

(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
29. Dezember 2016 (29.12.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/207383 A1

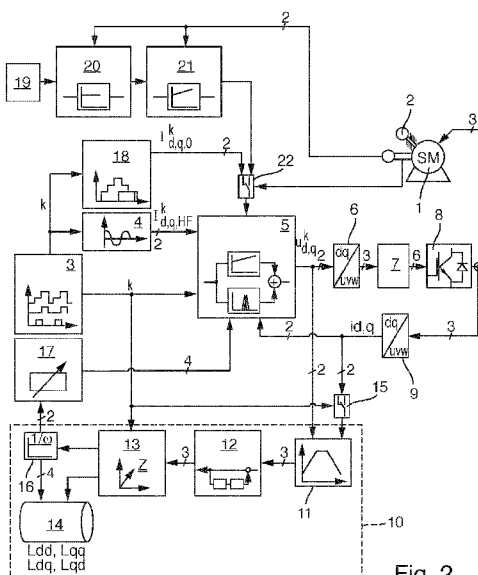
- (51) Internationale Patentklassifikation: **H02P 21/00** (2016.01) **H02P 6/185** (2016.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2016/064726
- (22) Internationales Anmeldedatum: 24. Juni 2016 (24.06.2016)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität: 10 2015 211 863.0 25. Juni 2015 (25.06.2015) DE
- (71) Anmelder: **LENZE AUTOMATION GMBH** [DE/DE]; Hans-Lenze-Straße 1, 31855 Aerzen (DE).
- (72) Erfinder: **STICHWEH, Heiko**; Lisztweg 9, 31832 Springe (DE). **BÖHM, Gennadi**; Lärchenweg 9, 29378 Wittingen (DE).
- (74) Anwalt: **PATENTANWÄLTE RUFF, WILHELM, BEIER, DAUSTER & PARTNER MBB**; Kronenstraße 30, 70174 Stuttgart (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING CURRENT-DEPENDENT AND/OR ROTATIONAL ANGLE POSITION-DEPENDENT CHARACTERISTIC VARIABLES OF AN ELECTRICAL MACHINE, AND FREQUENCY CONVERTER

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM ERMITTELN VON STROMABHÄNGIGEN UND/ODER DREHWINKELSTELLUNGSABHÄNGIGEN KENNGRÖßEN EINER ELEKTRISCHEN MASCHINE UND FREQUENZUMRICHTER

$(i_{a,s}^k)$ (I) $(i_{a,ref}^k)$ (II) $(i_{p,s}^k)$ (III) $(i_{p,ref}^k)$ (IV) (u_s^k) (V) (u_p^k) (VI)



(57) Abstract: Method for determining current-dependent and/or rotational angle position-dependent characteristic variables of an electrical machine (1), in particular for performance by means of an inverter (8), having the steps of: setting a rotational angle position of a rotor of the electrical machine (1) and then blocking the rotor, forming a series current desired value by adding a series current desired value operating point (formula I) and a series current desired value alternating signal (formula II), wherein the series current desired value alternating signal (formula II) changes periodically with a series current desired value frequency, and/or forming a parallel current desired value by adding a parallel current desired value operating point (formula III) and a parallel current desired value alternating signal (formula IV), wherein the parallel current desired value alternating signal (formula IV) changes periodically with a parallel current desired value frequency, regulating a series current (i_a) to the series current desired value and/or regulating a parallel current (i_q) to the parallel current desired value, wherein, for the purpose of regulation, manipulated variables in the form of a series setting voltage (formula V) and/or a parallel setting voltage (formula VI) are produced and are injected into motor phases of the electrical machine (1), measuring phase currents of the electrical machine (1) and determining an established series current (i_a) and/or an established parallel current (i_q) from the measured phase currents, applying a discrete Fourier transform (DFT) algorithm to the series setting voltage (formula V) and to the determined series current (i_a) in order to produce series setting voltage coefficients and series current coefficients and/or applying the DFT algorithm to the parallel setting voltage (formula VI) and to the determined parallel current (i_q) in order to produce parallel setting voltage coefficients and parallel current

coefficients, and calculating the characteristic variables on the basis of the series setting voltage coefficients and the series current coefficients and/or the parallel setting voltage coefficients and the parallel current coefficients.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2016/207383 A1

**Veröffentlicht:**

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Verfahren zum Ermitteln von stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen einer elektrischen Maschine (1), insbesondere zur Durchführung mittels eines Wechselrichters (8), mit den Schritten: Einstellen einer Drehwinkelstellung eines Rotors der elektrischen Maschine (1) und anschließendes Blockieren des Rotors, Bilden eines Längsstromsollwerts durch Addieren eines Längsstromsollwert-Arbeitspunkts (Formel I) und eines Längsstromsollwert-Wechselsignals (Formel II), wobei sich das Längsstromsollwert-Wechselsignal (Formel II) periodisch mit einer Längsstromsollwertfrequenz verändert, und/oder Bilden eines Querstromsollwerts durch Addieren eines Querstromsollwert-Arbeitspunkts (Formel III) und eines Querstromsollwert-Wechselsignals (Formel IV), wobei sich das Querstromsollwert-Wechselsignal (Formel IV) periodisch mit einer Querstromsollwertfrequenz verändert, Regeln eines Längsstroms (i_a) auf den Längsstromsollwert und/oder Regeln eines Querstroms (i_q) auf den Querstromsollwert, wobei zum Regeln Stellgrößen in Form einer Längs-Stellspannung (Formel V) und/oder einer Quer-Stellspannung (Formel VI) erzeugt und in Motorphasen der elektrischen Maschine (1) eingepreßt werden, Messen von Phasenströmen der elektrischen Maschine (1) und Ermitteln eines sich einstellenden Längsstroms (i_a) und/oder eines sich einstellenden Querstroms (i_q) aus den gemessenen Phasenströmen, Anwenden eines diskrete-Fourier-Transformation(DFT)-Algorithmus auf die Längs-Stellspannung (Formel V) und auf den ermittelten Längsstrom (i_a) zur Erzeugung von Längs-Stellspannungs-Koeffizienten und Längsstrom-Koeffizienten und/oder Anwenden des DFT-Algorithmus auf die Quer-Stellspannung (Formel VI) und auf den ermittelten Querstrom (i_q) zur Erzeugung von Quer-Stellspannungs-Koeffizienten und Querstrom-Koeffizienten, und Berechnen der Kenngrößen in Abhängigkeit von den Längs-Stellspannungs-Koeffizienten und den Längsstrom-Koeffizienten und/oder den Quer-Stellspannungs-Koeffizienten und den Querstrom-Koeffizienten.

Verfahren zum Ermitteln von stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen einer elektrischen Maschine und Frequenzumrichter

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln von stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen einer elektrischen Maschine, insbesondere durchgeführt mittels eines Frequenzumrichters, und einen Frequenzumrichter.

Elektrische Maschinen (Elektromotoren) in Form von permanenterregten Synchronmaschinen (PMSM) und synchronen Reluktanzmaschinen (SynRM) bieten gegenüber den heute weit verbreiteten Asynchron- bzw. Induktionsmaschinen erhebliche Vorteile bezüglich ihrer Energieeffizienz, insbesondere im Teillast- und Teildrehzahlbereich, sowie Leistungsdichte und Drehzahl-synchronität. Ein kostengünstiger, geberloser Betrieb dieser synchron arbeitenden Elektromotoren setzt jedoch eine sehr genaue Kenntnis der Eigenschaften der Elektromotoren in Form von kenngrößenbasierten Ersatzschaltbilddaten voraus. Aufgrund der sättigungsabhängigen Eigenschaften der Elektromotoren verändern sich Kenngrößen wie Induktivitäten typisch mit dem Strom oder in Abhängigkeit der Rotorlage.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Ermitteln bzw. zur Identifikation von stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen einer elektrischen Maschine und einen Frequenzumrichter zur Verfügung zu stellen.

Die Erfindung löst diese Aufgabe durch ein Verfahren nach Anspruch 1 und einen Frequenzumrichter nach Anspruch 12.

Das Verfahren dient zum Ermitteln von stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen einer elektrischen Maschine.

Die Kenngrößen können z.B. für eine modellbasierte, geberlose Regelung der PMSM oder SynRM sowie für eine effizienz- oder stromoptimale Regelung (Maximum Torque per Ampere Control bzw. MTPA) oder zur Prüfung der Eigenschaften des Motors weiterverwendet werden. Weiterhin kann die Information für eine verbesserte Stromsollwertvorsteuerung verwendet werden.

Zunächst wird eine Drehwinkelstellung eines Rotors der elektrischen Maschine eingestellt. Nach Erreichen der gewünschten Drehwinkelstellung wird der Rotor, insbesondere mechanisch,

blockiert, so dass der Rotor seine Drehwinkelstellung nicht mehr verändern kann. Diese Blockierung kann z.B. mit einer Betriebs- oder Haltebremse realisiert werden.

Anschließend wird ein Längsstromsollwert durch Addieren eines Längsstromsollwert-Arbeitspunkts und eines Längsstromsollwert-Wechselsignals gebildet, wobei sich das Längsstromsollwert-Wechselsignal periodisch mit einer Längsstromsollwertfrequenz verändert und der Längsstromsollwert-Arbeitspunkt zumindest während bestimmter Zeitdauern konstant bleibt. Alternativ oder zusätzlich wird ein Querstromsollwert durch Addieren eines Querstromsollwert-Arbeitspunkts und eines Querstromsollwert-Wechselsignals gebildet, wobei sich das Querstromsollwert-Wechselsignal periodisch mit einer Querstromsollwertfrequenz verändert und der Querstromsollwert-Arbeitspunkt zumindest während bestimmter Zeitdauern konstant bleibt. Die periodischen Wechselsignale, die z.B. sinusförmig ausgeführt sein können, dienen hierbei zur Identifikation der differentiellen Impedanz bzw. Induktivität in dem durch die konstanten Stromanteile definierten Arbeitspunkt.

Es werden nun Phasenströme (Ströme in den Motorphasen) der elektrischen Maschine gemessen und ein sich einstellender Längsstrom und/oder ein sich einstellender Querstrom herkömmlich aus den gemessenen Phasenströmen und einer gemessenen oder geschätzten Rotorflusslage ermittelt. Insoweit sei auch auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Der Längsstrom i_d wird nun herkömmlich auf den Längsstromsollwert geregelt und/oder der Querstrom i_q wird herkömmlich auf den Querstromsollwert geregelt, wobei zum Regeln herkömmlich Stellgrößen in Form einer Längs-Stellspannung und/oder einer Quer-Stellspannung erzeugt und in Motorphasen der elektrischen Maschine eingepägt werden. Insoweit sei auch auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Um sowohl ein bezüglich des Arbeitspunkts als auch bezüglich des HF-Anteils gutes Führungsverhalten des Stromreglers sowie eine gute Entkopplung zwischen Längs- und Querzweig zu realisieren, bietet sich die Verwendung eines PI-P-Resonanzreglers sowohl für den Quer- als auch für den Längsstrom an.

Die eingepägten Längs- und Quer-Stellspannungen und die ermittelten Längs- und Querströme können weiterhin dazu verwendet werden, die differentielle Impedanz der Maschine in dem eingestellten Arbeitspunkt zu ermitteln. Falls die Stellspannungen oder die gemessenen Ströme störende Rauschanteile oder andere störende bzw. überlagernde Signalanteile aufweisen, kann ein Filter (z.B. Bandpassfilter 2. Ordnung) zur Filterung eingesetzt werden. Es ist von Bedeutung, dass der Filter auf alle in die Berechnung eingehenden Stellspannungen sowie Längs-

und Querströme anzuwenden ist, sodass die durch den Filter verursachte Phasenverschiebung und die Amplitudendämpfung bei allen Größen gleichermaßen eintreten.

Auf die ungefilterten oder gefilterten Stellspannungen sowie auf die ungefilterten oder gefilterten Ströme wird jeweils eine diskrete-Fourier-Transformation(DFT)-Algorithmus angewendet, dessen Ergebnis die komplexen Fourier-Koeffizienten für Längs- und Querstrom und Längs- und Quer-Stellspannung in Abhängigkeit von der Frequenz ist. Wenn zur Anregung ein HF-Signal mit einer festen Frequenz (z.B. sinusförmiges Testsignal) verwendet wird, kann die diskrete Fourier-Transformation durch den wesentlich einfacheren Goertzel-Algorithmus ersetzt werden, der die Fourier-Koeffizienten für Strom und Spannung für die gewünschte Anregungsfrequenz mit deutlich geringerem Aufwand hinsichtlich Rechenzeit und Speicherbedarf berechnen kann

Schließlich werden die Kenngrößen in Abhängigkeit von den Längs-Stellspannungskoeffizienten und den Längsstrom-Koeffizienten und/oder den Quer-Stellspannungskoeffizienten und den Querstrom-Koeffizienten berechnet. Zu diesen Kenngrößen kann die Impedanz \underline{Z} für den Arbeitspunkt gehören. Aus der Impedanz können durch eine gesonderte Betrachtung des Imaginär- und Realanteils der ohmsche Widerstand sowie unter Berücksichtigung der Anregungsfrequenz die differentiellen Induktivitäten L_{dd} , L_{qq} , L_{dq} und L_{qd} gewonnen werden.

In Schritt b) kann/können der Längsstromsollwert-Arbeitspunkt verändert werden und/oder der Querstromsollwert-Arbeitspunkt verändert werden, wobei die Schritte c) bis f) bei geändertem Längsstromsollwert-Arbeitspunkt und/oder bei geändertem Querstromsollwert-Arbeitspunkt wiederholt werden.

Das Regeln des Längsstroms i_d auf den Längsstromsollwert und/oder das Regeln des Querstroms i_q auf den Querstromsollwert kann basierend auf Regelungsparameter für die Stromregler durchgeführt werden, die von dem Längsstromsollwert-Arbeitspunkt und/oder dem Querstromsollwert-Arbeitspunkt abhängen. Nutzt man zur Regelung des Stromes z.B. einen PI oder einen PI-P-Resonanzregler, so können diese Regler nach aus der Literatur bekannten Einstellverfahren (z.B. Betragsoptimum) eingestellt werden. Die für dieses Verfahren notwendigen Kenngrößen (Induktivitäten) können z.B. aus einem Arbeitspunkt gewonnen werden, der bereits zuvor identifiziert wurde und der nur einen geringfügigen Unterschied zum aktuell zu identifizierenden Arbeitspunkt aufweist. Auf diese Weise kann z.B. auch bei SynRM, deren differentielle Induktivität sich zum Teil um Faktor 3 in Abhängigkeit des Stromes ändern kann, ein stabiles und dynamisches Verhalten der Stromregler sichergestellt werden.

Der Längsstromsollwert-Arbeitspunkt und/oder der Querstromsollwert-Arbeitspunkt kann/können derart fortlaufend verändert werden, dass eine Änderung des Längsstroms und/oder des Querstroms einen vorgebbaren Schwellenwert nicht überschreitet. Die Schwellenwerte für positive und negative Längs- und Querströme begrenzen damit das Feld der Arbeitspunkte bzw. definieren den zu identifizierenden Suchraum.

Das Berechnen der Kenngrößen kann in Abhängigkeit von einer Totzeit des Wechselrichters und/oder in Abhängigkeit von Signallaufzeiten von Filtern erfolgen, die zum Messen der Phasenströme dienen. Die aus der Totzeit resultierende Phasenverschiebung auf das Spannungssignal kann z.B. bei der Berechnung der Impedanz verwendet und so eine fehlerhafte Berechnung des Imaginär- und Realteils der Impedanz vermieden werden.

In Schritt a) kann unter Lösen der Blockierung die Drehwinkelstellung verändert werden und anschließend der Rotor bei veränderter Drehwinkelstellung erneut blockiert werden, wobei die Schritte b) bis f) bei geänderter Drehwinkelstellung wiederholt werden, um derart die Kenngrößen drehwinkelabhängig zu bestimmen.

Die stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen können aus der folgenden Menge von Kenngrößen ausgewählt werden: differentielle (nach dem Strom abgeleitete) Längsinduktivität(en) L_{dd} , differentielle (nach dem Strom abgeleitete) Querinduktivität(en) L_{qq} , Kreuzsättigung L_{dq} und L_{qd} , und Widerstände.

Weiterhin können auch die aus Induktivität und Widerstand zusammengesetzten Impedanzen direkt verwendet werden.

$$L_{dd}(i_d, i_q, \varphi) = \frac{\partial \psi_d(i_d, i_q, \varphi)}{\partial I_d}, \quad L_{dq}(i_d, i_q, \varphi) = \frac{\partial \psi_d(i_d, i_q, \varphi)}{\partial I_q},$$

$$L_{qd}(i_d, i_q, \varphi) = \frac{\partial \psi_q(i_d, i_q, \varphi)}{\partial i_d}, \quad L_{qq}(i_d, i_q, \varphi) = \frac{\partial \psi_q(i_d, i_q, \varphi)}{\partial i_q}.$$

Zur besseren Verständlichkeit sind die Spannungsgleichungen einer PMSM und einer SynRM in vereinfachter Form dargestellt. Bei SynRM ist zu beachten, dass der Permanentfluss ψ_{PM} null ist.

$$U_d = R_s \cdot I_d + L_{dd} \cdot \frac{dI_d}{dt} + L_{dq} \cdot \frac{dI_q}{dt} - \omega_{el} \cdot L_{sq} \cdot I_q$$

$$U_q = R_s \cdot I_q + L_{qd} \cdot \frac{dI_d}{dt} + L_{qq} \cdot \frac{dI_q}{dt} + \omega_{el} \cdot L_{sd} \cdot I_d + \omega_{el} \cdot \psi_{PM}$$

Es können stromabhängige und/oder ortsabhängige Flussverkettungen in Längsrichtung und Querrichtung ψ_d , ψ_q aus den berechneten differentiellen Längsinduktivitäten und Querinduktivitäten L_{dd} , L_{qq} sowie der berechneten Kreuzsättigung berechnet werden. Bei permanent-erregten Synchronmaschinen kann dies insbesondere unter Berücksichtigung der durch die Magnete bewirkten Flussverkettung in Längsrichtung erfolgen.

$$\psi_d(i_d, i_q) = \int_0^{I_{d,max}} L_{dd}(i_d, i_q) di_d + \psi_{PM}$$

$$\psi_q(i_d, i_q) = \int_0^{I_{q,max}} L_{qq}(i_d, i_q) di_q$$

Es können stromabhängige und/oder ortsabhängige absolute Induktivitäten in Längs- und Querrichtung aus den Flussverkettungen in Längsrichtung und Querrichtung sowie aus den zugehörigen Längsströmen und Querströmen berechnet werden.

$$L_{sd}(i_d, i_q) = \frac{\psi_d(i_d, i_q)}{i_d}, \quad L_{sq}(i_d, i_q) = \frac{\psi_q(i_d, i_q)}{i_q}$$

Die aus der Messung der Phasenströme gewonnenen Längsströme und/oder Querströme können gefiltert, beispielsweise bandpassgefiltert, werden.

Die elektrische Maschine kann eine Synchronmaschine oder einer Reluktanzmaschine sein. Das Verfahren kann auch für Induktionsmaschinen verwendet werden

Der Frequenzrichter weist eine Steuereinheit auf, beispielsweise in Form eines Mikroprozessors und zugehöriger Software, die dazu ausgebildet ist, ein oben genanntes Verfahren durchzuführen. Es versteht sich, dass der Frequenzrichter geeignete Messmittel zur Messung der benötigten Größen aufweist.

Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, dass für jeden relevanten Arbeitspunkt die Kenn- bzw. Ersatzschaltbildgrößen ermittelt werden. Hierfür werden bei einer SynRM oder PMSM, die in einem definierten Drehwinkelstellung festgebremst ist, unterschiedliche Arbeitspunkte, die sich durch einen konstanten Längs- und Querstrom auszeichnen, angefahren. Mittels einer Testsignalinjektion in Längs- und/oder Querrichtung können anschließend für den Arbeitspunkt

die differentiellen Impedanzen bzw. Induktivitäten ermittelt werden. Anhand weiterer mathematischer Berechnungen können aus den differentiellen Größen anschließend die absoluten Induktivitäten und Flüsse gewonnen werden.

Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Zeichnungen detailliert beschrieben. Hierbei zeigen:

- Fig. 1 ein grundlegendes schematisches Struktogramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Ermitteln von stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen einer elektrischen Maschine,
- Fig. 2 ein schematisches Blockschaltbild einer Struktur des erfindungsgemäßen Verfahrens in höherer Detaillierung zur Ermittlung der stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen,
- Fig. 3 eine Darstellung des Prinzips einer alternierenden Anregung für einen Arbeitspunkt,
- Fig. 4 einen zeitlichen Verlauf eines Längsstromsollwerts und eines Querstromsollwerts,
- Fig. 5 einen zeitlichen Verlauf eines Zustands einer Zustandssteuerung in Verbindung mit einem zugehörigen zeitlichen Verlauf eines Längsstromsollwerts und eines Querstromsollwerts, und
- Fig. 6 einen Teil des in Fig. 2 gezeigten Blockschaltbilds in größerer Detaillierung.

Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht die Identifikation der stromabhängigen Ersatzschaltbilddaten bzw. Kenngrößen einer permanenterregten Synchronmaschine, einer synchronen Reluktanzmaschine und/oder einer Induktionsmaschine. Das Verfahren kann ohne einen Lagegeber durchgeführt werden. Es besteht jedoch die Notwendigkeit, die Maschine während des Verfahrens zumindest während bestimmter Zeitabschnitte festzubremesen.

Das Verfahren basiert auf der alternierenden Injektion von HF-Signalen. Die Signalinjektion kann grundsätzlich mittels HF-Spannungssignalen oder durch Einprägung eines HF-Stromes in feldorientierten Koordinatensystem erfolgen. Das nachfolgend Beschriebene basiert auf der Einprägung des HF-Stromes. Die Messung erfolgt beim blockierten Rotor, wobei die Position des Rotors bekannt ist oder geschätzt wird. Die Identifikation der Rotorlage bzw. Drehwinkelstellung kann nach bekannten Verfahren erfolgen. Eisenverluste werden erst bei höheren Drehzahlen

signifikant und können deshalb bei der Messung von Induktivität im Stillstand der Maschine vernachlässigt werden.

Fig. 1 zeigt als Überblick ein Struktogramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Ermitteln von stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen in Form von differentiellen Längsinduktivitäten L_{dd} , differentiellen Querinduktivitäten L_{qq} , Kreuzsättigungen L_{dq} und L_{qd} und optional Widerständen bzw. Impedanzen.

Bezugnehmend auf Fig. 1 erfolgt in einem optionalen Eingabeschritt I1 zunächst eine Parametrierung der vorhandenen Regler aus Bemessungsdaten. Weiterhin werden in I1 die zu messenden Arbeitspunkte festgelegt.

Nachfolgend erfolgt in einem Schritt S1 ein Einstellen einer Drehwinkelstellung des Rotors der elektrischen Maschine, d.h. eine Ausrichtung des Rotors.

Nachfolgend wird in einem Eingabeschritt I2 der Rotor der elektrischen Maschine blockiert, so dass sich die Drehwinkelstellung des Rotors nicht mehr verändern kann.

In einem Schritt S2 werden ein Wicklungswiderstand und eine Wechselrichter Kennlinie ermittelt. Weiterhin werden über einfache Testsignale (z.B. Sprungantworten) die Induktivitäten grob bestimmt. Die so gewonnenen Erkenntnisse werden zur Auslegung der Frequenz des späteren Wechselsignals sowie zur Voreinstellung der Regelparameter der Stromregler verwendet.

In einem Schritt S3 findet das eigentliche Verfahren zur Identifikation der differentiellen Induktivitäten, Widerstände und Induktivitäten statt.

Aus den differentiellen Induktivitäten werden in einem Schritt S4 die Flussverkettungen Ψ_d und Ψ_q sowie die absoluten Induktivitäten ermittelt.

In einem Schritt S5 wird eine Verkettung des Permanentmagnetflusses unter Berücksichtigung einer Spannungskonstante k_e ermittelt, die in einem Eingabeschritt I3 eingegeben wird.

Die ermittelten Kenngrößen werden in einer Datenbank 14 abgespeichert.

Fig. 2 zeigt ein detailliertes Blockschaltbild einer Struktur des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Eine Bremse 2 dient zum Blockieren einer elektrischen Maschine 1 in Form einer Synchronmaschine, einer Reluktanzmaschine oder einer Induktionsmaschine.

Eine Zustandssteuerung 3 dient zur Erzeugung einer Zustandsvariablen k . Die Zustandssteuerung 3 in Verbindung mit einer Sollwertgenerierung 18 dient zum Vorgeben eines Längsstromsollwert-Arbeitspunkts $I_{d,0}^k$ und eines Querstromsollwert-Arbeitspunkts $I_{q,0}^k$, jeweils in Abhängigkeit vom Zustand k . Der Zustand k kann ganzzahlige Werte zwischen 0 und 2 annehmen.

Ein HF-Generator 4 empfängt den Zustand k und erzeugt – nachdem der stationäre Arbeitspunkt angefahren und die stationären Ströme eingeschwungen sind – in Abhängigkeit davon entweder ein Längsstromsollwert-Wechselsignal $i_{d,HF}^k$ oder ein Querstromsollwert-Wechselsignal $i_{q,HF}^k$.

Eine Stromregelung 5 empfängt den Längsstromsollwert-Arbeitspunkt $I_{d,0}^k$, den Querstromsollwert-Arbeitspunkt $I_{q,0}^k$, das Längsstromsollwert-Wechselsignal $i_{d,HF}^k$, das Querstromsollwert-Wechselsignal $i_{q,HF}^k$ und den Zustand k . In der Stromregelung 5 werden ein Längsstromsollwert durch Addieren des Längsstromsollwert-Arbeitspunkts und des Längsstromsollwert-Wechselsignals und ein Querstromsollwert durch Addieren des Querstromsollwert-Arbeitspunkts und des Querstromsollwert-Wechselsignals gebildet. Zur Verdeutlichung sei auch auf Fig. 6 verwiesen. Der Stromregler kann hierbei als z.B. als PI- oder PI-P-Resonanzregler ausgeführt und bezüglich seiner Reglerparameter von Arbeitspunkt zu Arbeitspunkt nachgeführt werden.

Die Stromregelung 5 regelt den Längsstrom i_d auf den Längsstromsollwert und regelt den Querstrom i_q auf den Querstromsollwert, wobei zum Regeln Stellgrößen in Form einer Längs-Stellspannung u_d^k und einer Quer-Stellspannung u_q^k erzeugt und in Motorphasen der elektrischen Maschine 1 eingepreßt werden. Hierzu wird herkömmlich eine Transformation der feldorientierten Stellspannungsgrößen (dq-System) in das ständerfeste α,β -System bzw. in das phasenspannungsbasierte uvw-System durchgeführt (beispielsweise zur inversen Clarke-Transformation 6). Die Einprägung der Spannung kann mittels einer Pulsweitenmodulation(PWM)-Erzeugungseinheit 7 und eines dreiphasigen H-Brücken-Wechselrichters 8 erfolgen. Bei den Elementen 6, 7 und 8 handelt es sich um herkömmliche Elemente, die beispielsweise bei so genannten feldorientierten Regelung oder auch Vektor-Regelungen zum Einsatz kommen. Insoweit sei auch auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Bezugnehmend auf Fig. 6, werden Phasenströme $i_{u,ist}$, $i_{v,ist}$, $i_{w,ist}$ der elektrischen Maschine 1 mittels herkömmlicher, nicht gezeigter Messmittel gemessen, wobei basierend auf den gemessenen Phasenströmen $i_{u,ist}$, $i_{v,ist}$, $i_{w,ist}$ mittels eines herkömmlichen uvw-dq-Wandlers 9 (beispielsweise zur Clarke-Parks-Transformation) ein sich einstellender Längsstrom $i_{d,ist}$ und ein sich einstellender Querstrom $i_{q,ist}$ aus den gemessenen Phasenströmen $i_{u,ist}$, $i_{v,ist}$, $i_{w,ist}$ ermittelt werden. Die Phasenströme $i_{u,ist}$, $i_{v,ist}$, $i_{w,ist}$ können sowohl mit 3 als auch mit 2 Messgliedern gemessen werden, wobei im Falle von 2 Messgliedern der dritte Phasenstrom aus den beiden anderen Phasenströmen zu berechnen ist. Insoweit sei ebenfalls auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen. Die Ströme $i_{d,ist}$ und $i_{q,ist}$ werden als Istwerte der Stromregelung 5 zur Verfügung gestellt.

Die Stromregelung 5 kann einen PI-Regler und einen dem PI-Regler parallel geschalteten P-Resonanzregler (PR-Regler) aufweisen.

Erneut Bezug nehmend auf Fig. 2, dient eine Identifikationseinheit 10 zur Kenngrößenermittlung basierend auf dem ermittelten Längsstrom i_d , dem ermittelten Querstrom i_q , der Längs-Stellspannung u_d^k , der Quer-Stellspannung u_q^k und dem Zustand k.

Ein Schalter bzw. Multiplexer 15 ist mit dem Längsstrom i_d , dem Querstrom i_q und dem Zustand k beaufschlagt und gibt in Abhängigkeit vom Zustand k entweder den Längsstrom i_d oder den Querstrom i_q an ein optionales Filter 11 aus, das beispielsweise in Form eines Bandpasses realisiert sein kann. Das Filter 11 (bzw. entsprechende weitere, parallele Instanzen des Filters 11) ist/sind weiter mit der Längs-Stellspannung u_d^k und der Quer-Stellspannung u_q^k beaufschlagt.

Eine DFT-Einheit 12 wendet eine diskrete-Fourier-Transformation(DFT)-Algorithmus oder einen Görtzel-Algorithmus auf die Längs-Stellspannung u_d^k , und/oder die Quer-Stellspannung u_q^k , und/oder den Längsstrom i_d und/oder den Querstrom i_q zur Erzeugung von Längs-Stellspannungs-Koeffizienten, Quer-Stellspannungs-Koeffizienten, Längsstrom-Koeffizienten bzw. Querstrom-Koeffizienten an.

Eine Berechnungseinheit 13 berechnet schließlich die (Impedanz-) Kenngrößen bzw. differentiellen Induktivitäten in Abhängigkeit von den Längs-Stellspannungs-Koeffizienten und den Längsstrom-Koeffizienten sowie den Quer-Stellspannungs-Koeffizienten und den Querstrom-Koeffizienten. Hierzu kann die Berechnungseinheit 13 die Längsstrom-Koeffizienten durch die Längs-Stellspannungs-Koeffizienten dividieren und die Querstrom-Koeffizienten durch die Quer-Stellspannungs-Koeffizienten dividieren. Aus den derart berechneten differentiellen Induktivitäts-

ten können die Flussverkettungen und die absoluten Flüsse berechnet werden. Bei der Berechnung können Totzeiten des Wechselrichters sowie unterschiedliche Filterzeiten z.B. bei der Stromerfassung berücksichtigt und kompensiert werden.

Die berechneten Kenngrößen werden in der Datenbank 14 abgespeichert.

Weiterhin können die ermittelten Kenngrößen zur Nachführung der Stromregelung für einen der folgenden Arbeitspunkte verwendet werden. Hierfür ist eine Nachführung der Reglerparameter 16 und 17 vorgesehen.

Weiter ist für einen Normalbetrieb ein Sollwertgeber 19, ein nachgeschalteter Lageregler 20 und eine nachgeschaltete Drehzahlregelung 21 vorgesehen, wobei ein Ausgang der Sollwertgenerierung 18 und ein Ausgang der Drehzahlregelung 21 auf einen Umschalter 22 geführt sind, der in Abhängigkeit von einem Bremszustand entweder den Ausgang der Sollwertgenerierung 18 oder den Ausgang der Drehzahlregelung 21 auf die Stromregelung 5 gibt.

Fig. 3 zeigt eine Darstellung des Prinzips der alternierenden Anregung für einen Arbeitspunkt, was nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 4 und 5 näher erläutert wird.

Fig. 4 zeigt einen zeitlichen Verlauf des Längsstromsollwerts bzw. des Längsstroms und des Querstromsollwerts bzw. des Querstroms. Die Führung der Arbeitspunkte ist hierbei derart optimiert, dass zwischen 2 aufeinander folgenden Arbeitspunkten jeweils nur ein geringer Unterschied entweder im Längsstromsollwert oder im Querstromsollwert besteht. Diese vorteilhaft ausgeführte Aneinanderreihung von Arbeitspunkten macht es möglich, dass die gemessenen Impedanzen des vorherigen Arbeitspunktes zur adaptiven Nachführung der Reglerparameter für die Messung des folgenden Arbeitspunktes verwendet werden können. Somit können auch Maschinen mit extremem Sättigungsverhalten und stark veränderlichen Induktivitäten stabil, robust und sicher identifiziert werden. Eine mögliche Ausführung besteht darin, dass zunächst der Längsstromsollwert bei den Arbeitspunkten konstant gehalten und der Querstromsollwert von 0 bis zum maximal zu identifizierenden Querstromsollwert variiert wird. Nach Erreichen des max. Querstromsollwerts wird der Längsstromsollwert erhöht und es können dann die Arbeitspunkte für diesen Längsstromsollwert in dem gewünschten Quadranten durch schrittweises Dekrementieren des Querstromsollwerts von max. Sollwert bis 0 angefahren werden. Durch geschickte Aneinanderreihung können alle 4 Quadranten eines Motors auf diese Weise gemessen werden.

Die weiter oben beschriebenen Schritte zur Ermittlung der Kenngrößen werden bei den veränderten Arbeitspunkten wiederholt.

Weiter kann die Drehwinkelstellung verändert und anschließend der Rotor bei veränderter Drehwinkelstellung blockiert werden, wobei die oben beschriebenen Schritte zur Ermittlung der Kenngrößen bei veränderter Drehwinkelstellung wiederholt werden.

Fig. 5 zeigt einen zeitlichen Verlauf des Zustands k der Zustandssteuerung 3 in Verbindung mit einem zugehörigen zeitlichen Verlauf des Längsstroms bzw. Längsstromsollwerts und des Querstroms bzw. Querstromsollwerts.

Der Zustand k hat anfänglich einen Wert von 0, ändert anschließend seinen Wert auf 1, dann auf 2 und kehrt zurück zu 0. Dieser Zyklus wird fortlaufend wiederholt.

Während des ersten Zyklus bleiben sowohl der Längsstromsollwert-Arbeitspunkt als auch der Querstromsollwert-Arbeitspunkt konstant. In diesem Zustand werden die neuen Längs- und Querstromsollwerte des Arbeitspunktes angefahren. Es wird auf ein Einschwingen der Regler sowie auf ein stationäres Verhalten gewartet, um eine unerwünschte Überlagerung des Anregelvorgangs des Arbeitspunktes und der eigentlichen Identifikation ($k=1$, $k=2$) zu vermeiden.

Im Zustand $k = 0$ werden weder das Längsstromsollwert-Wechselsignal noch das Querstromsollwert-Wechselsignal erzeugt, so dass auch der Längsstromsollwert und der Querstromsollwert konstant bleiben.

Im Zustand $k = 1$ wird nur das Längsstromsollwert-Wechselsignal als sinusförmiges Signal mit einer Längsstromsollwertfrequenz erzeugt, so dass sich der Längsstromsollwert um seinen Arbeitspunkt wie dargestellt sinusförmig mit der Längsstromsollwertfrequenz verändert. Der Querstromsollwert bleibt konstant. Im Zustand $k = 1$ werden Längsinduktivitäten L_{dd} und Kreuzsättigungen L_{dq} berechnet. Der Schalter 15 (Fig. 2) und damit das Berechnungsverfahren 10 werden hierbei erst freigeschaltet, nachdem das Wechselsignal für mehrere Perioden angestanden hat und die Regler sich einschwingen konnten. Der Schalter wird dann für eine ganzzahlige Anzahl von Wechselsignalperioden durchgeschaltet.

Im Zustand $k = 2$ wird nur das Querstromsollwert-Wechselsignal als sinusförmiges Signal mit einer Querstromsollwertfrequenz erzeugt, so dass sich der Querstromsollwert um seinen Arbeitspunkt wie dargestellt sinusförmig mit der Querstromsollwertfrequenz verändert. Der Längsstromsollwert bleibt konstant. Im Zustand $k = 2$ werden Querinduktivitäten L_{qq} und Kreuzsätti-

gungen I_{qd} berechnet. Der Schalter 15 (Fig. 2) und damit das Berechnungsverfahren 10 werden hierbei erst freigeschaltet, nachdem das Wechselsignal für mehrere Perioden angestanden hat und die Regler sich einschwingen konnten. Der Schalter wird dann für eine ganzzahlige Anzahl von Wechselsignalperioden durchgeschaltet.

Längsstromsollwertfrequenz und Querstromsollwertfrequenz können identisch sein. Die Auslegung der Frequenz für das Verfahren ist in Abhängigkeit des zu identifizierenden Motors und der zur Verfügung stehenden Stellspannung zu wählen. Je nach Motor kann sie zwischen 100 und 600 Hz liegen. Die Amplitude des Stromsignals ist in Abhängigkeit der Auflösung der Stromerfassung und des zu messenden Strombereichs festzulegen. In der Regel sollte die Amplitude zwischen 5-15% des Nennstroms der Maschine betragen.

Im folgenden Zyklus wird, wie in Fig. 5 dargestellt, der Querstromarbeitspunkt erhöht, wobei der Längsstromarbeitspunkt konstant bleibt. Im Übrigen entspricht der zweite Zyklus dem ersten Zyklus. Über einen längeren Zeitraum ergibt sich schließlich das in Fig. 4 dargestellt zeitliche Profil der Stromsollwerte.

Erfindungsgemäß werden Längs- und Querstrom mit parallel geschaltetem PI-Regler und PR-Regler (Proportional-Resonanz-Regler) geregelt. Die zugehörigen Stromsollwerte werden mit einer Zustandssteuerung 3 in Verbindung mit einer Sollwertgenerierung 18 erzeugt. Die entsprechenden Sollspannungen aus dem Ausgang des Reglers 5 und die gemessenen Ströme werden mit dem Goertzel-Algorithmus bezüglich der Längsstromsollwertfrequenz bzw. Querstromsollwertfrequenz analysiert, wobei je nach Injektionsrichtung nur eine Stromkomponente untersucht wird. Die Umschaltung erfolgt mit dem zustandsabhängigen Schalter 15.

Falls die Messgrößen stark verrauscht sind, kann ein Bandpassfilter 11 eingesetzt werden. Empfohlen wird ein Bandpassfilter 2. Ordnung, wobei das Bandpassfilter 11 auf alle in die Berechnung eingehenden Messgrößen anzuwenden ist, sodass die Phasenverschiebung und die Amplitudendämpfung bei allen Größen gleichermaßen eintreten.

Der Goertzel-Algorithmus liefert die DFT-Koeffizienten der Spannungen und des Injektionsstromes.

Kurz vor dem Wechsel des Arbeitspunktes (Zustand 2 \rightarrow 0) wird aus den DFT-Koeffizienten die (differentielle) Impedanz der Maschine 1 berechnet. Die identifizierten Induktivitäten werden zur Optimierung der Regelung nachgeführt und im Speicher 14 abgelegt.

Die Reglerparameter des PI- und P-Resonanzreglers werden automatisch ermittelt und durch die Ablaufsteuerung 3 von Messpunkt zu Messpunkt adaptiv nachgeführt.

Die Auslegung des Testsignals erfolgt automatisch.

Die Totzeit des Wechselrichters 8 wird berücksichtigt.

Die differentiellen Induktivitäten werden durch eine Division der DFT-Koeffizienten von Strom und Spannung berechnet. Dies ermöglicht bei Berücksichtigung der Totzeit eine hochgenaue Bestimmung der differentiellen Induktivitäten und der Kreuzkopplungen.

Aus den differentiellen Induktivitäten können die Flussverkettungen und die absoluten Flüsse berechnet werden.

Der P-Resonanzregler kann kurzzeitig deaktiviert werden, um eine schnelle und stabile Anpassung der Gleichanteile des Längs- und Querstroms zu ermöglichen.

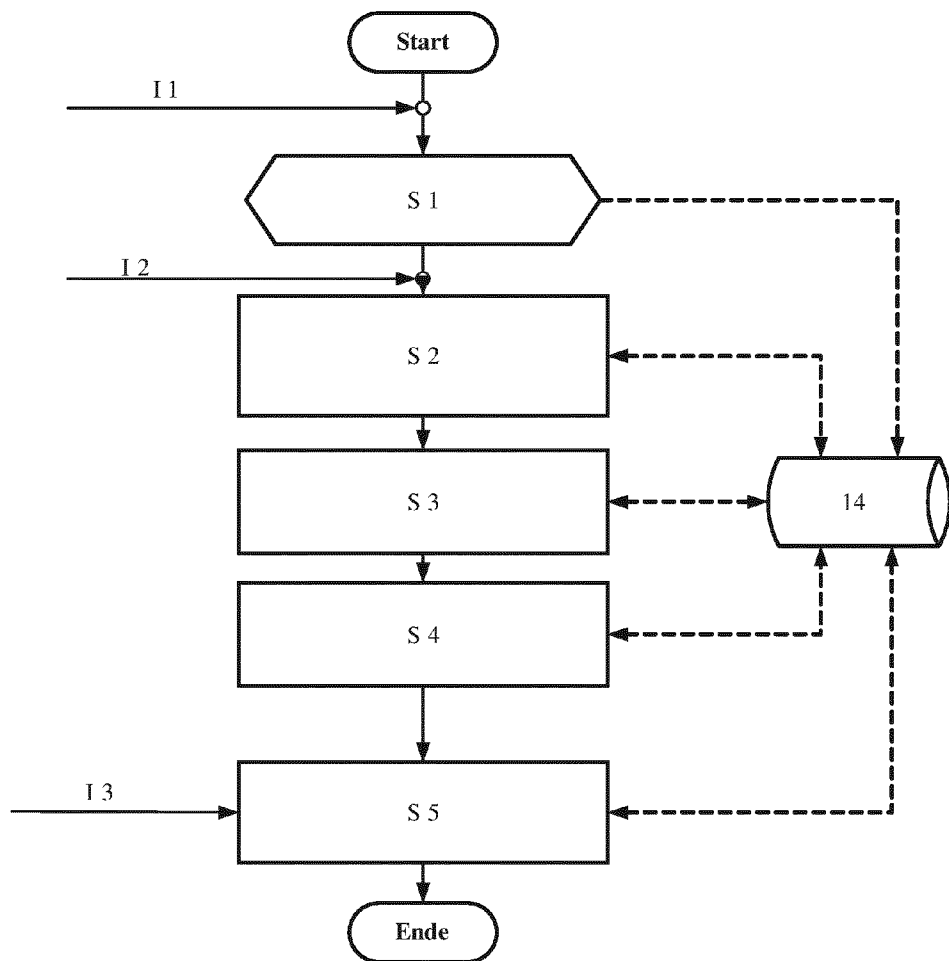
Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln von stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen einer elektrischen Maschine (1), insbesondere zur Durchführung mittels eines Wechselrichters (8), mit den Schritten:
 - a) Einstellen einer Drehwinkelstellung eines Rotors der elektrischen Maschine (1) und anschließendes Blockieren des Rotors,
 - b) Bilden eines Längsstromsollwerts durch Addieren eines Längsstromsollwert-Arbeitspunkts ($I_{d,0}^k$) und eines Längsstromsollwert-Wechselsignals ($I_{d,HF}^k$), wobei sich das Längsstromsollwert-Wechselsignal ($I_{d,HF}^k$) periodisch mit einer Längsstromsollwertfrequenz verändert, und/oder Bilden eines Querstromsollwerts durch Addieren eines Querstromsollwert-Arbeitspunkts ($I_{q,0}^k$) und eines Querstromsollwert-Wechselsignals ($I_{q,HF}^k$), wobei sich das Querstromsollwert-Wechselsignal ($I_{q,HF}^k$) periodisch mit einer Querstromsollwertfrequenz verändert,
 - c) Regeln eines Längsstroms (i_d) auf den Längsstromsollwert und/oder Regeln eines Querstroms (i_q) auf den Querstromsollwert, wobei zum Regeln Stellgrößen in Form einer Längs-Stellspannung (u_d^k) und/oder einer Quer-Stellspannung (u_q^k) erzeugt und in Motorphasen der elektrischen Maschine (1) eingepreßt werden,
 - d) Messen von Phasenströmen ($i_{u,ist}$, $i_{v,ist}$, $i_{w,ist}$) der elektrischen Maschine (1) und Ermitteln eines sich einstellenden Längsstroms ($i_{d,ist}$) und/oder eines sich einstellenden Querstroms ($i_{q,ist}$) aus den gemessenen Phasenströmen ($i_{u,ist}$, $i_{v,ist}$, $i_{w,ist}$),
 - e) Anwenden eines diskrete-Fourier-Transformation(DFT)-Algorithmus oder eines Görtzel-Algorithmus auf die Längs-Stellspannung (u_d^k) und auf den ermittelten Längsstrom ($i_{d,ist}$) zur Erzeugung von Längs-Stellspannungs-Koeffizienten und Längsstrom-Koeffizienten und/oder Anwenden des DFT-Algorithmus oder des Görtzel-Algorithmus auf die Quer-Stellspannung (u_q^k) und auf den ermittelten Querstrom ($i_{q,ist}$) zur Erzeugung von Quer-Stellspannungs-Koeffizienten und Querstrom-Koeffizienten, und
 - f) Berechnen der Kenngrößen in Abhängigkeit von den Längs-Stellspannungs-Koeffizienten und den Längsstrom-Koeffizienten und/oder den Quer-Stellspannungs-Koeffizienten und den Querstrom-Koeffizienten.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass
 - in Schritt b) der Längsstromsollwert-Arbeitspunkt verändert wird und/oder der Querstromsollwert-Arbeitspunkt verändert wird, wobei die Schritte c) bis f) bei geändertem Längsstromsollwert-Arbeitspunkt und/oder bei geändertem Querstromsollwert-Arbeitspunkt wiederholt werden.

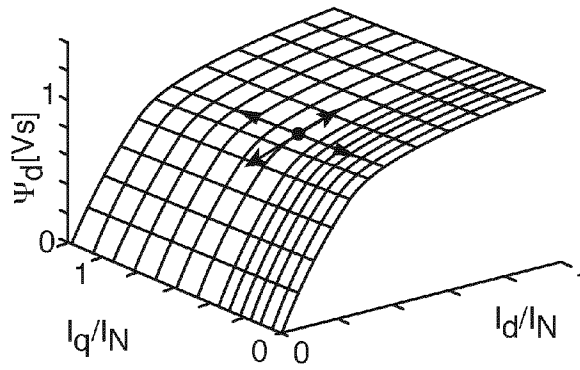
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass
 - das Regeln des Längsstroms (i_d) auf den Längsstromsollwert und/oder das Regeln des Querstroms (i_q) auf den Querstromsollwert basierend auf Regelungsparametern erfolgt, die von dem Längsstromsollwert-Arbeitspunkt und/oder dem Querstromsollwert-Arbeitspunkt abhängen.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass
 - der Längsstromsollwert-Arbeitspunkt und/oder der Querstromsollwert-Arbeitspunkt derart fortlaufend verändert wird/werden, dass eine Änderung des Längsstroms und/oder des Querstroms einen Schwellenwert nicht überschreitet.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
 - das Berechnen der Kenngrößen in Abhängigkeit von einer Totzeit des Wechselrichters (8) und/oder in Abhängigkeit von Signallaufzeiten von Filtern erfolgt, die zum Messen der Phasenströme dienen.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
 - in Schritt a) die Drehwinkelstellung verändert wird und anschließend der Rotor bei veränderter Drehwinkelstellung blockiert wird, wobei die Schritte b) bis f) bei geänderter Drehwinkelstellung wiederholt werden.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
 - die stromabhängigen und/oder drehwinkelstellungsabhängigen Kenngrößen ausgewählt sind aus der Menge von Kenngrößen:
 - differentielle Längsinduktivitäten,
 - differentielle Querinduktivitäten,
 - Kreuzsättigung,
 - Widerstände und
 - Impedanzen.
8. Verfahren nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch den Schritt:
 - Berechnen von stromabhängigen und/oder ortsabhängigen Flussverkettungen in Längs- und Querrichtung aus den berechneten differentiellen Längsinduktivitäten und Querinduktivitäten sowie der berechneten Kreuzsättigung, bei permanenterregten Synchronmaschinen insbesondere unter Berücksichtigung der durch deren Permanentmagnete bewirkten Flussverkettung in Längsrichtung.

9. Verfahren nach Anspruch 8, gekennzeichnet durch den Schritt:
 - Ermitteln von stromabhängigen und/oder ortsabhängigen absoluten Induktivitäten in Längsrichtung und Querrichtung aus den Flussverkettungen in Längsrichtung und Querrichtung sowie aus dem zugehörigen Längsstrom (i_d) und Querstrom (i_q).
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
 - der aus der Messung der Phasenströme gewonnene Längsstrom (i_d) und Querstrom (i_q) gefiltert werden.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
 - die elektrische Maschine (1) ein Synchronmaschine, oder einer Reluktanzmaschine, oder eine Induktionsmaschine ist.
12. Frequenzumrichter, aufweisend
 - eine Steuereinheit, die dazu ausgebildet ist, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11 durchzuführen.

Fig. 1



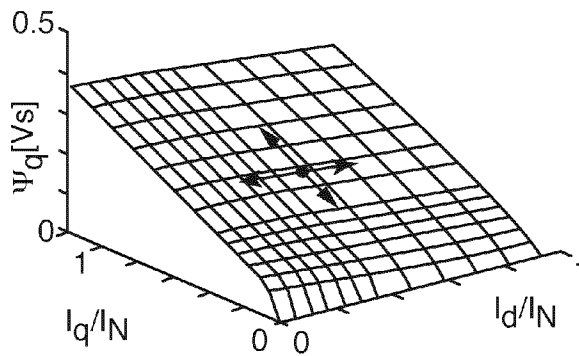
Anregung des Längsflusses



↔ Anregung in d-Achse L_{dd} und L_{qd}

↔ Anregung in q-Achse L_{dq} und L_{qq}

Anregung des Querflusses



↔ Anregung in d-Achse L_{dd} und L_{qd}

↔ Anregung in q-Achse L_{dq} und L_{qq}

Fig. 3

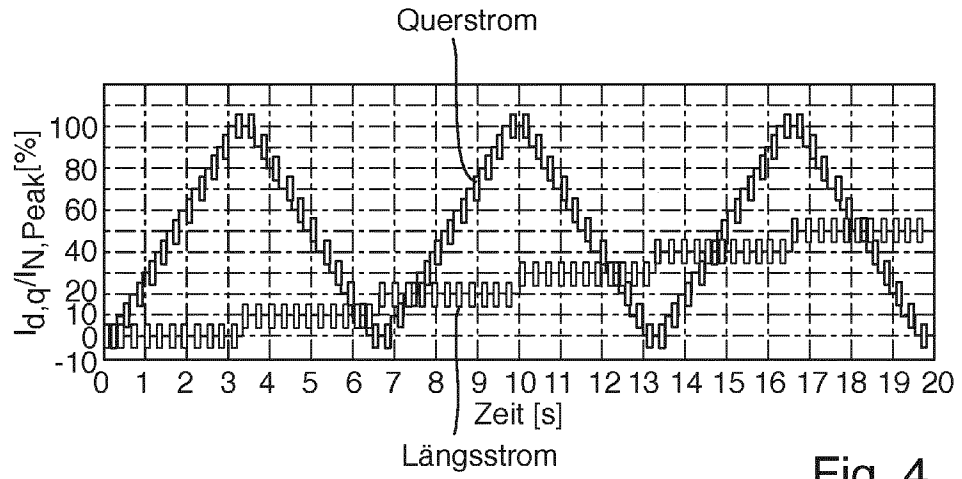


Fig. 4

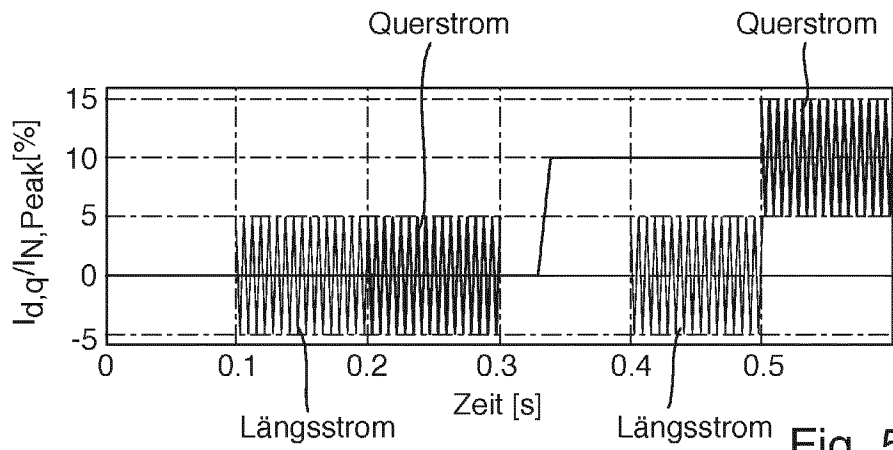


Fig. 5a

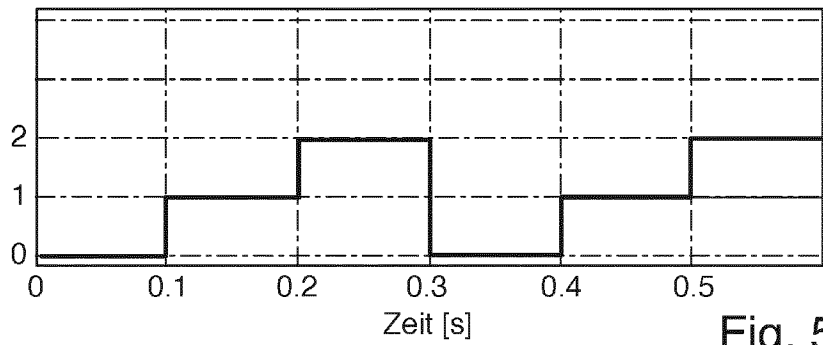


Fig. 5b

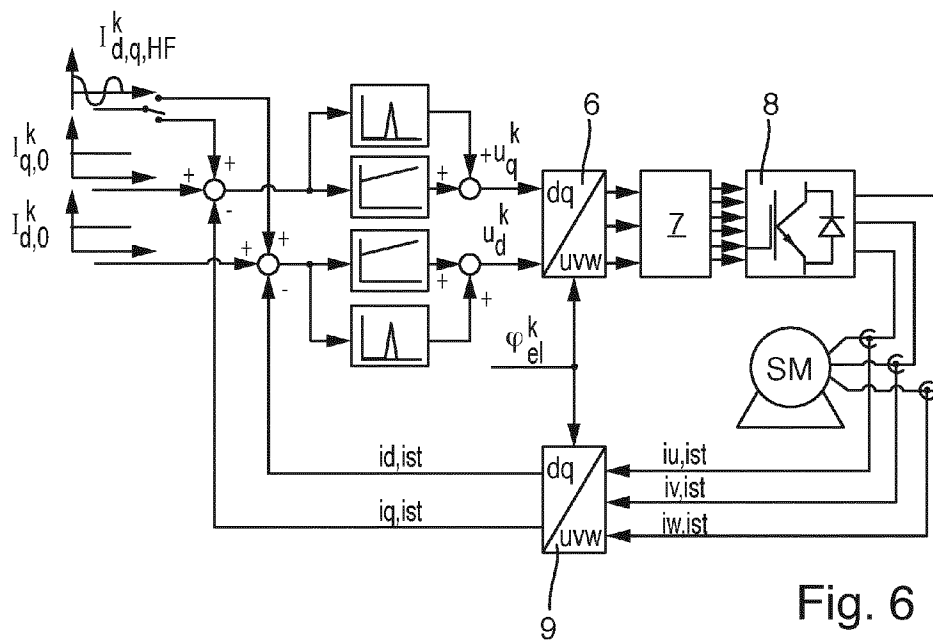


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/064726

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. H02P21/00 H02P6/185
ADD.
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	WEIGEL J ET AL: "Acquisition of a permanent magnet linear synchronous motor's electrical parameters and dead beat current control considering saturation", ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE, 2003. IEMDC'03. IEEE INTERNATIONAL JUNE 1-4, 2003, PISCATAWAY, NJ, USA, IEEE, vol. 2, 1 June 2003 (2003-06-01), pages 791-797, XP010643442, ISBN: 978-0-7803-7817-9 the whole document ----- -/--	1-12

Further documents are listed in the continuation of Box C.

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 26 September 2016	Date of mailing of the international search report 10/10/2016
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Schneider, Gernot

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/064726

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	ZHU Z Q ET AL: "Compensation for Rotor Position Estimation Error due to Cross-Coupling Magnetic Saturation in Signal Injection Based Sensorless Control of PM Brushless AC Motors", ELECTRIC MACHINES&DRIVES CONFERENCE, 2007. IEMDC '07. IEEE INTERNATIONAL, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 1 May 2007 (2007-05-01), pages 208-213, XP031114836, ISBN: 978-1-4244-0742-2 the whole document	1-12
A	----- EP 2 566 045 A2 (TOSHIBA KK [JP]) 6 March 2013 (2013-03-06) the whole document	1-12
A	----- US 2010/045218 A1 (TOMIGASHI YOSHIO [JP]) 25 February 2010 (2010-02-25) the whole document -----	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/064726

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
EP 2566045	A2	06-03-2013	CN 102969967 A	13-03-2013
			EP 2566045 A2	06-03-2013
			JP 5971707 B2	17-08-2016
			JP 2014014252 A	23-01-2014
			US 2013049656 A1	28-02-2013

US 2010045218	A1	25-02-2010	JP 5324159 B2	23-10-2013
			JP 2010051078 A	04-03-2010
			US 2010045218 A1	25-02-2010

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. H02P21/00 H02P6/185
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTER 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	WEIGEL J ET AL: "Acquisition of a permanent magnet linear synchronous motor's electrical parameters and dead beat current control considering saturation", ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE, 2003. IEMDC'03. IEEE INTERNATIONAL JUNE 1-4, 2003, PISCATAWAY, NJ, USA, IEEE, Bd. 2, 1. Juni 2003 (2003-06-01), Seiten 791-797, XP010643442, ISBN: 978-0-7803-7817-9 das ganze Dokument ----- -/-	1-12



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

26. September 2016

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

10/10/2016

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

Schneider, Gernot

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	ZHU Z Q ET AL: "Compensation for Rotor Position Estimation Error due to Cross-Coupling Magnetic Saturation in Signal Injection Based Sensorless Control of PM Brushless AC Motors", ELECTRIC MACHINES&DRIVES CONFERENCE, 2007. IEMDC '07. IEEE INTERNATIONAL, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 1. Mai 2007 (2007-05-01), Seiten 208-213, XP031114836, ISBN: 978-1-4244-0742-2 das ganze Dokument	1-12
A	----- EP 2 566 045 A2 (TOSHIBA KK [JP]) 6. März 2013 (2013-03-06) das ganze Dokument	1-12
A	----- US 2010/045218 A1 (TOMIGASHI YOSHIO [JP]) 25. Februar 2010 (2010-02-25) das ganze Dokument -----	1-12

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2016/064726

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 2566045	A2	06-03-2013	CN 102969967 A 13-03-2013
			EP 2566045 A2 06-03-2013
			JP 5971707 B2 17-08-2016
			JP 2014014252 A 23-01-2014
			US 2013049656 A1 28-02-2013

US 2010045218	A1	25-02-2010	JP 5324159 B2 23-10-2013
			JP 2010051078 A 04-03-2010
			US 2010045218 A1 25-02-2010
