

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50929/2017
(22) Anmeldetag: 03.11.2017
(43) Veröffentlicht am: 15.05.2019

(51) Int. Cl.: **H02P 6/18** (2016.01)
H02P 27/08 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 102016205462 A1
US 2016248354 A1
DE 102017106054 A1

(71) Patentanmelder:
Schrödl Manfred Dr.
7223 Sieggraben (AT)

(72) Erfinder:
Schrödl Manfred Dr.
7223 Sieggraben (AT)

(74) Vertreter:
Graschitz Roland Dr.
7000 Eisenstadt (AT)

(54) **Verfahren zur Ermittlung der Rotorposition von synchron laufenden elektrischen Maschinen ohne mechanischen Geber**

(57) Die Erfindung beschreibt ein Verfahren zur drehgeberlosen Ermittlung der Rotorposition einer synchron laufenden Drehstrommaschine (4), die über einen Umrichter (3) gespeist ist, wobei für die Stromregelung in unterschiedliche Raumzeigerrichtungen wirkende aktive Umrichterzustände ohne Kurzschlusszustände verwendet werden und Stromanstiege (10) der Phasenströme während dieser aktiven Umrichterzustände erfasst werden. Die erfassten Stromanstiege (10) werden in einer Rechneinheit (7) in ein messrichtungsfestes Koordinatensystem und weiter in symmetrische Komponenten transformiert und zumindest eine der aus diesen Stromanstiegen (10) berechneten symmetrischen Komponenten, welche mit doppelter elektrischer Drehzahl, einfacher elektrischer Drehzahl und mit Drehzahl Null umlaufen, ausgewertet wird, wobei zumindest die bis Drehzahl Null funktionierende und mit doppelter elektrischer Drehzahl umlaufende symmetrische Komponente ausgewertet und daraus die elektrische Rotorposition der Maschine (4) bestimmt wird. Weiters umfasst die Erfindung eine Schaltungsanordnung für das Verfahren.

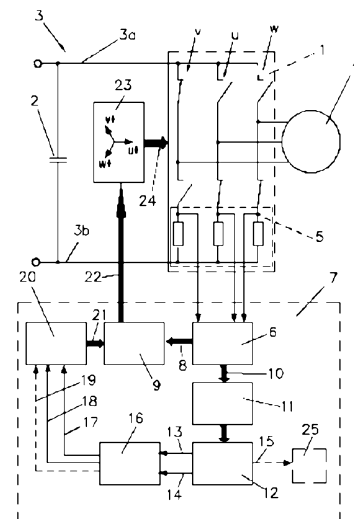


Fig.1

Zusammenfassung

Die Erfindung beschreibt ein Verfahren zur drehgeberlosen Ermittlung der Rotorposition einer synchron laufenden Drehstrommaschine (4), die über einen Umrichter (3) gespeist ist, wobei für die Stromregelung in unterschiedliche Raumzeigerrichtungen wirkende aktive Umrichterzustände ohne Kurzschlusszustände verwendet werden und Stromanstiege (10) der Phasenströme während dieser aktiven Umrichterzustände erfasst werden. Die erfassten Stromanstiege (10) werden in einer Rechneinheit (7) in ein messrichtungsfestes Koordinatensystem und weiter in symmetrische Komponenten transformiert und zumindest eine der aus diesen Stromanstiegen (10) berechneten symmetrischen Komponenten, welche mit doppelter elektrischer Drehzahl, einfacher elektrischer Drehzahl und mit Drehzahl Null umlaufen, ausgewertet wird, wobei zumindest die bis Drehzahl Null funktionierende und mit doppelter elektrischer Drehzahl umlaufende symmetrische Komponente ausgewertet und daraus die elektrische Rotorposition der Maschine (4) bestimmt wird. Weiters umfasst die Erfindung eine Schaltungsanordnung für das Verfahren.

Fig. 1

„Verfahren zur Ermittlung der Rotorposition von synchron laufenden elektrischen Maschinen ohne mechanischen Geber“

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur drehgeberlosen Ermittlung der Rotorposition einer synchron laufenden Drehstrommaschine und eine Schaltungsanordnung hierfür, wie sie in den Ansprüchen 1 und 9 beschrieben sind

Synchron laufende elektrische Maschinen, wie Permanentmagnet-Synchronmaschinen, Synchron-Reluktanzmaschinen, elektrisch erregte Synchronmaschinen etc. benötigen zur hochwertigen feldorientierten Regelung üblicherweise die Information über die Rotorposition, um einen winkel- und betragsmäßig geeigneten Stromraumzeiger in die von der feldorientierten Regelung vorgebbare Richtung mittels Umrichter über stromeinprägende Methoden gemäß dem Stand der Technik einzuprägen, wobei die der feldorientierten Regelung unterlagerte Stromregelung einen Spannungsraumzeiger berechnet, der unter Verwendung einer Kombination von mittels Umrichter darstellbaren Spannungsraumzeigern näherungsweise eingestellt wird. Die darstellbaren Spannungsraumzeiger sind beispielsweise im Falle eines dreisträngigen Umrichters 6 (sechs) aktive Raumzeiger mit gleicher Länge (die proportional zu der Zwischenkreisspannung des Umrichters sind), und jeweils um 60 Grad (elektrisch) versetzt sind, sowie 2 (zwei) Nullraumzeiger, die die Länge Null aufweisen. Letztere treten auf, wenn alle drei Halbbrücken des dreisträngigen Umrichters auf gleichem Potenzial liegen, also entweder auf positivem oder auf negativem Zwischenkreispotenzial. Die Kombination solcher Spannungsraumzeiger, die sich üblicherweise nach Ablauf einer gewissen Zeit wiederholen,

wird in der Literatur PWM (Pulsweitenmodulation) genannt. Klassische PWM-Verfahren verwenden drei der zuvor genannten darstellbaren Spannungsraumzeiger, die in der Umgebung des von der Regelung gewünschten Spannungsraumzeigers liegen. Dies sind der rechte und linke benachbarte aktive Raumzeiger sowie ein Nullraumzeiger.

Weiters ist bekannt, dass die Stranginduktivitäten der genannten Maschinen in Abhängigkeit von der Rotorposition schwanken. Dies wurde bereits zur Rotorpositionserfassung ohne Drehgeber herangezogen. Beispielsweise ist aus dem Stand der Technik (z.B. [Schrödl, M.: „Sensorless Control of A.C. Machines“, VDI Fortschrittberichte, Reihe 21, Nr. 117, VDI-Verlag 1992], oder [Rajashekara, K. et al. „Sensorless Control of AC Motor Drives“, IEEE Press, Piscataway, USA, 1996, ISBN 0-7803-1046-2]) bekannt, dass die Stromanstiege im Pulsmuster in gewissem Ausmaß von den Stranginduktivitäten abhängen, die ihrerseits aufgrund von geometrischer Achsigkeit (Reluktanz, durch unterschiedliche magnetische Leitwerte in Abhängigkeit von der Rotorposition) und/oder durch Sättigungseffekte im magnetisch leitfähigen Material in Rotor und Stator von der Rotorposition abhängen.

Nachteilig an den Verfahren zur drehgeberlosen Ermittlung der Rotorposition speziell bei kleinen Drehzahlen war bisher, dass Messimpulse oder Messsequenzen eingepreßt werden, die akustische Abstrahlungen in Form von Pfeifen oder Rauschen hervorrufen und zusätzlich die Stromregelung stören.

Grundsätzlich sind Umrichter-Stromregelungen bekannt, bei denen ausschließlich in drei unterschiedliche Raumzeigerrichtungen wirkende aktive Umrichterzustände ohne Kurzschlusszustände zur näherungsweise Einstellung des von der Stromregelung vorgegebenen Spannungsraumzeigers verwendet werden. Nachteilig ist hierbei, dass diese Pulsmuster bisher nur zum Zwecke der Stromregelung verwendet werden konnten und somit für hochwertige Regelungen weiterhin Drehgeber zur Erfassung der Rotorposition nötig waren.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur drehgeberlosen Rotorpositionsermittlung bis einschließlich Stillstand und eine Schaltungsanordnung hierfür zu schaffen, das diese Nachteile vermeidet und gleichzeitig einen einfachen Aufbau aufweist.

DIE AUFGABE WIRD DURCH DIE ERFINDUNG GELÖST.

In der Erfindung wird erstmalig die z.B. für Netzspannungsanalysen verwendete Theorie der Symmetrischen Komponenten in einem völlig neuen Anwendungsfeld, nämlich zur Analyse und Auswertung von umrichterbedingten Stromanstiegsverläufen im Hinblick auf Rotorpositionsauswertung aus Induktivitätsschwankungen unter Berücksichtigung von induzierten Spannungen angewendet. Daraus ergeben sich überraschende Möglichkeiten und Vorteile, die bisher nicht bekannt waren. Die Anwendung erfordert die Einführung eines neuen, bisher nicht bekannten Koordinatensystems in der komplexen Raumzeigerebene, das mit dem neuen technischen Begriff „Messrichtungsfestes Koordinatensystem“ bezeichnet wird. (Bekannt bisher verwendete Koordinatensysteme sind z.B. das statorfeste, das rotorfeste oder das drehfeldfeste Koordinatensystem).

Das erfindungsgemäße Verfahren zur drehgeberlosen Ermittlung der Rotorposition einer synchron laufenden Drehstrommaschine ist dadurch gekennzeichnet, dass die erfassten Stromanstiege in einer Rechneinheit in ein messrichtungsfestes Koordinatensystem und weiter in symmetrischen Komponenten transformiert werden und zumindest eine der aus diesen Stromanstiegen berechneten symmetrischen Komponenten, welche mit doppelter elektrischer Drehzahl, einfacher elektrischer Drehzahl und mit Drehzahl Null umlaufen, zur Rotorpositionsbestimmung herangezogen wird, wobei zumindest die bis Drehzahl Null funktionierende und mit doppelter elektrischer Drehzahl umlaufende symmetrische Komponente ausgewertet und daraus die elektrische Rotorposition der Maschine bestimmt wird.

Vorteilhaft ist hierbei, dass durch die Verwendung von vorzugsweise drei aktiven Zeigen nämlich bis zur Drehzahl Null ausreichend lange Messzeiten zur Bestimmung von Stromanstiegen generiert werden, wobei diese Information erfindungsgemäß zur hochwertigen und störgeräuschlosen Bestimmung der Rotorposition genutzt wird, und damit ohne teure und ausfallsanfällige mechanische Drehgeber bzw. Sensoren das Auslangen gefunden wird, d.h., dass nur aufgrund von Messungen der Ströme zum Zwecke der Bestimmung von Stromanstiegen, wie es aus dem Stand der Technik beispielsweise über Messwiderstände bekannt ist, die umrichtergespeiste Maschine geregelt und gesteuert wird.

Somit wird auch ein einfacher mechanischer Aufbau der Maschine möglich, da keine Positionierung von Positionssensoren bzw. Drehgebern benötigt wird, die auch noch entsprechend kalibriert werden müssten.

Grundidee dabei ist, eine spezielle PWM zu verwenden, die nur aktive Spannungsraumzeiger verwendet und diese, über den Stand der Technik hinausgehend, zur Ermittlung der Rotorposition durch Auswertung der Stromanstiege innerhalb der PWM heranzuziehen, ohne dass zusätzliche Messimpulse oder Messsequenzen benötigt werden und die Stromregelung nicht gestört wird. Der Vorteil dabei ist, dass dadurch keine zusätzlichen akustischen Störungen verursacht werden.

Eine PWM, die keine Nullraumzeiger verwendet, ist in [Öst. Patent AT 503.602B1 „Verfahren und Schaltungsanordnung zur näherungsweisen Einstellung eines Spannungsraumzeigers“] (/1/) beschrieben. Dabei ist ein Verfahren zur näherungsweisen Einstellung des Spannungsraumzeigers angegeben, das ausschließlich aktive Raumzeiger verwendet. Es wird also kein Nullraumzeiger wie bei üblichen PWM-Mustern verwendet. Über diesen Stand der Technik hinausgehend, wird in dieser Erfindung gezeigt, wie eine solche Spannungssequenz unter ausschließlicher Verwendung von aktiven Spannungsraumzeigern ausgewertet werden kann, um neben der näherungsweisen Einstellung des von der Stromregelung gewünschten Spannungsraumzeigers unter Erfassung von Stromanstiegen, die während der aktiven Spannungsraumzeiger auftreten und messtechnisch zugänglich sind, zusätzlich Information über die aktuelle Rotorposition zu ermitteln.

Durch die Kombination von vorzugsweise drei aktiven Zeigern besteht der Vorteil, dass bei kleinen resultierenden Spannungsaussteuergraden, wie sie vor allem im Tiefdrehzahlbereich auftreten, die Zeitdauer der aktiven Zeiger so lange bleibt, dass Stromanstiegsauswertungen mit guter Genauigkeit möglich sind. Dies ist bei klassischen PWM-Verfahren bei kleinen Spannungsaussteuergraden nicht möglich. Speziell sind in der gegenständlichen Erfindung bei Aussteuergrad „Null“ (keine Spannung im Mittel über eine PWM-Periode) alle drei beteiligten aktiven Zeiger (z.B. $u+$, $v+$, $w+$ oder $u-$, $v-$, $w-$) gleich lang anliegend und sehr gut im Hinblick auf Stromanstiegsauswertung auswertbar. In /1/ ist angegeben, wie aus einem gewünschten Spannungsraumzeiger, der z.B. aus der Stromregelung als Regelgröße berechnet wird, die Einschaltzeiten der Zeiger $u+$, $v+$, $w+$ (bzw. alternativ $u-$, $v-$, $w-$) dieser speziellen PWM ermittelt werden können.

Die Erfassung der Stromanstiege kann in verschiedenen Topologien erfolgen. Beispielsweise werden in einer Ausgestaltung der Erfindung die Stromanstiege zumindest in zwei Phasen zwischen dem Ausgang der Halbbrücken und dem Motoranschluss erfasst. Diese Anordnung bietet den Vorteil, dass sehr viele Industrieumrichter eine derartige Stromerfassung aufweisen.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung werden die Stromanstiege in den Fußpunkten von mindestens zwei Halbbrücken des Umrichters erfasst. Dies ist von Vorteil, wenn die auswertende Recheneinheit potenzialmäßig am Zwischenkreis angebunden ist, weil dadurch eine potenzialbehaftete Strommessung mit preiswerter Messtechnik eingesetzt werden kann.

Ist eine besonders preiswerte Realisierung, wie etwa bei Anwendungen mit hohen Stückzahlen, nötig, können in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung die Stromanstiege im Zwischenkreis des Umrichters erfasst werden.

Eine hochwertige Auswertung ist in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung gezeigt. Dabei wird unter Verwendung der Theorie der Symmetrischen Komponenten zusätzlich zur mit doppelter elektrischer Drehzahl umlaufenden Komponente auch die mit einfacher elektrischer Drehzahl umlaufende Komponente ausgewertet. Der Vorteil bei dieser Ausgestaltung ist, dass die Rotorposition über zwei Kanäle berechnet wird, wobei der Informationskanal, der die mit einfacher Rotordrehzahl umlaufende Komponente auswertet, ein Signal liefert, das mit steigender Drehzahl verbesserte Information enthält. Wie erwähnt, liefert der Informationskanal, der die mit doppelter Rotordrehzahl umlaufende Komponente auswertet, eine über die Drehzahl weitgehend konstante Qualität.

In einer Weiterbildung der Erfindung wird eine Auswertung bei unvollständiger Erfassung der Stromanstiege, vorzugsweise ausschließlicher Erfassung der messrichtungsparallelen

Stromanstiegsraumzeigerkomponenten vorgenommen. Dies ist etwa der Fall, wenn die Strommessung im Zwischenkreis über ein einziges Messelement erfasst wird. Dabei wird die Wirkung der nicht erfassten nicht-messrichtungsparallelen Stromanstiegsraumzeigerkomponenten durch eine Ersatzfunktion, welche die mit einfacher Rotordrehzahl umlaufende strom- und drehzahlabhängige symmetrische Komponente nachbildet, näherungsweise berücksichtigt. Der Vorteil dabei ist, dass eine sehr kostengünstige Lösung mit guter Genauigkeit der Rotorpositionserfassung möglich ist.

Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung werden die nach den Regeln der symmetrischen Komponenten ermittelten Größen einer Recheneinheit zugeführt werden, die daraus zumindest eine der Zustandsgrößen „Rotorlage“, „Rotordrehzahl“, „Rotorbeschleunigung“ und/oder „Lastmoment“ errechnet. Damit wird es möglich, neben einer Verbesserung der Rotorlage durch das Zustandsmodell auch die Rotordrehzahl und optional das Lastmoment und/oder die Winkelbeschleunigung der Motorwelle mit guter Dynamik zu ermitteln.

Schließlich wird in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung die mittlere inverse differenzielle Induktivitätskennzahl zur Überwachung des Maschinenzustandes im Hinblick auf unzulässige Impedanzverhältnisse verwendet. Damit können beispielsweise Windungskurzschlüsse, Leitungsunterbrechungen etc. sehr rasch erkannt und geeignete Maßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden.

Weiters wird die Aufgabe der Erfindung durch eine Schaltungsanordnung gelöst, bei der die Stromerfassungseinheit mit einer Strom- und Stromanstiegsauswertung verbunden ist, die einerseits mit einer Transformationseinheit zur Transformation von Stromanstiegen ins messrichtungsfeste Koordinatensystem verbunden ist und andererseits mit einer Stromregelung zur Übergabe der ausgewerteten Ströme verbunden ist, und dass die Transformationseinheit mit einer Auswertungseinheit zur Auswertung symmetrischer Komponenten verbunden ist, die wiederum mit einem Zustandsmodell zur Übergabe des doppelten Drehwinkels und gegebenenfalls zusätzlich eines einfachen Drehwinkels

gekoppelt ist und das Zustandsmodell zur Weiterleitung eines Drehwinkel, einer Drehzahl und optional einer Größe mit einer feldorientierten Regelung verbunden ist, worauf die Regelung unter Weitergabe von Stromsollwerten mit der Stromregelung verbunden ist und die Stromregelung mit einer ausschließlich aktive Spannungsraumzeiger nützende PWM-Einheit, die zur Verarbeitung des vom Stromregler übergebenden Sollspannungsraumzeigers 22 ausgebildet ist, verbunden ist, und diese mit dem Wechselrichterteil zur Steuerung verbunden ist.

Vorteilhaft ist hierbei, dass dadurch ein einfacher und kostengünstiger Aufbau erreicht wird. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass aus den Stromanstiegen symmetrische Komponenten berechnet werden, welche mit doppelter elektrischer Drehzahl, einfacher elektrischer Drehzahl und mit Drehzahl Null umlaufen, wobei zumindest die bis Drehzahl Null funktionierende und mit doppelter elektrischer Drehzahl umlaufende symmetrische Komponente ausgewertet und daraus die elektrische Rotorposition der Maschine (4) bestimmt wird, sodass keinerlei Positionssensoren für die Ermittlung der Rotorposition benötigt werden, wodurch Kosten und vor allem fehleranfällige Bauelemente eingespart werden können.

Schließlich ist eine Ausbildung von Vorteil, bei der die Auswertungseinheit zur Übergabe der inversen Induktivitätskennzahl mit der Überwachungseinheit verbunden ist. Dadurch wird eine zusätzliche Motorüberwachung auf einfache Art und Weise möglich.

Hinzuweisen ist, dass natürlich beispielsweise die Strommessung in verschiedenen Varianten realisiert werden kann, wie sie in den Patentansprüchen (2) bis (4) angegeben sind.

DIE AUFGABE WIRD DURCH DIE ERFINDUNG GELÖST.

Die erfindungsgemäße Schaltungsanordnung ist dadurch gekennzeichnet, dass eine über einen Umrichter gespeiste synchron laufende Drehstrommaschine vorliegt, wobei das System mit einer Strommessung in einer der besagten Varianten ausgeführt ist und die

Strommessungen einem Rechner zugeführt werden, die die Auswertungen nach der Theorie der symmetrischen Komponenten vornimmt und als Ergebnis zumindest die Rotorlage, oft auch die Rotordrehzahl und gegebenenfalls eine Lastmomentschätzung oder weitere Zustandsgrößen für die feldorientierte Regelung, welche auf dem Rechnersystem implementiert ist, zur Verfügung stellt.

Die Erfindung wird anhand eines in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiels näher erläutert.

Es zeigt:

Fig. 1 ein Schaltbild zur drehgeberlosen Ermittlung der Rotorposition einer synchron laufenden Drehstrommaschine, in vereinfachter, schematischer Darstellung.

In Fig. 1 wird ein mit einem Zwischenkreiskondensator 2 ausgestatteter Umrichter mit Zwischenkreisspannung zwischen den Anschlusspunkten 3a und 3b über einen vorzugsweise dreiphasigen Wechselrichter 1 mit einer synchron laufenden elektrischen Maschine 4 verbunden. Eine Stromerfassungseinheit 5 führt die erfassten Ströme einer Strom- und Stromanstiegsauswertung 6 in einer Recheneinheit 7 zu, welche einerseits die ausgewerteten Ströme 8 an eine Stromregelung 9 und andererseits die ausgewerteten Stromanstiege 10 an eine Transformationseinheit 11 weiterleitet. Die Transformationseinheit 11 transformiert die Stromanstiege 10 ins messrichtungsfeste Koordinatensystem und leitet sie an eine Auswertungseinheit 12 weiter, welche gemäß der Theorie der Symmetrischen Komponenten zumindest eine der Komponenten, welche mit doppelter elektrischer Drehzahl, mit einfacher elektrischer Drehzahl und mit Drehzahl Null umlaufen, auswertet.

Vorzugsweise wird zumindest jene Komponente ausgewertet, die mit doppelter elektrischer Drehzahl umläuft. Daraus wird dann entsprechend Gleichung GL1 (wie zuvor beschrieben) der Raumzeiger ξ_{INF} bzw. dessen Real- und Imaginärteil, gemäß den dargelegten Vorschriften, berechnet und der doppelte elektrische Drehwinkel 13 berechnet. Dabei ist es auch möglich, dass der Raumzeiger ξ_{EMK} ebenfalls ausgewertet wird, sodass sich daraus der einfache elektrische Drehwinkel 14 ergibt. Erfolgt auch noch eine Auswertung der Nullkomponente, so liefert diese die mittlere inverse differenzielle Induktivitätskennzahl ξ_0

15, welche zur Motorüberwachung in einer optionalen Überwachungseinheit 25 verwendet werden kann. Die ermittelten Winkelinformationen werden, vorzugsweise über ein Zustandsmodell 16, welches neben einem verbessertem elektrischen Drehwinkel 17 auch die Drehzahl 18 und optional weitere Größen 19, vorzugsweise das Lastmoment und/oder die Winkelbeschleunigung der Motorwelle ermittelt, der feldorientierten Regelung 20 zur Verfügung gestellt. Diese feldorientierte Regelung 20 berechnet aufgrund ihrer Sollwerte (z.B. Drehzahl, Drehmoment) gemäß dem implementierten Regelalgorithmus Stromsollwerte 21 und liefert diese als Sollwerte an die Stromregelung 9, welche daraus unter Verwendung der ausgewerteten Ströme 8 einen Sollspannungsraumzeiger 22 berechnet. Dieser wird in der beschriebenen PWM-Einheit 23 in ein Pulsmuster umgesetzt, welches ausschließlich aktive Spannungsraumzeiger verwendet und das die Halbbrücken des Wechselrichterteils 1 über Ansteuerbefehle 24 steuert.

Wesentlich bei der Erfindung ist, dass die Maschine 4 drehgeberlos bzw. positionssensorlos ausgebildet ist und die Regelung und Steuerung nur über die Stromerfassung erfolgt. Eine allfällig vorhandene Spannungsmessung kann zur Verbesserung der Genauigkeit der Auswertung optional verwendet werden. Dadurch wird ein sehr kostengünstiger und einfacher Aufbau für die Maschine 4 erreicht.

Erfindungsgemäß ist ein Verfahren zur drehgeberlosen Ermittlung der Rotorposition einer synchron laufenden Drehstrommaschine in Fig. 1 beschrieben, die über einen Umrichter gespeist wird. Die erfassten Stromanstiege 10 werden in ein messrichtungsfestes Koordinatensystem transformiert und gemäß Theorie der symmetrischen Komponenten zumindest eine der aus diesen Stromanstiegen 10 berechneten Komponenten ausgewertet. Die Komponenten laufen dabei mit doppelter elektrischer Drehzahl, einfacher elektrischer Drehzahl und mit Drehzahl Null um. Vorzugsweise wird die bis Drehzahl Null funktionierende und mit doppelter elektrischer Drehzahl umlaufende Komponente und daraus nach bekannten Methoden der Mathematik die elektrische Rotorposition bestimmt

Eine derartige Messung und Auswertung kann wie folgt erfolgen:

Legt man einen Spannungsraumzeiger u_+ (Umrichterstellung 1/0/0 des Wechselrichters 1) an die Maschine an, so reagiert sie mit einem Stromanstiegsraumzeiger $(\Delta i/\Delta t)_{u_+} = \xi_u$.

(Messrichtung des Spannungsraumzeigers $u = 0^\circ$ im statorfesten Koordinatensystem α, β).

Der Stromanstiegsraumzeiger $(\Delta i/\Delta t)$ ist bekanntermaßen definiert als

$$(\Delta i/\Delta t) = 2/3 \{ (\Delta i_u/\Delta t) + (\Delta i_v/\Delta t) \cdot \exp(+j \cdot 120^\circ) + (\Delta i_w/\Delta t) \cdot \exp(-j \cdot 120^\circ) \}$$

mit den jeweiligen möglichst zeitgleich zu ermittelnden Stromanstiegen $(\Delta i_u/\Delta t)$ in Strang u , $(\Delta i_v/\Delta t)$ in Strang v und $(\Delta i_w/\Delta t)$ in Strang w .

Legt man einen Spannungsraumzeiger v_+ (Umrichterstellung 0/1/0) an die Maschine 4 an, so reagiert sie mit einem Stromanstiegsraumzeiger $(\Delta i/\Delta t)_{v_+} = \xi_v$. (Messrichtung $v=120^\circ$)

Legt man einen Spannungsraumzeiger w_+ (Umrichterstellung 0/0/1) an die Maschine 4 an, so reagiert sie mit einem Stromanstiegsraumzeiger $(\Delta i/\Delta t)_{w_+} = \xi_w$. (Messrichtung $w=240^\circ$)

Wäre die Maschine 4 im Stillstand und hätte sie keine Achsigkeit sowie keinen Widerstand, so bildeten die Raumzeiger ξ_u, ξ_v, ξ_w in einem gemeinsamen statorfesten Koordinatensystem α, β ein um je 120° versetztes Zeigertripel.

Stellt man die drei Zeiger in einem „messrichtungsfesten Koordinatensystem“ dar (Reelle Achse des messrichtungsfesten Koordinatensystems in Richtung des jeweiligen Mess-Spannungsraumzeigers), so bilden die so dargestellten Raumzeiger $\xi_{uu}, \xi_{vv}, \xi_{ww}$ für den Fall „Maschine 4 im Stillstand, keine Achsigkeit sowie kein Widerstand“ drei parallele, gleich lange Zeiger in der reellen Achse.

Wäre die Maschine 4 im Stillstand und hätte eine Achsigkeit (kleinere Induktivität der Statorspulen z.B. in d -Richtung des Rotors (d -Achse achsparallel zur betrachteten Statorspulenachse), größere Induktivität in q -Richtung des Rotors), würden die drei Raumzeiger $\xi_{uu}, \xi_{vv}, \xi_{ww}$ eine zusätzliche, mit der doppelten Rotorlage etwa cosinusförmig variierende Länge aufweisen. Die Abhängigkeit von der doppelten Rotorlage kann man sich leicht erklären, da die hohe Induktivität zweimal pro elektrischer Umdrehung auftritt (in positiver und negativer q -Achse), analog die niedrige Induktivität in positiver und negativer d -Achse. (Die Definition der Richtung der d -Achse ist an sich beliebig, aber fest bezüglich des Rotors).

Würde sich die Maschine 4 drehen und hätte keine Achsigkeit (Induktivitäten der Statorspulen unabhängig von der Rotorposition), so erzeugt eine Rotormagnetisierung (bei permanentmagneterregten und elektrisch erregten Maschinen) bzw. ein rotororientierter Betriebsstrom über dem Statorwiderstand (bei permanentmagneterregten, elektrisch erregten und reluktanten Maschinen) Spannungskomponenten in den Statorspulen, die synchron mit der Rotorlage umlaufen und entsprechende Stromanstiegsanteile, die ebenfalls synchron mit der einfachen Rotorlage der Maschine 4 umlaufen. Die drei Raumzeiger ξ_{uu} , ξ_{vv} , ξ_{ww} würden in diesem Fall eine zusätzliche, mit der einfachen Rotorlage etwa cosinusförmig variierende Länge aufweisen.

Lässt man nun eine achsige Maschine 4 rotieren, so überlagern sich beide Effekte und die Raumzeiger ξ_{uu} , ξ_{vv} , ξ_{ww} enthalten einen in allen drei Zeigern gleichen Offsetanteil ξ_o , einen mit Rotordrehzahl umlaufenden Anteil ξ_{EMK} und einen mit doppelter Rotordrehzahl umlaufenden Anteil ξ_{INF} .

In Anlehnung an die bekannten Rechenregeln für symmetrische Komponenten [Oswald, B.: "Berechnung von Drehstromnetzen – Berechnung stationärer und nichtstationärer Vorgänge mit Symmetrischen Komponenten und Raumzeigern". Vieweg + Teubner, 2009, ISBN 978-3-8348-0617-8] können die genannten 3 Komponenten (im Folgenden „INFORM-Raumzeiger“, „EMK-Raumzeiger“ und „Mittlere inverse differenzielle Induktivitätskennzahl“ genannt) wie folgt ermittelt werden:

$$\text{„INFORM-Raumzeiger“} \quad \xi_{INF} = 1/3 * [\xi_{uu} + \xi_{vv} * \exp(-j * 120^\circ) + \xi_{ww} * \exp(+j * 120^\circ)] \quad (1)$$

$$\text{„EMK-Raumzeiger“} \quad \xi_{EMK} = 1/3 * [\xi_{uu} + \xi_{vv} * \exp(+j * 120^\circ) + \xi_{ww} * \exp(-j * 120^\circ)] \quad (2)$$

$$\text{„Mittlere inverse differenzielle Induktivitätskennzahl“} \quad \xi_o = 1/3 * [\xi_{uu} + \xi_{vv} + \xi_{ww}] \quad (3)$$

Das Argument des komplexen INFORM-Raumzeigers ξ_{INF} entspricht der doppelten Rotorposition 2γ , üblicherweise noch zu korrigieren um einen messtechnisch oder durch ein Modell zu ermittelnden last- und drehzahlabhängigen Korrekturterm

$$2\gamma = \arg(\xi_{INF}) + \Delta\gamma_{INF}(\text{Last, Drehzahl}) \quad (4)$$

Der Betrag des komplexen INFORM-Raumzeigers ξ_{INF} ist weitgehend drehzahlunabhängig, und daher kann der komplexe INFORM-Raumzeiger ξ_{INF} vorzugsweise bei kleinen Drehzahlen ausgewertet werden.

Das Argument des komplexen EMK-Raumzeigers ξ_{EMK} entspricht der einfachen Rotorposition γ , gegebenenfalls noch zu korrigieren um einen messtechnisch oder durch ein Modell zu ermittelnden last- und drehzahlabhängigen Korrekturterm

$$\gamma = \arg(\xi_{EMK}) + \Delta\gamma_{EMK}(\text{Last}, \text{Drehzahl}) \quad (5)$$

Der Betrag des komplexen EMK-Raumzeigers ξ_{EMK} zufolge der induzierten Spannung sinkt mit fallender Drehzahl, und daher kann der komplexe EMK-Raumzeiger ξ_{EMK} vorzugsweise bei höheren Drehzahlen ausgewertet werden.

Die mittlere differenzielle Induktivitätskennzahl ξ_0 kann zur Überwachung des Betriebspunktes oder zur Erkennung von Fehlern oder unzulässigen Parameterkonstellationen (Impedanzen), etwa zur Erkennung von Windungskurzschlüssen, Wicklungsunterbrechungen etc. verwendet werden.

Die gemessenen Stromanstiegsraumzeiger haben im messrichtungsfesten Koordinatensystem folgende Real- und Imaginärteile (Anmerkung: „sqrt(3)“ bedeutet die Wurzel aus 3):

Messung u_+ (alternativ u_-)

$$\xi_{uu} = \operatorname{Re}\{\xi_{uu}\} + j \operatorname{Im}\{\xi_{uu}\}, \text{ wobei}$$

$$\operatorname{Re}\{\xi_{uu}\} = (\Delta i_u / \Delta t)_{u+}$$

$$\operatorname{Im}\{\xi_{uu}\} = 1/\sqrt{3} * [(\Delta i_v / \Delta t) - (\Delta i_w / \Delta t)]_{u+}$$

Messung v_+ (alternativ v_-)

$$\xi_{vv} = \operatorname{Re}\{\xi_{vv}\} + j \operatorname{Im}\{\xi_{vv}\}, \text{ wobei}$$

$$\operatorname{Re}\{\xi_{vv}\} = (\Delta i_v / \Delta t)_{v+}$$

$$\operatorname{Im}\{\xi_{vv}\} = 1/\sqrt{3} * [(\Delta i_w / \Delta t) - (\Delta i_u / \Delta t)]_{v+}$$

Messung w_+ (alternativ w_-)

$$\xi_{ww} = \operatorname{Re}\{\xi_{ww}\} + j \operatorname{Im}\{\xi_{ww}\}, \text{ wobei}$$

$$\operatorname{Re}\{\xi_{ww}\} = (\Delta i_w / \Delta t) w_+$$

$$\operatorname{Im}\{\xi_{ww}\} = 1/\sqrt{3} * [(\Delta i_u / \Delta t) - (\Delta i_v / \Delta t)] w_+$$

Damit liefert Gleichung GL1:

$$\operatorname{Re}\{\xi_{INF}\} = 1/3 * \{ (\Delta i_u / \Delta t) u_+ - 1/2 * (\Delta i_v / \Delta t) v_+ - 1/2 * (\Delta i_w / \Delta t) w_+ + 1/2 * [(\Delta i_w / \Delta t) - (\Delta i_u / \Delta t)] v_+ - 1/2 * [(\Delta i_u / \Delta t) - (\Delta i_v / \Delta t)] w_+ \}$$

$$\operatorname{Im}\{\xi_{INF}\} = 1/3 * \{ 1/\sqrt{3} * [(\Delta i_v / \Delta t) - (\Delta i_w / \Delta t)] u_+ - \sqrt{3}/2 * (\Delta i_v / \Delta t) v_+ + \sqrt{3}/2 * (\Delta i_w / \Delta t) w_+ - 1/[2 * \sqrt{3}] * [(\Delta i_w / \Delta t) - (\Delta i_u / \Delta t)] v_+ - 1/[2 * \sqrt{3}] * [(\Delta i_u / \Delta t) - (\Delta i_v / \Delta t)] w_+ \}$$

Das Argument $\arg(\xi_{INF})$ kann durch Arcustangensbildung $\operatorname{atan}(\operatorname{Im}\{\xi_{INF}\} / \operatorname{Re}\{\xi_{INF}\})$ berechnet und in Gleichung (4) zur Berechnung des doppelten Rotorwinkels herangezogen werden.

Weiters liefert Gleichung GL2:

$$\operatorname{Re}\{\xi_{EMK}\} = 1/3 * \{ (\Delta i_u / \Delta t) u_+ - 1/2 * (\Delta i_v / \Delta t) v_+ - 1/2 * (\Delta i_w / \Delta t) w_+ - 1/2 * [(\Delta i_w / \Delta t) - (\Delta i_u / \Delta t)] v_+ + 1/2 * [(\Delta i_u / \Delta t) - (\Delta i_v / \Delta t)] w_+ \}$$

$$\operatorname{Im}\{\xi_{EMK}\} = 1/3 * \{ 1/\sqrt{3} * [(\Delta i_v / \Delta t) - (\Delta i_w / \Delta t)] u_+ + \sqrt{3}/2 * (\Delta i_v / \Delta t) v_+ - \sqrt{3}/2 * (\Delta i_w / \Delta t) w_+ - 1/[2 * \sqrt{3}] * [(\Delta i_w / \Delta t) - (\Delta i_u / \Delta t)] v_+ - 1/[2 * \sqrt{3}] * [(\Delta i_u / \Delta t) - (\Delta i_v / \Delta t)] w_+ \}$$

Das Argument $\arg(\xi_{EMK})$ kann durch Arcustangensbildung $\operatorname{atan}(\operatorname{Im}\{\xi_{EMK}\} / \operatorname{Re}\{\xi_{EMK}\})$ berechnet und in Gleichung (5) zur Berechnung des einfachen Rotorwinkels herangezogen werden.

Falls die Stromanstiegsmessungen unvollständig erfasst werden, vorzugsweise falls nur die messrichtungsp parallelen Stromanstiege erfasst werden, können jene Terme in $\operatorname{Re}\{\xi_{INF}\}$ und $\operatorname{Im}\{\xi_{INF}\}$, welche nicht-messrichtungsp parallele Stromanstiege enthalten, näherungsweise durch Modellierung von $\operatorname{Re}\{\xi_{EMK}\}$ und $\operatorname{Im}\{\xi_{EMK}\}$ als mit der einfachen Winkelgeschwindigkeit umlaufende cosinus- bzw. sinusförmige Funktionen berücksichtigt

werden, die über strom- und drehzahlabhängige Parametrierung festgelegt werden. Dies kann beispielsweise durch eine Referenzmessung ermittelt werden. Dies ermöglicht eine gute Erfassung des doppelten Rotorwinkels auch bei Strom- bzw. Stromanstiegserfassung ausschließlich im Zwischenkreis.

In vorteilhafter Weise ermittelt die Erfindung die Rotorposition einer Umrichter gespeisten synchron laufenden Drehstrommaschine ohne teure und ausfallsanfällige mechanische Drehgeber, wobei für die Stromregelung ausschließlich in drei unterschiedliche Raumzeigerrichtungen wirkende aktive Umrichterzustände ohne Kurzschlusszustände verwendet werden. Dabei werden Stromanstiege der Phasenströme während dieser aktiven Umrichterzustände erfasst und in ein messrichtungsfestes Koordinatensystem transformiert. Messrichtungsfest bedeutet dabei, dass der aktuelle von der Stromregelung vorgegebene Spannungsraumzeiger gleichzeitig auch als Messraumzeiger verwendet wird und die Basis für ein Koordinatensystem bildet, das seine reelle Achse in eben dieser Messrichtung aufweist.

In einer Ausgestaltung der Erfindung wird gemäß der Theorie der symmetrischen Komponenten zumindest eine der aus diesen Stromanstiegen 10 berechneten Komponenten, welche mit doppelter elektrischer Drehzahl, einfacher elektrischer Drehzahl und mit Drehzahl Null umlaufen, vorzugsweise die bis Drehzahl Null funktionierende und mit doppelter elektrischer Drehzahl umlaufende Komponente ausgewertet und daraus nach bekannten Methoden der Mathematik die elektrische Rotorposition bestimmt wird. Dies bietet den großen Vorteil, dass gut auswertbare Stromanstiege ohne zusätzliche Messimpulse vorliegen, welche eine Auswertung im gesamten Betriebsbereich einschließlich Stillstand zulassen.

Die Erfassung der Stromanstiege 10 kann in verschiedenen Topologien erfolgen. Beispielsweise werden in einer Ausgestaltung der Erfindung die Stromanstiege 10 zumindest in zwei Phasen zwischen dem Ausgang der Halbbrücken und dem Motoranschluss erfasst. Diese Anordnung bietet den Vorteil, dass sehr viele Industrieumrichter eine derartige Stromerfassung aufweisen.

Selbstverständlich ist es auch möglich, dass durch entsprechende Anpassung des Wechselrichters 1 auch eine Vollbrücke eingesetzt werden kann.

Der Ordnung halber wird darauf hingewiesen, dass die Erfindung nicht auf die dargestellten Ausführungsvarianten beschränkt ist, sondern auch weitere Ausbildungen beinhalten können.

Patentansprüche

1. Verfahren zur drehgeberlosen Ermittlung der Rotorposition einer synchron laufenden Drehstrommaschine (4), die über einen Umrichter (3) gespeist ist, wobei für die Stromregelung in unterschiedliche Raumzeigerrichtungen wirkende aktive Umrichterzustände ohne Kurzschlusszustände verwendet werden und Stromanstiege (10) der Phasenströme während dieser aktiven Umrichterzustände erfasst werden, dadurch gekennzeichnet, dass die erfassten Stromanstiege (10) in einer Rechereinheit (7) in ein messrichtungsfestes Koordinatensystem und weiter in symmetrische Komponenten transformiert werden und zumindest eine der aus diesen Stromanstiegen (10) berechneten symmetrischen Komponenten, welche mit doppelter elektrischer Drehzahl, einfacher elektrischer Drehzahl und mit Drehzahl Null umlaufen, zur Rotorpositionsbestimmung herangezogen wird, wobei zumindest die bis Drehzahl Null funktionierende und mit doppelter elektrischer Drehzahl umlaufende symmetrische Komponente ausgewertet und daraus die elektrische Rotorposition der Maschine (4) bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Stromanstiege zumindest in zwei Phasen zwischen dem Ausgang der Halbbrücken (u, v, w) und dem Motoranschluss erfasst werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Stromanstiege (10) in den Fußpunkten von mindestens zwei Halbbrücken (u, v, w) erfasst werden.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Stromanstiege (10) im Zwischenkreis des Umrichters erfasst werden.
5. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zur mit doppelter elektrischer Drehzahl umlaufenden Komponente auch die mit einfacher elektrischer Drehzahl umlaufende Komponente ausgewertet wird.

6. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei unvollständiger Erfassung der Stromanstiege (10), vorzugsweise ausschließlicher Erfassung der messrichtungsp parallelen Stromanstiegsraumzeigerkomponenten die Wirkung der nicht erfassten vorzugsweise nicht-messrichtungsp parallelen Stromanstiegsraumzeigerkomponenten durch eine Ersatzfunktion, welche die mit einfacher Rotordrehzahl umlaufende strom- und drehzahlabhängige symmetrische Komponente nachbildet, näherungsweise berücksichtigt wird.
7. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die nach den Regeln der symmetrischen Komponenten ermittelten Größen einer Recheneinheit zugeführt werden, die daraus zumindest eine der Zustandsgrößen „Rotorlage“, „Rotordrehzahl“, „Rotorbeschleunigung“ und/oder „Lastmoment“ errechnet.
8. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die mittlere inverse differenzielle Induktivitätskennzahl zur Überwachung des Maschinenzustandes im Hinblick auf unzulässige Impedanzverhältnisse verwendet wird.
9. Schaltungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Stromerfassungseinheit (5) mit einer Strom- und Stromanstiegsauswertung (6) verbunden ist, die einerseits mit einer Transformationseinheit (11) zur Transformation von Stromanstiegen (10) ins messrichtungsfeste Koordinatensystem verbunden ist und andererseits mit einer Stromregelung (9) zur Übergabe der ausgewerteten Ströme (8) verbunden ist, und dass die Transformationseinheit (11) mit einer Auswertungseinheit (12) zur Auswertung symmetrischer Komponenten verbunden ist, die wiederum mit einem Zustandsmodell (16) zur Übergabe des doppelten Drehwinkels (13) und gegebenenfalls zusätzlich des einfachen Drehwinkels (14) gekoppelt ist und das Zustandsmodell (16) zur Weiterleitung eines Drehwinkel (17), einer Drehzahl (18) und

optional einer Größe (19) mit einer feldorientierten Regelung (20) verbunden ist, worauf die Regelung (20) unter Weitergabe von Stromsollwerten (21) mit der Stromregelung (9) verbunden ist und die Stromregelung (9) mit einer ausschließlich aktive Spannungsraumzeiger nützende PWM-Einheit (23), die zur Verarbeitung des vom Stromregler (9) übergebenden Sollspannungsraumzeigers (22) ausgebildet ist, verbunden ist, und diese mit dem Wechselrichterteil (1) zur Steuerung verbunden ist.

10. Schaltungsanordnung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswertungseinheit (12) zur Übergabe der inversen Induktivitätskennzahl (15) mit der Überwachungseinheit (25) verbunden ist.

SCHRÖDL Manfred, Dr.

vertreten durch

Rechtsanwalt Dr. Roland Graschitz

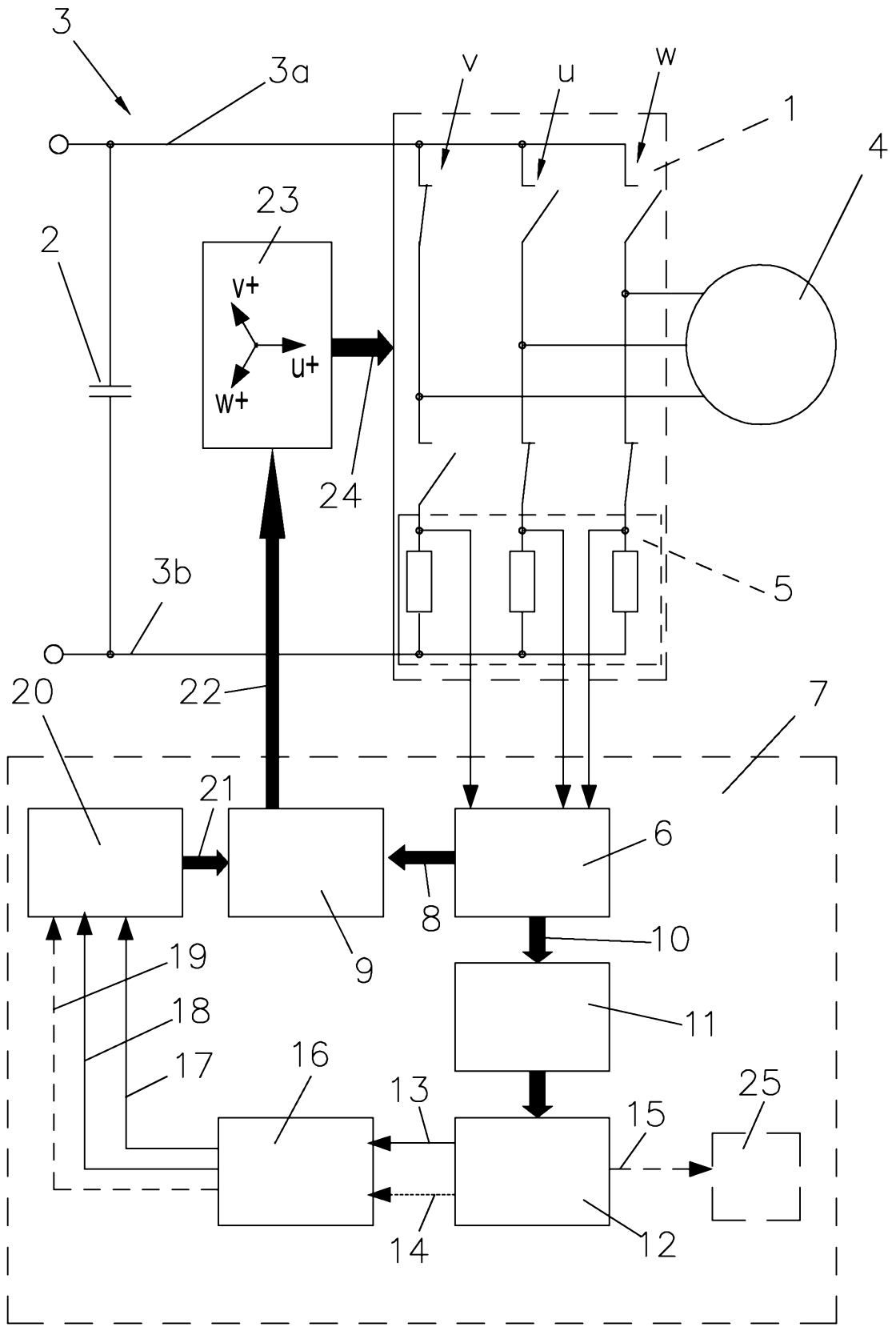


Fig.1

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß IPC: H02P 6/18 (2016.01); H02P 27/08 (2006.01)		
Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß CPC: H02P 6/18 (2016.02); H02P 27/08 (2013.01)		
Recherchierter Prüfstoff (Klassifikation): H02P		
Konsultierte Online-Datenbank: EPODOC , WPI		
Dieser Recherchenbericht wurde zu den am 03.11.2017 eingereichten Ansprüchen 1-10 erstellt.		
Kategorie ^{*)}	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
A	DE 102016205462 A1 (BOSCH GMBH ROBERT) 05. Oktober 2017 (05.10.2017) Anspruch 1; Figur 1	1-10
A	US 2016248354 A1 (LIU JINGBO et al.) 25. August 2016 (25.08.2016) Zusammenfassung; Figur 1	1-10
A	DE 102017106054 A1 (KK TOYOTA JIDOSHOKKI) 28. September 2017 (28.09.2017) Zusammenfassung; Figuren 2, 5	1-10
Datum der Beendigung der Recherche: 25.10.2018		Seite 1 von 1
		Prüfer(in): KOVACS György
^{*)} Kategorien der angeführten Dokumente: X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung : der Anmeldungsgegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden. Y Veröffentlichung von Bedeutung : der Anmeldungsgegenstand kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist.		
A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert. P Dokument, das von Bedeutung ist (Kategorien X oder Y), jedoch nach dem Prioritätstag der Anmeldung veröffentlicht wurde. E Dokument, das von besonderer Bedeutung ist (Kategorie X), aus dem ein „ älteres Recht “ hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage stellen). & Veröffentlichung, die Mitglied der selben Patentfamilie ist.		