



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 696 28 657 T2 2004.04.15**

(12)

## Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 860 048 B1**

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **H02M 7/48**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **696 28 657.2**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/NZ96/00119**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **96 935 613.8**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 97/017753**

(86) PCT-Anmeldetag: **24.10.1996**

(87) Veröffentlichungstag

der PCT-Anmeldung: **15.05.1997**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **26.08.1998**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **11.06.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **15.04.2004**

(30) Unionspriorität:

**28031795      24.10.1995      NZ**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LI,  
LU, MC, NL, PT, SE**

(73) Patentinhaber:

**Aquagas New Zealand Ltd., Avondale, Auckland,  
NZ**

(72) Erfinder:

**GREEN, William, Andrew, Papatoetoe, NZ**

(74) Vertreter:

**BOEHMERT & BOEHMERT, 40597 Düsseldorf**

(54) Bezeichnung: **GLEICHRICHTER-STROMVERSORUNG**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

## Beschreibung

### Hintergrund der Erfindung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Dreiphasentransformator und insbesondere – wenn auch nicht notwendigerweise ausschließlich – einen Dreiphasentransformator, der zur Verwendung bei einer Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung geeignet ist, und besonders bei einer Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung, um die erforderliche Gleichstromversorgung für eine Elektrolysezelleneinheit für die Elektrolyse von Wasser zur Freisetzung von Wasserstoff- und Sauerstoffgas bereitzustellen. In der Regel ist die Erfindung jedoch für jede spezielle Anwendung geeignet, bei der eine Netzwechselstromversorgung verfügbar ist, aber eine Gleichstromversorgung benötigt wird.

[0002] Die Vollwellengleichrichtung einer mehrphasigen Wechselstromversorgung zur Erzeugung eines Pseudogleichstroms am Ausgang ist allgemein bekannt. Bei einer einphasigen Netzstromversorgung mit 240 V und 50 Hz beträgt die von einem Vollwellengleichrichter (N-Brückengleichrichter) erzeugte durchschnittliche Gleichspannung 216 V. Allerdings erfordern Stromverbraucher, die eine Gleichstromversorgung benötigen, weit niedrigere Spannungen.

[0003] Transformatoren werden bei Stromversorgungen in großem Umfang eingesetzt. Beispiele für bestehende Transformatoren sind in den als US-Patente Nr. 5 168 255 und 5 202 664 veröffentlichten Beschreibungen gegeben. Diese Transformatoren enthalten jeweils eine große Anzahl an Wicklungen und sind groß.

[0004] Für Elektrolysezelleneinheiten, etwa beim AQUAGAS 3-Gasgenerator der Anmelderin, wird eine Gleichspannung in der Größenordnung von 33 V benötigt. Um diese Forderung zu erfüllen, wird üblicherweise die Netzwechselstromversorgung vor der Gleichrichtung auf ein geeignetes niedrigeres Niveau heruntertransformiert, so daß die gewünschte Ausgangsgleichspannung realisiert wird.

[0005] Der Nachteil bei dieser Technik ist, daß Netzfrequenz-Transformatoren einer Energieklasse oberhalb 10 kW aufgrund der Gegebenheiten der magnetischen Schaltung und Streureaktanz physikalisch groß und schwer werden.

[0006] Eine weitere bekannte Technik zur Erzeugung einer gewünschten Gleichstromversorgung aus einer ortsfesten Netzwechselstromversorgung besteht in der Nutzung von Steuerschaltgeräten in der Gleichrichterbrücke. Dies können Vorrichtungen wie etwa Leistungstransistoren, Thyristoren oder Abschaltthyristoren sein. Die mittlere Gleichstromausgangsleistung kann durch Steuern der Anschaltzeit (und möglicherweise auch der Abschaltzeit) für die Schaltgeräte eingestellt werden. Der Nachteil bei dieser Technik ist, daß die Ausgangswellenform "eingedellt" ist, selbst bei Verwendung von glättenden Speicherkondensatoren am Gleichspannungsausgang. Bestimmte Stromverbraucher sind empfindlich gegenüber zeitabhängigen Veränderungen des Gleichspannungspegels. Hierzu zählen Gleichspannungsgeräte wie etwa Elektrolysezelleneinheiten. Bei einigen kann die Empfindlichkeit so weit gehen, daß ein Punkt erreicht wird, an dem sie bei einer solchen Ausgangswellenform nicht mehr zufriedenstellend arbeiten.

[0007] Es bestehen weitere Probleme in Verbindung mit der bekannten Stromversorgung des Typs mit einphasiger Wechselstromversorgung, Abspanntransformator und gesteuerter Gleichrichterbrückenschaltung, darunter der hohe Transformatoreinschaltstrom beim Einschalten und die Anfälligkeit für Phasenschwankungen, wenn zwei Phasen einer nominell dreiphasigen Stromversorgung anstatt eine Phase und ein Nulleiter oder alle drei Phasen verwendet werden.

### Aufgabe der Erfindung

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist daher die Bereitstellung einer Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung, mit der sich einige Nachteile des Standes der Technik beheben lassen oder der Öffentlichkeit wenigstens eine brauchbare Wahlmöglichkeit gegeben wird.

### Zusammenfassung der Erfindung

[0009] Demzufolge besteht die Erfindung gemäß einem ersten Aspekt in einem Dreiphasentransformator, umfassend

- drei Sekundärwicklungen, von denen jede aus einer leitfähigen Röhre gebildet ist, wobei die leitfähigen Röhren im wesentlichen parallel und an ihrem ersten Ende elektrisch angeschlossen sind;
- drei Transformatorkerne, die jeweils einer Phase entsprechen, wobei jeder die Form eines auf eine entsprechende leitfähige Röhre geschraubten Zylinderelements aufweist; und
- drei Primärwicklungen, die jeweils einer Phase entsprechen und derart gewickelt sind, daß sie durch das Innere benachbarter Paare der leitfähigen Röhren hindurchführen.

[0010] Bevorzugt kann der wie vorstehend beschriebene Dreiphasentransformator in einer Wechsel-

strom-Gleichstrom-Stromversorgung enthalten sein, wobei der Dreiphasentransformator eine dreiphasige Pseudowechselstromausgangsleistung aufnimmt und die Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung des weiteren umfaßt:

- eine Dreiphasen-Gleichrichterschaltung, die eine erste gleichgerichtete Ausgangsleistung als Reaktion auf eine Eingangsspannung erzeugt;
  - eine gesteuerte Dreiphasen-Wechselrichterschaltung, die die erste gleichgerichtete Ausgangsleistung aufnimmt und eine dreiphasige Pseudowechselstromausgangsleistung erzeugt, wobei die dreiphasige Pseudowechselstromausgangsleistung eine Frequenz aufweist, die höher ist als die Frequenz der Eingangsspannung; und
  - eine zweite Dreiphasen-Gleichrichterschaltung, die die transformierte dreiphasige Pseudowechselstromausgangsleistung vom Transformator aufnimmt und eine Gleichstromversorgung am Ausgang erzeugt.
- Vorzugsweise kann die Wechselrichterschaltung umfassen:
- wenigstens zwei Schaltvorrichtungen pro Phase,
  - wobei jede Schaltvorrichtung ein kapazitives Element aufweist, das parallel dazu angeschlossen ist, und jede Phase des Wechselrichterausgangs ein induktives Element enthält,
  - wobei ein jeweiliges kapazitives Element und ein jeweiliges induktives Element jeder Phase einen LC-Schwingkreis bilden; und
  - wobei das Ausschalten jedes Schaltelements derart gesteuert wird, daß eine Totzeit zwischen den Schaltphasen vorliegt, wobei während dieser Zeit der LC-Schwingkreis bewirkt, daß das nächstfolgende Schaltelement, das eingeschaltet werden soll, zum Zeitpunkt des Schaltens im wesentlichen eine Nullspannung aufweist.

[0011] Demzufolge umfaßt die Erfindung gemäß einem zweiten Aspekt ein Verfahren zur Erzeugung einer Gleichstromversorgung aus einer Dreiphasen-Wechselstromversorgung, umfassend die Bereitstellung eines wie vorstehend beschriebenen Dreiphasentransformators, wobei dieses Verfahren folgendes umfaßt:

- Gleichrichten der Wechselstromversorgung, um eine gleichgerichtete Stromversorgung zu erzeugen;
- Wechselrichten der gleichgerichteten Stromversorgung, um eine dreiphasige Pseudowechselstromversorgung zu erzeugen, deren Frequenz größer ist als die der dreiphasigen Wechselstromversorgung;
- Anlegen der dreiphasigen Pseudowechselstromversorgung an den Dreiphasentransformator; und
- Gleichrichten eines Ausgangs des Dreiphasentransformators.

Weitere Aspekte dieser Erfindung werden dem Fachmann beim Lesen der Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen klar werden.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0012] Die bevorzugten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung sollen nun anhand der begleitenden Zeichnungen beschrieben werden, worin:

[0013] **Fig. 1** ein schematisches Blockdiagramm einer Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung ist;

[0014] **Fig. 2** ein schematisches Schaltungsdiagramm der Stromversorgung von **Fig. 1** ist; die **Fig. 3a** und **3b** eine Draufsicht bzw. eine Querschnittansicht eines coaxialen Dreiphasentransformators darstellen; die **Fig. 4a** bis **4c** Diagramme des Schaltzustands der Regler-Wechselrichter-Stufe sind;

[0015] **Fig. 5** die jeweilige Phasenverschiebung zwischen den Phasen des Regler-Wechselrichter-Ausgangs zeigt;

[0016] **Fig. 6** ein schematisches Blockdiagramm der Reglerleiterplatte ist; die **Fig. 7** und **8** Taktwellenformen für die Gate-Signale für die Schaltvorrichtungen der Wechselrichterstufe sind; und

[0017] **Fig. 9** die Spannungs- und Stromwellenform für eine Ausführungsform der Stromversorgung zeigt.

#### Ausführliche Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen

[0018] **Fig. 1** zeigt das generalisierte Blockdiagramm einer Stromversorgung **10**, die aus einer Anzahl gestaffelter Stufen besteht. Die Stromversorgung **10** nimmt eine dreiphasige Wechselstromzufuhr an den Eingangsanschlüssen **12**, **14**, **16** auf. Diese Zufuhr ist typischerweise eine ohne weiteres verfügbare Netzstromversorgung, die in Neuseeland eine solche mit 400 V (Phase zu Phase) und 50 Hz ist. Natürlich sind auch andere dreiphasige Versorgungsspannungen berücksichtigt, darunter die in den Vereinigten Staaten übliche Stromversorgung mit 200 V und 60 Hz. Das Nullbezugspotential der Netzstromversorgung wird auch an Anschluß **18** aufgenommen.

[0019] Eine dreiphasige Gleichrichterstufe **30** nimmt die Netzstromzufuhr auf, bringt sie durch Gleichrichten auf einen Gleichstrompegel am Ausgangsgleichstrombus **32**, **34**, der von einem Speicherkondensator **36** gestützt wird, der zu einer Glättung der Spannungswellenform führt. Zur Verbesserung des Eingangsleistungsfaktors kann auch ein Verbindungsinduktor enthalten sein. Ein gesteuerter Wechselrichter **40** nimmt die gleich-

gerichtete Gleichstromzufuhr auf und zerhackt sie, um eine dreiphasige Pseudowechselstromausgangsleistung mit einer Frequenz zu ergeben, die höher ist (typischerweise mehrere Größenordnungen höher) als die Frequenz des Netzstroms. Die Schaltvorrichtungen des Wechselrichters **40** werden vom Reglerschaltkreis **42** gesteuert, der durch mehrere Gate-Leitungen **44** an den Wechselrichter **40** angeschlossen ist. Der Reglerschaltkreis **42** erhält auch eine Phase/Null-Bezugsspannung von einer der Phasen der Wechselstromversorgung und vom Nulleiter der Netzstromversorgung, wie durch die Verbindungslinien **52**, **54** angedeutet ist.

[0020] Die dreiphasige Pseudowechselstromausgangsleistung vom Wechselrichter **40** wird durch die Ausgangsleitungen **46**, **48**, **50** einem (typischerweise) Hochfrequenz-Abspanntransformator **60** zugeführt. Die transformierte Pseudowechselspannung, die auf den Ausgangsleitungen **62**, **64**, **66** vom Transformator erscheint, gelangt wiederum in eine Gleichrichterstufe **70**, durch die die Ausgangsgleichspannung für die Stromversorgung **10** erzeugt wird und an den Ausgangsanschlüssen **72**, **74** verfügbar ist.

[0021] Der Transformator **60** hat in der bevorzugten Form ein festes Windungsverhältnis und ergibt daher nur näherungsweise die gewünschte maximale Ausgangsspannung, die an den Ausgangsanschlüssen **72**, **74** erscheint. Die Steuerung der Ausgangsspannung zwischen voller nomineller Ausgangsleistung und einem verringerten oder eingeregelter Wert erfolgt somit durch den Reglerschaltkreis **42**, der die Gate-Zeit der gesteuerten Schaltvorrichtungen des Wechselrichters **40** steuert.

[0022] Wie bereits erwähnt, besteht ein Vorteil der Nutzung einer dreiphasigen Netzstromversorgung an Stelle einer einphasigen Netzstromversorgung darin, daß die Auswirkungen von Phasenschwankungen ausgeglichen werden.

[0023] Es soll nun eine Beschreibung einer speziellen Ausführungsform einer Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung gegeben werden, die zur Verwendung mit dem AQUAGAS-Generator der vorliegenden Anmelderin geeignet ist. Es ist ein Gasgenerator, der 4,3 m<sup>3</sup> Wasserstoff/Sauerstoff-Mischgas pro Stunde liefern kann und dementsprechend 17 Liter Wasser verbraucht. Ein Gasgenerator mit dieser Kapazität benötigt eine Gleichstromversorgung mit etwa 10 kW, 300 A und 33 V. Es sei jedoch klar, daß die vorliegende Erfindung nicht auf die Verwendung mit einem Elektrolyse-Gasgenerator beschränkt ist, sondern genauso gut in all denjenigen Fällen eingesetzt werden kann, wo eine gesteuerte Gleichstromversorgung benötigt wird und eine Dreiphasenstromversorgung verfügbar ist. Weitere derartige Anwendungen können Elektroschweißen, Galvanisieren, Steuerung von Gleichstrom-Maschinen, Laden von Batterien, unterbrechungsfreie Stromversorgungen und dergleichen umfassen.

[0024] **Fig. 2** zeigt ein ausführliches schematisches Schaltungsdiagramm für eine Stromversorgung **100**, die eine Ausführungsform der Erfindung darstellt. Bauteile, die den in **Fig. 1** gezeigten gleichen, werden mit ähnlichen Bezugsziffern bezeichnet.

[0025] Die Stromversorgung **100** ist normalerweise auf 10 kW (300 A, V Gleichstrom) ausgelegt und nimmt einen dreiphasigen Netzwechselstrom mit 400 V und 50 Hz auf. Die Wechselstromzufuhr geht durch einen Isolierschalter **102** und dazu in Reihe geschaltete Sicherungseinsätze **104** und gelangt anschließend in eine herkömmliche RFI-Filterschaltung **106**. Der gefilterte Dreiphasenwechselstrom gelangt dann zur Gleichrichterstufe **30**. Die Dioden, die die Gleichrichterstufe **30** bilden, müssen so ausgelegt sein, daß sie eine gegensinnige Spitzenspannung von wenigstens 540 V aushalten. Der Bus-Gleichspannungspegel beträgt 540 V Gleichspannung.

[0026] Ein Soft-Start-Schaltkreis **110** bildet ein Bauteil des Nullgleichstrombezugs **34** des Gleichstrombus. Diese Schaltung wird wirksam bei Betätigung des Isolierschalters **102**, um Zufuhr zu schaffen, so daß der Bypass-Widerstand **112** den Einschaltstrom aufgrund des Ladens des Transformators begrenzt, und wird nach einiger Zeit durch Betätigung des gesteuerten Kontaktgebers **114** kurzgeschlossen, was durch Schließen des normalerweise geöffneten Schalters **116** bewirkt wird, der wiederum von der Steuerplatine **120** gesteuert wird.

[0027] Der Regler-Wechselrichter **40** ist aufgebaut aus einer dreiphasigen Vollwellen-Brückenschaltung mit sechs Schaltvorrichtungen, bei denen es sich in einer bevorzugten Form um Bipolartransistoren mit isoliertem Gate (IGBTs) handelt. Ein besonders bevorzugter IGBT ist das Modul FUJI 6MB150F, das sechs IGBT-Schaltvorrichtungen mit 50 A, 1200 V enthält. In **Fig. 2** sind die Kollektor-, Gate- und Emittierelektroden gezeigt. Das Schalten der IGBT-Vorrichtungen erfolgt unter der Kontrolle der IGBT-Treiberplatine **130**, die wiederum von der Steuerplatine **120** gesteuert wird. Die Gate-Elektroden der IGBT-Vorrichtungen **140** sind so geschaltet, daß ein Pseudowechselstrom (Rechteckwellen) synthetisiert wird; die dreiphasigen Ausgangsleitungen **44–48** des Wechselrichters **40** enthalten in Reihe geschaltete Induktoren **142**, deren Zweck nachstehend beschrieben wird.

[0028] In einer besonders bevorzugten Form ist der Transformator **60** von der Art eines solchen mit coaxialer Wicklung und Ferrit-Kern und Stern-Stern-Anordnung. Das Windungsverhältnis des Transformators **60** ist vorzugsweise 13,5 : 1, d. h., die nominelle Phase/Phase-Spitzenspannung auf der Primärwicklung von  $\pm 540$  ergibt  $\pm 40$  V auf der Sekundärwicklung. Die dreiphasige Ausgangsleistung von der Transformator-Sekundärwicklung mit einem Effektivwert von 16 kHz, 31 V, der auf den Ausgangsleitungen **62–66** erscheint, wird an den weiteren Gleichrichter **70** gegeben, um eine Ausgangsgleichspannung mit einem nominellen Pegel von 33 V am Ausgangsanschluß **72**, **74** zu ergeben. Die Gleichrichterstufe **70** besteht aus schnellen Dioden, etwa 6 SGS Thom-

son BYV225-200 Diodenmodulen. Jedes Modul enthält zwei Dioden mit 100 A, 200 V mit einer Sperrverzögerungszeit von 80 ns, die parallel betrieben werden. Vor dem  $V_{0+}$ -Ausgangsanschluß **72** befindet sich ein in Reihe geschalteter Induktor **144**, der dazu dient, die kleinen Wechselstromanteile in der Wellenform des Ausgangsgleichstroms zu glätten.

[0029] Um auf den coaxialen Transformator **60** zurückkommen, so sind hier die **Fig. 3a** und **b** heranzuziehen, die eine Draufsicht bzw. eine Querschnittsansicht einer Ausführungsform des Transformators **60** darstellen. Der Transformator ist aufgebaut aus drei Kupferrohren **150**, die in drei Hacken gelötet sind, die in eine Kupferplatte **152** geschnitten sind, die den Dreiphasenneutralpunkt (Stern) bildet. Die freien Enden der Rohre **150** bilden die Transformator-Ausgangsanschlüsse (sekundär) **154**, **156**, **158**. Die Kupferrohre **150** bilden so eine Sekundärwicklung mit einer Windung. Ferrit-Toroide sind über das jeweilige Kupferrohr **150** geschraubt.

[0030] Die drei Primärwicklungen **162**, **164**, **166** sind durch und zwischen ein benachbartes Paar Kupferrohre **150** gewickelt. Um der Klarheit willen ist eine vereinfachte Darstellung der Primärwicklung **166** in **Fig. 3b** gezeigt. Um der Klarheit willen ist der Innenumfang eines jeden der Kupferrohre **160** in **Fig. 3b** gezeigt. Der Innenumfang eines jeden der Kupferrohre **160** enthält des weiteren eine Isoliermanschette (Mylar) **168**, um Kurzschluß der Primärwicklung mit der vom jeweiligen Rohr gebildeten Sekundärwicklung zu verhindern. Primärwicklung und Sekundärwicklung sind aus 5 mm<sup>2</sup>-Litzendraht (1024 Stränge × 40 AWG-Draht) aufgebaut und mit einer geeigneten Form einer Warmschrumpfmanschette umhüllt.

[0031] Die Auswahl einer dreiphasigen Anordnung bedeutet, daß der Strom pro Sekundärwicklung gegenüber einer einphasigen Ausführung verringert wird. Dies ist aus mehreren Gründen ein wichtiger Vorteil. Bei 300A ist eine beträchtliche Leiterquerschnittfläche erforderlich, und dies ist schwer zu erreichen, wenn die Tiefe des Kupfer bei 16 kHz nur 0,5 mm beträgt. Soll zudem die Transformator-Ausgangsleistung gleichgerichtet werden, so ergibt sich eine weitere Schwierigkeit insofern, als schnelle Dioden gegenwärtig nur in Modulen mit einer Auslegung von bis zu 200 A ohne weiteres erhältlich sind. Durch Verwendung des dreiphasigen coaxialen Transformators wird eine Ausgangsauslegung von 300 A über die drei Phasen verteilt.

[0032] Durch Verwendung eines Hochfrequenztransformators wird es möglich, eine äquivalente Leistungsauslegung vor einem Transformator zu erzielen, der eine Größenordnung weniger schwer ist als ein herkömmlicher Niederfrequenztransformator und unter Umständen nur die Hälfte kostet. Dies liegt daran, daß für eine minimierte Kernfläche und eine maximierte Spannung entweder die Frequenz oder die Anzahl der Wicklungen erhöht werden muß. Die Erhöhung der Anzahl der Wicklungen führt zu einer Zunahme der Streuinduktivität und daher zu einem großen Spannungsabfall durch den Transformator.

[0033] Eine Version des Transformators **60**, der als Bauteil der in **Fig. 2** gezeigten Stromversorgung getestet wurde, hatte die ungefähren Abmessungen 200 × 150 × 150 mm. Messungen mit einem solchen Transformator zeigten, daß der Kopplungskoeffizient von Primärwicklung zu Sekundärwicklung 99,95% beträgt, woraus sich eine Streuinduktivität von nur 0,05% der Primärinduktivität ergibt. Mit einem größeren Längen/Breiten-Verhältnis erhielt man einen noch höheren Kopplungskoeffizienten von etwa 99,99%.

[0034] Der in **Fig. 2** gezeigte Dreiphasenwechselrichter **40** ist hart geschaltet. Dies bedeutet, daß im Augenblick des Einschaltens an jedem Transistor **140** eine hohe Spannung anfällt, und diese Spannung ist auch dann noch vorhanden, wenn der Strom durch den Transistor zunimmt. Beim Ausschalten beginnt die Spannung am Transistor zu steigen, ehe der Strom auf Null gefallen ist. Die in jedem Transistor aufgrund der Schaltverluste verlorene Leistung ist proportional zur Schaltfrequenz, womit die Gesamtverluste dazu führen, daß der Schaltfrequenz eines jeden hart geschalteten Umformers eine Obergrenze auferlegt wird.

[0035] Zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Verringerung der RFI der Stromversorgung **100**, und um es möglich zu machen, die Schaltfrequenz zu erhöhen, wird eine weich schaltende Technik auf die dreiphasige Vollbrückentopologie angewandt. Ein kleiner (zum Beispiel 4,7 nF) Kondensator **146** wurde überbrückend/parallel an jeden der Transistoren **140** geschaltet. Einschalten mit Nullspannung wird erreicht, weil die Spannung am jeweiligen Transistor langsamer ansteigt. Die Reihenstreuinduktivität der Transformator-Primärwicklung hält einen Reststrom aufrecht, nachdem ein Transistor abgeschaltet wurde. Gerade dieser Reststrom lädt den Kondensator über einem Transistor auf, der abgeschaltet hat, während gleichzeitig der Kondensator über dem anderen Transistor der gleichen Phase entladen wird. Zu dem Zeitpunkt, an dem die Totzeit (d. h., die Zeit zwischen dem Abschalten eines Transistors einer Phase und Anschalten eines anderen, die etwa 2 Mikrosekunden bei einem 15 kHz-Umformer beträgt) abgelaufen ist, ist die Diode **148** über dem betreffenden Transistor **140**, der gerade angeschaltet werden soll, in Durchlaßrichtung vorgespannt, so daß sich eine Nullspannungsanschaltcharakteristik für den Transistor ergibt.

[0036] Dieser Vorgang sei eingehender erklärt anhand der **Fig. 4a–4b**, die die Zeit des Übergangs vom Zustand **100** (Phase A hoch, Phasen B und C niedrig) zum Zustand **110** (Phasen A und B hoch, Phase C niedrig) erläutern, darunter auch die Totzeit, nachdem der Transistor **140** von Phase B auf der niedrigen Seite abgeschaltet wurde, ehe jedoch der Transistor auf der Hochseite angeschaltet wurde. Die Pfeile zeigen den Stromfluß aufgrund der vereinfachten Verbraucherlast, die als Induktor **170** dargestellt ist. In **Fig. 4b** dient der Strom in Phase B von der Verbraucherlast **170** zum Laden des niedrigeren Kondensators **146**, der zunächst entladen ist, und zum Entladen des höchsten Kondensators **146** vor dem Hochschalten von Phase C. Um Einschalten

mit Nullspannung zu erreichen, muß die im Induktor **170** gespeicherte Energie größer sein als im jeweiligen Kondensator **146**.

[0037] Die vorstehend beschriebene Ausführungsform des coaxialen Transformators **60** hat zur Erfüllung dieser Bedingung unzureichende Streuinduktivität, wobei in diesem Fall ein sättigbarer Induktor **142** in Reihe zu den jeweiligen Transformator-Primärwicklungen **162–166** eingeführt wurde. Diese Anordnung liefert die notwendige Induktivität zur Entladung des jeweiligen parallelen Kondensators **146** vor dem Einschalten des entsprechenden Transistors **140**, sättigt sich dann aber bei vollem Stromfluß und führt somit keinen zusätzlichen Spannungsabfall ein.

[0038] Es ist klar, daß das weich schaltende System nicht Teil der Steuerfunktionen ist, die von der Steuerplatine **120** wahrgenommen werden.

[0039] Wie ebenfalls bereits erörtert, erfolgt die Steuerung der Ausgangsgleichspannung durch Steuerung der Gate-Zeit der Transistoren **140**, die den steuerbaren Wechselrichter **40** bilden. Diese Funktion wird letztlich durch die Steuerplatine **120** erreicht. Insbesondere wird die Steuerung der Ausgangsgleichspannung mit Hilfe einer Ausgangsteuerungstechnik mit Phasenverschiebung erreicht.

[0040] Wie in **Fig. 5** gezeigt, fungiert eine der Phasen des Wechselrichters **40** ("Phase A") als Bezugsphase. Bei voller Ausgangsspannung vom Wechselrichter **40** beträgt die nominelle Phasendifferenz zwischen Phase A, Phase B und Phase C jeweils  $120^\circ$ . Dieser Ausgangsspannungspegel läßt sich einstellen durch Einstellen der relativen Phasendifferenz zwischen den jeweiligen Phasen, womit eine teilweise Spannungsauslöschung bewirkt wird, so daß sich der Effektivwert der Ausgangsleistung des Wechselrichters **40** verringert. Gemäß vorliegender Technik erfolgt die Phaseneinstellung derart, daß die Phase B phasenverzögert ist – die relative Phasendifferenz zu Phase A wird geringer – während die Phase C nach vorne phasenverschoben wird, so daß die relative Phasendifferenz zu Phase A zunimmt, wie in **Fig. 5** gezeigt.

[0041] Die folgende Tabelle zeigt typische Phasenverschiebungen für die Phasen B und C über der gesteuerten Ausgangsgleichspannung (nominell  $+120^\circ$  und  $+240^\circ$  Phasendifferenz) zur Bezugsphase A bei einem Gleichstrombus mit 540 V und einer Verbrauchslast von 200 A.

Ausgangsspannung	Phase B	Phase C
33	$99^\circ$	$261^\circ$
30	$90^\circ$	$270^\circ$
27	$81^\circ$	$279^\circ$
24	$72^\circ$	$288^\circ$
21	$63^\circ$	$297^\circ$
18	$54^\circ$	$306^\circ$
15	$45^\circ$	$315^\circ$

[0042] Neben der Möglichkeit der Auswahl einer gewünschten Ausgangsgleichspannung wird diese Technik auch zur Bereitstellung einer Ausgangsstromregulierung mit Hilfe eines Rückkopplungsmechanismus genutzt, dargestellt in **Fig. 2** durch einen Stromsensor **172**, der über Signalleitung **174** mit der Steuerplatine **120** in Verbindung steht. Die Steuerplatine **120** enthält Bezugswerte, die mit den Rückkopplungswerten verglichen werden, um die Gate-Zeiten der Transistoren **140** des Wechselrichters **40** einzustellen. Verringern sich die Ausgangsgleichspannungen, so folgt, daß aufgrund der ohmschen Beschaffenheit der Verbrauchslast sich gleichzeitig der Strom verringert.

[0043] **Fig. 6** zeigt ein vereinfachtes schematisches Diagramm der Steuerplatine **120** zusammen mit dem Stromsensor **172**.

[0044] Der Generator **180** für Sägezahn- und Hauptwellenform erzeugt zwei komplementäre Phasen einer rechteckigen Hauptwellenform, die als Zeitbezugssignale für die IGBTs der Bezugsphase A dienen, und zwei komplementäre Phasen einer Sägezahn-Wellenform. Die beiden Sägezahn-Wellenformen werden mit dem veränderlichen Gleichspannungspegel ( $\bar{U}$ ), der vom Regelabweichungsverstärker und Begrenzer **182** erzeugt

wird, in den PWM(Pulsdauermodulation)-Komparatoren **184a, b** verglichen, um zwei pulsdauermodulierte Wellenformen zu ergeben. Diese pulsdauermodulierten Wellenformen und die beiden Hauptwellenformen werden an ein Paar Flipflops **186a, b** angelegt. Die Ausgänge der jeweiligen Flipflops stellen die Steuerzeitbezugs-signale für das Paar IGBTs für jede der Phasen B und C dar.

[0045] Die Wellenformen im Flipflop-Element **185** sind in den **Fig. 7** und **8** ausführlicher gezeigt, die sich auf die Phasen B bzw. C beziehen. Die Ausgangswellenformen der Flipflops **186a, b** haben die gleiche Periode und den gleichen Arbeitszyklus wie die Hauptwellenform, sind aber um einen relativen Phasenwinkel zwischen 0 und 120° gemäß dem Wert des Fehlersignals ( $\epsilon$ ), das von null bis 5 V variieren kann, verzögert bzw. vorverschoben. Die in den **Fig. 7** und **8** gezeigten Pfeile zeigen die Wirkung einer Zunahme des Fehlersignals so weit, wie sich die Wellenformen ändern. Wird die Phasenverschiebung stärker, so erhöht sich auch die Ausgangsspannung des Wechselrichters **40**, bis zu einer maximalen Phasenverschiebung von 120°. Somit ist das Fehlersignal auf zwei Drittel der Amplitude der Sägezahn-Wellenform begrenzt, d. h., auf 3,3 V.

[0046] Jedes der sechs IGBT-Zeitsignale wird mit einer gewöhnlichen "Freigabe"-Leitung **188** mit einer UND-Operation verknüpft, so daß sich ein Mechanismus zur Sperrung des Wechselrichters **40** ergibt. Diese Freigabe/Sperrung kann auf zwei Arten erfolgen, einerseits während des Soft-Start-Betriebs, wobei das Schalten der Transistoren **140** gesperrt wird, bis die Soft-Start-Schaltung **192** ermittelt, daß der Steuerschaltkreis stabil arbeitet und die Einschaltspitze vorüber ist, womit verhindert wird, daß der Wechselrichter während dieser Zeit in einen bedenklichen Schaltzustand gelangt. Übersteigt andererseits das Signal vom Stromsensor **172** einen Sollwert des Lastpegels, was von Komparator und Pufferspeicher **196** ermittelt wird, so werden die Gate-Treiber wiederum gesperrt. Ein einfaches ODER-Glied **198** erleichtert beide Schutzmaßnahmen. Die logischen Ausgaben vom UND-Glied **190** werden an die Treiberplatine **130** zur Pegelumsetzung gegeben und erreichen so die Gate-Elektroden der IGBT-Vorrichtungen **140**.

[0047] Das Signal vom Stromsensor **172** wird auch von einem Sollwert subtrahiert, der vom Bezugswert und vom Wechselrichter-Soft-Start-Element **192** abgeleitet ist, wobei das Ergebnis verstärkt wird und durch einen Tiefpaßfilter zum Regelabweichungsverstärker und Begrenzer **182** gelangt, um das Fehlersignal ( $\epsilon$ ) zu ergeben, das – wie vorstehend erörtert – auf 3,3 V begrenzt ist. Der Sollwert ist eine Kombination aus einem manuell einstellbaren Sollwert und einem Taktkondensator, womit sichergestellt ist, daß jedes Hochfahren des Wechselrichters **40** oder Rückstellen nach einem Fehler langsam erfolgt. Das Sollwertsignal zum Regelabweichungsverstärker **182** steigt somit stufenweise von null bis zum eigentlichen Sollwert über einen Zeitraum von etwa 1 Sekunde.

[0048] **Fig. 9** zeigt zwei Wellenformen, die beim Betrieb der in **Fig. 2** gezeigten Stromversorgung **100** gemessen werden. Die Figur zeigt die gemessene Drain-Source-Spannung für eine der IGBT-Vorrichtungen **140** (rechteckige Wellenform) und den zugehörigen Transformator-Primärphasenstrom, wobei die Stromversorgung mit 250 A, 40 V arbeitet.

[0049] Zu den besonderen Vorteilen der erfindungsgemäßen Ausführungsformen zählt auch die Vermeidung ungünstiger Auswirkungen von Phasenschwankungen aufgrund der Verwendung einer dreiphasigen Netzstromversorgung. Ein Soft-Start-System beseitigt praktisch den Einschaltstrom beim Hochfahren. Die Transformator-Anordnung ist im Vergleich zu ähnlich leistungsausgelegten herkömmlichen Transformator-Anordnungen leicht und kompakt beschalten. Weiterhin kann mit der dreiphasigen phasenverschobenen Ausgangssteuerung für den gesteuerten Wechselrichter ein weiterer Bereich von Ausgangsgleichspannungen erhalten werden. Auch sind die Schaltvorrichtungen des gesteuerten Wechselrichters "weich geschaltet", so daß Belastungen der Halbleiterstruktur verringert werden, die Gesamtleistungsfähigkeit der Stromversorgung verbessert und die Synthese hochfrequenter Pseudowechselstromausgangsleistungen möglich wird, was wiederum dazu führt, daß die physikalische Größe der zugehörigen Transformatoren verringert werden kann.

[0050] Soweit in der obigen Beschreibung auf spezielle Komponenten oder Einheiten der Erfindung mit bekannten Äquivalenten Bezug genommen wurde, seien derartige Äquivalente so hierin miteinbezogen als ob sie im einzelnen ausgeführt worden wären.

[0051] Zwar wurde diese Erfindung beispielhaft und anhand möglicher Ausführungsformen derselben beschrieben, doch sei klar, daß Abwandlungen oder Verbesserungen daran vorgenommen werden können, ohne vom Umfang der beigefügten Patentansprüche abzuweichen.

### Patentansprüche

#### 1. Dreiphasentransformator (**60**), umfassend

- drei Sekundärwicklungen, von denen jede aus einer leitfähigen Röhre (**150**) gebildet ist, wobei die leitfähigen Röhren im Wesentlichen parallel und an ihrem ersten Ende elektrisch angeschlossen sind,
- drei Transformatorkerne, die jeweils einer Phase entsprechen, wobei jeder die Form eines auf eine entsprechende leitfähige Röhre (**150**) geschraubten Zylinderelements aufweist, und
- drei Primärwicklungen (**162, 164, 166**), die jeweils einer Phase entsprechen und die derart gewickelt sind, daß sie durch das Innere von benachbarten Paaren von leitfähigen Röhren (**150**) hindurchführen.

2. Transformator nach Anspruch 1, wobei die Zylinderelemente aus einer Mehrzahl von Ferritscheiben gebildet sind, wobei jede Scheibe eine Öffnung darin aufweist, die dafür ausgebildet ist, einen entsprechenden Zylinder aufzunehmen.

3. Transformator nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, wobei die drei leitfähigen Röhren (**150**) eine Einzelwindungs-Sekundärwicklung bilden.

4. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung (**100**), die einen Dreiphasentransformator (**60**) nach einem der Ansprüche 1 bis 3 umfaßt, die eine Pseudowechselstrom-Dreiphasenausgabe empfängt und ferner umfaßt:

- eine Dreiphasen-Gleichrichterschaltung (**30**), die eine erste gleichgerichtete Ausgabe in Antwort auf eine Eingangsspannung erzeugt,
- eine gesteuerte/geregelte Dreiphasen-Wechselrichterschaltung (**40**), die die erste gleichgerichtete Ausgabe empfängt und eine Pseudowechselstrom-Dreiphasenausgabe erzeugt, wobei die Pseudowechselstrom-Dreiphasenausgabe eine Frequenz aufweist, die höher ist als die Frequenz der Eingangsspannung, und
- eine zweite Dreiphasen-Gleichrichterschaltung (**70**), die die transformierte Pseudowechselstrom-Dreiphasenausgabe von dem Transformator empfängt und die Ausgangsgleichstromversorgung erzeugt.

5. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung nach Anspruch 4, wobei die gesteuerte/geregelte Dreiphasen-Wechselrichterschaltung (**40**) ferner eine Mehrzahl von Schaltvorrichtungen (**140**) enthält.

6. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung nach Anspruch 5, wobei die Schaltvorrichtungen (**140**) Leistungstransistoren sind.

7. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung nach einem der Ansprüche 4 bis 6, wobei die Frequenz der Pseudowechselstrom-Dreiphasenausgabe wesentlich höher ist als die Eingangsspannungsfrequenz.

8. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung nach einem der Ansprüche 4 bis 7, wobei die Frequenz der Pseudowechselstrom-Dreiphasenausgabe mehr als oder um eine Größenordnung größer ist als die Eingangsspannungsfrequenz.

9. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung nach Anspruch 8, wobei die Frequenz der Pseudowechselstrom-Dreiphasenausgabe mehr als oder um zwei Größenordnungen größer ist als die Netzfrequenz.

10. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung nach einem der Ansprüche 4 bis 9, wobei die gesteuerte/geregelte Dreiphasen-Wechselrichterschaltung (**40**) umfaßt:

- eine 3-Zweig-Brückenstruktur,
- wobei jeder Zweig der Brückenstruktur wenigstens eine steuerbare/regelbare Schaltvorrichtung (**140**) umfaßt,
- wobei wenigstens eine Schaltvorrichtung (**140**) eines der Zweige eine Phasenreferenz bildet, und
- wobei die Spannung der Wechselrichterschaltung (**40**) durch Phasenmodulation gesteuert/geregelt wird.

11. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung nach Anspruch 10, wobei die Phasenmodulation durch die wenigstens eine Schaltvorrichtung (**140**) eines der anderen beiden Zweige bewirkt wird, wobei deren relative Phasenverschiebung bezüglich der Phasenreferenz gesteuert/geregelt wird, und wobei die relative Phasenverschiebung der wenigstens einen Schaltvorrichtung (**140**) des dritten Zweigs bezüglich der Phasenreferenz derart gesteuert/geregelt wird, daß die Phasenverschiebung relativ zu der Phasenreferenz erhöht wird und dadurch der Ausgangsspannungspegel der Wechselrichterschaltung (**40**) gesteuert/geregelt wird.

12. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung nach Anspruch 10, wobei die Wechselrichterschaltung (**40**) umfaßt:

- wenigstens zwei Schaltvorrichtungen (**140**) pro Phase,
- wobei jede der Schaltvorrichtungen (**140**) ein kapazitives Element (**146**) aufweist, das parallel über dieselbe hinweg angeschlossen ist und wobei jede Phase der Wechselrichterausgabe ein induktives Element (**142**) enthält,
- wobei ein jeweiliges kapazitives Element (**146**) und ein jeweiliges induktives Element (**142**) jeder Phase einen LC-Schwingkreis bilden, und
- wobei das Ausschalten jedes Schaltelements derart gesteuert/geregelt wird, daß eine Totzeit zwischen Schaltephasen auftritt, wobei während dieser Zeit der LC-Schwingkreis bewirkt, daß das nächstfolgende Schaltelement, das eingeschaltet werden soll, zum Zeitpunkt des Schaltens über sich im Wesentlichen eine



Spannung von 0 V aufweist.

13. Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung nach einem der Ansprüche **4** bis **12**, wobei die Wechselstrom-Gleichstrom-Stromversorgung mit einer Zelleinheit gekoppelt ist, wobei der Gleichstromausgang der Stromversorgung an wenigstens ein Kathoden-/Anoden-Elektrodenpaar der Zelleinheit angeschlossen ist, um zu bewirken, daß die Elektrolyse von Wasser zum Freisetzen von Wasserstoff- und Sauerstoffgas stattfindet.

14. Verfahren zum Erzeugen einer Gleichstrom-Stromversorgung aus einer Dreiphasen-Wechselstrom-Stromversorgung, das einen Dreiphasentransformator (**60**) nach einem der Ansprüche 1 bis 3 vorsieht, umfassend:

- Gleichrichten der Wechselstrom-Stromversorgung, um eine gleichgerichtete Stromversorgung zu erzeugen,
- Wechselrichten der gleichgerichteten Stromversorgung, um die Pseudowechselstrom-Dreiphasenversorgung zu erzeugen, deren Frequenz größer ist als die der Dreiphasen-Wechselstrom-Stromversorgung,
- Bereitstellen einer Pseudowechselstrom-Dreiphasenversorgung für den Dreiphasentransformator, und
- Gleichrichten einer Ausgabe des Dreiphasen-Transformators.

15. Verfahren zum Erzeugen einer Gleichstromversorgung nach Anspruch **14**, wobei die Spannung der Pseudowechselstrom-Dreiphasenversorgung durch Bereitstellen eines Dreiphasenwechselrichters gesteuert geregelt wird, und umfassend:

- Zuordnen einer ersten Phase als eine Phasenreferenz,
- Steuern/Regeln der relativen Phasenverschiebung einer der anderen beiden Phasen derart, daß die Phasendifferenz zwischen der ersten Phase und der einen der beiden anderen Phasen reduziert wird, und
- Steuern/Regeln der relativen Phasenverschiebung der dritten Phase, derart daß die Phasendifferenz zwischen der dritten Phase und der ersten Phase erhöht wird.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

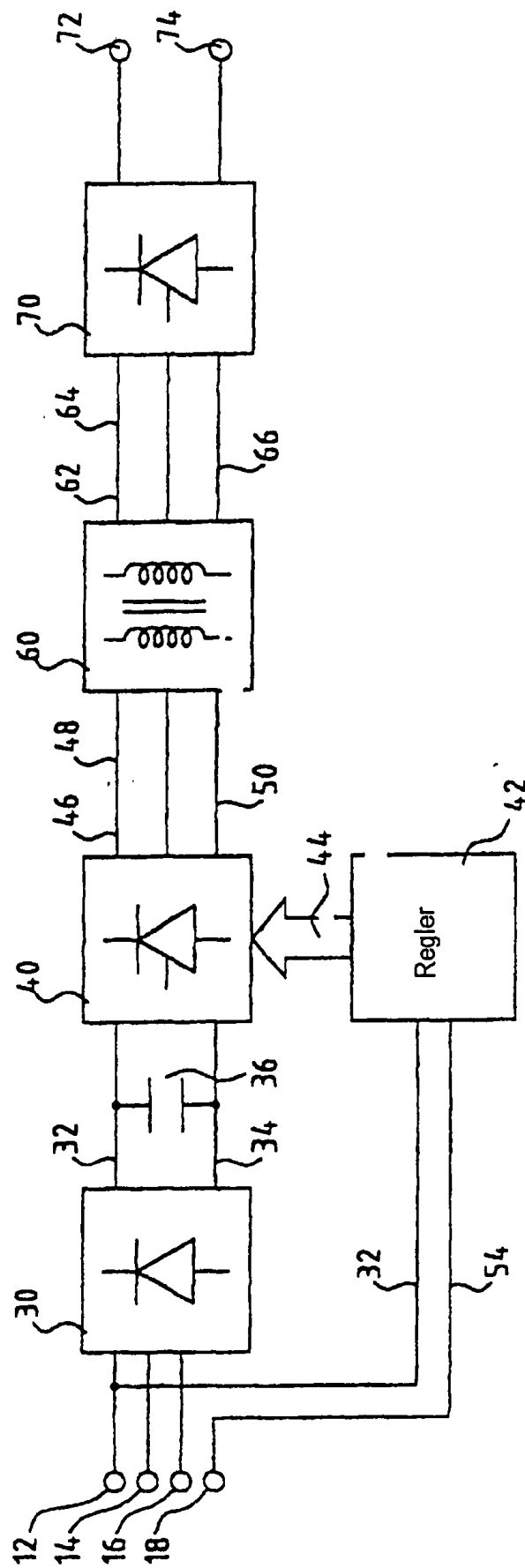


FIG.1.

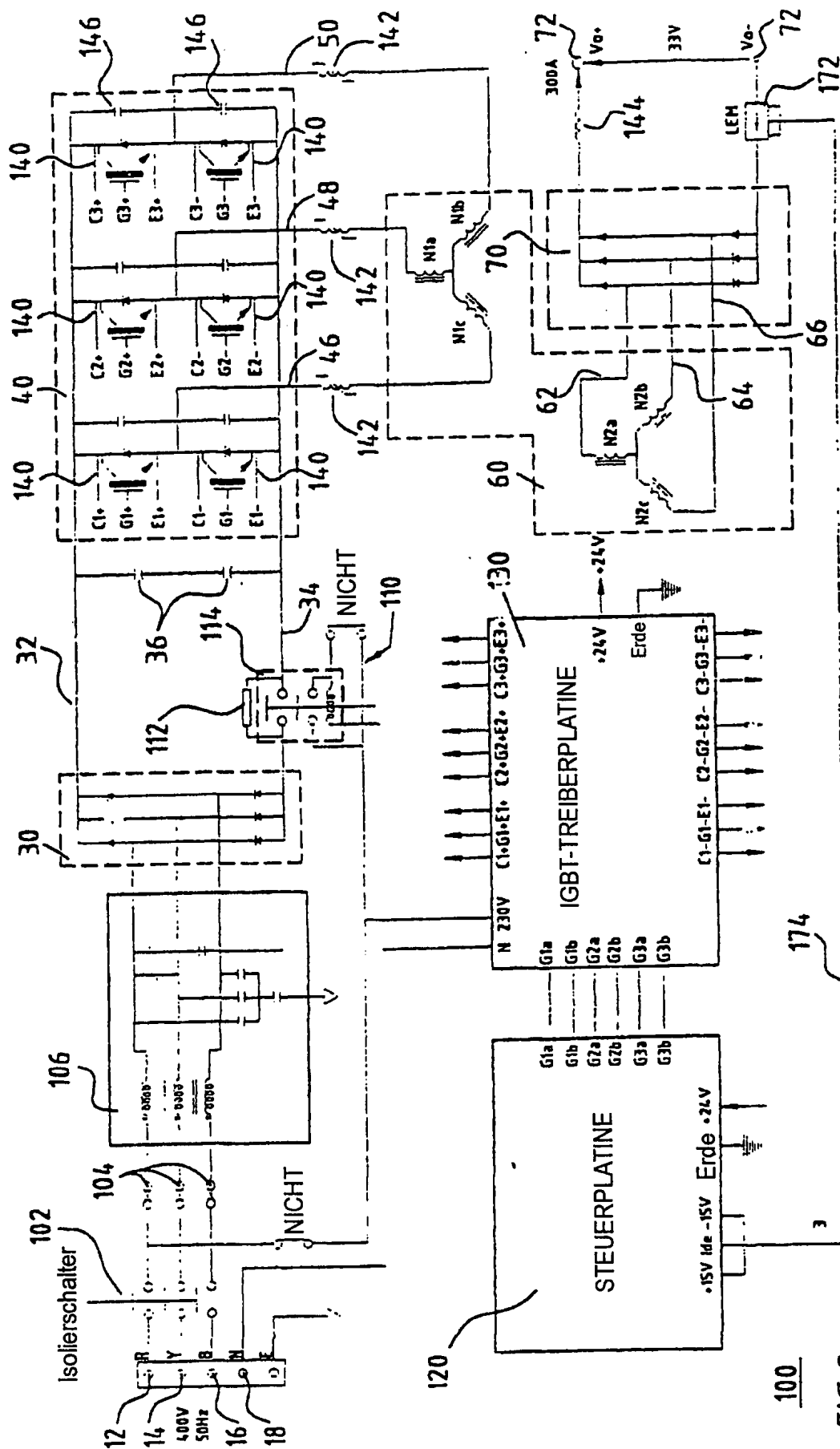


FIG. 2.

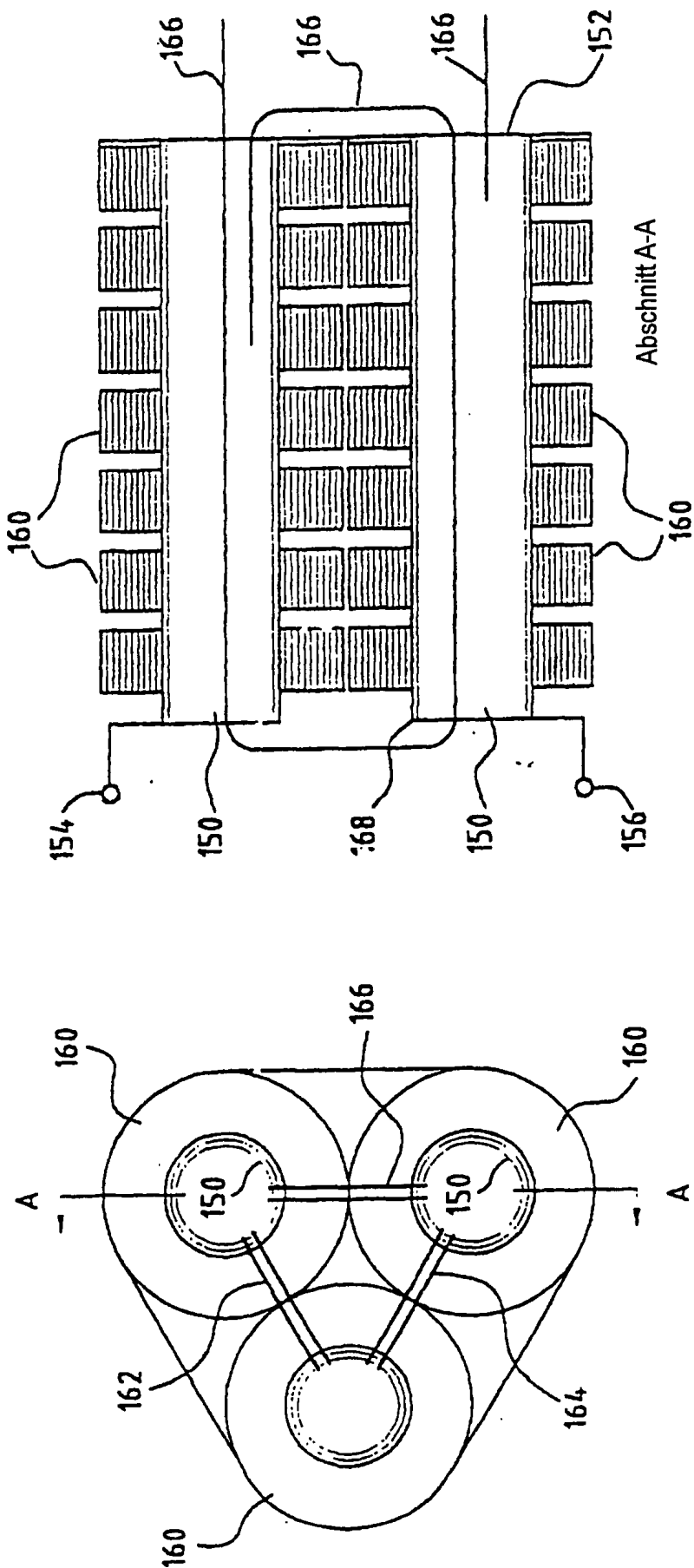


FIG. 3b.

FIG. 3a.

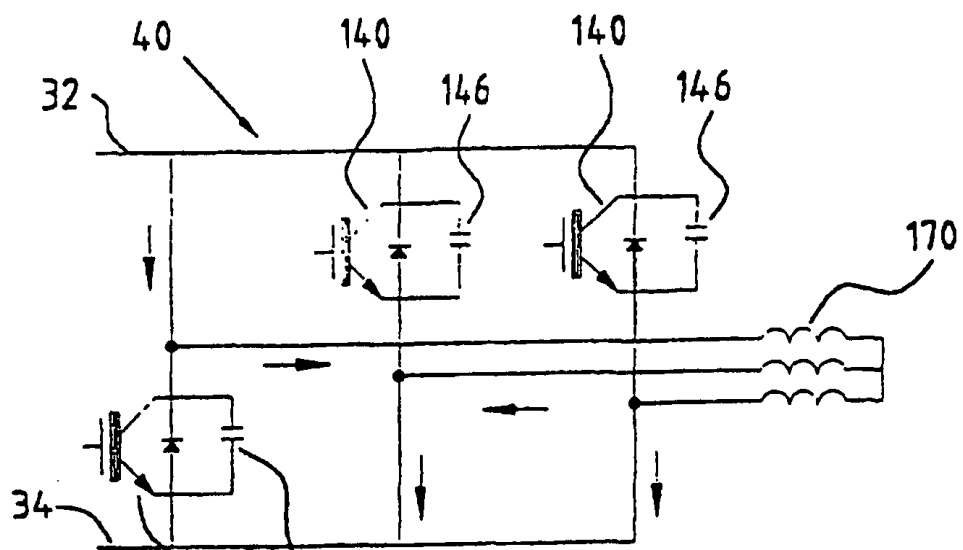


FIG. 4a.

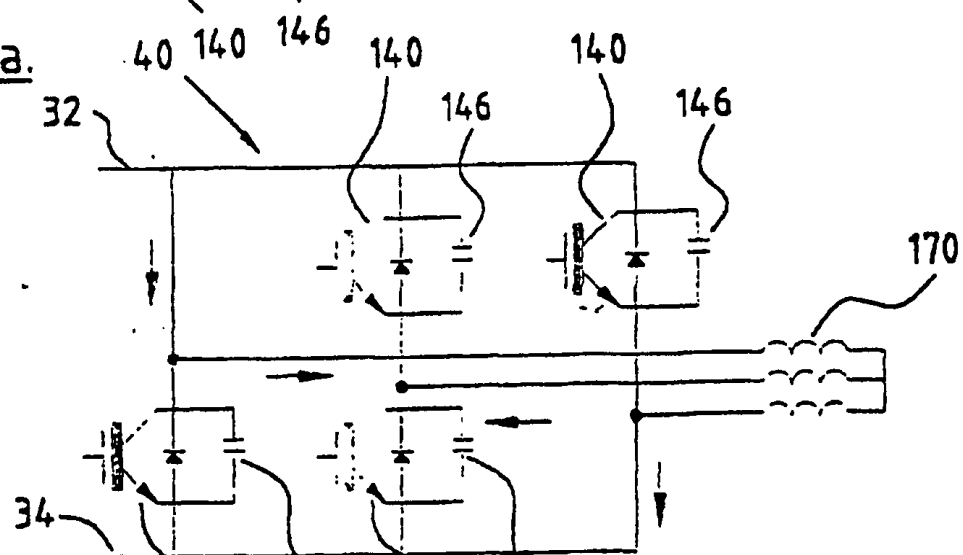


FIG. 4b.

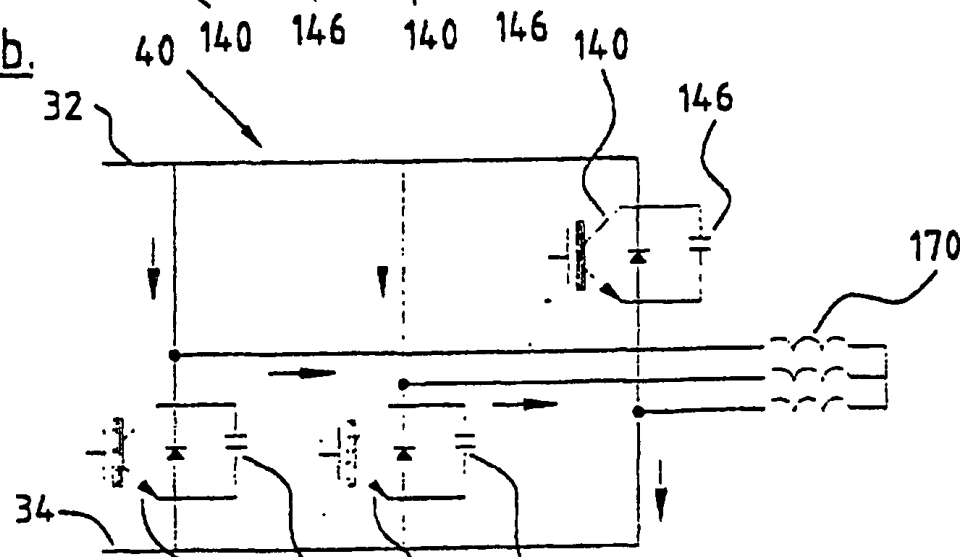


FIG. 4c.

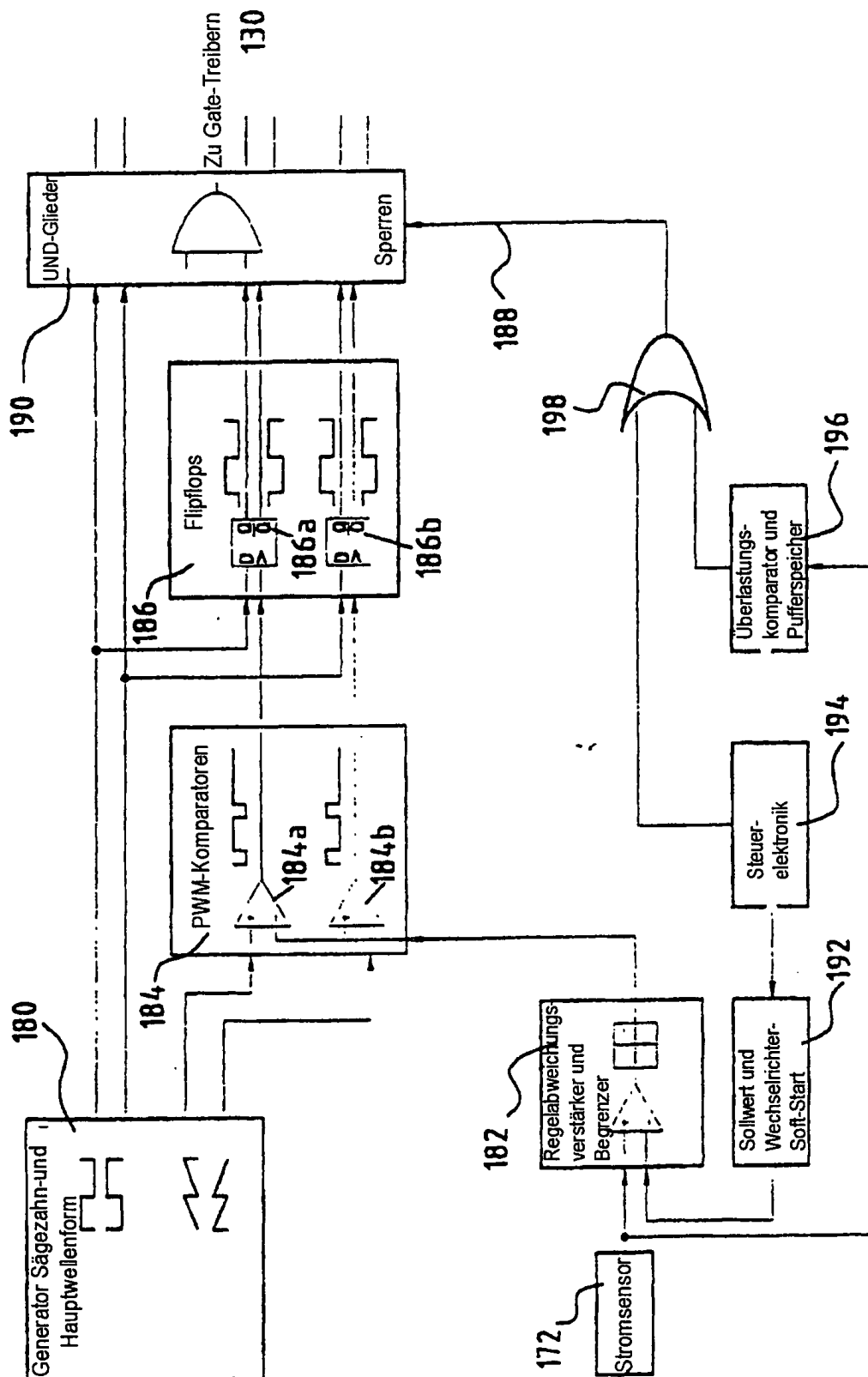


FIG. 6.

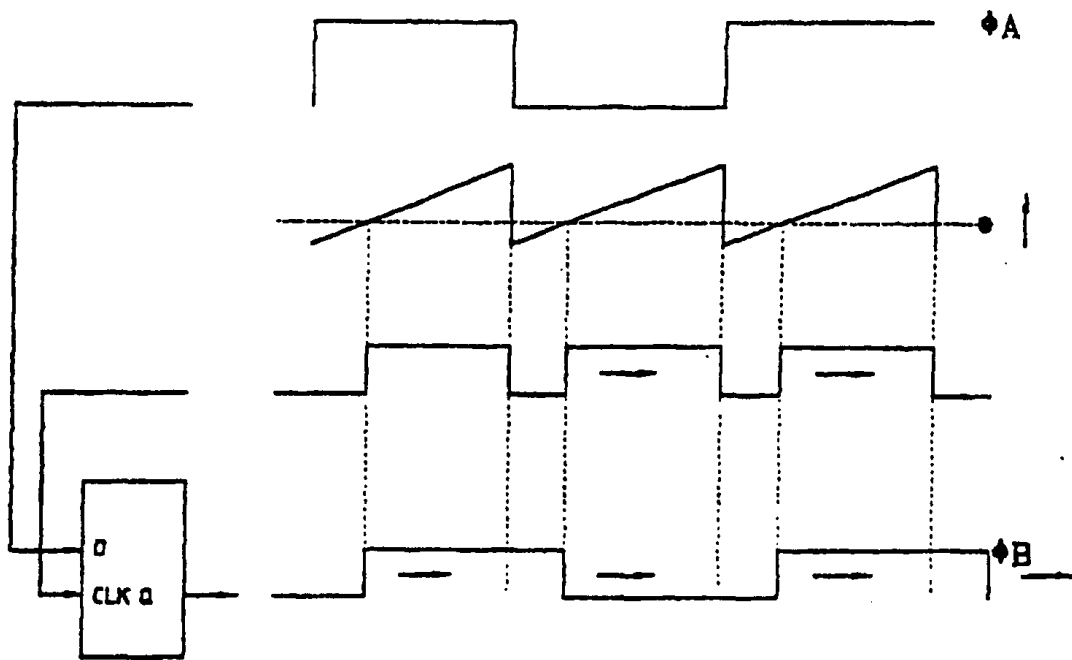


FIG. 7.

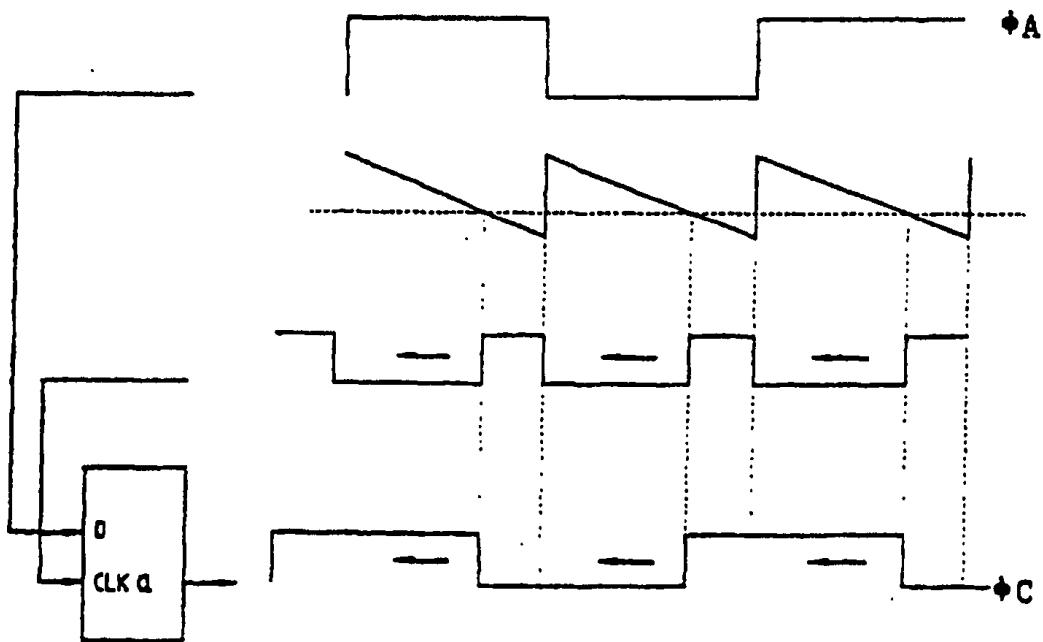


FIG. 8.

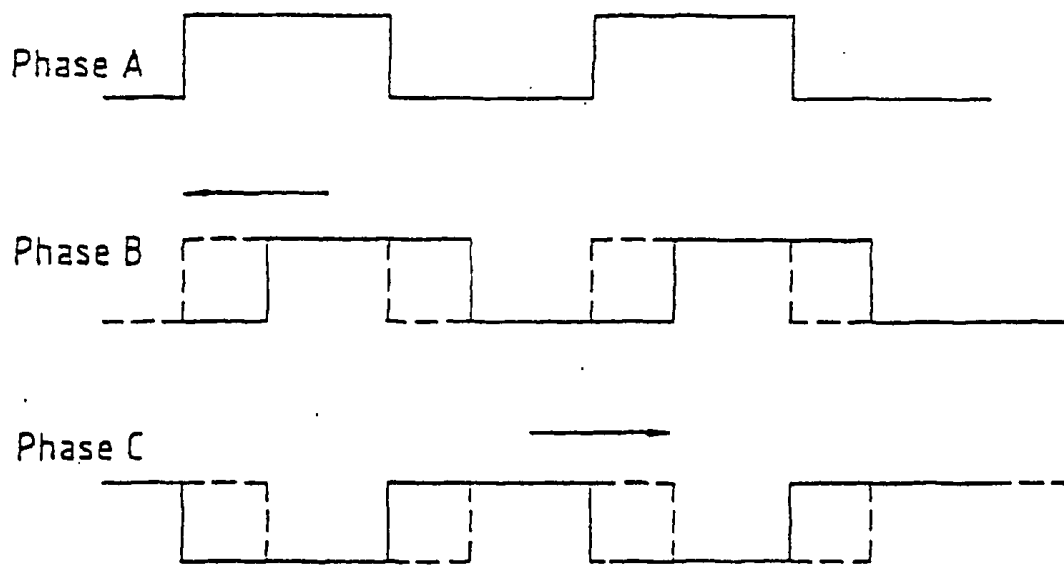


FIG.5.

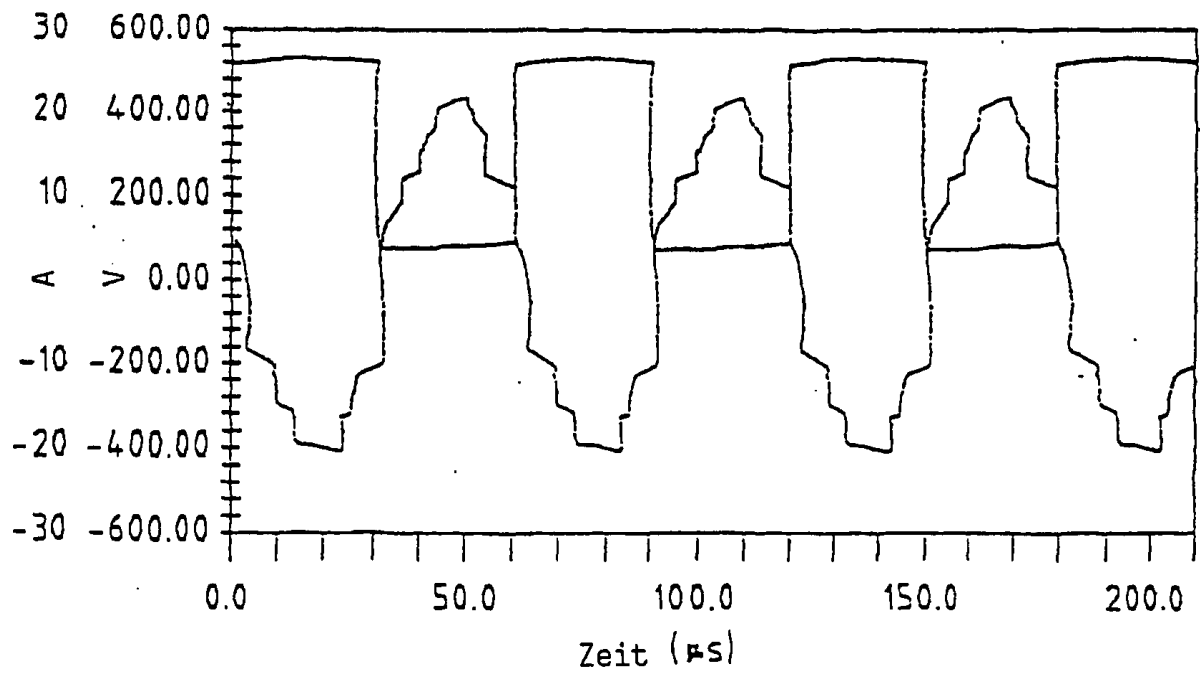


FIG.9.