

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
6. Oktober 2016 (06.10.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/155694 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
H02M 7/5387 (2007.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2016/000137

(22) Internationales Anmeldedatum:
30. März 2016 (30.03.2016)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2015 004 162.2 1. April 2015 (01.04.2015) DE

(71) Anmelder: **HOCHSCHULE OSTWESTFALEN-LIPPE**
[DE/DE]; Liebigstraße 87, 32657 Lemgo (DE).

(72) Erfinder: **AUSTERMANN, Johann**; Zur Hirtenkuhle 5,
32825 Blomberg (DE). **BORCHERDING, Holger**;
Hemsener Weg 33, 31840 Hessisch-Oldendorf (DE).

(74) Anwalt: **ANWALTSKANZLEI EIKEL & PARTNER**
GBR; Friedrich-Ebert-Straße 107, 32760 Detmold (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,

BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,
ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,
SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG,
KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,
CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE,
IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,
RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz
2 Buchstabe g)

(54) Title: CIRCUIT AND METHOD FOR MULTIPHASE OPERATION OF AN ELECTRICAL MACHINE

(54) Bezeichnung : SCHALTUNG UND VERFAHREN FÜR EINEN MEHRPHASIGEN BETRIEB EINER ELEKTRISCHEN
MASCHINE

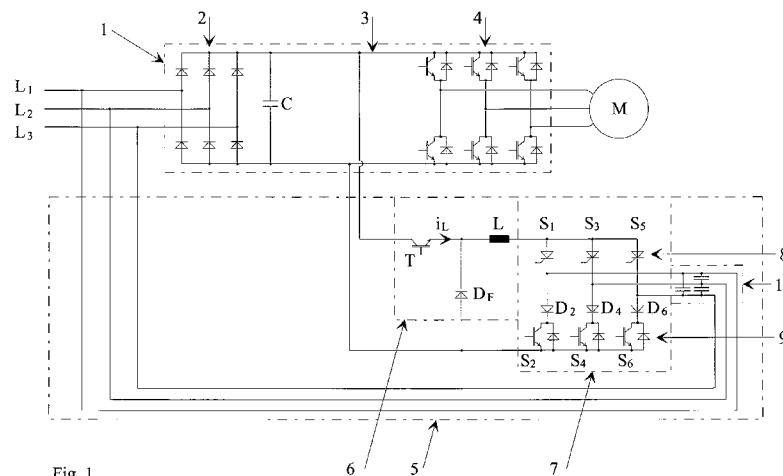


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a circuit and to a method for operating an electrical machine (M) connected to at least three phases (L1, L2, L3) of a power supply network by means of a frequency converter (1) that has a DC link (3), wherein, by means of a synchronous inverter (7) that is actuated by a DC chopper (6) and comprises two bridge halves switching the positive and the negative half-waves respectively, the energy generated by said machine (M) is fed back into the power supply network. According to the invention, the synchronous inverter (7) has an asymmetrical design such that, to switch the potential tapped from the DC link (3) by the DC chopper (6), switching is carried out by a first bridge half (8) that consists of thyristors (S1, S3, S5) as electronic switches, and such that the second bridge half (9) comprises reverse-blocking electronic switches (S2, S4, S6) able to be switched off.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



Bei einer Schaltung und einem Verfahren für den Betrieb einer an wenigstens drei Phasen (L1, L2, L3) eines Stromnetzes über einen Frequenzumrichter (1) mit einem Gleichspannungszwischenkreis (3) angeschlossenen elektrischen Maschine (M), bei der über einen von einem Gleichstromsteller (6) angesteuerten Synchronwechselrichter (7) mit zwei jeweils die positiven bzw. negativen Halbwellen schaltenden Brückenhälften eine Rückspeisung der von der Maschine (M) generierter Energie in das Stromnetz erfolgt, ist der Synchronwechselrichter (7) asymmetrisch derart aufgebaut, dass für das Schalten des von dem Gleichstromsteller (6) aus dem Gleichspannungszwischenkreis (3) abgegriffenen Potentials von einer ersten Brückenhälfte (8) aus Thyristoren (S1, S3, S5) als elektronische Schalter geschaltet wird und dass die zweite Brückenhälfte (9) ausschaltbare, rückwärts sperrende elektronische Schalter (S2, S4, S6) aufweist.

Schaltung und Verfahren für einen mehrphasigen Betrieb einer elektrischen Maschine

5

Beschreibung:

Die Erfindung betrifft eine Schaltung und ein Verfahren für den Betrieb einer an wenigstens drei Phasen eines Stromnetzes über einen Frequenzumrichter mit einem Gleichspannungszwischenkreis angeschlossenen elektrischen Maschine, bei denen über einen von einem Gleichstromsteller angesteuerten Synchronwechselrichter mit zwei jeweils die positiven bzw. negativen Halbwellen schaltenden Brückenhälften eine Rückspeisung der von der Maschine generierter Energie in das Stromnetz erfolgt.

Viele elektrische Maschinen wie bspw. Asynchron-, Synchron- oder Reluktanzmaschinen werden in der Regel an Frequenzumrichtern betrieben. Die Schaltung eines solchen Frequenzumrichters weist einen Gleichrichter auf, der einen Gleichspannungszwischenkreis speist. Ein Kondensator in diesem Gleichspannungszwischenkreis dient der Glättung und eine häufig vorgesehene Induktivität der Entstörung. Der Zwischenkreis speist weiter einen Wechselrichter, aufweisend gesteuerte Brücken, für die häufig Metalloxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren, MOSFET, zunehmend Insulated Gate Bipolartransistoren, IGBT, oder Schaltthyristoren, Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT, Verwendung finden.

30

In vorteilhafter Weise kann die Höhe der Ausgangsspannung und die Frequenz in weiten Grenzen geregelt werden, so dass bspw. Elektromotoren optimal gesteuert werden können.

Unabhängig davon, ob ein Zwei- oder Vierquadrantenbetrieb der elektrischen Maschine vorgesehen ist, wird bei einem

Abbremsen der Maschine Energie in den Gleichspannungszwischenkreis eingespeist.

Bei einfachen Antrieben ist in dem
5 Gleichspannungszwischenkreis ein sogenannter Brems-Chopper vorgesehen, mit dem die überschüssige Energie aus dem Gleichspannungszwischenkreis von einem Bremswiderstand in Wärme umgewandelt wird, die dann an die Umgebung abgegeben wird. Deshalb werden Bremswiderstände regelmäßig außerhalb
10 des Frequenzumrichters angeordnet.

Abgesehen davon, dass eine solche Erwärmung der Umgebung wenig effektiv ist, bedingt das Vorhersehen von Bremswiderständen auch durchaus aufwändige bauliche
15 Maßnahmen, da zum einen die Bremswiderstände sehr groß sein können, naturgemäß abhängig von deren Leistung, und zum anderen eine ausreichende Kühlung der Bremswiderstände sichergestellt werden muss. So war es früher häufig üblich, Bremswiderstände beispielsweise auf dem Dach von elektrischen
20 Lokomotiven anzuordnen.

Vor diesem Hintergrund sind insbesondere in der Eisenbahntechnik frühzeitig aufwändige, rückspeisefähige Frequenzumrichter sowie Matrixumrichter entwickelt worden,
25 die die generatorische Brems-Leistung der Antriebsmotoren zurück in das einphasige Bahnstromnetz speisen können.

Der bauliche Aufwand und die damit verbundenen Kosten, beispielsweise durch den Ersatz eines Diodengleichrichters
30 durch einen Umrichter mit hochwertigen Leistungstransistoren und aufwändig dimensioniertem Netzfilter mögen sich bei großen Antriebsleistungen durchaus rechnen, jedoch finden derartige Lösungen bei vergleichsweise kleinen Antriebseinheiten kaum Verwendung, da das Verheizen der
35 generatorischen Energie in einem Bremswiderstand gegenüber

einer Energie rückspeisenden Lösung deutlich kostengünstiger ist.

Aus der WO 2013/020544 A1 ist ein Verfahren und eine
5 Schaltung für einen mehrphasigen Betrieb eines Elektromotors bekannt, die mit geringen Investitionskosten eine
Rückspeisung generatorischer Energie bei einem Abbremsen auch
bei kleinen Antrieben wirtschaftlich ermöglichen. Dort
erfolgt eine Rückspeisung der von der elektrischen Maschine
10 generierten Energie in das Stromnetz über einen
Synchronwechselrichter, der einen von einem höherfrequent
getakteten Gleichstromsteller über eine Induktivität zur
Verfügung gestellten, konstanten Strom i_L auf die Netzphase
höchster Spannung schaltet.

15 Die Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt wird durch die
Umschaltgeschwindigkeit des Synchronwechselrichters bestimmt
und ist dort sehr hoch. Da die Netzimpedanz solcher
Schaltungen zumeist induktiv ist, kann es regelmäßig bei sehr
20 hohen Stromänderungsgeschwindigkeiten di/dt zu Überspannungen
kommen, die durch große netzseitige Kondensatoren begrenzt
werden müssen.

Vor diesem Hintergrund macht die Erfindung es sich zur
25 Aufgabe, eine kostengünstige Schaltung und ein einfaches
Verfahren für eine Einspeisung der von einer elektrischen
Maschine im Generatorbetrieb gelieferten Energie in ein
Stromnetz anzugeben.

30 Gelöst wird diese technische Problematik bei der in Rede
stehenden Schaltung gem. des Anspruchs 1 durch die Maßnahmen,
dass der Synchronwechselrichter asymmetrisch aufgebaut ist
derart, dass für das Schalten des von dem Gleichstromsteller
aus dem Gleichspannungszwischenkreis abgegriffenen Potentials
35 von einer ersten Brückenhälfte aus Thyristoren als

elektronische Schalter geschaltet wird und dass die zweite Brückenhälfte ausschaltbare, rückwärts sperrende elektronische Schalter aufweist.

- 5 Die Schaltung bietet wie die gemäß WO 2013/020544 A1 eine Vielzahl von Vorteilen.

Insbesondere kann die übliche Schaltung eines Frequenzumrichters mit Diodengleichrichtung beibehalten
10 werden und es wird in den Vorwärtszweig des motorischen Betriebes der Maschine nicht eingegriffen.

Die Verwendung von Thyristoren, von Hause aus rückwärts sperrende elektronische Schalter, für das Schalten einer
15 Halbwelle einer Netzphase hat in Verbindung mit ausschaltbaren, rückwärts sperrenden elektronischen Schaltern für das Schalten der anderen Halbwelle der Netzphase den Vorteil, dass Entkoppeldioden entfallen können, die in der Schaltung gem. WO2013/020544 A1 ein Aufladen des
20 Glättungskondensators in dem Gleichspannungszwischenkreis des Frequenzumrichters bei einem Einschalten der Rückspeiseschaltung verhindern.

Bei der Schaltung gem. WO 2013/020544 A1 muss weiter
25 sichergestellt werden, dass die Schalter des Synchronwechselrichters exakt im Nulldurchgang der Netzphasen umgeschaltet werden. Andernfalls kann es bei der Verwendung von IGBTs als elektronischen Schaltern in dem Synchronwechselrichter zu einem Stromfluss über die
30 Inversdioden der IGBTs kommen, was zu der Zerstörung der Bauelemente führen kann.

Solche Ströme werden durch die Verwendung von rückwärts sperrenden Schaltern praktisch ausgeschlossen.

Darüber hinaus ist die Verwendung von Thyristoren sehr preisgünstig und ist ihre Ansteuerung vergleichsweise einfach.

5 Als elektronische Schalter sind in der zweiten Brückenhälfte nach der Erfindung insbesondere IGBTs vorgesehen, vorzugsweise mit einer Diode in Reihe geschaltet. Hierdurch wird sichergestellt, dass es sich um ausschaltbare, rückwärts sperrende Schalter handelt.

10

Bei einem Verzicht auf die Entkopplungs- oder Schutzdioden kann der den Synchronwechselrichter ansteuernde Gleichstromsteller unmittelbar an den Gleichspannungszwischenkreis des Frequenzumrichters
15 angeschlossen sein.

Ein weiterer Vorteil der erfindungsgemäßen Schaltung ist die verbesserte elektromagnetische Verträglichkeit. Zumeist ist die Netzimpedanz bei einer in Rede stehenden
20 Rückspeiseschaltung induktiv. Daher kann es bei einem Umschalten der Synchronwechselrichterbrücken mit einer hohen Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt zu Überspannungen kommen. Diese müssen wie bei der Schaltung gem. WO 2013/020544 A1 dann durch große netzseitige Kondensatoren begrenzt werden.

25

Durch die Schaltung nach der Erfindung ergibt sich bei einem Umschalten der Synchronwechselrichterbrücken jedoch eine sehr geringe Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt . Infolge können Filterkondensatoren sehr geringer Kapazität für einen
30 Netzfilter verwendet werden, die in vorteilhafter Weise zwischen die Lastkreise der elektronischen Schalter jeweils geschaltet werden können.

Insbesondere dann können die Lastkreise der elektronischen Schalter in einfacher Weise unmittelbar auf das Stromnetz geschaltet sein.

- 5 Eine solche Schaltung bietet sich insbesondere für ein Verfahren für den Betrieb einer an wenigstens drei Phasen eines Stromnetzes über einen Frequenzumrichter
angeschlossenen elektrischen Maschine an, bei der über einen von einem Gleichstromsteller angesteuerten
10 Synchronwechselrichter eine Rückspeisung der von der Maschine generierten Energie in das Stromnetz erfolgt, bei dem gem. des Anspruchs 7 erfindungsgemäß darauf abgestellt ist, dass der Laststrom i_L auf den maximalen und/oder den minimalen Abschnitt einer Netzphase zwischen den Phasenübergängen
15 dieser Netzphase und den zwei nächstliegenden Netzphasen geschaltet wird.

- Infolge dieser Maßnahme wird i_L über keine vollständige Halbwelle einer Netzphase zurückgespeist, sondern es wird
20 immer der über dem Phasenwinkel anstehende maximale bzw. minimale Abschnitt einer Netzphase mit i_L beaufschlagt.

Entsprechend müssen die elektronischen Schalter schalten.

- 25 Die Thyristoren der ersten Brückenhälfte des Synchronwechselrichters können zwar über ihren Steueranschluss eingeschaltet, jedoch nicht wieder ausgeschaltet werden. Ein Ausschalten bzw. Löschen erfolgt, wenn der Strom im Leistungspfad der Thyristoren einen
30 Nulldurchgang aufweist.

- Es ist deshalb vorgesehen, dass der Gleichstromsteller für ein Löschen eines Thyristors die Verbindung zu dem Gleichspannungszwischenkreis unterbricht, dass von dem
35 Gleichstromsteller in dem Strom i_L im Laststromkreis der

Thyristoren eine Stromlücke mit $i_L=0$ geschaltet wird, dass mit Schalten des Gleichstromstellers der Zündstrom i_z der Thyristoren abgeschaltet wird und dass der dem Thyristor zugeordnete IGBT erst nach dem Löschen des Thyristors sperrt.

5

Wenn der Gleichstromsteller den aus dem Gleichspannungszwischenkreis zurückzuspeisenden Strom durch einen elektronischen Schalter unterbricht, wird der Strom i_L aufgrund der Induktivität des Gleichstromstellers nicht sofort den Wert Null annehmen, mithin verbleibt der Thyristor eingeschaltet. Der ebenfalls eingeschaltete IGBT stellt aber sicher, dass der Strom über die Freilaufdiode abfließt und somit verzögert den Wert Null annimmt und der Thyristor gelöscht wird.

10

Es kann bspw. aus Symmetriegründen oder aufgrund der Verwendung spezieller elektronischer Schalter zweckmäßig sein, dass für das Ausschalten eines jeden elektronischen Schalters eine Stromlücke $i_L=0$ geschaltet wird.

15

Bedingt durch das Ausschalten aller elektronischer Schalter des Synchronwechselrichters über den Schnitt zweier Netzphasen über dem Phasenwinkel werden dann auch solche Thyristoren gelöscht, die gerade einen maximalen oder minimalen Anteil einer Halbwelle einer Netzphase schalten sollen. Diese sind dann erneut zu zünden, regelmäßig nach dem Durchgang des Maximums bzw. Minimums einer solchen Netzphase.

20

Aus diesem Grunde muss über einen solchen Extremwert einer Netzphase eine Stromlücke $i_L=0$ geschaltet werden, deren Dauer größer bemessen ist als die Freiwerdezeit der Thyristoren. Erst mit Ablauf der Freiwerdezeit kann der dieser Netzphase zugeordnete Thyristor erneut gezündet werden.

25

30

Zwischen den Lücken wird der Gleichstromsteller den Strom i_L auf einen im Mittel konstanten Wert regeln.

Die Erfindung wird anhand der Zeichnung näher erläutert, in der lediglich Ausführungsbeispiele dargestellt sind. In der Zeichnung zeigt:

Fig. 1: eine Schaltung nach der Erfindung Anhand der idealisierten

Fig. 2: wird die Ansteuerung des Synchronwechselrichters erläutert und

Fig. 3: gibt einen vergrößerten und ergänzten Ausschnitt aus Fig. 2 wieder.

Die Schaltung gem. Fig. 1 zeigt eine über einen herkömmlichen Frequenzumrichter 1 aus einem dreiphasigen Stromnetz L_1 , L_2 , L_3 gespeiste elektrische Maschine M.

Der Frequenzumrichter 1 weist in üblicher Weise einen Diodengleichrichter 2 mit einem Glättungskondensator C, einen Gleichspannungszwischenkreis 3 und einen aus dem Gleichspannungszwischenkreis 3 gespeisten Wechselrichter 4 auf.

Erfindungsgemäß ist an den Gleichspannungszwischenkreis 3 eine Rückspeiseschaltung 5 angeschlossen, insbesondere auch als eigenständige, von dem Frequenzumrichter 1 gesondert ausgebildete Baugruppe, durch die eine während eines generatorischen Betriebes der Maschine M erzeugte Energie in das Stromnetz L_1 , L_2 , L_3 zurückgespeist wird.

Die Rückspeiseschaltung 5 weist eingangsseitig einen Gleichstromsteller 6 auf, der unmittelbar, ohne Schutz- oder

Entkoppeldioden, an den Gleichspannungszwischenkreis 3 angeschlossen ist und der einen Synchronwechselrichter 7 speist.

5 Der Gleichstromsteller 6 weist einen elektronischen Schalter T, einer Induktivität L und einer Freilaufdiode D_f auf und schaltet den Strom i_L in dem Laststromkreis des Synchronwechselrichters 7

10 Da bei dem Ausführungsbeispiel der Gleichstromsteller 6 das Pluspotential des Gleichspannungszwischenkreis 3 abgreift, weist der Synchronwechselrichter 7 als rückwärts sperrende Schalter Thyristoren S_1, S_3, S_5 in der oberen, ersten Brückenhälfte 8 auf, während die ausschaltbaren, rückwärts
15 sperrenden elektronischen Schalter S_2, S_4, S_6 der zweiten Brückenhälfte 9 durch IGBTs ausgebildet werden, die mit Dioden D_2, D_4, D_6 in Reihe geschaltet sind.

Greift alternativ der Gleichstromsteller das negative
20 Potential des Gleichstromzwischenkreises ab, so ergibt sich eine spiegelbildliche Schaltungstopologie.

Bei dem Ausführungsbeispiel sind weiter die Ausgänge der Schalter S_1-S_6 unmittelbar auf die Netzphasen L_1-L_3 geschaltet.
25 Bei dem dennoch vorgesehenen Netzfilter 10 ist auf Induktivitäten gänzlich und auf Kondensatoren großer Kapazität verzichtet. Der Netzfilter 10 weist lediglich drei Kondensatoren auf, die zwischen die Ausgänge der Schalter S_1-S_6 geschaltet sind.

30 Das Verhalten der Schaltung gem. Fig. 1 wird anhand der Fig. 2 und 3 weiter erläutert.

Fig. 2 zeigt in einem oberen Diagramm den Phasenverlauf der
35 Spannung der drei Netzphasen L_1, L_2, L_3 über dem Netzwinkel φ .

Die hier drei Netzphasen L_1 , L_2 , L_3 sind jeweils um 120° phasenverschoben.

In dem unteren Diagramm der Fig. 2 ist idealisiert das Schaltverhalten der elektronischen Schalter S_1 - S_6 über den Netzwinkel φ dargestellt. Darunter ist die Freigabe der Pulsweitenmodulation des Gleichstromstellers 6 PWM aufgetragen, in deren Pausenzeiten für das Ausschalten der Thyristoren die Löschbedingung $i_L=0$ auftritt.

Fig. 2 zeigt insgesamt auf, dass die Schalter S_1 - S_6 die zurückzuspeisende Energie im Wesentlichen nur auf die maximalen bzw. minimalen Abschnitten einer Netzphase zwischen den Schnittpunkten mit den beiden anderen Phasen schaltet. So leitet bspw. S_1 etwa zwischen den Phasenwinkeln $\varphi=30^\circ$ und $\varphi=150^\circ$. Mit Sperren des Schalters S_1 leitet dann S_3 bis etwa $\varphi=270^\circ$ usw.. Entsprechendes gilt für die Low-Side.

Für ein Löschen eines Thyristors S_1, S_3, S_5 ist neben dem Abschalten des Zündstroms i_z notwendig, dass der Strom i_L Null wird. Um dies sicherzustellen, unterbricht der elektronische Schalter T des Gleichstromstellers 6 die Verbindung zu dem Gleichspannungszwischenkreis 3. Dies hat jedoch $i_L=0$ nicht unmittelbar zur Folge. Vielmehr müssen die IGBTs S_2, S_4, S_6 etwas länger eingeschaltet verbleiben als die entsprechenden Thyristoren S_1, S_3, S_5 , damit i_L der Induktivität L über die Freilaufdiode D_f abgebaut werden kann. Erst mit $i_L=0$ wird der entsprechende Thyristor S_1, S_3, S_5 gelöscht.

Entsprechend der Darstellung in Fig. 2 muss zwingend eine derartige Stromlücke $i_L=0$ bei einem Phasenwinkel von etwa $\varphi=30^\circ$ für den Phaseübergang von L_3 auf L_1 , bei einem Phasenwinkel von etwa $\varphi=150^\circ$ für den Phaseübergang von L_1

auf L_2 und bei einem Phasenwinkel von etwa $\varphi=270^\circ$ für den Phasenübergang von L_2 auf L_3 geschaltet werden.

Fig. 2 zeigt weiter auf, dass bei dem Ausführungsbeispiel diese Stromlücken $i_L=0$ auch bei der Abschaltung der IGBTs S_2 , S_4 und S_6 vorgesehen ist, beispielsweise aus Symmetriegründen. Insbesondere wird jedoch durch diese Maßnahme das EMV-Verhalten verbessert, da i_L wieder über die Freilaufdiode D_f abgebaut wird. Damit werden auch die leitenden Thyristoren im Bereich der Maxima der entsprechenden Netzphase gelöscht. Hierdurch ergeben sich kleine Stromänderungsgeschwindigkeiten di/dt .

Dieses Schaltverhalten wird anhand der Fig. 3 beispielhaft erläutert. Vor Erreichen eines Phasenwinkels $\varphi^*<90^\circ$ gem. Fig. 3 ist der Strom i_L von dem Gleichstromsteller 6 auf einen konstanten Wert geregelt. Die leitenden Schalter S_1 und S_4 schalten den Strom i_L auf die Phasen L_1 und L_2 .

Bei φ^* wird der Schalter T des Gleichstromstellers 6 geöffnet und der Zündstrom i_z für die Thyristoren S_1 , S_3 , S_5 abgeschaltet. Der Thyristor S_1 verbleibt dennoch eingeschaltet, da der Strom i_L noch nicht Null ist. Der IGBT S_4 verbleibt über φ^* hinaus eingeschaltet und es kann der Strom i_L sich über die Freilaufdiode D_f abbauen. Ist $i_L=0$ geworden, so schaltet der Thyristor S_1 aus.

Die Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt wird dabei durch die Induktivität L und die Netzspannung vorgegeben und stellt sich in vorteilhafter Weise auf einen geringen Wert ein.

Mit $i_L=0$ beginnt die Freiwerdezeit des Thyristors S_1 gem. des dortigen Doppelpfeils. Auch darüber hinaus verbleibt der IGBT S_4 eingeschaltet. Erst wenn sichergestellt ist, dass $i_L=0$ und der Thyristor S_1 gelöscht ist, wird auch S_4 ausgeschaltet.

Innerhalb der Stromlücke $i_L=0$, entsprechend dem oberen Doppelfeil in Fig. 3, schaltet weiter der IGBT S_6 ein.

5 Nach Ablauf der Freiwerdezeit des Thyristors S_1 kann T und damit i_z und i_L erneut eingeschaltet werden. Entsprechend wird auch der Thyristor S_1 erneut gezündet.

5

Ansprüche:

1. Schaltung für den Betrieb einer an wenigstens drei Phasen
eines Stromnetzes über einen Frequenzumrichter mit einem
Gleichspannungszwischenkreis angeschlossenen elektrischen
Maschine, bei der über einen von einem Gleichstromsteller
angesteuerten Synchronwechselrichter mit zwei jeweils die
positiven bzw. negativen Halbwellen schaltenden
Brückenhälften eine Rückspeisung der von der Maschine
generierter Energie in das Stromnetz erfolgt, dadurch
gekennzeichnet, dass Synchronwechselrichter (7)
asymmetrisch aufgebaut ist derart, dass für das Schalten
des von dem Gleichstromsteller (6) aus dem
Gleichspannungszwischenkreis (3) abgegriffenen Potentials
von einer ersten Brückenhälfte (8) aus Thyristoren
(S_1, S_3, S_5) als elektronische Schalter geschaltet wird und
dass die zweite Brückenhälfte (9) ausschaltbare,
rückwärts sperrende elektronische Schalter (S_2, S_4, S_6)
aufweist.
2. Schaltung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass
für die zweite Brückenhälfte (9) IGBTs (S_2, S_4, S_6)
vorgesehen sind.
3. Schaltung nach Anspruch 2, gekennzeichnet durch eine
Reihenschaltung eines IGBTs (S_2, S_4, S_6) und einer Diode
(D_2, D_4, D_6).
4. Schaltung nach einem oder mehreren der vorangehenden
Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der den
Synchronwechselrichter (7) ansteuernde Gleichstromsteller
(6) unmittelbar an den Gleichspannungszwischenkreis (3)

des Frequenzumrichters (1) angeschlossen ist.

5. Schaltung nach einem oder mehreren der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen die Lastkreise elektronischen Schalter (S_2, S_4, S_6) jeweils ein Kondensator als Netzfilter (10) geschaltet ist.

6. Schaltung nach einem oder mehreren der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Lastkreise der elektronischen Schalter (S_2, S_4, S_6) unmittelbar auf das Stromnetz (L_1, L_2, L_3) geschaltet sind.

7. Verfahren für den Betrieb einer an wenigstens drei Phasen eines Stromnetzes über einen Frequenzumrichter angeschlossenen elektrischen Maschine, bei der über einen von einem Gleichstromsteller angesteuerten Synchronwechselrichter eine Rückspeisung der von der Maschine generierten Energie in das Stromnetz erfolgt, insbesondere mit einer Schaltung nach einem oder mehreren der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Laststrom i_L auf den maximalen und/oder den minimalen Abschnitt einer Netzphase (L_1, L_2, L_3) zwischen den Phasenübergängen dieser Netzphase (L_1, L_2, L_3) und den beiden nächstliegenden Netzphasen (L_1, L_2, L_3) geschaltet wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Gleichstromsteller (6) für ein Löschen eines Thyristors (S_1, S_3, S_5) die Verbindung zu dem Gleichspannungszwischenkreis (3) unterbricht, dass von dem Gleichstromsteller (6) in dem Strom i_L im Laststromkreis der Thyristoren (S_1, S_3, S_5) eine Stromlücke mit $i_L=0$ geschaltet wird, dass mit Schalten des Gleichstromstellers (6) der Zündstrom i_z der Thyristoren (S_1, S_3, S_5) abgeschaltet wird und dass der dem Thyristor (S_1, S_3, S_5) zugeordnete IGBT (S_2, S_4, S_6) erst nach dem Löschen des Thyristors (S_1, S_3, S_5) sperrt.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dass für das Ausschalten eines jeden elektronischen Schalters (S_1 - S_6) eine Stromlücke $i_L=0$ geschaltet wird.

5 10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass über ein Maximum einer Netzphase (L_1, L_2, L_3) eine Stromlücke $i_L=0$ geschaltet wird, deren Dauer größer bemessen ist als die Freiwerdezeit der Thyristoren (S_1, S_3, S_5), und dass der dieser Netzphase (L_1, L_2, L_3) zugeordnete Thyristor (S_1, S_3, S_5)
10 erneut gezündet wird.

11. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Gleichstromsteller (6) den Strom i_L zwischen den Lücken auf einen im Mittel
15 konstanten Wert regelt.

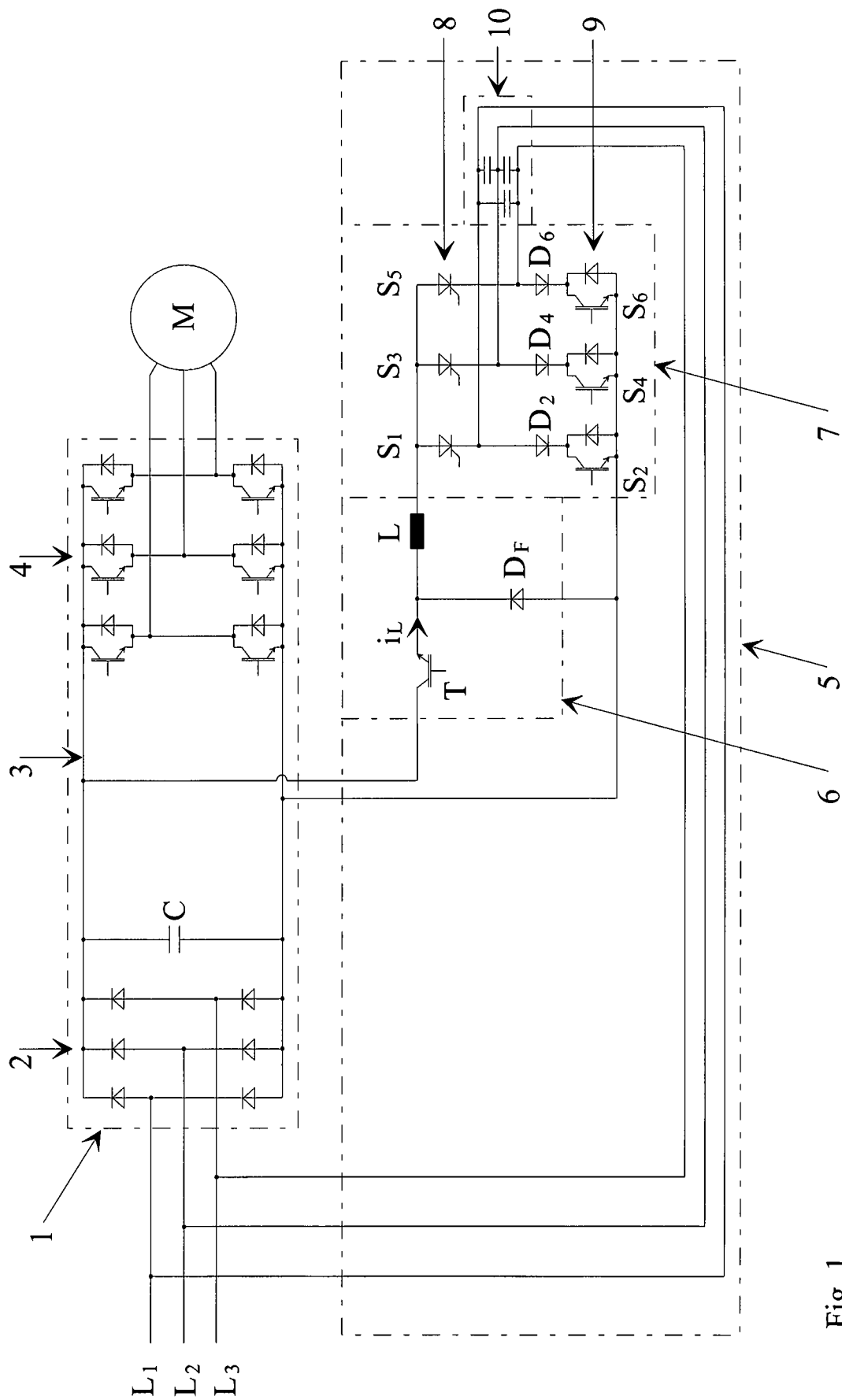


Fig. 1

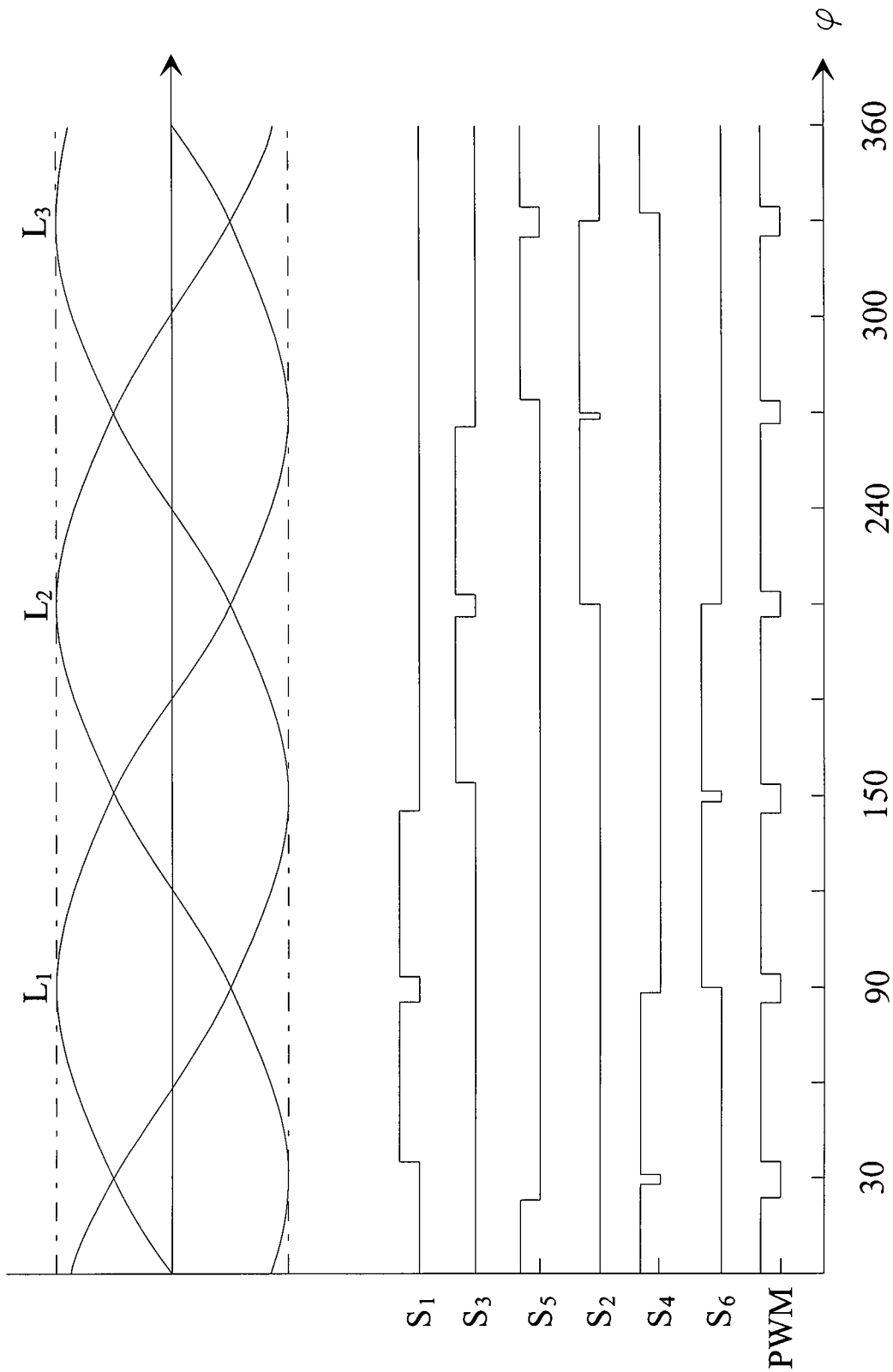


Fig. 2

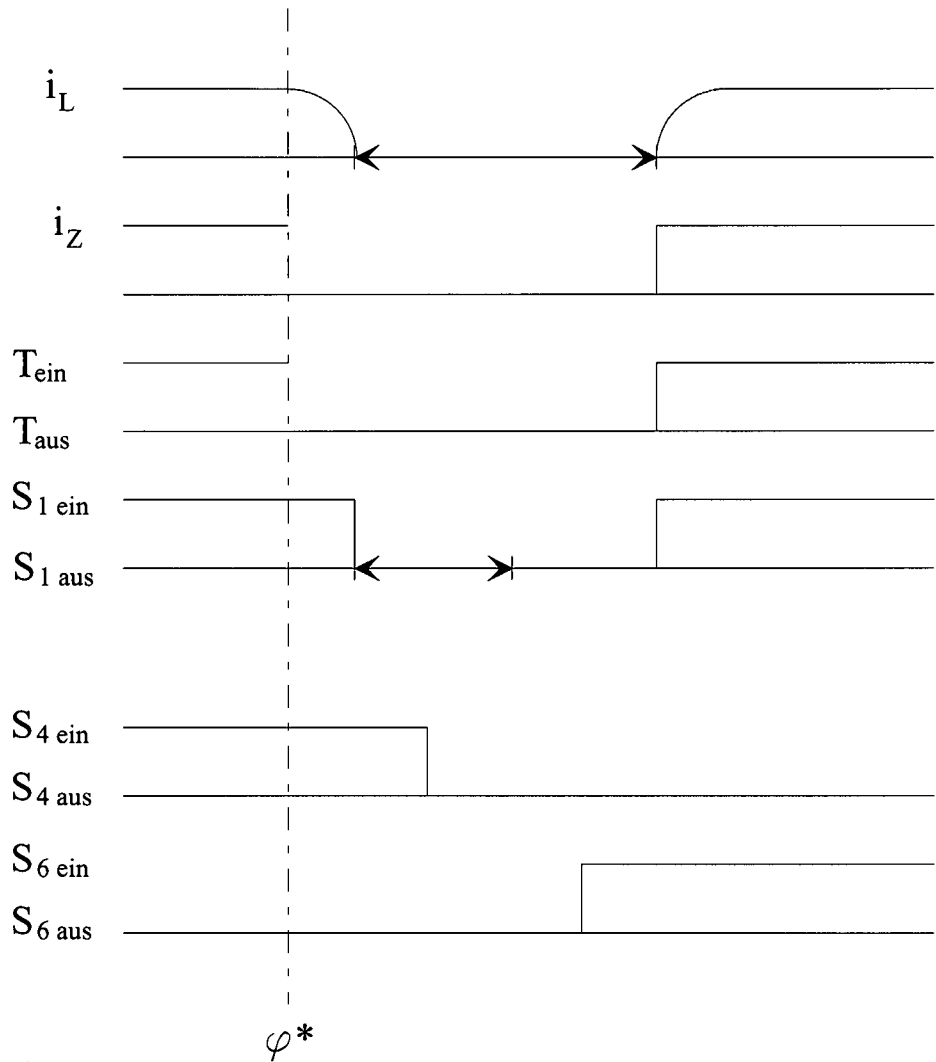


Fig. 3