

(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
6. Dezember 2012 (06.12.2012)



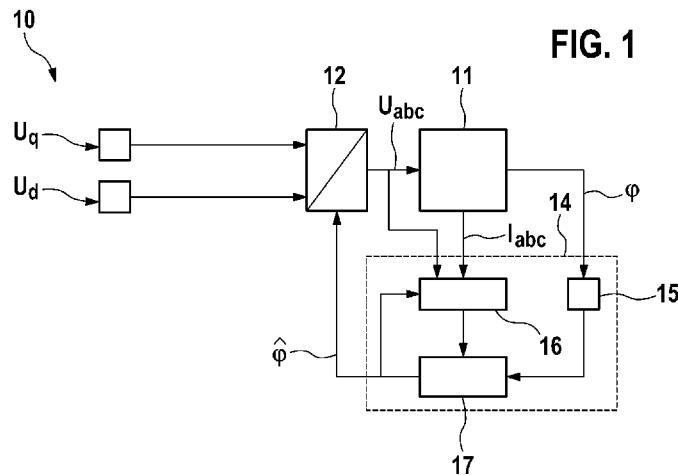
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/163585 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2012/056299
- (22) Internationales Anmeldedatum: 5. April 2012 (05.04.2012)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität: 10 2011 076 734.7 30. Mai 2011 (30.05.2011) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **ROBERT BOSCH GMBH** [DE/DE]; Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **LINGENFELSER, Christian** [DE/DE]; Hansjakobstr. 13, 76707 Hambruecken (DE). **MAYER-JOHN, Eckart** [DE/DE]; Wunnensteinstr. 27, 70188 Stuttgart (DE). **GOETTING, Gunther** [DE/DE]; Schuetzenhausweg 39, 70499 Stuttgart (DE).
- (74) Gemeinsamer Vertreter: **ROBERT BOSCH GMBH**, Postfach 30 02 20, 70442 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, 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, QA, RO, RS, RU, RW, 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, 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, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND APPARATUS FOR ANGLE ESTIMATION IN A SYNCHRONOUS MACHINE

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR WINKELSCHÄTZUNG IN EINER SYNCHRONMASCHINE



(57) Abstract: The invention relates to an apparatus for angle estimation in a synchronous machine (11), comprising: an angle sensor device (15), which is designed to determine event-discrete measurement values for a rotor angle (φ) of a rotor of the synchronous machine (11) and to output a measurement signal which is dependent on the measurement values determined; an estimation device (16), which is designed to detect current and/or voltage signals from the synchronous machine (11) and to calculate a discrepancy ($\Delta\varphi$) of the rotor angle (φ) of the rotor of the synchronous machine (11) with respect to an expected rotor angle depending on the detected current and/or voltage signals and to output a discrepancy signal which is dependent on the calculated discrepancy ($\Delta\varphi$); and a combination device (17), which is designed to receive the measurement signal and the discrepancy signal and to calculate an estimated value ($\hat{\varphi}$) for the rotor angle (φ) of the rotor of the synchronous machine (11) from a combination of the measurement signal and the discrepancy signal.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2012/163585 A2

**Veröffentlicht:**

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

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine (11), mit einer Winkelsensoreinrichtung (15), welche dazu ausgelegt ist, ereignisdiskrete Messwerte für einen Rotorwinkel (φ) eines Rotors der Synchronmaschine (11) zu ermitteln und ein von den ermittelten Messwerten abhängiges Messsignal auszugeben, einer Schätzeinrichtung (16), welche dazu ausgelegt ist, Strom- und/oder Spannungssignale der Synchronmaschine (11) zu erfassen und in Abhängigkeit von den erfassten Strom- und/oder Spannungssignalen eine Abweichung ($\Delta\varphi$) des Rotorwinkels (φ) des Rotors der Synchronmaschine (11) von einem erwarteten Rotorwinkel zu berechnen und ein von der berechneten Abweichung ($\Delta\varphi$) abhängiges Abweichungssignal auszugeben, und einer Kombiniereinrichtung (17), welche dazu ausgelegt ist, das Messsignal und das Abweichungssignal zu empfangen und aus einer Kombination des Messsignals und des Abweichungssignals einen Schätzwert (φ) für den Rotorwinkel (φ) des Rotors der Synchronmaschine (11) zu berechnen.

Beschreibung

5 Titel

Verfahren und Vorrichtung zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine, insbesondere in einer permanenterregten Synchronmaschine.

10

Stand der Technik

Zum Betrieb von permanenterregten Synchronmaschinen, die beispielsweise in elektrischer Antriebstechnik für elektrisch betriebene Fahrzeuge wie Elektrofahrzeuge oder Hybridfahrzeuge eingesetzt werden, ist es notwendig, den Rotorwinkel zu kennen, also die Position des Rotors bzw. Läufers der Synchronmaschine in Bezug auf seine Drehbewegung um die Rotorwelle. Diese Messgröße wird benötigt, um die Momentenerzeugung auf die tatsächliche Rotorposition abzustimmen.

15

Der Rotorwinkel kann beispielsweise mithilfe von Winkelsensoren bestimmt werden. Derartige Winkelsensorik, insbesondere Winkelsensorik mit hoher Auflösung, kann jedoch beträchtliche Kosten bei der Fertigung von elektrischen Antriebssystemen verursachen. Daher werden häufig kostengünstige Winkelsensoren mit entsprechend niedrigerer Winkelauflösung eingesetzt. Es ist beispielsweise aus der Druckschrift DE 10 2007 052 365 A1 ein Verfahren zur Bestimmung eines Rotorwinkels einer Synchronmaschine mithilfe eines niedrig auflösenden Winkelsensors und eines Kalman-Filters bekannt.

25

Alternativ ist es möglich, statt der Messung des Rotorwinkels über Winkelsensoren eine Schätzung auf der Basis von Strom- und/oder Spannungssensoren durchzuführen. Dabei können sogenannte aktive Verfahren eingesetzt werden, also Verfahren, bei denen ein zusätzliches Spannungssignal auf die an die Maschine angelegte Versorgungsspannung aufmoduliert wird und durch dieses zusätzliche Spannungssignal induzierte Ströme in der Maschine gemessen werden. Bei geeigneter Auslegung der Maschine, also beispielsweise bei hinreichender magnetischer Anisotropie, kann von den gemessenen Strömen auf den aktuellen Rotorwinkel zurückgeschlossen werden. Beispielsweise sind aus der Druckschrift Linke, M., et al.: "Sensorless position control of Permanent Magnet

35

Synchronous Machines without Limitation at Zero Speed", IEEE IECON'02 1, 2002, S. 674-679, sensorlose Verfahren bekannt, bei welchen Hochfrequenzsignale in die Versorgungsspannung der Maschine injiziert werden, und bei welchen durch die Hochfrequenzsignale induzierte Antwortsignale in der Maschine gemessen werden, die
5 eine Schätzung des Rotorwinkels zulassen.

Die bekannten Verfahren zur Rotorwinkelermittlung sind jedoch nur für bestimmte eingeschränkte Drehzahlbereiche geeignet. Beispielsweise können bei Verwendung sensorloser Verfahren Sicherheitsanforderungen, die an den elektrischen Antrieb eines
10 Elektrofahrzeugs oder Hybridfahrzeugs gestellt werden, nicht in allen Fällen gewährleistet werden. Verfahren mit Winkelsensoren niedriger Auflösung sind andererseits in niedrigen Drehzahlbereichen aufgrund der unzureichenden Messdaten anderen Verfahren unterlegen.

15 Es besteht ein Bedarf an Lösungen zur Winkelermittlung von Rotorwinkeln in einer Synchronmaschine, welche eine robustere, sicherere und leistungsfähigere Momentenregelung in allen Drehzahlbereichen der Synchronmaschine ermöglichen, ohne auf kostenintensive hochauflösende Winkelsensorik zurückgreifen zu müssen.

20 Offenbarung der Erfindung

Die vorliegende Erfindung schafft daher eine Vorrichtung zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine, mit einer Winkelsensoreinrichtung, welche dazu ausgelegt ist, ereignisdiskrete Messwerte für einen Rotorwinkel eines Rotors der Synchronmaschine zu
25 ermitteln und ein von den ermittelten Messwerten abhängiges Messsignal auszugeben, einer Schätzeinrichtung, welche dazu ausgelegt ist, Strom- und/oder Spannungssignale der Synchronmaschine zu erfassen und in Abhängigkeit von den erfassten Strom- und/oder Spannungssignale eine Abweichung des Rotorwinkels des Rotors der Synchronmaschine von einem erwarteten Rotorwinkel zu berechnen und ein von der
30 berechneten Abweichung abhängiges Abweichungssignal auszugeben, und einer Kombiniereinrichtung, welche dazu ausgelegt ist, das Messsignal und das Abweichungssignal zu empfangen und aus einer Kombination des Messsignals und des Abweichungssignals einen Schätzwert für den Rotorwinkel des Rotors der Synchronmaschine zu berechnen. Dadurch können in vorteilhafter Weise zwei
35 Ermittlungsmethoden in einem integrierten Ansatz kombiniert werden, womit ein zuverlässiger Betrieb der Synchronmaschine in allen Drehzahlbereichen ermöglicht wird.

Zudem ist mit der Verwendung von zwei Methoden eine Redundanz gegeben, die eine erhöhte Ausfallsicherheit beispielsweise der Winkelsensoreinrichtung bietet. Außerdem kann die Winkelsensoreinrichtung mit einem niedrig auflösenden und damit kostengünstigen Winkelsensor ausgestattet werden, wobei die damit einhergehende geringere Anzahl an Messwerten durch die Abweichungssignale der Schätzeinrichtung ausgeglichen werden kann. Außerdem bietet sich mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung der Vorteil, dass gegenüber den bereits vorhandenen Komponenten einer Ansteuerung für Synchronmaschinen keine zusätzliche Hardware wie beispielsweise zusätzliche Sensoren oder ähnliches notwendig sind.

10

Gemäß einer weiteren Ausführungsform schafft die Erfindung ein Verfahren zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine, mit den Schritten des Ermitteln ereignisdiskreter Messwerte für einen Rotorwinkel eines Rotors der Synchronmaschine mithilfe eines Winkelsensors, des Erfassens von Strom- und/oder Spannungssignalen der Synchronmaschine und Berechnen einer Abweichung des Rotorwinkels des Rotors der Synchronmaschine von einem erwarteten Rotorwinkel, und des Berechnens eines Schätzwerts für den Rotorwinkel des Rotors der Synchronmaschine durch Kombinieren der ermittelten Messwerte und der berechneten Abweichung.

15

20 Vorteile der Erfindung

In einer bevorzugten Ausführungsform weist die Vorrichtung als Kombiniereinrichtung ein Kalman-Filter auf, welches eine Prädiktionseinrichtung, die dazu ausgelegt ist, einen Prädiktionswert für den Zustandsvektor eines dynamischen Modells des Rotors zu berechnen, und eine Korrektoreinrichtung, die dazu ausgelegt ist, in Abhängigkeit von dem Prädiktionswert ein Korrektursignal zu berechnen, aufweist.

25

Das Kalman-Filter kann dabei weiterhin eine Bestimmungseinrichtung aufweisen, welche dazu ausgelegt ist, nach dem Berechnen des Prädiktionswerts durch die

30

Prädiktionseinrichtung zu bestimmen, ob das Messsignal einen aktuellen Messwert aufweist, wobei die Korrektoreinrichtung dazu ausgelegt ist, das Korrektursignal in Abhängigkeit von dem Messsignal zu berechnen, falls die Bestimmungseinrichtung bestimmt, dass ein aktueller Messwert vorliegt, und wobei die Korrektoreinrichtung dazu ausgelegt ist, das Korrektursignal in Abhängigkeit von dem Abweichungssignal zu berechnen, falls die Bestimmungseinrichtung bestimmt, dass kein aktueller Messwert vorliegt. Die Verwendung eines Kalman-Filters ermöglicht eine Datenfusion aus

35

Messwertdaten einer Winkelsensoreinrichtung und Abweichungsdaten einer Schätzeinrichtung, die auf Strom- und/oder Spannungssignale der Synchronmaschine zurückgreift. Die Datenfusion kann dabei vorteilhafterweise eine Priorisierung der verwendeten Korrekturwerte vornehmen: Die Messwerte der Winkelsensoreinrichtung, die
5 weniger häufig als die Abweichungssignale aktualisiert werden, können bei Vorliegen eines aktuellen Wertes bevorzugt zur Berechnung des Korrektursignals für den Kalman-Filter herangezogen werden, während zu Zeitpunkten, zu denen gerade kein aktueller bzw. aktualisierter Messwert vorliegt, die Abweichungssignale der Schätzeinrichtung zur Korrektursignaleberechnung herangezogen werden. Dadurch können Schwankungen in
10 der Aktualisierungsfrequenz der Messwerte durch die Winkelsensoreinrichtungen abgefangen werden, insbesondere in niedrigen Drehzahlbereichen, in denen tendenziell weniger Messwerte durch die Winkelsensoreinrichtung aufgenommen werden können als in hohen Drehzahlbereichen.

15 Vorzugsweise kann die Schätzeinrichtung dazu ausgelegt sein, die Abweichung des Rotorwinkels auf der Basis von Stromausgangssignalen der Synchronmaschine zu berechnen, welche durch Testspannungssignale, die in eine Versorgungsspannung der Synchronmaschine eingepreßt sind, induziert werden. Diese Vorgehensweise wird auch als aktives Testsignalverfahren bezeichnet. Dadurch kann eine Schätzung des
20 Rotorwinkels entkoppelt von der eigentlichen Versorgungsspannung erfolgen. Insbesondere ist es mit aktiven Verfahren möglich, die Testspannungssignale in Amplitude und/oder Frequenz an den Betriebszustand der Synchronmaschine anzupassen, so dass in kritischen Betriebszuständen oder bei niedrigen Drehzahlen eine robuste Winkelschätzung gewährleistet bleibt. Überdies kann über die Anpassung der
25 Frequenz der Testspannungssignale ein ausreichender Frequenzabstand gegenüber der Frequenz der Versorgungsspannung gewährleistet werden.

Alternativ kann die Schätzeinrichtung dazu ausgelegt sein, die Abweichung des Rotorwinkels auf der Basis von Gegenspannungssignalen der Synchronmaschine zu
30 berechnen. Diese Methoden werden auch als passive Schätzverfahren bezeichnet. Ein Vorteil liegt darin, dass die Abweichungssignale aus ohnehin bereits vorhandenen Ausgangssignalen der Synchronmaschine bestimmt werden können, ohne dass ein aktiver Eingriff in die Ansteuerung der Maschine notwendig ist. Insbesondere eignen sich die passiven Verfahren hauptsächlich für mittlere und höhere Drehzahlen, während das
35 aktive Testsignalverfahren in der Drehzahl nach oben begrenzt ist.

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

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

5

Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Systems zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine gemäß einer Ausführungsform der Erfindung;

10

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Systems zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung;

15

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Kombiniereinrichtung der Systeme aus Fig. 1 und 2 gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung; und

20

Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Verfahrens zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung.

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Systems 10 zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine 11. Die Synchronmaschine 11 kann dabei beispielsweise eine permanenterregte Synchronmaschine sein. Die dreiphasige Versorgungsspannung U_{abc} für die Synchronmaschine 11 kann über eine Versorgungsspannungseinrichtung 12 bereitgestellt werden. Dabei kann die Versorgungsspannungseinrichtung 12 über eine Transformationseinrichtung verfügen, mithilfe derer Versorgungsspannungssignale U_q und U_d aus einem rotorfesten d-q-Koordinatensystem in ein statorfestes Koordinatensystem transformiert werden können. Die Ausgabesignale der Transformationseinrichtung können einem PWM-Signalgeber zugeführt werden, welcher einen in der Versorgungsspannungseinrichtung 12 umfassten Wechselrichter ansteuert. Über den Wechselrichter kann die dreiphasige Versorgungsspannung U_{abc} an die Synchronmaschine 11 abgegeben werden. Über den Versorgungsspannungsanteil U_q , dessen Spannungsvektor quer zur Rotorfeldrichtung liegt, und über den Versorgungsspannungsanteil U_d , dessen Spannungsvektor in Rotorfeldrichtung liegt kann

dabei das Drehmoment der Synchronmaschine 11 und die magnetische Feldbildung der Synchronmaschine 11 geregelt werden.

Das System 10 umfasst weiterhin eine Vorrichtung 14, welche mit der Synchronmaschine
5 gekoppelt ist. Die Vorrichtung 14 ist dazu ausgelegt, einen Schätzwert $\hat{\varphi}$ für den Rotorwinkel φ der Synchronmaschine 11 zu berechnen und an die Versorgungsspannungseinrichtung 12 rückzukoppeln. Über den Schätzwert $\hat{\varphi}$ kann eine Vektorregelung in der Versorgungsspannungseinrichtung 12, insbesondere eine Drehmomentregelung durch entsprechende Einstellung der
10 Versorgungsspannungsanteile U_d und U_q erreicht werden.

Die Vorrichtung 14 kann beispielsweise eine Winkelsensoreinrichtung 15 umfassen, welche den Rotorwinkel φ der Synchronmaschine erfassen kann. Dazu kann die Winkelsensoreinrichtung 15 ereignisdiskrete Messwerte für den Rotorwinkel φ erfassen,
15 das heißt, Messwerte, die in bestimmten Zeitabständen, deren Folge beispielsweise von der Drehgeschwindigkeit des Rotors oder anderen Parametern wie der Steuergerätelast abhängt, erfasst werden. Die ereignisdiskreten Messwerte können durch die Winkelsensoreinrichtung 15 verarbeitet und als Messsignal ausgegeben werden. Das Messsignal kennzeichnet sich mit anderen Worten dadurch, dass es in periodischen
20 Zeitabständen (veränderlicher Frequenz) mit einem zuletzt erfassten Messwert aktualisiert wird. Die Zeitpunkte der Aktualisierung hängen dabei beispielsweise von der Drehgeschwindigkeit des Rotors ab.

Die Anzahl der pro Zeiteinheit durch die Winkelsensoreinrichtung 15 erfassten Messwerte
25 hängt dabei auch von der Winkelauflösung des verwendeten Winkelsensors ab. Je niedriger die Winkelauflösung des Winkelsensors ist, desto seltener wird das Messsignal mit neuen Messwerten aktualisiert. Im Sinne der Erfindung wird dabei ein Messwert für den Rotorwinkel φ , der durch die Winkelsensoreinrichtung 15 neu erfasst wird, zum Zeitpunkt des Ersetzens des bisherigen letzten Messwerts des Messsignals als aktueller
30 Messwert bezeichnet. Mit anderen Worten, wenn das durch die Winkelsensoreinrichtung 15 ausgegebene Messsignal eine Änderung des letzten Messwerts erfährt, liegt ein aktueller Messwert vor. Wenn sich der letzte Messwert des Messsignals nicht ändert, beispielsweise weil sich der Rotor in einem Zwischenstadium zwischen der Erfassung zweier aufeinanderfolgender Messwerte befindet, liegt kein aktueller Messwert vor.

35

Die Vorrichtung 14 umfasst weiterhin eine Schätzeinrichtung 16, welche mit der Synchronmaschine 11 gekoppelt ist und welche dazu ausgelegt ist, Strom- und/oder Spannungssignale, beispielsweise ein Stromsignal I_{abc} im statorfesten Koordinatensystem der Synchronmaschine 11, zu erfassen und in Abhängigkeit von den erfassten Strom- und/oder Spannungssignalen eine Abweichung $\Delta\varphi$ des Rotorwinkels φ von einem erwarteten Rotorwinkel zu berechnen und ein von der berechneten Abweichung $\Delta\varphi$ abhängiges Abweichungssignal auszugeben. Es ist beispielsweise möglich, dass die Schätzeinrichtung 16 ein Gegenspannungssignal der Synchronmaschine 11 erfasst, und unter Ausnutzung der Winkelabhängigkeit der Gegenspannung die Abweichung $\Delta\varphi$ des Rotorwinkels φ anhand eines entsprechenden Modells bestimmt. Die Gegenspannung ist dabei eine durch die Drehung des Rotors verursachte induzierte Spannung in den Spulen des Stators, welche von der Rotordrehzahl und der Drehmomentregelung abhängig ist und damit einen Rückschluss auf den Rotorwinkel φ zulässt.

Die Vorrichtung 14 umfasst weiterhin eine Kombiniereinrichtung 17, welche dazu ausgelegt ist, das Messsignal der Winkelsensoreinrichtung 15 und das Abweichungssignal der Schätzeinrichtung 16 zu empfangen und aus einer Kombination des Messsignals und des Abweichungssignals den Schätzwert $\hat{\varphi}$ für den Rotorwinkel φ des Rotors der Synchronmaschine 11 zu berechnen. Der Schätzwert $\hat{\varphi}$ kann dabei über einen Rückkopplungsweig an die Versorgungsspannungseinrichtung 12 und die Schätzeinrichtung 16 rückgekoppelt werden.

Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung des Systems 10 zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine 11. Das System 10 in Fig. 2 unterscheidet sich von dem allgemein dargestellten System in Fig. 1 im Wesentlichen dadurch, dass die Kombiniereinrichtung 17 ein Kalman-Filter umfasst und in der Schätzeinrichtung 16 ein aktives Testsignalverfahren implementiert ist. Die Kombiniereinrichtung 17 kann alternativ auch als Beobachterstruktur ausgeführt sein. Das Kalman-Filter wird weiter unten im Zusammenhang mit Fig. 3 genauer erläutert.

Das System 10 in Fig. 2 umfasst im Pfad des Versorgungsspannungsanteils U_d ein Mischglied 13, mithilfe dessen ein Testspannungssignal U_c in den Versorgungsspannungsanteil U_d eingeprägt werden kann. Dazu kann beispielsweise vorgesehen sein, dass ein Testspannungssignal $U_c = |U_c| \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_c)$ mit einer Amplitude $|U_c|$ und einer Frequenz ω_c auf den Versorgungsspannungsanteil U_d

aufmoduliert wird. Die Frequenz ω_c kann dabei beispielsweise größer als die Frequenz der Grundwelle der eingepprägten Versorgungsspannung U_{abc} sein und insbesondere einen Mindestfrequenzabstand zu selbiger aufweisen. Das Testspannungssignal U_c wird dabei in Richtung der geschätzten Rotorachse eingepprägt. Dadurch wird in der

5 Synchronmaschine 11 ein Strom induziert, dessen Stromsignal I_{abc} durch die Schätzeinrichtung 16 erfasst werden kann. Über die Auswertung des Stromsignals kann die Schätzeinrichtung 16 dann die Abweichung $\Delta\varphi$ des Rotorwinkels φ von einem erwarteten Rotorwinkel bestimmen.

10 Es kann möglich sein, die Amplitude und/oder die Frequenz des Testspannungssignals U_c variabel zu halten. Beispielsweise kann die Frequenz des Testspannungssignals U_c drehzahlabhängig angepasst werden. Bei niedrigen Drehzahlen kann beispielsweise eine geringere Frequenz gewählt werden. Die Amplitude des Testspannungssignals U_c kann in kritischen Betriebspunkten an den Betriebszustand der Synchronmaschine 11 angepasst
15 werden.

Die Winkelsensoreinrichtung 15 kann beispielsweise digitale Absolutsensoren mit niedriger Winkelauflösung umfassen, beispielsweise Sensoren mit sechs Flanken je elektrischer Umdrehung. Dabei können selbstverständlich auch andere

20 Sensoranordnungen verwendet werden. Die Winkelsensoreinrichtung 15 kann auch inkrementelle Winkelsensoren mit oder ohne Drehrichtungserkennung aufweisen. In letzterem Fall kann vorgesehen sein, die Ausgangsstellung der Winkelsensoren durch ein geeignetes Initialisierungsverfahren sicherzustellen. Die Winkelsensoreinrichtung 15 übergibt ein Messsignal mit Messwerten φ_s an das Kalman-Filter der
25 Kombiniereinrichtung 17.

Alternativ kann statt auf eine Winkelsensoreinrichtung 15 auch auf bereits vorhandene Winkelgrößen in der Synchronmaschine 11 zurückgegriffen werden, beispielsweise wenn die Winkelsensoreinrichtung 15 ausfällt. Zum Beispiel können die Messwerte φ_s auch der

30 Winkelsensorik des Verbrennungsmotors eines Hybridfahrzeugs, dem Winkelsensor der Drosselklappe oder dem Winkelsensor des Scheibenwischers entnommen werden.

Die Schätzeinrichtung 16 kann beispielsweise auch zur Kalibrierung der Winkelsensoreinrichtung 15 genutzt werden. Insbesondere bei einem Ausbau oder nach
35 einer Reparatur der Winkelsensoreinrichtung 15 kann die Schätzeinrichtung 16 dazu

ausgelegt sein, ein Testpulsverfahren durchzuführen, mithilfe dessen der elektrische Winkel, das heißt, die Relativlage des Winkelsensors zur Winkellage der Maschinenspulenwicklungen und der Permanentmagnete, neu justiert werden kann. Die Kalibrierung kann in diesem Fall vollautomatisch bei Wiederinbetriebnahme erfolgen.

5

Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer Kombiniereinrichtung 17 des Systems 10 aus Fig. 2, welche als Kalman-Filter ausgestaltet ist. Das Kalman-Filter 17 umfasst eine Prädiktionseinrichtung 17a, welche dazu ausgelegt ist, einen Prädiktionswert $\hat{x}^-(k+1)$ für den Zustandsvektor \hat{x} eines dynamischen Modells des Rotors in Abhängigkeit von einer vorherigen Wert $\hat{x}^+(k)$ des Zustandsvektors \hat{x} zu berechnen. Der Zustandsvektor \hat{x} kann beispielsweise ein dreidimensionaler Vektor sein, welcher als Zustandsgrößen die Systemzustände des Rotorwinkels φ , der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und des Lastmoments M beschreibt. Die Zustandsgrößen können dabei über ein physikalisches Modell miteinander verknüpft sein, beispielsweise über ein System linearer Differentialgleichungen, welche die Abhängigkeit der Zustandsgrößen untereinander beschreiben. Der Prädiktionswert $\hat{x}^-(k+1)$ kann dabei als Glied einer Markov-Kette erster Ordnung mit einer deterministischen Störung w in Abhängigkeit einer Zustandsübergangsmatrix A_d und eines Steuereingriffsterms $b_d u_k$, welcher eine mit einer Steuerdynamik b_d gewichtete Ansteuergröße u_k modelliert, berechnet werden:

20

$$\hat{x}^-(k+1) = A_d \hat{x}^+(k) + b_d u_k$$

Die Prädiktionseinrichtung 17a kann außerdem eine Kovarianzmatrix $P^-(k+1)$ der für die Prädiktion erwarteten Fehlerkovarianz gemäß der Formel $P^-(k+1) = A_d P^+(k) A_d^T + Q$ berechnen, wobei $P^+(k)$ die korrigierte Fehlerkovarianzmatrix des vorangegangenen Prädiktionsschritts und Q die Kovarianzmatrix des zufälligen Systemrauschens w ist.

25

Nach der Berechnung des aktualisierten Prädiktionswerts $\hat{x}^-(k+1)$ in einem Prädiktionsschritt erfolgt eine Bestimmung, ob ein aktueller Messwert φ_s der Winkelsensoreinrichtung 15 vorliegt oder nicht. Die Iteration der Aktualisierung der Prädiktionswerte kann dabei mit einer höheren Berechnungsfrequenz erfolgen als die

30

Messwerte des Messsignals durch die Winkelsensoreinrichtung 15 aktualisiert werden. Die Bestimmung kann dabei in einer Bestimmungseinrichtung 17b erfolgen.

- In Abhängigkeit von dem Resultat der Bestimmung, ob ein aktueller Messwert φ_s der Winkelsensoreinrichtung 15 vorliegt oder nicht, können der aktualisierte Prädiktionwert $\hat{x}^-(k+1)$ sowie die aktualisierte Fehlerkovarianzmatrix $P^-(k+1)$ an eine Korrekturereinrichtung 17c übergeben werden, in der bei Vorliegen eines aktuellen Messwerts φ_s ein Korrektursignal auf der Basis des aktuellen Messwerts bzw. des Messsignals berechnet wird (Berechnungsschritt 17d). Dabei kann ein korrigierter Prädiktionwert gemäß der Formel

$$\hat{x}^+(k+1) = \hat{x}^-(k+1) + P^-(k+1)c(c^T P^-(k+1)c + R_2)^{-1}(\varphi_s - c^T \hat{x}^-(k+1))$$

- berechnet werden. Ferner kann eine korrigierte Fehlerkovarianzmatrix gemäß der Formel

$$P^+(k+1) = \left(I - P^-(k+1)c(c^T P^-(k+1)c + R_2)^{-1}c^T \right) P^-(k+1)$$

- berechnet werden, wobei c^T die Beobachtungsmatrix des Systems und R_2 eine Messunsicherheitsmatrix für die Winkelsensoreinrichtung 15 ist. Die entsprechenden Modellparameter für die Berechnung des Korrektursignals können an das System angepasst gewählt werden.

- Für den Fall, dass kein aktueller Messwert φ_s vorliegt, kann die Korrekturereinrichtung 17c das Korrektursignal auf der Basis des Abweichungssignals berechnen (Berechnungsschritt 17e). Dann kann der korrigierte Prädiktionwert gemäß der Formel

$$\hat{x}^+(k+1) = \hat{x}^-(k+1) + P^-(k+1)c(c^T P^-(k+1)c + R_1)^{-1} \Delta\varphi$$

- und die korrigierte Fehlerkovarianzmatrix gemäß der Formel

$$P^+(k+1) = \left(I - P^-(k+1)c(c^T P^-(k+1)c + R_1)^{-1}c^T \right) P^-(k+1)$$

berechnet werden, wobei R_1 eine Messunsicherheitsmatrix für die Schätzeinrichtung 16 ist.

5 Nach den jeweiligen Berechnungsschritten 17d bzw. 17e werden die korrigierten Werte der Korrektureinrichtung 17c zurück an die Prädiktionseinrichtung 17a übergeben, wo dann ein neuer Prädiktionsschritt durchgeführt werden kann. Die Prädiktions- und Korrekturschritte können dabei iterativ wiederholt werden.

10 Das Kalman-Filter kann dabei so angepasst werden, dass die Berechnung des Schätzwerts in besonderer Weise darauf reagiert, dass eine erwartete Aktualisierung der Messwerte ausbleibt, beispielsweise aufgrund eines Messfehlers oder einer Fehlfunktion der Winkelsensoreinrichtung 15. In diesem Fall kann die Winkelschätzung dann gesondert korrigiert werden.

15 Auch können die Matrizen R_1 , R_2 , und Q nicht notwendigerweise konstant, sondern alternativ auch in Abhängigkeit des aktuellen Betriebspunkts (Drehmoment und Drehzahl) gewählt werden.

20 Mit anderen Worten kann die Korrektureinrichtung 17c die Messwerte des Messsignals der Winkelsensoreinrichtung priorisiert zur Berechnung des Korrektursignals heranziehen. Da allerdings nicht nach jedem Prädiktionsschritt aktuelle Messwerte vorliegen, kann die Korrektureinrichtung 17c als Hilfwerte die nach jedem Prädiktionsschritt aktualisierten Abweichungssignale der Schätzeinrichtung 16 zur Berechnung des Korrektursignals heranziehen. Auf diese Weise kann eine robuste und präzise Berechnung des
25 Schätzwerts $\hat{\varphi}$ für den Rotorwinkel φ auch mit einem niedrigauflösenden Winkelsensor, welcher nur sporadisch aktualisierte Messwerte liefert, durchgeführt werden.

30 Im Falle des Ausfalls der Winkelsensoreinrichtung 15 kann das elektrische Antriebssystem in einem Notlaufmodus (sogenannte "Limp-Home-Funktion") betrieben werden. Hierzu kann die Kombiniereinrichtung 17 ausschließlich auf die Abweichungssignale der Schätzeinrichtung 16 zurückgreifen, um die Synchronmaschine 11 zu regeln. Um eine stabile Betriebssicherheit zu gewährleisten, können dabei beispielsweise der Drehzahlbereich oder die abgegebene Leistung der Synchronmaschine 11 begrenzt werden. Es kann auch vorgesehen sein, dass die

Amplitude der eingepprägten Hochfrequenzsignale erhöht wird, um eine robuste Detektion der induzierten Stromsignale zu ermögliehen.

- Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung eines Verfahrens 20 zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine, insbesondere eine permanenterrregten Synchronmaschine. In einem ersten Schritt 21 erfolgt ein Ermitteln ereignisdiskreter Messwerte für einen Rotorwinkel eines Rotors der Synchronmaschine mithilfe eines Winkelsensors und ein Erfassen von Strom- und/oder Spannungssignalen der Synchronmaschine und Berechnen einer Abweichung des Rotorwinkels des Rotors der Synchronmaschine von einem erwarteten Rotorwinkel. In einem zweiten Schritt 22 wird in einem Kalman-Filter zunächst ein Berechnen eines Prädiktionswerts für den Zustandsvektor eines dynamischen Modells des Rotors durchgeführt. In einem dritten Schritt 23 erfolgt ein Bestimmen, ob ein aktueller Messwert vorliegt. Falls das Vorliegen eines aktuellen Messwerts bestimmt wird, erfolgt in einem Schritt 24 ein Berechnen eines Korrektursignals des Prädiktionswerts in Abhängigkeit von dem aktuellen Messwert. Falls jedoch bestimmt wird, dass kein aktueller Messwert vorliegt, erfolgt in einem Schritt 25 ein Berechnen des Korrektursignals des Prädiktionswerts in Abhängigkeit von der berechneten Abweichung.

Ansprüche

- 5 1. Vorrichtung zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine (11), mit:
einer Winkelsensoreinrichtung (15), welche dazu ausgelegt ist, ereignisdiskrete
Messwerte für einen Rotorwinkel (φ) eines Rotors der Synchronmaschine (11) zu
ermitteln und ein von den ermittelten Messwerten abhängiges Messsignal auszugeben;
einer Schätzeinrichtung (16), welche dazu ausgelegt ist, Strom- und/oder
10 Spannungssignale der Synchronmaschine (11) zu erfassen und in Abhängigkeit von den
erfassten Strom- und/oder Spannungssignalen eine Abweichung ($\Delta\varphi$) des Rotorwinkels
(φ) des Rotors der Synchronmaschine (11) von einem erwarteten Rotorwinkel zu
berechnen und ein von der berechneten Abweichung ($\Delta\varphi$) abhängiges
Abweichungssignal auszugeben; und
15 einer Kombiniereinrichtung (17), welche dazu ausgelegt ist, das Messsignal und das
Abweichungssignal zu empfangen und aus einer Kombination des Messsignals und des
Abweichungssignals einen Schätzwert ($\hat{\varphi}$) für den Rotorwinkel (φ) des Rotors der
Synchronmaschine (11) zu berechnen.
- 20 2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die Kombiniereinrichtung (17) einen Kalman-Filter
oder eine Beobachterstruktur aufweist, welcher eine Prädiktionseinrichtung (17a), die
dazu ausgelegt ist, einen Prädiktionswert für den Zustandsvektor (\hat{x}) eines dynamischen
Modells des Rotors zu berechnen, und eine Korrekturereinrichtung (17c), die dazu
ausgelegt ist, in Abhängigkeit von dem Prädiktionswert ein Korrektursignal zu berechnen,
25 aufweist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, wobei das Kalman-Filter oder die Beobachterstruktur
weiterhin eine Bestimmungseinrichtung (17b) aufweist, welche dazu ausgelegt ist, nach
dem Berechnen des Prädiktionswerts durch die Prädiktionseinrichtung (17a) zu
30 bestimmen, ob das Messsignal einen aktuellen Messwert (φ_s) aufweist, wobei die
Korrekturereinrichtung (17c) dazu ausgelegt ist, das Korrektursignal in Abhängigkeit von
dem Messsignal zu berechnen, falls die Bestimmungseinrichtung (17b) bestimmt, dass
ein aktueller Messwert (φ_s) vorliegt, und wobei die Korrekturereinrichtung (17c) dazu
ausgelegt ist, das Korrektursignal in Abhängigkeit von dem Abweichungssignal zu

berechnen, falls die Bestimmungseinrichtung (17b) bestimmt, dass kein aktueller Messwert (φ_s) vorliegt.

4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Schätzeinrichtung (16) dazu ausgelegt ist, die Abweichung ($\Delta\varphi$) des Rotorwinkels (φ) auf der Basis von Stromsignalen der Synchronmaschine (11) zu berechnen, welche durch Testspannungssignale (U_c), die in eine Versorgungsspannung der Synchronmaschine (11) eingepreßt sind, induziert werden.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Schätzeinrichtung (16) dazu ausgelegt ist, die Abweichung ($\Delta\varphi$) des Rotorwinkels (φ) auf der Basis von Gegenspannungssignalen der Synchronmaschine (11) zu berechnen.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Winkelsensoreinrichtung (15) einen digitalen Absolutsensor, einen inkrementellen Winkelsensor mit Drehrichtungserkennung oder einen inkrementellen Winkelsensor ohne Drehrichtungserkennung umfasst.
7. Verfahren zur Winkelschätzung in einer Synchronmaschine (11), mit den Schritten:
 - 20 Ermitteln ereignisdiskreter Messwerte (φ_s) für einen Rotorwinkel (φ) eines Rotors der Synchronmaschine (11) mithilfe eines Winkelsensors (15);
 - Erfassen von Strom- und/oder Spannungssignalen der Synchronmaschine (11) und Berechnen einer Abweichung ($\Delta\varphi$) des Rotorwinkels (φ) des Rotors der Synchronmaschine (11) von einem erwarteten Rotorwinkel;
 - 25 Berechnen eines Schätzwerts ($\hat{\varphi}$) für den Rotorwinkel (φ) des Rotors der Synchronmaschine (11) durch Kombinieren der ermittelten Messwerte (φ_s) und der berechneten Abweichung ($\Delta\varphi$).
8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei der Schritt des Berechnens des Schätzwerts ($\hat{\varphi}$) in einem Kalman-Filter (17) durchgeführt wird und die Schritte aufweist:
 - 30 Berechnen eines Prädiktionswerts für den Zustandsvektor (\hat{x}) eines dynamischen Modells des Rotors;
 - Bestimmen, ob ein aktueller Messwert (φ_s) vorliegt;

Berechnen eines Korrektursignals des Prädiktionswerts in Abhängigkeit von dem aktuellen Messwert (φ_s), falls ein aktueller Messwert (φ_s) vorliegt; und

Berechnen eines Korrektursignals des Prädiktionswerts in Abhängigkeit von der berechneten Abweichung ($\Delta\varphi$), falls kein aktueller Messwert (φ_s) vorliegt.

5

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 und 8, weiterhin mit den Schritten:

Einprägen von Testspannungssignalen (U_c) in eine Versorgungsspannung der Synchronmaschine (11); und

Berechnen der Abweichung ($\Delta\varphi$) des Rotorwinkels (φ) auf der Basis von Stromsignalen

10 der Synchronmaschine (11), welche durch die Testspannungssignale (U_c) induziert werden.

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei die Testspannungssignale (U_c) in Amplitude und/oder Frequenz an den Betriebszustand der Synchronmaschine (11) angepasst

15 werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 und 8, wobei das Berechnen der Abweichung ($\Delta\varphi$) des Rotorwinkels (φ) auf der Basis von Gegenspannungssignalen der Synchronmaschine (11) erfolgt.

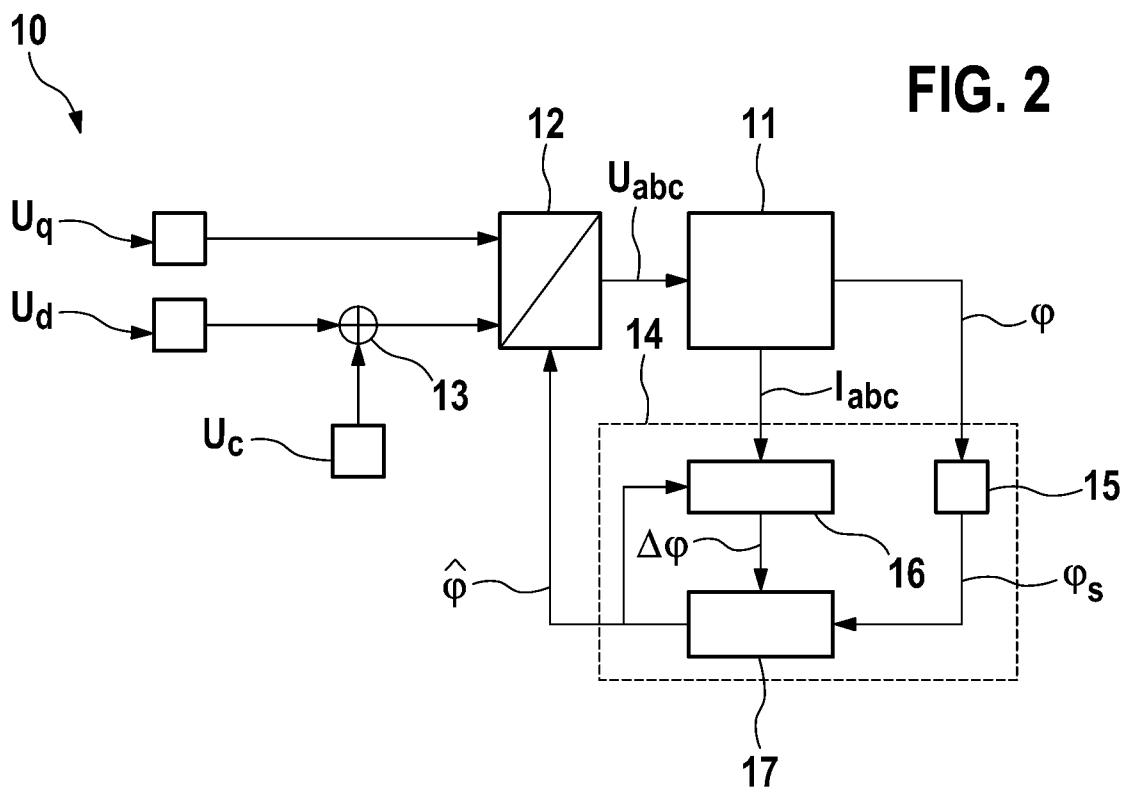
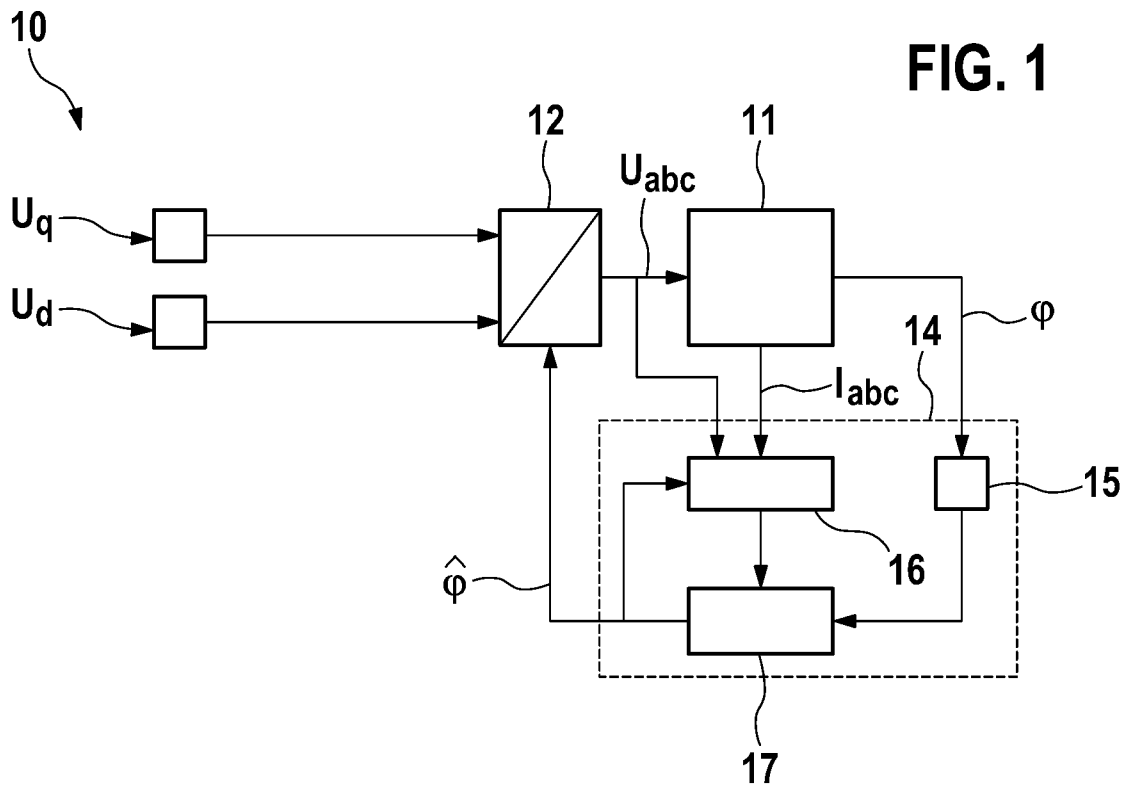


FIG. 3

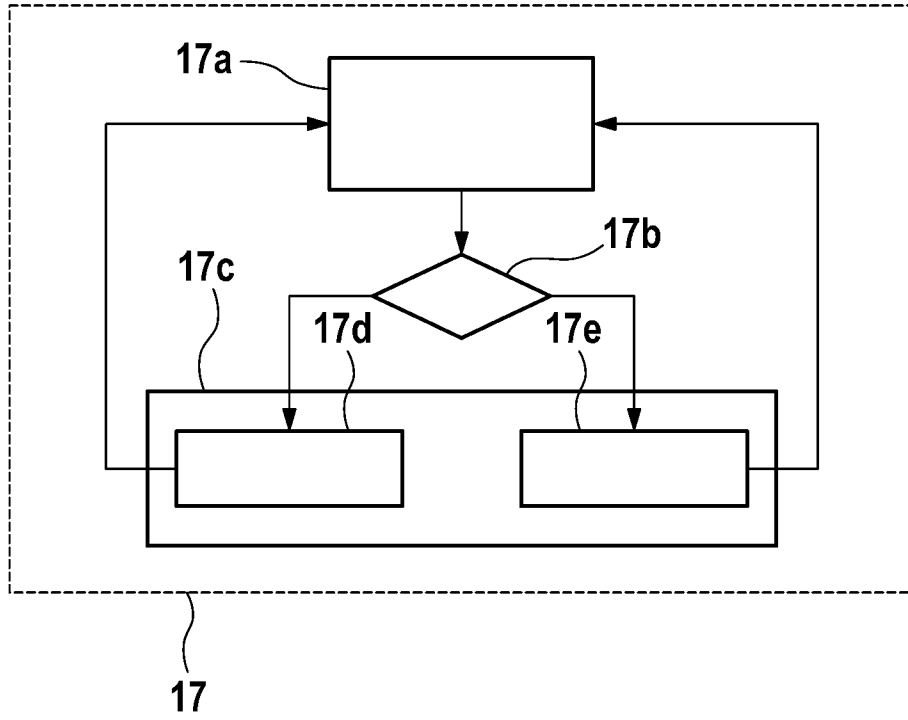


FIG. 4

