



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
02.01.2019 Patentblatt 2019/01

(51) Int Cl.:
H02P 6/20 (2016.01) **H02P 21/34** (2016.01)
H02P 21/36 (2016.01) **F04D 25/06** (2006.01)
H02M 5/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **17179017.3**

(22) Anmeldetag: **30.06.2017**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
MA MD

(72) Erfinder: **Wang, Jinou**
35606 Solms-Niederbiehl (DE)

(74) Vertreter: **Manitz Finsterwald Patentanwälte PartmbB**
Martin-Greif-Strasse 1
80336 München (DE)

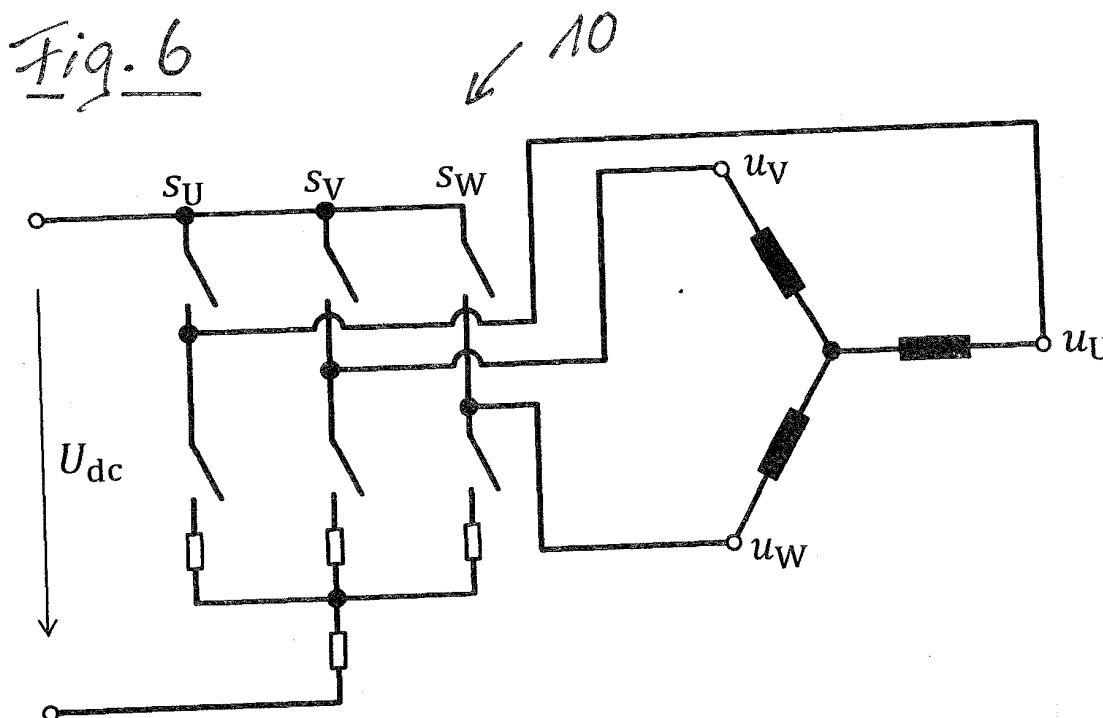
(71) Anmelder: **PFEIFFER VACUUM GMBH**
35614 Asslar (DE)

Bemerkungen:
Geänderte Patentansprüche gemäss Regel 137(2) EPÜ.

(54) **MODULATIONSVERFAHREN FÜR EINEN DREHSTROM-WECHSELRICHTER**

(57) Bei einem Raumzeiger-Modulationsverfahren zur Ansteuerung eines Drehstrom-Wechselrichters, insbesondere eines Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichters, für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine, insbesondere eine Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, wird während einer jeweiligen Pulsweitenmodulations-Periode zumindest eine der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters nicht geschaltet,

bzw. es werden höchstens zwei der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters geschaltet. Es werden auch ein hybrides Modulationsverfahren, ein Hochlaufverfahren sowie eine Vorrichtung zur Ansteuerung einer Drehstrommaschine, insbesondere einer gerberlosen Synchron-Drehstrommaschine, auf der Basis der Pulsbreitenmodulation angegeben, die insbesondere für einen jeweiligen Antrieb einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe einsetzbar sind.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Raumzeiger-Modulationsverfahren sowie ein hybrides Modulationsverfahren zur Ansteuerung eines Drehstrom-Wechselrichters, insbesondere eines Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichters, für eine auf der Basis einer Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine, insbesondere eine Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zum Hochfahren einer auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbaren geberlosen Drehstrommaschine, eine Vorrichtung zur Ansteuerung einer Drehstrommaschine sowie eine Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, mit einer über eine solche Ansteuervorrichtung ansteuerbaren Drehstrommaschine.

[0002] Anstelle des Begriffs "Hochfahren" wird im Folgenden auch der Begriff "Hochlaufen" verwendet. Beide Begriffe sind als gleichwertig zu verstehen.

[0003] Vakuumpumpen wie zum Beispiel Turbomolekularpumpen werden in unterschiedlichen Bereichen der Technik eingesetzt, um ein für einen jeweiligen Prozess notwendiges Vakuum zu schaffen. Turbomolekularpumpen umfassen einen Stator mit mehreren in Richtung einer Rotorachse aufeinanderfolgenden Statorscheiben und einen relativ zu dem Stator um die Rotorachse drehbar gelagerten Rotor, der eine Rotorwelle und mehrere auf der Rotorwelle angeordnete, in axialer Richtung aufeinanderfolgende und zwischen den Statorscheiben angeordnete Rotorscheiben umfasst, wobei die Statorscheiben und die Rotorscheiben jeweils eine pumpaktive Struktur aufweisen.

[0004] Unter einer Raumzeigermodulation versteht man in der Leistungselektronik ein Verfahren zur Steuerung von rotierenden elektrischen Maschinen auf der Basis der Pulsweitenmodulation. Basierend auf dieser Modulationsart ist es möglich, ein Mehrphasendrehstromsystem auf elektronischem Wege nachzubilden, wie es für den Betrieb von Drehstrommaschinen benötigt wird. Durch die Raumzeigerdarstellung genügen zwei Größen, der Winkel des Raumzeigers und dessen Betrag oder Real- und/oder Imaginärteil, um die Flussdichteverteilung in der Maschine vorzugeben. Soll ein Dreiphasensystem nachgebildet werden, so benötigt man für jede der drei Phasen eine Halbbrücke, über die die Ausgangsspannungen der Phasen U, V, W auf das positive oder auf das negative Zwischenkreispotential gelegt werden können.

[0005] Bei der bisher üblichen Raumzeigermodulation wird für den Startpunkt ein konstantes Spannungspotential von $\frac{1}{2} U_{dc}$ verwendet, was für die verschiedenen Phasen $\zeta = U, V, W$ jeweils ein Taktverhältnis λ_{ζ} mit sich bringt, das

durch die Beziehung
$$\lambda_{\zeta} = \frac{u_{\zeta,0}^* + \frac{1}{2} U_{dc}}{U_{dc}}, \quad \zeta = U, V, W$$
 bestimmt ist. Mit einer solchen herkömmlichen Modulation kann

nun aber nur eine maximale Spannungsamplitude von $\frac{1}{2} U_{dc}$ erreicht werden, die kleiner ist als die theoretisch er-

reichbare Amplitude von $\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$. Zur Erhöhung des Betriebsspannungsbereichs muss daher ein Nullsystem eingeführt werden, bei dem die Phasen eine gleiche Richtung und eine gleiche Länge besitzen. Dies bringt nun aber einen zusätzlichen Rechenaufwand mit sich.

[0006] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Raumzeiger-Modulationsverfahren, ein hybrides Modulationsverfahren, ein Hochfahrverfahren und eine Vorrichtung der eingangs genannten Art anzugeben, mit denen ein jeweiliger Wechselrichter für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betriebene Drehstrommaschine effizienter und mit geringeren Schaltverlusten ansteuerbar bzw. die Drehstrommaschine einfacher und robuster hochfahrbar ist.

[0007] Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Raumzeiger-Modulationsverfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1, durch ein hybrides Modulationsverfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 7, durch ein Hochfahrverfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 8, durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 14 und durch eine Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, mit den Merkmalen des Anspruchs 15 gelöst. Bevorzugte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Raumzeiger-Modulationsverfahrens und des erfindungsgemäßen Hochfahrverfahrens ergeben sich aus den Unteransprüchen.

[0008] Das erfindungsgemäße Raumzeiger-Modulationsverfahren zur Ansteuerung eines Drehstrom-Wechselrichters, insbesondere eines Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichters, für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine, insbesondere eine Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, zeichnet sich dadurch aus, dass während einer jeweiligen Pulsweitenmodulations-Periode zumindest eine der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters nicht geschaltet bzw. höchstens zwei der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters geschaltet werden.

[0009] Bevorzugt werden ausgehend von einem gegebenen Soll-Spannungsraumzeiger zunächst die drei Soll-Span-

nungspotentiale u_{U0} , u_{V0} und u_{W0} der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters berechnet, von den berechneten drei Soll-Spannungspotentialen u_{U0} , u_{V0} und u_{W0} der minimale Wert u_{Min} ermittelt und die endgültigen Ausgangsspannungspotentiale $u_{U\ final}$, $u_{V\ final}$, $u_{W\ final}$ für die drei Phasen U, V, W des Wechselrichters unter Berücksichtigung des ermittelten minimalen Wertes u_{Min} berechnet.

5 **[0010]** Die endgültigen Ausgangsspannungspotentiale $u_{U\ final}$, $u_{V\ final}$ und $u_{W\ final}$ für die drei Phasen U, V, W des Wechselrichters werden dann vorzugsweise über die folgenden Beziehungen berechnet:

$$u_{U\ final} = u_{U0} - u_{Min}, u_{V\ final} = u_{V0} - u_{Min} \text{ und } u_{W\ final} = u_{W0} - u_{Min}.$$

10 **[0011]** Das Taktverhältnis λ für eine jeweilige Phase U, V, W des Wechselrichters wird dann vorteilhafterweise über die folgenden Beziehungen berechnet:

$$15 \lambda_U = u_{U\ final} / U_{dc}, \lambda_V = u_{V\ final} / U_{dc} \text{ und } \lambda_W = u_{W\ final} / U_{dc}, \text{ wobei } U_{dc} \text{ die Zwischen-}$$

wobei U_{dc} die Zwischenkreisspannung ist.

20 **[0012]** Mit der erfindungsgemäßen effizienten Berechnung ist ein maximaler resultierender Spannungsbetrag von $U_{dc}/\sqrt{3}$ ohne die Einführung eines Nullsystems realisierbar. Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Modulationsverfahrens besteht darin, dass während jeder PWM-(Pulsweitenmodulation-)Periode wenigstens eine Phase nicht schaltet. Betrachtet man eine Umdrehung des Spannungsraumzeigers, so wird ein jeweiliges Schaltelement des Wechselrichters nur zu zwei Dritteln der Zeit geschaltet, was bedeutet, dass die effektive Schaltfrequenz um etwa 33% reduziert wird, so dass auch die Schaltverluste entsprechend reduziert werden.

25 **[0013]** Bevorzugt werden die drei Soll-Spannungspotentiale u_{U0} , u_{V0} und u_{W0} der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters unter Verwendung einer inversen Clarke-Transformation aus zwei Spannungen u_α und u_β in einem orthogonalen Koordinatensystem berechnet.

30 **[0014]** Die auch als α,β -Transformation bezeichnete Clarke-Transformation dient dazu, mehrphasige Größen wie bei einer Drehstrommaschine mit den Achsen U, V, W in ein einfacheres zweifaches Koordinatensystem mit den Achsen α , β zu überführen. Die beiden Spannungen u_α und u_β können somit vorteilhafterweise aus einem Spannungsvektor in Form eines Betrags und eines Winkels berechnet werden.

35 **[0015]** Das erfindungsgemäße hybride Modulationsverfahren zur Ansteuerung eines Drehstromwechselrichters, insbesondere eines Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichters, für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine, insbesondere eine Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, zeichnet sich dadurch aus, dass für relativ größere Phasenströme das erfindungsgemäße Raumzeiger-Modulationsverfahren und für relativ kleinere Phasenströme ein herkömmliches Modulationsverfahren angewandt wird, bei dem alle drei Phasen U, V, W des Wechselrichters zum Spannungsschalten beitragen.

40 **[0016]** Das erfindungsgemäße Verfahren zum Hochfahren einer auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbaren geberlosen Drehstrommaschine, insbesondere einer geberlosen Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, bei dem insbesondere das erfindungsgemäße Raumzeiger-Modulationsverfahren und/oder das erfindungsgemäße hybride Modulationsverfahren anwendbar ist, zeichnet sich dadurch aus, dass das Hochfahren einen Synchronisationsschritt, einen Hochfahrschritt und einen Überprüfungsschritt umfasst und im Überprüfungsschritt in dem Fall, dass das Hochfahren erfolgreich verlaufen ist, entsprechend einem Teilschritt a) ein interner Beobachter für die geberlose feldorientierte Maschinenregelung initialisiert und das Hochfahrverfahren beendet wird, und im Fall eines Scheiterns des Hochfahrens entsprechend einem Teilschritt b) ein Abbremsen der Drehstrommaschine bis zum Stillstand bewirkt wird, woraufhin die Drehstrommaschine erneut hochgefahren wird.

45 **[0017]** Bevorzugt wird die Drehstrommaschine im Synchronisationsschritt im Leerlaufbetrieb mit einem Synchronisa-

50 tions-Spannungsvektor \vec{u}_{sync} angesteuert, der durch die Beziehung $\vec{u}_{sync} = U_{sync} \cdot e^{j2\pi f_{sync} t}$ definiert ist, wobei die gesamte Dauer des Synchronisationsvorgangs durch T_{sync} definiert ist, und/oder der Synchronisations-Spannungsvektor \vec{u}_{sync} mit einer konstanten Frequenz f_{sync} in einem relativ geringen Frequenzbereich oder bei der Frequenz Null rotiert, und/oder die Amplitude u_{sync} des Synchronisations-Spannungsvektors \vec{u}_{sync} innerhalb des Zeitintervalls zwischen 0 und $k_T \times T_{sync}$ mit $k_T \in (0,1)$ zunimmt, und/oder die Amplitude u_{sync} sich während des Zeitintervalls zwischen $k_T \times T_{sync}$ und T_{sync} linear vom Spannungswert U_{sync} bis auf $k_u \times U_{sync}$ mit $k_u \geq 0$ ändert.

[0018] Vorteilhafterweise wird die Drehstrommaschine im Hochlaufschritt im Leerlaufbetrieb mit einem Hochlauf-Span-

nungsvektor \vec{u}_{up} angesteuert, der durch die Beziehung $\vec{u}_{up} = U_{up} \cdot e^{j2\pi f_{up} \cdot t + \gamma_{up}}$ definiert ist, wobei der Hochlauf-

vorgang durch die Parameter Gesamthochlaufzeit T_{up} , Endrotationsgeschwindigkeit f_{final} in Hz und Anfangsamplitude U_{up} definiert ist, und wobei

die Amplitude u_{up} des rotierenden Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} linear von U_{up} bis $U_{up} + \Delta U$ zunimmt und ΔU über die Beziehung $\Delta U = 2\pi \cdot \Psi_M \cdot (f_{final} - f_{sync})$ berechnet wird, in der Ψ_M magnetische Flussdichte der Drehstrommaschine ist, und/oder die Frequenz f_{up} des rotierenden Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} linear von f_{sync} bis zu einer Endfrequenz zunimmt,

und/oder der Anfangswinkel γ_{up} des Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} am Anfang des Hochlaufvorgangs durch die Beziehung $\gamma_{up} = \gamma_{sync} + \Delta\gamma$ berechnet wird, wobei γ_{sync} der Winkel des Synchronisations-Spannungsvektors \vec{u}_{sync} am Ende des Synchronisationsvorgangs und $\Delta\gamma$ ein Parameter zwischen 0 und $\pm 45^\circ$ ist.

[0019] Bevorzugt wird im Initialisierungsteilschritt a) des Überprüfungs-schrittes die anfängliche elektrische Winkelgeschwindigkeit ω_0 über die Beziehung $\omega_0 = |\vec{u}|/\Psi_M$ bestimmt, der anfängliche elektrische Winkel γ_0 über die Beziehung

$\gamma_0 = \angle \vec{u} - \frac{\pi}{2}$ bestimmt, und in dem Fall, dass eine negative Endhochlaufgeschwindigkeit erforderlich sein sollte, diese über die Beziehung $\omega_0 = -|\vec{u}|/\Psi_M$ mit $\gamma_0 = \angle \vec{u} + \frac{\pi}{2}$ berechnet.

[0020] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Hochfahrverfahrens wird im Abbremssteilschritt b) des Überprüfungs-schrittes der Wechselrichter aktiviert und mit einem konstanten Spannungsvektor $\vec{u} = U_{brk}$ beaufschlagt und bis zu einem Einschaltzeitpunkt T_{on} gewartet, der Wechselrichter deaktiviert und bis zu einem Ausschaltzeitpunkt T_{off} gewartet, bei dem alle Phasenströme den Wert Null annehmen, die Amplitude $|\vec{u}|$ der Gegen-EMK gemessen, in dem Fall, dass die Amplitude $|\vec{u}|$ geringer als ein Grenzwert U_{stop} ist, der Bremsvorgang beendet, und andernfalls der Abbremssteilschritt b) wiederholt.

[0021] Von Vorteil ist insbesondere auch, wenn im Überprüfungs-schritt nach dem Hochlaufvorgang der Wechselrichter deaktiviert und bis zu dem Ausschaltzeitpunkt T_{off} gewartet wird, bis alle Phasenströme den Wert Null annehmen, die drei Phasenspannungen u_U , u_V und u_W als Gegen-EMK gemessen werden und unter Verwendung der Clarke-Transformation der Spannungsvektor $\vec{u} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$ der Gegen-EMK berechnet wird, der Betrag $|\vec{u}| = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$

und der Winkel $\angle \vec{u} = \text{atan}\left(\frac{u_\beta}{u_\alpha}\right)$ des Spannungsvektors der Gegen-EMK berechnet werden, und in dem Fall, dass der Betrag größer ist als ein Grenzwert $U_{backEMF\ low}$, der Initialisierungsteilschritt a) und andernfalls der Abbremssteilschritt b) durchgeführt wird.

[0022] Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Ansteuerung einer Drehstrommaschine, insbesondere eines geberlosen Synchron-Drehstrommotors, auf der Basis der Pulsbreitenmodulation, insbesondere zur Ansteuerung einer Drehstrommaschine bzw. eines geberlosen Synchron-Drehstrommotors einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, umfasst einen Drehstrom-Wechselrichter, insbesondere einen Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichter, und eine Steuerung, wobei der Drehstrom-Wechselrichter über die Steuerung entsprechend dem erfindungsgemäßen Raumzeiger-Modulationsverfahren und/oder entsprechend dem erfindungsgemäßen hybriden Modulationsverfahren und/oder entsprechend dem erfindungsgemäßen Hochfahrverfahren ansteuerbar ist.

[0023] Die erfindungsgemäße Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, umfasst einen Stator und einen relativ zum Stator um eine Rotorachse drehbar gelagerten Rotor und wenigstens eine Antriebseinheit, wobei die Antriebseinheit eine Drehstrommaschine, insbesondere einen geberlosen Synchron-Drehstrommotor umfasst, die bzw. der über eine erfindungsgemäße Vorrichtung ansteuerbar ist.

[0024] Nachfolgend wird die Erfindung beispielhaft anhand vorteilhafter Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die beigefügten Figuren beschrieben. Es zeigen, jeweils schematisch:

Fig. 1 eine perspektivische Ansicht einer Turbomolekularpumpe,

- Fig. 2 eine Ansicht der Unterseite der Turbomolekularpumpe von Fig. 1,
- Fig. 3 einen Querschnitt der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittlinie A-A,
- 5 Fig. 4 eine Querschnittsansicht der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittlinie B-B,
- Fig. 5 eine Querschnittsansicht der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittlinie C-C,
- Fig. 6 eine schematische Darstellung eines beispielhaften Drehstromwechselrichters, bei dem die Erfindung an-
wendbar ist,
- Fig. 7 eine schematische Darstellung beispielhafter aktiver Spannungsvektoren für eine Raumzeiger-Modulation,
- Fig. 8 eine in einem orthogonalen Koordinatensystem dargestellte beispielhafte willkürliche Spannung als Aus-
gangspunkt für die Anwendung der Erfindung,
- Fig. 9 die Amplitude \bar{u}_{sync} des Synchronisations-Spannungsvektors \bar{u}_{sync} während eines beispielhaften Synchroni-
sationsschritts des erfindungsgemäßen Hochlaufverfahrens,
- 20 Fig. 10 die Amplitude \bar{u}_{up} des Hochlauf-Spannungsvektors \bar{u}_{up} während eines beispielhaften Hochlaufschritts des
erfindungsgemäßen Hochlaufverfahrens, und
- Fig. 11 die Frequenz f_{up} des rotierenden Hochlauf-Spannungsvektors \bar{u}_{up} während eines beispielhaften Hochlauf-
schritts des erfindungsgemäßen Hochlaufverfahrens.
- 25

[0025] Die in Fig. 1 gezeigte Turbomolekularpumpe 111 umfasst einen von einem Einlassflansch 113 umgebenen Pumpeneinlass 115, an welchen in an sich bekannter Weise ein nicht dargestellter Rezipient angeschlossen werden kann. Das Gas aus dem Rezipienten kann über den Pumpeneinlass 115 aus dem Rezipienten gesaugt und durch die Pumpe hindurch zu einem Pumpenauslass 117 gefördert werden, an den eine Vorvakuumpumpe, wie etwa eine Dreh-
schieberpumpe, angeschlossen sein kann.

30

[0026] Der Einlassflansch 113 bildet bei der Ausrichtung der Vakuumpumpe gemäß Fig. 1 das obere Ende des Gehäuses 119 der Vakuumpumpe 111. Das Gehäuse 119 umfasst ein Unterteil 121, an welchem seitlich ein Elektronikgehäuse 123 angeordnet ist. In dem Elektronikgehäuse 123 sind elektrische und/oder elektronische Komponenten der Vakuumpumpe 111 untergebracht, z.B. zum Betreiben eines in der Vakuumpumpe angeordneten Elektromotors 125. Am Elektronikgehäuse 123 sind mehrere Anschlüsse 127 für Zubehör vorgesehen. Außerdem sind eine Datenschnittstelle 129, z.B. gemäß dem RS485-Standard, und ein Stromversorgungsanschluss 131 am Elektronikgehäuse 123 angeordnet.

35

[0027] Am Gehäuse 119 der Turbomolekularpumpe 111 ist ein Fluteinlass 133, insbesondere in Form eines Flutventils, vorgesehen, über den die Vakuumpumpe 111 geflutet werden kann. Im Bereich des Unterteils 121 ist ferner noch ein Sperrgasanschluss 135, der auch als Spülgasanschluss bezeichnet wird, angeordnet, über welchen Spülgas zum Schutz des Elektromotors 125 (siehe z.B. Fig. 3) vor dem von der Pumpe geförderten Gas in den Motorraum 137, in welchem der Elektromotor 125 in der Vakuumpumpe 111 untergebracht ist, gebracht werden kann. Im Unterteil 121 sind ferner noch zwei Kühlmittelanschlüsse 139 angeordnet, wobei einer der Kühlmittelanschlüsse als Einlass und der andere Kühlmittelanschluss als Auslass für Kühlmittel vorgesehen ist, das zu Kühlzwecken in die Vakuumpumpe geleitet werden kann.

40

[0028] Die untere Seite 141 der Vakuumpumpe kann als Standfläche dienen, sodass die Vakuumpumpe 111 auf der Unterseite 141 stehend betrieben werden kann. Die Vakuumpumpe 111 kann aber auch über den Einlassflansch 113 an einem Rezipienten befestigt werden und somit gewissermaßen hängend betrieben werden. Außerdem kann die Vakuumpumpe 111 so gestaltet sein, dass sie auch in Betrieb genommen werden kann, wenn sie auf andere Weise ausgerichtet ist als in Fig. 1 gezeigt ist. Es lassen sich auch Ausführungsformen der Vakuumpumpe realisieren, bei der die Unterseite 141 nicht nach unten, sondern zur Seite gewandt oder nach oben gerichtet angeordnet werden kann.

45

[0029] An der Unterseite 141, die in Fig. 2 dargestellt ist, sind noch diverse Schrauben 143 angeordnet, mittels denen hier nicht weiter spezifizierte Bauteile der Vakuumpumpe aneinander befestigt sind. Beispielsweise ist ein Lagerdeckel 145 an der Unterseite 141 befestigt.

50

[0030] An der Unterseite 141 sind außerdem Befestigungsbohrungen 147 angeordnet, über welche die Pumpe 111 beispielsweise an einer Auflagefläche befestigt werden kann.

[0031] In den Figuren 2 bis 5 ist eine Kühlmittleitung 148 dargestellt, in welcher das über die Kühlmittelanschlüsse

139 ein- und ausgeleitete Kühlmittel zirkulieren kann.

[0032] Wie die Schnittdarstellungen der Figuren 3 bis 5 zeigen, umfasst die Vakuumpumpe mehrere Prozessgas-pumpstufen zur Förderung des an dem Pumpeneinlass 115 anstehenden Prozessgases zu dem Pumpenauslass 117.

[0033] In dem Gehäuse 119 ist ein Rotor 149 angeordnet, der eine um eine Rotationsachse 151 drehbare Rotorwelle 153 aufweist.

[0034] Die Turbomolekularpumpe 111 umfasst mehrere pumpwirksam miteinander in Serie geschaltete turbomolekulare Pumpstufen mit mehreren an der Rotorwelle 153 befestigten radialen Rotorscheiben 155 und zwischen den Rotorscheiben 155 angeordneten und in dem Gehäuse 119 festgelegten Statorscheiben 157. Dabei bilden eine Rotorscheibe 155 und eine benachbarte Statorscheibe 157 jeweils eine turbomolekulare Pumpstufe. Die Statorscheiben 157 sind durch Abstandsringe 159 in einem gewünschten axialen Abstand zueinander gehalten.

[0035] Die Vakuumpumpe umfasst außerdem in radialer Richtung ineinander angeordnete und pumpwirksam miteinander in Serie geschaltete Holweck-Pumpstufen. Der Rotor der Holweck-Pumpstufen umfasst eine an der Rotorwelle 153 angeordnete Rotornabe 161 und zwei an der Rotornabe 161 befestigte und von dieser getragene zylindermantelförmige Holweck-Rotorhülsen 163, 165, die koaxial zur Rotationsachse 151 orientiert und in radialer Richtung ineinander geschachtelt sind. Ferner sind zwei zylindermantelförmige Holweck-Statorhülsen 167, 169 vorgesehen, die ebenfalls koaxial zu der Rotationsachse 151 orientiert und in radialer Richtung gesehen ineinander geschachtelt sind.

[0036] Die pumpaktiven Oberflächen der Holweck-Pumpstufen sind durch die Mantelflächen, also durch die radialen Innen- und/oder Außenflächen, der Holweck-Rotorhülsen 163, 165 und der Holweck-Statorhülsen 167, 169 gebildet. Die radiale Innenfläche der äußeren Holweck-Statorhülse 167 liegt der radialen Außenfläche der äußeren Holweck-Rotorhülse 163 unter Ausbildung eines radialen Holweck-Spalts 171 gegenüber und bildet mit dieser die der Turbomolekularpumpen nachfolgende erste Holweck-Pumpstufe. Die radiale Innenfläche der äußeren Holweck-Rotorhülse 163 steht der radialen Außenfläche der inneren Holweck-Statorhülse 169 unter Ausbildung eines radialen Holweck-Spalts 173 gegenüber und bildet mit dieser eine zweite Holweck-Pumpstufe. Die radiale Innenfläche der inneren Holweck-Statorhülse 169 liegt der radialen Außenfläche der inneren Holweck-Rotorhülse 165 unter Ausbildung eines radialen Holweck-Spalts 175 gegenüber und bildet mit dieser die dritte Holweck-Pumpstufe.

[0037] Am unteren Ende der Holweck-Rotorhülse 163 kann ein radial verlaufender Kanal vorgesehen sein, über den der radial außenliegende Holweck-Spalt 171 mit dem mittleren Holweck-Spalt 173 verbunden ist. Außerdem kann am oberen Ende der inneren Holweck-Statorhülse 169 ein radial verlaufender Kanal vorgesehen sein, über den der mittlere Holweck-Spalt 173 mit dem radial innenliegenden Holweck-Spalt 175 verbunden ist. Dadurch werden die ineinander geschachtelten Holweck-Pumpstufen in Serie miteinander geschaltet. Am unteren Ende der radial innenliegenden Holweck-Rotorhülse 165 kann ferner ein Verbindungskanal 179 zum Auslass 117 vorgesehen sein.

[0038] Die vorstehend genannten pumpaktiven Oberflächen der Holweck-Statorhülsen 163, 165 weisen jeweils mehrere spiralförmig um die Rotationsachse 151 herum in axialer Richtung verlaufende Holweck-Nuten auf, während die gegenüberliegenden Mantelflächen der Holweck-Rotorhülsen 163, 165 glatt ausgebildet sind und das Gas zum Betrieb der Vakuumpumpe 111 in den Holweck-Nuten vorantreiben.

[0039] Zur drehbaren Lagerung der Rotorwelle 153 sind ein Wälzlager 181 im Bereich des Pumpenauslasses 117 und ein Permanentmagnetlager 183 im Bereich des Pumpeneinlasses 115 vorgesehen.

[0040] Im Bereich des Wälzlagers 181 ist an der Rotorwelle 153 eine konische Spritzmutter 185 mit einem zu dem Wälzlager 181 hin zunehmenden Außendurchmesser vorgesehen. Die Spritzmutter 185 steht mit mindestens einem Abstreifer eines Betriebsmittelspeichers in gleitendem Kontakt. Der Betriebsmittelspeicher umfasst mehrere aufeinander gestapelte saugfähige Scheiben 187, die mit einem Betriebsmittel für das Wälzlager 181, z.B. mit einem Schmiermittel, getränkt sind.

[0041] Im Betrieb der Vakuumpumpe 111 wird das Betriebsmittel durch kapillare Wirkung von dem Betriebsmittelspeicher über den Abstreifer auf die rotierende Spritzmutter 185 übertragen und in Folge der Zentrifugalkraft entlang der Spritzmutter 185 in Richtung des größer werdenden Außendurchmessers der Spritzmutter 185 zu dem Wälzlager 181 hin gefördert, wo es z.B. eine schmierende Funktion erfüllt. Das Wälzlager 181 und der Betriebsmittelspeicher sind durch einen wannenförmigen Einsatz 189 und den Lagerdeckel 145 in der Vakuumpumpe eingefasst.

[0042] Das Permanentmagnetlager 183 umfasst eine rotorseitige Lagerhälfte 191 und eine statorseitige Lagerhälfte 193, welche jeweils einen Ringstapel aus mehreren in axialer Richtung aufeinander gestapelten permanentmagnetischen Ringen 195, 197 umfassen. Die Ringmagnete 195, 197 liegen einander unter Ausbildung eines radialen Lagerspalts 199 gegenüber, wobei die rotorseitigen Ringmagnete 195 radial außen und die statorseitigen Ringmagnete 197 radial innen angeordnet sind. Das in dem Lagerspalt 199 vorhandene magnetische Feld ruft magnetische Abstoßungskräfte zwischen den Ringmagneten 195, 197 hervor, welche eine radiale Lagerung der Rotorwelle 153 bewirken. Die rotorseitigen Ringmagnete 195 sind von einem Trägerabschnitt 201 der Rotorwelle 153 getragen, welcher die Ringmagnete 195 radial außenseitig umgibt. Die statorseitigen Ringmagnete 197 sind von einem statorseitigen Trägerabschnitt 203 getragen, welcher sich durch die Ringmagnete 197 hindurch erstreckt und an radialen Streben 205 des Gehäuses 119 aufgehängt ist. Parallel zu der Rotationsachse 151 sind die rotorseitigen Ringmagnete 195 durch ein mit dem Trägerabschnitt 203 gekoppeltes Deckelelement 207 festgelegt. Die statorseitigen Ringmagnete 197 sind parallel zu der

Rotationsachse 151 in der einen Richtung durch einen mit dem Trägerabschnitt 203 verbundenen Befestigungsring 209 sowie einen mit dem Trägerabschnitt 203 verbundenen Befestigungsring 211 festgelegt. Zwischen dem Befestigungsring 211 und den Ringmagneten 197 kann außerdem eine Tellerfeder 213 vorgesehen sein.

[0043] Innerhalb des Magnetlagers ist ein Not- bzw. Fanglager 215 vorgesehen, welches im normalen Betrieb der Vakuumpumpe 111 ohne Berührung leer läuft und erst bei einer übermäßigen radialen Auslenkung des Rotors 149 relativ zu dem Stator in Eingriff gelangt, um einen radialen Anschlag für den Rotor 149 zu bilden, da eine Kollision der rotorseitigen Strukturen mit den statorseitigen Strukturen verhindert wird. Das Fanglager 215 ist als ungeschmiertes Wälzlager ausgebildet und bildet mit dem Rotor 149 und/oder dem Stator einen radialen Spalt, welcher bewirkt, dass das Fanglager 215 im normalen Pumpbetrieb außer Eingriff ist. Die radiale Auslenkung, bei der das Fanglager 215 in Eingriff gelangt, ist groß genug bemessen, sodass das Fanglager 215 im normalen Betrieb der Vakuumpumpe nicht in Eingriff gelangt, und gleichzeitig klein genug, sodass eine Kollision der rotorseitigen Strukturen mit den statorseitigen Strukturen unter allen Umständen verhindert wird.

[0044] Die Vakuumpumpe 111 umfasst den Elektromotor 125 zum drehenden Antreiben des Rotors 149. Der Anker des Elektromotors 125 ist durch den Rotor 149 gebildet, dessen Rotorwelle 153 sich durch den Motorstator 217 hindurch erstreckt. Auf den sich durch den Motorstator 217 hindurch erstreckenden Abschnitt der Rotorwelle 153 kann radial außenseitig oder eingebettet eine Permanentmagnetanordnung angeordnet sein. Zwischen dem Motorstator 217 und dem sich durch den Motorstator 217 hindurch erstreckenden Abschnitt des Rotors 149 ist ein Zwischenraum 219 angeordnet, welcher einen radialen Motorspalt umfasst, über den sich der Motorstator 217 und die Permanentmagnetanordnung zur Übertragung des Antriebsmoments magnetisch beeinflussen können.

[0045] Der Motorstator 217 ist in dem Gehäuse innerhalb des für den Elektromotor 125 vorgesehenen Motorraums 137 festgelegt. Über den Sperrgasanschluss 135 kann ein Sperrgas, das auch als Spülgas bezeichnet wird, und bei dem es sich beispielsweise um Luft oder um Stickstoff handeln kann, in den Motorraum 137 gelangen. Über das Sperrgas kann der Elektromotor 125 vor Prozessgas, z.B. vor korrosiv wirkenden Anteilen des Prozessgases, geschützt werden. Der Motorraum 137 kann auch über den Pumpenauslass 117 evakuiert werden, d.h. im Motorraum 137 herrscht zumindest annäherungsweise der von der am Pumpenauslass 117 angeschlossenen Vorvakuumpumpe bewirkte Vakuumdruck.

[0046] Zwischen der Rotornabe 161 und einer den Motorraum 137 begrenzenden Wandung 221 kann außerdem eine sog. und an sich bekannte Labyrinthdichtung 223 vorgesehen sein, insbesondere um eine bessere Abdichtung des Motorraums 217 gegenüber den radial außerhalb liegenden Holweck-Pumpstufen zu erreichen.

[0047] Fig. 6 zeigt in schematischer Darstellung einen beispielhaften Drehstrom-Wechselrichter 10, der für jede der drei Phasen $\zeta = U, V, W$ eine Halbbrücke aufweist, so dass die Ausgangsspannung u_V, u_U, u_W einer jeweiligen Phase U, V, W entweder auf das positive oder auf das negative Zwischenkreispotential U_{dc} gelegt werden kann. Das Spannungspotential u_ζ einer jeweiligen Phase ζ nimmt den Wert U_{dc} an, wenn der Schaltzustand $s_\zeta = H$ ist, und den Wert 0 an, wenn der Schaltzustand $s_\zeta = L$ ist. Bei einem gegebenen Taktverhältnis $\lambda_\zeta \in [0,1]$ ergibt sich für eine jeweilige Phase ζ eine Spannung $u_\zeta = \lambda_\zeta \times U_{dc}$.

[0048] Fig. 7 zeigt in schematischer Darstellung beispielhafte aktive Spannungsvektoren für eine Raumzeiger-Modulation. Dabei sind die Spannungsvektoren \vec{u}_ζ in einem orthogonalen Koordinatensystem mit dem Realteil u_α und dem Imaginärteil u_β der Spannungsvektoren entsprechenden Koordinaten dargestellt. Ein jeweiliger aktiver Spannungsvektor

\vec{u}_ζ ist abhängig von den Schaltzuständen der drei Phasen, so dass die folgende Beziehung gilt: $\vec{u}_\zeta = f(s_U, s_V, s_W)$.

Der Nullvektor \vec{u}_0 ist durch die Beziehung $\vec{u}_0 = f(L,L,L)$ definiert.

[0049] Fig. 8 zeigt eine in einem orthogonalen Koordinatensystem dargestellte beispielhafte willkürliche Spannung \vec{u} . Die Koordinaten des orthogonalen Koordinatensystems entsprechen wieder dem Realteil u_α und dem Imaginärteil u_β der Spannungsvektoren. Eine jeweilige Spannung lässt sich damit durch die folgende Beziehung darstellen:

$$\vec{u} = u_\alpha + j \times u_\beta.$$

[0050] Wie im Folgenden dargestellt, können die drei Spannungspotentiale u_U, u_V und u_W unter Verwendung der Clarke-Transformation in den durch die beiden Spannungen u_α und u_β definierten Spannungsvektor \vec{u} transformiert werden:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_U \\ u_V \\ u_W \end{bmatrix}$$

[0051] Unter Verwendung der inversen Clarke-Transformation kann der gewünschte Spannungsvektor

$\vec{u}^* = u_\alpha^* + j \cdot u_\beta^*$ wie folgt auf die drei auf das Nullpotential bezogenen Spannungspotentiale $u_{U,0}^*$, $u_{V,0}^*$ und $u_{W,0}^*$ transformiert werden:

$$\begin{bmatrix} u_{U,0}^* \\ u_{V,0}^* \\ u_{W,0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha^* \\ u_\beta^* \end{bmatrix}$$

[0052] Bei dem erfindungsgemäßen Raumzeiger-Modulationsverfahren wird beispielsweise ein in der Fig. 6 dargestellter Drehstrom-Wechselrichter 10, insbesondere Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichter, für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine so angesteuert, dass während einer jeweiligen Pulsweitenmodulations-Periode zumindest eine der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters 10 nicht geschaltet bzw. höchstens zwei der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters 10 geschaltet werden. Dabei können ausgehend von einem gegebenen Soll-Spannungsraumzeiger zunächst die drei Soll-Spannungspotentiale $u_{U,0}$, $u_{V,0}$ und $u_{W,0}$ der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters 10 berechnet, von den berechneten drei Soll-Spannungspotentialen $u_{U,0}$, $u_{V,0}$ und $u_{W,0}$ der minimale Wert u_{Min} ermittelt und die endgültigen Ausgangsspannungspotentiale $u_{U \text{ final}}$, $u_{V \text{ final}}$ und $u_{W \text{ final}}$ für die drei Phasen U, V, W des Wechselrichters 10 unter Berücksichtigung des ermittelten minimalen Werts u_{Min} berechnet werden.

[0053] Die endgültigen Ausgangsspannungspotentiale $u_{U \text{ final}}$, $u_{V \text{ final}}$ und $u_{W \text{ final}}$ für die drei Phasen U, V, W des Wechselrichters 10 können über die folgenden Beziehungen berechnet werden: $u_{U \text{ final}} = u_{U,0} - u_{\text{Min}}$, $u_{V \text{ final}} = u_{V,0} - u_{\text{Min}}$ und $u_{W \text{ final}} = u_{W,0} - u_{\text{Min}}$.

[0054] Das Taktverhältnis λ für eine jeweilige Phase U, V, W des Wechselrichters 10 kann über die folgenden Beziehungen berechnet werden: $\lambda_U = u_{U \text{ final}} / U_{\text{dc}}$, $\lambda_V = u_{V \text{ final}} / U_{\text{dc}}$ und $\lambda_W = u_{W \text{ final}} / U_{\text{dc}}$, wobei U_{dc} die Zwischenkreisspannung ist.

[0055] Die drei Soll-Spannungspotentiale $u_{U,0}$, $u_{V,0}$ und $u_{W,0}$ der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters 10 können dann unter Verwendung einer inversen Clarke-Transformation aus zwei Spannungen u_α und u_β in einem orthogonalen Koordinatensystem berechnet werden.

[0056] Schließlich können die beiden Spannungen u_α und u_β aus einem Spannungsvektor in Form eines Betrages und eines Winkels berechnet werden.

[0057] Bei der erfindungsgemäßen Raumzeigermodulation wird somit ein schwebendes Spannungspotential für den Startpunkt verwendet. Zunächst wird der minimale Wert der drei auf den Ausgangs- oder Nullpunkt bezogenen Potentiale

$u_{U,0}^*$, $u_{V,0}^*$ und $u_{W,0}^*$ entsprechend der folgenden Beziehung ermittelt: $U_{\text{min}} = \min(u_{U,0}^*, u_{V,0}^*, u_{W,0}^*)$. Das

$$\lambda_\zeta = \frac{u_{\zeta,0}^* - u_{\text{min}}}{U_{\text{dc}}}, \zeta = U, V, W.$$

Taktverhältnis λ_ζ einer jeweiligen Phase wird dann wie folgt berechnet:

[0058] Mit einem solchen erfindungsgemäßen Raumzeiger-Modulationsverfahren wird auf unmittelbare, effiziente

Weise ohne zusätzlichen Rechenaufwand eine Amplitude von $U_{\text{dc}}/\sqrt{3}$ erreicht, womit die Rechenbelastung der verwendeten Mikrocontroller entsprechend reduziert wird. Während einer jeweiligen Pulsweitenmodulations-Periode wird zumindest eine der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters 10 nicht geschaltet bzw. es werden höchstens zwei der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters 10 geschaltet. Während einer jeweiligen Rotationsperiode der Drehstrommaschine schaltet somit ein jeweiliger Zweig des Wechselrichters 10 während eines Drittels der Zeitdauer nicht. Entspre-

chend ist bei einer gegebenen Schaltfrequenz f_F die Schaltdauer auf $\frac{2}{3} f_F$ reduziert, womit die Schaltverluste um 33% reduziert werden.

[0059] Gemäß einem erfindungsgemäßen hybriden Modulationsverfahren zur Ansteuerung eines Drehstromwechselrichters, insbesondere Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichters für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine kann für relativ größere Phasenströme das erfindungsgemäße Raumzeiger-Modulationsverfahren und für relativ kleinere Phasenströme ein herkömmliches Modulationsverfahren angewandt werden, bei dem alle drei Phasen U, V, W des Wechselrichters 10 zum Spannungsschalten beitragen.

[0060] Das erfindungsgemäße Verfahren zum Hochfahren einer auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbaren geberlosen Drehstrommaschine, bei dem das erfindungsgemäße Raumzeiger-Modulationsverfahren und/oder das erfindungsgemäße hybride Modulationsverfahren anwendbar ist, umfasst einen Synchronisationsschritt, einen Hochlaufschritt und einen Überprüfungsschritt. Dabei wird im Überprüfungsschritt in dem Fall, dass das Hochfahren erfolgreich verlaufen ist, entsprechend einem Teilschritt a) ein interner Beobachter für die geberlose feldorientierte Maschinenregelung initialisiert und das Hochfahrverfahren beendet, und im Fall eines Scheiterns des Hochfahrens entsprechend einem Teilschritt b) ein Abbremsen der Drehstrommaschine bis zum Stillstand bewirkt, woraufhin die Drehstrommaschine erneut hochgefahren wird.

[0061] Im Synchronisationsschritt wird die Drehstrommaschine im Leerlaufbetrieb mit einem Synchronisations-Span-

nungsvektor \vec{u}_{sync} angesteuert, der durch die Beziehung $\vec{u}_{sync} = u_{sync} \cdot e^{j2\pi f_{sync} t}$ definiert ist, wobei die gesamte Dauer des Synchronisationsvorgangs durch T_{sync} definiert ist. Der Synchronisations-Spannungsvektor \vec{u}_{sync} rotiert mit einer konstanten Frequenz f_{sync} in einem relativ geringen Frequenzbereich oder bei der Frequenz Null. Die Amplitude u_{sync} des Synchronisations-Spannungsvektors \vec{u}_{sync} nimmt innerhalb des Zeitintervalls zwischen 0 und $k_T \times T_{sync}$ mit $k_T \in (0,1)$ zu. Die Amplitude u_{sync} ändert sich während des Zeitintervalls zwischen $k_T \times T_{sync}$ und T_{sync} linear vom Spannungswert u_{sync} bis auf $k_u \times u_{sync}$ mit $k_u \geq 0$.

[0062] Im Hochlaufschritt wird die Drehstrommaschine im Leerlaufbetrieb mit einem Hochlauf-Spannungsvektor \vec{u}_{up}

angesteuert, der durch die Beziehung $\vec{u}_{up} = U_{up} \cdot e^{j2\pi f_{up} t + \gamma_{up}}$ definiert ist. Dabei ist der Hochlaufvorgang durch die Parameter Gesamthochlaufzeit T_{up} , Endrotationsgeschwindigkeit f_{final} in Hz und Anfangsamplitude u_{up} definiert. Die Amplitude u_{up} des rotierenden Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} nimmt linear von u_{up} bis $u_{up} + \Delta U$ zu, wobei ΔU über die Beziehung $\Delta U = 2\pi \cdot \Psi_M \cdot (f_{final} - f_{sync})$ berechnet wird, in der Ψ_M die magnetische Flussdichte der Drehstrommaschine ist. Die Frequenz f_{up} des rotierenden Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} nimmt linear von f_{sync} bis zu einer Endfrequenz zu. Der Anfangswinkel γ_{up} des Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} am Anfang des Hochlaufvorgangs wird durch die Beziehung $\gamma_{up} = \gamma_{sync} + \Delta\gamma$ berechnet. Dabei ist γ_{sync} der Winkel des Synchronisations-Spannungsvektors \vec{u}_{sync} am Ende des Synchronisationsvorgangs und $\Delta\gamma$ ein Parameter zwischen 0 und $\pm 45^\circ$.

[0063] Im Initialisierungsteilschritt a) des Überprüfungsschritts wird die anfängliche elektrische Winkelgeschwindigkeit

ω_0 über die Beziehung $\omega_0 = |\vec{u}|/\Psi_M$ bestimmt. Der anfängliche elektrische Winkel γ_0 wird über die Beziehung

$\gamma_0 = \angle \vec{u} - \frac{\pi}{2}$ bestimmt. In dem Fall, dass eine negative Hochlaufgeschwindigkeit erforderlich sein sollte, wird diese

über die Beziehung $\omega_0 = -|\vec{u}|/\Psi_M$ mit $\gamma_0 = \angle \vec{u} - \frac{\pi}{2}$ berechnet.

[0064] Im Abbremssteilschritt b) des Überprüfungsschrittes wird der Wechselrichter 10 aktiviert und mit einem konstan-

ten Spannungsvektor $\vec{u} = U_{brk}$ beaufschlagt und bis zu einem Einschaltzeitpunkt T_{on} gewartet. Im Folgenden wird der Wechselrichter 10 deaktiviert und bis zu einem Ausschaltzeitpunkt T_{off} gewartet, bei dem alle Phasenströme den Wert Null annehmen. Es wird dann die Amplitude $|\vec{u}|$ der Gegen-EMK gemessen. In dem Fall, dass die Amplitude $|\vec{u}|$ geringer ist als ein Grenzwert U_{stop} , wird der Bremsvorgang beendet. Andernfalls wird der Abbremssteilschritt b) wiederholt.

[0065] Im Überprüfungsschritt wird nach dem Hochlaufvorgang der Wechselrichter 10 deaktiviert und bis zu einem Ausschaltzeitpunkt T_{off} gewartet, bis alle Phasenströme den Wert Null annehmen. Zudem werden die drei Phasenspan-

nungen u_u , u_v und u_w als Gegen-EMK gemessen und unter Verwendung der Clarke-Transformation der Spannungs-

vektor $\vec{u} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$ der Gegen-EMK berechnet. Es können dann der Betrag $|\vec{u}| = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$ und der Winkel

$\angle \vec{u} = \text{atan}\left(\frac{u_\beta}{u_\alpha}\right)$ des Spannungsvektors der Gegen-EMK berechnet werden. In dem Fall, dass der Betrag größer ist als ein Grenzwert $U_{\text{backEMF low}}$, wird der Initialisierungsteilschritt a), und andernfalls der Abbremssteilschritt b) durchgeführt.

[0066] Mit dem erfindungsgemäßen Hochfahrverfahren können auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschinen und insbesondere auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare geberlose Drehstrom-Synchronmaschinen oder -motoren auf relativ einfache und robuste Weise hochgefahren werden.

[0067] Eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Ansteuerung einer Drehstrommaschine, insbesondere eines geberlosen Synchron-Drehstrommotors, auf der Basis der Pulsbreitenmodulation umfasst einen Drehstrom-Wechselrichter 10, insbesondere einen Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichter, und eine Steuerung. Dabei kann es sich bei dem Drehstrom-Wechselrichter 10 der erfindungsgemäßen Vorrichtung beispielsweise um einen Wechselrichter der in der Fig. 6 dargestellten Art handeln. Über die Steuerung der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist der Drehstrom-Wechselrichter 10 entsprechend dem erfindungsgemäßen Raumzeiger-Modulationsverfahren, entsprechend dem erfindungsgemäßen hybriden Modulationsverfahren und/oder entsprechend dem erfindungsgemäßen Hochfahrverfahren ansteuerbar.

[0068] Das erfindungsgemäße Raumzeiger-Modulationsverfahren, das erfindungsgemäße hybride Modulationsverfahren, das erfindungsgemäße Hochfahrverfahren sowie die erfindungsgemäße Vorrichtung sind insbesondere zur Ansteuerung einer jeweiligen Antriebseinheit einer Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, und beispielsweise zur Ansteuerung einer Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, der in den Fig. 1 bis 5 dargestellten Art anwendbar.

[0069] Die erfindungsgemäße Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, umfasst einen Stator und einen relativ zum Stator um eine Rotorachse drehbar gelagerten Rotor sowie wenigstens eine Antriebseinheit, die eine Drehstrommaschine, insbesondere einen geberlosen Synchron-Drehmotor umfasst, die bzw. der entsprechend dem erfindungsgemäßen Raumzeiger-Modulationsverfahren, entsprechend dem erfindungsgemäßen hybriden Modulationsverfahren, entsprechend dem erfindungsgemäßen Hochfahrverfahren und/oder über die erfindungsgemäße Vorrichtung ansteuerbar ist.

Bezugszeichenliste

[0070]

10	Drehstrom-Wechselrichter
111	Turbomolekularpumpe
113	Einlassflansch
40 115	Pumpeneinlass
117	Pumpenauslass
119	Gehäuse
121	Unterteil
123	Elektronikgehäuse
45 125	Elektromotor
127	Zubehöranschluss
129	Datenschnittstelle
131	Stromversorgungsanschluss
133	Fluteinlass
50 135	Sperrgasanschluss
137	Motorraum
139	Kühlmittelanschluss
141	Unterseite
143	Schraube
55 145	Lagerdeckel
147	Befestigungsbohrung
148	Kühlmittelleitung
149	Rotor

	151	Rotationsachse
	153	Rotorwelle
	155	Rotorscheibe
	157	Statorscheibe
5	159	Abstandsring
	161	Rotornabe
	163	Holweck-Rotorhülse
	165	Holweck-Rotorhülse
	167	Holweck-Statorhülse
10	169	Holweck-Statorhülse
	171	Holweck-Spalt
	173	Holweck-Spalt
	175	Holweck-Spalt
	179	Verbindungskanal
15	181	Wälzlager
	183	Permanentmagnetlager
	185	Spritzmutter
	187	Scheibe
	189	Einsatz
20	191	rotorseitige Lagerhälfte
	193	statorseitige Lagerhälfte
	195	Ringmagnet
	197	Ringmagnet
	199	Lagerspalt
25	201	Trägerabschnitt
	203	Trägerabschnitt
	205	radiale Strebe
	207	Deckelelement
	209	Stützring
30	211	Befestigungsring
	213	Tellerfeder
	215	Not- bzw. Fanglager
	217	Motorstator
	219	Zwischenraum
35	221	Wandung
	223	Labyrinthdichtung
	U, V, W	Phasen des Wechselrichters
	U_{dc}	Zwischenkreisspannung
	T_{up}	Gesamthochlaufzeit
40	U_{up}	Anfangsamplitude
	Ψ_M	magnetische Flussdichte der Drehstrommaschine
	T_{on}	Einschaltzeitpunkt
	T_{off}	Ausschaltzeitpunkt
	u_{U0}, u_{V0}, u_{W0}	anfängliche Soll-Spannungspotentiale der Phasen U, V, W
45	$u_{U\ final}, u_{V\ final}, u_{W\ final}$	endgültige Ausgangsspannungssignale der Phasen U, V, W
	u_{Min}	minimaler Wert
	λ_ζ	Taktverhältnis für eine jeweilige Phase ζ
	u_α	Realteil eines Spannungsvektors
	u_β	Imaginärteil eines Spannungsvektors
50	\underline{u}_{sync}	Synchronisations-Spannungsvektor
	\underline{u}_{sync}	Amplitude des Synchronisations-Spannungsvektors
	\vec{u}_{up}	Hochlauf-Spannungsvektor
	u_{up}	Amplitude des Hochlauf-Spannungsvektors
	f_{final}	Endrotationsgeschwindigkeit
55	γ_{up}	Anfangswinkel des Hochlauf-Spannungsvektors
	γ_{sync}	Winkel des Synchronisations-Spannungsvektors am Ende des Synchronisationsvorgangs
	ω_0	anfängliche elektrische Winkelgeschwindigkeit

Patentansprüche

1. Raumzeiger-Modulationsverfahren zur Ansteuerung eines Drehstrom-Wechselrichters (10), insbesondere eines Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichters, für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine, insbesondere eine Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, wobei während einer jeweiligen Pulsweitenmodulations-Periode zumindest eine der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) nicht geschaltet bzw. höchstens zwei der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) geschaltet werden.
2. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** ausgehend von einem gegebenen Soll-Spannungsraumzeiger zunächst die drei Soll-Spannungspotentiale u_{U0} , u_{V0} und u_{W0} der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) berechnet, von den berechneten drei Soll-Spannungspotentialen u_{U0} , u_{V0} und u_{W0} der minimale Wert u_{Min} ermittelt und die endgültigen Ausgangsspannungspotentiale $u_{U\ final}$, $u_{V\ final}$ und $u_{W\ final}$ für die drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) unter Berücksichtigung des ermittelten minimalen Werts u_{Min} berechnet werden.

3. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die endgültigen Ausgangsspannungspotentiale $u_{U\ final}$, $u_{V\ final}$ und $u_{W\ final}$ für die drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) über die folgenden Beziehungen berechnet werden:

$$u_{U\ final} = u_{U0} - u_{Min}, \quad u_{V\ final} = u_{V0} - u_{Min} \quad \text{und} \quad u_{W\ final} = u_{W0} - u_{Min}.$$

4. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach zumindest einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Taktverhältnis λ für eine jeweilige Phase U, V, W des Wechselrichters (10) über die folgenden Beziehungen berechnet wird: $\lambda_U = u_{U\ final} / U_{dc}$, $\lambda_V = u_{V\ final} / U_{dc}$ und $\lambda_W = u_{W\ final} / U_{dc}$, wobei U_{dc} die Zwischenkreisspannung ist.
5. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach zumindest einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die drei Soll-Spannungspotentiale u_{U0} , u_{V0} und u_{W0} der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) unter Verwendung einer inversen Clarke-Transformation aus zwei Spannungen u_α und u_β in einem orthogonalen Koordinatensystem berechnet werden.
6. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden Spannungen u_α und u_β aus einem Spannungsvektor in Form eines Betrags und eines Winkels berechnet werden.
7. Hybrides Modulationsverfahren zur Ansteuerung eines Drehstrom-Wechselrichters (10), insbesondere eines Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichters, für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine, insbesondere eine Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, wobei für relativ größere Phasenströme das Raumzeiger-Modulationsverfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche und für relativ kleinere Phasenströme ein herkömmliches Modulationsverfahren angewandt wird, bei dem alle drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) zum Spannungsschalten beitragen.
8. Verfahren zum Hochfahren einer auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbaren geberlosen Drehstrommaschine, insbesondere einer geberlosen Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, insbesondere unter Anwendung des Raumzeiger-Modulationsverfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6 und/oder des hybriden Modulationsverfahrens nach Anspruch 7, wobei das Hochfahrverfahren einen Synchronisationsschritt, einen Hochfahrschritt und einen Überprüfungsschritt umfasst und im Überprüfungsschritt in dem Fall, dass das Hochfahren erfolgreich verlaufen ist, entsprechend einem Teilschritt a) ein interner Beobachter für die geberlose feldorientierte Maschinenregelung initialisiert und das Hochfahrverfahren beendet wird, und im Fall eines Scheiterns des Hochfahrens entsprechend einem Teilschritt b) ein Abbremsen der Drehstrommaschine bis zum Stillstand bewirkt wird, woraufhin die Drehstrommaschine erneut hochgefahren wird.
9. Hochfahrverfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Drehstrommaschine im Synchronisationsschritt im Leerlaufbetrieb mit einem

Synchronisations-Spannungsvektor \vec{u}_{sync} angesteuert wird, der durch die Beziehung $\vec{u}_{\text{sync}} = U_{\text{sync}} \cdot e^{j2\pi f_{\text{sync}} t}$ definiert ist, wobei die gesamte Dauer des Synchronisationsvorgangs durch T_{sync} definiert ist, und/oder der Synchronisations-Spannungsvektor \vec{u}_{sync} mit einer konstanten Frequenz f_{sync} in einem relativ geringen Frequenzbereich oder bei der Frequenz Null rotiert, und/oder die Amplitude u_{sync} des Synchronisations-Spannungsvektors \vec{u}_{sync} innerhalb des Zeitintervalls zwischen 0 und $k_T \times T_{\text{sync}}$ mit $k_T \in (0,1)$ zunimmt, und/oder die Amplitude u_{sync} sich während des Zeitintervalls zwischen $k_T \times T_{\text{sync}}$ und T_{sync} linear vom Spannungswert u_{sync} bis auf $k_U \times u_{\text{sync}}$ mit $k_U \geq 0$ ändert.

10. Hochfahrverfahren nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Drehstrommaschine im Hochlaufschritt im Leerlaufbetrieb mit einem Hochlauf-Spannungsvektor \vec{u}_{up} angesteuert wird, der durch die Beziehung

$$\vec{u}_{\text{up}} = U_{\text{up}} \cdot e^{j2\pi f_{\text{up}} t + \gamma_{\text{up}}}$$

definiert ist, wobei der Hochlaufvorgang durch die Parameter Gesamthochlaufzeit T_{up} , Endrotationsgeschwindigkeit f_{final} in Hz und Anfangsamplitude U_{up} definiert ist, und wobei die Amplitude u_{up} des rotierenden Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} linear von U_{up} bis $U_{\text{up}} + \Delta U$ zunimmt und ΔU über die Beziehung $\Delta U = 2\pi \cdot \Psi_M \cdot (f_{\text{final}} - f_{\text{sync}})$ berechnet wird, in der Ψ_M die magnetische Flussdichte der Drehstrommaschine ist, und/oder die Frequenz f_{up} des rotierenden Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} linear von f_{sync} bis zu einer Endfrequenz zunimmt, und/oder der Anfangswinkel γ_{up} des Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} am Anfang des Hochlaufvorgangs durch die Beziehung $\gamma_{\text{up}} = \gamma_{\text{sync}} + \Delta\gamma$ berechnet wird, wobei γ_{sync} der Winkel des Synchronisations-Spannungsvektors \vec{u}_{sync} am Ende des Synchronisationsvorgangs und $\Delta\gamma$ ein Parameter zwischen 0 und $\pm 45^\circ$ ist.

11. Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Initialisierungsteilschritt a) des Überprüfungsschrittes die anfängliche elektrische Winkelgeschwindigkeit ω_0 über die Beziehung $\omega_0 = |\vec{u}|/\Psi_M$ bestimmt wird, der anfängliche elektrische

Winkel γ_0 über die Beziehung $\gamma_0 = \angle \vec{u} - \frac{\pi}{2}$ bestimmt wird, und

in dem Fall, dass eine negative Endhochlaufgeschwindigkeit erforderlich sein sollte, diese über die Beziehung

$$\omega_0 = |\vec{u}|/\Psi_M \quad \text{mit} \quad \gamma_0 = \angle \vec{u} + \frac{\pi}{2} \quad \gamma_0 \text{ berechnet wird.}$$

12. Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Abbremssteilschritt b) des Überprüfungsschrittes der Wechselrichter (10) aktiviert

und mit einem konstanten Spannungsvektor $\vec{u} = U_{\text{brk}}$ beaufschlagt und bis zu einem Einschaltzeitpunkt T_{on} gewartet wird,

der Wechselrichter (10) deaktiviert und bis zu einem Ausschaltzeitpunkt T_{off} gewartet wird, bei dem alle Phasenströme den Wert Null annehmen, die Amplitude \bar{u} der Gegen-EMK gemessen wird,

in dem Fall, dass die Amplitude $|\bar{u}|$ geringer als ein Grenzwert U_{stop} ist, der Bremsvorgang beendet wird, und andernfalls der Abbremssteilschritt b) wiederholt wird.

13. Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Überprüfungsschritt nach dem Hochlaufvorgang der Wechselrichter (10) deaktiviert und bis zu einem Ausschaltzeitpunkt T_{off} gewartet wird, bis alle Phasenströme den Wert Null annehmen, die drei Phasenspannungen u_U , u_V und u_W als Gegen-EMK gemessen werden und unter Verwendung der Clarke-

Transformation der Spannungsvektor $\vec{u} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$ der Gegen-EMK berechnet wird,

$$|\vec{u}| = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad \text{und der Winkel} \quad \angle \vec{u} = \text{atan}\left(\frac{u_\beta}{u_\alpha}\right)$$

der Betrag berechnet werden, und

in dem Fall, dass der Betrag größer ist als ein Grenzwert $U_{\text{backEMF low}}$, der Initialisierungsteilschritt a) und andernfalls der Abbremssteilschritt b) durchgeführt wird.

14. Vorrichtung zur Ansteuerung einer Drehstrommaschine, insbesondere eines geberlosen Synchron-Drehstrommotors, auf der Basis der Pulsbreitenmodulation, insbesondere zur Ansteuerung einer Drehstrommaschine bzw. eines geberlosen Synchron-Drehstrommotors einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, mit einem Drehstrom-Wechselrichter(10), insbesondere einem Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichter, und einer Steuerung, wobei der Drehstrom-Wechselrichter (10) über die Steuerung entsprechend dem Raumzeiger-Modulationsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, entsprechend dem hybriden Modulationsverfahren nach Anspruch 7 und/oder entsprechen dem Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13 ansteuerbar ist.
15. Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, mit einem Stator und einem relativ zum Stator um eine Rotorachse drehbar gelagerten Rotor und wenigstens einer Antriebseinheit, wobei die Antriebseinheit eine Drehstrommaschine, insbesondere einen geberlosen Synchron-Drehstrommotor, umfasst, die bzw. der entsprechend dem Raumzeiger-Modulationsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, entsprechend dem hybriden Modulationsverfahren nach Anspruch 7, nach dem Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13 und/oder über eine Vorrichtung nach Anspruch 14 ansteuerbar ist.

Geänderte Patentansprüche gemäss Regel 137(2) EPÜ.

1. Raumzeiger-Modulationsverfahren zur Ansteuerung eines Drehstrom-Wechselrichters (10), insbesondere eines Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichters, für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine, insbesondere eine Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, wobei während einer jeweiligen Pulsweitenmodulations-Periode zumindest eine der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) nicht geschaltet bzw. höchstens zwei der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) geschaltet werden.

2. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** ausgehend von einem gegebenen Soll-Spannungsraumzeiger zunächst die drei Soll-Spannungspotentiale u_{U0} , u_{V0} und u_{W0} der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) berechnet, von den berechneten drei Soll-Spannungspotentialen u_{U0} , u_{V0} und u_{W0} der minimale Wert u_{Min} , d.h. das Kleinste dieser drei Soll-Spannungspotentiale, ermittelt und die endgültigen Ausgangsspannungspotentiale $u_{U \text{ final}}$, $u_{V \text{ final}}$ und $u_{W \text{ final}}$ für die drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) unter Berücksichtigung des ermittelten minimalen Werts u_{Min} berechnet werden.

3. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die endgültigen Ausgangsspannungspotentiale $u_{U \text{ final}}$, $u_{V \text{ final}}$ und $u_{W \text{ final}}$ für die drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) über die folgenden Beziehungen berechnet werden:

$$u_{U \text{ final}} = u_{U0} - u_{\text{Min}}, \quad u_{V \text{ final}} = u_{V0} - u_{\text{Min}} \quad \text{und} \quad u_{W \text{ final}} = u_{W0} - u_{\text{Min}}.$$

4. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach zumindest einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Taktverhältnis λ für eine jeweilige Phase U, V, W des Wechselrichters (10) über die folgenden Beziehungen berechnet wird: $\lambda_U = u_{U \text{ final}} / U_{\text{dc}}$, $\lambda_V = u_{V \text{ final}} / U_{\text{dc}}$ und $\lambda_W = u_{W \text{ final}} / U_{\text{dc}}$, wobei U_{dc} die Zwischenkreisspannung ist.

5. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach zumindest einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die drei Soll-Spannungspotentiale u_{U0} , u_{V0} und u_{W0} der drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) unter Verwendung einer inversen Clarke-Transformation aus zwei Spannungen u_α und u_β in

einem orthogonalen Koordinatensystem berechnet werden.

6. Raumzeiger-Modulationsverfahren nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet, dass die beiden Spannungen u_α und u_β aus einem Spannungsvektor in Form eines Betrags und eines Winkels berechnet werden.

7. Hybrides Modulationsverfahren zur Ansteuerung eines Drehstrom-Wechselrichters (10), insbesondere eines Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichters, für eine auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbare Drehstrommaschine, insbesondere eine Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, wobei für relativ größere Phasenströme das Raumzeiger-Modulationsverfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche und für relativ kleinere Phasenströme ein herkömmliches Modulationsverfahren angewandt wird, bei dem alle drei Phasen U, V, W des Wechselrichters (10) zum Spannungsschalten beitragen.

8. Verfahren zum Hochfahren einer auf der Basis der Pulsweitenmodulation betreibbaren geberlosen Drehstrommaschine, insbesondere einer geberlosen Drehstrommaschine einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, insbesondere unter Anwendung des Raumzeiger-Modulationsverfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6 und/oder des hybriden Modulationsverfahrens nach Anspruch 7, wobei das Hochfahrverfahren einen Synchronisationsschritt, einen Hochfahrschritt und einen Überprüfungsschritt umfasst und im Überprüfungsschritt in dem Fall, dass das Hochfahren erfolgreich verlaufen ist, entsprechend einem Teilschritt a) ein interner Beobachter für die geberlose felderorientierte Maschinenregelung initialisiert und das Hochfahrverfahren beendet wird, und im Fall eines Scheiterns des Hochfahrens entsprechend einem Teilschritt b) ein Abbremsen der Drehstrommaschine bis zum Stillstand bewirkt wird, woraufhin die Drehstrommaschine erneut hochgefahren wird.

9. Hochfahrverfahren nach Anspruch 8,
dadurch gekennzeichnet, dass die Drehstrommaschine im Synchronisationsschritt im Leerlaufbetrieb mit einem Synchronisations-Spannungsvektor \vec{u}_{sync} angesteuert wird, der durch die Beziehung $\vec{u}_{sync} = u_{sync} \cdot e^{j2\pi f_{sync} t}$ definiert ist, wobei die gesamte Dauer des Synchronisationsvorgangs bzw. Synchronisationsschritts durch T_{sync} definiert ist, und/oder der Synchronisations-Spannungsvektor \vec{u}_{sync} mit einer konstanten Frequenz f_{sync} in einem relativ geringen Frequenzbereich oder bei der Frequenz Null rotiert, und/oder die Amplitude u_{sync} des Synchronisations-Spannungsvektors \vec{u}_{sync} innerhalb des Zeitintervalls zwischen 0 und $k_T \times T_{sync}$ mit $k_T \in (0, 1)$ zunimmt, und/oder die Amplitude u_{sync} sich während des Zeitintervalls zwischen $k_T \times T_{sync}$ und T_{sync} linear vom Spannungswert u_{sync} bis auf $k_U \times u_{sync}$ mit $k_U \geq 0$ ändert.

10. Hochfahrverfahren nach Anspruch 8 oder 9,
dadurch gekennzeichnet, dass die Drehstrommaschine im Hochlaufschritt im Leerlaufbetrieb mit einem Hochlauf-Spannungsvektor \vec{u}_{up} angesteuert wird, der durch die Beziehung

$$\vec{u}_{up} = U_{up} \cdot e^{j2\pi f_{up} \cdot t + \gamma_{up}}$$

definiert ist, wobei der Hochlaufvorgang durch die Parameter Gesamthochlaufzeit T_{up} , Endrotationsgeschwindigkeit f_{final} in Hz und Anfangsamplitude U_{up} definiert ist, und wobei die Amplitude u_{up} des rotierenden Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} linear von U_{up} bis $U_{up} + \Delta U$ zunimmt und ΔU über die Beziehung $\Delta U = 2\pi \cdot \Psi_M \cdot (f_{final} - f_{sync})$ berechnet wird, in der Ψ_M die magnetische Flussdichte der Drehstrommaschine ist, und/oder die Frequenz f_{up} des rotierenden Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} linear von f_{sync} bis zu einer Endfrequenz zunimmt, und/oder der Anfangswinkel γ_{up} des Hochlauf-Spannungsvektors \vec{u}_{up} am Anfang des Hochlaufvorgangs durch die Beziehung $\gamma_{up} = \gamma_{sync} + \Delta\gamma$ berechnet wird, wobei γ_{sync} der Winkel des Synchronisations-Spannungsvektors \vec{u}_{sync} am Ende des Synchronisationsvorgangs und $\Delta\gamma$ ein Parameter zwischen 0 und $\pm 45^\circ$ ist.

11. Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10,
dadurch gekennzeichnet, dass im zur Initialisierung vorgesehenen Teilschritt a) des Überprüfungsschrittes die anfängliche elektrische Winkelgeschwindigkeit ω_0 über die Beziehung $\omega_0 = |\vec{u}|/\Psi_M$ bestimmt wird,

$$\gamma_0 = \angle \vec{u} - \frac{\pi}{2}$$

der anfängliche elektrische Winkel γ_0 über die Beziehung $\omega_0 = |\vec{u}|/\Psi_M$ mit

$$\gamma_0 = \angle \vec{u} + \frac{\pi}{2}$$

berechnet wird.

12. Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11,

dadurch gekennzeichnet, dass im zum Abbremsen vorgesehenen Teilschritt b) des Überprüfungsschrittes der Wechselrichter (10) aktiviert und mit einem konstanten Spannungsvektor $\vec{u} = U_{brk}$ beaufschlagt und bis zu einem Einschaltzeitpunkt T_{on} gewartet wird,

der Wechselrichter (10) deaktiviert und bis zu einem Ausschaltzeitpunkt T_{off} gewartet wird, bei dem alle Phasenströme den Wert Null annehmen, die Amplitude $|\vec{u}|$ der Gegen-EMK gemessen wird, in dem Fall, dass die Amplitude $|\vec{u}|$ der Gegen-EMK geringer als ein Grenzwert U_{stop} ist, der Bremsvorgang beendet wird, und andernfalls der Abbremssteilschritt b) wiederholt wird.

13. Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 12,

dadurch gekennzeichnet, dass im Überprüfungsschritt nach dem Hochlaufvorgang der Wechselrichter (10) deaktiviert und bis zu einem Ausschaltzeitpunkt T_{off} gewartet wird, bis alle Phasenströme den Wert Null annehmen, die drei Phasenspannungen u_U, u_V und u_W als Gegen-EMK gemessen werden und unter Verwendung der Clarke-Transformation der Spannungsvektor $\vec{u} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$ der Gegen-EMK berechnet wird,

$$|\vec{u}| = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad \angle \vec{u} = \text{atan} \left(\frac{u_\beta}{u_\alpha} \right)$$

der Betrag und der Winkel des Spannungsvektors der Gegen-EMK berechnet werden, und

in dem Fall, dass der Betrag größer ist als ein Grenzwert $U_{backEMF\ low}$, der Initialisierungsteilschritt a) und andernfalls der Abbremssteilschritt b) durchgeführt wird.

14. Vorrichtung zur Ansteuerung einer Drehstrommaschine, insbesondere eines geberlosen Synchron-Drehstrommotors, auf der Basis der Pulsbreitenmodulation, insbesondere zur Ansteuerung einer Drehstrommaschine bzw. eines geberlosen Synchron-Drehstrommotors einer Vakuumpumpe, bevorzugt einer Turbomolekularpumpe, mit einem Drehstrom-Wechselrichter(10), insbesondere einem Drehstrom-Zweipunkt-Wechselrichter, und einer Steuerung, wobei der Drehstrom-Wechselrichter (10) über die Steuerung entsprechend dem Raumzeiger-Modulationsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, entsprechend dem hybriden Modulationsverfahren nach Anspruch 7 und/oder entsprechen dem Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13 ansteuerbar ist.

15. Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, mit einem Stator und einem relativ zum Stator um eine Rotorachse drehbar gelagerten Rotor und wenigstens einer Antriebseinheit, wobei die Antriebseinheit eine Drehstrommaschine, insbesondere einen geberlosen Synchron-Drehstrommotor, umfasst, die bzw. der entsprechend dem Raumzeiger-Modulationsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, entsprechend dem hybriden Modulationsverfahren nach Anspruch 7, nach dem Hochfahrverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13 und/oder über eine Vorrichtung nach Anspruch 14 ansteuerbar ist.

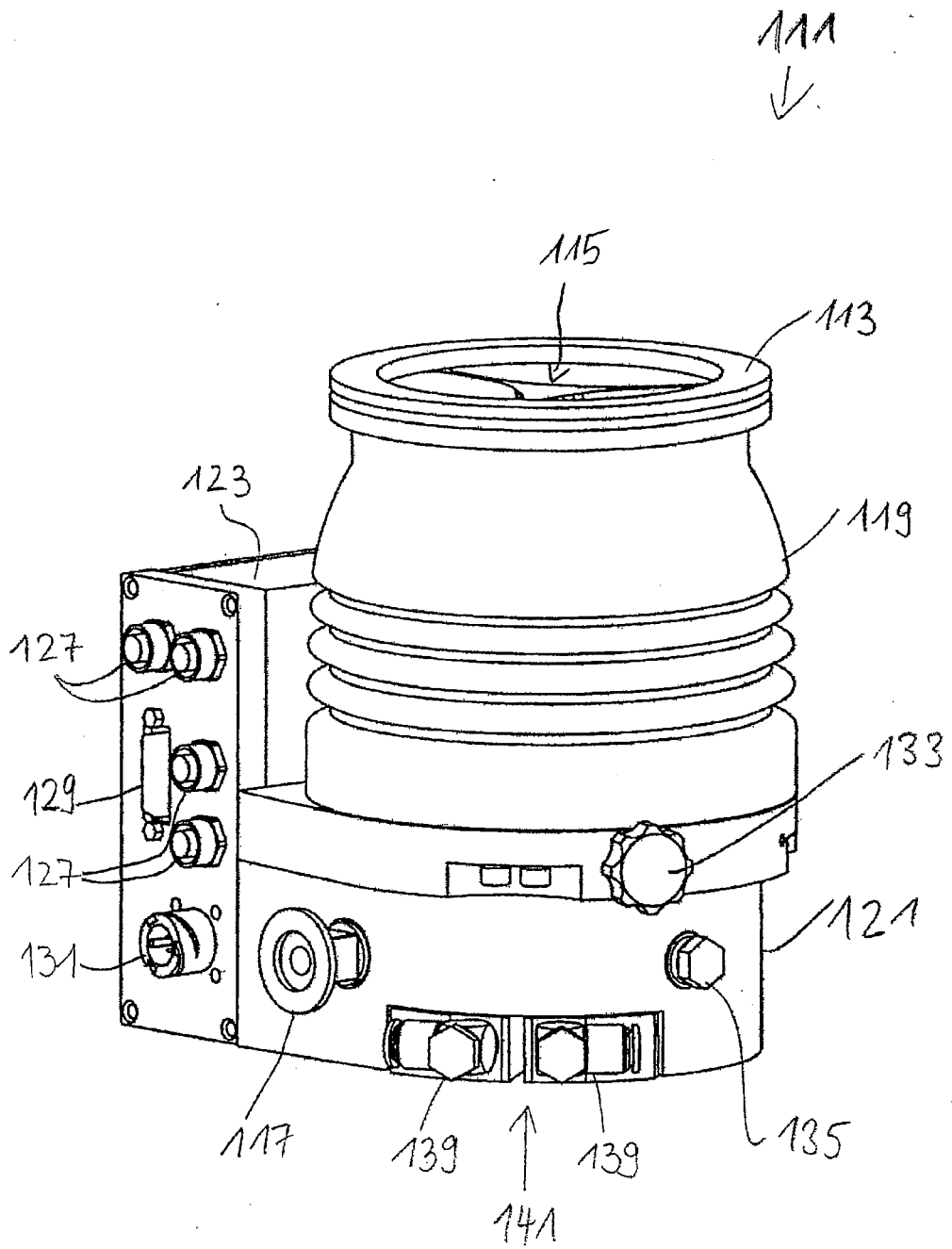


Fig. 1

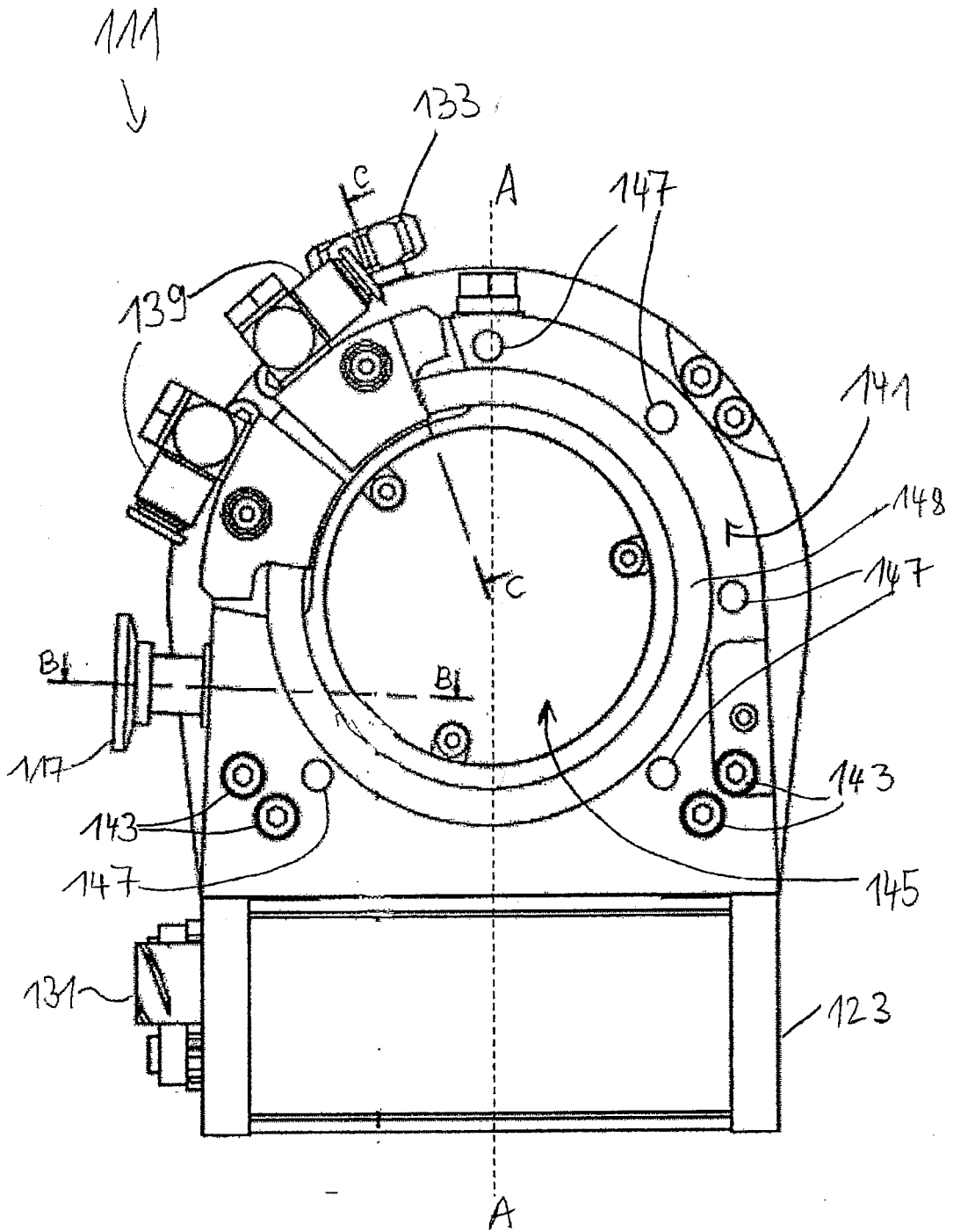


Fig. 2

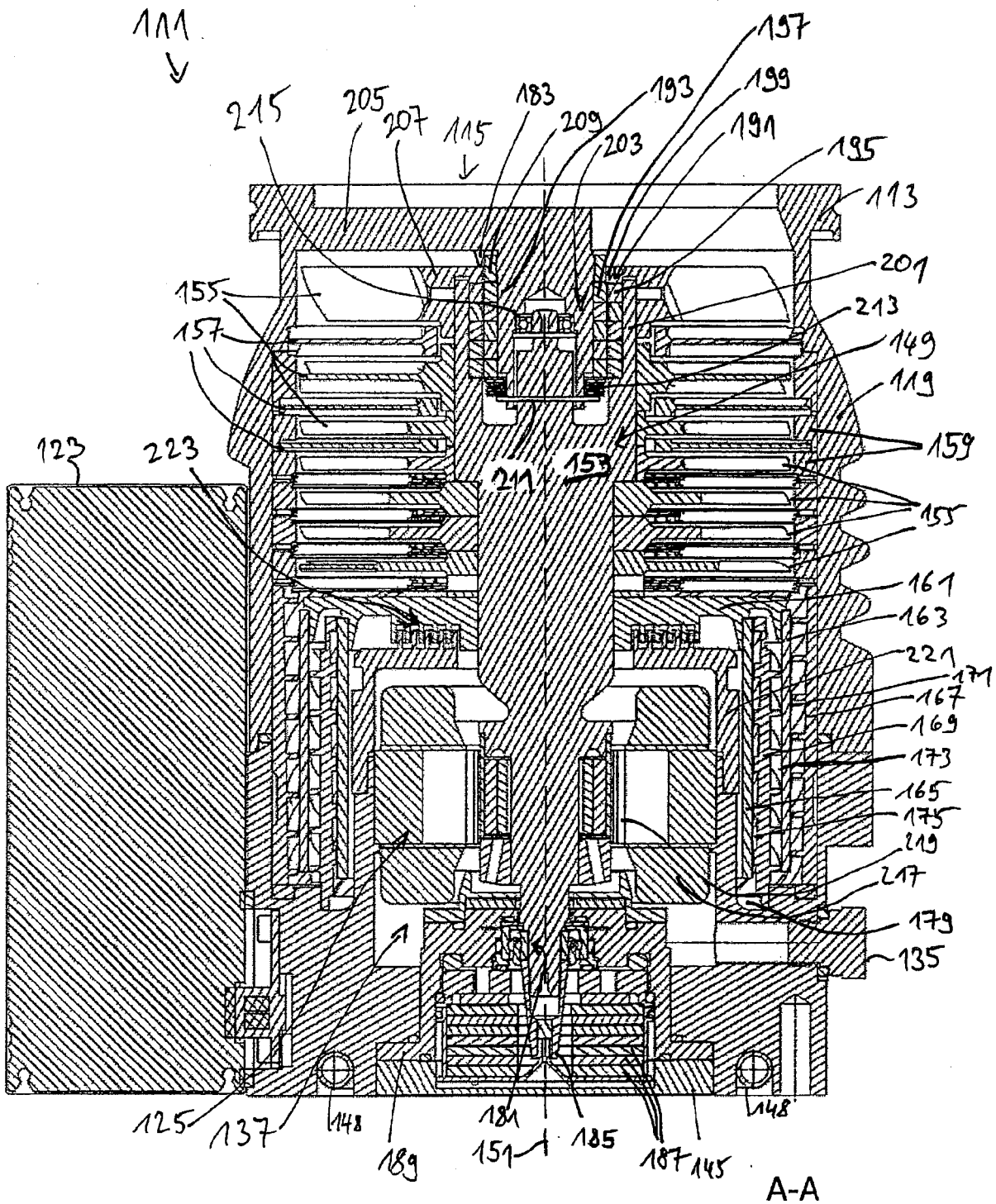


Fig. 3

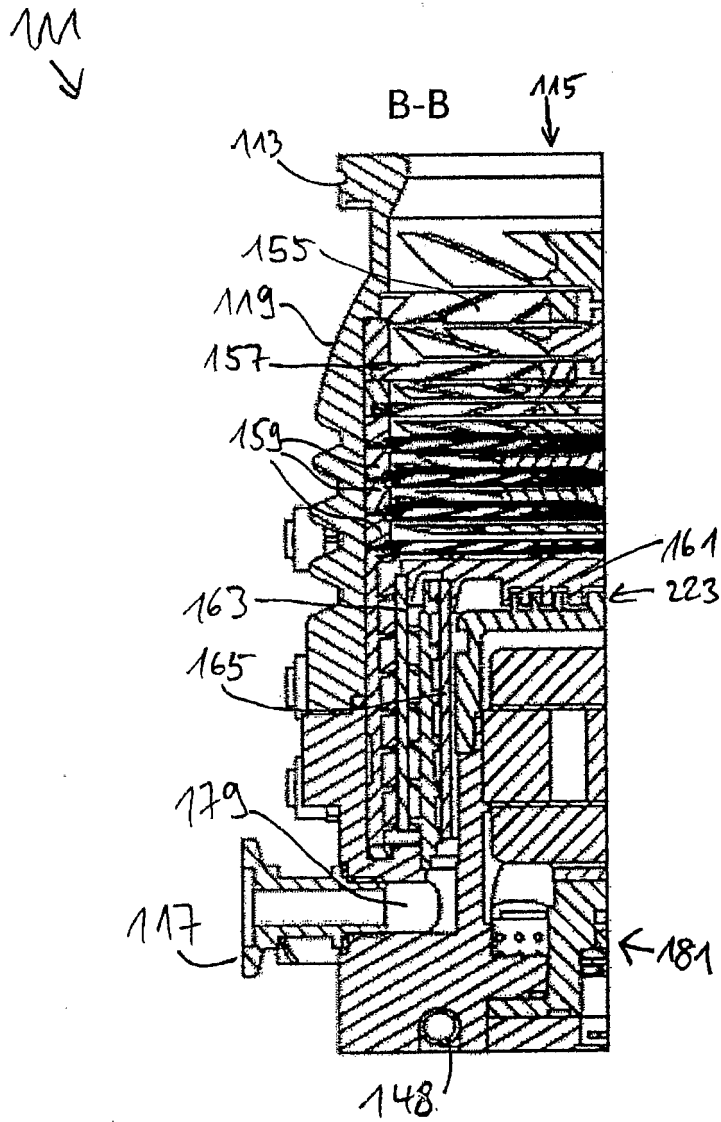


Fig. 4

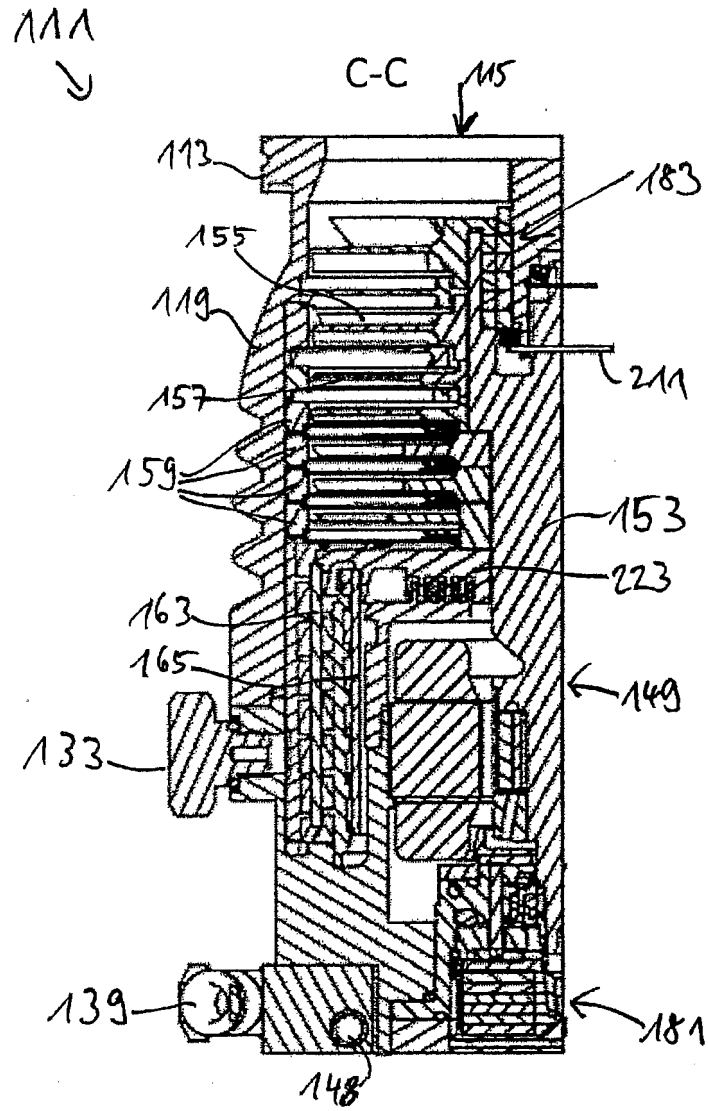


Fig. 5

Fig. 6

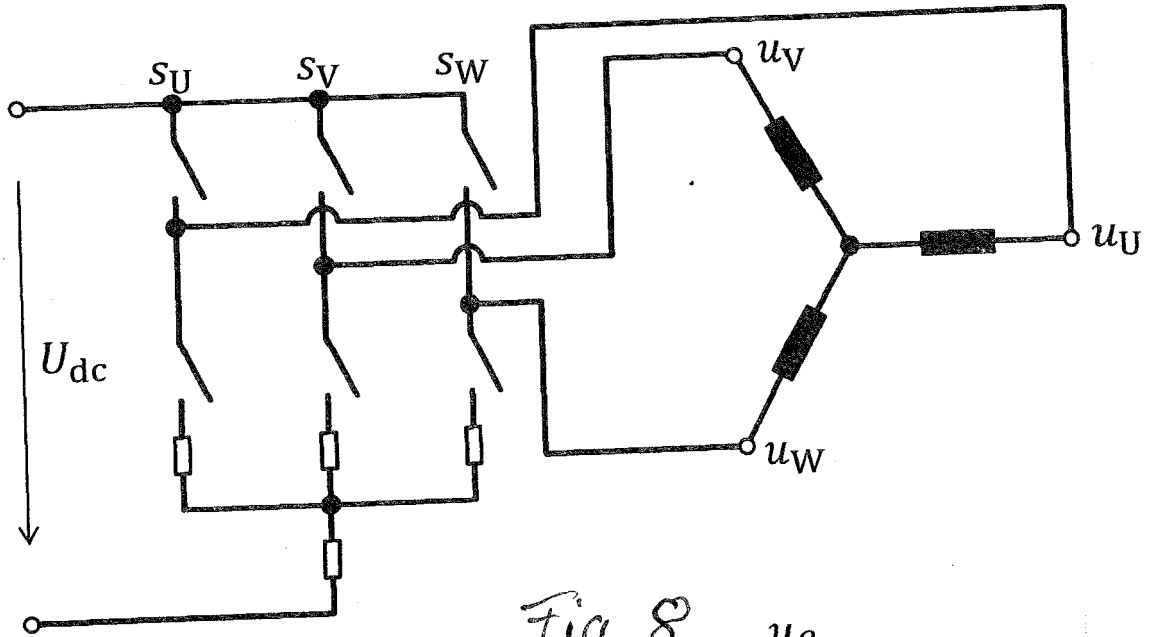


Fig. 8

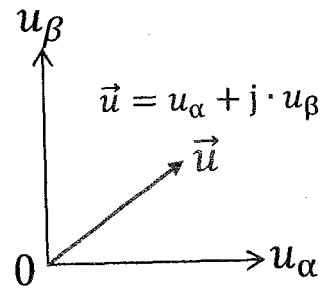


Fig. 7

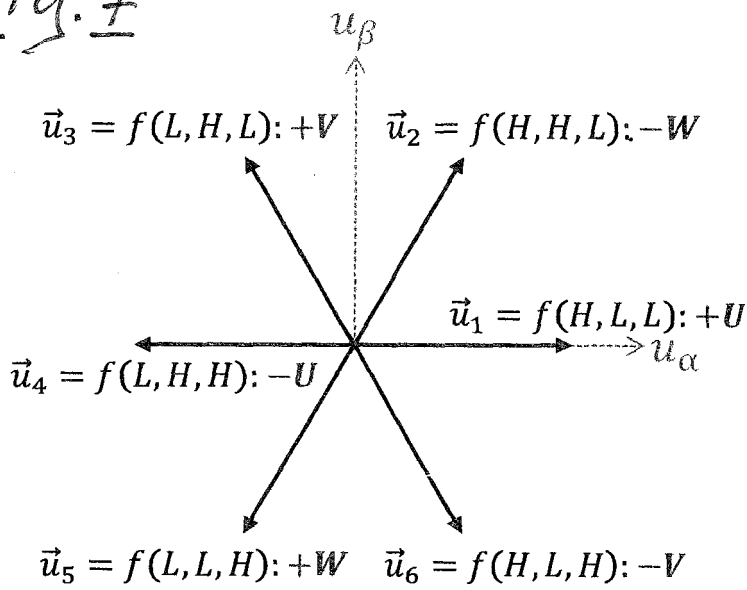


Fig. 9

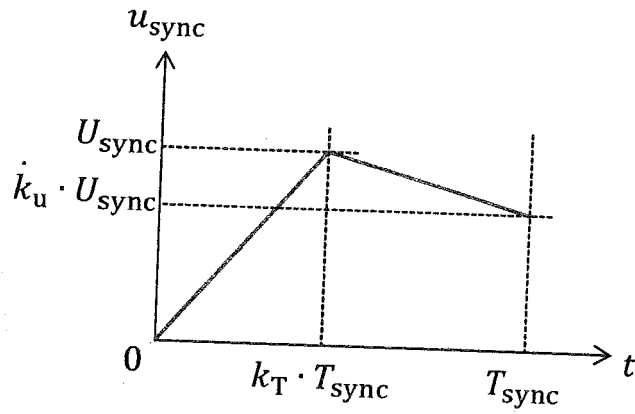


Fig. 10

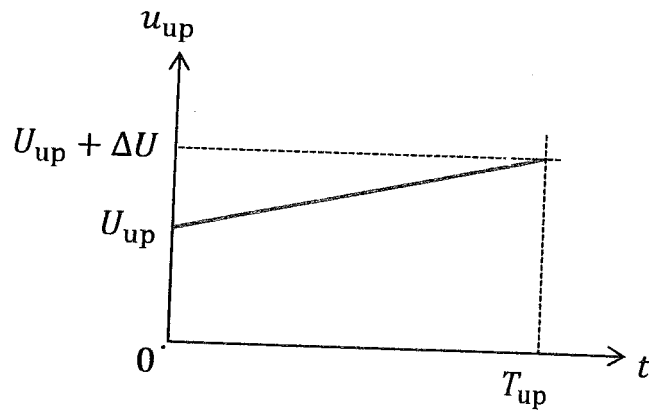
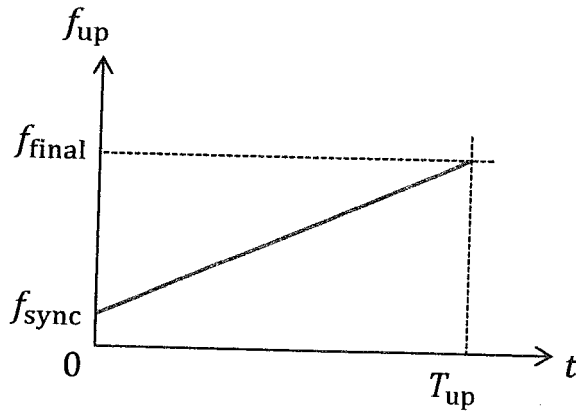


Fig. 11





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 17 17 9017

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	<p>AYYANAR R ET AL: "Start-up, short-circuit and dynamic characteristics of the full-load-range ZVS hybrid converter", 32ND.ANNUAL IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE. PESC 2001. CONFERENCE PROCEEDINGS. VANCOUVER, CANADA, JUNE 17 - 21, 2001; [ANNUAL POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE], NEW YORK, NY : IEEE, US, Bd. 1, 17. Juni 2001 (2001-06-17), Seiten 26-30, XP010559119, DOI: 10.1109/PESC.2001.953990 ISBN: 978-0-7803-7067-8 * Teil II * * Abbildung 2 *</p>	1-15	<p>INV. H02P6/20 H02P21/34 H02P21/36</p> <p>ADD. F04D25/06 H02M5/00</p>
X	<p>EP 2 991 206 A1 (CHANGZHOU LEILI MOTOR SCIENCE & TECH CO LTD [CN]) 2. März 2016 (2016-03-02) * Abbildungen 8, 9 *</p>	1-15	
A	<p>CN 203 151 429 U (NANJING INST TECHNOLOGY) 21. August 2013 (2013-08-21) * Zusammenfassung * * Abbildung 1 *</p>	1-15	<p>RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)</p> <p>H02P F04D H02M</p>

-/--			
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 1. Dezember 2017	Prüfer Bartal, P
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur			

EPO FORM 1503 03 82 (P04C03)



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 17 17 9017

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	<p>MOHAN J ET AL: "Performance evaluation of two level unidirectional PWM rectifiers employing space vector modulation (SVM) technique", RECENT ADVANCEMENTS IN ELECTRICAL, ELECTRONICS AND CONTROL ENGINEERING (ICONRAEECE), 2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, 15. Dezember 2011 (2011-12-15), Seiten 384-392, XP032096161, DOI: 10.1109/ICONRAEECE.2011.6129803 ISBN: 978-1-4577-2146-5 * Teil III * * Abbildungen 1-3 *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15	
A	<p>CHEN MIN ET AL: "A Unified Space Vector Pulse Width Modulation for Dual Two-level Inverter System", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, USA, Bd. 32, Nr. 2, 1. Februar 2017 (2017-02-01), Seiten 889-893, XP011634081, ISSN: 0885-8993, DOI: 10.1109/TPEL.2016.2585223 [gefunden am 2016-11-11] * Abbildungen 2-5, 7, 8 *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 1. Dezember 2017	Prüfer Bartal, P
<p>KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE</p> <p>X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur</p>		<p>T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument</p> <p>..... & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument</p>	

EPO FORM 1503 03/02 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 17 17 9017

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

01-12-2017

10
15
20
25
30
35
40
45
50
55

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 2991206 A1	02-03-2016	CN 104124849 A EP 2991206 A1 WO 2014173232 A1	29-10-2014 02-03-2016 30-10-2014

CN 203151429 U	21-08-2013	KEINE	

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82