

(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
10. März 2011 (10.03.2011)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2011/026578 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
H02P 25/02 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2010/005166

(22) Internationales Anmeldedatum:
24. August 2010 (24.08.2010)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2009 039 672.1
2. September 2009 (02.09.2009) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **SEW-EURODRIVE GMBH & CO. KG** [DE/DE]; Ernst-Blickle-Str. 42, 76646 Bruchsal (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **HAMMEL, Wolfgang** [DE/DE]; Reitschulweg 46, 76646 Bruchsal (DE). **HARTMANN, Matthias** [DE/DE]; Franz-Bläsi-Strasse 4, 76646 Bruchsal (DE). **WOLF, Harald** [DE/DE]; Nikolausplatz 18, 76698 Übstadt-Weiher (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY,

BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, 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, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- hinsichtlich der Identität des Erfinders (Regel 4.17 Ziffer i)
- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING THE ROTOR POSITION OF A SYNCHRONOUS MACHINE WITH FIELD-ORIENTED CONTROL

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER ROTORLAGE EINER FELDORIENTIERT BETRIEBENEN SYNCHRONMASCHINE

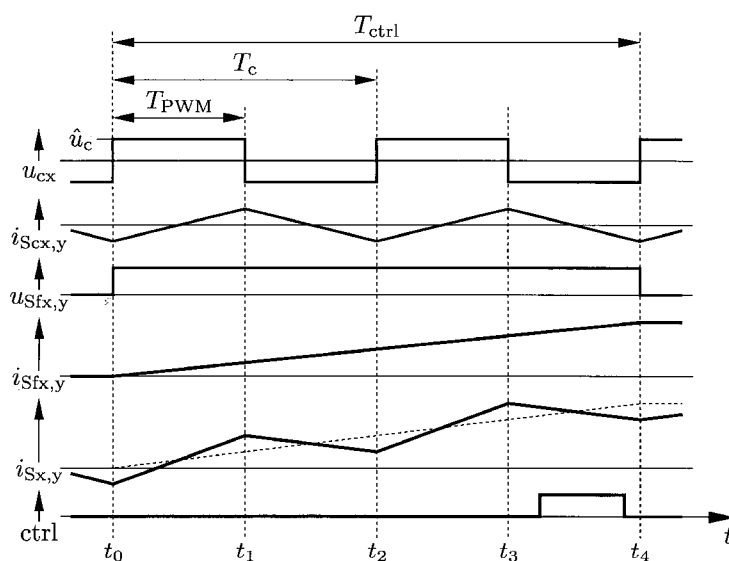


Fig. 1

(57) Abstract: Method for determining the rotor position of a synchronous machine with field-oriented control which has an effective inductance which is dependent on the rotor position, wherein the motor current is detected and the motor voltage is set using a pulse width modulation method, wherein a signal which is synchronous to the pulse width modulation frequency is superimposed on the motor voltage value to be set, wherein values for the motor current are detected in synchronism with the pulse width modulation frequency, wherein a current component brought about by the superimposed voltage signal and a residual current component, i.e. the fundamental component, are determined, wherein an estimated rotor angle position is determined from the current component brought about by the superimposed voltage signal, the phase angle of said rotor angle position being reduced with respect to the actual rotor angle position by means of a flux model, wherein the residual current component is supplied to a current regulator.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2011/026578 A2



- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii)
- Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

Veröffentlicht:

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage einer feldorientiert betriebenen Synchronmaschine, die eine von der Rotorlage abhängige wirksame Induktivität aufweist, wobei der Motorstrom erfasst wird und die Motorspannung unter Verwendung eines Pulsweitenmodulationsverfahrens gestellt wird, wobei ein zur Pulsweitenmodulationsfrequenz synchrones Signal dem zu stellenden Motorspannungswert überlagert wird, wobei synchron zur Pulsweitenmodulationsfrequenz Werte des Motorstroms erfasst werden, wobei ein durch das überlagerte Spannungssignal bewirkter Stromanteil und ein restlicher Stromanteil, also Grundwellenanteil, bestimmt werden wobei aus dem durch das überlagerte Spannungssignal bewirkten Stromanteil eine geschätzte Rotorwinkellage bestimmt wird, deren Fehlwinkel zur tatsächlichen Rotorwinkellage mittels eines Flussmodells vermindert wird, wobei der restliche Stromanteil einem Stromregler zugeführt wird.

Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage einer feldorientiert betriebenen Synchronmaschine

Beschreibung:

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage einer feldorientiert betriebenen Synchronmaschine.

Aus der DE 102 26 974 A1 ist ein Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage einer feldorientiert betriebenen Synchronmaschine bekannt. Dabei wird eine sensorlose Lageerkennung ausgeführt, indem der pulsweitenmodulierten Ausgangsspannung des Umrichters ein hochfrequentes Signal zusätzlich überlagert und aus dem zugehörigen Stromsignal der hochfrequente Anteil vom Grundwellenanteil separiert wird. Der hochfrequente Anteil wird zur Bestimmung des Rotorlagewinkels verwendet. Der Grundwellenanteil wird als Istwert einem Stromregler zugeführt.

Alternativ wären die hochfrequenten Anteile auch mittels eines Bandpasses abtrennbar.

Aus der DE 10 2008 025 408.8 – 32 ist ein Verfahren zum Regeln einer Synchronmaschine bekannt, bei der ein auf der induzierten Spannung senkrecht stehender Rotorflussraumzeiger gebildet und als Rückführgröße verwendet wird, die somit bei verschwindender Drift ebenfalls verschwindet.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, die Rotorlagenbestimmung weiterzubilden und das Regelverfahren für Synchronmaschinen zu verbessern.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe bei dem Verfahren nach den in Anspruch 1 angegebenen Merkmalen gelöst.

Wichtige Merkmale der Erfindung bei dem Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage einer feldorientiert betriebenen Synchronmaschine sind, dass eine von der Rotorlage abhängige wirksame Induktivität vorgesehen ist,

wobei der Motorstrom erfasst wird und die Motorspannung unter Verwendung eines Pulsweitenmodulationsverfahrens gestellt wird,

wobei ein zur Pulsweitenmodulationsfrequenz synchrones Signal dem zu stellenden Motorspannungswert überlagert wird ,

wobei synchron zur Pulsweitenmodulationsfrequenz Werte des Motorstroms erfasst werden,

5

wobei ein durch das überlagerte Spannungssignal bewirkter Stromanteil und ein restlicher Stromanteil, also der Grundwellenanteil, bestimmt werden

10 wobei aus dem durch das überlagerte Spannungssignal bewirkten Stromanteil eine geschätzte Rotorwinkellage bestimmt wird, deren Fehlwinkel zur tatsächlichen Rotorwinkellage mittels eines Flussmodells vermindert wird,

wobei der restliche Stromanteil einem Stromregler zugeführt wird.

15 Von Vorteil ist dabei, dass ein sensorloses Betreiben einer Synchronmaschine mit einem verbesserten Regelverfahren ermöglicht ist. Insbesondere ist aus erfassten Strommesswerten ein für einen in der Zukunft liegenden Zeitpunkt extrapolierter Stromwert bestimmbar, der als Eingangswert für eine Reglerstruktur verwendbar ist, so dass die für das nächste Zeitintervall bestimmten Stellgrößen aus diesem extrapolierten Stromwert
20 bestimmbar sind und zu diesem Zeitpunkt zeitgleich wirksam werden. Somit ist das Regelverfahren für die Synchronmaschine verbessert. Insbesondere ergibt sich im geschlossenen Stromregelkreis eine verringerte wirksame Totzeit, wodurch sich das Regelverhalten, insbesondere die erreichbare Bandbreite, erhöhen lässt.

25 Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird **eine Anzahl von Motorstrommesswerten zum Bestimmen von Parametern verwendet, die in einer dem Grundwellenanteil zugeordneten ersten parameterbehafteten Funktion vorgesehen sind und in einer dem durch das überlagerte Spannungssignal bewirkten Stromanteil zugeordneten zweiten parameterbehafteten Funktion, insbesondere wobei die Summe der**
30 **parameterbehafteten Funktionen an die erfassten Stromwerte angepasst und/oder als Fittfunktionen angefittet werden.** Von Vorteil ist dabei, dass für den Grundwellenanteil eine parameterbehaftete Funktion zum Fitten, also Anpassen, verwendet wird, die zumindest einen nichtlinearen Anteil aufweist. Auf diese Weise ist auch die Bestimmung des abzuseparierenden überlagerten höher frequenten Signals verbessert, da Abweichungen im
35 Anpassen des Grundwellenanteils zu Verfälschungen bei der Bestimmung der Amplitude des

durch das überlagerte Spannungssignal bewirkten Stromanteils führen und der Grundwellenstromanteil sehr präzise bestimmbar ist.

5 Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung ist die erste parameterbehaftete Funktion ein Polynom n-ter Ordnung, insbesondere wobei die Anzahl um Eins größer ist als n. Von Vorteil ist dabei, dass das Polynom exakt bestimmbar ist.

10 Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung ist die zweite parameterbehaftete Funktion ein Dreieckssignal und/oder eine aus linearen Abschnitten zusammengesetzte Funktion, insbesondere deren Amplitude ein Parameter ist und deren Frequenz synchron zur Pulsweitenmodulationsfrequenz ist. Von Vorteil ist dabei, dass der hochfrequente Anteil in sehr guter Näherung mathematisch abbildbar und mit nur einem Parameter beschreibbar ist.

15 Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung beträgt die Anzahl vier oder größer als vier. Von Vorteil ist dabei, dass nur wenige Strommessungen zur Ausführung der Erfindung ausreichen.

20 Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird nach Bestimmung der Parameter der parameterbehafteten Funktionen ein Stromwert extrapoliert für einen Zeitpunkt, an welchem die Werte der Stellgröße, insbesondere der Ausgangsspannung, wirksam gemacht werden, so dass zur Bestimmung der Werte der Stellgröße ein zeitgleicher Stromwert als Eingangswert für die Regelstruktur verwendet wird. Von Vorteil ist dabei, dass eine Extrapolation des Grundwellenanteils ausführbar ist und somit der in die Regelstruktur eingehende Wert dem gleichen Zeitpunkt zugeordnet ist wie auch die Stellgrößenwerte.

25 Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird die Amplitude des durch das überlagerte Spannungssignal bewirkten Stromanteils aus einer Linearkombination von mindestens drei der erfassten Strommesswerte bestimmt. Von Vorteil ist dabei, dass eine Bestimmung der Amplitude in sehr einfacher Weise ermöglicht ist.

30 Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird ein extrapolierter Stromwert für einen Zeitpunkt, an welchem ein Wert der Stellgröße, insbesondere der Ausgangsspannung, wirksam gemacht wird, bestimmt durch Linearkombination von mindestens drei der erfassten Strommesswerte. Von Vorteil ist dabei, dass eine sehr einfache und schnelle Extrapolation ausführbar ist.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird ein Modellwert für die Winkellage aus den gemessenen elektrischen Größen Motorspannung und Motorstrom bestimmt, insbesondere wobei die Synchronmaschine ohne Winkellage-Sensor ausgestattet ist. Von Vorteil ist dabei, dass eine geberlose Regelung realisierbar ist bei einer Synchronmaschine.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung weist die wirksame Induktivität in verschiedenen Rotorwinkellagen verschiedene Werte auf. Insbesondere ist dadurch eine Rotorwinkellageerkennung auch bei sehr kleinen Drehzahlen und im Stillstand ausführbar.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung beträgt die Periodendauer des überlagerten Signals das n -fache der Pulsweitenmodulationsdauer, wobei n eine ganz Zahl ist, die größer ist als Zwei. Von Vorteil ist dabei, dass eine Separation des Grundwellenanteils vom hochfrequenten Anteil ermöglicht ist, insbesondere mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird der zu stellende Motorspannungswert nach einer jeweiligen Zeitdauer T_{ctrl} bestimmt, insbesondere die das Vierfache oder ein höheres ganzzahliges Vielfaches der Pulsweitenmodulationsdauer beträgt. Von Vorteil ist dabei, dass synchron zur Pulsweitenmodulationsdauer ein Strommesswert bestimmbar ist und nach Ermittlung von vier Strommesswerten der Grundwellenanteil und der höher frequente Anteil separierbar sind, wobei die Fittfunktionen den bestimmten Stromverlauf sehr gut annähern.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird synchron zu den Zeitpunkten der größten Signalspannungsänderung der Motorstrom erfasst. Von Vorteil ist dabei, dass somit stets ein lokaler Extremalwert als Strommesswert erfasst wird. Auf diese Weise ist die Amplitude des höher frequenten Stromanteils besonders genau ermittelbar.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird der durch das überlagerte Spannungssignal bewirkte Stromanteil, also der höher frequente Stromanteil, vom erfassten Strom subtrahiert und der so bestimmte Motorstrom als Istwert der feldorientierten Regelung zugeführt. Von Vorteil ist dabei, dass die Überlagerung separiert wird und somit der Grundwellenanteil zur Regelung verwendet wird, welcher das Regelverhalten der Maschine beeinflusst. Der höher frequente Stromanteil wird zur Rotorwinkellagenbestimmung verwendet.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird ein geschätzter Flussraumzeiger erzeugt, dessen Richtung der geschätzten Rotorwinkellage entspricht und dieser geschätzte Flussraumzeiger dem Flussmodell zur Stützung zugeführt wird,

- 5 wobei dem Flussmodell auch der jeweilige Wert der gestellten Ausgangsspannung und des erfassten Motorstroms zugeführt wird. Dabei ist der geschätzte Flussraumzeiger auf einen Flussraumzeiger hin regelbar ist, der aus Ausgangsspannung und Motorstrom bestimmt wird. Von Vorteil ist dabei, dass die hohe Dynamik des Flussmodells auch bei sehr kleinen Drehzahlen nutzbar ist.

10

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird im Flussmodell ein Rotorflussraumzeiger bestimmt, dessen Differenz zum geschätzten Rotorflussraumzeiger einem Proportional-Integrierglied zugeführt wird,

- 15 wobei das Ausgangssignal des Proportional-Integriergliedes zur Driftreduzierung eines Integriergliedes des Flussmodells verwendet wird. Von Vorteil ist dabei, dass eine geberlose Regelung ermöglicht wird, bei der der Drift des Integrierglieds derart entgegenwirkbar ist, dass der geschätzte Flussraumzeiger in Richtung des physikalischen Flussraumzeigers hin geregelt wird und somit auf Grund der Stützung des Flussmodells keine Phasenverschiebung
20 des Modellflussraumzeigers gegenüber dem tatsächlichen Flussraumzeiger resultiert.

- Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird unterhalb einer ersten Drehzahl das Flussmodell gestützt durch den auf dem geschätzten Rotorlagewinkel basierten Rotorflussraumzeiger, insbesondere wobei der Betrag vorgebbbar ist und die Richtung aus dem durch das
25 überlagerte Spannungssignal bewirkten Stromanteil geschätzt wird. Von Vorteil ist dabei, dass das Flussmodell auch bei sehr kleinen Drehzahlen und im Stillstand verwendbar ist.

- Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird oberhalb einer zweiten Drehzahl das Flussmodell gestützt durch einen Rotorflussraumzeiger, dessen Betrag vorgebbbar und dessen Richtung
30 senkrecht steht auf der Richtung des induzierten Spannungsraumzeigers, der eingangsseitig am Flussmodell gebildet wird. Von Vorteil ist dabei, dass oberhalb der zweiten Drehzahl eine hohe induzierte Spannung erzeugt wird und somit eine gute Rotorwinkellageerkennung ermöglicht ist. Des weiteren kann im oberen Drehzahlbereich die überlagerte hochfrequente Spannung abgeschaltet werden, was eine vollständige Ausnutzung der maximalen
35 Umrichterausgangsspannung ermöglicht.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung wird zwischen der ersten und zweiten Drehzahl das Flussmodell gestützt durch einen Rotorflussraumzeiger, der als Summe gebildet ist aus einem ersten Anteil vom auf dem geschätzten Rotorlagewinkel basierten

- 5 Rotorflussraumzeiger und aus einem weiteren Anteil vom demjenigen Rotorflussraumzeiger, dessen Betrag vorgebbar und dessen Richtung senkrecht steht auf der Richtung des induzierten Spannungsraumzeigers, der eingangsseitig am Flussmodell gebildet wird, wobei das Verhältnis der Anteile frequenzabhängig ist. Von Vorteil ist dabei, dass in diesem Übergangsdrehzahlbereich, also zwischen erster und zweiter Drehzahl, ein kontinuierlicher
- 10 Wechsel zwischen den rückgeführten Größen erfolgt, wodurch Unstetigkeiten im Regelverhalten vermieden werden.

Insbesondere ist die erste Drehzahl kleiner als die zweite Drehzahl.

- 15 Weitere Vorteile ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Die Erfindung wird nun anhand von Abbildungen näher erläutert:

Erfindungsgemäß wird ein Elektromotor, insbesondere Synchronmotor, aus einem Umrichter gespeist, der in seiner Signalelektronik eine Regelschaltung umfasst. Der Synchronmotor umfasst dabei einen mit Dauermagneten bestückten Rotor. Alternativ ist aber auch ein Rotor mit Felderregewicklung verwendbar, wobei die Erregewicklung dann jedoch induktiv gekoppelt oder mittels Bürsten mit unipolarem Strom zu versorgen ist.

Dieser geberlos, also ohne Winkelsensor, arbeitenden Regelschaltung wird der Motorstrom als Istwert zugeführt.

Von der Regelschaltung wird die Motorspannung als Ausgangsgröße gestellt, indem ein jeweiliges Pulsweitenmodulationsverhältnis ausgegeben wird, das bei Mittelung über die Pulsweitenmodulationsperiodendauer T_{PWM} den zu stellenden Wert ergibt. Dabei werden von der Regelschaltung in jedem Zeitintervall T_{ctrl} neue Werte für die Stellgrößen berechnet und somit ein jeweils nächster Ausgangsspannungswert bestimmt, also ein jeweils nächster Wert für die Motorspannung. Diese Zeitdauer T_{ctrl} beträgt im gezeigten Ausführungsbeispiel vier T_{PWM} Pulsweitenmodulationsperiodendauern.

Zur Winkellageerkennung des Rotors wird der Ausgangsgröße der Regelschaltung ein hochfrequentes Trägersignal überlagert. Im Folgenden wird die Ausgangsgröße auch als Grundwelle bezeichnet, der das Trägersignal überlagert ist.

Dabei wird das Trägersignal in einer geschätzten Richtung des Rotors dem von der Regelung bestimmten Grundwellensignal, also dem Motorspannungsraumzeiger, überlagert. Hierbei ist der Motorspannungsraumzeiger als ein in einer zweidimensionalen Ebene drehbarer Vektor darstellbar. Die Amplitude des Trägersignals ist skalar darstellbar und die Richtung entspricht der geschätzten Richtung des Rotors. Der vom Umrichter ausgangsseitig zur Versorgung des Synchronmotors zur Verfügung zu stellende Spannungsraumzeiger ist also eine Überlagerung des Vektors der Grundwelle und des Trägersignals.

In Figur 1 sind beispielhafte idealisierte Strom- und Spannungsverläufe gezeigt.

Dabei ist ein beispielhafter Soll-Spannungsverlauf $u_{Sfx,y}$ an den Eingangsklemmen des Elektromotors, insbesondere als Stellwert des Stromreglers, gezeigt, wobei das überlagerte

hochfrequente Trägersignal weggelassen ist. Der Spannungsverlauf u_{cx} des hochfrequenten Trägersignals weist eine Periodendauer T_c auf, die beispielhaft dem Zweifachen der Pulsweitenmodulationsperiodendauer T_{PWM} entspricht.

- 5 Infolge der Motorinduktivität ergeben sich die zu den Spannungsverläufen zugehörigen Stromverläufe, nämlich der Stromverlauf $i_{scx,y}$ des hochfrequenten Trägersignals und der aus dem Spannungsverlauf $u_{sfx,y}$ resultierende Stromverlauf $i_{sfx,y}$ in einer Statorwicklung des Elektromotors. Der resultierende Gesamt-Stromverlauf $i_{sx,y}$ in der Statorwicklung des Elektromotors ist ebenfalls abgebildet.

10

Erfindungsgemäß wird der Motorstrom, also der Motorstromraumzeiger, jeweils zu den in Figur 1 gezeigten Zeitpunkten, nämlich zum Abtastzeitpunkt t_0 , Abtastzeitpunkt t_1 , Abtastzeitpunkt t_2 und Abtastzeitpunkt t_3 der Stromerfassung erfasst.

- 15 Diese Abtastzeitpunkte liegen synchron zum Pulsweitenmodulationssignal. Außerdem sind die Abtastzeitpunkte auch zeitgleich zu denjenigen Zeitpunkten gelegt, an denen das rechteckförmige Trägersignal seine Sprungstellen aufweist. An diesen Zeitpunkten weist also der Spannungsverlauf des Trägersignals die größten Spannungsveränderungen auf. Auf diese Weise sind also die jeweiligen Maxima und Minima des Stromverlaufs des
- 20 Trägersignals an den Abtastzeitpunkten angeordnet und somit wird der Strom jeweils an diesen Extremwerten erfasst.

- Mittels der synchronen Abtastung ist eine Bestimmung der durch den Spannungsverlauf des Trägersignals bewirkten, genannten lokalen Maxima und Minima des Stromverlaufs
- 25 ermöglicht. Dabei wird innerhalb einer Pulsweitenmodulationsperiode ein linearer Stromverlauf angenommen, was bei einer Pulsweitenmodulationsfrequenz von mehreren kHz, beispielsweise etwa 4 kHz, 8 kHz oder sogar 16 kHz, eine sehr gute Näherung darstellt.

- Im Gegensatz zur Verwendung eines Bandpassfilters zur Separation des hochfrequenten Trägersignals wird also keine Phasenverschiebung bewirkt. Denn die erfindungsgemäße
- 30 synchrone Abtastung ermöglicht ein direktes Bestimmen des hochfrequenten Stromverlaufs.

- Zur Separation des hochfrequenten Trägersignalanteils vom Grundwellenanteil wird nun angenommen, dass die Grundwelle ein Polynom zweiter Ordnung als Funktion der Zeit ist,
- 35 wobei dieses durch drei Parameter bestimmt ist, und dass das Trägersignal aus linearen

Funktionsabschnitten zusammengesetzt sei, wobei das Trägersignal synchron ist zur Pulsweitenmodulationsfrequenz. Somit ist die Amplitude des Trägersignals sowie die drei Parameter des Polynoms bestimmbar durch die 4 erfassten Stromwerte.

- 5 Auf diese Weise ist einerseits der Trägersignalverlauf und der Grundwellenverlauf in sehr guter Näherung bekannt gemacht und andererseits ist eine Extrapolation des zum Zeitpunkt t_4 zu erwartenden Stromwertes ausgeführt. Dabei ist der Zeitpunkt t_4 wiederum gleichmäßig beabstandet wie die Abtastzeitpunkte t_0, t_1, t_2, t_3 . Die Zeitpunkte weisen also zu dem ihnen jeweils vorangehenden Zeitpunkt den gleichen Zeitabstand auf.

10

Wie schon oben geschildert erfolgt in jedem Zeitintervall T_{ctrl} eine erneute Bestimmung der Werte der Stellgrößen, insbesondere der Motorspannung. Die hierfür notwendigen Rechenschritte werden zwischen den Zeitpunkten t_3 und t_4 ausgeführt. Als Eingangsgröße für die Bestimmung wird der für den Zeitpunkt t_4 extrapolierte Stromwert des Grundwellenanteils
15 verwendet. Auf diese Weise ist somit der wirklich vorhandene Stromwert zu diesem Zeitpunkt mit hoher Genauigkeit bekannt und zur Bestimmung der Stellgrößenwerte wird ein totzeitfreier Stromwert verwendet.

- Der hochfrequente Stromanteil wird zur Bestimmung des Rotorwinkels verwendet. Da er
20 nicht durch ein Bandpassfilter oder ähnliche Mittel geführt ist, unterliegt er keiner Phasenverschiebung und erlaubt eine sehr präzise Bestimmung des Rotorlagewinkels. Insbesondere wird der so demodulierte hochfrequente Stromanteil auch bei dynamischen Veränderungen des Grundwellenanteils nicht verfälscht. Dies gilt auch dann, wenn der verwendete Motor signifikantes Sättigungsverhalten aufweist, wodurch die
25 Grundwellenstromanstiege nichtlinear erfolgen.

- In Figur 2 ist für ein Ausführungsbeispiel der wesentliche Teil der Regelstruktur dargestellt, die für niedrige Drehzahlen des Rotors verwendet wird. Dabei wird die Speisespannung des Drehstrommotors mittels der Endstufe 1 zur Verfügung gestellt. Der erfasste Motorstrom,
30 also der Stator-Stromraumzeiger i_s , wird mittels der Koordinatentransformation $T(x)$ in einem Koordinatensystem dargestellt, das mittels des geschätzten Rotorlagewinkels verdreht ist gegen das ortsfeste Koordinatensystem. Der Stator-Stromraumzeiger wird dann einem Entkoppelungsmodul zugeführt, das - wie schon zuvor beschrieben - aus den erfassten Strommesswerten den hochfrequenten Signalanteil ausfiltert und einen extrapolierten
35 Stromwert i_{sf4} für den Grundwellenanteil bestimmt, der dem Stromregler, umfassend das Proportional- und Integrierglied 3, zugeführt wird. Dem Ausgangssignal des Proportional- und

Integrierglieds 3 wird die Trägersignalspannung U_c überlagert und das Ergebnis als Stellgröße der pulsweitenmoduliert betriebenen Endstufe 1 zugeführt.

Der ausgefilterte hochfrequente Signalanteil wird in einen Fehlwinkel $\tilde{\theta}_e$ übergeführt, woraus unter Verwendung des geschätzten Rotorlagewinkels θ_e ein Referenzwinkel für die Rotorposition $\tilde{\theta}_{rc}$ bestimmt wird. Der somit bestimmte Modellwert für die Rotorlage wird als Richtung für einen geschätzten Rotorflussraumzeiger verwendet, der einem Flussmodell 4 zugeführt wird. Dabei wird die Regelabweichung des Rotorflussraumzeigers einem Proportional- und Integrierglied 5 zugeführt.

Dabei wird der gestellte Spannungsraumzeiger u_s vermindert um den ohmschen Spannungsabfall $R_s \times i_s$ und dann aufsummiert, also integriert, auf den Wert des geschätzten Statorflussraumzeigers. Hiervon wird ein dem Statorstrom entsprechender Flussanteil abgezogen, wodurch ein Schätzwert für den Rotorflussraumzeiger bestimmt wird.

Das Argument des geschätzten Rotorflussraumzeigers wird verwendet, um zusammen mit dem ermittelten Fehlwinkel $\tilde{\theta}_e$ den Referenzwinkel für die Rotorposition $\tilde{\theta}_{rc}$ zu bestimmen.

Das Ausführungsbeispiel nach Figur 2 ist für niedrige Drehzahlen des Rotors vorteilhaft verwendbar.

In Figur 3 wird ein weiteres Ausführungsbeispiel gezeigt, das für hohe und niedrige Frequenzen vorteilhaft verwendbar ist.

Dabei wird das Flussmodell für niedrige Drehzahlen auf einen Referenzflusszeiger gestützt, dessen Richtung aus dem hochfrequenten demodulierten Trägerstrom bestimmt wurde, wie zur Figur 2 beschrieben.

Bei sehr hohen Drehzahlen wird ebenfalls ein Rotorflussraumzeiger zur Stützung des Flussmodells verwendet, dessen Winkellage jedoch ohne Verwendung des hochfrequenten Trägerstromes bestimmt wird. Dieser Winkel wird derart bestimmt, dass er senkrecht gerichtet ist zur Richtung des induzierten Spannungsraumzeigers, der eingangsseitig im Flussmodell bestimmt wird. Die Rückführgröße ist also derart ausgestaltet, dass bei

verschwindender Drift des Integrationsergebnisses des Integriergliedes im Flussmodell die Rückführgröße ebenfalls verschwindet.

5 Bei Frequenzen in einem vorgebbaren Übergangs-Frequenzbereich, der zwischen den genannten hohen und niedrigen Drehzahlen liegt, wird eine Mischung, insbesondere lineare Überlagerung abhängig von der Frequenz, der beiden Rotorflussraumzeiger bestimmt und dann als Stützung des Flussmodells verwendet.

10 Weitere Details und Merkmale der Erfindung sind den Figuren entnehmbar und dort für den Fachmann genügend deutlich ersichtlich.

Bezugszeichenliste

- 1 Endstufe
- 2 Entkoppelungsmodul
- 5 3 Proportional- und Integrierglied
- 4 Flussmodell
- 5 Proportional- und Integrierglied
- U_{cx} Spannungsverlauf des hochfrequenten Trägersignals
- 10 $i_{Scx,y}$ Stromverlauf des hochfrequenten Trägersignals
- $u_{Sfx,y}$ Spannungsverlauf des Grundwellenanteils der Motorspannung, insbesondere als Stellwert des Stromreglers
- $i_{Sfx,y}$ aus $u_{Sfx,y}$ resultierender Stromverlauf in einer Statorwicklung des Elektromotors
- $i_{Sx,y}$ resultierender Gesamt-Stromverlauf in einer Statorwicklung des Elektromotors
- 15
- T_{ctrl} Periodendauer des Stromreglers
- T_c Periodendauer des hochfrequenten Trägersignals
- T_{PWM} Pulsweitenmodulationsperiodendauer
- t_0 Abtastzeitpunkt der Stromerfassung
- 20 t_1 Abtastzeitpunkt der Stromerfassung
- t_2 Abtastzeitpunkt der Stromerfassung
- t_3 Abtastzeitpunkt der Stromerfassung
- t_4 Prognosezeitpunkt für den Strom
- 25
- PMSM Synchronmotor mit auf seinem Rotor angeordneten Permanentmagneten

5 Patentansprüche:

1. Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage einer feldorientiert betriebenen Synchronmaschine, die eine von der Rotorlage abhängige wirksame Induktivität aufweist,

10 wobei der Motorstrom erfasst wird und die Motorspannung unter Verwendung eines Pulsweitenmodulationsverfahrens gestellt wird,

dadurch gekennzeichnet, dass

15 ein zur Pulsweitenmodulationsfrequenz synchrones Signal dem zu stellenden Motorspannungswert überlagert wird ,

wobei synchron zur Pulsweitenmodulationsfrequenz Werte des Motorstroms erfasst werden,

20 wobei ein durch das überlagerte Spannungssignal bewirkter Stromanteil und ein restlicher Stromanteil, also der Grundwellenanteil, bestimmt werden

wobei aus dem durch das überlagerte Spannungssignal bewirkten Stromanteil eine geschätzte Rotorwinkellage bestimmt wird, deren Fehlwinkel zur tatsächlichen

25 Rotorwinkellage mittels eines Flussmodells vermindert wird,

wobei der restliche Stromanteil einem Stromregler zugeführt wird.

2. Verfahren nach mindestens Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass

eine Anzahl von Motorstrommesswerten zum Bestimmen von Parametern verwendet wird,
5 die in einer dem Grundwellenanteil zugeordneten ersten parameterbehafteten Funktion
vorgesehen sind und in einer dem durch das überlagerte Spannungssignal bewirkten
Stromanteil zugeordneten zweiten parameterbehafteten Funktion,

insbesondere wobei die Summe der parameterbehafteten Funktionen an die erfassten
10 Stromwerte angepasst und/oder als Fittfunktionen angefitet werden.

3. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

die erste parameterbehaftete Funktion ein Polynom n-ter Ordnung ist, insbesondere wobei
15 die Anzahl von Motorstrommesswerten um Eins größer ist als n,

und/oder dass die zweite parameterbehaftete Funktion ein Dreieckssignal und/oder eine aus
linearen Abschnitten zusammengesetzte Funktion ist, insbesondere deren Amplitude ein
Parameter ist und deren Frequenz synchron zur Pulsweitenmodulationsfrequenz ist.

4. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
20 die Anzahl vier beträgt oder größer als vier ist.

5. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

nach Bestimmung der Parameter der parameterbehafteten Funktionen ein Stromwert
extrapoliert wird für einen Zeitpunkt, an welchem die Werte der Stellgröße, insbesondere der
Ausgangsspannung, wirksam gemacht werden, so dass zur Bestimmung der Werte der
30 Stellgröße ein zeitgleicher Stromwert verwendet wird.

6. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

5 die Amplitude des durch das überlagerte Spannungssignal bewirkten Stromanteils aus einer
Linearkombination von mindestens drei der erfassten Strommesswerte bestimmt wird.

7. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

10 ein extrapolierter Stromwert für einen Zeitpunkt, an welchem ein Wert der Stellgröße,
insbesondere der Ausgangsspannung, wirksam gemacht werden, bestimmt wird durch
Linearkombination von mindestens drei der erfassten Strommesswerte.

8. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

15 ein Modellwert für die Winkellage aus den gemessenen elektrischen Größen Motorspannung
und Motorstrom bestimmt wird, insbesondere wobei die Synchronmaschine ohne Winkellage-
Sensor ausgestattet ist.

9. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

20 die wirksame Induktivität in verschiedenen Rotorwinkellagen verschiedene Werte aufweist,
und/oder dass
die Periodendauer des überlagerten Signals das n-fache der Pulsweitenmodulationsdauer
beträgt, wobei n eine ganz Zahl ist, die größer ist als Eins.

25

10. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

der zu stellende Motorspannungswert nach einer jeweiligen Zeitdauer T_{ctrl} bestimmt wird,
insbesondere die das Vierfache oder ein höheres ganzzahliges Vielfaches der
30 Pulsweitenmodulationsdauer beträgt,
und/oder dass
synchron zu den Zeitpunkten der größten Signalspannungsänderung der Motorstrom erfasst
wird.

11. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

5 der durch das überlagerte Spannungssignal bewirkter Stromanteil vom erfassten Strom
subtrahiert wird und der so bestimmte Motorstrom als Istwert der feldorientierten Regelung
zugeführt wird.

12. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

10 ein geschätzter Flussraumzeiger erzeugt wird, dessen Richtung der geschätzten
Rotorwinkellage entspricht und dieser geschätzte Flussraumzeiger dem Flussmodell zur
Stützung zugeführt wird,

wobei dem Flussmodell auch der jeweilige Wert der gestellten Ausgangsspannung und des
15 erfassten Motorstroms zugeführt wird.

13. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

im Flussmodell ein Rotorflussraumzeiger bestimmt wird, dessen Differenz zum geschätzten
20 Rotorflussraumzeiger einem Proportional-Integrierglied zugeführt wird,

wobei das Ausgangssignal des Proportional-Integriergliedes zur Driftreduzierung eines
Integriergliedes des Flussmodells verwendet wird.

14. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass

unterhalb einer ersten Drehzahl das Flussmodell gestützt wird durch den auf dem
geschätzten Rotorlagewinkel basierten Rotorflussraumzeiger, insbesondere wobei der
Betrag vorgebbar ist und die Richtung aus dem durch das überlagerte Spannungssignal
bewirkten Stromanteil geschätzt wird,

und/oder dass

oberhalb einer zweiten Drehzahl das Flussmodell gestützt wird durch einen
Rotorflussraumzeiger, dessen Betrag vorgebbar und dessen Richtung senkrecht steht auf
der Richtung des induzierten Spannungsraumzeigers, der eingangsseitig am Flussmodell
gebildet wird,

und/oder dass

zwischen der ersten und zweiten Drehzahl das Flussmodell gestützt wird durch einen
Rotorflussraumzeiger, der als Summe gebildet ist aus einem ersten Anteil vom auf dem
geschätzten Rotorlagewinkel basierten Rotorflussraumzeiger und aus einem weiteren Anteil
vom demjenigen Rotorflussraumzeiger, dessen Betrag vorgebbar und dessen Richtung
senkrecht steht auf der Richtung des induzierten Spannungsraumzeigers, der eingangsseitig
am Flussmodell gebildet wird, wobei das Verhältnis der Anteile frequenzabhängig ist.

15. Verfahren nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die erste Drehzahl kleiner ist als die zweite Drehzahl.

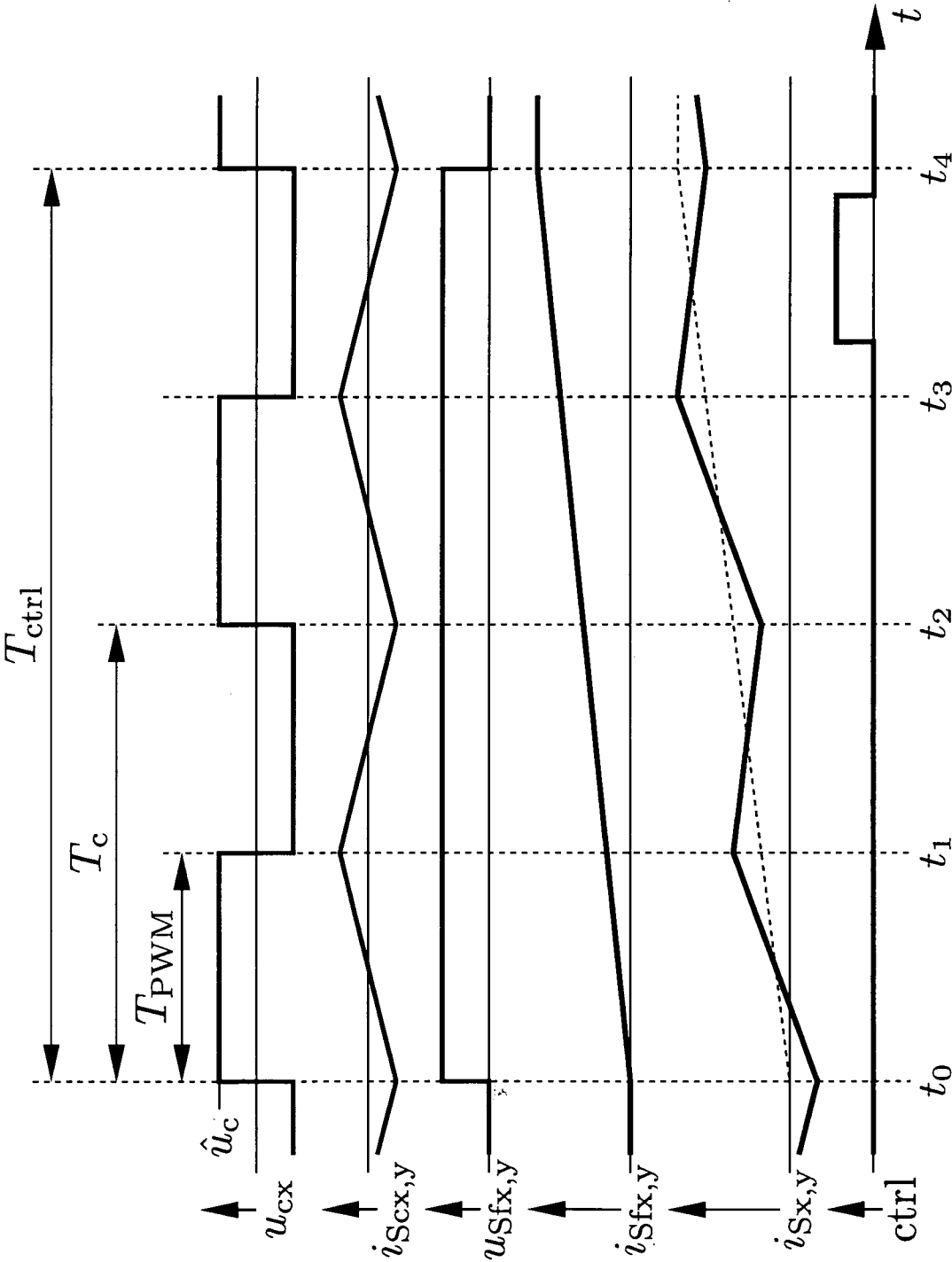
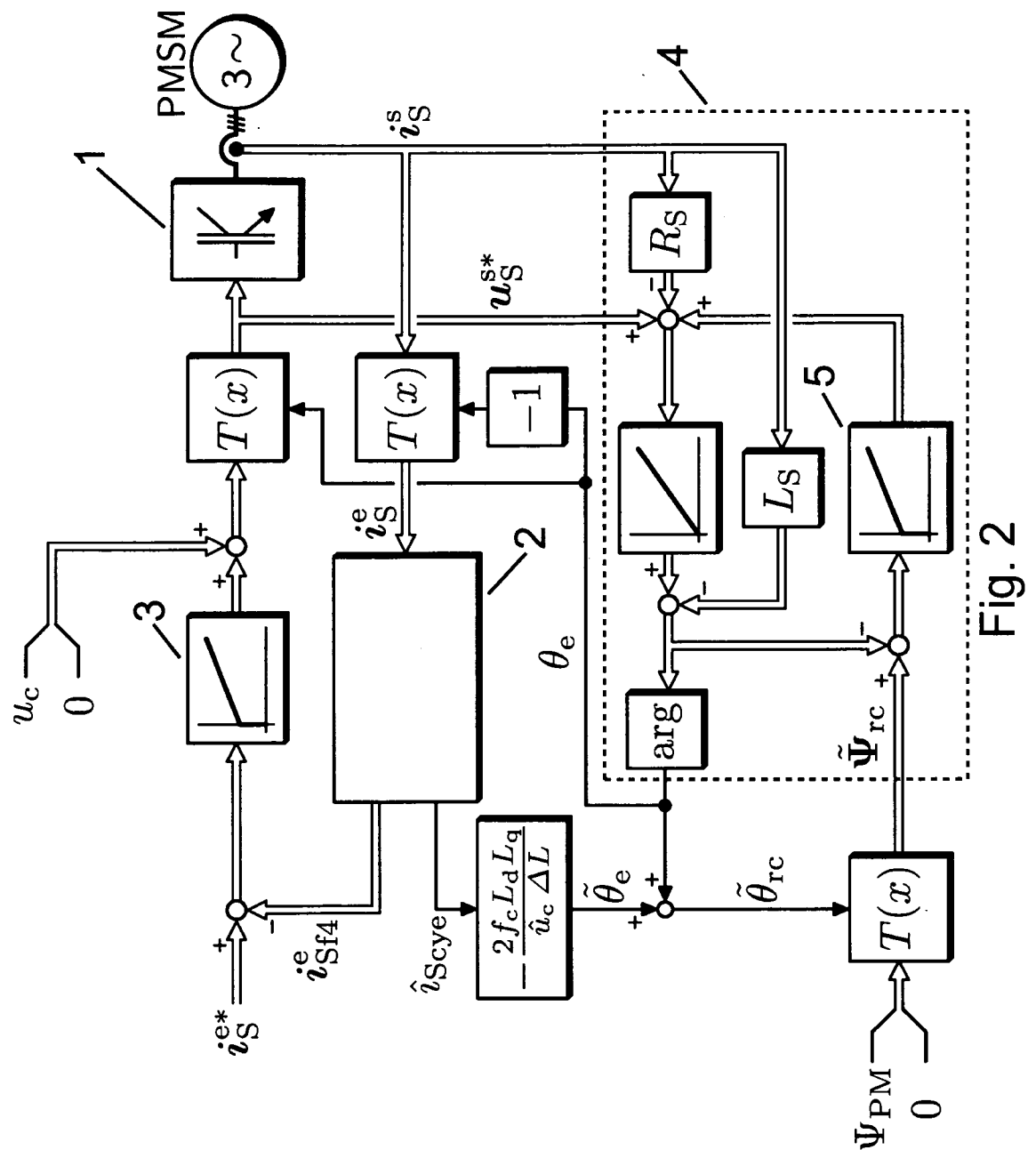


Fig. 1



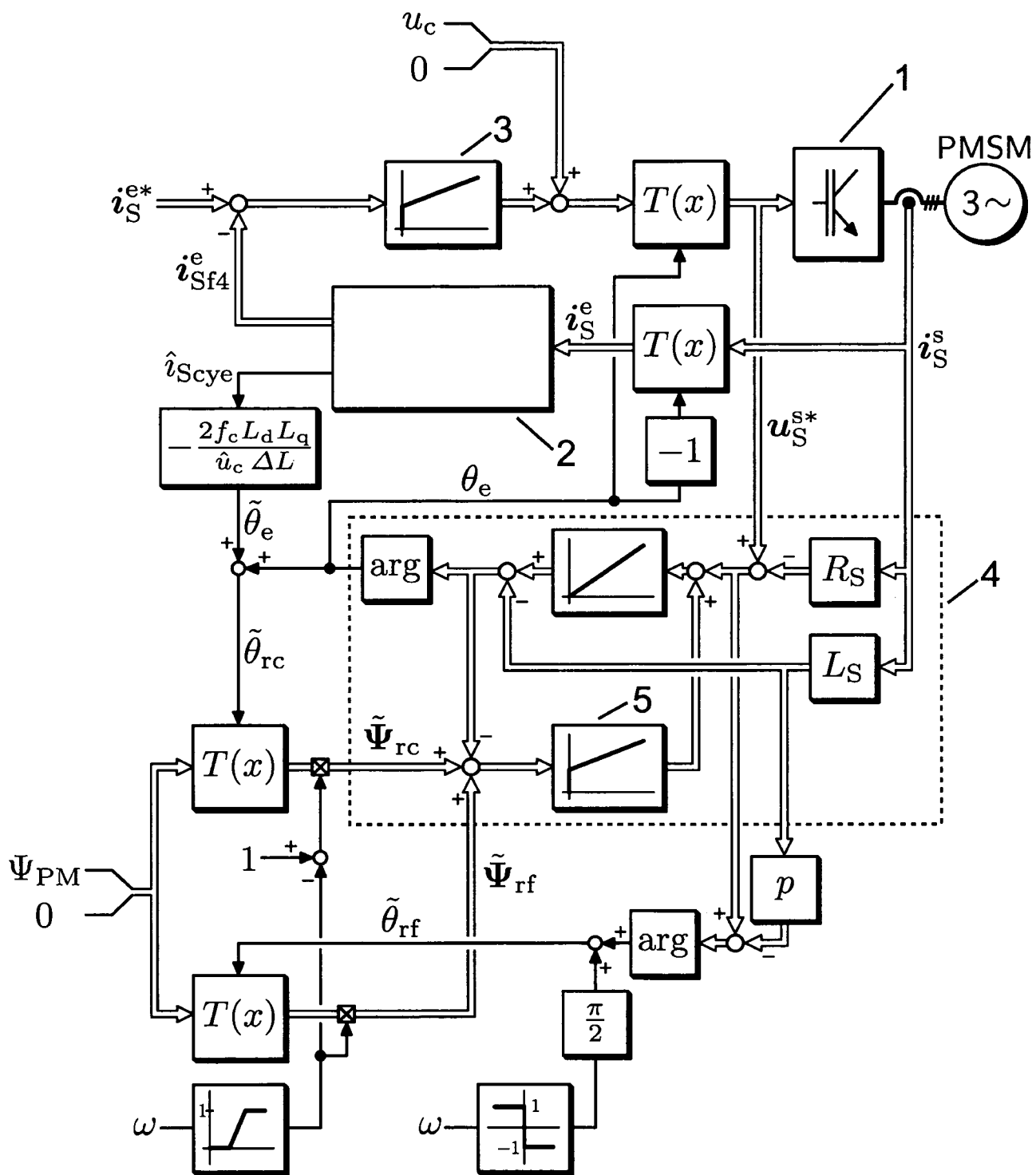


Fig. 3