

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
05. August 2021 (05.08.2021)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2021/151950 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
H02P 29/50 (2016.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2021/051869

(22) Internationales Anmeldedatum:
27. Januar 2021 (27.01.2021)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2020 201 200.8
31. Januar 2020 (31.01.2020) DE

(71) Anmelder: **ROBERT BOSCH GMBH** [DE/DE]; Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (DE).

(72) Erfinder: **FASSNACHT, Jochen**; Justinus-Kerner-Str. 4, 75365 Calw (DE). **REIMANN, Sven**; Mathilde-Hasen-

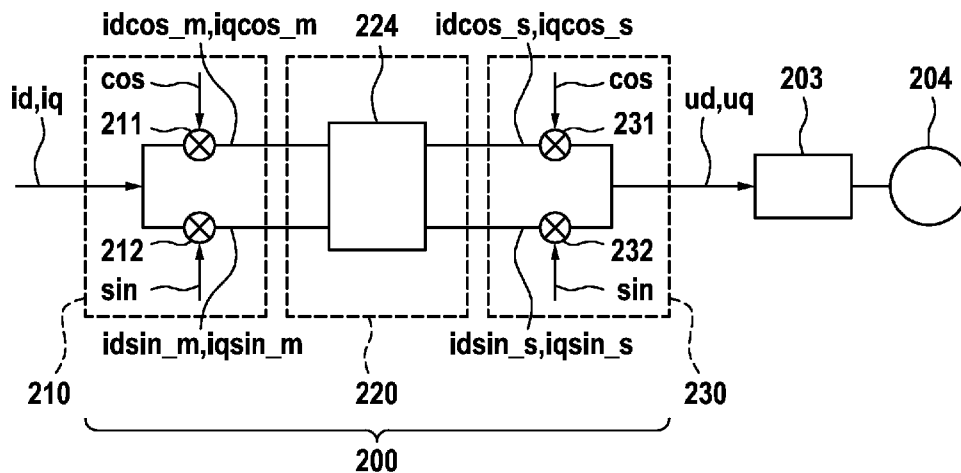
kamp-Str. 27, 71272 Remmingen (DE). **GAENZLE, David**; Christophstrasse 41, 70771 Leinfelden-Echterdingen (DE). **MANDERLA, Maximilian**; Eckstr. 9, 71638 Ludwigsburg (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR CONTROLLING AN ELECTRIC MACHINE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR REGELUNG EINER ELEKTRISCHEN MASCHINE

Fig. 1



(57) **Abstract:** The invention relates to a method (100) for controlling an electric machine (204) with a harmonics controller (200), which comprises an input stage (210), a controller (220) and an output stage (230), comprising the following steps: determining (110) at least two measurement variables (id, iq); determining (120) cosine measurement portions and sine measurement portions (idcos_m, idsin_m, iqcos_m, iqsin_m); determining (130) the cosine control variables and sine control variables (idcos_s, idsin_s, iqcos_s, iqsin_s); determining (140) at least two control variables (ud, uq); and actuating the electric machine (204) according to the determined control variables (ud, uq).

(57) **Zusammenfassung:** Die vorliegende Erfindung betrifft eine Verfahren (100) zur Regelung einer elektrischen Maschine (204) mit einem Oberwellenregler (200), welcher eine Eingangsstufe (210), einen Regler (220) und eine Ausgangsstufe (230) umfasst, mit den Schritten: Ermitteln (110) mindestens zweier Messgrößen (id, iq); Ermitteln (120) von Cosinussmessanteilen und Sinussmessanteilen



WO 2021/151950 A1

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

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

- 1 -

Beschreibung

5 Titel

Verfahren und Vorrichtung zur Regelung einer elektrischen Maschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Regelung einer elektrischen Maschine. Ferner betrifft die Erfindung ein elektrisches Antriebssystem mit einer entsprechenden Vorrichtung und eine Wärmepumpe mit einem elektrischen Antriebssystem sowie ein Computerprogramm und ein computerlesbares Speichermedium.

15 Stand der Technik

Die Druckschrift DE 10 2009 000 930 A1 offenbart ein Verfahren und eine Anordnung zur Reduktion der Drehmomentwelligkeit in einem Permanentmagnet-Motorsystem. Das Motorsystem umfasst einen Permanentmagnetmotor, der an einen Wechselrichter gekoppelt ist. Das in dieser Druckschrift beschriebene Verfahren umfasst einen Schritt zum Modifizieren von Betriebssteuersignalen, um welligkeitsreduzierende Betriebssteuersignale zu generieren. Diese modifizierten Betriebssteuersignale werden an einen Inverter zur Steuerung des Permanentmagnetmotors geliefert.

25 Aufgrund konstruktiver Eigenschaften oder bei Auftreten von Fehlerfällen zeigen elektrische Antriebssysteme, bestehend aus elektrischer Maschine und Leistungselektronik, keine glatten sondern vielmehr oberwellenbehaftete Drehmomentverläufe. Ebenso entstehen radiale Kraftanregungen am Rotor der elektrischen Maschine. Wird mit der elektrischen Maschine eine ungleichmäßige Last, beispielsweise ein Kompressor für eine Wärmepumpe angetrieben, so ergeben sich zusätzliche oberwellenbehaftete Schwingungen der Drehzahl des Rotors der elektrischen Maschine. Die oberwellenbehafteten Schwingungen, Drehmomentverläufe und radialen Kraftanregungen überlagern sich und führen zu Gehäuseschwingungen und somit zu Schallabstrahlungen führen.

- 2 -

Zur Reduktion der mechanischen Belastung der einzelnen Komponenten des Antriebssystems aber auch zur Reduktion von Geräuschen sollen diese Effekte reduziert werden. Hierzu wird die Ansteuerung der elektrischen Maschine so verändert, dass sich oberwellenbehaftete Ströme ergeben, die den störenden Effekten entgegenwirken.

Drehfeldmaschinen, wie zum Beispiel Käfigläufer-Asynchronmaschinen oder Permanentmagnet-Synchronmaschinen, besitzen aufgrund ihrer Bauweise keine idealen sinusförmigen Flussverteilungen im Luftspalt. Im Betrieb führt dies bei einer Regelung mit sinusförmigen Strömen zu oberwellenbehafteten ungleichmäßigen Drehmomenten. Neben den dadurch hervorgerufenen Torsionsschwingungen im Antriebsstrang ergeben sich durch die genannten Ungleichförmigkeiten auch radiale Kraftanregungen zwischen Stator und Rotor, die sich unmittelbar in Form von Gehäuseschwingungen und folglich Schallabstrahlungen (Noise Vibration Harshness - NVH) äußern. Verstärkt wird die Problematik durch externe oszillierende Lastmomente wie beispielsweise durch einen Kompressor, wie er in Wärmepumpen verbaut ist. Insgesamt bewirken die konstruktiven Eigenschaften des elektrischen Antriebssystems folglich mitunter unerwünschte spürbare Schwingungen im Antriebsstrang, im elektrischen Netz und/oder akustisch wahrnehmbare Schallemissionen. Es ist bekannt elektrische Drehfeldmaschinen mittels der feldorientierten Regelung (FOR, engl.: Field Oriented Control (FOC)) zu regeln. Diese Regelung ist im Wesentlichen ausgelegt auf die Regelung der Grundwelle des Stroms, wobei hierzu mittels der d/q Transformation die Grundwelle des Stroms in Gleichgrößen i_d , i_q in dem mitrotierenden dq-Koordinatensystem transformiert wird. Die Gleichgrößen werden in dem Koordinatensystem geregelt und die ermittelten Stellgrößen u_d , u_q anschließend zurücktransformiert in den Zeitbereich und als Grundwelle der Spannung zur Ansteuerung der elektrischen Maschine verwendet. Eine Beeinflussung oder Reduktion von Oberwellen ist hiermit nicht möglich.

Für die Minimierung von harmonischen Oberwellen sind zwei grundsätzliche Ansätze möglich. Die erste Möglichkeit besteht in der gezielten Aufschaltung einer exogenen Störgrößenkompensation, was bei betriebsabhängigen (wie z.B.

temperaturabhängigen) Parametern oder herstellungsbedingten Toleranzen zu einer unzureichenden Performance im realen Betrieb führt.

Alternative, feedback-basierte Konzepte sind zwar robuster hinsichtlich parametrischer Abweichungen, sie sind in bekannten Varianten allerdings nur für Eingrößensysteme (eine Stellgröße sowie eine Messgröße) geeignet. Elektrische Drehfeldmaschinen besitzen jedoch bereits bei der feldorientierten Regelung in dem d/q Koordinatensystem zwei unabhängigen Stellspannungen u_d/u_q und somit zwei Stellgrößen.

Offenbarung der Erfindung

Es wird ein Verfahren zur Regelung einer elektrischen Maschine mit einem Oberwellenregler bereitgestellt, welcher eine Eingangsstufe, einen Regler und eine Ausgangsstufe umfasst. Das Verfahren umfasst die Schritte:

- Ermitteln mindestens zweier Messgrößen;
- Ermitteln von Cosinusmessanteilen und Sinusmessanteilen einer vorbestimmten Frequenz in Abhängigkeit der erfassten Messgrößen mittels der Eingangsstufe;
- Ermitteln von Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen in Abhängigkeit der Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile mittels des Reglers und einer vorbestimmten Regelungsmatrix des Reglers;
- Ermitteln mindestens zweier Stellgrößen in Abhängigkeit der ermittelten Cosinustellgrößen und Sinusstellgrößen mittels der Ausgangsstufe;
- Ansteuern der elektrischen Maschine in Abhängigkeit der ermittelten Stellgrößen.

Zur Regelung elektrischer Maschinen, bevorzugt permanentmagnetisch erregte Synchronmaschinen, werden verbreitet feldorientierte Regelungen verwendet. Dabei werden die Wechselgrößen der im Zeitbereich, bevorzugt sinusförmigen, einzuregelnden Phasenströme, auch die Grundwellen genannt, mittels einer mathematischen Transformation jeweils in ein mit der Frequenz der Wechselgrößen rotierendes Koordinatensystem übertragen. Die Frequenz der Wechselgrößen bestimmt auch die Frequenz des magnetischen Feldes in der Maschine, sodass dieses mit der Frequenz der Wechselgrößen rotierende Koordinatensystem auch feldorientiertes System genannt wird. Im stationären

Betrieb der elektrischen Maschine ergeben sich aus den Wechselgrößen im Zeitbereich Gleichgrößen im feldorientierten System, welche mittels der üblichen Verfahren der Regelungstechnik geregelt werden können. Das feldorientierte System wird auch d/q-Koordinatensystem genannt. Dabei zeigt dessen d-Achse in Richtung des Rotorflusses. Die q-Achse ist senkrecht zu der d-Achse. Ein sinusförmiger Phasenstrom wird als Statorstromzeiger oder Statorstromvektor repräsentiert, welcher über seine Länge und seine Richtung charakterisiert wird. Dieser Stromzeiger dreht sich synchron mit dem rotierenden Stator- oder Rotorfluss der elektrischen Maschine. In dem d/q Koordinatensystem kann der Stromzeiger entsprechend seiner Länge und seiner Richtung mittels zwei senkrecht aufeinander stehenden Komponenten I_d und I_q dargestellt werden, welche im stationären Fall Gleichgrößen sind.

Zur Regelung einer mit dem Oberwellenregler verbindbaren oder an den Oberwellenregler anschließbaren elektrischen Maschine werden mindestens zwei Messgrößen der elektrischen Maschine in dem feldorientierten System erfasst, bevorzugt die beiden Komponenten des Statorstromzeigers in dem feldorientierten System. Wie oben erläutert umfassen diese Messgrößen Oberwellen oder mindestens eine Oberwelle, welche den Phasenstrom durch die elektrische Maschine überlagern. In dem feldorientierten System ist die elektrische Grundwelle eine Gleichgröße wohingegen die Oberwelle eine Wechselgröße ist.

Zur Regelung der Oberwelle erfolgt, ähnlich der Transformation aus dem Zeitbereich in den feldorientierten Bereich, mittels der Eingangsstufe eine Ermittlung eines Frequenzanteils einer vorbestimmten Frequenz, welche bevorzugt der Frequenz einer Oberwelle einer vorbestimmten Ordnung entspricht. Bevorzugt wird eine Oberwelle einer vorbestimmten Ordnung der elektrischen Grundwelle oder elektrischen Grundfrequenz, welche in dem feldorientierten System in den beiden Komponenten des Statorstromzeigers enthalten ist, mittels der Eingangsstufe in ein oberwellenorientiertes System zu jeweils einem Cosinusmessanteil und einem Sinusmessanteil abgebildet. Die jeweiligen Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile sind wiederum Gleichgrößen. Größen, die im feldorientierten System als Wechselgrößen dargestellt werden, werden im stationären Betrieb der elektrischen Maschine im

oberwellenorientierten System als Gleichgrößen dargestellt. Diese können mittels der Regelungstechnik geregelt werden. Die vorbestimmte Frequenz ist bevorzugt eine n-te Ordnung der Grundfrequenz des Phasenstroms oder der elektrischen Grundwelle, welche einen signifikanten Beitrag für die mechanischen
5 Schwingungen der elektrischen Maschine oder des Antriebssystems liefert. Bevorzugt sind dies die 6-te, 4-te, 3-te, 2-te, und/oder erste Ordnung. Bevorzugt werden mehrere insbesondere mehr als eine oder mehr als zwei harmonische Ordnungen gleichzeitig berücksichtigt.
Dabei steigt der Rechenaufwand linear mit der Anzahl der Ordnungen.

10 Mittels des Reglers und einer vorbestimmten Regelungsmatrix werden aus den Cosinussmessanteilen und Sinusmessanteilen die Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen ermittelt. Hierzu wird bevorzugt ein Vektor in Abhängigkeit der
15 oder aus den Cosinussmessanteilen und Sinusmessanteilen mit einer Regelungsmatrix multipliziert. Bevorzugt bilden die Komponenten der Regelungsmatrix ein Modell der anschließbaren elektrischen Maschine oder des elektrischen Antriebssystems ab zur Ermittlung der Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen. Aus diesen Gleichstellgrößen im oberwellenorientierten System, den Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen, werden zur weiteren
20 Verwendung in der feldorientierten Regelung der elektrischen Maschine mittels der Ausgangsstufe zwei Stellgrößen ermittelt, bevorzugt als Phasenspannungszeiger oder Phasenspannungsvektor. Im feldorientierten System umfasst die Stellgröße eine Wechselgröße, eine Oberwelle. Schließlich umfasst das Verfahren einen Schritt zum Ansteuern der elektrischen Maschine in
25 Abhängigkeit der zwei Stellgrößen. Das Ansteuern der elektrischen Maschine umfasst bevorzugt die Bestromung der Phasen der elektrischen Maschine oder das Anlegen einer Phasenspannung an die Wicklungen der elektrischen Maschine, die sich aus einer Rücktransformation des Phasenspannungsvektors aus dem feldorientierten System in den Zeitbereich ergibt.

30 Vorteilhaft wird ein Verfahren für einen effektiven Oberwellenregler bereitgestellt.

Die Formulierung, dass eine Größe des Regelkreises eine Oberwelle oder eine Grundwelle umfasst, bedeutet im Rahmen dieser Anmeldung, dass eine Größe
35 des Regelkreises zumindest eine Oberwelle oder Grundwelle charakterisiert oder

beschreibt, wobei die jeweilige Größe des Regelkreises auch weitere Signalanteile, beispielsweise Grundwelle und eine oder mehrere Oberwellen sowie zusätzlich noch vorhandene Störgrößen beinhalten kann.

5 In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung charakterisieren die mindestens zwei Messgrößen einen Strom in der elektrischen Maschine. Mittels Messung mindestens eines Phasenstroms werden die mindestens zwei Messgrößen ermittelt.

10 Vorteilhaft wird eine messbare Größe des elektrischen Antriebssystems als Eingangsgröße für den Oberwellenregler bereitgestellt.

In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung werden mittels der Eingangsstufe die erfassten Messgrößen jeweils mit einer Cosinusfunktion und einer
15 Sinusfunktion einer vorbestimmten Frequenz, welche bevorzugt der Frequenz einer Oberwelle einer vorbestimmten Ordnung entspricht, multipliziert. Die Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile mit der vorbestimmten Frequenz werden als Ergebnisse der Multiplikationen ermittelt. Die Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile entsprechen dabei den Cosinus- und Sinus-Anteilen der
20 zu regelnden oder minimierenden harmonischen Oberwellen der vorbestimmten Frequenz der Messgrößen. Bei der Multiplikation ist der aktuelle Bezugswinkel für die jeweilige harmonische Oberwelle zu berücksichtigen. Er ergibt sich beispielhaft aus $\varphi_d = m N_p \varphi_{mech}$ mit dem mechanischen Rotorlagewinkel φ_{mech} , der Polpaarzahl N_p und der harmonischen Ordnung m . Bevorzugt werden die
25 Messgrößen vor der Multiplikation mit der Cosinusfunktion und Sinusfunktion multiplikativ mit einem skalaren Parameter ρ verstärkt. Der skalare Parameter ρ stellt einen Tuningparameter dar, mit dem die Konvergenzrate der Regelung für eine bestimmte harmonische Ordnung eingestellt wird.

Vorteilhaft wird ein effizientes Verfahren zur Extraktion der Cosinus- und Sinus-
30 Anteile harmonischer Oberwellen bereitgestellt.

In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung werden mittels des Reglers Differenzen der jeweiligen Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile und vorgegebbarer Cosinussollanteile und Sinussollanteile mit der vorbestimmten

Regelungsmatrix multipliziert zur Ermittlung der Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen.

Vor der Multiplikation mit der Regelungsmatrix werden zunächst vorgebbare Cosinussollanteile und Sinussollanteile von den jeweiligen Cosinusmessanteilen und Sinusmessanteilen subtrahiert. Die sich ergebenden Koeffizientenvektoren $\Theta_{c,y}$ und $\Theta_{s,y}$ werden bevorzugt zu einem komplexen Vektor $\Theta_y = \Theta_{s,y} + j\Theta_{c,y}$ zusammengefasst. Es ergibt sich eine vereinfachte Beschreibung der anschließenden Operation. Für eine elektrische Maschine ergibt sich beispielsweise mittels der beiden Ströme i_d und i_q als Messgrößen:

$$\Theta_{s,y} = \begin{pmatrix} \Theta_{s,i_d} \\ \Theta_{s,i_q} \end{pmatrix}, \Theta_{c,y} = \begin{pmatrix} \Theta_{c,i_d} \\ \Theta_{c,i_q} \end{pmatrix} \Rightarrow \Theta_y = \begin{pmatrix} \Theta_{s,i_d} + j\Theta_{c,i_d} \\ \Theta_{s,i_q} + j\Theta_{c,i_q} \end{pmatrix}.$$

Aufgrund der Subtraktion der Sollwerte von den Messwerten kann mittels der Multiplikation eine Regelung oder Minimierung der harmonischen Oberwellen erfolgen. Bevorzugt werden somit gezielt Oberwellen-Sollwerte vorgegeben welche zu einer Reduktion oder aber auch einer Erhöhung der Stromoberwellen führen. So kann gezielt eine überlagerte Optimierung des Antriebssystems hinsichtlich Geräuscherzeugung oder Steuerung oder Reduktion von mechanischen Belastungen (Verlängerung Lebensdauer) erfolgen.

Bei Berücksichtigung des stationären Übertragungsverhaltens einer elektrischen Maschine oder einer Übertragungsstrecke, bevorzugt des elektrischen Antriebssystems, gilt: $\Theta_y = G(j\omega_d)\Theta_u$.

Für den Oberwellenregler (HC) wird bevorzugt der Ansatz:

$G^{HC}(j\omega_d) = G^{-1}(j\omega_d)$ gewählt, was der, bevorzugt statischen und/oder

Mehrgrößen-, Inversion der Gleichungen der elektrischen Maschine oder Übertragungsstrecke entspricht. Die harmonische Frequenz wird bevorzugt mittels des Terms $\omega_d = m\omega_{el} = mN_p\omega_{mech}$ mit der mechanischen

Kreisfrequenz $\omega_{mech} = 2\pi f_{mech}$ bzw. mit der elektrischen Kreisfrequenz

$\omega_{el} = N_p\omega_{mech}$ ermittelt. Bevorzugt ergibt sich für eine elektrische Maschine

$$G^{HC}(j\omega_d) = G^{-1}(j\omega_d) = \begin{bmatrix} jm\omega_{el}L_d + R & -\omega_{el}L_q \\ \omega_{el}L_d & jm\omega_{el}L_q + R \end{bmatrix}$$

Diese komplexe Darstellung der inversen Übertragungsfunktion als Regelungsmatrix kann bevorzugt in reellwertiger Form folgendermaßen als vorbestimmte Regelungsmatrix dargestellt werden:

$$\begin{matrix} 5 \\ \\ \\ \\ \end{matrix}
 \begin{bmatrix} \dot{\Theta}_{c,ud} \\ \dot{\Theta}_{s,ud} \\ \dot{\Theta}_{c,uq} \\ \dot{\Theta}_{s,uq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & m\omega_{ei}L_d & -\omega_{ei}L_q & 0 \\ -m\omega_{ei}L_d & R & 0 & -\omega_{ei}L_q \\ \omega_{ei}L_d & 0 & R & m\omega_{ei}L_q \\ 0 & \omega_{ei}L_d & -m\omega_{ei}L_q & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_{c,id} \\ \Theta_{s,id} \\ \Theta_{c,iq} \\ \Theta_{s,iq} \end{bmatrix}$$

Diese reellwertige Darstellung wird bevorzugt für die Ermittlung der Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen mittels einer Recheneinheit verwendet, wobei m die m-te Ordnung der Oberwelle, R den ohmschen Widerstand, ω_{ei} die elektrische Grundfrequenz, L_d die Induktivität in d-Richtung und L_q die Induktivität in Q Richtung beschreibt.

Hierbei wird die dargestellte vorbestimmte Regelungsmatrix mit den Differenzen, der jeweiligen Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile und vorgegebbarer Cosinussollanteile und Sinussollanteile, multipliziert. Somit werden die Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen ermittelt und als eine zeitliche Änderung der Parameter Θ_u vorgegeben.

Vorteilhaft wird ein effizientes Verfahren zur Ermittlung der Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen bereitgestellt.

In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung werden mittels der Ausgangsstufe die ermittelten Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen jeweils mit der Cosinusfunktion und der Sinusfunktion der vorbestimmten Frequenz multipliziert zur Ermittlung der Stellgrößen. Die Stellgrößen werden als Ergebnisse der Multiplikationen ermittelt. Bevorzugt werden vor der Multiplikation die ermittelten Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen mittels einer, bevorzugt numerischen, Integration integriert. Es ergeben sich die Stellgrößen, welche dem Spannungsraumzeiger der elektrischen Maschine zur Ansteuerung überlagert wird.

Vorteilhaft wird ein effizientes Verfahren zur Ermittlung der Stellgrößen bereitgestellt.

5 In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung werden die Verfahrensschritte in Abhängigkeit eines aktuellen Rotorwinkels der elektrischen Maschine ausgeführt. Hierzu wird der Rotorwinkel in Abhängigkeit der erfassten Messgrößen ermittelt. Für die Regelung der elektrischen Maschine wird der Rotorwinkel der elektrischen Maschine benötigt. Falls eine Messung des Rotorwinkels nicht vorgesehen ist, wird der Rotorwinkel, und bevorzugt auch die Drehzahl, aus
10 vorliegenden ermittelten physikalischen Größen ermittelt, bevorzugt aus den Messgrößen. Bevorzugt wird hierzu ein PLL-Verfahren (Phase-locked loop), ein EKF-Verfahren (Extended Kalman Filter) oder ein anderes Schätzverfahren angewendet. Verfahren angewendet. Für die Ermittlung des Rotorwinkels werden insbesondere die Messgrößen, Phasenspannungen der elektrischen Maschine
15 und/oder vorhandene Modellparameter der elektrischen Maschine, die auch für die Regelungsmatrix verwendet werden, beispielsweise L_d , L_q , m , R , berücksichtigt.

Bevorzugt wird für ein PLL-Verfahren die Back EMF Spannung modellbasiert anhand der Phasenströme und -spannungen berechnet. In dem d/q-Koordinatensystem ist die Back EMF Spannung in d-Richtung gleich Null. Mittels
20 eines PI-Reglers wird die Back EMF Spannung in d-Richtung auf Null geregelt, wobei die Stellgröße hierzu die Winkelgeschwindigkeit ω ist.

Alternativ wird bevorzugt ein Kalman Filter-Verfahren verwendet. Durch
25 Linearisierung um den aktuellen Arbeitspunkt und anschließender Diskretisierung ergibt sich ein lineares zeitvariables Modell, welches im Extended Kalman Filter berücksichtigt wird. Das Verfahren umfasst die Schritte Prädiktion (prediction) und Korrektur (correction).

30 Ferner betrifft die Erfindung ein Computerprogramm, welches Befehle umfasst, die bei der Ausführung durch einen Computer diesen veranlassen, die Schritte des bisher beschriebenen Verfahrens auszuführen.

Ferner betrifft die Erfindung ein computerlesbares Speichermedium, umfassend Befehle, die bei der Ausführung durch einen Computer diesen veranlassen, die Schritte des bisher beschriebenen Verfahrens auszuführen.

5 Ferner betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Regelung einer elektrischen Maschine, mit einer Recheneinheit und einem Oberwellenregler, wobei der Oberwellenregler eine Eingangsstufe, einen Regler und eine Ausgangsstufe umfasst. Die Vorrichtung ist dazu eingerichtet, die Schritte des beschriebenen Verfahrens auszuführen.

10 Vorteilhaft wird eine Vorrichtung für eine effektive Oberwellenregelung einer elektrischen Maschine bereitgestellt.

15 Ferner betrifft die Erfindung ein elektrisches Antriebssystem mit einer elektrischen Maschine und einer beschriebenen Vorrichtung. Ein derartiges elektrisches Antriebssystem dient beispielsweise dem Antrieb eines Kompressors einer Wärmepumpe. Mittels des Verfahrens und der Vorrichtung wird ein optimierter Betrieb hinsichtlich mechanischer Belastung und/ oder Geräuschentwicklung des Antriebssystems ermöglicht.

20 Ferner betrifft die Erfindung eine Wärmepumpe, mit einem beschriebenen elektrischen Antriebssystem, wobei die Wärmepumpe einen Kompressor (640) und insbesondere einen Kondensator (610), eine Drossel (620) oder einen Verdampfer (630) umfasst. Vorteilhaft wird somit eine Wärmepumpe
25 bereitgestellt, welche eine Vorrichtung umfasst, mit der eine elektrische Maschine effektiv geregelt wird.

30 Es versteht sich, dass die Merkmale, Eigenschaften und Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens entsprechend auf die Vorrichtung bzw. das elektrische Antriebssystem und die Wärmepumpe und umgekehrt zutreffen bzw. anwendbar sind.

Weitere Merkmale und Vorteile von Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung mit Bezug auf die beigefügten
35 Zeichnungen.

Kurze Beschreibung der Zeichnung

Im Folgenden soll die Erfindung anhand einiger Figuren näher erläutert werden,
5 dazu zeigen:

Figur 1

eine schematische Regelstruktur eines Oberwellenreglers

10 Figur 2

eine alternative schematische Regelstruktur eines Oberwellenreglers

Figur 3

15 ein schematisch dargestelltes Ablaufdiagramm für ein Verfahren zur Regelung einer elektrischen Maschine.

Figur 4

eine schematische dargestellte Vorrichtung zur Regelung einer elektrischen
20 Maschine

Figur 5

eine schematisch dargestellte Wärmepumpe mit einem elektrischen
Antriebssystem

25

Ausführungsformen der Erfindung

Die Figur 1 zeigt eine schematische Regelstruktur eines Oberwellenreglers 200,
wobei der Oberwellenregler 200 eine Eingangsstufe 210, einen Regler 220 und
30 eine Ausgangsstufe 230 umfasst. Ermittelte Messgrößen i_d , i_q werden der
Eingangsstufe 210 zugeführt. Diese Messgrößen charakterisieren bevorzugt
einen elektrischen Strom in die elektrische Maschine. Die Cosinussmessanteile
und Sinusmessanteile $i_{d\cos_m}$, $i_{d\sin_m}$, $i_{q\cos_m}$, $i_{q\sin_m}$ einer vorbestimmten
Frequenz werden in Abhängigkeit der erfassten Messgrößen i_d , i_q mittels der
35 Eingangsstufe 210 ermittelt. Bevorzugt werden die Messgrößen hierzu mittels

der Multiplizierer 211, 212 mit einer Cosinusfunktion und einer Sinusfunktion \cos , \sin einer vorbestimmten Frequenz multipliziert. Die Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen $idcos_s$, $idsin_s$, $iqcos_s$, $iqsin_s$ werden in Abhängigkeit der Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile $idcos_m$, $idsin_m$, $iqcos_m$, $iqsin_m$ mittels des Reglers 220 und einer vorbestimmten Regelungsmatrix 224 des Reglers 220 ermittelt. Mindestens zwei Stellgrößen u_d , u_q werden in Abhängigkeit der ermittelten Cosinustellgrößen und Sinusstellgrößen $idcos_s$, $idsin_s$, $iqcos_s$, $iqsin_s$ mittels der Ausgangsstufe 230 ermittelt. Bevorzugt werden die Cosinustellgrößen und Sinusstellgrößen $idcos_s$, $idsin_s$, $iqcos_s$, $iqsin_s$ hierzu mittels der Multiplizierer 231, 232 mit einer Cosinusfunktion und einer Sinusfunktion \cos , \sin einer vorbestimmten Frequenz multipliziert. In Abhängigkeit der ermittelten Stellgrößen u_d , u_q wird, bevorzugt mittels einem Inverter 203, eine elektrische Maschine 204 angesteuert.

Die Figur 2 zeigt eine alternative schematische Regelstruktur eines Oberwellenreglers 200. Ergänzend zu Figur 1 umfasst der Regler 220 zwei Differenzierer 221 und 222 zur Bildung der Differenzen der jeweiligen Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile $idcos_m$, $idsin_m$, $iqcos_m$, $iqsin_m$ und vorgegebbarer Cosinussollanteile und Sinussollanteile $idcos_{so}$, $idsin_{so}$, $iqcos_{so}$, $iqsin_{so}$. Gemäß Figur 2 werden diese Differenzen mit der vorbestimmten Regelungsmatrix multipliziert zur Ermittlung der Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen $idcos_s$, $idsin_s$, $iqcos_s$, $iqsin_s$. Mittels der Ausgangsstufe 230 werden die ermittelten Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen $idcos_s$, $idsin_s$, $iqcos_s$, $iqsin_s$ zunächst den Integrierern 233 und 234 zugeführt und anschließend jeweils mit der Cosinusfunktion und der Sinusfunktion (\cos , \sin) der vorbestimmten Frequenz multipliziert zur Ermittlung der zwei Stellgrößen u_d , u_q .

Die Figur 3 zeigt ein schematisch dargestelltes Ablaufdiagramm für ein Verfahren 400 zur Regelung einer elektrischen Maschine 204. Mit Schritt 110 werden mindestens zwei Messgrößen i_d , i_q ermittelt. Mit Schritt 120 werden die Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile $idcos_m$, $idsin_m$, $iqcos_m$, $iqsin_m$ einer vorbestimmten Frequenz ermittelt. Mit Schritt 130 werden die Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen $idcos_s$, $idsin_s$, $iqcos_s$, $iqsin_s$

ermittelt. Mit Schritt 140 werden die mindestens zwei Stellgrößen u_d , u_q ermittelt, mit denen in Schritt 150 die elektrische Maschine 204 angesteuert wird.

5 Die Figur 4 zeigt eine schematische dargestellte Vorrichtung 300 zur Regelung einer elektrischen Maschine 204. Die elektrische Maschine 204 wird mittels eines Inverter 203 angesteuert. Die Vorrichtung 300 umfasst einen Oberwellenregler 200 und eine Recheneinheit 310 zur Steuerung und Umsetzung der Struktur des Oberwellenreglers 200. Die Vorrichtung ist dazu eingerichtet die oben
10 beschriebenen Verfahrensschritte auszuführen und somit die elektrischen Maschine 204 zu betreiben und zu regeln.

Die Figur 5 zeigt eine schematisch dargestellte Wärmepumpe 600, welche ein elektrisches Antriebssystem 500 umfasst. Das Antriebssystem 500 umfasst die elektrische Maschine 204, welche mittels eines Inverters 203 angesteuert wird,
15 und eine Vorrichtung 300 zur Regelung der elektrischen Maschine 204, wie in Figur 4 beschrieben. Die elektrische Maschine treibt einen Kompressor 640 der Wärmepumpe an. Bevorzugt umfasst die Wärmepumpe einen Kondensator 610, eine Drossel 620 und/ oder einen Verdampfer 630.

20

Ansprüche

5

1. Verfahren (100) zur Regelung einer elektrischen Maschine (204), mit einem Oberwellenregler (200), welcher eine Eingangsstufe (210), einen Regler (220) und eine Ausgangsstufe (230) umfasst, mit den Schritten:

10

Ermitteln (110) mindestens zweier Messgrößen (id, iq);

15

Ermitteln (120) von Cosinusmessanteilen und Sinusmessanteilen (idcos_m, idsin_m, iqcos_m, iqsin_m) einer vorbestimmten Frequenz in Abhängigkeit der erfassten Messgrößen (id, iq) mittels der Eingangsstufe (210);

20

Ermitteln (130) der Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen (idcos_s, idsin_s, iqcos_s, iqsin_s) in Abhängigkeit der Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile (idcos_m, idsin_m, iqcos_m, iqsin_m) mittels des Reglers (220) und einer vorbestimmten Regelungsmatrix (224) des Reglers (220);

25

Ermitteln (140) mindestens zweier Stellgrößen (ud, uq) in Abhängigkeit der ermittelten Cosinustellgrößen und Sinusstellgrößen (idcos_s, idsin_s, iqcos_s, iqsin_s) mittels der Ausgangsstufe (230);

30

2. Verfahren (100) nach Anspruch 1, wobei die mindestens zwei Messgrößen (id, iq) einen elektrischen Strom in der elektrische Maschine (204) charakterisieren.

35

3. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei mittels der Eingangsstufe (210) die erfassten Messgrößen (id, iq)

jeweils mit einer Cosinusfunktion und einer Sinusfunktion (cos, sin) einer vorbestimmten Frequenz multipliziert werden zur Ermittlung der Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile (idcos_m, idsin_m, iqcos_m, iqsin_m) mit der vorbestimmten Frequenz.

5

4. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei mittels des Reglers (220) Differenzen der jeweiligen Cosinusmessanteile und Sinusmessanteile (idcos_m, idsin_m, iqcos_m, iqsin_m) und vorgegebbarer Cosinussollanteile und Sinussollanteile (idcos_so, idsin_so, iqcos_so, iqsin_so) mit der vorbestimmten Regelungsmatrix multipliziert werden zur Ermittlung der Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen (idcos_s, idsin_s, iqcos_s, iqsin_s).

10

5. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei mittels der Ausgangsstufe die ermittelten Cosinusstellgrößen und Sinusstellgrößen (idcos_s, idsin_s, iqcos_s, iqsin_s) jeweils mit der Cosinusfunktion und der Sinusfunktion (cos, sin) der vorbestimmten Frequenz multipliziert werden zur Ermittlung der Stellgrößen (ud, uq).

15

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Verfahrensschritte in Abhängigkeit eines aktuellen Rotorwinkels der elektrischen Maschine ausgeführt werden und der Rotorwinkel in Abhängigkeit der erfassten Messgrößen (id, iq) ermittelt wird.

20

7. Computerprogramm, umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch einen Computer diesen veranlassen, das Verfahren/die Schritte des Verfahrens (100) nach Anspruch 1 bis 6 auszuführen.

25

8. Computerlesbares Speichermedium, umfassend Befehle, die bei der Ausführung durch einen Computer diesen veranlassen, das Verfahren/die Schritte des Verfahrens (100) nach Anspruch 1 bis 6 auszuführen.

30

9. Vorrichtung (300) zur Regelung einer elektrischen Maschine (204), mit einer Recheneinheit (310) und einem Oberwellenregler (200), wobei der Oberwellenregler eine Eingangsstufe (210), einen Regler (220)

35

- 16 -

und eine Ausgangsstufe (230) umfasst,
wobei die Vorrichtung dazu eingerichtet ist, die Schritte des Verfahrens
nach einem der Ansprüche 1-6 auszuführen.

- 5 10. Elektrisches Antriebssystem (500) mit einer elektrischen Maschine (204)
 und einer Vorrichtung (300) nach Anspruch 9.
11. Wärmepumpe (600) mit einem elektrischen Antriebssystem (500) nach
 Anspruch 10,
- 10 wobei die Wärmepumpe einen Kompressor (640) und insbesondere einen
 Kondensator (610), eine Drossel (620) und/ oder einen Verdampfer (630)
 umfasst.

Fig. 1

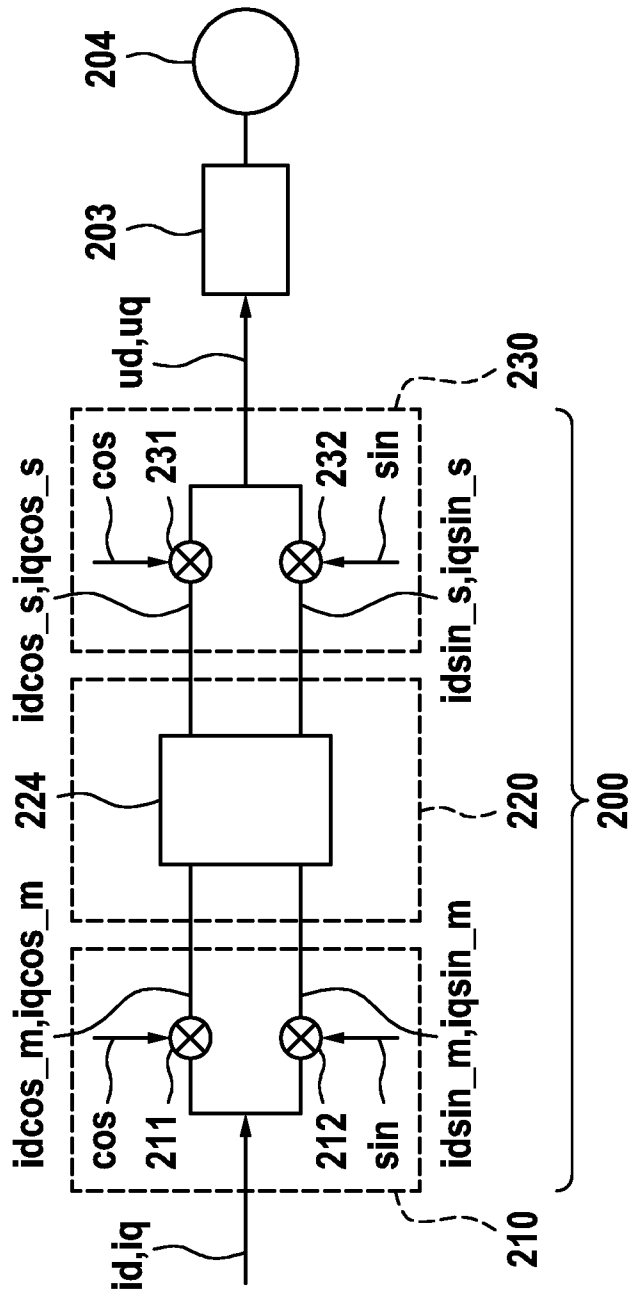


Fig. 2

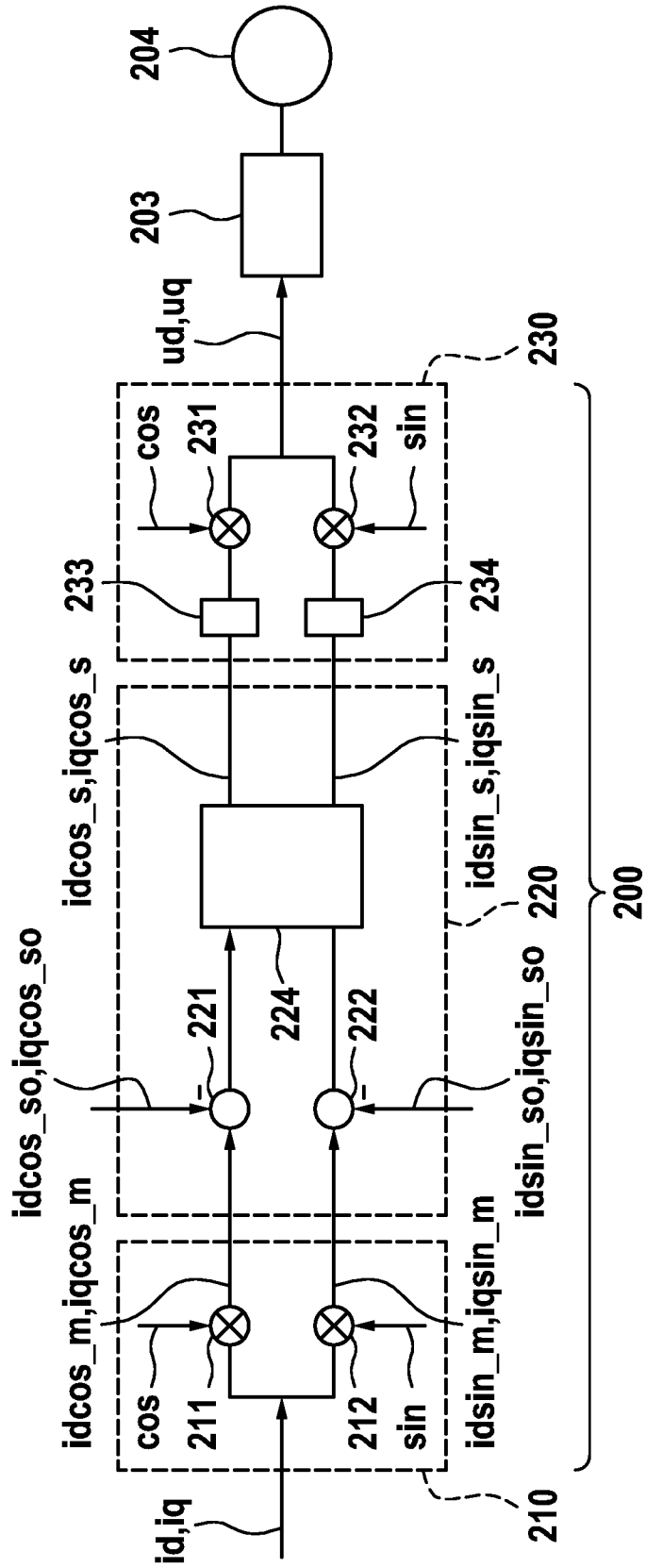


Fig. 3

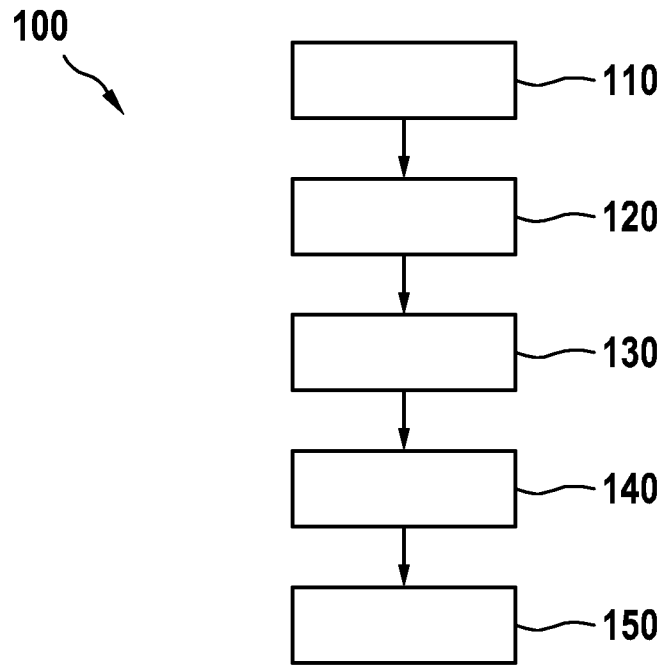


Fig. 4

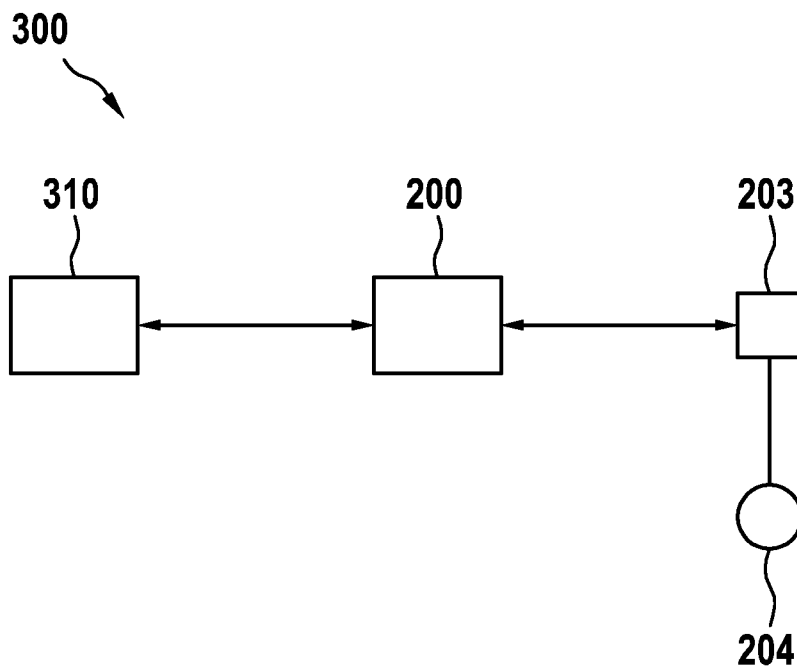
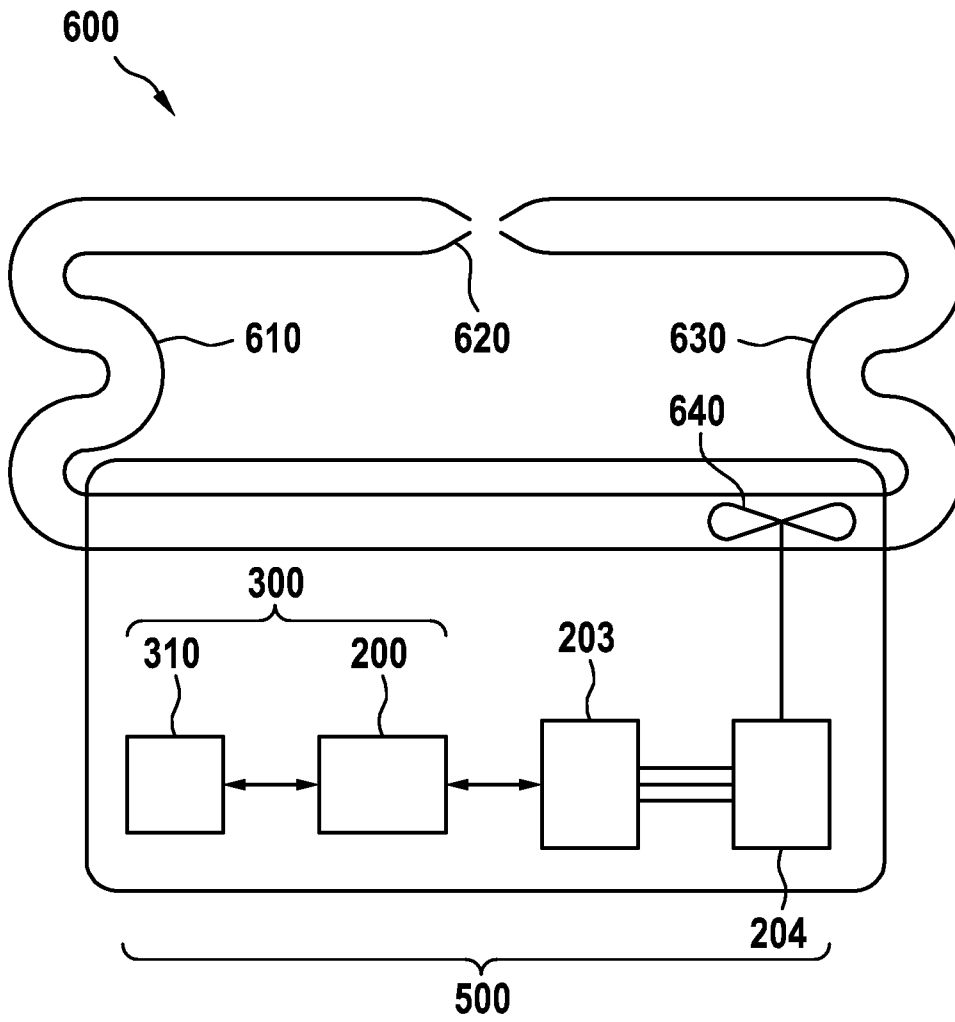


Fig. 5



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2021/051869

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
H02P 29/50 (2016.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H02P		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 102017203697 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 13 September 2018 (2018-09-13) paragraph [0003] - paragraph [0028]; claims 1-2; figure 2	1-11
X	EP 3264593 A1 (SIEMENS AG [DE]) 03 January 2018 (2018-01-03) paragraph [0080] - paragraph [0083]; figure 6	1-11
X	PHILIP B BECCUE ET AL. "Compensation for Asymmetries and Misalignment in a Hall-Effect Position Observer Used in PMSM Torque-Ripple Control" <i>IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US</i> , Vol. 43, No. 2, 01 March 2007 (2007-03-01), pages 560-570 <DOI: 10.1109/TIA.2006.889883> ISSN: 0093-9994, XP011175015	1,7-9
A	page 562 - page 567; figure 10	2-6
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 08 April 2021		Date of mailing of the international search report 16 April 2021
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Kruij, Stephan Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/EP2021/051869

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
DE 102017203697 A1	13 September 2018	CN 110603729 A	20 December 2019
		DE 102017203697 A1	13 September 2018
		EP 3593449 A1	15 January 2020
		US 2020091848 A1	19 March 2020
		WO 2018162335 A1	13 September 2018
EP 3264593 A1	03 January 2018	CN 107565871 A	09 January 2018
		EP 3264593 A1	03 January 2018

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. H02P29/50
 ADD.
 Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE
 Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 H02P

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
 EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 10 2017 203697 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 13. September 2018 (2018-09-13) Absatz [0003] - Absatz [0028]; Ansprüche 1-2; Abbildung 2	1-11
X	EP 3 264 593 A1 (SIEMENS AG [DE]) 3. Januar 2018 (2018-01-03) Absatz [0080] - Absatz [0083]; Abbildung 6	1-11
	----- -/--	

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

- "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
8. April 2021	16/04/2021

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Kruip, Stephan
--	---

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	PHILIP B BECCUE ET AL: "Compensation for Asymmetries and Misalignment in a Hall-Effect Position Observer Used in PMSM Torque-Ripple Control", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, Bd. 43, Nr. 2, 1. März 2007 (2007-03-01), Seiten 560-570, XP011175015, ISSN: 0093-9994, DOI: 10.1109/TIA.2006.889883	1,7-9
A	Seite 562 - Seite 567; Abbildung 10 -----	2-6

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2021/051869

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102017203697 A1	13-09-2018	CN 110603729 A	20-12-2019
		DE 102017203697 A1	13-09-2018
		EP 3593449 A1	15-01-2020
		US 2020091848 A1	19-03-2020
		WO 2018162335 A1	13-09-2018

EP 3264593 A1	03-01-2018	CN 107565871 A	09-01-2018
		EP 3264593 A1	03-01-2018
