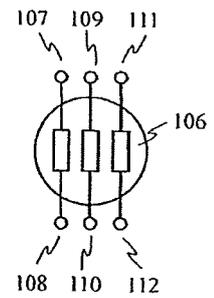


Fig. 10

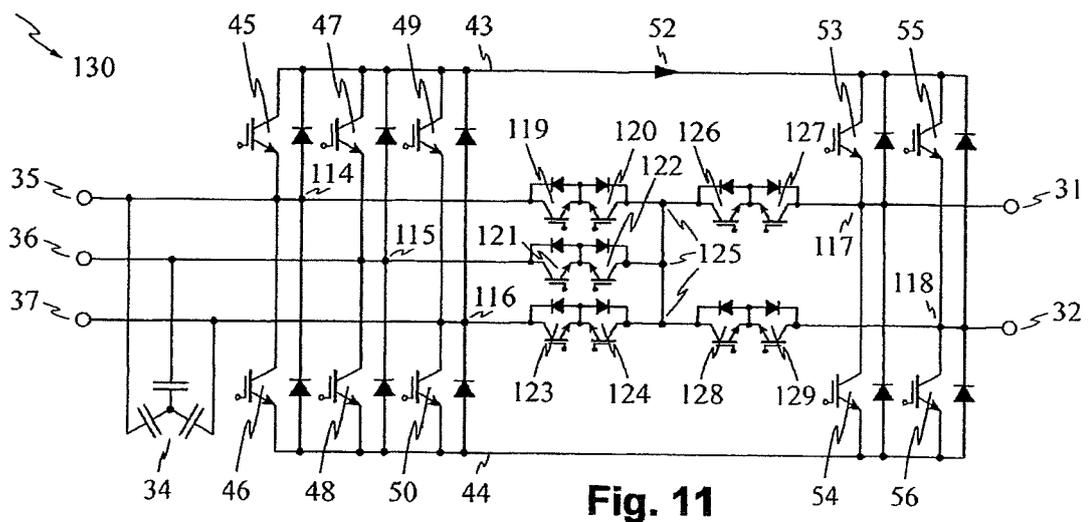


Fig. 11