



**SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT**  
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) **CH 713 573 B1**

(51) Int. Cl.: **H01F 37/00** (2006.01)  
**H02M 7/797** (2006.01)

**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**

Schweizerisch-lichtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 00318/17

(22) Anmeldedatum: 15.03.2017

(43) Anmeldung veröffentlicht: 28.09.2018

(24) Patent erteilt: 29.01.2021

(45) Patentschrift veröffentlicht: 29.01.2021

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

(72) Erfinder:  
Lukas Schrittwieser, 8050 Zürich (CH)  
Michael Leibl, 8050 Zürich (CH)  
Michael Haider, 8001 Zürich (CH)  
Friedrich Thöny, 8302 Kloten (CH)  
Johann Walter Kolar, 8044 Zürich (CH)

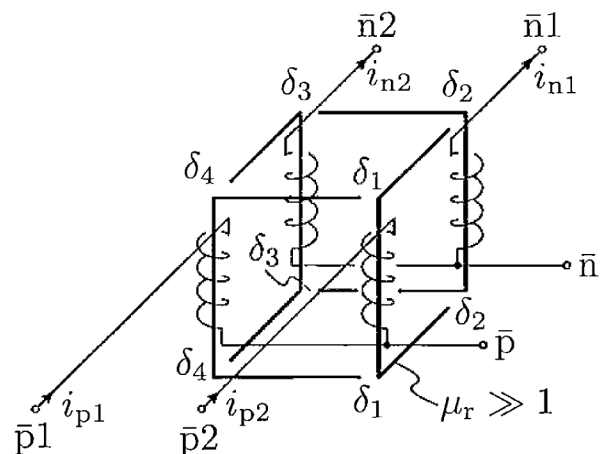
(74) Vertreter:  
Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach  
8032 Zürich (CH)

(54) **Magnetische Drossel, Umrichterabschnitt und Umrichter.**

(57) Die Erfindung betrifft eine magnetische Drossel welche zur Verwendung in Verbindung mit einer Umrichterbrücke, zum Anschluss an n Phasen mit jeweils m Brückenzeigen pro Phase vorgesehen ist. Die Drossel weist einen Kern mit n Teilkernen auf, wobei jeder der Teilkerne

jeweils einen Anfangsknoten und einen Endknoten und m Kernabschnitte aufweist, welche den Anfangsknoten und den Endknoten verbinden,

und jeder der Kernabschnitte eine Wicklung mit einem ersten (p1, p2, n1, n2; und einem zweiten Wicklungsanschluss (p,n) aufweist. Die zweiten Wicklungsanschlüsse der Wicklungen desselben bilden Teilkernes bilden einen gemeinsamen Wicklungsanschlusspunkt (p, n) bilden. Die Wicklungen auf den Kernabschnitten sind so orientiert, dass in jedem Kernabschnitt ein durch die Wicklung in den gemeinsamen Wicklungsanschlusspunkt fließender Strom eine magnetische Spannung vom Anfangsknoten zum Endknoten des Teilkernes



Die Teilkerne sind über ihre Anfangs- und Endknoten miteinander verbunden und bilden einen Kreis.

Ferner betrifft die Erfindung einen Umrichterabschnitt und einen Umrichter mit einer solchen Drossel.

## Beschreibung

### Stand der Technik

**[0001]** Zur Speisung von Gleichspannungslasten aus dem dreiphasen Wechselspannungsnetz werden dem Stand der Technik entsprechend aktive Gleichrichterschaltungen eingesetzt um eine Regelung der Ausgangsspannung und geringe Netzurückwirkungen zu erreichen.

**[0002]** Liegt die zu erzeugende Gleichspannung zwischen Null und dem 1.5-fachen der Netzphasenspannungsamplitude können hierfür Systeme mit Tiefsetzstellercharakteristik verwendet werden. Mögliche Schaltungen zur Realisierung eines aktiven Dreiphasen-Gleichrichters mit Leistungsfaktorkorrektur und Tiefsetzstellercharakteristik wurden in CH704553 beschrieben, eine Variante davon ist in Fig. 1a dargestellt. Dieser Gleichrichter erlaubt eine Leistungsübertragung vom Dreiphasen-Wechselspannungsnetz mit den Anschlussklemmen a, b, c an einen Gleichspannungsausgang mit den Klemmen p und n. Hierzu werden die Netzspannungen nach einer Filterung durch drei Eingangsinduktivitäten  $L_f$  von einer Gleichrichtereinheit 1 mit den Ausgangsknoten x, y und z, bestehend aus einer Dreiphasen-Sechspuls-Diodenbrücke und drei bipolar sperrfähigen, bidirektionalen Phasenauswahlschaltern  $S_{aya}$ ,  $S_{byb}$ ,  $S_{cyc}$  gleichgerichtet wobei jener Phasenauswahlschalter eingeschaltet wird dessen Momentanwert der zugeordneten Phasenspannung zwischen den beiden anderen Momentanwerten der Phasenspannungen liegt. Dadurch resultieren drei abschnittsweise sinusförmige Spannungen an den Knoten x, y und z, welche durch drei Kondensatoren  $C_{x,y,z}$  stabilisiert werden, wobei das Potential an Knoten x immer grösser oder gleich dem Potential an Knoten y ist und das Potential an Knoten y immer grösser oder gleich jenem an Knoten z ist. Mittels einer nachfolgenden Schaltstufe 2, bestehend aus zwei in Reihe geschalteten Tiefsetzstellerhalbbrücken mit den aktiven Schaltern  $S_{xp}$ ,  $S_{nz}$  und zwei Dioden  $D_{yp}$ ,  $D_{ny}$ , wird eine im zeitlichen Mittel über eine Periode der Schaltfrequenz konstante Spannung zwischen den Knoten p und n erzeugt. Nach einer Tiefpassfilterung durch zwei Induktivitäten  $L$  und einen Kondensator  $C_o$  resultiert die Ausgangsgleichspannung  $u_{pn}$ . Dadurch ergeben sich Gleichströme  $i_p$  und  $i_n$  in den Filterinduktivitäten sowie sinusförmige Eingangsströme  $i_a$ ,  $i_b$  und  $i_c$  im Wechselspannungsnetz. Ein Nachteil dieses Systems liegt in den diskontinuierlichen Eingangsströmen  $i'_x$ ,  $i'_y$  und  $i'_z$  der Schaltstufe wodurch ein vergleichsweise starker schaltfrequenter Spannungsrippel an den Filterkondensatoren  $C_{x,y,z}$  entsteht welcher die Kommutierung der Eingangsstufe 1 stören und somit Verzerrungen der Netzströme hervorrufen kann.

**[0003]** Eine alternative Realisierung ist in Fig. 1b gezeigt wobei hier die Schaltstufe 4 im Vergleich zu Fig. 1a aus je zwei parallel geschalteten Tiefsetzstellerhalbbrücken besteht welche bezüglich der Knoten x, y und z parallel geschaltet ist. Die resultierenden Ausgangsklemmenpaare p1, p2 und n1, n2 werden anschliessend durch zwei stromkompensierte Drosseln 5 ( $ICT_p$  und  $ICT_n$ ) zusammengeführt auf die Knoten p und n welche analog zu Fig. 1a schaltfrequente Spannungskomponenten aufweisen. Die stromkompensierten Drosseln  $ICT_p$  und  $ICT_n$  stellen in Verbindung mit einer geeigneten Regelung, mit Ausnahme eines schaltfrequenten Rippels, eine Vermeidung von Kreisströmen zwischen den parallel geschalteten Tiefsetzstellerbrücken sicher, wodurch eine gleichmässige Aufteilung der Ausgangsgleichströme  $i_p$  und  $i_n$  auf die Schalterpaare  $S_{xp1}$ ,  $S_{xp2}$  und  $S_{nz1}$ ,  $S_{nz2}$  sichergestellt wird. Durch eine geeignete verschränkte Taktung, das heisst zum Beispiel um eine halbe Pulsperiode versetzt, der Schalter  $S_{xp1}$ ,  $S_{xp2}$  und  $S_{nz1}$ ,  $S_{nz2}$  kann zusätzlich die Amplitude der schaltfrequenten Spannungskomponenten zwischen den Knoten p und n reduziert und deren Frequenz verdoppelt werden, was Vorteile hinsichtlich der Realisierung der Ausgangsfilterinduktivitäten 6 ergibt. Ebenso resultiert eine Verdoppelung der Frequenz und Reduktion der Amplitude des schaltfrequenten Rippels in den diskontinuierlichen Eingangsströmen  $i'_x$ ,  $i'_y$  und  $i'_z$  der Tiefsetzstellerbrücken, wodurch sich der schaltfrequente Spannungsrippel an den Filterkondensatoren  $C_{x,y,z}$  reduziert.

**[0004]** Wie in Fig. 1b gezeigt können die Ausgangsfilterinduktivitäten 6 durch zwei gekoppelte Induktivitäten realisiert werden wobei deren Wicklungssinn so gewählt wird, dass der schaltfrequente Gleichtaktanteil der Potentiale an den Knoten p und n über der Gleichtaktdrossel  $L_{cm}$  abfällt und der Gegentaktanteil über der Gegentaktdrossel  $L_{dm}$  abfällt. Dies erlaubt eine kompaktere und/oder verlustärmere Realisierung des Ausgangsfilters durch die Implementierung eines grösseren Induktivitätswerts der Gleichtaktdrossel  $L_{cm}$  zur Filterung von Gleichtaktstörströmen.

**[0005]** Im Vergleich zu Fig. 1a ergeben sich bei der Realisierung nach Fig. 1b geringere Verzerrungen der aus dem Wechselspannungsnetz bezogenen Eingangsströme  $i_a$ ,  $i_b$  und  $i_c$  sowie eine geringe benötigte Dämpfung des Eingangsfilters  $L_f$  und  $C_{x,y,z}$  zur Einhaltung von Störstromvorschriften im Wechselspannungsnetz. Allerdings resultiert ein höherer Aufwand für die Implementierung der magnetischen Komponenten da insgesamt vier gekoppelte Induktivitäten mit je zwei Wicklungen benötigt werden.

**[0006]** Aufgabe der Erfindung ist es, den Realisierungsaufwand des Ausgangsfilters in Bezug auf Baugrösse, Belastbarkeit, Anzahl und/oder Kosten der Komponenten, bei gleicher Funktionalität, zu reduzieren.

**[0007]** Die Aufgabe wird gelöst durch eine magnetische Drossel, einen Umrichterabschnitt und einen Umrichter gemäss den Patentansprüchen.

**[0008]** Die magnetische Drossel ist also zur Verwendung in Verbindung mit einer Umrichterbrücke vorgesehen, zum Anschluss an n Phasen mit jeweils m Brückenäzweigen pro Phase, wobei n mindestens zwei und m mindestens zwei beträgt. Die Drossel weist einen Kern mit n Teilkernen auf,

wobei jeder der Teilkern jeweils einen Anfangsknoten und einen Endknoten und m Kernabschnitte aufweist, welche den Anfangsknoten und den Endknoten verbinden, und jeder der Kernabschnitte

eine Wicklung mit einem ersten und einem zweiten Wicklungsanschluss aufweist,

die zweiten Wicklungsanschlüsse der Wicklungen desselben Teilkernes einen gemeinsamen Wicklungsanschlusspunkt bilden, und

die Wicklungen auf den Kernabschnitten so orientiert sind, dass in jedem Kernabschnitt ein durch die Wicklung in den gemeinsamen Wicklungsanschlusspunkt fließender Strom eine magnetische Spannung vom

Anfangsknoten zum Endknoten des Teilkernes erzeugt,

und die Teilkerne miteinander zu einem magnetischen Netzwerk verbunden sind indem für  $i=1..n-1$  jeweils der Endknoten des  $i$ -ten Teilkernes mit den Anfangsknoten des  $(i+1)$ -ten Teilkernes verbunden ist und der Endknoten des  $n$ -ten Teilkernes mit dem Anfangsknoten des ersten Teilkernes verbunden ist.

**[0009]** Ein darauf aufgebauter Umrichterabschnitt mit einer ersten Topologie weist eine solche Drossel und eine Umrichterbrücke mit  $m \cdot n$  Brückenzeigen auf, wobei jeder Brückenweig einen Zweigmittelpunkt, einen oberen Schalter und einen unteren Schalter aufweist, wobei der obere Schalter zwischen den Zweigmittelpunkt und einen oberen Anschluss der Umrichterbrücke und der untere Schalter zwischen den Zweigmittelpunkt und einen unteren Anschluss der Umrichterbrücke angeschlossen ist, und jeder der ersten Wicklungsanschlüsse der  $m$  Kernabschnitte der  $n$  Teilkerne an einen der Zweigmittelpunkte der  $m \cdot n$  Brückenzeige angeschlossen ist.

**[0010]** Ein nach dem gleichen Prinzip betriebener aber eine andere, zweite, Topologie aufweisender Umrichterabschnitt, weist eine solche Drossel und eine Umrichterbrücke mit  $m \cdot n/2$  Brückenzeigen auf, wobei jeder Brückenweig einen Zweigmittelpunkt, einen oberen Anschlusspunkt, einen unteren Anschlusspunkt, einen oberen oberen Schalter, einen unteren oberen Schalter, einen oberen unteren Schalter und einen unteren unteren Schalter aufweist, wobei

der obere obere Schalter zwischen einen oberen Anschluss der Umrichterbrücke und den oberen Anschlusspunkt geschaltet ist,

der untere obere Schalter, der ein passiver Schalter sein kann, zwischen den oberen Anschlusspunkt und den Zweigmittelpunkt geschaltet ist,

der obere untere Schalter, der ein passiver Schalter sein kann, zwischen den Zweigmittelpunkt und den unteren Anschlusspunkt geschaltet ist,

der untere untere Schalter zwischen den unteren Anschlusspunkt und einen unteren Anschluss der Umrichterbrücke geschaltet ist,

und jeder der ersten Wicklungsanschlüsse der  $m$  Kernabschnitte der  $n$  Teilkerne an einen der Menge der oberen und der unteren Anschlusspunkte der  $m \cdot n/2$  Brückenzeige angeschlossen ist.

**[0011]** Ein darauf aufgebauter Umrichter weist einen Umrichterabschnitt mit der zweiten Topologie auf, sowie eine weitere Umrichterbrücke zur Verbindung des oberen Anschlusses und des unteren Anschlusses der Umrichterbrücke mit gefilterten Phasenanschlüssen eines Mehrphasennetzes mit  $q$  Phasen, sowie mit  $q$  Mittelpunkt-Schaltern, von denen jeder zwischen einen der gefilterten Phasenanschlüsse und dem Zweigmittelpunkt geschaltet ist.

### Kurzbeschreibung der Figuren

**[0012]** Im Folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen, welche in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt sind, näher erläutert. Es zeigen jeweils schematisch:

#### Figur 1

Dreiphasen-Gleichrichter Schaltungen mit Tiefsetzstellercharakteristik gemäss dem Stand der Technik, ausgeführt ohne (a) und mit (b) parallelen Halbbrückenzeigen in den Schaltstufen 2 bzw. 4.

#### Figur 2

Dreiphasen-Gleichrichter Schaltungen mit Tiefsetzstellercharakteristik gemäss der Erfindung mit parallelen Halbbrückenzeigen in der Schaltstufe sowie mit einer stromkompensierten Drossel 7 welche gleichzeitig Kreisströme zwischen den parallel geschalteten Halbbrückenzeigen, als auch Gleichtaktströme unterdrückt.

#### Figur 3

Mögliche Realisierungen einer stromkompensierten Drossel für eine Anwendung gemäss Figur 2 mit geometrisch unterschiedlichen Kernen und Wicklungsanordnungen.

#### Figur 4

Charakteristische Spannungs- und Stromformen bei Verwendung der Erfindung als Dreiphasen-Gleichrichter mit Tiefsetzstellercharakteristik gemäss Figur 2.

#### Figur 5

Mögliche Realisierung einer Regelung eines Dreiphasen-Gleichrichters mit Tiefsetzstellercharakteristik gemäss Figur 2 welche sinusförmige Netzströme sowie eine gleichmässige Aufteilung des Ausgangsgleichstroms auf die parallel geschalteten Halbbrückenarme erlaubt.

#### Figur 6

Mögliche Anwendung einer stromkompensierten Drossel in einem Dreiphasen-Gleichrichters mit Hochsetzstellercharakteristik mit drei Phasen und mit je zwei parallelen Halbbrückenarmen.

### Wege zur Ausführung der Erfindung

**[0013]** Mit der Erfindung ist es möglich, den Realisierungsaufwand des Ausgangsfilters eines Dreiphasen-Gleichrichters mit Tiefsetzstellercharakteristik durch eine Kombination von mehr als zwei Wicklungen auf einen gemeinsamen Mehrschenkelkern zu reduzieren. Insbesondere kann hierdurch die Anzahl der benötigten Wicklungen bei gleicher Funktionalität reduziert werden da durch eine geeignete magnetische Kopplung der beiden stromkompensierten Drosseln  $ICT_p$  und  $ICT_n$  die Funktion der Gleichtaktrossel  $L_{cm}$  in diese integriert wird. Die resultierende Schaltung ist in Fig. 2 gezeigt mit der neuartigen gekoppelten stromkompensierten Drossel 7 wobei im Ausgangsfilter 8 die Gleichtaktrossel entfallen kann und eine reine Gegentaktrossel  $L_{dm}$ , welche gekoppelt oder ungekoppelt ausgeführt werden kann, ausreicht.

**[0014]** Das in Fig. 2 dargestellte Gleichrichtersystem wird durch ein ein- oder mehrstufiges Eingangsfilter mit dem Dreiphasen-Wechselspannungsnetz verbunden wobei die letzte Stufe des Filters aus drei Filterinduktivitäten  $L_f$  besteht an welche eine Dreiphasen-Sechspuls-Diodenbrücke angeschlossen wird deren positiver Ausgang mit den Knoten x der Schaltung verbunden ist und deren negativer Ausgang mit dem Knoten z der Schaltung verbunden ist. Zusätzlich wird an die drei Filterinduktivitäten je ein bipolar sperr- und leitfähiger Phasenauswahlschalter angeschlossen wobei die verbleibenden Anschlüsse der drei Phasenauswahlschalter an den Knoten y der Schaltung angeschlossen werden. An die Knoten x, y und z der Schaltung werden drei Filterkondensatoren  $C_{x,y,z}$  angeschlossen welche entweder einen gemeinsamen Sternpunkt bilden können oder in einer Dreieckschaltung mit den Knoten x, y und z verbunden werden können. An die Knoten x und y ist eine obere Tiefsetzstellerbrücke angeschlossen und an die Knoten z und y ist eine untere Tiefsetzstellerbrücke angeschlossen. Die obere Tiefsetzstellerbrücke wird von zwei parallel geschalteten oberen Tiefsetzstellerhalbbrücken gebildet deren Ausgänge als p1 und p2 bezeichnet werden, wobei diese je aus einem aktiven Halbleiterschalter und einer Diode bestehen. Dabei wird der Halbleiterschalter  $S_{xp1}$  der ersten oberen Tiefsetzstellerhalbbrücke zwischen die Knoten x und p1 und der Halbleiterschalter  $S_{xp2}$  der zweiten oberen Tiefsetzstellerhalbbrücke zwischen die Knoten x und p2 geschaltet sodass je ein Stromfluss vom Knoten x in die Knoten p1 und p2 möglich ist. Die Dioden werden so geschaltet dass ein Stromfluss vom Knoten y nach p1 sowie vom Knoten y nach p2 möglich ist. Die untere Tiefsetzstellerbrücke wird von zwei parallel geschalteten unteren Tiefsetzstellerhalbbrücken gebildet deren Ausgänge als n1 und n2 bezeichnet werden, wobei diese je aus einem aktiven Halbleiterschalter und einer Diode bestehen. Dabei wird der Halbleiterschalter  $S_{nz1}$  der ersten unteren Tiefsetzstellerhalbbrücke zwischen die Knoten z und n1 sowie der Halbleiterschalter  $S_{nz2}$  der zweiten unteren Tiefsetzstellerbrücke zwischen z und n2 geschaltet sodass je ein Stromfluss von den Knoten n1 und n2 in den Knoten z möglich ist und die Dioden werden so geschaltet dass ein Stromfluss von den Knoten n1 und n2 in den Knoten y möglich ist. An die Knoten p1, p2, n1 und n2 sind vier Wicklungen mit identischer Windungszahl einer stromkompensierten Drossel angeschlossen welche um einen gemeinsamen mehrschenkligen Kern gewickelt sind dessen Ausführung weiter unten beschrieben ist. Die beiden verbleibenden Anschlüsse der Wicklungen welche mit den Knoten p1 und p2 verbunden sind, sind zusammen an den Knoten p angeschlossen welcher über eine obere Ausgangsinduktivität mit der positiven Ausgangsklemme p des Gleichrichters verbunden ist. Die beiden verbleibenden Anschlüsse der Wicklungen welche mit den Knoten n1 und n2 verbunden sind, sind zusammen an den Knoten n angeschlossen welcher über eine untere Ausgangsinduktivität mit der negativen Ausgangsklemme n des Gleichrichters verbunden ist. Die obere und untere Ausgangsinduktivität können alternativ auch gekoppelt, im Sinne einer Gegentaktrossel auf einem gemeinsamen Kern ausgeführt werden. Zwischen die Ausgangsklemmen p und n kann zusätzlich noch ein Ausgangskondensator angeschlossen werden welcher die Ausgangsgleichspannung upn stabilisiert.

**[0015]** Eine mögliche Realisierung der stromkompensierten Drossel mit einem Kern aus hochpermeablem ferromagnetischem Material ( $\mu_r \gg 1$ ) mit vier Schenkeln und drei Fenstern ist in Fig. 3a gezeigt. Jeder der vier Kernschenkel trägt dabei eine der Wicklungen. Der Wicklungssinn der vier Wicklungen ist dabei so gewählt dass sich die Gleichstromkomponenten der Wicklungsströme  $i_{p1}$ ,  $i_{p2}$ ,  $i_{n1}$  und  $i_{n2}$  in jedem der drei Kernfenster aufheben. Dadurch wird eine Sättigung des Kernmaterials unabhängig vom Ausgangsgleichstrom vermieden und es sind keine Luftspalte in den Kernschenkeln nötig, was die Implementierung von hohen Induktivitätswerten erlaubt welche typisch für eine ausreichende Unterdrückung von Gleichtaktströmen im Wechselspannungsnetz benötigt werden. Es ist jedoch möglich in jedem der vier Kernschenkel je einen Luftspalt einzufügen, welche in Fig. 3a mit  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  und  $\delta_4$  bezeichnet sind, wodurch die Induktivitätswerte der stromkompensierten Drossel bei unveränderter Windungszahl verringert werden können.

**[0016]** Auf Grund der planaren Anordnung der Wicklungen bei einer Realisierung wie oben beschrieben ergibt sich in Folge von Streufeldern eine unterschiedliche Kopplung zwischen verschiedenen Wicklungspaaren. Dies kann durch Ver-

wendung eines Kerns vermieden werden bei welchem die 12 Kanten eines Würfels oder Quaders aus hochpermeablem ferromagnetischem Kernmaterial ausführt werden und um vier parallele Kanten je eine Wicklung der stromkompensierten Drossel führt, wobei der Wicklungssinn wiederum so gewählt wird, dass sich in jeder Seitenfläche des Würfels die durch sie hindurchtretenden Ströme kompensieren. Es kann dabei zwischen zwei möglichen Anordnungen der Wicklungen unterschieden werden da jene beiden Wicklungen welche an die Knoten  $p_1$  und  $p_2$  der Schaltung angeschlossen sind entweder auf unmittelbar benachbarten Kanten (Fig. 3b) oder aber an diagonal gegenüberliegenden Kanten (Fig. 3c) gewickelt werden können. Für gleiche Permeabilität und Abmessungen des Kerns ergibt sich für eine direkt benachbarte Anordnung gemäss Fig. 3b eine geringe Gleichtaktinduktivität und eine grössere Induktivität zu Unterdrückung von Kreisströmen zwischen den parallel geschalteten Tiefsetzstellerhalbrücken verglichen mit einer diagonal gegenüberliegenden Anordnung der  $p_1$ ,  $p_2$  Wicklungen. Wie bei einer planaren Anordnung können wiederum Luftspalte eingefügt werden um die Induktivitätswerte der stromkompensierten Drossel bei unveränderter Windungszahl zu verringern, wobei entweder je ein Luftspalt in jedem der eine Wicklung tragenden Kernschenkel eingefügt werden kann oder je ein Luftspalt in den acht keine Wicklung tragenden Kernschenkeln eingefügt werden kann.

**[0017]** Wird die Topologie des magnetischen Kreises betrachtet, so entspricht jeder der Schenkel des Kernes, der eine Wicklung trägt, einem Kernabschnitt. Eine Anzahl von  $m$ , in diesem Fall jeweils von zwei, Kernabschnitten bildet einen Teilkern  $t_1, t_2$ . Jeder Teilkern  $t_1, t_2$  ist einer von  $n$  Phasen zugeordnet, in diesem Fall einer von zwei Phasen. Jeder Teilkern weist einen Anfangsknoten und einen Endknoten auf, welche durch die  $m$  Kernabschnitte verbunden sind. In diesem Fall ist ein erster gemeinsamer Knoten  $k_1$  gleich dem Anfangsknoten des ersten Teilkerns  $t_1$  und dem Endknoten des zweiten Teilkerns  $t_2$ , und ein zweiter gemeinsamer Knoten  $k_2$  ist gleich dem Anfangsknoten des zweiten Teilkerns  $t_2$  und dem Endknoten des ersten Teilkerns  $t_1$ . In den Figuren 3b und 3c bildet das obere Viereck von Schenkeln ohne Wicklungen den ersten gemeinsamen Knoten und das untere Viereck den zweiten gemeinsamen Knoten. In der weiter unten im Zusammenhang mit Figur 6 erläuterten Variante einer Drossel 7 liegen drei Teilkern mit jeweils zwei Kernabschnitten vor, die über die Knoten  $k_1, k_2, k_3$  miteinander verbunden sind und einen Kreis bilden.

**[0018]** Charakteristische Spannungs- und Stromformen bei Drosseln gemäss Fig. 2 und Fig. 3 sind in Fig. 4 als Funktion des Phasenwinkels  $\omega t$  der Dreiphasen-Wechselspannung dargestellt. In Fig. 4a sind die Spannungen der Knoten  $p_1, p_2, n_1$  und  $n_2$  gegen den Sternpunkt  $N$  des Wechselspannungsnetzes gezeigt. Daraus resultieren die in Fig. 4b und Fig. 4c dargestellten Spannungen  $u_{w,p1}, u_{w,p2}, u_{w,n1}$  und  $u_{w,n2}$  an den Anschlüssen der stromkompensierten Drossel sowie die Ströme  $i_{p1}, i_{p2}, i_{n1}$  und  $i_{n2}$  in den Wicklungen der stromkompensierten Drossel. An den Wicklungen der Gegentaktdrossel  $L_{dm}$  des Gleichrichters nach Fig. 2 verbleibt somit die Fig. 4d gezeigte Spannung  $u_{Ldm}$  welche zu einem Ausgangsstrom  $i_p$  bzw.  $i_n$  führt. Sowohl  $u_{Ldm}$  als auch  $i_p$  bzw.  $i_n$  weisen dabei im Vergleich zu den Spannungen  $u_{p1}, u_{p2}, u_{n1}$  und  $u_{n2}$  sowie im Vergleich zu den Wicklungsspannungen  $u_{w,p1}, u_{w,p2}, u_{w,n1}$  und  $u_{w,n2}$  die doppelte Frequenz auf.

**[0019]** Die Regelung des Gleichrichters wird bevorzugt mit zwei oder vier Schlaufen ausgeführt wobei die Ansteuerung der Schalter beispielsweise, wie in Fig. 5 gezeigt, mittels Pulsweitenmodulation (PWM) oder mit Toleranzbandregelung erfolgen kann. Dabei vergleicht ein äusserer Ausgangsspannungsregler  $G_u$  die gemessene Ausgangsgleichspannung  $u_{pn}$  mit einem Referenzwert  $u_{pn}^*$  und bestimmt daraus einen Ausgangsstromsollwert  $i_{dm}^*$  zu welchem allenfalls der in der Zuleitung der Last gemessene Strom als Vorsteuerung addiert werden kann. Von  $i_{dm}^*$  wird der Strom  $i_{dm}$  subtrahiert welcher als die Summe der vier gemessenen Wicklungsströme  $i_{p1}, i_{p2}, i_{n1}$  und  $i_{n2}$  der stromkompensierten Drossel geteilt durch zwei berechnet wird. Das resultierende Fehlersignal wird einem unterlagerten Stromregler  $G_{dm}$  zugeführt zu dessen Ausgangswert die gemessene Ausgangsgleichspannung  $u_{pn}$  im Sinne einer Vorsteuerung addiert werden kann. Mittels einer Division durch das 1.5-fache der Amplitude der Eingangsphasenwechselspannung ergibt sich der Modulationsindex  $M$  des Gleichrichters welcher mit zwei abschnittsweise sinusförmigen Signalen  $s_p$  und  $s_n$ , welche eine Amplitude von 1 aufweisen, multipliziert wird. Dadurch ergeben sich die Tastverhältnisse  $d_p$  und  $d_n$  des oberen ( $p$ ) und unteren ( $n$ ) Tiefsetzstellers welche den Pulsweitenmodulatoren (PWM in Fig. 5) für die Schalter  $S_{xp1}, S_{xp2}$  und  $S_{nz1}, S_{nz2}$  zugeführt werden. Um wechselseitige Eingangsströme  $i_a, i_b, i_c$  zu erhalten welche in Phase mit den zugeordneten Netzspannungen sind kann das Signal  $s_p$  aus der Spannung  $u_x$  zwischen dem Knoten  $x$  und dem Sternpunkt  $N$  des Dreiphasen-Wechselspannungsnetzes gewonnen werden indem die gemessene Spannung  $u_x$ , durch die Amplitude  $\hat{u}_i$  der Netzphasenspannung dividiert wird. Weiters wird das Signal  $s_n$  durch Division der Spannung  $u_z$  zwischen dem Knoten  $z$  und dem Sternpunkt  $N$  des Dreiphasen-Wechselspannungsnetzes durch  $\hat{u}_i$  gebildet, wobei das Vorzeichen der Spannung gekehrt werden muss da das Potential von  $z$  unterhalb des Sternpunktes liegt,  $s_n$  jedoch positiv sein muss.

**[0020]** Um eine gleichmässige Aufteilung der Ströme in den Wicklungen der stromkompensierten Drossel in allen Betriebsfällen, insbesondere während Laständerungen, sicherzustellen können zwei zusätzliche Stromregelschleifen hinzugefügt werden. Hierzu wird zunächst die Differenz der beiden in den  $p$ -seitigen Wicklungen der stromkompensierten Drossel gemessenen Ströme  $i_{p2}$  und  $i_{p1}$  berechnet und einem Regler  $G_{im,p}$  zugeführt dessen Ausgangssignal durch die Spannung  $u_{xy}$  zwischen den Knoten  $x$  und  $y$  dividiert wird. Das resultierende Signal stellt ein differentielles Tastverhältnis dar welches zu  $d_p$  addiert, bzw. von diesem subtrahiert wird um zwei getrennte Tastverhältnisse  $d_{p1}$  und  $d_{p2}$  zu erzeugen welche zwei separaten Pulsweitenmodulatoren für die Schalter  $S_{xp1}$  und  $S_{xp2}$  zugeführt werden. Zusätzlich wird die Differenz der Ströme  $i_{n1}$  und  $i_{n2}$  einem Regler  $G_{im,n}$  zugeführt dessen Ausgangssignal durch die Spannung  $u_{yz}$  zwischen den Knoten  $y$  und  $z$  dividiert wird. Das entstehende differentielle Tastverhältnis wird anschliessend zu  $d_n$  addiert, bzw. von diesem subtrahiert wodurch die Tastverhältnisse  $d_{n1}$  und  $d_{n2}$  resultieren welche den Pulsweitenmodulatoren für  $S_{nz1}$  und  $S_{nz2}$  zugeführt werden.

**[0021]** Um die gewünschte Reduktion des schaltfrequenten Spannungsrippels an den Filterkondensatoren  $C_{x,y,z}$  zu erreichen müssen die Pulsbreitenmodulatoren der Schalter  $S_{xp1}$  und  $S_{xp2}$ , sowie jene der Schalter  $S_{nz1}$  und  $S_{nz2}$  mit um  $180^\circ$  versetzten Trägersignalen angesteuert werden. Wird das gleiche Trägersignal für  $S_{xp1}$  und für  $S_{nz1}$  verwendet resultiert daraus ein grösserer Gegentaktstromrippel und gleichzeitig ein kleinerer Gleichtaktstromrippel, im Vergleich zu einer Taktung bei der die Trägersignale der Pulsbreitenmodulatoren von  $S_{xp1}$  und für  $S_{nz1}$  um  $90^\circ$  phasenverschoben sind.

**[0022]** Die oben beschriebene Schaltung erlaubt auf Grund der verwendeten Dioden nur einen unidirektionalen Leistungsfluss vom Dreiphasen-Wechselspannungsnetz zu den Gleichspannungsausgangsklemmen. Eine Erweiterung auf bidirektionalen Leistungsfluss ist möglich wenn in der Schaltung alle Dioden durch zusätzliche aktive Schalter ersetzt oder ergänzt werden wobei die zusätzlichen Schalter immer genau solange eingeschaltet werden als die Dioden in der ursprünglichen Schaltung leiten würden. Dadurch wird ein Umkehren der Richtung des Ausgangsgleichstroms möglich wodurch sich ein Leistungsfluss von den Gleichspannungsklemmen p und n hin zum Dreiphasen-Wechselspannungsnetz einstellt.

**[0023]** Das oben beschriebene Konzept einer stromkompensierten Drossel welche gleichzeitig die Unterdrückung und Regelung von Kreisströmen zwischen parallel geschalteten Brückenweigen sowie die Filterung von Gleichtaktstromkomponenten erlaubt ist nicht auf auf Dreiphasen-Gleicherichtersystem mit Tiefsetzstellercharakteristik beschränkt sondern kann für n-phasige Gleich- und Wechselrichtersysteme mit m parallelen Brückenweigen pro Phase generalisiert werden. Dazu wird je eine der einer Phase zugeordneten Wicklungen auf eine Kante eines n-eckigen, polygonförmigen Kerns montiert wobei insgesamt m solcher Polygone gebildet werden. Diese polygonförmigen Kerne werden dann so parallel angeordnet dass die einer Phase zugeordneten Wicklungen einander gegenüber zu liegen kommen, und die Eckpunkte der polygonförmigen Kerne werden mit zu den Polygonebenen orthogonal angebrachten Stücken aus Kernmaterial verbunden um eine magnetische Kopplung zu erreichen. Der Wicklungssinn aller Wicklungen wird dabei so gewählt dass sich in allen geschlossenen Schlaufen aus Kernmaterial die hindurchtretene Ströme, unter Vernachlässigung schaltfrequenter Rippel, zu null addieren. Weiters können Luftspalte eingefügt werden um die Induktivitätswerte der stromkompensierten Drossel bei unveränderter Windungszahl zu verringern, wobei je ein Luftspalt in jedem der eine Wicklung tragenden Kernschenkel eingefügt werden kann und oder je ein Luftspalt in den keine Wicklung tragenden Kernschenkel eingefügt werden kann. Eine Konfiguration für drei Phasen und zwei parallelen Brückenweigen je Phase ist in Fig. 6 dargestellt.

## Patentansprüche

1. Magnetische Drossel (7) zur Verwendung in Verbindung mit einer Umrichterbrücke zum Anschluss der Umrichterbrücke über die Drossel (7) an n Phasen mit jeweils m Brückenweigen pro Phase, wobei n eine natürliche Zahl ist und mindestens zwei beträgt, und m eine natürliche Zahl ist und mindestens zwei beträgt, dadurch gekennzeichnet, dass die Drossel (7) einen Kern mit n Teilkernen ( $t_1, t_2$ ) aufweist, wobei jeder der Teilkern ( $t_1, t_2$ ) jeweils einen Anfangsknoten und einen Endknoten und m Kernabschnitte aufweist, welche den Anfangsknoten und den Endknoten des Teilkerns ( $t_1, t_2$ ) verbinden, jeder der Kernabschnitte eine Wicklung mit einem ersten ( $p_1, p_2, n_1, n_2; a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ ) und einem zweiten Wicklungsanschluss aufweist, die zweiten Wicklungsanschlüsse der Wicklungen desselben Teilkernes einen gemeinsamen Wicklungsanschlusspunkt ( $p, n$ ) bilden, und die Wicklungen auf den Kernabschnitten so orientiert sind, dass in jedem Kernabschnitt ein durch die Wicklung in den gemeinsamen Wicklungsanschlusspunkt fliessender Strom eine magnetische Spannung vom Anfangsknoten zum Endknoten des Teilkernes erzeugt, und die Teilkern ( $t_1, t_2$ ) miteinander zu einem magnetischen Netzwerk verbunden sind indem für  $i=1..n-1$  jeweils der Endknoten des i-ten Teilkernes mit dem Anfangsknoten des ( $i+1$ )-ten Teilkernes verbunden ist und der Endknoten des n-ten Teilkernes mit dem Anfangsknoten des ersten Teilkernes verbunden ist.
2. Umrichterabschnitt, aufweisend eine Drossel (7) gemäss Anspruch 1 und eine Umrichterbrücke mit m·n Brückenweigen, wobei jeder Brückenweig einen Zweigmittelpunkt, einen oberen Schalter und einen unteren Schalter aufweist, wobei der obere Schalter zwischen den Zweigmittelpunkt und einen oberen Anschluss (p) der Umrichterbrücke und der untere Schalter zwischen den Zweigmittelpunkt und einen unteren Anschluss (n) der Umrichterbrücke angeschlossen ist, und jeder der ersten Wicklungsanschlüsse ( $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ ) der m Kernabschnitte der n Teilkern an einen der Zweigmittelpunkte der m·n Brückenweige angeschlossen ist.
3. Umrichterabschnitt, aufweisend eine Drossel (7) gemäss Anspruch 1 und eine Umrichterbrücke mit m·n/2 Brückenweigen, wobei jeder Brückenweig einen Zweigmittelpunkt (y), einen oberen Anschlusspunkt, einen unteren Anschlusspunkt, einen oberen oberen Schalter ( $S_{xp1}$ ), einen unteren oberen Schalter, einen oberen unteren Schalter und einen unteren unteren ( $S_{nz1}$ ) Schalter aufweist, wobei der obere obere Schalter ( $S_{xp1}$ ) zwischen einen oberen Anschluss (x) der Umrichterbrücke und den oberen Anschlusspunkt geschaltet ist, der untere obere Schalter, der ein passiver Schalter sein kann, zwischen den oberen Anschlusspunkt und den Zweigmittelpunkt (y) geschaltet ist,

## CH 713 573 B1

der obere untere Schalter, der ein passiver Schalter sein kann, zwischen den Zweigmittelpunkt (y) und den unteren Anschlusspunkt geschaltet ist,

der untere untere Schalter ( $S_{nz1}$ ) zwischen den unteren Anschlusspunkt und einen unteren Anschluss (z) der Umrichterbrücke geschaltet ist,

und jeder der ersten Wicklungsanschlüsse ( $p_1, p_2, n_1, n_2$ ) der m Kernabschnitte der n Teilkern an einen der Menge der oberen und der unteren Anschlusspunkte der m-n/2 Brückenweige angeschlossen ist.

4. Umrichter, aufweisend einen Umrichterabschnitt gemäss Anspruch 3 und eine weitere Umrichterbrücke zur Verbindung des oberen Anschlusses (x) und des unteren Anschlusses (z) der Umrichterbrücke des Umrichterabschnitts gemäss Anspruch 3 mit gefilterten Phasenanschlüssen (a, b, c) eines Mehrphasennetzes mit q Phasen, sowie mit q Mittelpunkt-Schaltern ( $S_{aya}, S_{ayc}$ ), von denen jeder zwischen einen der gefilterten Phasenanschlüsse (a, b, c) und dem Zweigmittelpunkt der Umrichterbrücke des Umrichterabschnitts gemäss Anspruch 3 geschaltet ist.

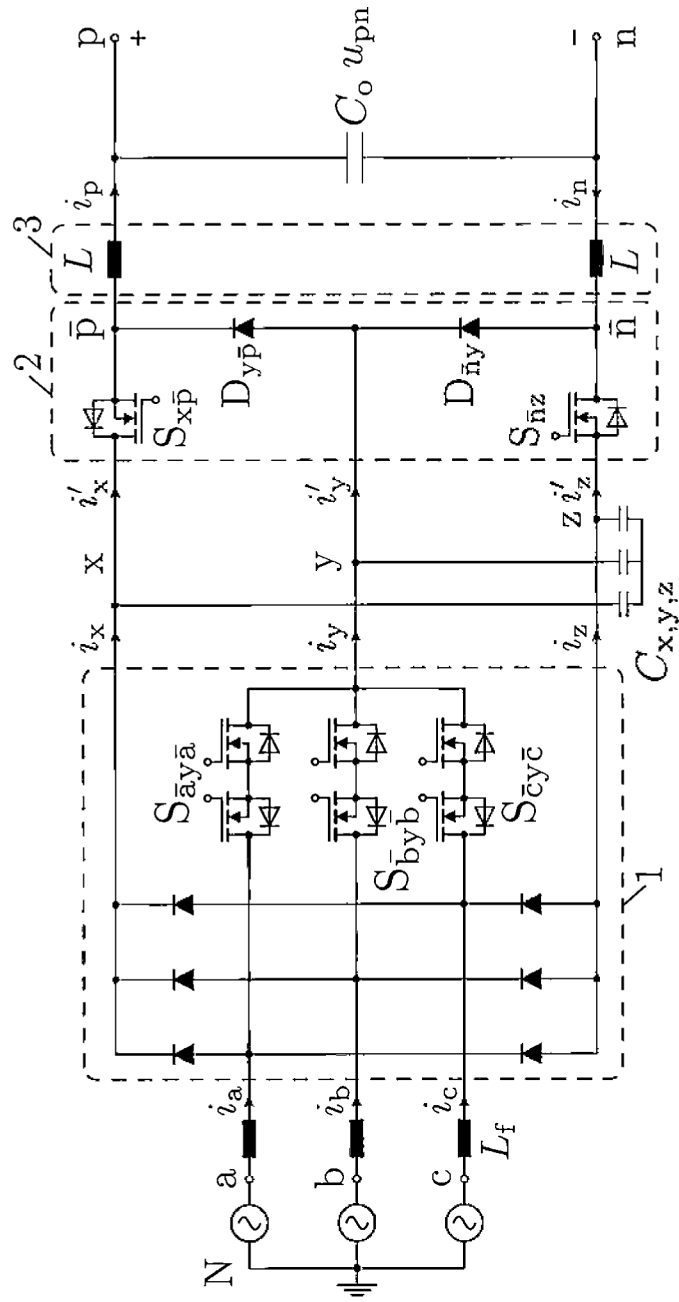


Fig. 1a



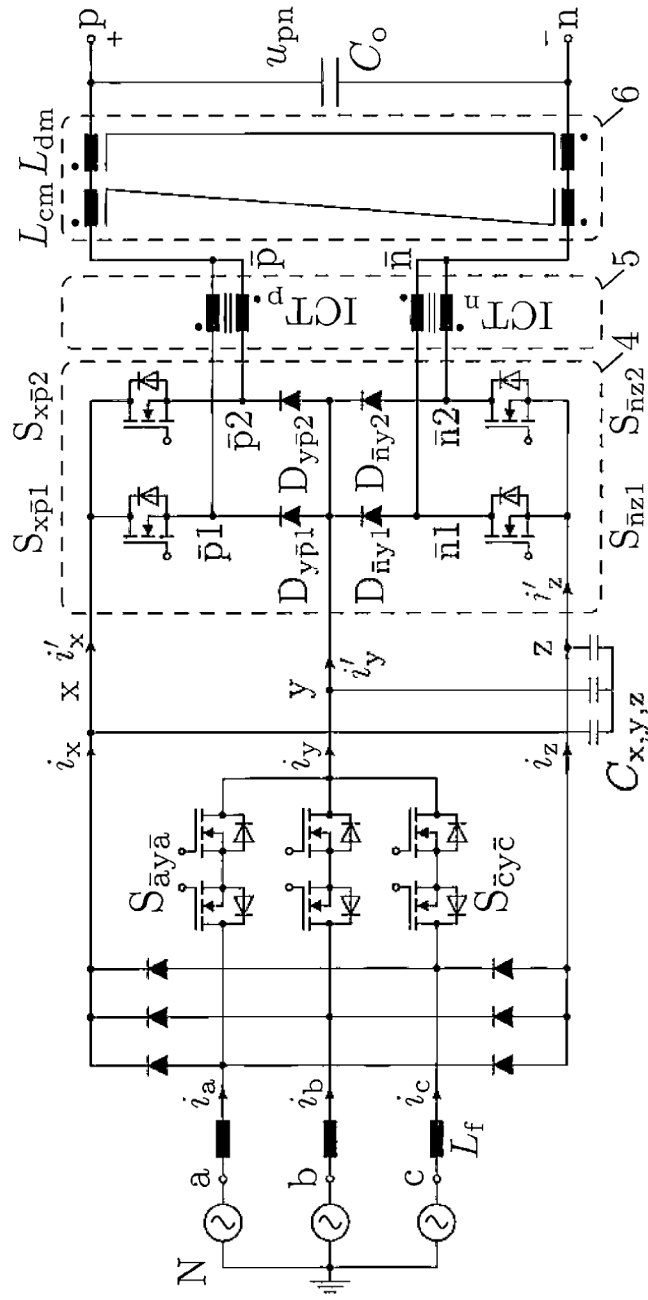


Fig. 1b

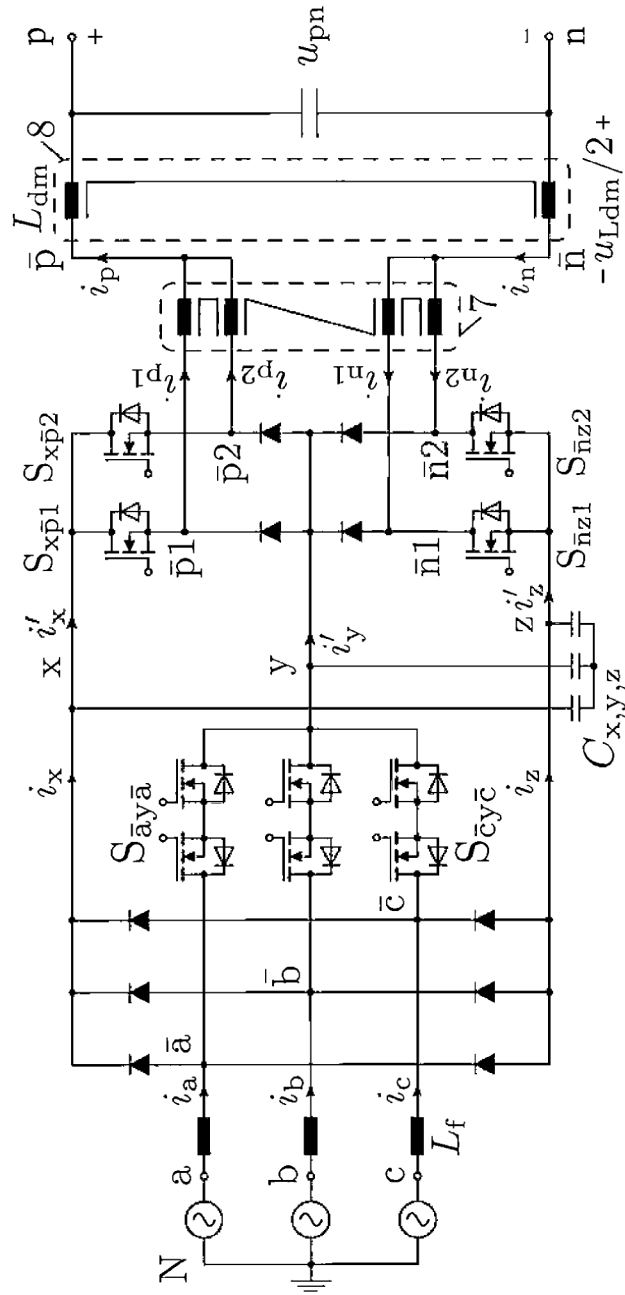


Fig. 2

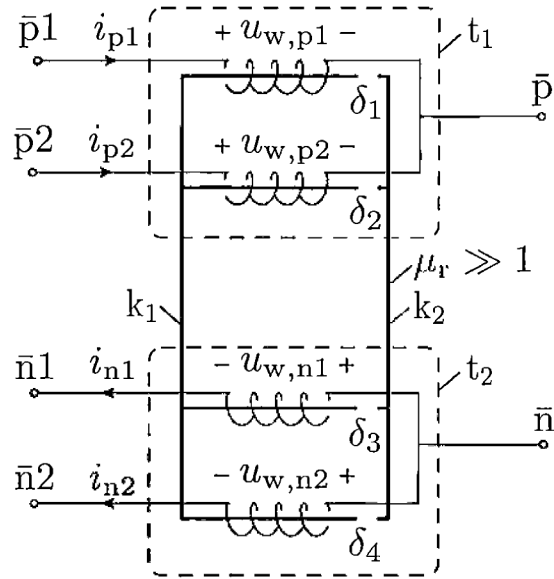


Fig. 3a

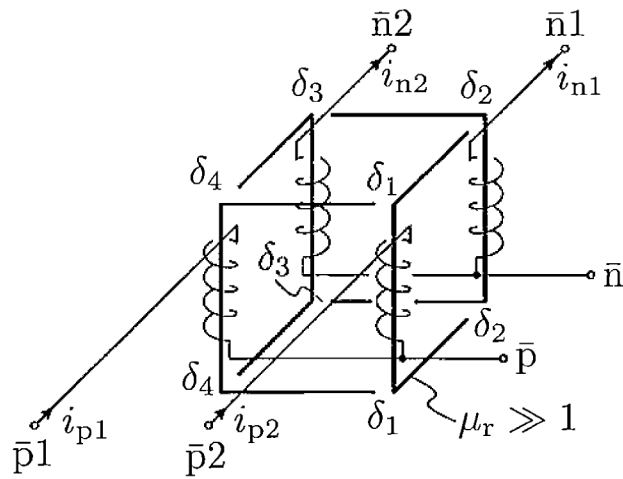


Fig. 3b

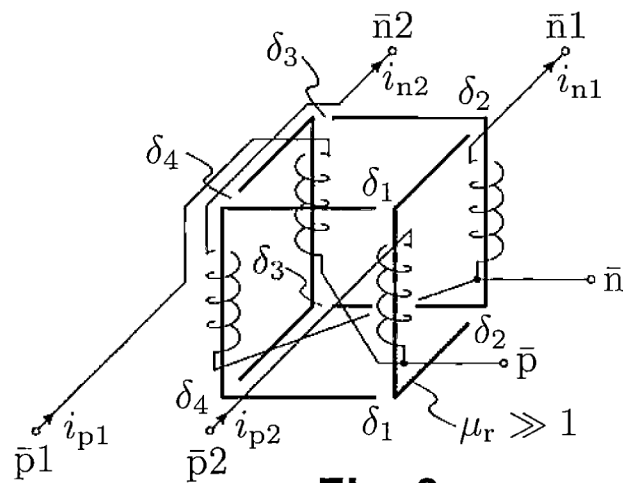
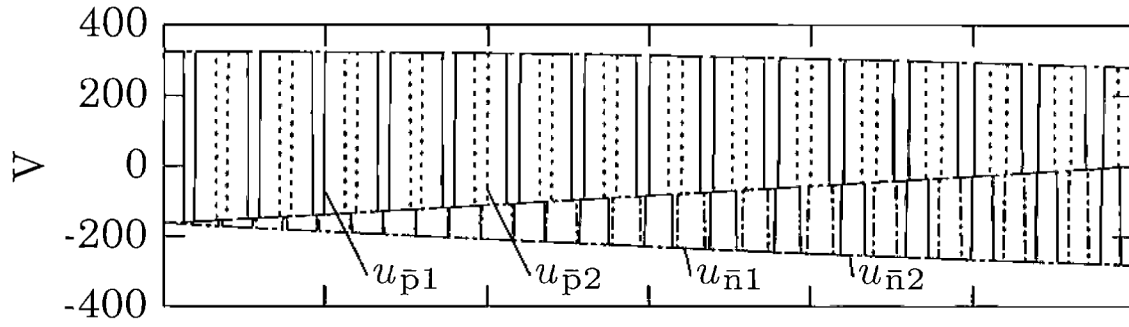
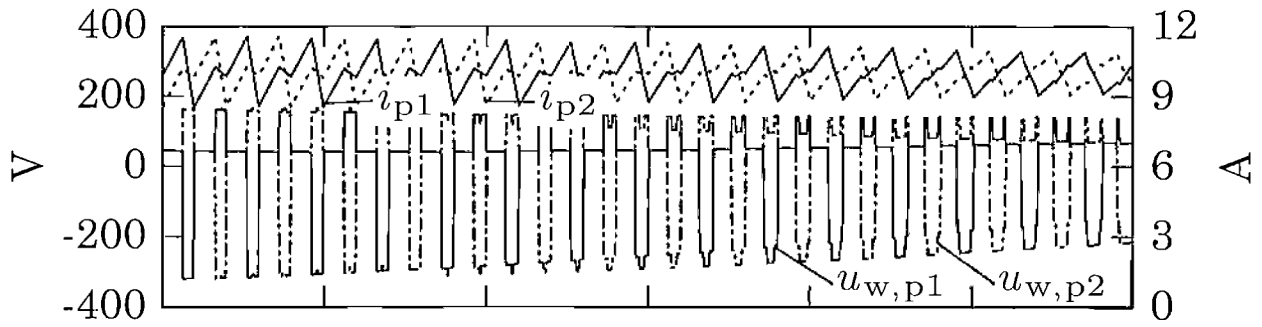


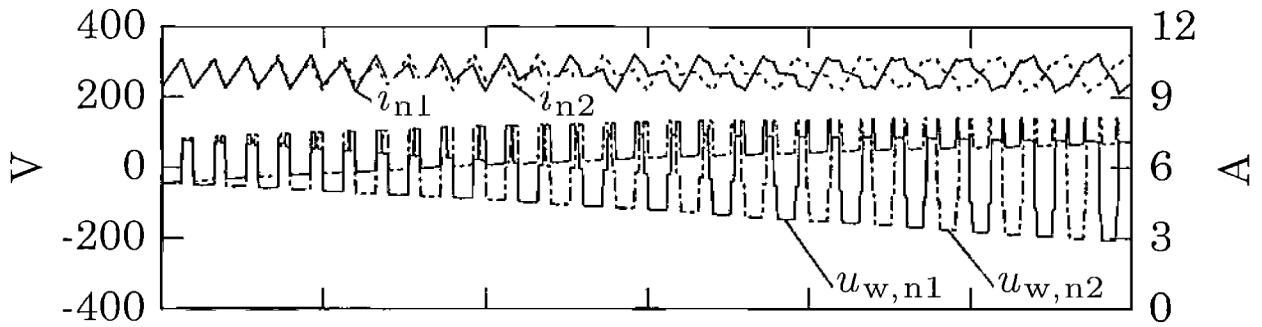
Fig. 3c



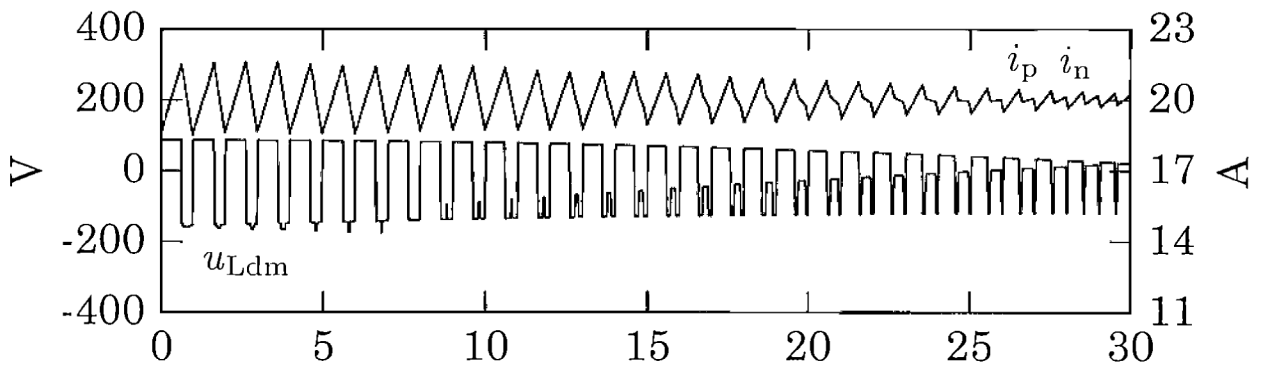
**Fig. 4a**



**Fig. 4b**



**Fig. 4c**



**Fig. 4d**

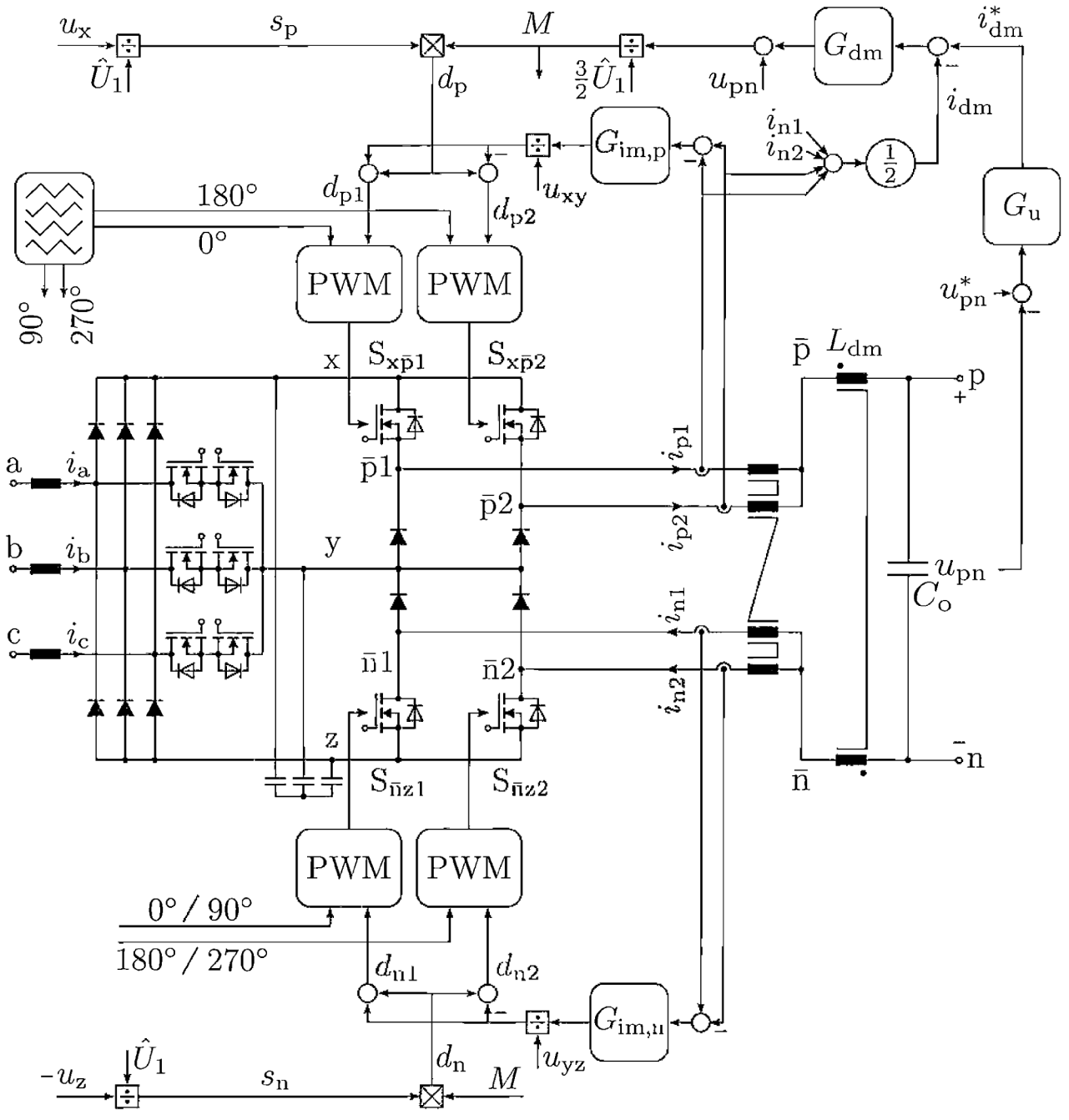


Fig. 5

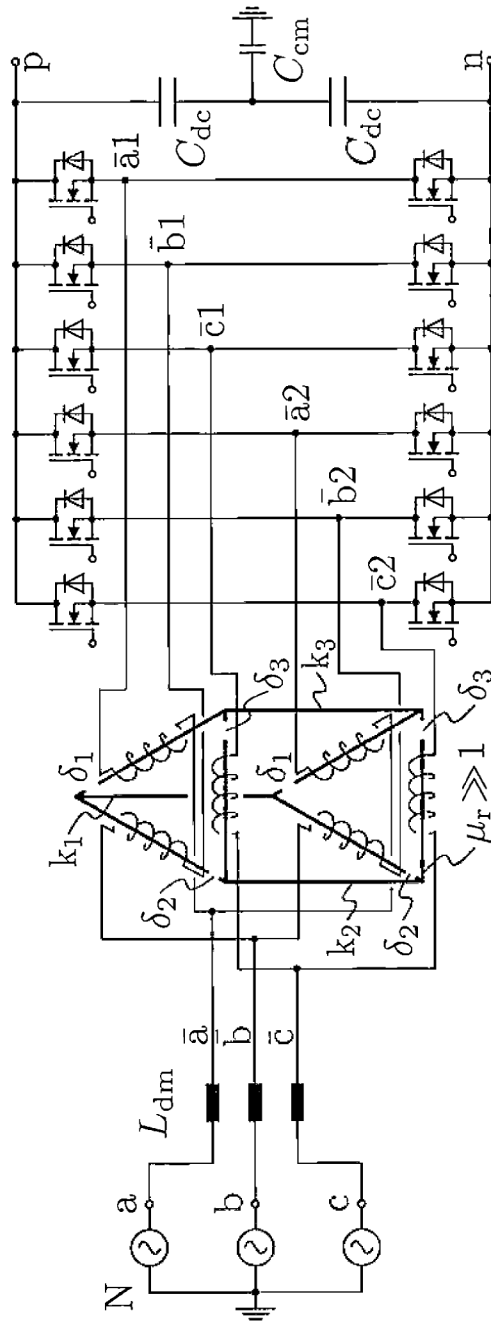


Fig. 6