



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2004 062 580 A1 2006.03.16

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2004 062 580.8

(22) Anmeldetag: 24.12.2004

(43) Offenlegungstag: 16.03.2006

(51) Int Cl.⁸: H02P 6/08 (2006.01)

(66) Innere Priorität:
 10 2004 040 704.5 23.08.2004

(71) Anmelder:
 Diehl AKO Stiftung & Co. KG, 88239 Wangen, DE

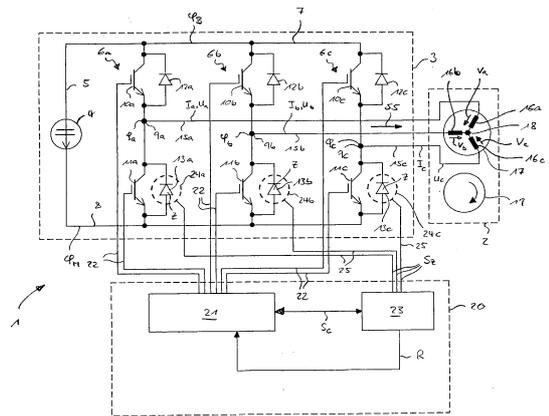
(72) Erfinder:
 Weinmann, Martin, 88339 Bad Waldsee, DE;
 Müller, Alexander, 88339 Bad Waldsee, DE; Zeh,
 Stefan, 88239 Wangen, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Regelung eines mehrphasigen, elektronisch kommutierten Motors**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur Regelung eines mittels einer wechselrichterseitigen Brückenschaltung (3) kommutierten, mehrphasigen Motors (2) angegeben, im Zuge dessen eine besonders präzise und messtechnisch einfache Erfassung einer regelungsrelevanten Größe einer betrachteten Motorphase (15a, 15b, 15c), insbesondere eines Motorphasenstroms (I_a , I_b , I_c) und/oder einer Back-EMF-Spannung (V_a , V_b , V_c) und/oder einer hieraus abgeleiteten Größe, stattfindet. Dabei ist vorgesehen, die regelungsrelevante Größe anhand des Bestromungszustandes (Z) einer Freilaufdiode (13, 13a, 13b, 13c), die in einer der betrachteten Motorphase (15a, 15b, 15c) zugeordneten Phasenhalbrücke (6a, 6b, 6c) der Brückenschaltung (3) angeordnet ist, zu bestimmen, wobei der Bestromungszustand (Z) während einer Einzeit (T , T_1 , T_2 , T_3) erfasst wird, in welcher ein der Freilaufdiode (13, 13a, 13b, 13c) parallel geschalteter Leistungsschalter (11, 11a, 11b, 11c) der Phasenhalbrücke (6a) einen leitenden Zustand und ein der Freilaufdiode (13, 13a, 13b, 13c) seriell geschalteter Leistungsschalter (10a, 10b, 10c) einen sperrenden Zustand aufweist. Es wird des Weiteren eine Vorrichtung (1) zur Durchführung des Verfahrens angegeben.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Regelung eines mehrphasigen, elektronisch kommutierten Motors. Die Erfindung bezieht sich weiterhin auf eine Vorrichtung zur Durchführung des genannten Verfahrens.

[0002] Bei einem elektronisch kommutierten (Elektro-)Motor ist zur Kommutierung, d.h. zur Ansteuerung der Motorphasen, ein Wechselrichter vorgesehen, der üblicherweise in Form einer Brückenschaltung realisiert ist. Eine solche Brückenschaltung umfasst eine der Anzahl der Motorphasen entsprechende Anzahl von Phasenhalbbrücken, wobei jede Phasenhalbbrücke über einen Spannungszwischenkreis mit dem Pluspol und dem Minuspol einer Gleichspannungsquelle verbunden ist und an einem Mittelabgriff eine Phasenanschlussklemme zum Anschluss einer zugeordneten Motorphase umfasst. Innerhalb einer jeden Phasenhalbbrücke ist zwischen der Phasenanschlussklemme und dem Pluspol ein hochpotentialseitiger Leistungsschalter, und zwischen der Phasenanschlussklemme und dem Minuspol ein niederpotentialseitiger Leistungsschalter angeordnet, über welchen der jeweilige Ast der Phasenhalbbrücke gesperrt oder freigegeben werden kann. Jedem Leistungsschalter ist eine Freilaufdiode parallel geschaltet, die in Richtung des Potentialgefälles zwischen Pluspol und Minuspol sperrend angeordnet ist.

[0003] Durch die Kommutierung werden in den Motorphasen oszillierende elektrische Ströme angeregt. Unter Wirkung dieser Motorphasenströme wird im Motor ein magnetisches Drehfeld erzeugt, welches einen Rotor des Motors zu einer Rotationsbewegung antreibt. Eine Motorregelung erfolgt üblicherweise anhand der Motorphasenströme und/oder so genannter Back-EMF-Spannungen, die durch die Rotordrehung in jede Motorphase induziert werden.

Stand der Technik

[0004] Aus der US 6,121,736 A ist ein Regelverfahren für einen elektrischen Motor der oben genannten Art bekannt, bei welchem zur Erfassung des Flussrichtungswechsels eines Motorphasenstroms (nachfolgend als Nulldurchgang des Motorphasenstroms bezeichnet) eine der betrachteten Motorphase zugeordnete Klemmenspannung während einer Totzeit der Leistungsschalter in der zugeordneten Phasenhalbbrücke detektiert wird. Der Nulldurchgang des Motorphasenstroms wird hierbei an einem Wechsel der Klemmenspannung zwischen einem dem Minuspol zugeordneten Massepotential und einem dem Pluspol zugeordneten Betriebspotential erkannt. Die Totzeit ist eine im Zuge eines Kommutierungsschaltprozesses vorgesehene Umschaltzeit, während der beide Leistungsschalter einer Phasenhalbbrücke kurzfristig sperrend angesteuert sind, um beim qua-

si-simultanen Schalten der Leistungsschalter einen Kurzschluss zwischen dem Pluspol und dem Minuspol zu vermeiden.

[0005] Ein Nachteil des bekannten Verfahrens liegt darin, dass zur Erfassung der Motorstromrichtung nur die vergleichsweise kurze Totzeit zur Verfügung steht. Eine Messung der Klemmenspannung ist mit schaltungstechnisch akzeptablem Aufwand nur dann möglich, wenn die Totzeit hinreichend groß dimensioniert ist. Diesem Erfordernis läuft die fortschreitende Entwicklung moderner Motoransteuerungen zuwider. Mit der kommerziellen Verfügbarkeit zunehmend präziserer Leistungsschalter werden auch zunehmend kürzere Totzeiten angestrebt, um einen störenden Einfluss totzeitbedingter Oberwellen der Motorphasenströme zu eliminieren.

[0006] Bei einem weiteren, aus der US 6,208,112 B1 bekannten Regelungsverfahren für einen Motor der oben genannten Art ist als Regelgröße die Phasenverschiebung zwischen einem Motorphasenstrom und der zugehörigen Back-EMF-Spannung vorgesehen. Diese Phasenverschiebung wird anhand der Abweichung zwischen dem Nulldurchgang des Motorphasenstroms und dem Nulldurchgang der Back-EMF-Spannung bestimmt. Die Messung der Back-EMF-Spannung erfolgt hierbei in einer Motorphase, die während der Messung vom Versorgungsnetz getrennt wird.

Aufgabenstellung

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Regelungsverfahren für einen mehrphasigen, elektronisch kommutierten Motor anzugeben, im Zuge dessen eine besonders präzise und messtechnisch einfache Erfassung einer regelungsrelevanten Größe, insbesondere eines Motorphasenstroms und/oder einer Back-EMF-Spannung und/oder einer hieraus abgeleiteten Größe stattfindet. Der Erfindung liegt weiterhin die Aufgabe zugrunde, eine zur Durchführung des genannten Verfahrens besonders geeignete Vorrichtung anzugeben.

[0008] Bezüglich des Verfahrens wird die Aufgabe erfindungsgemäß gelöst durch die Merkmale des Anspruchs 1. Danach ist vorgesehen, dass eine einer Motorphase zugeordnete, regelungsrelevante Größe durch Erfassung des Bestromungszustandes einer Freilaufdiode bestimmt wird, die innerhalb einer der Motorphase zugeordneten Phasenhalbbrücke einer Brückenschaltung angeordnet ist. Der Bestromungszustand wird hierbei während einer nachfolgend als „Einzeit“ bezeichneten Zeitspanne erfasst, die dadurch definiert ist, dass ein der Freilaufdiode innerhalb der Phasenhalbbrücke parallel geschalteter Leistungsschalter „ein“-geschaltet ist, d.h. einen leitenden Zustand aufweist, während ein der Freilaufdiode seriell geschalteter Leistungsschalter einen

sperrenden Zustand aufweist.

[0009] Im Folgenden wird zwischen einer „betrachteten Motorphase“ und den jeweils „weiteren Motorphasen“ unterschieden. Durch diese Sprachregelung soll ausgedrückt werden, dass durch Erfassung des Bestromungszustands einer gegebenen Freilaufdiode stets eine regelungsrelevante Größe ermittelt wird, die derjenigen Motorphase zugeordnet ist, in deren zugeordneten Phasenhalbbrücke die Freilaufdiode angeordnet ist. Diese Motorphase wird nachfolgend, zur Unterscheidung von den „weiteren Motorphasen“, als „betrachtete Motorphase“ bezeichnet. Diese Sprachregelung ist jedoch nicht im Sinne einer Festlegung auf eine bestimmte, physikalische Motorphase zu verstehen. Vielmehr wird in bevorzugter Ausführung der Bestromungszustand jeweils einer Freilaufdiode einer jeden Phasenhalbbrücke erfasst, so dass, je nach Bezugnahme, eine jede Motorphase die „betrachtete Motorphase“ sein kann.

[0010] Der Bestromungszustand der Freilaufdiode wird in einer zweckmäßigen Verfahrensvariante durch einen direkten Stromsensor, insbesondere einen der Freilaufdiode über seine Basis-Emitter-Strecke seriell geschalteten Bipolartransistor erfasst. In einer gleichermaßen bevorzugten alternativen Verfahrensvariante wird der Bestromungszustand der Freilaufdiode, z.B. mittels einer Komparatorschaltung, indirekt anhand einer über der Freilaufdiode abfallenden Referenzspannung bestimmt. Die indirekte Erfassung des Bestromungszustandes eignet sich insbesondere für vergleichsweise hohe Antriebsleistungen, zumal die indirekte Erfassung des Bestromungszustandes im Wesentlichen verlustlos erfolgt.

[0011] Diese Referenzspannung entspricht erkanntermaßen der (in Durchlassrichtung abfallenden) Flussspannung der Freilaufdiode, wenn diese bestromt ist. Ist die Freilaufdiode dagegen stromlos, so entspricht die Referenzspannung während der Einzeit der (in Sperrrichtung der Freilaufdiode abfallenden) Sättigungsspannung des parallel geschalteten Leistungsschalters. Die Referenzspannung ändert somit bei einer Änderung des Bestromungszustandes der Freilaufdiode das Vorzeichen, wodurch der Bestromungszustand der Freilaufdiode und eine Änderung desselben mit schaltungstechnisch besonders einfachen und damit insbesondere kostengünstigen Mitteln erkennbar ist.

[0012] Bevorzugt wird der Bestromungszustand der niederpotentialseitigen, d.h. der zwischen einer Phasenanschlussklemme und dem Minuspol angeordneten Freilaufdiode einer Phasenhalbbrücke bestimmt. Dies ist insbesondere unter dem Aspekt zweckmäßig, dass der Minuspol üblicherweise als Systemmasse herangezogen wird, auf die auch die Steuerlogik einer Motoransteuerung gewöhnlicherweise bezogen ist. Grundsätzlich kann aber zusätzlich

oder alternativ hierzu auch der Bestromungszustand der hochpotentialseitigen Freilaufdiode erfasst werden.

[0013] Als regelungsrelevante Größe wird in einer bevorzugten Ausführung des Verfahrens die Flussrichtung des in der betrachteten Motorphase fließenden Motorphasenstroms bestimmt. Eine niederpotentialseitig angeordnete Freilaufdiode ist während der Einzeit erkanntermaßen dann bestromt, wenn die Flussrichtung des zugeordneten Motorphasenstroms positiv ist, d.h. wenn der Motorstrom auf den Motor zufließt. Bei negativer Flussrichtung des Motorphasenstroms ist die Freilaufdiode dagegen unbestromt. Der Bestromungszustand einer hochpotentialseitigen Freilaufdiode verhält sich hierzu genau entgegengesetzt.

[0014] Vorzugsweise wird der Bestromungszustand der Freilaufdiode fortlaufend, d.h. während einer jeden Einzeit kontinuierlich oder zeitdiskret mit einer vorgegebenen Abtastrate überwacht, um Nulldurchgänge, d.h. Flussrichtungswechsel des Motorphasenstroms zu erkennen. Als für einen Nulldurchgang charakteristische Größen werden hierbei insbesondere der Zeitpunkt, zu dem der Nulldurchgang stattfindet, sowie optional ein dem Nulldurchgang zugeordnetes Vorzeichen erfasst. Ein Nulldurchgang wird hierbei positiv notiert, wenn der Motorphasenstrom von negativer Flussrichtung zu positiver Flussrichtung wechselt. Ein Flussrichtungswechsel von positiv zu negativ wird entsprechend als negativer Nulldurchgang bezeichnet. Aus den ermittelten Nulldurchgängen des Motorphasenstroms werden optional abgeleitete Größen wie die Frequenz des Motorphasenstroms und/oder die Phasenlage des Motorphasenstroms zu einem beliebigen Zeitpunkt bestimmt.

[0015] Zusätzlich oder alternativ zu der Flussrichtung des Motorphasenstroms wird in einer vorteilhaften Ausführung des Verfahrens als weitere regelungsrelevante Größe das Vorzeichen einer in die betrachtete Motorphase induzierten Back-EMF-Spannung anhand des Bestromungszustandes der Freilaufdiode bestimmt. Hierzu wird während einer Einzeit einer betrachteten Motorphase, insbesondere nach Abkommuteirung des betreffenden Motorphasenstroms, ein so genannter Nullvektorzustand hergestellt, im Zuge dessen alle Motorphasen auf einen gemeinsamen Pol des Spannungszwischenkreises geklemmt werden, so dass an die weiteren Motorphasen ein Klemmenpotential angelegt wird, das dem Klemmenpotential der betrachteten Motorphase im Wesentlichen entspricht. Wird der Bestromungszustand der niederpotentialseitigen Freilaufdiode bestimmt, so wird der Nullvektorzustand insbesondere realisiert, indem alle Motorphasen auf den Minuspol geklemmt werden.

[0016] Während des auf den Minuspol bezogenen Nullvektorzustands ist im Grenzfall eines geringen Motorphasenstroms das der betrachteten Motorphase zugeordnete Klemmenpotential gegenüber dem Massenpotential dann positiv, wenn die zugehörige Back-EMF-Spannung ein positives Vorzeichen aufweist. Entsprechend ist die niederpotentialseitige Freilaufdiode in diesem Fall stromlos. Umgekehrt ist die niederpotentialseitige Freilaufdiode dann bestromt, wenn die Back-EMF-Spannung ein negatives Vorzeichen aufweist.

[0017] Das Vorzeichen der Back-EMF-Spannung kann äquivalenterweise auch anhand des Bestromungszustandes einer hochpotentialseitigen Freilaufdiode ermittelt werden. Hierbei werden zur Herstellung des Nullvektorzustandes alle Motorphasen auf den Pluspol geklemmt. Die hochpotentialseitige Freilaufdiode ist bei positivem Vorzeichen der Back-EMF-Spannung bestromt und bei negativem Vorzeichen der Back-EMF-Spannung stromlos.

[0018] Bevorzugt werden als regelungsrelevante Größen sowohl die Flussrichtung des Motorphasenstroms als auch das Vorzeichen der Back-EMF-Spannung in der betrachteten Motorphase bestimmt. Die Bestimmung des Vorzeichens der Back-EMF-Spannung wird hierbei vorteilhafterweise immer dann vorgenommen, wenn zuvor ein Nulldurchgang des Motorphasenstroms erkannt wurde. Durch diese mit dem Nulldurchgang des Motorphasenstroms quasi-simultane Bestimmung des Vorzeichens der Back-EMF-Spannung wird gleichzeitig Information über eine qualitative Phasenverschiebung zwischen dem Motorphasenstrom und der Back-EMF-Spannung gewonnen, d.h. es kann festgestellt werden, ob die Back-EMF-Spannung dem Motorstrom nach- oder vorseilt. Die Information über diese qualitative Phasenverschiebung wird insbesondere bei einem Synchronmotor vorteilhafterweise als Regelgröße zur Phasenangleichung des Motorphasenstroms an die Back-EMF-Spannung herangezogen.

[0019] Um vor Herstellung des Nullvektorzustandes den in der Motorphase fließenden Motorstrom zu eliminieren, wird dem Nullvektorzustand zweckmäßigerweise ein Abkommutierungszustand vorausgeschaltet. Während des Abkommutierungszustandes wird die der betrachteten Motorphase zugeordnete Phasenhalbrücke hochohmig geschaltet. Mit anderen Worten werden beide Leistungsschalter dieser Phasenhalbrücke vorübergehend sperrend angesteuert. An die weiteren Motorphasen wird gleichzeitig ein Klemmenpotential angelegt, das dem Motorphasenstrom in der betrachteten Motorphase entgegenwirkt. Fließt der Motorphasenstrom in der betrachteten Motorphase also in positive Flussrichtung, so wird an die weiteren Motorphasen im Wesentlichen das Betriebspotential angelegt. Entsprechend

werden die weiteren Motorphasen auf Masse gelegt, wenn zu Beginn des Abkommutierungszustandes der Motorphasenstrom in der betrachteten Motorphase in negative Flussrichtung floss.

[0020] Bezüglich der zur Durchführung des vorstehend beschriebenen Verfahrens vorgesehenen Vorrichtung wird die Aufgabe erfindungsgemäß gelöst durch die Merkmale des Anspruchs 10. Danach umfasst die Vorrichtung eine Brückenschaltung zur Ansteuerung eines mehrphasigen elektronisch kommutierten Motors. Die Brückenschaltung umfasst zu jeder Motorphase eine zugeordnete Phasenhalbrücke, in welcher bezüglich einer Phasenanschlussklemme ein hochpotentialseitig angeordneter Leistungsschalter und ein niederpotentialseitig angeordneter Leistungsschalter angeordnet sind. Jedem Leistungsschalter ist hierbei eine Freilaufdiode parallel geschaltet. Die Vorrichtung umfasst weiterhin eine Steuereinheit, die zur Ansteuerung der Leistungsschalter der Brückenschaltung ausgebildet ist.

[0021] Erfindungsgemäß ist hierbei einer Freilaufdiode mindestens einer Phasenhalbrücke eine Sensorschaltung zugeordnet, die dazu ausgebildet ist, während einer Einzeit gemäß obiger Definition den Bestromungszustand der Freilaufdiode zu ermitteln. Der Steuereinheit ist von der Sensorschaltung ein den Bestromungszustand kennzeichnender Ausgabewert zugeführt, anhand dessen die Steuereinheit nach dem vorstehend beschriebenen Verfahren eine regelungsrelevante Größe, insbesondere die Flussrichtung des Motorphasenstroms, das Vorzeichen der Back-EMF-Spannung oder eine hieraus abgeleitete Größe bestimmt.

[0022] Zweckmäßigerweise ist die Sensorschaltung einer niederpotentialseitig angeordneten Freilaufdiode zugeordnet. Bevorzugt ist der niederpotentialseitigen Freilaufdiode einer jeden Phasenhalbrücke eine Sensorschaltung zugeordnet.

[0023] Für eine direkte Messung des Bestromungszustandes der Freilaufdiode umfasst die Sensorschaltung in einer bevorzugten Ausführung der Erfindung einen Bipolartransistor, der über seine Basis-Emitter-Strecke der Freilaufdiode seriell geschaltet ist. In einer alternativen Ausführung der Erfindung umfasst die Sensorschaltung zur indirekten Messung des Bestromungszustandes einen Komparator, dem zur Erfassung der über der Freilaufdiode abfallenden Referenzspannung ein anodenseitiges Diodenpotential und ein kathodenseitiges Diodenpotential der Freilaufdiode zugeführt ist.

[0024] In einer schaltungstechnisch besonders vorteilhaften Ausführung der Erfindung ist die Sensorschaltung zusammen mit der zugeordneten Freilaufdiode und dem der letzteren parallel geschalteten Leistungsschalter in einem gemeinsamen, insbeson-

dere monolithisch ausgeführten Bauteil integriert, das als 4-Pol realisiert ist, d.h. zusätzlich zu den drei Eingängen des Leistungsschalters einen der Sensorschaltung zugeordneten Sensorausgang umfasst, an welchem das Ausgabesignal abgreifbar ist. Dieser Sensorausgang ist insbesondere als Open-Kollektor-Ausgang ausgeführt. Ein Open-Kollektor-Ausgang stellt anstelle eines aktiven Spannungssignals einen passiven Widerstandswert zur Kennzeichnung eines Signalzustandes zur Verfügung.

[0025] Die mit der Erfindung verknüpften Vorteile bestehen insbesondere darin, das mittels eines gemeinsamen Messprinzips, nämlich der Erfassung des Bestromungszustandes einer Freilaufdiode während des für die oben definierte Einzeit charakteristischen Schaltzustands, auf schaltungstechnisch besonders einfache und somit kostengünstige Weise regelungsrelevante Größen wie die Flussrichtung eines Motorphasenstroms und/oder das Vorzeichen einer Back-EMF-Spannung ermittelt werden können. Derartige Einzeiten treten bei einer gewöhnlichen Motoransteuerung von Haus aus und mit messtechnisch hinreichend großer Dauer auf, so dass insbesondere die Flussrichtung des Motorphasenstroms unproblematisch im Normalbetrieb des Motors bestimmbar ist. In Hinblick auf eine Erfassung der Back-EMF-Spannung ist das vorstehend beschriebene Messprinzip insbesondere insofern vorteilhaft, als die Messung der Back-EMF-Spannung während eines Nullvektorzustands erfolgt. Ein derartiger Nullvektorzustand wird typischerweise bei jedem Taktzyklus der Leistungsschalter einmal durchlaufen.

[0026] Zur konstruktiven Vereinfachung der Steuervorrichtung trägt insbesondere bei, dass die Flussrichtung des Motorphasenstroms und das Vorzeichen der Back-EMF-Spannung mit ein und derselben Sensorschaltung detektiert werden. Diese erlaubt trotz einfachem schaltungstechnischem Aufbau eine hochpräzise Messung, so dass insbesondere auch die vergleichsweise schwache, durch den Remanenzmagnetismus des Rotoreisens verursachte Back-EMF-Spannung eines Asynchronmotors sicher gemessen wird. Das Verfahren und die zugehörige Vorrichtung ist ebenso vorteilhaft auch bei einem Synchronmotor, insbesondere zur Phasenangleichung der Motorphasenströme an die Back-EMF-Spannung einsetzbar.

Ausführungsbeispiel

[0027] Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand einer Zeichnung näher erläutert. Darin zeigen:

[0028] [Fig. 1](#) in einem schematisch vereinfachten Blockschaltbild eine Vorrichtung zur Ansteuerung eines dreiphasigen, elektronisch kommutierten Motors, mit einer wechselrichterseitigen Brückenschaltung

und einer diese ansteuernden Steuereinheit,

[0029] [Fig. 2](#) in einem elektronischen Schaltbild einen Leistungsschalter und eine parallel geschaltete Freilaufdiode der Brückenschaltung gemäß [Fig. 1](#) mit einer als Komparatorschaltung ausgeführten Sensorschaltung zur Erfassung des Bestromungszustandes der Freilaufdiode,

[0030] [Fig. 3](#) in Darstellung gemäß [Fig. 2](#) eine alternative Ausführung der Sensorschaltung,

[0031] [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) in Darstellung gemäß [Fig. 2](#) weitere Ausführungen der Sensorschaltung,

[0032] [Fig. 7](#) in einem schematischen Diagramm für jede der drei Motorphasen den zeitlichen Verlauf des Motorphasenstroms, des Klemmenpotentials sowie der Phasenspannung bei einer sogenannten „Fiat Bottom-Modulation“,

[0033] [Fig. 8](#) in einem Diagramm mit gegenüber [Fig. 7](#) verfeinerter Zeitskala Zeitausschnitte Va und Vb des Diagramms gemäß [Fig. 7](#),

[0034] [Fig. 9](#) in Darstellung gemäß [Fig. 7](#) den zeitlichen Verlauf der Motorphasenströme, Klemmenpotentiale und Phasenspannungen bei einer sogenannten „zentrischen Modulation“ sowie zusätzlich den zeitlichen Verlauf der in eine jede Motorphase induzierten Back-EMF-Spannung,

[0035] [Fig. 10](#) in Darstellung gemäß [Fig. 8](#) Zeitausschnitte VIIa und VIIb des Diagramms gemäß [Fig. 9](#) in verfeinerter Zeitauflösung.

[0036] Einander entsprechende Teile und Größen sind in allen Figuren stets mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

[0037] [Fig. 1](#) zeigt in einem schematisch vereinfachten Blockschaltbild eine Vorrichtung **1** zur Regelung eines dreiphasigen, elektronisch kommutierten Motors **2**. Bei dem Motor **2** handelt es sich exemplarisch um einen bürstenlosen Synchronmotor mit Permanentmagnet. Das nachfolgend beschriebene Verfahren und die zugehörige Vorrichtung **1** sind aber auch zur Regelung anderer Motortypen einsetzbar, insbesondere bei einem Asynchronmotor oder einem Reluktanz-Synchronmotor.

[0038] Die Vorrichtung **1** umfasst eine wechselrichterseitige Brückenschaltung **3**, die von einer Gleichspannungsquelle **4** über einen Spannungszwischenkreis **5** spannungsversorgt wird. Die Brückenschaltung **3** umfasst drei Phasenhalfbrücken **6a**, **6b**, **6c**, die in Parallelschaltung jeweils zwischen einen Pluspol **7** und einen Minuspol **8** des Spannungszwischenkreises **5** geschaltet sind. Jede Phasenhalfbrücke **6a**, **6b**, **6c** weist an einem Mittelabgriff eine Phasen-

anschlussklemme **9a, 9b, 9c** auf. Der Phasenanschlussklemme **9a, 9b, 9c** und dem Pluspol **7** ist innerhalb der jeweiligen Phasenhalbrücke **6a, 6b, 6c** ein hochpotentialseitiger Leistungsschalter **10a, 10b, 10c** zwischengeschaltet. Ebenso ist der jeweiligen Phasenanschlussklemme **9a, 9b, 9c** und dem Minuspol **8** innerhalb der jeweiligen Phasenhalbrücke **6a, 6b, 6c** ein niederpotentialseitiger Leistungsschalter **11a, 11b, 11c** zwischengeschaltet. Die Leistungsschalter **10a, 10b, 10c** und **11a, 11b, 11c** sind als Halbleiterschaltenelemente, insbesondere IGBTs oder MOFETs ausgebildet. Jedem hochpotentialseitigem Leistungsschalter **10a, 10b, 10c** ist eine hochpotentialseitige Freilaufdiode **12a, 12b, 12c** parallel geschaltet. Ebenso ist jedem niederpotentialseitigen Leistungsschalter **11a, 11b, 11c** eine zugehörige niederpotentialseitige Freilaufdiode **13a, 13b, 13c** parallel geschaltet. Die Freilaufdioden **12a, 12b, 12c** und **13a, 13b, 13c** sind jeweils mit ihrer Durchlassrichtung auf den Pluspol **7** ausgerichtet und somit bezüglich des Potentialgefälles zwischen Pluspol **7** und Minuspol **8** in Sperrrichtung geschaltet.

[0039] Mit der Phasenanschlussklemme **9a, 9b, 9c** einer jeden Phasenhalbrücke **6a, 6b, 6c** ist eine zugehörige Motorphase **15a, 15b, 15c** des Motors **2** kontaktiert, der hier exemplarisch in Sternschaltung ausgeführt ist. Jede Motorphase **15a, 15b, 15c** umfasst eine Erregerwicklung **16a, 16b, 16c**, die in einem Stator **17** des Motors **2** angeordnet ist. Die Motorphasen **15a, 15b, 15c** sind innerhalb des Stators **17** in einem Sternpunkt **18** zusammengeschlossen. Der Motor **2** umfasst weiterhin einen innerhalb des Stators **17** rotierbar gelagerten Rotor **19**, der insbesondere einen (nicht näher dargestellten) Permanentmagneten umfasst.

[0040] Die Vorrichtung **1** umfasst weiterhin eine Steuereinheit **20**, die insbesondere als logische elektronische Schaltung ausgebildet ist. Die Steuereinheit **20** umfasst ein Schaltmodul **21** zur Aufsteuerung bzw. Zuststeuerung der Leistungsschalter **10a, 10b, 10c** und **11a, 11b, 11c**. Das Schaltmodul **21** ist hierzu über jeweils eine entsprechende Steuerleitung **22** mit dem Gate-Eingang eines jeden Leistungsschalters **10a, 10b, 10c** und **11a, 11b, 11c** verbunden.

[0041] Zur Ermittlung einer (nachfolgend näher beschriebenen) Regelgröße **R** umfasst die Steuereinheit **20** weiterhin ein Auswertemodul **23**. Das Auswertemodul **23** ist hierbei dazu ausgebildet, die Regelgröße **R** anhand des (stromlosen oder strombehafteten) Bestromungszustands **Z** einer jeden niederpotentialseitigen Freilaufdiode **13a, 13b, 13c** zu bestimmen. Zur Erfassung des Bestromungszustands **Z** ist jeder der niederpotentialseitigen Freilaufdioden **13a, 13b, 13c** eine Sensorschaltung **24a, 24b, 24c** zugeordnet, die ein den Bestromungszustand **Z** spezifizierendes Ausgabesignal **S_Z** über eine jeweilige Erfassungsleitung **25** dem Auswertemodul **23** zuführt. Das

Auswertemodul **23** und Schaltmodul **21** sind zum Austausch von Steuersignalen **S_C** verbunden.

[0042] Ein niederpotentialseitiger Leistungsschalter **11**, der exemplarisch für einen beliebigen Leistungsschalter **11a, 11b, 11c** gemäß **Fig. 1** steht, ist in den **Fig. 2** und **Fig. 3** zusammen mit der parallelgeschalteten Freilaufdiode **13** (entsprechend einer der Freilaufdioden **13a, 13b, 13c** aus **Fig. 1**) und der dieser zugeordneten Sensorschaltung **24** (entsprechend einer der Sensorschaltungen **24a, 24b, 24c** aus **Fig. 1**) vergrößert dargestellt. Die Sensorschaltung **24** ist in einer ersten Ausführung gemäß **Fig. 2** als Komparatorschaltung ausgebildet. Die Sensorschaltung **24** umfasst hierbei einen Komparator **30**, der über seine Eingänge **31** und **32** der jeweiligen Freilaufdiode **13** parallelgeschaltet ist, so dass der Eingang **31** mit einem anodenseitiges Diodenpotential φ_- und der Eingang **32** mit einem kathodenseitiges Diodenpotential φ_+ belegt ist. Der Komparator **30** vergleicht die anliegenden Diodenpotentiale φ_- und φ_+ und gibt an einem Ausgang **33** das Ausgabesignal **S_Z** in Form eines logischen Signals aus, dessen Wert von dem Größenverhältnis der Diodenpotentiale φ_- und φ_+ , und somit von dem Vorzeichen einer über der Freilaufdiode **13** abfallenden Referenzspannung $U_R = (\varphi_+ - \varphi_-)$ abhängt. Der Bestromungszustand **Z** wird hierbei indirekt über das Vorzeichen der Referenzspannung U_R bestimmt. Ist die Freilaufdiode **13** bestromt, so entspricht die Referenzspannung U_R der in Durchlassrichtung abfallenden und somit negativen Flussspannung der Freilaufdiode **13**. Ist die Freilaufdiode **13** unbestromt, so ist die über ihr abfallende Referenzspannung U_R positiv.

[0043] Die Sensorschaltung **24** ist optional zusammen mit dem Schaltmodul **21** in einem gemeinsamen Treiberbaustein **34** integriert. In dieser Ausführung sind die Diodenpotentiale φ_- und φ_+ an einen „COM“-Eingang **35** bzw. einen „Vs“-Eingang **36** des Treiberbausteins **34** angelegt, die bausteinintern mit den Eingängen **31** bzw. **32** des Komparators **30** kontaktiert sind. Das Ausgabesignal **S_Z** ist an einem mit dem Ausgang **33** des Komparators **30** verschalteten „Sign“-Ausgang **37** des Treiberbausteins **34** abgreifbar. Ein „LO“-Eingang **38** des Treiberbausteins **34** ist über die zugehörige Steuerleitung **22** mit dem Gate-Eingang des niederpotentialseitigen Leistungsschalters **11** verbunden. Ein „HO“-Eingang **39** des Treiberbausteins **34** ist entsprechend mit dem Gate-Eingang des (in **Fig. 2** nicht dargestellten) zugehörigen hochpotentialseitigen Leistungsschalters **10a, 10b, 10c** verbunden. Die Eingänge **38** u. **39** sind (in nicht näher dargestellter Weise) bausteinintern mit dem Schaltmodul **21** verbunden.

[0044] In einer alternativen Ausführung der Sensorschaltung **24** gemäß **Fig. 3** wird der Bestromungszustand **Z** der Freilaufdiode **13** direkt gemessen. Hierzu ist der Freilaufdiode **13** ein Bipolartransistor **40** über

dessen Basis-Emitter-Strecke **41** in Serie geschaltet. Das Ausgangssignal S_z ist hierbei an einem Mittelabgriff **42** einer Spannungsteilerschaltung **43** abgreifbar, die über einen Widerstand **44** mit einem Versorgungspotential VCC und über einen Widerstand **45** mit einem Kollektoreingang **46** des Bipolartransistors **40** verbunden ist. Die Basis-Emitter-Strecke **41** des Bipolartransistors **40** hat hierbei selbst die schaltungstechnischen Eigenschaften einer gleichsinnig mit der Freilaufdiode **13** ausgerichteten Diode. Der Bipolartransistor **40** kann hierdurch bei entsprechender Auslegung die Freilaufdiode **13** auch vollständig ersetzen.

[0045] Optional sind der Leistungsschalter **11**, die Freilaufdiode **13** und der Bipolartransistor **40** in einem gemeinsamen elektronischen Bauteil **47** kombiniert. Das Bauteil **47** ist als 4-Pol konzipiert. Es umfasst drei dem Leistungsschalter **11** zuzuordnende Anschlüsse **48**, **49** und **50**, von denen der Anschluss **48** zur Verbindung mit dem Minuspol **8**, der Anschluss **49** als Steuereingang zur Verbindung mit dem Schaltmodul **21** und der Anschluss **50** zur Verbindung mit der jeweiligen Motorphasenklemme **9a**, **9b**, **9c** vorgesehen ist. Das Bauteil **47** umfasst des Weiteren einen Sensorausgang **51**, der mit dem Kollektoreingang **46** des Bipolartransistors **40** verbunden ist. Der Sensorausgang **51** hat die schaltungstechnischen Eigenschaften eines Open-Kollektor-Ausgangs und stellt einen in hochsensibler Weise von dem Bestromungszustand der Basis-Emitter-Strecke **41**, und damit von dem Bestromungszustand Z der Freilaufdiode **13** abhängigen Widerstandswert zur Verfügung. Das Bauteil **47** ist bevorzugt monolithisch ausgeführt. Die Darstellung des Bipolartransistors **40** repräsentiert in diesem Fall kein separates Teil, sondern eine schaltungstechnische Charakteristik des Bauteils **47**.

[0046] Weitere Ausführungsformen der Sensorschaltung **24** sind in den [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) dargestellt. Im Gegensatz zu den vorstehend beschriebenen Ausführungsformen gemäß [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) ist die Sensorschaltung **24** hier jeweils dem aus dem niederpotentialseitigen Leistungsschalter **11** und der zugeordneten Freilaufdiode **13** gebildeten Halbleiterbaustein und dem Minuspol **8** zwischengeschaltet.

[0047] Im Betrieb des Motors **2** wird durch Kommutierung der Motorphasen **15a**, **15b**, **15c**, d.h. durch periodische Auf- bzw. Zusteuerung der Leistungsschalter **10a**, **10b**, **10c** und **11a**, **11b**, **11c** in jeder Motorphase **15a**, **15b**, **15c** ein periodisch fluktuierender Motorphasenstrom I_a , I_b , I_c erzeugt, wobei – wie in [Fig. 1](#) angedeutet – der Motorphasenstrom I_a der Motorphase **15a**, der Motorphasenstrom I_b der Motorphase **15b** und der Motorphasenstrom I_c der Motorphase **15c** zugeordnet ist. Die Motorphasenströme I_a , I_b , I_c erzeugen im Stator **17** des Motors **2** ein rotierendes magnetisches Erregerfeld, das den Rotor **19** antreibt. Ein innerhalb einer Motorphase **15a**, **15b**, **15c**

auf den Motor **2** zufließender Motorphasenstrom I_a , I_b , I_c wird nachfolgend mit einem positiven Vorzeichen notiert. Ein positiver Motorphasenstrom I_a , I_b , I_c fließt somit entlang einer in [Fig. 1](#) angedeuteten Flussrichtung **55**. Entsprechend wird ein von dem Motor **2** wegfließender Motorphasenstrom I_a , I_b , I_c mit negativem Vorzeichen notiert. Ein entsprechender Motorphasenstrom I_a , I_b , I_c fließt somit in eine der Flussrichtung **55** entgegengesetzte Flussrichtung.

[0048] Zur Steuerung der Phasenströme I_a , I_b , I_c wird durch Auf- bzw. Zusteuerung der Leistungsschalter **10a**, **10b**, **10c** und **11a**, **11b**, **11c** ein Klemmenpotential φ_a , φ_b , φ_c an der jeweils zugehörigen Phasenanschlussklemme **9a**, **9b**, **9c** eingestellt.

[0049] Der hochpotentialseitige Leistungsschalter **10a**, **10b**, **10c** und der zugehörige niederpotentialseitige Leistungsschalter **11a**, **11b**, **11c** einer jeden Phasenhalbrücke **6a**, **6b**, **6c** werden hierbei – sofern nicht explizit anders ausgeführt – stets antiparallel angesteuert, so dass innerhalb einer jeden Phasenhalbrücke **6a**, **6b**, **6c** jeweils ein Leistungsschalter **10a**, **10b**, **10c** bzw. **11a**, **11b**, **11c** einen leitenden Zustand aufweist, während der andere Leistungsschalter **10a**, **10b**, **10c** bzw. **11a**, **11b**, **11c** einen sperrenden Zustand aufweist. Ist der hochpotentialseitige Leistungsschalter **10a**, **10b**, **10c** einer Phasenhalbrücke **6a**, **6b**, **6c** leitend, so entspricht das zugeordnete Klemmenpotential φ_a , φ_b , φ_c im Wesentlichen einem dem Pluspol **7** zugeordneten Betriebspotential φ_B . Ist dagegen der niederpotentialseitige Leistungsschalter **11a**, **11b**, **11c** leitend, so entspricht das zugeordnete Klemmenpotential φ_a , φ_b , φ_c näherungsweise einem an dem Minuspol **8** abgreifbaren Massenpotential φ_M . Ein Wechsel des Schaltzustandes innerhalb einer Phasenhalbrücke **6a**, **6b**, **6c** erfolgt in der Regel quasi-simultan für beide Leistungsschalter **10a**, **10b**, **10c** und **11a**, **11b**, **11c**, genauer innerhalb der eingangs eingeführten Totzeit, die aufgrund ihrer geringen Dauer für die nachfolgenden Ausführungen aber vernachlässigbar ist. Die Ansteuerung der Motorphasen I_a , I_b , I_c wird durch das Schaltmodul **21** unter Anwendung einer Pulsweitenmodulation (PWM) vorgenommen. Dabei wird der hochpotentialseitige Leistungsschalter **10a**, **10b**, **10c** der anzusteuern Motorphase **15a**, **15b**, **15c** durch eine Serie von Steuerpulsen P ([Fig. 7](#)) angesteuert, die mit einer vorgegebenen Taktfrequenz aufeinander folgen. Die als Pulsweite bezeichnete Dauer eines jeden Steuerpulses P wird im Zuge des Regelungsverfahrens zwischen 0% und 100% der Taktdauer eines PWM-Taktes moduliert. Für die auf den Steuerpuls P folgende Zeitspanne eines PMW-Taktes ist der hochpotentialseitige Leistungsschalter **10a**, **10b**, **10c** abgeschaltet, und die zugehörige Motorphase **15a**, **15b**, **15c** durch Aufsteuerung des entsprechenden niederpotentialseitigen Leistungsschalters **11a**, **11b**, **11c** auf den Minuspol **8** geklemmt. Bei der in [Fig. 1](#) dargestellten Schaltungskonfiguration entspricht eine

durch diesen Schaltzustand gekennzeichnete Zeitspanne einer Einzeit im Sinne der obigen Definition.

[0050] Als Phasenspannung U_a , U_b , U_c wird nachfolgend der über den PWM-Takt gebildete zeitliche Mittelwert des entsprechenden Klemmenpotentials φ_a , φ_b , φ_c bezeichnet. Eine jede Phasenspannung U_a , U_b , U_c ist auf das Massenpotential φ_M bezogen und variiert zwischen 0V und dem Betriebspotential φ_B . Die Phasenspannung U_a , U_b , U_c ist hierbei direkt proportional zu der Pulsweite, mit welcher die entsprechende Motorphase **15a**, **15b**, **15c** angesteuert wird.

[0051] In der Praxis werden verschiedene Varianten der pulswertenmodulierten Motoransteuerung eingesetzt, auf die das erfindungsgemäße Verfahren gleichermaßen anwendbar ist. Exemplarisch ist in [Fig. 7](#) eine sogenannte „Fiat Bottom“-Modulation dargestellt. [Fig. 7](#) zeigt in einem Diagramm gegen die Zeit t für jede Motorphase **15a**, **15b**, **15c** separiert den jeweiligen Motorphasenstrom I_a , I_b , I_c , das zugeordnete Klemmenpotential φ_a , φ_b , φ_c sowie die jeweilige Phasenspannung U_a , U_b , U_c .

[0052] Dem Diagramm gemäß [Fig. 7](#) ist zunächst zu entnehmen, dass die Phasenströme I_a , I_b , I_c periodisch gemäß einer zumindest im Wesentlichen sinusförmigen Zeitabhängigkeit variieren. Die Periode dieser sinusförmigen Zeitabhängigkeit entspricht einer Volldrehung des Erregerfelds, sowie – bei einem Synchronmotor mit N Polpaaren – einer N -tel Drehung des Rotors **19**. Ein Zeitintervall innerhalb des Diagramms ist somit direkt proportional zu einer Änderung des Phasenwinkels des Erregerfelds bzw. der Rotorbewegung.

[0053] Bei der „Fiat Bottom“-Modulation gemäß [Fig. 7](#) wird jede Motorphase **15a**, **15b**, **15c** während eines einem Phasenwinkelbereich von 240° entsprechenden ersten Teilzyklus **60** einer jeden Periode pulswertenmoduliert angesteuert. Dieser Teilzyklus **60** in der Darstellung gemäß [Fig. 7](#) an den jeweils einem Steuerpuls P entsprechenden Spitzen der Klemmenpotentiale φ_a , φ_b , φ_c zu erkennen, die aus Gründen der begrenzten Zeitauflösung in [Fig. 7](#) unter Vernachlässigung ihrer jeweiligen zeitlichen Ausdehnung lediglich als senkrechte Striche angedeutet sind. Wie an dem korrespondierenden Verlauf der jeweiligen Phasenspannung U_a , U_b , U_c zu erkennen ist, nimmt die hierzu proportionale Pulsweite der Steuerpulse P im Verlauf der ersten Hälfte des Teilzyklus **60** zu, durchläuft zwei Maxima und nimmt in der zweiten Hälfte des Teilzyklus **60** wieder ab. An den Teilzyklus **60** schließt ein zweiter Teilzyklus **61** an, der einem Phasenwinkelbereich von 120° entspricht und die Periode somit vervollständigt, d.h. sich mit dem Teilzyklus **60** zu einem Vollzyklus, entsprechend einem Phasenwinkelbereich von 360° , ergänzt. Während des Teilzyklus **61** ist die jeweilige Motorphase **15a**, **15b**, **15c** permanent auf das Massenpotential φ_M ge-

klemmt. Die Phasenspannung U_a , U_b , U_c entspricht während dieses Teilzyklus **61** dem zugehörigen Klemmenpotential φ_a , φ_b , φ_c .

[0054] Nachfolgend wird in exemplarisch auf die Motorphase **15a** beschränkter Betrachtung das Verhalten des Klemmenpotentials φ_a bei einem Nulldurchgang des zugehörigen Motorphasenstroms I_a näher erläutert. Als positiver Nulldurchgang wird hierbei ein Nulldurchgang bezeichnet, bei welchem die Flussrichtung von negativ zu positiv wechselt. Ein solcher positiver Nulldurchgang ereignet sich gemäß [Fig. 7](#) innerhalb des markierten Zeitausschnitts V_a . Als negativer Nulldurchgang wird ein Nulldurchgang des Motorphasenstroms I_a bezeichnet, bei welchem die Flussrichtung von positiv auf negativ wechselt. Ein solcher negativer Nulldurchgang ereignet sich innerhalb des markierten Zeitausschnitts V_b .

[0055] Diese Zeitausschnitte V_a und V_b sind in [Fig. 8](#) in verfeinerter Zeitauflösung nochmals dargestellt. [Fig. 8](#) ist insbesondere entnehmbar, dass ein Sockelwert L , den das Klemmenpotential φ_a jeweils während einer jeden Einzeit T einnimmt, von der Flussrichtung bzw. dem Vorzeichen des zugehörigen Motorphasenstroms I_a bestimmt ist. Für den gemäß [Fig. 8](#) zu einem Zeitpunkt t_1 stattfindenden positiven Nulldurchgang ist der Sockelwert L des Klemmenpotentials φ_a vor dem Nulldurchgang geringfügig positiv, danach geringfügig negativ. Bei dem gemäß [Fig. 8](#) zu einem Zeitpunkt t_2 stattfindenden negativen Nulldurchgang verhält sich das Klemmenpotential φ_a entgegengesetzt, weist also vor dem Nulldurchgang einen geringfügig negativen Wert und nach dem Nulldurchgang einen geringfügig positiven Wert auf.

[0056] Der Sockelwert L des Klemmenpotentials φ_a ist hierbei durch den Bestromungszustand Z der Freilaufdiode **13a** bestimmt. Infolge der Kontinuität, d.h. der induktiv bedingten „Trägheit“ des Motorphasenstroms I_a fließt der Motorphasenstrom I_a bei negativer Flussrichtung während der Einzeit über den Leistungsschalter **11a** ab. Der Motorphasenstrom I_a ist dabei in Sperrrichtung der Freilaufdiode **13a** gerichtet, die somit unbestromt ist. Das Klemmenpotential φ_a hat infolgedessen gegenüber dem Massenpotential φ_M einen der Sättigungsspannung des Leistungsschalters **11a** entsprechenden positiven Wert. Bei positiver Flussrichtung ist der Stromfluss dagegen in Durchlassrichtung der Freilaufdiode **13a** gerichtet, die somit bestromt ist. Der Sockelwert L des Klemmenpotentials φ_a ist infolgedessen um einen der Flussspannung der Freilaufdiode **13a** entsprechenden Betrag gegenüber dem Massenpotential φ_M erniedrigt und somit insbesondere negativ.

[0057] Der Bestromungszustand Z der Freilaufdiode **13a** bzw. die durch ihn bedingte Abhängigkeit des Sockelwertes L des Klemmenpotentials φ_a wird verfahrensgemäß ausgenutzt, um die Flussrichtung,

und insbesondere Nulldurchgänge des Motorphasenstroms I_a zu bestimmen.

[0058] Wie wiederum aus [Fig. 8](#) zu erkennen ist, findet ein positiver Nulldurchgang des Motorphasenstroms I_a stets während eines Steuerpulses P statt. Der Nulldurchgang wird hierbei anhand der Änderung des Sockelwertes L zwischen einer dem Nulldurchgang unmittelbar vorausgehenden Einzeit T_1 und einer hierauf folgenden Einzeit T_2 festgestellt. Die Erkennung des Nulldurchgangs erfolgt damit insbesondere zu einem den Beginn der Einzeit T_2 kennzeichnenden Zeitpunkt t_3 und somit mit geringer Zeitverschiebung gegenüber dem exakten Zeitpunkt t_1 des Nulldurchgangs.

[0059] Ein negativer Nulldurchgang erfolgt dagegen während des Teilzyklus **61**, der aufgrund des damit verbundenen Schaltzustands über seine gesamte Länge eine Einzeit T_3 im Sinne der obigen Definition darstellt. Der Nulldurchgang wird daher mit der durch die Abtastrate des Bestromungszustandes Z vorgegebenen Genauigkeit unmittelbar zum Zeitpunkt t_2 erkannt.

[0060] Ein weiteres Beispiel einer pulsweitenmodulierten Motoransteuerung, auf die das erfindungsgemäße Verfahren anwendbar ist, ist in [Fig. 9](#) (in zu [Fig. 7](#) analoger Darstellung) abgebildet. Hierbei handelt es sich um eine so genannte „zentrische Modulation“, bei welcher jede Motorphase **15a**, **15b**, **15c** über den Vollzyklus des Phasenwinkels getaktet angesteuert wird. Wie anhand der jeweilige Phasenspannung U_a , U_b , U_c erkennbar ist, variiert die Pulsweite der Steuerpulse P in jeder Motorphase **15a**, **15b**, **15c** beispielhaft gemäß einer sinusförmigen zeitlichen Abhängigkeit mit der Periode der Motorphasenströme I_a , I_b , I_c . Zusätzlich zu den Motorphasenströmen I_a , I_b , I_c , den Phasenspannungen U_a , U_b , U_c und den Klemmenpotentialen φ_a , φ_b , φ_c ist in [Fig. 9](#) der zeitliche Verlauf einer Back-EMF-Spannung V_a , V_b , V_c eingetragen, die durch die gegenelektromotorische Kraft (Back-EMF) des Rotors **19** in jede Motorphase **15a**, **15b**, **15c** induziert wird. Die in die Motorphasen **15a**, **15b**, **15c** induzierten Back-EMF-Spannungen V_a , V_b , V_c sind auf den ggf. virtuellen Sternpunkt **18** als gemeinsames Bezugspotential bezogen. In der Darstellung gemäß [Fig. 9](#) eilt die Back-EMF-Spannung V_a , V_b , V_c gegenüber dem jeweils zugehörigen Motorphasenstrom I_a , I_b , I_c geringfügig nach.

[0061] Eine Verfahrensvariante, gemäß der (wiederum exemplarisch anhand der Motorphase **15a** betrachtet) durch Erfassung des Bestromungszustandes Z der Freilaufdiode **13a** das Vorzeichen der Back-EMF-Spannung V_a , V_b , V_c , und insbesondere ihre qualitative (d.h. positive oder negative) Phasenverschiebung gegenüber dem zugehörigen Motorphasenstrom I_a , I_b , I_c bestimmt wird, ist nachfolgend

anhand der [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#) näher erläutert. In der letzteren Figur sind analog zu [Fig. 8](#) Zeitausschnitte VIIa und VIIb des Diagramms gemäß [Fig. 9](#), die einem positiven bzw. negativen Nulldurchgang des exemplarisch betrachteten Motorphasenstroms I_a entsprechen, in verfeinerter Zeitauflösung dargestellt.

[0062] Die Back-EMF-Spannung V_a , V_b , V_c einer Motorphase **15a**, **15b**, **15c** kann gemessen werden, sobald der durch die Induktivität der Erregerwicklungen **16a**, **16b**, **16c** getriebene Stromfluß abgeklungen ist, und der Reststrom in einer Motorphase **15a**, **15b**, **15c** im Fall kurzgeschlossener Phasenanschlussklemmen **9a**, **9b**, **9c** durch die Back-EMF-Spannung V_a , V_b , V_c der betrachteten Motorphase **15a**, **15b**, **15c** getrieben wird.

[0063] Die Bestimmung des Vorzeichens der Back-EMF-Spannung V_a erfolgt, indem während einer Messzeit T_M ein so genannter Nullvektorzustand N an die Motorphasen **15a**, **15b**, **15c** angelegt wird. Hierzu wird durch Aufsteuerung der Leistungsschalter **11a**, **11b**, **11c** nicht nur die betrachtete Motorphase **15a**, sondern auch die weiteren Motorphasen **15b** und **15c** auf das Massenpotential φ_M geklemmt. Während des Nullvektorzustands N ist die Freilaufdiode **13a** dann bestromt, wenn die Back-EMF-Spannung V_a negativ ist, und infolgedessen das Klemmenpotential φ_a das Massenpotential φ_M unterschreitet. Ist die Back-EMF-Spannung V_a dagegen positiv, so ist die Freilaufdiode **13a** stromlos.

[0064] Dementsprechend wird während der gemäß [Fig. 10](#) innerhalb des Zeitausschnitts VIIa geschalteten Messzeit T_m aufgrund der negativen Back-EMF-Spannung V_a ein negativer Sockelwert L gemessen bzw. der strombehaftete Bestromungszustand Z der Freilaufdiode **13a** als Indiz für das negative Vorzeichen der Back-EMF-Spannung V_a erfasst.

[0065] Im Gegensatz dazu wird während der innerhalb des Zeitausschnitts VIIb geschalteten Messzeit T_M ein positiver Sockelwert L des Klemmenpotentials φ_a bzw. der stromlose Bestromungszustand Z der Freilaufdiode **13a** als Kennzeichen des positiven Vorzeichens der Back-EMF-Spannung V_a erfasst.

[0066] Die Erfassung der Back-EMF-Spannung V_a wird jeweils bei Erkennung eines Nulldurchgangs des zugehörigen Motorphasenstroms I_a , und damit zu einem Zeitpunkt, zu dem der Stromfluss in der betrachteten Motorphase **15a** von Haus aus besonders gering ist, vorgenommen. Zur Eliminierung des Reststroms wird der Anlegung des Nullvektorzustandes N ein Abkommutierungszustand A in der Motorphase **15a** vorgeschaltet. Im Zuge des Abkommutierungszustandes A wird die Phasenhalbrücke **6a** durch Abschattung beider Leistungsschalter **10a** und **11a** hochohmig geschaltet. Die Klemmenpotentiale φ_b und φ_c der weiteren Motorphasen **15b** und **15c** wer-

den gleichzeitig auf einen Wert gesetzt, der dem Stromfluss in der betrachteten Motorphase **15a** entgegenwirkt.

[0067] Unmittelbar nach Erkennung des innerhalb des Zeitausschnitts VIIa stattfindenden positiven Nulldurchgangs des Motorphasenstroms I_a werden entsprechend die weiteren Motorphasen **15b**, **15c** auf das Betriebspotential φ_B geklemmt. Die erfolgreiche Abkommutierung des Motorphasenstroms I_a ist in diesem Fall daran zu erkennen, dass die Freilaufdiode **13a** stromlos wird und entsprechend das Klemmenpotential φ_a von einem negativen Wert auf einen annähernd dem Betriebspotential φ_B entsprechenden Wert anwächst.

[0068] Unmittelbar nach Erkennung des während des Zeitausschnitts VIIb stattfindenden negativen Nulldurchgangs des Motorphasenstroms I_a werden die weiteren Motorphasen **15b** und **15c** dagegen im Zuge des Abkommutierungszustandes A auf das Massepotential φ_M geklemmt. Der Abkommutierungsvorgang äußert sich in diesem Fall derart, dass unmittelbar mit der Sperrung der beiden Leistungsschalter **10a** und **11a** der Phasenhalbrücke **6a** das Klemmenpotential φ_a sprunghaft auf einen dem Betriebspotential φ_B im Wesentlichen entsprechenden Wert ansteigt und mit dem Versiegen des Motorphasenstroms I_a auf einen geringen Wert zurückfällt. In diesem Fall kann die Erfassung des Bestromungszustandes Z zur Bestimmung der Back-EMF-Spannung V_a bereits während des Abkommutierungszustandes A beginnen, sobald der Motorphasenstrom I_a abgefallen ist.

[0069] Das erfindungsgemäße Verfahren ist entsprechend auf weitere gängige Arten einer pulsweitenmodulierten Motoransteuerung, insbesondere auf eine sogenannte Blockkommutierung anwendbar. Optional werden weiterhin, z.B. nach einem an sich aus der US 6,249,094 bekannten Verfahren, die Back-EMF-Spannungen V_a , V_b , V_c auch quantitativ bestimmt.

[0070] Im Betrieb des Motors **2** erfasst die Auswerteeinheit **23** während jeder Einzeit T einer jeden Phasenhalbrücke **6a**, **6b**, **6c** den von der entsprechenden Sensorschaltung **24a**, **24b**, **24c** bestimmten Bestromungszustand Z der entsprechenden Freilaufdiode **13a**, **13b**, **13c**. Die Erfassung des Bestromungszustands Z erfolgt mindestens einmal pro Einzeit T. Die Auswerteeinheit **23** wird hierbei über das Steuersignal S_C von dem Schaltmodul **21** entsprechend „getriggert“. Erkennt das Auswertemodul **23** nach der im Zusammenhang mit den [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) beschriebenen Vorgehensweise einen Nulldurchgang eines Phasenstroms I_a , I_b , I_c , so ermittelt sie nach der im Zusammenhang mit den [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#) beschriebenen Vorgehensweise das Vorzeichen der Back-EMF-Spannung V_a , V_b , V_c . Hierzu veranlasst

das Auswertemodul **23** das Schaltmodul **21** durch Abgabe von entsprechenden Steuersignalen S_C zur Erzeugung des Abkommutierungszustandes A bzw. zur Erzeugung des Nullvektorzustandes N.

[0071] Anhand der Flussrichtung bzw. des Vorzeichens der Motorphasenströme I_a , I_b , I_c und/oder Back-EMF-Spannungen V_a , V_b , V_c sowie gegebenenfalls anhand von hieraus abgeleiteten Nulldurchgängen dieser Größen ermittelt das Auswertemodul **23** die Regelgröße R und übermittelt diese an das Schaltmodul **21**.

[0072] Bei der Regelgröße R handelt es sich insbesondere um die einen Nulldurchgang der Phasenströme I_a , I_b , I_c und/oder der Back-EMF-Spannungen V_a , V_b , V_c zugeordneten Zeitpunkte, die dem Schaltmodul **21** in Form eines Trigger-Signals zugeführt werden. Alternativ handelt es sich bei der Regelgröße R um eine hieraus abgeleitete Größe, insbesondere die Drehzahl, oder ein qualitatives oder quantitatives Maß für die Phasenverschiebung zwischen einem Motorphasenstrom I_a , I_b , I_c und der zugeordneten Back-EMF-Spannung V_a , V_b , V_c . Die Drehzahl wird hierbei durch Ermittlung des Zeitintervalls zwischen aufeinander folgenden Nulldurchgängen bestimmt. Als qualitatives Maß für die genannte Phasenverschiebung wird das Vorzeichen der Back-EMF-Spannung V_a , V_b , V_c zum Zeitpunkt eines Nulldurchgangs des zugehörigen Motorphasenstroms I_a , I_b , I_c übermittelt.

[0073] Das Schaltmodul **21** steuert die Brückenschaltung **3** insbesondere derart an, dass die als Regelgröße R zugeführte Ist-Drehzahl an eine vorgegebene Soll-Drehzahl angeglichen wird. Optional wird die Ansteuerung zusätzlich oder alternativ derart vorgenommen, dass die als weitere Regelgröße R erhobene Ist-Phasenverschiebung zwischen den Motorströmen I_a , I_b , I_c und den zugehörigen Back-EMF-Spannungen V_a , V_b , V_c betragsmäßig minimiert wird.

[0074] Konkrete Ausführungsbeispiele derartiger Regelungsalgorithmen sind an sich bekannt und beispielsweise in den Dokumenten US 6,249,094 B1, US 6,208,112 B1 und US 6,121,736 A beschrieben.

[0075] Eine spezielle Anwendungsmöglichkeit des beschriebenen Verfahrens besteht in der sicheren Erkennung der Drehzahl eines Permanentmagnet-Synchronmotors oder eines Asynchronmotors im Auslauf oder einer sonstigen ansteuerungsfreien Freilaufphase. Während eines solchen Freilaufs werden einer oder mehrere der Leistungsschalter **11a**, **11b**, **11c** permanent aufgesteuert. Dabei werden unter Wirkung der Back-EMF Kreisströme durch die kurzgeschlossenen Motorphasen **15a**, **15b**, **15c** erzeugt, durch welche ein Bremsmoment auf den Rotor **19** ausgeübt wird. Auch bei einem Asynchronmotor

existiert aufgrund des Remanenzmagnetismus im Rotoreisen eine, wenn auch im Vergleich zu einem Permanentmagnet-Synchronmotor wesentlich schwächere Back-EMF. Zumal der Bestromungszustand Z ein sehr empfindliches Maß für die an den Freilaufdioden **13a**, **13b**, **13c** anliegenden Spannungsverhältnisse darstellt, kann auch die sehr schwache Back-EMF eines Asynchronmotors sicher gemessen werden. Falls erforderlich wird hierbei der Remanenzmagnetismus des Rotoreisens durch einen der Freilaufphase vorausgehenden Statorpuls aufgefrischt, um die Amplitude der Back-EMF-Spannungen V_a , V_b , V_c zu verstärken. Auf diese Weise kann insbesondere im Auslauf die Drehzahl des Motors **2** bis nahezu zum Stillstand verfolgt werden. Diese Funktionalität ist nützlich, um den sicheren Stillstand des Motors **2** zu erkennen.

Bezugszeichenliste

1	Vorrichtung
2	Motor
3	Brückenschaltung
4	Gleichspannungsquelle
5	Spannungszwischenkreis
6a-6c	Phasenhalfbrücke
7	Pluspol
8	Minuspol
9a-9c	Phasenanschlussklemme
10a-10c	(hochpotentialseitiger) Leistungsschalter
11, 11a-11c	(niederpotentialseitiger) Leistungsschalter
12a-12c	(hochpotentialseitige) Freilaufdiode
13, 13a-13c	(niederpotentialseitige) Freilaufdiode
15a-15c	Motorphase
16a-16c	Erregerwicklung
17	Stator
18	Sternpunkt
19	Rotor
20	Steuereinheit
21	Schaltmodul
22	Steuerleitung
23	Auswertemodul
24, 24a-24c	Sensorschaltung
25	Erfassungsleitung
30	Komparator
31	Eingang
32	Eingang
33	Ausgang
34	Treiberbaustein
35	„COM“-Eingang
36	„Vs“-Eingang
37	„Sign“-Eingang
38	„LO“-Eingang
39	„HO“-Eingang
40	Bipolartransistor
41	Basis-Emitter-Strecke
42	Mittelabgriff
43	Spannungsteilerschaltung

44	Widerstand
45	Widerstand
46	Kollektoreingang
47	Bauteil
48	Anschluss
49	Anschluss
50	Anschluss
51	Sensorausgang
55	Flussrichtung
60	Teilzyklus
61	Teilzyklus
\square_{-}, \square_{-}	Diodenpotential
$\square_{a'}, \square_{b'}, \square_{c}$	Klemmenpotential
\square_B	Betriebspotential
\square_M	Massenpotential
A	Abkommutierungszustand
I_a, I_b, I_c	Motorphasenstrom
L	Sockelwert
N	Nullvektorzustand
P	Steuerpuls
R	Regelgröße
S_c	Steuersignal
S_z	Ausgabesignal
t	Zeit
t_1, t_2, t_3	Zeitpunkt
T_1, T_2, T_3	Einzeit
T_M	Messzeit
U_a, U_b, U_c	Phasenspannung
U_R	Referenzspannung
V_a, V_b, V_c	Back-EMF-Spannung
VCC	Versorgungspotential
Z	Bestromungszustand

Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung eines mittels einer wechselrichterseitigen Brückenschaltung (**3**) kommutierten, mehrere Motorphasen (**15a**, **15b**, **15c**) aufweisenden Motors (**2**), **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Bestimmung einer regelungsrelevanten Größe einer betrachteten Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) der Bestromungszustand (Z) einer Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**), die in einer der betrachteten Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) zugeordneten Phasenhalfbrücke (**6a**, **6b**, **6c**) der Brückenschaltung (**3**) angeordnet ist, während einer Einzeit (T , T_1 , T_2 , T_3) erfasst wird, in welcher ein der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) parallelgeschalteter Leistungsschalter (**11**, **11a**, **11b**, **11c**) der Phasenhalfbrücke (**6a**) einen leitenden Zustand, und ein der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) seriell geschalteter Leistungsschalter (**10a**, **10b**, **10c**) einen sperrenden Zustand aufweist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Bestromungszustand (Z) der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) anhand einer über der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) abfallenden Referenzspannung (U_R) bestimmt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch**

gekennzeichnet, dass die Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**), deren Bestromungszustand (Z) bestimmt wird, innerhalb der betrachteten Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) zugeordneten Phasenhalbrücke (**6a**, **6b**, **6c**) bezüglich einer Phasenanschlussklemme (**9a**, **9b**, **9c**) niederpotentialseitig angeordnet ist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass als regelungsrelevante Größe anhand des Bestromungszustandes (Z) die Flussrichtung eines in der betrachteten Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) fließenden Motorphasenstroms (I_a , I_b , I_c) bestimmt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass zur Ermittlung von Nulldurchgängen des Motorphasenstroms (I_a , I_b , I_c) der Bestromungszustand (Z) der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) fortlaufend überwacht wird, wobei ein Nulldurchgang an einer Änderung des Bestromungszustandes (Z) erkannt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass als regelungsrelevante Größe anhand des Bestromungszustandes (Z) das Vorzeichen einer von dem Motor (**2**) in die betrachtete Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) induzierten Back-EMF-Spannung (V_a , V_b , V_c) bestimmt wird, indem ein Nullvektorzustand (N) bezüglich eines an die betrachtete Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) angelegten Klemmenpotentials (φ_a , φ_b , φ_c) und weiterer jeweils an eine der weiteren Motorphasen (**15a**, **15b**, **15c**) angelegten Klemmenpotentiale (φ_a , φ_b , φ_c) hergestellt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung des Vorzeichens der Back-EMF-Spannung (V_a , V_b , V_c) bei Erkennung eines Nulldurchgangs des Motorphasenstroms (I_a , I_b , I_c) in der betrachteten Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) vorgenommen wird.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass vor Herstellung des Nullvektorzustandes (N) zur Abkommutierung des Motorstroms (I_a , I_b , I_c) in der betrachteten Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) ein Abkommutierungszustand (A) herbeigeführt wird, bei welchem die der betrachteten Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) zugeordnete Phasenhalbrücke (**6a**, **6b**, **6c**) hochohmig geschaltet wird und an die weiteren Motorphasen (**15a**, **15b**, **15c**) ein dem Motorphasenstrom (I_a , I_b , I_c) in der betrachteten Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) entgegenwirkendes Klemmenpotential (φ_a , φ_b , φ_c) angelegt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass anhand eines Flussrichtungswechsels des Motorphasenstroms (I_a , I_b , I_c) und des Vorzeichens der Back-EMF-Spannung (V_a , V_b , V_c) zu diesem Zeitpunkt (t_1 , t_2) eine Phasenver-

schiebung zwischen dem Motorphasenstrom (I_a , I_b , I_c) und der Back-EMF-Spannung (V_a , V_b , V_c) als Regelgröße (R) ermittelt wird.

10. Vorrichtung (**1**) zur Ansteuerung eines mehrphasigen, elektronisch kommutierten Motors (**2**), mit einer wechselrichterseitigen Brückenschaltung (**3**), innerhalb welcher jeder Motorphase (**15a**, **15b**, **15c**) eine Phasenhalbrücke (**6a**, **6b**, **6c**) zugeordnet ist, die einen bezüglich einer Phasenanschlussklemme (**9a**, **9b**, **9c**) hochpotentialseitig angeordneten Leistungsschalter (**10a**, **10b**, **10c**) und einen bezüglich der Phasenanschlussklemme (**9a**, **9b**, **9c**) niederpotentialseitig angeordneten Leistungsschalter (**11**, **11a**, **11b**, **11c**), sowie jeweils eine einem jeden Leistungsschalter (**10a**, **10b**, **10c**, **11**, **11a**, **11b**, **11c**) parallelgeschaltete Freilaufdiode (**12a**, **12b**, **12c**, **13**, **13a**, **13b**, **13c**) umfasst, sowie mit einer Steuereinheit (**20**) zur Ansteuerung der Leistungsschalter (**10a**, **10b**, **10c**, **11**, **11a**, **11b**, **11c**) der Brückenschaltung (**3**), dadurch gekennzeichnet, dass einer Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) mindestens einer Phasenhalbrücke (**6a**, **6b**, **6c**) eine Sensorschaltung (**24**, **24a**, **24b**, **24c**) zugeordnet ist, die dazu ausgebildet ist, während einer Einzeit (T , T_1 , T_2 , T_3), in welcher ein der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) parallelgeschalteter Leistungsschalter (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) einen leitenden Zustand, und ein der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) seriell geschalteter Leistungsschalter (**12a**, **12b**, **12c**) einen sperrenden Zustand aufweist, einen Bestromungszustand (Z) der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) zur Erfassung einer regelungsrelevanten Größe der betrachteten Motorphase (**15a**) zu ermitteln.

11. Vorrichtung (**1**) nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die oder jede Sensorschaltung (**24**, **24a**, **24b**, **24c**) einer bezüglich der zugehörigen Phasenanschlussklemme (**9a**, **9b**, **9c**) niederpotentialseitig angeordneten Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) zugeordnet ist.

12. Vorrichtung (**1**) nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Sensorschaltung (**24**, **24a**, **24b**, **24c**) einen Komparator (**30**) umfasst, dem ein anodenseitiges Diodenpotential (φ_-) und ein kathodenseitiges Diodenpotential (φ_+) der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) als Eingangspotential zugeführt ist.

13. Vorrichtung (**1**) nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Sensorschaltung (**24**, **24a**, **24b**, **24c**) einen Bipolartransistor (**40**) umfasst, der über seine Basis-Emitter-Strecke (**41**) der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) in Serie geschaltet ist.

14. Vorrichtung (**1**) nach einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Sensorschaltung (**24**, **24a**, **24b**, **24c**) zusammen mit der zugeordneten Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) und

dem dem dieser parallelgeschalteten Leistungsschalter (**11**, **11a**, **11b**, **11c**) in einem gemeinsamen Bauteil (**47**) integriert sind.

15. Vorrichtung (**1**) nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass ein der Sensorschaltung (**24**, **24a**, **24b**, **24c**) zugeordneter und ein den Bestromungszustand (Z) der Freilaufdiode (**13**, **13a**, **13b**, **13c**) kennzeichnendes Ausgabesignal (S_2) zur Verfügung stellender Sensorausgang (**51**) des Bauteils (**47**) als Open-Kollektor-Ausgang ausgeführt ist.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

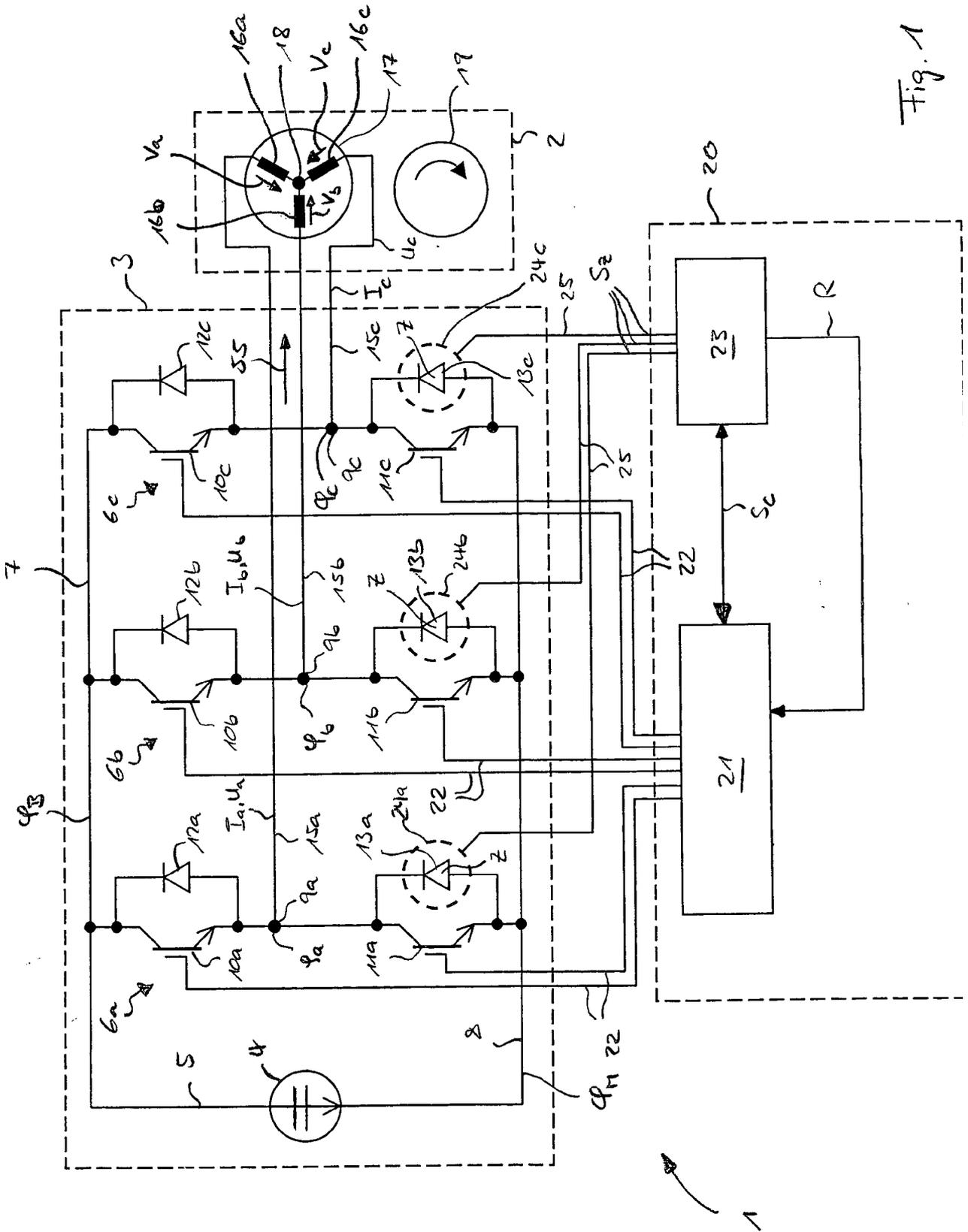


Fig. 1

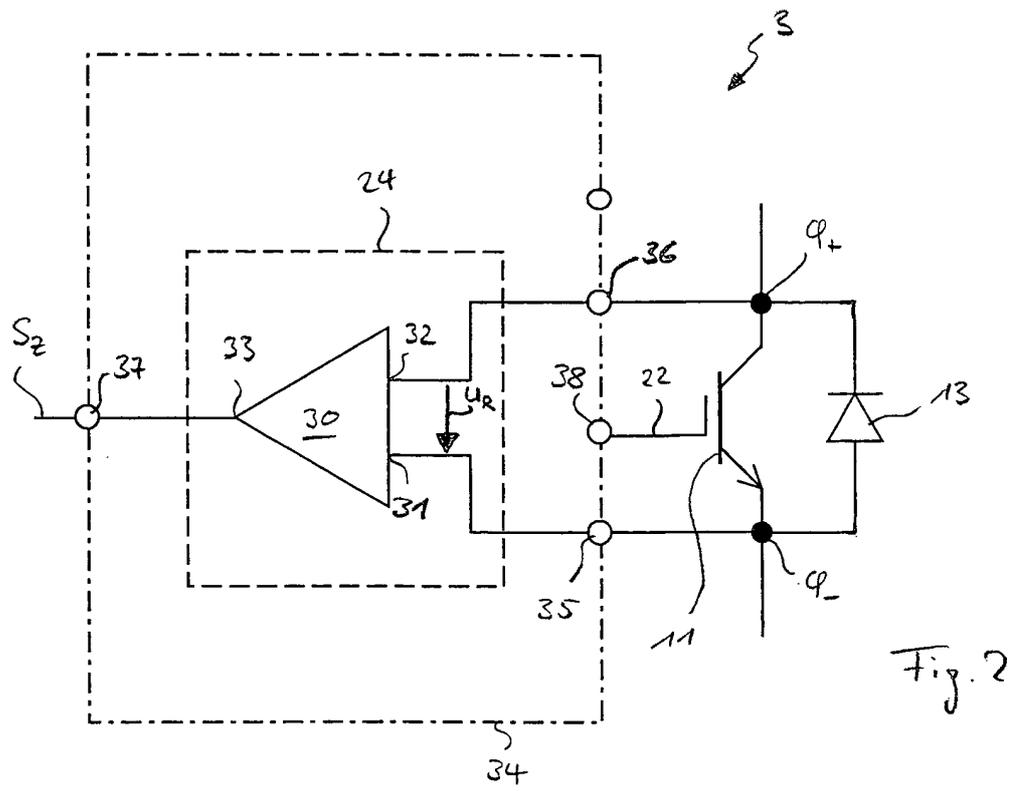


Fig. 2

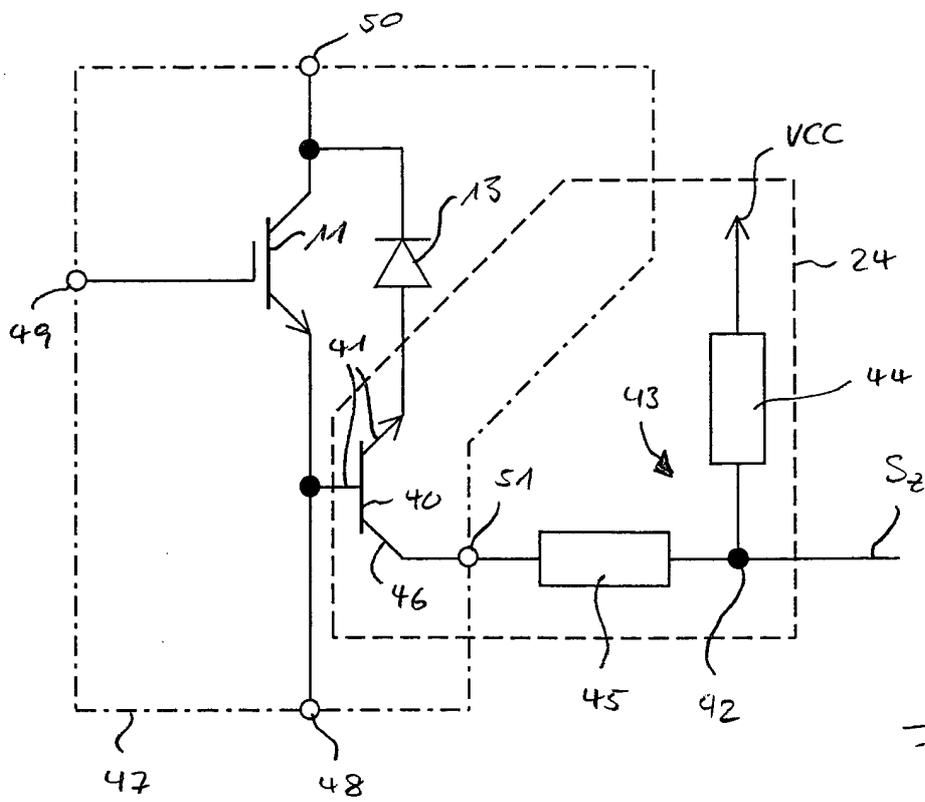


Fig. 3

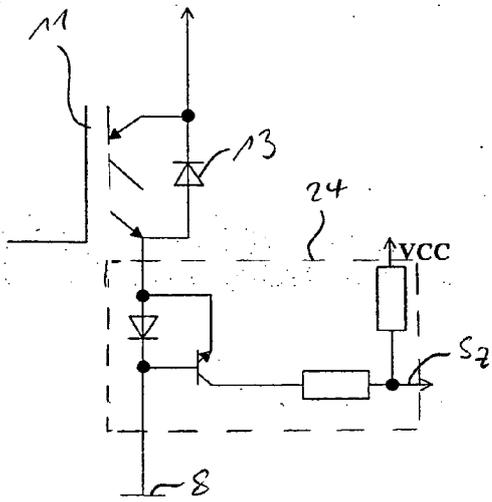


Fig. 4

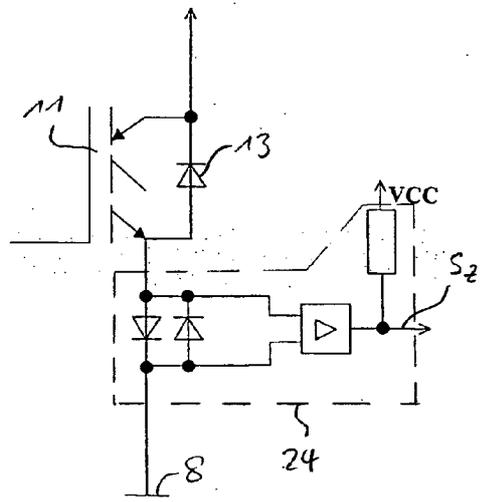


Fig. 5

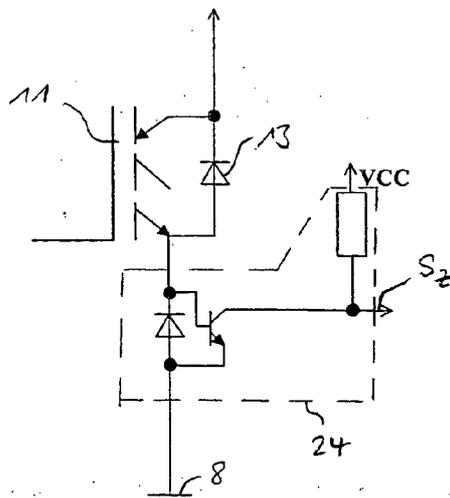


Fig. 6

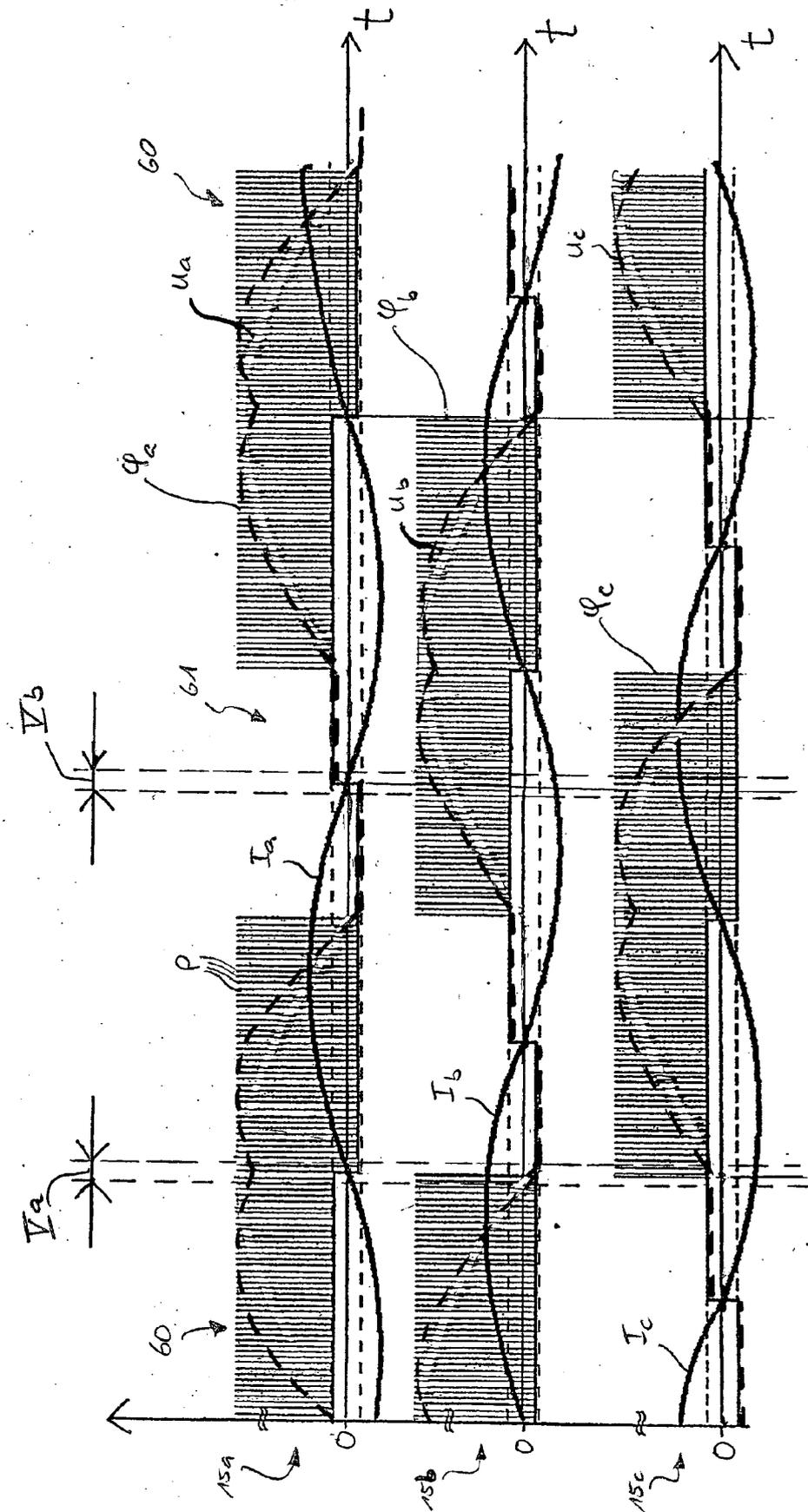


Fig. 7

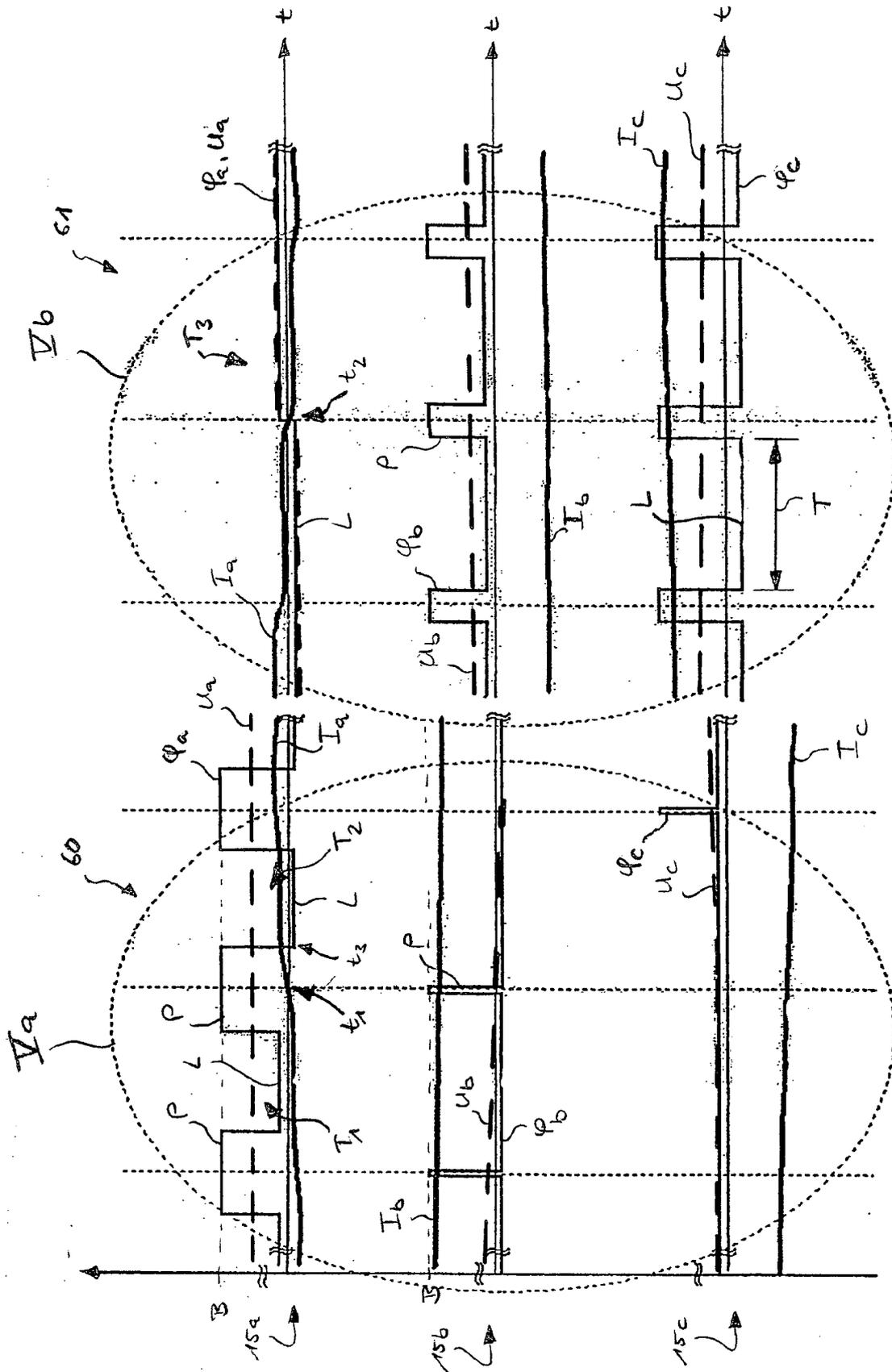


Fig. 8

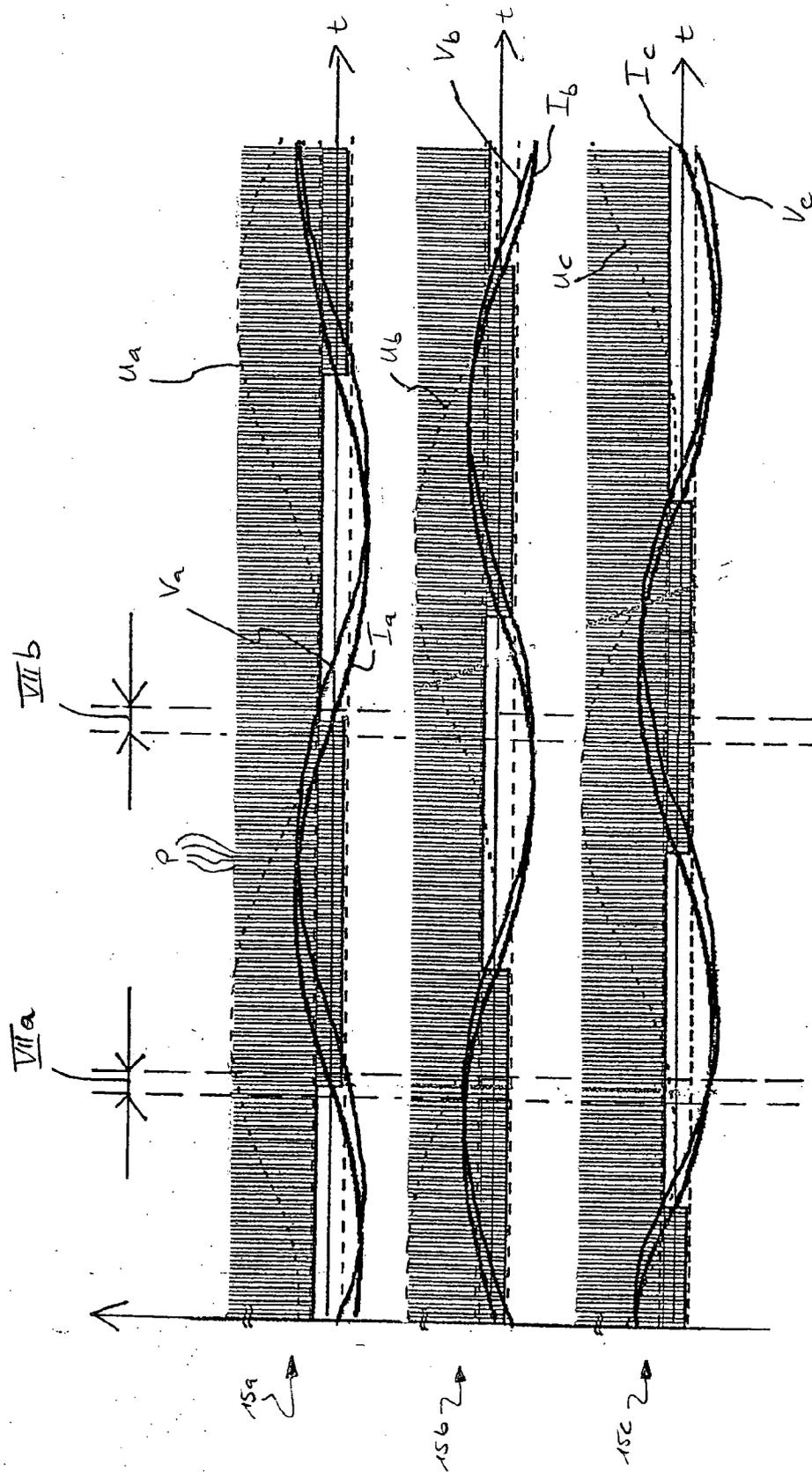


Fig. 9

