

(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  
 27. November 2014 (27.11.2014)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2014/187751 A2**

- (51) **Internationale Patentklassifikation:**  
*H02P 21/00* (2006.01)
- (21) **Internationales Aktenzeichen:** PCT/EP2014/060150
- (22) **Internationales Anmeldedatum:**  
 16. Mai 2014 (16.05.2014)
- (25) **Einreichungssprache:** Deutsch
- (26) **Veröffentlichungssprache:** Deutsch
- (30) **Angaben zur Priorität:**  
 10 2013 209 347.0 21. Mai 2013 (21.05.2013) DE  
 10 2013 209 334.9 21. Mai 2013 (21.05.2013) DE  
 10 2013 209 319.5 21. Mai 2013 (21.05.2013) DE  
 10 2013 209 331.4 21. Mai 2013 (21.05.2013) DE  
 10 2013 209 330.6 21. Mai 2013 (21.05.2013) DE  
 10 2013 209 335.7 21. Mai 2013 (21.05.2013) DE
- (71) **Anmelder:** ROBERT BOSCH GMBH [DE/DE];  
 Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (DE). SAMSUNG SDI  
 CO., LTD. [KR/KR]; 428-5 Gongse-dong, Giheung-gu,  
 Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-577 (KR).
- (72) **Erfinder:** FINK, Holger; Rotkaeppchenweg 31, 70567  
 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, LT, 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, 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:** SIMULATION OF A FIELD-ORIENTED STATOR VOLTAGE OF A STATOR OF AN ASYNCHRONOUS MACHINE STEADILY REQUIRED DURING OPERATION

(54) **Bezeichnung :** SIMULIEREN EINER FELDORIENTIERTEN IN EINEM BETRIEB STATIONÄR ERFORDERLICHEN STATORSPANNUNG EINES STATORS EINER ASYNCHRONMASCHINE

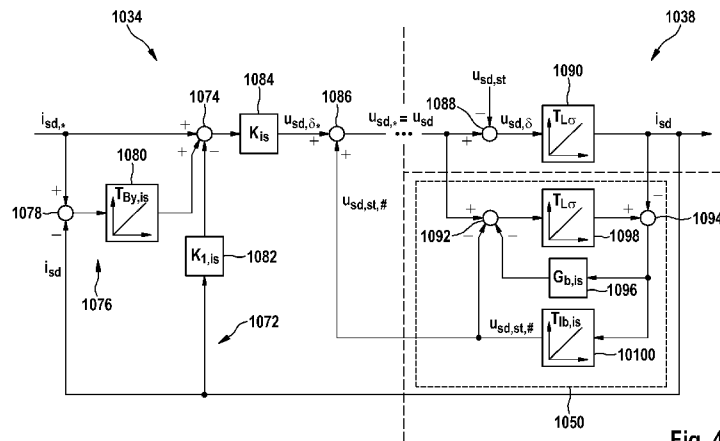


Fig. 4

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for simulating, by means of a model, in particular by means of a machine model, a field-oriented stator voltage ( $U_{s,st,\varphi\#}$ ) of a stator of an asynchronous machine (14) steadily required during operation, wherein the asynchronous machine (14) is operated without a rotary encoder, with field orientation, and with a graduated voltage, comprising the following steps: providing a detected field-oriented stator voltage ( $U_{s,\varphi}$ ), providing a detected field-oriented stator current ( $i_{s,\varphi}$ ), and simulating the field-oriented stator voltage ( $U_{s,st,\varphi\#}$ ) steadily required during operation on the basis of the detected field-oriented stator voltage ( $U_{s,\varphi}$ ) and the detected field-oriented stator current ( $i_{s,\varphi}$ ). Thus, the method can be performed especially simply and can enable exact simulation or modeling of the field-oriented stator voltage ( $U_{s,st,\varphi\#}$ ) steadily required during operation.

(57) **Zusammenfassung:**

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2014/187751 A2

**Veröffentlicht:**

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

---

Es ist ein Verfahren zum Simulieren einer feldorientierten in einem Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ( $U_{s,st,\varphi\#}$ ) eines Stators einer Asynchronmaschine (14) mittels eines Modells, insbesondere eines Maschinenmodells, beschrieben, wobei die Asynchronmaschine (14) drehgeberfrei, feldorientiert und mit einer gestuften Spannung betrieben wird, mit Bereitstellen einer feldorientierten erfassten Statorspannung ( $U_{s,\varphi}$ ), Bereitstellen eines feldorientierten erfassten Statorstroms ( $i_{s,\varphi}$ ) und Simulieren der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ( $U_{s,st,\varphi\#}$ ) basierend auf der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $U_{s,\varphi}$ ) und dem feldorientierten erfassten Statorstrom ( $i_{s,\varphi}$ ). Dadurch kann das Verfahren besonders einfach ausgeführt werden und eine exakte Simulation oder Nachbildung der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ( $U_{s,st,\varphi\#}$ ) ermöglichen.

5 Beschreibung

Titel

10 Simulieren einer feldorientierten in einem Betrieb stationär erforderlichen  
Statorspannung eines Stators einer Asynchronmaschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung bzw. Vorrichtungen zum drehgeberfreien, feldorientierten Regeln einer Asynchronmaschine.

15 Stand der Technik

Es ist aus der Praxis bekannt, dass eine Asynchronmaschine mittels eines feldorientiert arbeitenden Regelsystems beziehungsweise Führungssystems geregelt oder geführt werden kann. Das Regelsystem arbeitet üblicherweise basierend  
20 auf einer Erfassung eines Statorstroms eines Stators der Asynchronmaschine, einer Statorspannung des Stators sowie einer Rotorposition und/oder einer Rotordrehzahl eines Rotors der Asynchronmaschine.

Es ist ebenfalls bekannt, dass eine drehgeberfreie Regelung der Asynchronmaschine mittels eines drehgeberfreien und feldorientierten Regelsystems erfolgen  
25 kann, das frei von einer direkten Erfassung der Rotorposition bzw. der Rotordrehzahl arbeiten kann. Eine drehgeberfreie Führung der Asynchronmaschine kann beispielsweise auf das Vorsehen eines teuren Drehgebers verzichten, so dass die Asynchronmaschine kostengünstig und kompakt gefertigt sein kann.

30 DE 196 46 457 A1 und DE 42 09 305 C2 beschreiben Verfahren zur drehgeberfreien, feldorientierten Regelung einer Asynchronmaschine.

In DE 42 09 305 A1 ist ein Verfahren und eine Einrichtung zur feldorientierten  
35 Regelung von Asynchronmaschinen mit dynamisch hochwertiger Erfassung von

deren im elektrisch eingeschwungenen Zustand benötigten Statorspannungen beschrieben.

5 DE 195 31 771 A1 beschreibt ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Bestimmen einer Drehzahl einer geberlosen, feldorientiert betriebenen Drehfeldmaschine.

10 DE 102 19 826 A1 beschreibt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur feldorientierten Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine.

#### Offenbarung der Erfindung

15 Erfindungsgemäß ist ein Verfahren zum Simulieren einer feldorientierten in einem Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung eines Stators einer Asynchronmaschine mittels eines Modells, insbesondere eines Maschinenmodells bereitgestellt, wobei die Asynchronmaschine drehgeberfrei, feldorientiert und mit einer gestuften Spannung betrieben wird, mit Bereitstellen einer feldorientierten erfassten Statorspannung, Bereitstellen eines feldorientierten erfassten Statorstroms und Simulieren der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung basierend auf der feldorientierten erfassten Statorspannung und dem feldorientierten erfassten Statorstrom.

20

25 Mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens kann eine feldorientierte in einem Betrieb der Asynchronmaschine stationär erforderliche Statorspannung eines Stators der Asynchronmaschine unter Verwendung eines die Asynchronmaschine elektrisch beschreibenden Maschinenmodells simuliert oder nachgebildet werden. Die simulierte stationär erforderliche Statorspannung kann dabei einem Raumvektor einer dem Stator zuzuführenden Statorspannung entsprechen, die zur Aufrechterhaltung eines Raumvektors eines momentan vorliegenden im Stator fließenden Statorstroms erforderlich sein kann. Zur auszuführenden Simulation können Werte einer tatsächlich vorliegenden feldorientierten Statorspannung und eines feldorientierten Statorstroms verwendet werden, die beispielsweise als Eingabewerte für das Verfahren bereitgestellt oder in einem anfänglichen Verfahrensschritt des erfindungsgemäßen Verfahrens mittels eines geeigneten Sensors

30

35 erfasst oder gemessen werden können.

Dadurch kann das Verfahren besonders einfach ausgeführt werden und eine exakte Simulierung oder Nachbildung der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ermöglichen.

5 Insbesondere kann die ermittelte simulierte feldorientierte im Betrieb stationär erforderliche Statorspannung für einen Führungsgrößengenerator bzw. für eine Störgrößenaufschaltung für einen Soll-Statorstrom in einer Regelung eines feldorientierten Statorstroms der Asynchronmaschine verwendet werden, um eine Effizienz und Genauigkeit einer feldorientierten, drehgeberfreien Regelung einer  
10 Drehzahl und/oder eines Drehmoments eines Rotors der Asynchronmaschine signifikant zu verbessern.

Das Verfahren kann ferner Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung über eine Zeit mit einer Normierungskonstanten, die indikativ für  
15 eine Statorinduktivität des Stators sein kann, und Subtrahieren des feldorientierten erfassten Statorstroms von der integrierten feldorientierten Statorspannung aufweisen, um einen feldorientierten Differenzstrom zu erzeugen, wobei das Simulieren der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung basierend auf dem feldorientierten Differenzstrom durchgeführt werden kann.  
20 Diese Maßnahme kann eine geeignete Kombination der feldorientierten erfassten Statorspannung und des feldorientierten erfassten Statorstroms ermöglichen.

Das Verfahren kann ferner Verstärken des feldorientierten Differenzstroms mit einem einstellbaren Verstärkungsparameter und Subtrahieren des verstärkten  
25 feldorientierten Differenzstroms von der feldorientierten erfassten Statorspannung vor dem Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung aufweisen, um eine feldorientierte Differenzspannung zu erzeugen, wobei das Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung Integrieren der feldorientierten Differenzspannung aufweisen kann. Dadurch kann in  
30 der Simulation eine Rückkopplung der verarbeiteten feldorientierten erfassten Statorspannung und des feldorientierten erfassten Statorstroms zu den anfänglichen Größen erfolgen, so dass eine bei der Simulation der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung verwendete Tiefpassübertragungsfunktion ein der Asynchronmaschine in feldorientierten Koordinaten zugrunde liegendes Ersatzschaltbild berücksichtigen kann.  
35

Das Verfahren kann ferner Integrieren des feldorientierten Differenzstroms über eine Zeit mit einer einstellbaren, weiteren Normierungskonstanten und Subtrahieren des feldorientierten integrierten Differenzstroms von der feldorientierten erfassten Statorspannung vor dem Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung aufweisen, um eine bzw. die oben genannte feldorientierte Differenzspannung zu erzeugen, wobei das Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung Integrieren der feldorientierten Differenzspannung aufweisen kann. Diese Maßnahme kann ebenfalls eine Rückkopplung der bei der Simulation der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung verarbeiteten Größen mit den anfänglichen bereitgestellten Größen bewerkstelligen und das entsprechende Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine im feldorientierten Koordinatensystem berücksichtigen.

Ein Zeitmaßstab, in dem die feldorientierte im Betrieb stationär erforderliche Statorspannung simuliert werden kann, kann kleiner als ein Zeitmaßstab gewählt werden, in dem ein feldorientierter Statorstrom des Stators unter Verwendung der simulierten feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung geregelt werden kann. Dadurch kann eine Gleichheit der simulierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung und der tatsächlich vorliegenden feldorientierten stationär erforderlichen Statorspannung bei schnellen Änderungen der feldorientierten stationär erforderlichen Statorspannungen dynamisch mit sehr guter Genauigkeit erreicht werden. Insbesondere kann das geeignete Wählen der Zeitmaßstäbe mittels Einstellen der einstellbaren Normierungskonstante und des einstellbaren Verstärkungsparameters erfolgen.

Insbesondere können die in der Anmeldung genannten Größen, wie beispielsweise die Statorspannung, der Statorstrom und die stationär erforderliche Statorspannung, Raumvektoren in dem statororientierten Koordinatensystem, in dem feldorientierten Koordinatensystem und/oder in einem simulierten feldorientierten Koordinatensystem darstellen. Dabei kann das erfindungsgemäße Verfahren unter Verwendung von Werten dieser Größen durchgeführt werden und/oder einen zeitabhängigen Verlauf dieser Größen berücksichtigen, bei dem eine Vielzahl der entsprechenden Werte betrachtet werden kann.

Die Erfindung betrifft ferner eine Simulationsvorrichtung zum Simulieren einer feldorientierten in einem Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung eines

5 Stators einer Asynchronmaschine mittels eines Modells, insbesondere eines Maschinenmodells, wobei die Asynchronmaschine drehgeberfrei, feldorientiert und mit einer gestuften Spannung betreibbar ist, mit einer Einheit zum Bereitstellen einer feldorientierten erfassten Statorspannung, einer Einheit zum Bereitstellen eines feldorientierten erfassten Statorstroms und einer Simulationseinheit zum Simulieren der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung basierend auf der feldorientierten erfassten Statorspannung und dem feldorientierten erfassten Statorstrom. Die Simulationsvorrichtung kann zum Durchführen des oben beschriebenen Verfahrens eingerichtet sein und entsprechende Einheiten aufweisen. Die Einheit zum Bereitstellen der jeweiligen Größe kann insbesondere als Sensor zum Erfassen der jeweiligen Größe oder als Schnittstelle zum Empfangen der jeweiligen Größe ausgebildet sein. Die Simulationseinheit kann Teil einer Verarbeitungseinheit, insbesondere eines Prozessors, sein und/oder mittels Integrations-, Verstärkungs-, Additions- und/oder Subtraktionseinheiten oder -glieder realisiert sein.

10 Die Erfindung betrifft ferner ein Regelsystem zum drehgeberfreien, feldorientierten Regeln einer Drehzahl und/oder eines Drehmoments eines Rotors einer mittels einer gestuften Spannung betreibbaren Asynchronmaschine, die die oben beschriebene Simulationsvorrichtung aufweist.

15 Die Erfindung betrifft ferner eine Anordnung, insbesondere einen Antrieb, mit einer Asynchronmaschine, einer Spannungsquelle, die zum Ausgeben einer gestuften Spannung an die Asynchronmaschine eingerichtet ist, und dem oben beschriebenen Regelsystem. Die Spannungsquelle kann insbesondere eingerichtet sein, die der Asynchronmaschine zuführende Ausgabespannung stufig oder in Stufen einzustellen und/oder als Batteriedirektinverter ausgebildet sein.

20 Die mit Bezug auf ein der Verfahren, eine der Vorrichtungen, ein der Regelsysteme, eine der Anordnungen bzw. die Verwendung beschriebenen Ausführungsformen gelten auch für die jeweils anderen Gegenstände.

25 Nachfolgend wird die Erfindung unter Bezugnahme auf die anliegenden Zeichnungen anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele exemplarisch erläutert.

30 Es zeigen:

Figur 1 eine schematische Blockdarstellung einer Anordnung mit einer mittels einer stufig einstellbaren und/oder gestuften Spannung betreibbaren Asynchronmaschine und einem Regelsystem zum drehgeberfreien feldorientierten Regeln einer Drehzahl der Asynchronmaschine;

5

Figur 2 eine schematische Blockdarstellung des Regelsystems in Figur 1 gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel mit einer ersten Simulationsvorrichtung zum Simulieren einer feldorientierten stationär erforderlichen Statorspannung gemäß einem Ausführungsbeispiel;

10

Figur 3 ein Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine in Figur 1 in einem feldorientierten Koordinatensystem;

15

Figur 4 ein schematisches Blockdiagramm einer in Figur 2 dargestellten Statorstromregelvorrichtung zum Regeln eines feldorientierten Statorstroms, einer Simulationseinheit der in Figur 2 dargestellten Simulationsvorrichtung und einer in Figur 2 dargestellten Statorstromregelstrecke zum Regeln des feldorientierten Statorstroms;

20

Figur 5 eine schematische Blockdarstellung des Regelsystems in Figur 1 gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel;

25

Figur 6 eine schematische Blockdarstellung einer in Figur 5 gezeigten ersten Simulationsvorrichtung zum Simulieren einer feldorientierten in einem Stator der Asynchronmaschine in Figur 1 induzierten Statorspannung gemäß einem Ausführungsbeispiel;

30

Figur 7 eine schematische Blockdarstellung einer Statorstromregelstrecke in Figur 5;

Figur 8 eine schematische Blockdarstellung des Regelsystems in Figur 1 gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel;

35

Figur 9 eine schematische Darstellung eines Raumvektors der in einem Stator der Asynchronmaschine in Figur 1 induzierten Statorspannung in einem

statororientierten Koordinatensystem, in einem feldorientierten Koordinatensystem und in einem simulierten feldorientierten Koordinatensystem;

5

Figur 10 ein schematisches Blockdiagramm einer in Figur 8 dargestellten Einheit zum Bestimmen einer Winkeldifferenz zwischen einem simulierten Feldwinkel und einem Feldwinkel;

10

Figur 11 ein schematisches Blockdiagramm einer in Figur 8 dargestellten Simulationseinheit zum Simulieren des Feldwinkels und eines Ausschnitts einer in Figur 9 dargestellten Drehzahlregelstrecke;

15

Figur 12 eine schematische Blockdarstellung des Regelsystems in Figur 1 gemäß einem vierten Ausführungsbeispiel;

Figur 13 eine schematische Blockdarstellung des Regelsystems in Figur 1 gemäß einem fünften Ausführungsbeispiel;

20

Figur 14 ein schematisches Blockschaltbild einer feldorientierten Magnetisierungsstrom-Regelstrecke des Regelsystems in Figur 13;

Figur 15 eine schematische Blockdarstellung des Regelsystems in Figur 1 gemäß einem sechsten Ausführungsbeispiel;

25

Figur 16 eine schematische Blockdarstellung einer Statorstromregelstrecke in Figur 15;

Figur 17 eine weitere schematische Blockdarstellung der Statorstromregelstrecke des Regelsystems in Figur 15; und

30

Figur 18 eine schematische Blockdarstellung der Statorstromregelvorrichtung und der Statorstromregelstrecke des Regelsystems in Figur 15.

35

Eine in Figur 1 gezeigte Anordnung 10 weist eine als Batteriedirektinverter ausgebildete Spannungsquelle 12 auf, mittels der eine als Käfigläufer ausgebildete Asynchronmaschine 14 betreibbar ist. Ein Regelsystem 16 der Anordnung 10 dient zum drehgeberfreien, feldorientierten Regeln einer Drehzahl und/oder eines

Drehmoments eines Rotors der Asynchronmaschine 14. Die Anordnung 10 ist Teil eines Elektroantriebs, der in stationären und/oder statischen Anlagen, wie beispielsweise in einem Windkraftwerk, oder in einem Fahrzeug, beispielsweise in einem Hybrid- oder Elektrofahrzeug, verwendet werden kann. Die Anordnung 10 kann auch Teil eines Transaktionsantriebs sein.

Die Spannungsquelle 12 ist mit drei Spannungszweigen 17a, 17b, 17c ausgebildet, deren stufig skalierbare, einstellbare und/oder gestufte Ausgabespannungen über einen jeweiligen Pluspol U, V, W der Asynchronmaschine 14 zuführbar sind. Jeder Spannungsweig 17a, 17b, 17c ist mit einer Vielzahl von Batteriemodulen mit Koppereinrichtungen versehen, die der Übersicht halber lediglich in dem Spannungsweig 17c mit den Bezugszeichen 18a bzw. 18b bezeichnet sind. Optionale Trenneinrichtungen 20a und optionale Lade- und Trenneinrichtungen 20b der Spannungsweige 17a, 17b, 17c sind jeweils mit einem Batteriemodul 18a bzw. 18b der Spannungsweige 17a, 17b, 17c gekoppelt. Minuspole des Batteriedirektinverters 12 sind zu einem Sternpunkt verbunden, können allerdings auch elektrisch voneinander getrennt sein. Obwohl die Spannungsquelle 12 als wiederaufladbar ausgebildet ist und einen Akkumulator bzw. ein Akkumulatorsystem darstellt, wird die Spannungsquelle 12 entsprechend des üblichen Sprachgebrauchs als Batterie bzw. als Batteriesystem bezeichnet.

Im Folgenden wird das Regelsystem 16 gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel näher beschrieben und mit dem Bezugszeichen 1016 bezeichnet.

Das in Figur 2 dargestellte Regelsystem 1016 weist eine erste und zweite Park-Transformationseinheit 1022, 1024 zum Transformieren von Werten einer vektoriellen Größe zwischen einem statororientierten Koordinatensystem, das mittels zueinander orthogonaler Koordinatenachsen 1,2,3 definiert ist, und einem feldorientierten Koordinatensystem, das mittels zueinander orthogonaler Koordinatenachsen d, q definiert ist, unter Verwendung eines Feldwinkels  $\varphi$  auf. Das Regelsystem 1016 weist ferner eine erste Simulationsvorrichtung 1026 zum Simulieren einer feldorientierten, aufgrund eines Rotorflusses  $\Psi_r$  des Rotors in einem Stator der Asynchronmaschine 14 induzierten Statorspannung  $u_{ind,q\#}$  mittels eines Maschinenmodells und zum Simulieren einer simulierten feldorientierten in einem Betrieb der Asynchronmaschine 14 stationär erforderlichen Statorspannung

$u_{s,st,\varphi\#}$  mittels des Maschinenmodells auf. Eine zweite Simulationsvorrichtung 1028 des Regelsystems 1016 ist zum Simulieren eines feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\#}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells eingerichtet und eine dritte Simulationsvorrichtung 1030 des Regelsystems 1016 ist zum Simulieren einer Drehzahl  $n\#$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells eingerichtet. Die erste, zweite und dritte Simulationsvorrichtung 1026, 1028, 1030 arbeiten in einem simulierten oder nachgebildeten Koordinatensystem, das mittels zueinander orthogonaler Koordinatenachsen  $d\#, q\#$  definiert ist.

Ferner weist das Regelsystem 1016 eine feldorientiert arbeitende Drehzahlregelvorrichtung 1032 zum Regeln der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels einer in der Drehzahlregelvorrichtung 1032 implementierten, feldorientiert arbeitenden Magnetisierungsstromregelung zum Regeln eines Magnetisierungsstroms  $i_{mg}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 und eine feldorientiert arbeitende Statorstromregelvorrichtung 1034 zum Regeln des im Stator fließenden Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 auf. Über ein Stellglied 36 des Regelsystems 1016 ist die vom Batteriedirektinverter 12 ausgebbare gestufte Ausgangsspannung regelbar, die an Maschinenklemmen der Asynchronmaschine 14 einspeisbar ist. Eine Statorstromregelstrecke 1038 des Regelsystems 1016, die zum Regeln eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  dient, und eine Drehzahlregelstrecke 1040 des Regelsystems 1016, die zum Regeln des Magnetisierungsstroms  $i_{mg}$  und der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 dient, bilden die Asynchronmaschine 14 mittels der entsprechenden Zusammenhänge zwischen jeweiligen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen der Regelstrecken 1038, 1040 nach. Ein erster Sensor 1042 zum Erfassen einer feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 und ein zweiter Sensor 1044 zum Erfassen eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators sind jeweils mit der ersten, zweiten und dritten Simulationsvorrichtung 1026, 1028, 1030 gekoppelt. Die Statorstromregelvorrichtung 1034 kann ferner mit dem ersten Sensor 1042 und dem zweiten Sensor 1044 gekoppelt sein.

Obwohl die Sensoren 1042, 1044 schaltungstechnisch dargestellt sind, als dass die Sensoren 1042, 1044 zum Erfassen der feldorientierten Größen eingerichtet sind, versteht es sich, dass der erste und zweite Sensor 1042, 1044 Raumvektoren der jeweiligen Größe im statororientierten Koordinatensystem erfassen, die

mittels der Transformationseinheit 1022 in Raumvektoren der entsprechenden Größen im feldorientierten Koordinatensystem umgewandelt werden.

Die erste Simulationsvorrichtung 1026 weist eine erste Schnittstelleneinheit 1046 zum Empfangen einer vom ersten Sensor 1042 erfassten feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und eine zweite Schnittstelleneinheit 1048 zum Empfangen eines vom zweiten Sensor 1044 erfassten feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  auf. Eine Simulationseinheit 1050 der ersten Simulationsvorrichtung 1026, die mit der ersten und zweiten Schnittstelleneinheit 1046, 1048 gekoppelt ist, ist zum Simulieren der im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  eingerichtet. Die von der Simulationseinheit 1050 erzeugte feldorientierte im Betrieb stationär erforderliche Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  wird mittels einer dritten Schnittstelleneinheit 1052 der ersten Simulationsvorrichtung 1026 an die Statorstromregelvorrichtung 1034 ausgegeben.

Zumindest eine der Einheiten 1046-1052 der ersten Simulationsvorrichtung 1026 und/oder zumindest eine Vorrichtung der ersten Simulationsvorrichtung 1026, der zweiten Simulationsvorrichtung 1028 und der dritten Simulationsvorrichtung 1030 sind mittels Hardware und/oder Software realisiert. Ferner können zumindest zwei Elemente ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus den Einheiten 1046-1052 und den Vorrichtungen 1026, 1028, 1030 einstückig bzw. als gemeinsamer Code realisiert sein.

Der Vollständigkeit halber wird angemerkt, dass in Figur 2 mittels  $\Omega$  eine mechanische Kreisfrequenz des Rotors im feldorientierten Koordinatensystem und mittels  $n^*$  eine Steuerdrehzahl für die Drehzahlregelvorrichtung 1032 bezeichnet wird. Ferner sind vektorielle Größen in den Figuren 2 bis 4 mittels eines Pfeils gekennzeichnet, während diese Größen in der Beschreibung ohne Pfeil gekennzeichnet sind.

Ein in Figur 3 dargestelltes Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine 14 weist einen Statorzweig 1054 mit einer Stator- oder Streuinduktivität 1056 des Stators mit der Bezeichnung  $L_\sigma$ , einem Statorwiderstand 1058 des Stators mit der Bezeichnung  $R_s$  und einer Einheit 1060 auf. Der Statorzweig 54 ist mit einem Rotorzweig 1062 gekoppelt, der eine Rotorinduktivität 1064 des Rotors mit der Bezeichnung  $L_r$ , einen Rotorwiderstand 1066 des Rotors mit der Bezeichnung  $R_r$ ,

eine erste Einheit 1068 und eine zweite Einheit 1070 aufweist. Eine Größe  $\omega_s$  bezeichnet eine feldorientierte Statorkreisfrequenz, mit der das feldorientierte Koordinatensystem relativ zum statororientierten Koordinatensystem rotiert. Die Größe  $z_p$  bezeichnet eine Polpaaranzahl des Rotors der Asynchronmaschine 14.  
5 Die Einheiten 1060, 1068, 1070 können Spannungsquellen darstellen.

Figur 4 zeigt eine Signalverarbeitung der Statorstromregelvorrichtung 1034 für die Längskomponente  $i_{sd}$  bzw.  $u_{sd}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  und der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$ , die in ähnlicher Weise für die Querkomponente  $i_{sq}$  bzw.  $u_{sq}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  und der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  durchgeführt wird.  
10

Die Statorstromregelvorrichtung 1034 weist eine Rückführung 1072 auf, mittels der die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten erfassten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  einem Kombinationsglied 1074 zugeführt wird. Ein Bypass-Integrierer 1076 der Statorstromregelvorrichtung 1034 weist ein Subtraktionsglied 1078 und ein Integrationsglied 1080 mit einer Normierungskonstanten  $T_{By, is}$  auf. Mittels des Subtraktionsglieds 1078 wird die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten erfassten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  von der Längskomponente  $i_{sd,*}$  des feldorientierten Soll-Statorstroms  $i_{s,*\varphi}$  subtrahiert. Ein Ausgabesignal des Subtraktionsglieds 1078 wird mittels des Integrationsglieds 1080 integriert und dem Kombinationsglied 1074 zugeführt. Die Rückführung 1072 ist zusätzlich mit einem Verstärkungsglied 1082 versehen, das die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten erfassten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  mit einem Streckenfaktor  $K_{1, is}$  multipliziert. Ein erzeugtes Ausgabesignal des Verstärkungsglieds 1082 wird dem Kombinationsglied 1074 zugeführt. Das Kombinationsglied 1074 addiert die Längskomponente  $i_{sd,*}$  des feldorientierten Soll-Statorstroms  $i_{s,*\varphi}$  und das Ausgabesignal des Integrationsglieds 1080 und subtrahiert davon die von dem ersten Verstärkungsglied 1082 ausgegebene Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten erfassten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$ . Ein Ausgabesignal des Kombinationsglieds 1074 wird einem zweiten Verstärkungsglied 1084 zugeführt, das einen Streckenparameter  $K_{is}$  mit dem Ausgabesignal des Kombinationsglieds 1074 multipliziert. Ein Ausgabesignal des Verstärkungsglieds 1084 entspricht einer Längskomponente  $u_{sd,\delta^*}$  einer feldorientierten an der Statorinduktivität  $L_\sigma$  abfallenden Soll-Statorspannung  $u_{s,\delta^*}$  und wird einem Additionsglied 1086 zugeführt, das die Längskomponente  $u_{sd, st, \#}$  der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s, st, \varphi \#}$  als Führungsgröße bzw.  
15  
20  
25  
30  
35

als Störgrößenaufschaltung zu dem Ausgabesignal des zweiten Verstärkungsglieds 1084 addiert, um eine Störgrößenaufschaltung der Längskomponente  $u_{sd}$  der feldorientierten erfassten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  mit der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi}$  in der Statorstromregelstrecke 1038 zu kompensieren. Das Ausgabesignal des Additionsglieds 1086 entspricht der Längskomponente  $u_{sd,*}$  der von der Statorstromregelvorrichtung 1034 ausgegeben feldorientierten Soll-Statorspannung  $u_{s,*\varphi}$ .

Die in Figur 4 für die Längskomponente  $u_{sd}$  bzw.  $i_{sd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  dargestellte Statorstromregelstrecke 1038 wird mittels eines Subtraktionsglieds 1088 gebildet, das eine Längskomponente  $u_{sd,st}$  der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi}$  von der Längskomponente  $u_{sd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  subtrahiert. Ein Ausgabesignal des Subtraktionsglieds 1088 wird mittels eines Integrationsglieds 1090 integriert, dessen Normierungskonstante eine Zeitkonstante  $T_{L\sigma}$  ist, die indikativ für die Streuinduktivität 1064 bzw.  $L_{\sigma}$  des Stators und mittels  $T_{L\sigma} = L_{\sigma} * i_B / u_B$  definiert ist. Dabei bezeichnen  $i_B$  und  $u_B$  Normierungen für Ströme und Spannungen des Regelsystems 1016. Ein Ausgabesignal des Integrationsglieds 1090 entspricht der Längskomponente  $i_{sd}$  des geregelten feldorientierten Statorstrom  $i_{s,\varphi}$ , die der Statorstromregelvorrichtung 1034 zugeführt wird. Eine Funktionsweise der Statorstromregelstrecke 1038 für die Querkomponente  $u_{sq}$  bzw.  $i_{sq}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  erfolgt in ähnlicher Weise wie die für die Längskomponente  $u_{sd}$  bzw.  $i_{sd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  dargestellte Funktionsweise der Statorstromregelstrecke 1038.

Die in Figur 4 ebenfalls gezeigte Simulationseinheit 1050 stellt einen Beobachter für die feldorientierte Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und den feldorientierten Statorstrom  $i_{s,\varphi}$  dar und bildet den Raumvektor der im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  mittels einer Tiefpassübertragungsfunktion

$$u_{s,st,\varphi\#} / u_{s,st,\varphi} = 1 / (1 + p * T_{b,is} + q_{2b,is} * p^{2*} (T_{b,is})^2)$$

nach. Dabei gelten für eine Zeitkonstante  $T_{b,is} = G_{b,is} * T_{lb,is}$  und für einen Parameter  $q_{2b,is} = T_{L\sigma} / ((G_{b,is})^2 * T_{lb,is})$ . Unter Berücksichtigung von Figur 3 berechnet sich die feldorientierte stationär erforderliche Statorspannung mittels

$$u_{s,st,\varphi} = \omega_s * K_{L\sigma} * R(\pi/2) * i_{s,\varphi} + K_{Rs} * i_{s,\varphi} + u_{ind,\varphi}$$

Dabei ist die feldorientierte induzierte Statorspannung mittels  $u_{\text{ind},\varphi} = T_{Lr} * d/dt$   
 $i_{\text{mg},\varphi} + \omega_s * K_{Lr} * R(\pi/2) * i_{\text{mg},\varphi}$  bestimmt. Der Parameter  $K_{L\sigma} = L_{L\sigma} * i_B / (u_B * T_B)$  be-  
 zeichnet einen Streckenparameter der Asynchronmaschine 14, der indikativ für  
 die Statorinduktivität 1056 bzw.  $L_{\sigma}$  ist bzw. von dieser abhängt, und  $K_{Rs} = R_s * i_B /$   
 5  $u_B$  bezeichnet einen Streckenparameter der Asynchronmaschine 14, der indikativ  
 für den Statorwiderstand 1058 bzw.  $R_s$  ist und von diesem abhängt. Die Größe  
 $T_{Lr} = L_r * i_B / u_B$  bezeichnet eine Zeitkonstante, die indikativ für die Rotorinduktivi-  
 tät 1064 bzw.  $L_r$  ist und  $K_{Lr} = T_{Lr} / T_B = (L_r * i_B) / (u_B * T_B)$  bezeichnet einen Stre-  
 ckenparameter, der indikativ für die Rotorinduktivität 1064 bzw.  $L_r$  ist. Dabei be-  
 10 zeichnen  $i_B$ ,  $u_B$  und  $T_B$  die Bezugsgrößen bzw. Normierungsgrößen für Ströme,  
 Spannungen und Zeitkonstanten des Regelsystems 1016 und  $R(\pi/2)$  bezeichnet  
 eine Drehmatrix für den Wert  $(\pi/2)$ .

Zur Nachbildung der Längskomponente  $u_{\text{sd,st,\#}}$  der simulierten feldorientierten im  
 15 Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{\text{s,st,\#}}$  mittels der oben dargestell-  
 ten Zusammenhänge weist die Simulationseinheit 1050 ein erstes Subtraktions-  
 glied 1092, ein zweites Subtraktionsglied 1094, ein Verstärkungsglied 1096 und  
 ein erstes und zweites Integrationsglied 1098, 10100 auf. Die Längskomponente  
 $u_{\text{sd}}$  der vom Sensor 1042 erfassten feldorientierten Statorspannung  $u_{\text{s},\varphi}$  wird dem  
 20 ersten Subtraktionsglied 1092 zugeführt. Ein Ausgabesignal des Subtraktions-  
 glieds 1092, das eine Längskomponente einer feldorientierten Differenzspannung  
 darstellt, wird mittels des ersten Integrationsglieds 1098 über eine Zeit unter  
 Verwendung einer Normierungskonstanten  $T_{L\sigma}$  integriert. Ein Ausgabesignal des  
 ersten Integrationsglieds 1098 wird dem zweiten Subtraktionsglied 1094 zuge-  
 25 führt, das die Längskomponente  $i_{\text{sd}}$  des vom Sensor 1044 erfassten Statorstroms  
 $i_{\text{s},\varphi}$  von dem Ausgabesignal des ersten Integrationsglieds 1098 abzieht und eine  
 Längskomponente eines feldorientierten Differenzstroms erzeugt. Das Ausgabe-  
 signal des zweiten Subtraktionsglieds 1094 wird dem Verstärkungsglied 1096  
 zugeführt, dass das Ausgabesignal des Subtraktionsglieds 1094 mit einem Ver-  
 30 stärkungsfaktor  $G_{\text{b, is}}$  multipliziert. Das erzeugte Ausgabesignal des Verstär-  
 kungsglieds 1096 wird dem ersten Subtraktionsglied 1092 zugeführt. Ferner wird  
 das Ausgabesignal des zweiten Subtraktionsglieds 1094 dem zweiten Integrati-  
 onsglied 10100 zugeführt, das das zugeführte Signal über eine Zeit unter Ver-  
 wendung einer Normierungskonstanten  $T_{\text{lb, is}}$  integriert und als Ausgabesignal ei-  
 35 ne Längskomponente  $u_{\text{sd,st,\#}}$  der simulierten im Betrieb stationär erforderlichen  
 Statorspannung  $u_{\text{s,st,\#}}$  erzeugt. Das Ausgabesignal des zweiten Integrations-

glieds 10100 wird ebenfalls dem ersten Subtraktionsglied 1092 zugeführt. Das erste Subtraktionsglied 1092 subtrahiert die Längskomponente  $u_{sd,st,\#}$  der simulierten feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  und die Längskomponente des verstärkten feldorientierten Differenzstroms von der Längskomponente  $u_{sd}$  der feldorientierten erfassten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und gibt als sein Ausgabesignal die Längskomponente der feldorientierten Differenzspannung aus, die dem ersten Integrationsglied 1098 zugeführt wird. Eine Funktionsweise der Simulationseinheit 1050 für die Querkomponente  $u_{sq}$  bzw.  $i_{sq}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  erfolgt in ähnlicher Weise wie die für die Längskomponente  $u_{sd}$  bzw.  $i_{sd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  dargestellte Funktionsweise der Simulationseinheit 1050.

In einem eingeschwungenen Zustand der Asynchronmaschine 14 ist die Simulation der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  exakt. Ein Einschwingverhalten der Simulationsvorrichtung 1026 im Anschluss an eine Änderung der feldorientierten stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi}$  ist durch die beiden Eigenschaftsparameter  $T_{b,is}$  und  $q_{2b,is}$  der Tiefpassübertragungsfunktion gekennzeichnet. Diese Eigenschaftsparameter können durch die Wahl der beiden Einstellparameter  $G_{b,is}$  und  $T_{lb,is}$  des Beobachters zumindest aus theoretischer Sicht beliebig festgelegt werden. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel wird die Asynchronmaschine 14 derart betrieben, dass ein Zeitmaßstab der Simulationsvorrichtung 1026 wesentlich kleiner als ein Zeitmaßstab einer Führungsübertragungsfunktion der Statorstromregelvorrichtung 1034 gewählt ist, so dass die Gleichheit des Raumvektors der simulierten stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  mit des Raumvektor der tatsächlichen stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi}$  auch dynamisch mit sehr guter Genauigkeit erreicht ist. Dabei ist der Zeitmaßstab der Simulationsvorrichtung 1026 durch die Zeitkonstante  $T_{b,is}$ , also durch  $G_{b,is}$  und  $T_{lb,is}$ , festgelegt.

Im Folgenden wird das Regelsystem 16 gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel näher beschrieben und mit dem Bezugszeichen 2016 bezeichnet.

Das in Figur 5 dargestellte Regelsystem 2016 weist eine erste und zweite Park-Transformationseinheit 2022, 2024 zum Transformieren von Werten vektorieller

Größen zwischen einem statororientierten Koordinatensystem mit den Koordinatenachsen 1,2,3 und einem feldorientierten Koordinatensystem mit den Koordinatenachsen d, q unter Verwendung eines Feldwinkels  $\varphi$ , eine erste Simulationsvorrichtung 2026 zum Simulieren einer feldorientierten, aufgrund eines Rotorflusses  $\Psi_r$  des Rotors in einem Stator der Asynchronmaschine 14 induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  mittels eines Maschinenmodells und einer simulierten feldorientierten in einem Betrieb der Asynchronmaschine 14 stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  mittels des Maschinenmodells, eine zweite Simulationsvorrichtung 2028 zum Simulieren eines feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\#}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells, eine dritte Simulationsvorrichtung 2030 zum Simulieren einer Drehzahl  $n_{\#}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells, eine Drehzahlregelvorrichtung 2032 zum Regeln der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels einer Magnetisierungsstromregelung zum Regeln eines Magnetisierungsstroms  $i_{mg}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 und eine Statorstromregelvorrichtung 2034 zum Regeln des Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 auf. Über ein Stellglied 2036 des Regelsystems 2016 ist die vom Batteriedirektinverter 12 ausgebbare gestufte Ausgabespannung regelbar, die an Maschinenklemmen der Asynchronmaschine 14 einspeisbar ist. Eine Statorstromregelstrecke 2038 des Regelsystems 2016, die zum Regeln eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  dient, und eine Drehzahlregelstrecke 2040 des Regelsystems 2016, die zum Regeln des Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  und der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 dient, bilden die Asynchronmaschine 14 mittels der entsprechenden Zusammenhänge zwischen jeweiligen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen der Regelstrecken 2038, 2040 nach. Ein erster Sensor 2041 zum Erfassen einer feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 und ein zweiter Sensor 2042 zum Erfassen eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators sind jeweils mit der ersten, zweiten und dritten Simulationsvorrichtung 2026, 2028, 2030 gekoppelt. Die Statorstromregelvorrichtung 2034 kann ferner mit dem ersten Sensor 2041 und dem zweiten Sensor 2042 gekoppelt sein.

Obwohl die Sensoren 2041, 2042 schaltungstechnisch dargestellt sind, als dass sie zum Erfassen der feldorientierten Größen eingerichtet sind, versteht es sich, dass die Sensoren Werte im statororientierten Koordinatensystem erfassen, die

in entsprechende Größen im feldorientierten Koordinatensystem bzw. im simulierten feldorientierten Koordinatensystem umgewandelt werden.

5 Eine mit einem Stern „\*“ gekennzeichnete Größe bezeichnet in Figur 5 eine Sollgröße einer zu regelnden Größe,  $\Omega$  bezeichnet eine Drehfrequenz des Rotors im statororientierten Koordinatensystem und  $n^*$  bezeichnet eine Steuerdrehzahl für die Drehzahlregelvorrichtung 2032. Ferner sind vektorielle Größen in den Figuren 5 bis 7 mittels eines Pfeils gekennzeichnet, während diese Größen in der Beschreibung ohne Pfeil gekennzeichnet sind.

10 Eine erste Schnittstelleneinheit 2043 der ersten Simulationsvorrichtung 2026 ist zum Empfangen der mittels des ersten Sensors 2041 gemessenen feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und eine zweite Schnittstelleneinheit 2044 der ersten Simulationsvorrichtung 2026 ist zum Empfangen des mittels des zweiten Sensors 15 2042 gemessenen feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  eingerichtet. Die erste und zweite Schnittstelleneinheit 2043, 2044 sind jeweils mit einer ersten Simulationseinheit 2045 der ersten Simulationsvorrichtung 2026, die zum Simulieren einer in einem Betrieb der Asynchronmaschine 14 stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  basierend auf der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und 20 des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  eingerichtet ist, und einer zweiten Simulationseinheit 2046 der ersten Simulationsvorrichtung 2026 gekoppelt, die zum Simulieren einer aufgrund des Rotorflusses  $\Psi_r$  des Rotors in Statorwicklungen des Stators induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  basierend auf der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi\#}$ , des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi\#}$  und des im Betrieb 25 stationär erforderlichen Statorstroms  $u_{s,st,\varphi\#}$  eingerichtet ist. Die erste Simulationseinheit 2045 ist dazu mit der zweiten Simulationseinheit 2046 und zusätzlich mit einer dritten Schnittstelleneinheit 2047 der Simulationsvorrichtung 2026 gekoppelt, die zum Ausgeben der simulierten feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  an den Statorstromregler 2034 eingerichtet 30 ist. Die zweite Simulationseinheit 2046 ist mit einer vierten Schnittstelleneinheit 2048 der Simulationsvorrichtung 2026 gekoppelt, die zum Ausgeben der simulierten feldorientierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  an die zweite Simulationsvorrichtung 2028 eingerichtet ist.

35 Zumindest eine Einheit bzw. Vorrichtung der Einheiten 2043-2048 der ersten Simulationsvorrichtung 2026, der zweiten Simulationsvorrichtung 2028 und der drit-

ten Simulationsvorrichtung 2030 ist mittels Hardware und/oder Software realisiert. Ferner können zumindest zwei Elemente ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus den Einheiten 2043-2048 und den Vorrichtungen 2026, 2028, 2030 einstückig bzw. als gemeinsamer Code realisiert sein.

5

Die in Figur 6 dargestellte Blockdarstellung der ersten Simulationsvorrichtung 2026 fasst die Funktionsweise der ersten und zweiten Simulationseinheit 2045, 2046 der ersten Simulationsvorrichtung 2026 zusammen. Eine erste und zweite Transformationseinheit 2066, 2068 der ersten Simulationsvorrichtung 2026 sind dazu eingerichtet, unter Berücksichtigung eines simulierten Feldwinkels  $\varphi_{\#}$ , der zwischen dem statororientierten Koordinatensystem und einem simulierten feldorientierten Koordinatensystem mit den Achsen  $d_{\#}$ ,  $q_{\#}$  gemessen ist, die von dem Sensor 2041 erfasste Statorspannung  $u_{s,1,2,3}$  bzw. den von dem Sensor 2042 erfassten Statorstrom  $i_{s,1,2,3}$  in entsprechende simulierte feldorientierte Größen  $u_{s,\varphi_{\#}}$ ,  $i_{s,\varphi_{\#}}$  umzuwandeln.

10

15

Ein erster Signalverarbeitungsabschnitt 2070 der ersten Simulationsvorrichtung 2026 ist als Störgrößenbeobachter ausgebildet und dazu eingerichtet, eine simulierte feldorientierte in einem Betrieb der Asynchronmaschine 14 stationär erforderliche Statorspannung  $u_{s,st,\varphi_{\#}}$  auf Basis des simulierten feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi_{\#}}$  und der simulierten feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi_{\#}}$  zu erzeugen. Dazu weist der erste Signalverarbeitungsabschnitt 2070 ein erstes Subtraktionsglied 2072, ein Integrationsglied 2074, ein zweites Subtraktionsglied 2076, ein Verstärkungsglied 2078 und ein zweites Integrationsglied 2080 auf. Die simulierte feldorientierte Statorspannung  $u_{s,\varphi_{\#}}$  wird mittels des Subtraktionsglied 2072 und des eine Integrationskonstante  $T_{L\sigma}$  aufweisenden Integrationsglieds 2074 in einen simulierten feldorientierten Statorstrom  $i_{s,b,\varphi_{\#}}$  umgewandelt, von dem der simulierte feldorientierte Statorstrom  $i_{s,\varphi_{\#}}$  mittels des zweiten Subtraktionsglieds 2076 subtrahiert wird. Ein Ausgabesignal des Subtraktionsglieds 2076 wird dem Verstärkungsglied 2078 zugeführt, das einen Verstärkungsfaktor  $G_{b,is}$  zu dem Ausgabesignal des zweiten Subtraktionsglieds 2076 multipliziert und ein entsprechend multipliziertes Signal an das Subtraktionsglied 2072 ausgibt. Das Ausgabesignal des zweiten Subtraktionsglieds 2076 wird ebenfalls dem zweiten Integrationsglied 2080 zugeführt, das durch eine Integrationskonstante  $T_{lb,is}$  gekennzeichnet ist und dessen Ausgabesignal die simulierte feldorientierte in dem Betrieb stationär erforderliche Statorspannung  $u_{s,st,\varphi_{\#}}$  ist. Diese Statorspannung

20

25

30

35

$u_{s,st,\varphi\#}$  wird dem ersten Subtraktionsglied 2072 zugeführt. Das erste Subtraktionsglied 2072 subtrahiert die erzeugte simulierte feldorientierte im Betrieb stationär erforderliche Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  und das vom Verstärkungsglied 2078 ausgegebene Signal von der simulierten feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi\#}$ . Die simulierte feldorientierte im Betrieb stationär erforderliche Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  wird ebenfalls einem dritten Subtraktionsglied 2082 zugeführt, das von der zuletzt genannten Größe ein Ausgabesignal eines zweiten Signalverarbeitungsabschnitts 2084 der ersten Simulationsvorrichtung 2026 subtrahiert.

Der zweite Signalverarbeitungsabschnitt 2084 weist ein zweites Verstärkungsglied 2086 auf, das den von der Transformationseinheit 2086 ausgegebenen simulierten feldorientierten Statorstrom  $i_{s,\varphi\#}$  mit einem Streckenparameter  $K_{R_s}$  des Verstärkungsglieds 2086 multipliziert, der indikativ für den Statorwiderstand  $R_s$  ist.

Von einem Ausgabesignal des dritten Subtraktionsglieds 2082 wird ein Ausgabesignal eines dritten Signalverarbeitungsabschnitts 2088 der ersten Simulationsvorrichtung 2026 mittels eines vierten Subtraktionsglieds 2090 subtrahiert. Der dritte Signalverarbeitungsabschnitt 2088 weist ein Multiplikationsglied 2092 auf, das den von der zweiten Transformationseinheit 2068 ausgegebenen simulierten feldorientierten Statorstrom  $i_{s,\varphi\#}$  mit der simulierten Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  multipliziert. Ein Drehglied 2094 erzeugt eine Drehung oder Rotation des Ausgabesignals des Multiplikationsglieds 2092 mittels einer Drehmatrix  $R(\pi/2)$  am Wert  $\pi/2$  und gibt ein entsprechendes Ausgabesignal an ein drittes Verstärkungsglied 2096 aus. Das dritte Verstärkungsglied 2096 multipliziert das Ausgabesignal des Drehglieds 2094 mit einem Streckenparameter  $K_{L_\sigma}$ , der indikativ für die Statorinduktivität  $L_\sigma$  ist. Das Ausgabesignal des dritten Verstärkungsglieds 2096 wird dem vierten Subtraktionsglied 2090 zugeführt, das das Ausgabesignal des dritten Verstärkungsglieds 2096 vom Ausgabesignal des dritten Subtraktionsglieds 2082 abzieht und die induzierte Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  erzeugt.

Die in Figur 7 dargestellte Statorstromregelstrecke 2038 verdeutlicht einen regelungstechnischen Zusammenhang zwischen der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und dem feldorientierten Statorstrom  $i_{s,\varphi}$ . Eine Längskomponente  $u_{sd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  wird mittels eines ersten Subtraktionsglieds 2098a mit einer Störung in Form einer Längskomponente  $u_{sd,st}$  der im Betrieb sta-

tionär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi}$  beaufschlagt. Das Ausgangssignal  $u_{sd,\delta}$  des ersten Subtraktionsglieds 2098a wird mittels eines ersten Integrationsglieds 20100a integriert, das eine Integrationskonstante  $T_{L\sigma}$  aufweist und eine Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  ausgibt. Die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  wird einem ersten Verstärkungsglied 20102a zugeführt, das einen Streckenparameter  $K_{R_s}$ , der indikativ für den Statorwiderstand  $R_s$  ist, mit dem zugeführten Signal multipliziert. Ein Ausgangssignal des ersten Verstärkungsglieds 20102a wird einem Additionsglied 20104a zugeführt, dessen Ausgangssignal die Längskomponente  $u_{sd,st}$  der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi}$  ist. Ferner wird die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  einem zweiten Subtraktionsglied 20106 zugeführt, das einen Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  von der Längskomponente  $i_{sd}$  der feldorientierten Statorspannung  $i_{s,\varphi}$  subtrahiert. Dabei wird der Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  mittels eines zweiten Integrationsglieds 20108 erzeugt, das mit einer Integrationskonstante  $T_r$  das Ausgangssignal des zweiten Subtraktionsglieds 20106 integriert. Das Ausgangssignal des zweiten Subtraktionsglieds 20106 wird auch einem zweiten Verstärkungsglied 20110a zugeführt, das einen Streckenparameter  $K_{R_r}$ , der indikativ für den Rotorwiderstand  $R_r$  ist, mit dem Eingangssignal multipliziert und als Ausgangssignal eine Längskomponente  $u_{indd}$  der feldorientierten induzierten Spannung  $u_{indd}$  ausgibt, die dem Additionsglied 20104a zugefügt wird. Eine Verarbeitung einer Querkomponente  $u_{sq}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  erfolgt in gleicher Weise wie die zuvor beschriebene Signalverarbeitung der Längskomponente  $u_{sd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$ . Dabei wird allerdings die mittels des zweiten Subtraktionsglieds 20106 ausgeführte Subtraktion und die mittels des zweiten Integrationsglieds 20108 ausgeführte Integration nicht durchgeführt und die zugehörigen Komponenten 20106, 20108 sind nicht vorhanden.

Eine nicht-lineare Kopplung zwischen der Längskomponente  $i_{sd}$  und der Querkomponente  $i_{sq}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  wird mittels eines dritten regelbaren Verstärkungsglieds 20112a erzeugt, das ein Eingangssignal, die Querkomponente  $i_{sq}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$ , mit einem Streckenparameter  $-\omega_s K_{L\sigma}$  multipliziert, der indikativ für ein Produkt aus der Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  und dem Streckenparameter  $K_{L\sigma}$  ist, und dessen Ausgangssignal dem Additionsglied 20104a zugeführt wird. Dabei ist der Streckenparameter  $K_{L\sigma}$  einer Statorinduktivität  $L\sigma$  zugeordnet. Die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten

Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  wird ebenfalls einem dritten regelbaren Verstärkungsglied 20112b zugeführt, das das Eingangssignal mit einem zum Streckenparameter des Verstärkungsglieds 20112a vorzeichenvertauschten Streckenparameter  $\omega_s K_{L\sigma}$  multipliziert. Der Streckenparameter des dritten Verstärkungsglieds 20112b ist indikativ für ein Produkt aus der Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  und dem Streckenparameter  $K_{L\sigma}$ . Ein Ausgabesignal des dritten Verstärkungsglieds 20112b wird dem ersten Subtraktionsglied 20104b zugeführt.

Das der Simulationsvorrichtung 2026 zugrunde liegende Verfahren ist im Vergleich zu einer Simulation der feldorientierten Statorspannung unter Verwendung von

$$u_{ind,\varphi} = u_{s,\varphi} - T_{L\sigma} * d/dt (i_{s,\varphi}) - \omega_s * K_{L\sigma} * R(\pi/2) * i_{s,\varphi} - K_{Rs} * i_{s,\varphi}$$

besonders robust, da auf eine Verwendung einer Zeitableitung des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  verzichtet wird.

Im Folgenden wird das Regelsystem 16 gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel näher beschrieben und mit dem Bezugszeichen 3016 bezeichnet.

Das in Figur 8 dargestellte Regelsystem 3016 weist eine erste und zweite Park-Transformationseinheit 3022, 3024 zum Transformieren von dreidimensionalen Werten einer Größe zwischen einem statororientierten Koordinatensystem mit zueinander orthogonalen Koordinatenachsen 1,2,3 und einem feldorientierten Koordinatensystem mit zueinander orthogonalen Koordinatenachsen d, q unter Verwendung eines Feldwinkels  $\varphi$  auf. Das Regelsystem 16 weist ferner eine erste Simulationsvorrichtung 3026 zum Simulieren einer feldorientierten, aufgrund eines Rotorflusses  $\Psi_r$  des Rotors in einem Stator der Asynchronmaschine 14 induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  mittels eines Maschinenmodells und zum Simulieren einer simulierten feldorientierten in einem stationären Betrieb oder elektrisch eingeschwungenen Zustand der Asynchronmaschine 14 erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  mittels des Maschinenmodells, eine zweite Simulationsvorrichtung 3028 zum Simulieren eines feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\#}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells und eine dritte Simulationsvorrichtung 3030 zum Simulieren einer Drehzahl  $n\#$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells auf. Die erste, zweite und dritte Simulationsvorrichtung 3026, 3028, 3030 arbeiten in einem si-

mulierten oder nachgebildeten Koordinatensystem, das mittels zueinander orthogonaler Koordinatenachsen  $d\#$ ,  $q\#$  definiert ist.

Zusätzlich weist das Regelsystem 3016 eine feldorientiert arbeitende Drehzahlregelvorrichtung 3032 zum Regeln der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels einer in der Drehzahlregelvorrichtung 3032 implementierten, feldorientiert arbeitenden Magnetisierungsstromregelung zum Regeln eines Magnetisierungsstroms  $i_{mg}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 und eine feldorientiert arbeitende Statorstromregelvorrichtung 3034 zum Regeln des im Stator fließenden Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 auf. Über ein Stellglied 3036 des Regelsystems 3016 ist die vom Batteriedirektinverter 12 ausgebbare gestufte Ausgabespannung regelbar, die an Maschinenklemmen der Asynchronmaschine 14 einspeisbar ist. Eine Statorstromregelstrecke 3038 des Regelsystems 3016, die zum Regeln eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  dient, und eine Drehzahlregelstrecke 3040 des Regelsystems 3016, die zum Regeln des Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  und der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 dient, bilden die Asynchronmaschine 14 mittels der entsprechenden Zusammenhänge zwischen jeweiligen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen der Regelstrecken 3038, 3040 nach. Ein erster Sensor 3042 zum Erfassen einer feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 und ein zweiter Sensor 3044 zum Erfassen eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators sind jeweils mit der ersten, zweiten und dritten Simulationsvorrichtung 3026, 3028, 3030 gekoppelt. Die Statorstromregelvorrichtung 3034 kann ferner mit dem ersten Sensor 3042 und dem zweiten Sensor 3044 gekoppelt sein. Obwohl die Sensoren 3042, 3044 schaltungstechnisch dargestellt sind, als dass die Sensoren 3042, 3044 zum Erfassen der feldorientierten Größen eingerichtet sind, versteht es sich, dass die Sensoren Werte im statororientierten Koordinatensystem erfassen, die mittels der Transformationseinheit 3022 in entsprechende Größen des feldorientierten Koordinatensystems umgewandelt werden.

Die dritte Simulationsvorrichtung 3030 weist eine erste Schnittstelle 3046 zum Empfangen der simulierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$ , eine Einheit 3048 zum Bestimmen einer Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  zwischen dem zu simulierenden Feldwinkel  $\varphi\#$  und dem Feldwinkel  $\varphi$  mittels des Maschinenmodells, eine Simulationseinheit 3050 zum Simulieren des Feldwinkels  $\varphi\#$  basierend auf der bestimm-

ten Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  mittels des Maschinenmodells und eine Schnittstelle 3052 zum Ausgeben des simulierten Feldwinkels  $\varphi\#$  auf.

Zumindest eine der Einheiten 3046-3052 der dritten Simulationsvorrichtung 3030 und/oder zumindest eine Vorrichtung der ersten Simulationsvorrichtung 3026, der zweiten Simulationsvorrichtung 3028 und der dritten Simulationsvorrichtung 3030 sind mittels Hardware und/oder Software realisiert. Ferner können zumindest zwei Elemente ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus den Einheiten 3046-3052 und den Vorrichtungen 3026, 3028, 3030 einstückig bzw. als gemeinsamer Code realisiert sein.

Der Vollständigkeit halber wird angemerkt, dass in Figur 8 mittels  $\Omega$  eine mechanische Kreisfrequenz des Rotors im feldorientierten Koordinatensystem und mittels  $n^*$  eine Steuerdrehzahl für die Drehzahlregelvorrichtung 3032 bezeichnet wird. Ferner sind vektorielle Größen in den Figuren 8 bis 11 mittels eines Pfeils gekennzeichnet, während diese Größen in der Beschreibung ohne Pfeil gekennzeichnet sind.

Unter Berücksichtigung von Figur 8 verwendet die dritte Simulationsvorrichtung 30 den Zusammenhang  $u_{ind,\varphi} = T_{Lr} * d/dt i_{mg,\varphi} + \omega_s * K_{Lr} * R(\pi/2) * i_{mg,\varphi} = (K_{Rr} * (i_{sd} - i_{mg}), \omega_s * K_{Lr} * i_{mg})^t$ . Dabei gelten die Zusammenhänge  $T_{Lr} = L_r * i_B / u_B$  und  $K_{Lr} = T_{Lr} / T_B = (L_r * i_B) / (u_B * T_B)$ , wobei  $i_B$ ,  $u_B$  und  $T_B$  die Bezugsgrößen bzw. Normierungsgrößen für Ströme, Spannungen und Zeitkonstanten des Regelsystems 3016 sind und  $R(\pi/2)$  eine Drehmatrix für den Wert  $(\pi/2)$  und  $(a, b)^t$  einen transponierten Vektor bezeichnen. Für die Längskomponente  $u_{indd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi}$  und die Querkomponente  $u_{indq}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi}$  gilt entsprechend  $u_{indd} = T_{Lr} * d/dt i_{mg} = K_{Rr} * (i_{sd} - i_{mg})$  und  $u_{indq} = \omega_s * K_{Lr} * i_{mg}$  mit  $K_{Rr} = (R_r * i_B) / u_B$ . In den zuvor genannten Gleichungen können geeignet (dimensions-)normierte Parameterwerte der jeweiligen Parameter bzw. Größen eingesetzt werden. Alternativ können die Normierungsgrößen bzw. deren Dimensionen geeignet gewählt werden.

Da der Rotorwiderstand  $R_r$  und damit der Streckenparameter  $K_{Rr}$  bei Käfigläufer-Asynchronmaschinen 12 kleine Werte aufweisen, kann die Längskomponente  $u_{indd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi}$  bei Ausgleichsvorgängen im Regelsystem 3016 für den Magnetisierungsstrom  $i_{mg,\varphi}$ , also wenn die Längskompo-

nente  $i_{sd}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  ungleich zum feldorientierten Magnetisierungsstrom  $i_{mg,\varphi}$  ist ( $i_{s,\varphi} \neq i_{mg,\varphi}$ ), mit sehr guter Näherung zu Null angenommen werden ( $u_{indd} = 0$ ). Der Raumvektor der feldorientierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi}$  weist somit im Vergleich zum in Figur 9 dargestellten und im Folgenden mit dem Bezugszeichen 3072 versehenen statororientierten Koordinatensystem, das mittels einer ersten Achse a und einer zweiten Achse b definiert ist, im feldorientierten Koordinatensystem 3074, das mittels einer Längsachse d und einer Querachse q definiert ist, im Wesentlichen nur eine Querkomponente  $u_{indq}$  in Richtung der Querachse q auf ( $u_{ind,\varphi} = (0, u_{indq})^t$ ). In einem simulierten oder nachgebildeten feldorientierten Koordinatensystem 3076, das mittels einer Simulationslängsachse d# und einer Simulationsquerachse q# definiert ist, gilt für den Raumvektor der induzierten Spannungen  $u_{ind,\varphi\#} = (u_{indd,\#}, u_{indq,\#})^t = R(\Delta\varphi) * u_{ind,\varphi} = u_{indq} * (-\sin(\Delta\varphi), \cos(\Delta\varphi))^t$ . Damit gilt für die Längskomponente  $u_{indd,\#}$  der simulierten feldorientierten Statorspannung  $u_{indd,\#} = -\sin(\Delta\varphi) * u_{indq}$  und die Querkomponente  $u_{indq,\#}$  der simulierten feldorientierten Statorspannung  $u_{indq,\#} = +\cos(\Delta\varphi) * u_{indd}$ . Daher gilt  $\tan(\Delta\varphi) = u_{indd,\#} / u_{indq,\#}$  und, als Näherung für kleine Beträge der Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$ ,  $\tan(\Delta\varphi) = -u_{indd,\#} / u_{indq,\#} \approx \Delta\varphi$ .

Somit entspricht der Betrag der simulierten feldorientierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  dem Betrag der feldorientierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi}$ , also es gilt  $|u_{ind,\varphi\#}| = ((u_{indd,\#})^2 + (u_{indq,\#})^2)^{1/2} = |u_{ind,\varphi}|$ . Da die induzierte Spannung  $u_{ind,\varphi}$  im Wesentlichen lediglich die Querkomponente  $u_{indq}$  aufweist, gilt mit guter Näherung für den Betrag der feldorientierten induzierten Statorspannung  $|u_{ind,\varphi}| = |u_{indq}| = |\omega_s * K_{Lr} * i_{mg}| = |\omega_s| * K_{Lr} * i_{mg}$ . Der simulierte feldorientierte Magnetisierungsstrom ergibt sich zu  $i_{mg,\varphi} = ((u_{indd,\#})^2 + (u_{indq,\#})^2)^{1/2} / (|\omega_s| * K_{Lr})$ .

Unter der Annahme, dass ein hochwertiges Signal für die Nachbildung der Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  vorhanden und die Nachbildung besonders exakt ist, kann die Simulationseinheit 5048 den simulierten feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\#}$  unter Verwendung von  $i_{mg,\#} = ((u_{indd,\#})^2 + (u_{indq,\#})^2)^{1/2} / (|\omega_{s,\#}| * K_{Lr,\#})$  errechnen.

Die dritte Simulationseinheit 5050 berechnet die simulierte Rotorflussverkettung  $\Psi_{r,\#}$  mit sehr guter Näherung zu  $\Psi_{r,\#} = K_{Lr,\#} * i_{mg,\#} = \Psi_r = K_{Lr} * i_{mg}$ .

Die in Figur 10 detaillierter dargestellte Einheit 3048 weist ein Koordinatenzerlegungsglied 3078 auf, das eine Längskomponente  $u_{indd,\#}$  der simulierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  und eine Querkomponente  $u_{indq,\#}$  der simulierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  ausgibt. Ein Verstärkungsglied 3080 multipliziert die zugeführte Längskomponente  $u_{indd,\#}$  der simulierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  mit einem Faktor -1 und gibt die negative Längskomponente  $-u_{indd,\#}$  der simulierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  aus. Das Ausgangssignal des Verstärkungsglieds 3080 und die von dem Koordinatenaufspaltungsglied 3078 ausgegebene Querkomponente  $u_{indq,\#}$  der simulierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  werden einem Divisionsglied 3082 zugeführt, das ein Verhältnis zwischen beiden Eingangssignalen zu  $\tan(\Delta\varphi) = -u_{indd,\#} / u_{indq,\#}$  berechnet. Ein Ausgangssignal des Divisionsglieds 3082 entspricht unter der Annahme, dass die Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  kleine Beträge aufweist, der Winkeldifferenz  $\Delta\varphi = \varphi\# - \varphi$  zwischen dem simulierten Feldwinkel  $\varphi\#$  und dem Feldwinkel  $\varphi$ , da  $\tan(\Delta\varphi) \approx \Delta\varphi$  gilt.

Die in Figur 11 detaillierter gezeigte Simulationseinheit 3050 empfängt die von der Einheit 3048 bestimmte Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  und führt diese einer Regeleinheit 3084 zu, die mittels eines PI-Reglers 3086 und einem ersten Additionsglied 3088 gebildet wird. Der PI-Regler 3086 weist ein Verstärkungsglied 3090, das die Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  mit einem Verstärkungsfaktor  $K_{PI,\varphi}$  multipliziert, ein erstes Integrationsglied 3092, das die Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  über eine Zeit unter Verwendung einer Integrationskonstanten  $T_{PI,\varphi}$  integriert, und ein zweites Additionsglied 3094 auf, das die Ausgangssignale des Verstärkungsglieds 3090 und des Integrationsglieds 3092 addiert. Das Ausgangssignal des zweiten Additionsglieds 3094 ist eine simulierte elektrische Rotorkreisfrequenz  $\Omega_{r,\#}$  und wird dem ersten Additionsglied 3088 zugeführt, das das zugeführte Ausgangssignal und eine simulierte Schlupfkreisfrequenz  $\omega_{r,\#}$  addiert und die simulierte Statorkreisfrequenz  $\omega_{s,\#}$  ausgibt. Die simulierte Schlupfkreisfrequenz  $\omega_{r,\#}$  ist einem Schlupf zwischen einem Rotorfluss  $\Psi_{r,\#}$  und einem Statorfluss  $\Psi_{s,\#}$  zugeordnet. Eine dem Regler 3084 nachgeschaltete Einheit 3096, die als digitaler Integrierer ausgebildet ist, weist ein zweites Integrationsglied 3098 auf, das die simulierte Statorkreisfrequenz  $\omega_{s,\#}$  über eine Zeit unter Verwendung einer Integrationskonstanten  $T_B$  gemäß dem Zusammenhang  $\varphi\# = (1 / T_B) * \int \omega_{s,\#} dt$  integriert. Ein Ausgangssignal des zweiten Integrationsglieds 3098 entspricht dem simulierten Feldwinkel  $\varphi\#$ .

Die in Figur 11 ebenfalls gezeigte Feldwinkelregelstrecke 30100 bildet einen Abschnitt der Drehzahlregelstrecke 3040 in Figur 8. Ein Differenzierglied 30102 der Feldwinkelregelstrecke 30100 empfängt einen Winkel  $\alpha$ , den der Rotor bezüglich des statororientierten Koordinatensystems aufweist, und differenziert den Winkel  $\alpha$  und gibt die mechanische Rotorwinkelgeschwindigkeit oder Rotorkreisfrequenz  $\Omega$  des Rotors an ein Verstärkungsglied 30104 aus. Dabei kann  $T_B$  einer dem Differenzierglied 30102 zuordbaren Integrationskonstanten entsprechen. Alternativ zum Differenzierglied 30102 kann eine Winkelbeschleunigung mittels eines Integrierglieds, das die Integrationskonstante  $T_B$  verwendet, über die Zeit integriert werden und die Rotorkreisfrequenz  $\Omega$  ausgeben. Das Verstärkungsglied 30104 verstärkt die zugeführte Rotorkreisfrequenz  $\Omega$  mit einem Verstärkungsfaktor  $z_P$ , der der Polpaarzahl des Rotors entspricht, und gibt eine elektrische Rotorwinkelgeschwindigkeit oder Rotorkreisfrequenz  $\Omega_r$  des Rotors aus. Die ausgegebene elektrische Rotorkreisfrequenz  $\Omega_r$  wird mittels eines Additionsglieds 30106 mit der Schlupfkreisfrequenz  $\omega_r$  addiert, die einem Schlupf des Rotorfelds relativ zum Statorfeld zugeordnet ist, und gibt als Ergebnis die Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  aus. Die ausgegebene Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  wird einem Integrationsglied 30108 zugeführt, das die empfangene Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  unter Verwendung der Integrationskonstanten  $T_B$  über eine Zeit integriert und den Feldwinkel  $\varphi$  ausgibt.

Ein Subtraktionsglied 30110 der Simulationseinheit 3050 errechnet eine Differenz zwischen dem mittels der Regeleinheit 3084 und der Einheit 3096 simulierten Feldwinkel  $\varphi\#$  und dem von der Feldwinkelregelstrecke 30100 ausgegebenen Feldwinkel  $\varphi$  und gibt die Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  aus, die der Regeleinheit 3084 zugeführt wird. Das Subtraktionsglied 30110 stellt ein optionales Bauteil dar und soll veranschaulichen, dass die Simulation des Feldwinkels  $\varphi\#$  der Asynchronmaschine 14 als Regelkreis verstanden werden kann, der mittels der gestrichelten Linien in Figur 11 angedeutet ist und mittels dem der simulierte Feldwinkels  $\varphi\#$  dem tatsächlichen Feldwinkel  $\varphi$  nachgeführt werden kann. Bei diesem Regelkreis ersetzt die von dem Subtraktionsglied 30110 ausgegebene Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$  die von der Einheit 3048 ausgegebene Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$ .

Für die Simulation oder Nachbildung des Feldwinkels  $\varphi\#$  ergibt sich eine Übertragungsfunktion bei einer simulierten Rotorkreisfrequenz  $\omega_{r\#}$  von Null bzw. wenn keine Addition mittels des ersten Additionsglieds 3088 erfolgt, zu

$$(\varphi\# / \varphi)|_{\omega_r\# = 0} = (1 + p^*T_\varphi) / (1 + p^*T_\varphi + q_{2,\varphi} * p^{2*}(T_\varphi)^2).$$

Dabei gelten die Zusammenhänge  $T_\varphi = K_{PI,\varphi} * T_{PI,\varphi}$  und  $q_{2,\varphi} = (1 / K_{PI,\varphi})^2 * (T_B / T_{PI,\varphi})$ . Bei dieser Übertragungsfunktion würde die Winkeldifferenz  $\Delta\varphi$ , also der Fehlwinkel zwischen dem feldorientierten Koordinatensystem 3074 und dem simulierten feldorientierten Koordinatensystem 3076, das den Berechnungen der ersten Simulationsvorrichtung 3026, der zweiten Simulationsvorrichtung 3028 und der dritten Simulationsvorrichtung 3030 bei der Simulation der jeweiligen Größen zu Grunde gelegt wird, bei einer schnellen Änderung der Schlupfkreisfrequenz  $\omega_r$  vorübergehend bis zum Einstellen eines stationären Zustands größere Abweichungen aufweisen. Um diese Abweichungen zu verhindern, wird dem Ausgabesignal des PI-Reglers 3086 in ähnlicher Weise zu einer Vorsteuerung die simulierte Schlupfkreisfrequenz  $\omega_{r,\#}$  aufgeschaltet. Dadurch wird eine dynamisch hochwertige Simulation der Statorkreisfrequenz  $\omega_{s,\#}$  und des Feldwinkels  $\varphi\#$  bewerkstelligt.

Im Folgenden wird das Regelsystem 16 gemäß einem vierten Ausführungsbeispiel näher beschrieben und mit dem Bezugszeichen 4016 bezeichnet.

Das in Figur 12 dargestellte Regelsystem 4016 weist eine erste und zweite Park-Transformationseinheit 4022, 4024 zum Transformieren von dreidimensionalen Werten einer Größe oder eines Parameters zwischen einem statororientierten Koordinatensystem, das mittels zueinander orthogonaler Koordinatenachsen 1,2,3 definiert ist, und einem feldorientierten Koordinatensystem, das mittels zueinander orthogonaler Koordinatenachsen d, q definiert ist, unter Verwendung eines Feldwinkels  $\varphi$  auf.

Das Regelsystem 4016 weist ferner eine erste Simulationsvorrichtung 4026 zum Simulieren einer feldorientierten, aufgrund eines Rotorflusses  $\Psi_r$  des Rotors in einem Stator der Asynchronmaschine 14 induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  mittels eines Maschinenmodells und zum Simulieren einer simulierten feldorientierten in einem Betrieb der Asynchronmaschine 14 stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  mittels des Maschinenmodells auf. Eine zweite Simulationsvorrichtung 4028 des Regelsystems 4016 ist zum Simulieren eines feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\#}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells und zum Simulieren einer feldorientierten Rotorflussver-

kettung  $\Psi_{r,\#}$  mittels des Maschinenmodells eingerichtet. Der Einfachheit halber werden der Rotorfluss und die Rotorflussverkettung mittels des gemeinsamen griechischen Buchstabens  $\Psi_r$  bezeichnet. Eine dritte Simulationsvorrichtung 4030 ist zum Simulieren einer Drehzahl  $n\#$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells, zum Simulieren einer Schlupfkreisfrequenz  $\omega_{r,\#}$  mittels des Maschinenmodells und zum Simulieren eines Feldwinkels  $\varphi\#$  mittels des Maschinenmodells eingerichtet. Die erste, zweite und dritte Simulationsvorrichtung 4026, 4028, 4030 arbeiten in einem simulierten oder nachgebildeten Koordinatensystem, das mittels zueinander orthogonaler Koordinatenachsen  $d\#, q\#$  und dem Feldwinkel  $\varphi\#$  definiert ist.

Ferner weist das Regelsystem 4016 eine feldorientiert arbeitende Drehzahlregelvorrichtung 4032 zum Regeln der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels einer in der Drehzahlregelvorrichtung 4032 implementierten, feldorientiert arbeitenden Magnetisierungsstromregelung zum Regeln eines Magnetisierungsstroms  $i_{mg}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 und eine feldorientiert arbeitende Statorstromregelvorrichtung 4034 zum Regeln des im Stator fließenden Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 auf. Über ein Stellglied 4036 des Regelsystems 4016 ist die von der Spannungsquelle 12 ausgebbare stufig einstellbare Ausgabespannung regelbar, die an Maschinenklemmen der Asynchronmaschine 14 einspeisbar ist. Eine Statorstromregelstrecke 4038 des Regelsystems 4016, die zum Regeln eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  dient, und eine Drehzahlregelstrecke 4040 des Regelsystems 4016, die zum Regeln des Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  und der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 dient, bilden die Asynchronmaschine 14 mittels der entsprechenden Zusammenhänge zwischen jeweiligen Eingangsgrößen  $u_{s,\varphi}$  bzw.  $i_{s,\varphi}$  und Ausgangsgrößen  $i_{s,\varphi}$  bzw.  $\Omega, n, \varphi$  der Regelstrecken 4038, 4040 nach. Dabei bezeichnet  $\Omega$  eine mechanische Kreisfrequenz des Rotors im feldorientierten Koordinatensystem.

Ein erster Sensor 4042 zum Erfassen einer feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 und ein zweiter Sensor 4044 zum Erfassen eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators sind jeweils mit der ersten, zweiten und dritten Simulationsvorrichtung 4026, 4028, 4030 gekoppelt. Die Statorstromregelvorrichtung 4034 kann ferner mit dem ersten Sensor 4042 und dem zweiten Sensor 4044 gekoppelt sein. Ein dritter Sensor 4045 ist zum Erfas-

sen einer Statortemperatur des Stators der Asynchronmaschine 14 eingerichtet und mit der dritten Simulationsvorrichtung 4030 gekoppelt.

Obwohl die Sensoren 4042, 4044 schaltungstechnisch dargestellt sind, als dass die Sensoren 4042, 4044 zum Erfassen der feldorientierten Größen eingerichtet sind, versteht es sich, dass die Sensoren Werte im statororientierten Koordinatensystem erfassen, die mittels der Transformationseinheit 4022 in entsprechende Größen des feldorientierten Koordinatensystems umgewandelt werden.

Die dritte Simulationsvorrichtung 4030 weist eine erste Schnittstelleneinheit 4046 zum Empfangen eines von dem zweiten Sensors 4044 erfassten feldorientierten Statorstroms und eine zweite Schnittstelleneinheit 4048 zum Empfangen der von der zweiten Simulationsvorrichtung 4028 erzeugten, simulierten feldorientierten Rotorflussverkettung  $\Psi_{r,\#}$  auf. Eine dritte Schnittstelleneinheit 4049 der dritten Simulationsvorrichtung 4030 ist zum Empfangen der vom dritten Sensor 4045 zugeführten Statortemperatur eingerichtet. Eine Simulationseinheit 4050 der dritten Simulationsvorrichtung 4030 ist dazu eingerichtet, die feldorientierte Schlupfkreisfrequenz  $\omega_{r,\#}$  basierend auf dem von der ersten Schnittstelleneinheit 4046 zugeführten feldorientierten Statorstrom  $i_{s,\varphi}$ , der von der zweiten Schnittstelleneinheit 4048 zugeführten simulierten feldorientierten Rotorflussverkettung  $\Psi_{r,\#}$  und der von der dritten Schnittstelleneinheit 4048 bereitgestellten Statortemperatur mittels des Maschinenmodells zu simulieren. Ein Ausgabewert der Simulationseinheit 4050 entspricht der simulierten Schlupfkreisfrequenz  $\omega_{r,\#}$  und ist mittels einer vierten Schnittstelleneinheit 4052 ausgebbar.

Zumindest eine der Einheiten 4046-4052 der dritten Simulationsvorrichtung 4030 und/oder zumindest eine Vorrichtung der ersten Simulationsvorrichtung 4026, der zweiten Simulationsvorrichtung 4028 und der dritten Simulationsvorrichtung 4030 sind mittels Hardware und/oder Software realisiert. Ferner können zumindest zwei Elemente ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus den Einheiten 4046-4052 und den Vorrichtungen 4026, 4028, 4030 einstückig bzw. als gemeinsamer Code realisiert sein.

Der Vollständigkeit halber wird angemerkt, dass in Figur 12 mittels  $n^*$  eine Steuereerdrehzahl für die Drehzahlregelvorrichtung 4032 bezeichnet wird. Größen von Figur 12, die mit einem Stern gekennzeichnet sind, bezeichnen Soll-Größen im

Regelsystem 4016. Ferner sind vektorielle Größen in den Figuren 3 und 12 mittels eines Pfeils gekennzeichnet, während diese Größen in der Beschreibung ohne Pfeil gekennzeichnet sind.

5

Bezugnehmend auf Fig. 1 kann die Anordnung 10 alternativ oder zusätzlich wie folgt ausgebildet sein: Die in Figur 1 gezeigte Anordnung 10 weist eine als Käfigläufer ausgebildete Asynchronmaschine 14, ein Regelsystem 16 zum drehgeberfreien, feldorientierten Regeln der Asynchronmaschine 14 und eine als einen ein-  
10 gestufte, dreiphasige Spannung ausgebenden Batteriedirektinverter ausgebildete Spannungsquelle 12 auf, der mit drei Spannungszweigen 17a, 17b, 17c versehen ist. Die Anordnung 10 ist Teil eines Elektroantriebs, der in statischen Anlagen, wie beispielsweise in einem Windkraftwerk, oder in einem Fahrzeug, beispielsweise in einem Hybrid- oder Elektrofahrzeug, verwendet werden kann. Die  
15 Anordnung 10 kann auch Teil eines Transaktionsantriebs sein.

Die mit den drei Spannungszweigen 17a, 17b, 17c ausgebildete Spannungsquelle 12 ist dazu eingerichtet, gestufte Ausgabespaltungen über einen jeweiligen Pluspol U, V, W der Asynchronmaschine 14 zuzuführen. Jeder Spannungszweig  
20 17a, 17b, 17c ist mit einer Vielzahl von Batteriemodulen mit Koppelinrichtungen versehen, die der Übersicht halber lediglich in dem Spannungszweig 17c mit den Bezugszeichen 18a bzw. 18b bezeichnet sind. Optionale Trenneinrichtungen 20a und optionale Lade- und Trenneinrichtungen 20b der Spannungszweige 17a,  
25 17b, 17c sind jeweils mit einem Batteriemodul 18a bzw. 18b der Spannungszweige 17a, 17b, 17c gekoppelt. Minuspole des Batteriedirektinverters 16 sind zu einem Sternpunkt verbunden, können allerdings auch elektrisch voneinander getrennt sein. Obwohl die Spannungsquelle 12 als wiederaufladbar ausgebildet ist und einen Akkumulator bzw. ein Akkumulatorsystem darstellt, wird die Spannungsquelle 12 entsprechend des üblichen Sprachgebrauchs als Batterie bzw.  
30 als Batteriesystem bezeichnet.

Im Folgenden wird das zuletzt beschriebene Regelsystem 16 gemäß einem fünften Ausführungsbeispiel in Figur 13 näher beschrieben und mit dem Bezugszeichen 5016 bezeichnet. Dieses Ausführungsbeispiel des Regelsystems 5016  
35 kann in der zuerst mit Bezug auf Figur 1 beschriebenen Anordnung 10 anstelle des Regelsystems 1016, 2016, 3016, 4016 bzw. 6016 verwendet werden. Die

Regelsysteme 1016, 2016, 3016, 4016 bzw. 6016 können auch in der soeben beschriebenen Anordnung 10 verwendet werden.

Das Regelsystem 5016 weist eine erste und zweite Parktransformationseinheit 5022, 5024 zum Transformieren von Werten vektorieller Größen zwischen einem statororientierten Koordinatensystem und einem feldorientierten Koordinatensystem, einen ersten und zweiten Sensor 5026, 5028 zum Erfassen einer feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  bzw. eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$ , eine Statorstromregelstrecke 5030 zum Regeln des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$ , eine Drehzahlregelstrecke 5032 zum Regeln eines Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  und einer Drehzahl  $n$  eines Rotors der Asynchronmaschine 14, einen Drehzahlregler bzw. -regelvorrichtung 5034 zum feldorientierten Regeln des Magnetisierungsstroms  $i_{mg}$  und der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 und einen Statorstromregler bzw. -regelvorrichtung 5036 zum feldorientierten Regeln des Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  auf. Die Statorstromregelvorrichtung 5036 kann mit dem ersten Sensor 5026 und zweiten Sensor 5028 gekoppelt sein. Die Statorstromregelstrecke 5030 und die Drehzahlregelstrecke 5032 bilden die Asynchronmaschine 14 mittels der entsprechenden Zusammenhänge zwischen jeweiligen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen der Regelstrecken 5030, 5032 nach. Insbesondere kann die Drehzahlregelstrecke 5032, wie später detailliert mit Bezug auf Figure Figur 14 beschrieben ist, die Drehzahl  $n$  und den Feldwinkel  $\varphi$  ausgeben. Obwohl die Sensoren 5026, 5028 schaltungstechnisch dargestellt sind, als dass sie zum Erfassen der feldorientierten Größen eingerichtet sind, versteht es sich, dass die Sensoren Werte im statororientierten Koordinatensystem erfassen, die in entsprechende Größen im feldorientierten Koordinatensystem bzw. im simulierten feldorientierten Koordinatensystem umgewandelt werden.

Eine erste Simulationsvorrichtung 5038 des Regelsystems 5016 ist zum Simulieren einer feldorientierten, im Betrieb der Asynchronmaschine 14 stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  sowie einer feldorientierten, im Stator induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  basierend auf der vom ersten Sensor 5026 gemessenen und entsprechend transformierten feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und des vom zweiten Sensor 5028 gemessenen und entsprechend transformierten feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  unter Verwendung eines die Asynchronmaschine 14 nachbildenden Maschinenmodells eingerichtet. Eine zweite Simulationsvor-

richtung 5040 des Regelsystems 5016 ist dazu eingerichtet, eine Statorkreisfrequenz  $\omega_{s,\#}$ , einen feldorientierten Magnetisierungsstrom  $i_{mg,\varphi\#}$  sowie eine feldorientierte Rotorflussverkettung  $\Psi_{r,\varphi\#}$  mittels des Maschinenmodells zu simulieren. Eine dritte Simulationsvorrichtung 5042 des Regelsystems 5014 ist zum Simulieren einer Drehzahl  $n_{\#}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 basierend auf der vom ersten Sensor 5026 gemessenen und transformierten feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und des vom zweiten Sensor 5028 gemessenen und transformierten feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  unter Verwendung des Maschinenmodells eingerichtet. Über ein Stellglied 5043 des Regelsystems 5016 ist die vom Batteriedirektinverter 12 ausgebbare gestufte Ausgabespannung regelbar, die an Maschinenklemmen der Asynchronmaschine 14 einspeisbar ist.

Die zweite Simulationsvorrichtung 5040 weist eine erste Schnittstelleneinheit 5044 zum Empfangen der vom ersten Sensor 5026 gemessenen und transformierten feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$ , des vom zweiten Sensor 5028 gemessenen und transformierten feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  und der mittels der ersten Simulationsvorrichtung 5038 simulierten feldorientierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  auf. Eine erste Simulationseinheit 5046 der zweiten Simulationsvorrichtung 5040 ist kommunikativ mit der ersten Schnittstelleneinheit 5044 gekoppelt und zum Simulieren der Statorkreisfrequenz  $\omega_{s,\#}$  basierend auf der simulierten feldorientierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  eingerichtet. Eine zweite Simulationseinheit 5048 der zweiten Simulationsvorrichtung 5040 ist kommunikativ mit der ersten Schnittstelleneinheit 5044 und der ersten Simulationseinheit 5046 gekoppelt und zum Simulieren des feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\varphi\#}$  basierend auf der simulierten feldorientierten induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  und der simulierten Statorkreisfrequenz  $\omega_{s,\#}$  eingerichtet. Eine dritte Simulationseinheit 5050 der zweiten Simulationsvorrichtung 5040 ist kommunikativ mit der zweiten Simulationseinheit 5048 gekoppelt und zum Simulieren der feldorientierten Rotorflussverkettung  $\Psi_{r,\varphi\#}$  basierend auf dem simulierten feldorientierten Magnetisierungsstrom  $i_{mg,\varphi\#}$  eingerichtet. Eine zweite Schnittstelleneinheit 5052 der zweiten Simulationsvorrichtung 5040 ist zum Ausgeben des mittels der zweiten Simulationseinheit 5048 simulierten feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\varphi\#}$  an den Drehzahlregler 5034 eingerichtet. Eine dritte Schnittstelleneinheit 5054 der zweiten Simulationsvorrichtung 5040 ist zum Ausgeben der mittels der dritten Simulationseinheit 5050 simulierten feldorientierten Rotorflussverkettung  $\Psi_{r,\varphi\#}$  eingerichtet.

Der Drehzahlregler 5034 weist eine erste Schnittstelleneinheit 5056 zum Empfangen des simulierten feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\varphi\#}$  der von der dritten Simulationsvorrichtung 5042 ausgegebenen simulierten Drehzahl  $n_{\#}$  und einem Drehzahlsteuerwert  $n^*$  auf und ist kommunikativ mit einem in dem Drehzahlregler 5034 aufgenommenen Magnetisierungsstromregler 5058 zum feldorientierten Regeln des Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\varphi}$  des Rotors basierend auf dem simulierten feldorientierten Magnetisierungsstrom  $i_{mg,\varphi\#}$  gekoppelt. Der Magnetisierungsstromregler bzw. -regeleinheit 5058 ist dazu eingerichtet, eine Längskomponente  $i_{sd}$  eines feldorientierten Sollstatorstroms  $i_{s,*\varphi}$  an den Statorstromregler 5036 auszugeben, der zusammen mit einer Querkomponente  $i_{sq}$  als Sollstatorstrom  $i_{s,*\varphi}$  über eine zweite Schnittstelleneinheit 5060 des Drehzahlreglers 5034 dem Statorstromregler 5036 zuführbar ist. Dadurch ergibt sich ein Regelkreis für den feldorientierten Magnetisierungsstrom  $i_{mg,\varphi}$  und den feldorientierten Rotorfluss  $\Psi_{r,\varphi}$  der Asynchronmaschine 14. Eine von dem Statorstromregler 5036 ausgegebene Sollstatorspannung  $u_{s,*\varphi}$  ist als Sollstatorspannung  $u_{s,*1,2,3}$  dem Stellglied 5043 des Regelsystems 14 für die Asynchronmaschine 14 zuführbar.

Zumindest eine der ersten, zweiten und dritten Simulationsvorrichtung 5036, 5038, 5040 ist mittels Hardware und/oder Software realisiert. Zumindest zwei Vorrichtungen der ersten, zweiten und dritten Simulationsvorrichtung 5038, 5040, 5042 können einstückig bzw. als gemeinsamer Code realisiert sein.

Es wird angemerkt, dass vektorielle Größen in den Figuren 13 und 14 mittels eines Pfeils gekennzeichnet sind, während diese Größen in der Beschreibung ohne Pfeil gekennzeichnet sind.

Die in Figur 14 gezeigte Drehzahlregelstrecke 5032 weist für die Längskomponente  $i_{sd}$  des Raumvektors des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  ein Subtraktionsglied 5090, das den Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  von der Längskomponente  $i_{sd}$  subtrahiert, und ein Integrierglied 5092 erster Ordnung mit einer durch die Rotorzeitkonstante  $T_r$  gebildeten Verzögerungszeitkonstante auf, das den Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  ausgibt. Der Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  wird einem Dividierglied 5093 zugeführt, das als nicht lineare Kopplung der beiden Komponenten  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  des Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  einen Quotienten zwischen der Querkompo-

5 nente  $i_{sq}$  des Raumvektors des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  und dem Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  bildet. Ein Ausgabewert des Dividierglieds 5093 wird einem Verstärkungsglied 5094 zugeführt, das einen Proportionalitätsfaktor  $1/K_{Tr}$  zu dem Ausgabesignal multipliziert und als Ausgabewert die Schlupfkreisfrequenz  $\omega_r$  ausgibt. Ein Addierglied 5096 addiert die Schlupfkreisfrequenz  $\omega_r$  zu einer Drehzahl  $n$  und gibt die Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  aus, die mittels eines Integrierglieds 5098 mit einer Bezugszeitkonstanten  $T_B$  integriert wird, so dass der Feldwinkel  $\varphi$  erzeugt wird. Die Querkomponente  $i_{sq}$  des Raumvektors des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  wird neben dem Dividierglied 5093 einem Multiplikationsglied 10 50100 zugeführt, das als nicht lineare Kopplung der beiden Komponenten  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  des Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  den von dem Integrierglied 5092 ausgegebenen Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  mit der Querkomponente  $i_{sq}$  multipliziert. Der Ausgabewert des Multiplikationsglied 50100 wird einem Verstärkungsglied 50102 zugeführt, das einen Proportionalitätsfaktor  $K_{mi}$  zu dem Ausgabesignal multipliziert und ein 15 Drehmoment  $m_i$  an ein Substraktionsglied 50104 ausgibt, das ein Drehmoment oder Widerstandsmoment  $m_w$  von dem Drehmoment  $m_i$  abzieht. Der Ausgabewert des Subtraktionsglied 50104 wird einem Integrierglied 50106 mit einer Zeitkonstanten  $T_j$ , die das Trägheitmoment des Asynchronmaschine 14 repräsentiert, zugeführt, dessen Ausgabesignal die Drehfrequenz  $\Omega$  des Rotors im 20 satororientierten Koordinatensystem 3082 ist. Die Drehfrequenz  $\Omega$  wird einem Verstärkungsglied 50108 zugeführt, das die Drehfrequenz  $\Omega$  mit einer Proportionalitätskonstante  $Z_p$ , einer Polpaarzahl der Asynchronmaschine 14, multipliziert und die Drehzahl  $n$  ausgibt, die als nicht lineare Kopplung zwischen den beiden Komponenten  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  des Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  dem Additionsglied 5096 zugeführt 25 wird.

Die zweite Simulationseinheit 5048 und die dritte Simulationseinheit 5050 arbeiten unabhängig von der Rotorzeitkonstanten  $T_r$ , die sich bei Betrieb der Asynchronmaschine 14 temperaturbedingt und aufgrund ändernder Eisensättigung 30 ändern kann. Bei Ausgleichsvorgängen des Magnetisierungsstromreglers 5058 kann daher vermieden werden, dass eine Abweichung zwischen dem simulierten Wert des Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\#}$  vom tatsächlichen Wert des Magnetisierungsstroms  $i_{mg}$  auftreten kann. Somit ist die Simulierung des feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\varphi\#}$  und der Rotorflussverkettung  $\Psi_{r,\#}$  besonders exakt.

35

Im Folgenden wird das Regelsystem 16 gemäß einem sechsten Ausführungsbeispiel näher beschrieben und mit dem Bezugszeichen 6016 bezeichnet.

5 Das in Figur 15 dargestellte Regelsystem 6016 weist eine erste und zweite Park-Transformationseinheit 6022, 6024 zum Transformieren von Werten vektorieller Größen zwischen einem statororientierten Koordinatensystem mit zueinander orthogonalen Koordinatenachsen 1,2,3 und einem feldorientierten Koordinatensystem mit zueinander orthogonalen Koordinatenachsen d, q unter Verwendung  
10 eines Feldwinkels  $\varphi$  auf. Das Regelsystem 6016 weist ferner eine erste Simulationsvorrichtung 6026 zum Simulieren einer feldorientierten, aufgrund eines Rotorflusses  $\Psi_r$  des Rotors in einem Stator der Asynchronmaschine 14 induzierten Statorspannung  $u_{ind,\varphi\#}$  mittels eines Maschinenmodells und zum Simulieren einer simulierten feldorientierten in einem Betrieb der Asynchronmaschine 14 stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  mittels des Maschinenmodells, eine zweite Simulationsvorrichtung 6028 zum Simulieren eines feldorientierten Magnetisierungsstroms  $i_{mg,\#}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells und eine dritte Simulationsvorrichtung 6030 zum Simulieren einer Drehzahl  $n_{\#}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels des Maschinenmodells  
15 auf. Die erste, zweite und dritte Simulationsvorrichtung 6026, 6028, 6030 arbeiten in einem simulierten oder nachgebildeten Koordinatensystem, das mittels zueinander orthogonaler Koordinatenachsen  $d\#, q\#$  definiert ist und bezüglich des feldorientierten Koordinatensystems um einen Feldwinkel  $\Delta\varphi$  gedreht ist.

25 Zusätzlich weist das Regelsystem 6016 eine Drehzahlregelvorrichtung 6032 zum Regeln der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 mittels einer in der Drehzahlregelvorrichtung 6032 implementierten Magnetisierungsstromregelung zum Regeln eines Magnetisierungsstroms  $i_{mg}$  des Rotors der Asynchronmaschine 14 und eine Statorstromregelvorrichtung 6034 zum Regeln des im Stator fließenden Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 auf. Über ein Stellglied 6036 des Regelsystems 6016 ist die vom Batteriedirektinverter 12 ausgebbare gestufte Ausgabespannung regelbar, die an Maschinenklemmen der Asynchronmaschine 14 einspeisbar ist. Eine Statorstromregelstrecke 6038 des Regelsystems 6016, die zum Regeln eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  dient,  
30 und eine Drehzahlregelstrecke 6040 des Regelsystems 6016, die zum Regeln des Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  und der Drehzahl  $n$  des Rotors der Asynchronma-

35

schine 14 dient, bilden die Asynchronmaschine 14 mittels der entsprechenden Zusammenhänge zwischen jeweiligen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen der Regelstrecken 6038, 6040 nach. Ein erster Sensor 6042 zum Erfassen einer feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  des Stators der Asynchronmaschine 14 und ein zweiter Sensor 6044 zum Erfassen eines feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  des Stators sind jeweils mit der ersten, zweiten und dritten Simulationsvorrichtung 6026, 6028, 6030 und der Statorstromregelvorrichtung 6034 gekoppelt. Die Statorstromregelvorrichtung 6034 kann mit dem ersten Sensor 6042 und dem zweiten Sensor 6044 gekoppelt sein.

Obwohl die Sensoren 6042, 6044 schaltungstechnisch dargestellt sind, als dass die Sensoren 6042, 6044 zum Erfassen der feldorientierten Größen eingerichtet sind, versteht es sich, dass die Sensoren Werte im statororientierten Koordinatensystem erfassen, die mittels der Transformationseinheit 6022 in entsprechende Größen im feldorientierten Koordinatensystem umgewandelt werden.

Die Statorstromregelvorrichtung 6034 weist eine erste Schnittstelleneinheit 6046 zum Empfangen eines feldorientierten Soll-Statorstroms  $i_{s,*\varphi}$  von der Drehzahlregelvorrichtung 6032, eine zweite Schnittstelleneinheit 6048 zum Empfangen des feldorientierten gemessenen Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  vom zweiten Sensor 6044, eine dritte Schnittstelleneinheit 6050 zum Empfangen der simulierten feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  von der ersten Simulationseinheit 6026, eine Erzeugungseinheit 6052 zum Erzeugen der feldorientierten Soll-Statorspannung  $u_{s,*\varphi}$  mittels des Maschinenmodells und eine vierte Schnittstelleneinheit 6054 zum Ausgeben der erzeugten feldorientierten Soll-Statorspannung  $u_{s,*\varphi}$  an die Park-Transformationseinheit 6024 auf.

Zumindest eine Einheit 6046 bis 6054 der Statorstromregelvorrichtung 6034 kann mittels Hardware und/oder Software realisiert sein. Ferner können zumindest zwei Einheiten 6046 bis 6054 der Statorstromregelvorrichtung 6034 einstückig bzw. als gemeinsamer Code realisiert sein.

Der Vollständigkeit halber wird angemerkt, dass in Figur 15 mittels  $\Omega$  eine Drehfrequenz des Rotors im statororientierten Koordinatensystem und mittels  $n^*$  eine Steuerdrehzahl für die Drehzahlregelvorrichtung 6032 bezeichnet wird. Ferner sind vektorielle Größen in den Figuren 15 bis 18 mittels eines Pfeils gekenn-

zeichnet, während diese Größen in der Beschreibung ohne Pfeil gekennzeichnet sind.

Die in Figur 16 dargestellte Statorstromregelstrecke 6038 verdeutlicht einen re-  
5 regelungstechnischen Zusammenhang zwischen der feldorientierten  
Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  und dem feldorientierten Statorstrom  $i_{s,\varphi}$ . Eine Längskompo-  
nente  $u_{sd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  wird mittels eines ersten Sub-  
traktionsglieds 6056a mit einer Störung in Form einer Längskomponente  $u_{sd,st}$  der  
feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung  $u_{s,st,\varphi}$  beauf-  
10 schlägt. Das Ausgabesignal  $u_{sd,\delta}$  des ersten Subtraktionsglieds 6056a wird mit-  
tels eines ersten Integrationsglieds 6058a integriert, das eine Integrationskon-  
stante  $T_{L\sigma}$  aufweist und eine Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten  
Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  ausgibt. Dabei ist die Integrationskonstante  $T_{L\sigma}$  einer  
Statorinduktivität zugeordnet. Die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten  
15 Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  wird einem ersten Verstärkungsglied 6060a zugeführt, das einen  
Streckenparameter  $K_{R_s}$ , der indikativ für den Statorwiderstand  $R_s$  ist, mit dem zu-  
geführten Signal multipliziert. Ein Ausgabesignal des ersten Verstärkungsglieds  
6060a wird einem Additionsglied 6062a zugeführt, dessen Ausgabesignal die  
Längskomponente  $u_{sd,st}$  der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen  
20 Statorspannung  $u_{s,st,\varphi}$  ist. Ferner wird die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientier-  
ten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  einem zweiten Subtraktionsglied 6064 zugeführt, das einen  
Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  von der Längskomponente  $i_{sd}$  der feldorientierten  
Statorspannung  $i_{s,\varphi}$  subtrahiert. Dabei wird der Magnetisierungsstrom  $i_{mg}$  mittels  
eines zweiten Integrationsglieds 6066 erzeugt, das mit einer Integrationskonstan-  
25 te  $T_r$  das Ausgabesignal des zweiten Subtraktionsglieds 6064 integriert. Das  
Ausgabesignal des zweiten Subtraktionsglieds 6064 wird auch einem zweiten  
Verstärkungsglied 6068a zugeführt, das einen Streckenparameter  $K_{R_r}$ , der indika-  
tiv für den Rotorwiderstand  $R_r$  ist, mit seinem Eingabesignal multipliziert und als  
Ausgabesignal eine Längskomponente  $u_{indd}$  der feldorientierten induzierten  
30 Spannung  $u_{ind,\varphi}$  ausgibt, die dem Additionsglied 6062a zugefügt wird. Eine Ver-  
arbeitung einer Querkomponente  $u_{sq}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  er-  
folgt in gleicher Weise wie die zuvor beschriebene Signalverarbeitung der Längs-  
komponente  $u_{sd}$  der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$ . Dabei wird allerdings  
die mittels des zweiten Subtraktionsglieds 6064 ausgeführte Subtraktion und die  
35 mittels des zweiten Integrationsglieds 6066 ausgeführte Integration nicht durch-

geführt und die zugehörigen Komponenten 6064, 6066 sind in einem zugeordneten Signalverarbeitungsabschnitt nicht vorhanden.

5 Eine nicht-lineare Kopplung zwischen der Längskomponente  $i_{sd}$  und der Querkomponente  $i_{sq}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  wird mittels eines dritten regelbaren Verstärkungsglieds 6070a erzeugt, das ein Eingangssignal, die Querkomponente  $i_{sq}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$ , mit einem Streckenparameter  $-\omega_s K_{L\sigma}$  multipliziert, der indikativ für ein Produkt aus der Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  und dem Streckenparameter  $K_{L\sigma}$  ist, und dessen Ausgangssignal dem Additionsglied 6062a zugeführt wird. Die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  wird ebenfalls einem dritten regelbaren Verstärkungsglied 6070b zugeführt, das das Eingangssignal mit einem zum Streckenparameter des Verstärkungsglieds 6070a vorzeichenvertauschten Streckenparameter  $\omega_s K_{L\sigma}$  multipliziert. Der Streckenparameter des dritten Verstärkungsglieds 6070b ist indikativ für ein Produkt aus der Statorkreisfrequenz  $\omega_s$  und dem Streckenparameter  $K_{L\sigma}$ . Ein Ausgangssignal des dritten Verstärkungsglieds 6070b wird dem Additionsglied 6062b zugeführt.

20 Die in Figur 16 dargestellte Statorstromregelstrecke 6038 kann vereinfacht wie in Figur 17 dargestellt werden und für die Längs- und Querkomponente der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$  jeweils das Subtraktionsglied 6056a bzw. 6056b und das Integrationsglied 6058a, 6058b aufweisen.

25 Figur 18 zeigt eine Signalverarbeitung der Statorstromregelvorrichtung 6034 für die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  und der feldorientierten Statorspannung  $u_{s,\varphi}$ , die identisch für die Querkomponente  $i_{sq}$  des feldorientierten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  ausgebildet ist. Die Statorstromregelvorrichtung 6034 weist eine Rückführung 6072 auf, mittels der die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten erfassten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  einem Kombinationsglied 6074 zugeführt wird. Ein Bypass-Integrierer 6076 der Statorstromregelvorrichtung 6034 weist ein Subtraktionsglied 6078 und ein Integrationsglied 6080 mit einer Integrationskonstanten  $T_{By, is}$  auf. Mittels des Subtraktionsglieds 6078 wird die Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientierten erfassten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  von der Längskomponente  $i_{sd,*}$  des feldorientierten Soll-Statorstroms  $i_{s,*\varphi}$  subtrahiert. Ein Ausgangssignal des Subtraktionsglieds 6078 wird mittels des Integrationsglieds 6080 integriert und dem Kombinationsglied 6074 zugeführt. Die Rückführung 6072 ist zusätzlich mit

einem Verstärkungsglied 6082 versehen, das die Längskomponente  $i_{sd}$  des  
 feldorientierten erfassten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$  mit einem Streckenfaktor  $K_{1, is}$  multipli-  
 ziert. Ein erzeugtes Ausgabesignal des Verstärkungsglieds 6082 wird dem Kom-  
 binationsglied 6074 zugeführt. Das Kombinationsglied 6074 addiert die Längskom-  
 ponente  $i_{sd,*}$  des feldorientierten Soll-Statorstroms  $i_{s,*\varphi}$  und das Ausgabesignal  
 des Integrationsglieds 6076 und subtrahiert davon die von dem ersten Verstär-  
 kungsglied 6082 ausgegebene verstärkte Längskomponente  $i_{sd}$  des feldorientier-  
 ten erfassten Statorstroms  $i_{s,\varphi}$ . Das Ausgabesignal des Kombinationsglieds 6074  
 wird einem zweiten Verstärkungsglied 6084 zugeführt, das einen Streckenpara-  
 meter  $K_{is}$  mit dem Ausgabesignal des Kombinationsglieds 6074 multipliziert. Ein  
 Ausgabesignal des Verstärkungsglieds 6084 entspricht einer Längskomponente  
 $u_{sd,\delta^*}$  einer feldorientierten an einer Statorinduktivität  $L_s$  abfallenden Soll-  
 Statorspannung  $u_{s,\delta^*}$  und wird einem Additionsglied 6086 zugeführt, das die  
 Längskomponente  $u_{sd,st,\#}$  der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen  
 Statorspannung  $u_{s,st,\varphi\#}$  als Störstellenaufschaltung für die Statorstromregelstrecke  
 6038 zu dem Ausgabesignal des zweiten Verstärkungsglieds 6084 addiert. Das  
 Ausgabesignal des Additionsglieds 6086 entspricht der Längskomponente  $u_{sd,*}$   
 der feldorientierten Soll-Statorspannung  $u_{s,*\varphi}$ , die mittels der vierten Schnittstel-  
 leneinheit 6054 von Fig. 15 ausgegeben wird.

In Übereinstimmung mit Figur 18 ergibt sich eine Führungsübertragungsfunktion von

$$i_{sd} / i_{sd,*} = 1 / (1 + pT_{is}).$$

Der erstellbare Parameter  $K_{1, is}$  ist zu  $K_{1, is} = 1 + (T_{is} / T_{By, is})$  gewählt, um eine Ord-  
 nungszahl von 1 der Führungsübertragungsfunktion zu gewährleisten. Dabei  
 ergibt sich der einstellbare Parameter  $K_{is} = T_{L\sigma} / T_{is}$  aus dem Zeitmaßstab  $T_{is}$  des  
 Regelsystems 6016. Somit kann nach Festlegung der Zeitkonstanten  $T_{By, is}$  des  
 Bypass-Integrierers 6076 die Einstellparameter der Statorstromregelvorrichtung  
 6034 bestimmt werden.

Merkmale eines der ersten bis sechsten Ausführungsbeispiele des Regelsystems  
 1016, 2016, 3016, 4016, 5016, 6016 können jeweils mit Merkmalen eines ande-  
 ren Ausführungsbeispiels des Regelsystems 1016, 2016, 3016, 4016, 5016,  
 6016 kombinierbar sein. Beispielsweise kann die Statorstromregelstrecke  
 1038, 3038, 4038, 5030 wie die Statorstromregelstrecke 2038 oder 6038 ausge-  
 bildet sein.

Es versteht sich, dass die Statorstromregelstrecke 1038, 2038, 3038, 4038, 5030, 6038 und die Drehzahlregelstrecke 1040, 2040, 3040, 4040, 5032, 6040, die die Asynchronmaschine 14 nachbilden, als Teil des Regelsystems 1016, 2016, 3016, 4016, 5016, 6016 oder separat vom Regelsystem 1016, 2016, 3016, 4016, 5016, 6016, also als nicht Teil des Regelsystems 1016, 2016, 3016, 4016, 5016, 6016 betrachtet werden können. In diesem Zusammenhang wird ferner angemerkt, dass die von der Drehzahlregelstrecke 1040, 2040, 3040, 4040, 5032, 6040 ausgegebenen Größen  $n$  und  $\varphi$  physikalische Größen darstellen können, während die entsprechenden simulierten bzw. nachgebildeten Größen  $n\#$  und  $\varphi\#$ , die mittels der entsprechenden Simulationsvorrichtung 1030, 2030, 3030, 4030, 5042, 6030 erzeugt werden, als berechnete Größen angesehen werden können. Das in Figur 3 gezeigte Ersatzschaltbild kann dem sechsten Ausführungsbeispiel des Regelsystems 6016 als Grundlage dienen und/oder als Grundlage für die Darstellung der Asynchronmaschine 14 mittels der Statorstromregelstrecke 1038, 2038, 3038, 4038, 5030, 6038 und der Drehzahlregelstrecke 1040, 2040, 3040, 4040, 5032, 6040 angesehen werden.

## 5 Ansprüche

1. Verfahren zum Simulieren einer feldorientierten in einem Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ( $u_{s,st,\varphi\#}$ ) eines Stators einer Asynchronmaschine (14) mittels eines Modells, insbesondere eines Maschinenmodells, wobei die Asynchronmaschine (14) drehgeberfrei, feldorientiert und mit einer gestuften Spannung betrieben wird, mit:
- Bereitstellen einer feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ),
  - Bereitstellen eines feldorientierten erfassten Statorstroms ( $i_{s,\varphi}$ ) und
  - Simulieren der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ( $u_{s,st,\varphi\#}$ ) basierend auf der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ) und dem feldorientierten erfassten Statorstrom ( $i_{s,\varphi}$ ).
2. Verfahren nach Anspruch 1, ferner mit:
- Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ) über eine Zeit mit einer Normierungskonstanten ( $T_{L\sigma}$ ), die indikativ für eine Statorinduktivität ( $L_\sigma$ ) des Stators ist, und
  - Subtrahieren des feldorientierten erfassten Statorstroms ( $i_{s,\varphi}$ ) von der integrierten feldorientierten Statorspannung, um einen feldorientierten Differenzstrom zu erzeugen,
- wobei das Simulieren der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ( $u_{s,st,\varphi\#}$ ) basierend auf dem feldorientierten Differenzstrom durchgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, ferner mit:
- Verstärken des feldorientierten Differenzstroms mit einem einstellbaren Verstärkungsparameter ( $G_{b,is}$ ) und
  - Subtrahieren des verstärkten feldorientierten Differenzstroms von der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ) vor dem Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ), um eine feldorientierte Differenzspannung zu erzeugen,

wobei das Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ) Integrieren der feldorientierten Differenzspannung aufweist.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, ferner mit:

- Integrieren des feldorientierten Differenzstroms über eine Zeit mit einer einstellbaren, weiteren Normierungskonstanten ( $T_{lb, is}$ ) und
- Subtrahieren des feldorientierten integrierten Differenzstroms von der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ) vor dem Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ), um eine feldorientierte Differenzspannung zu erzeugen,

wobei das Integrieren der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ) Integrieren der feldorientierten Differenzspannung aufweist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei ein Zeitmaßstab, in dem die feldorientierte im Betrieb stationär erforderliche Statorspannung ( $u_{s, st, \varphi\#}$ ) simuliert wird, kleiner als ein Zeitmaßstab gewählt wird, in dem ein feldorientierter Statorstrom ( $i_{s, \varphi}$ ) des Stators unter Verwendung der simulierten feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ( $u_{s, st, \varphi\#}$ ) geregelt wird.

6. Simulationsvorrichtung (1026) zum Simulieren einer feldorientierten in einem Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ( $u_{s, st, \varphi\#}$ ) eines Stators einer Asynchronmaschine (14) mittels eines Modells, insbesondere eines Maschinenmodells, wobei die Asynchronmaschine (14) drehgeberfrei, feldorientiert und mit einer gestuften Spannung betreibbar ist, mit:

- einer Einheit (1046) zum Bereitstellen einer feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ),
- einer Einheit (1048) zum Bereitstellen eines feldorientierten erfassten Statorstroms ( $i_{s,\varphi}$ ) und

einer Simulationseinheit (1050) zum Simulieren der feldorientierten im Betrieb stationär erforderlichen Statorspannung ( $u_{s, st, \varphi\#}$ ) basierend auf der feldorientierten erfassten Statorspannung ( $u_{s,\varphi}$ ) und dem feldorientierten erfassten Statorstrom ( $i_{s,\varphi}$ ).

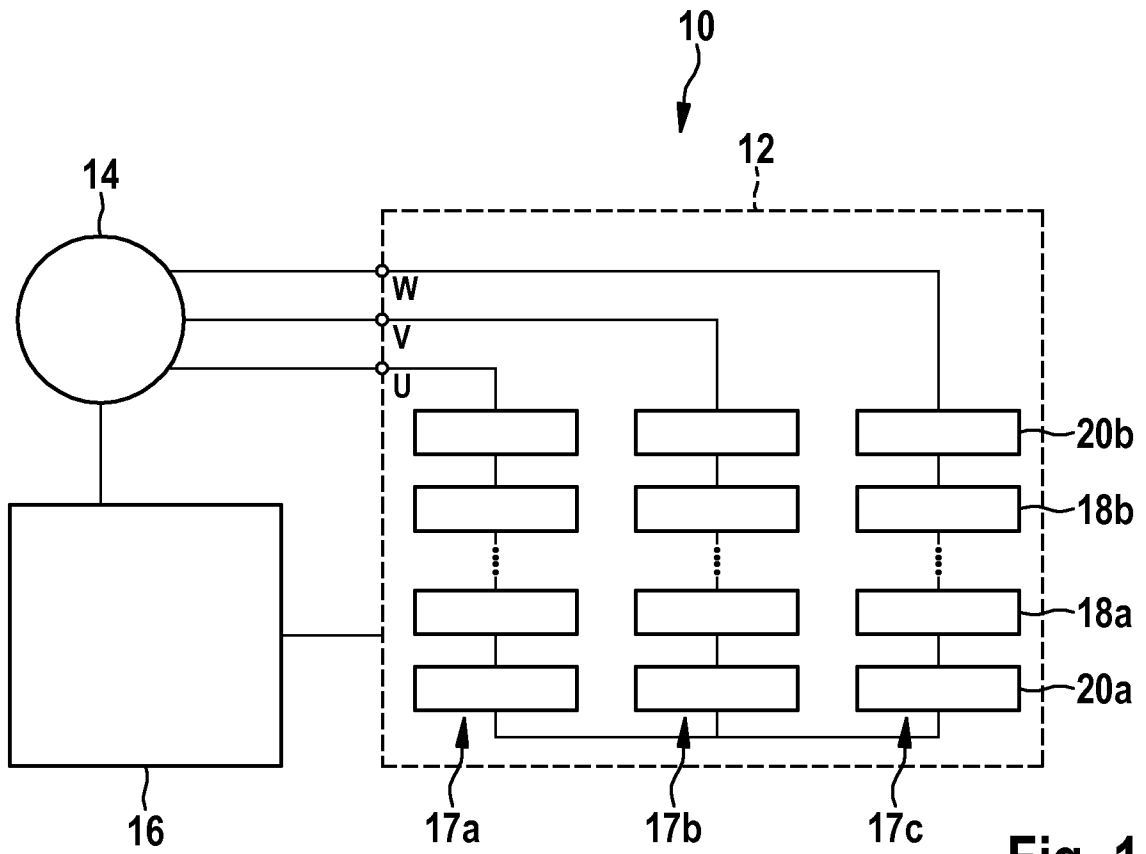


Fig. 1

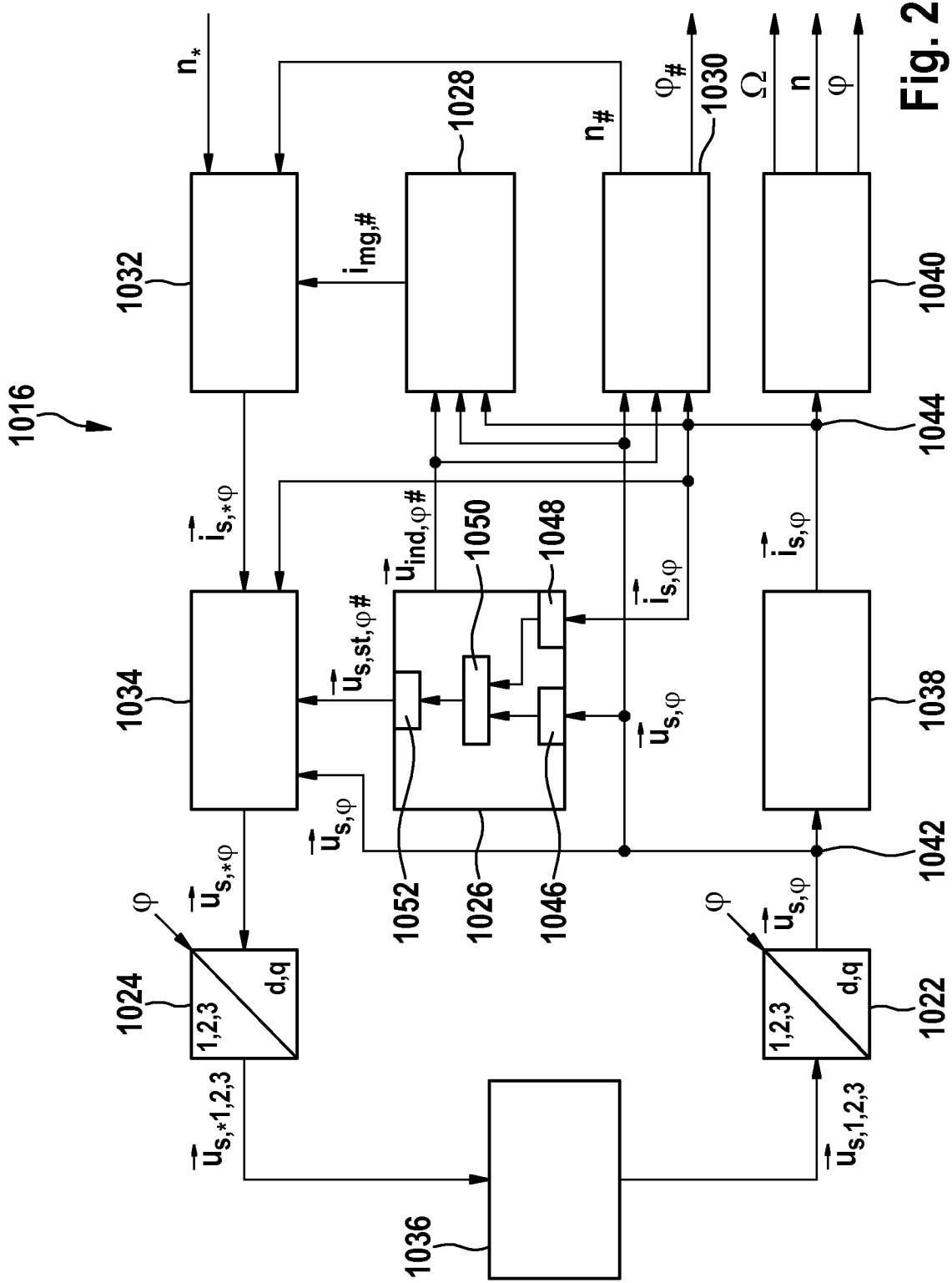


Fig. 2

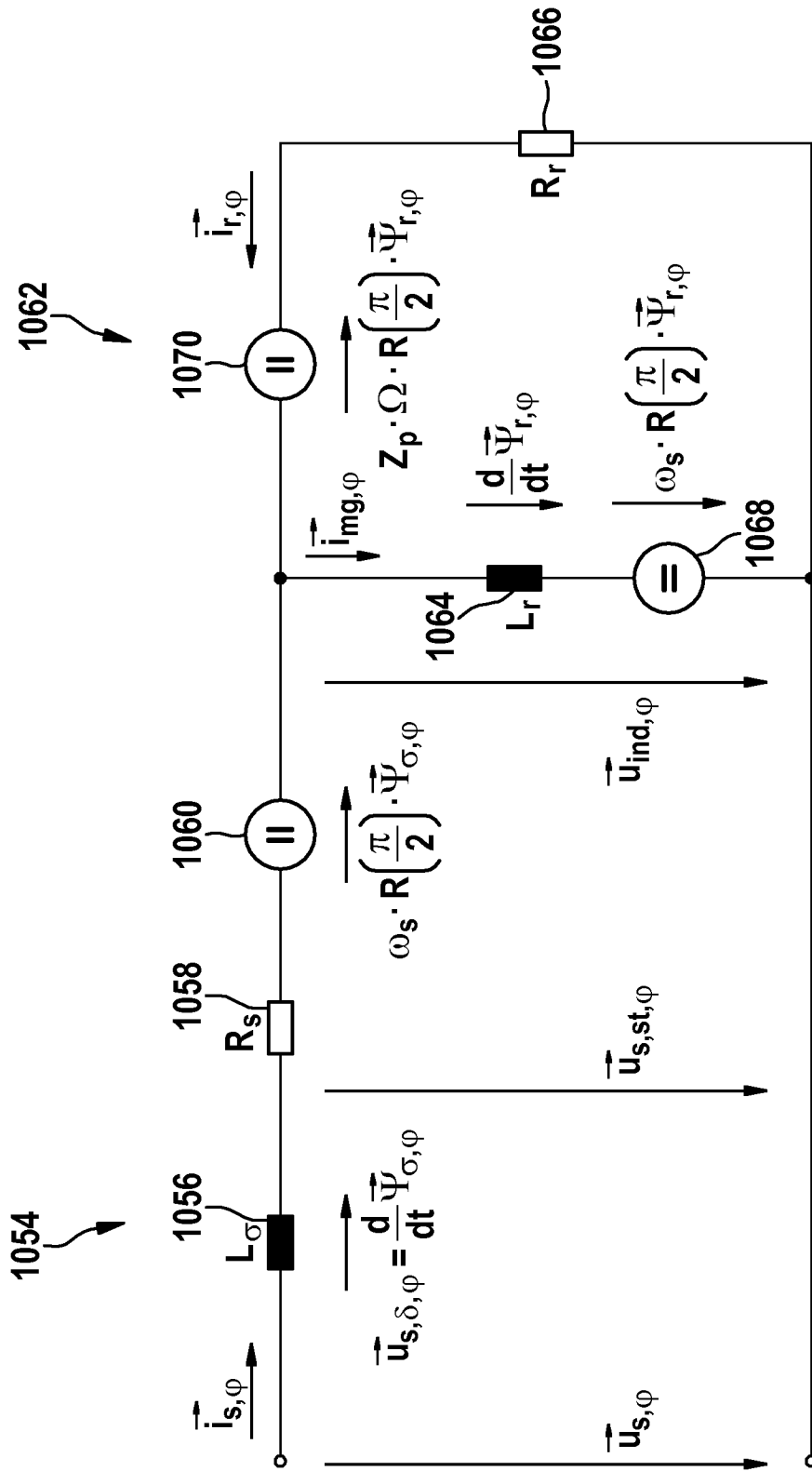


Fig. 3

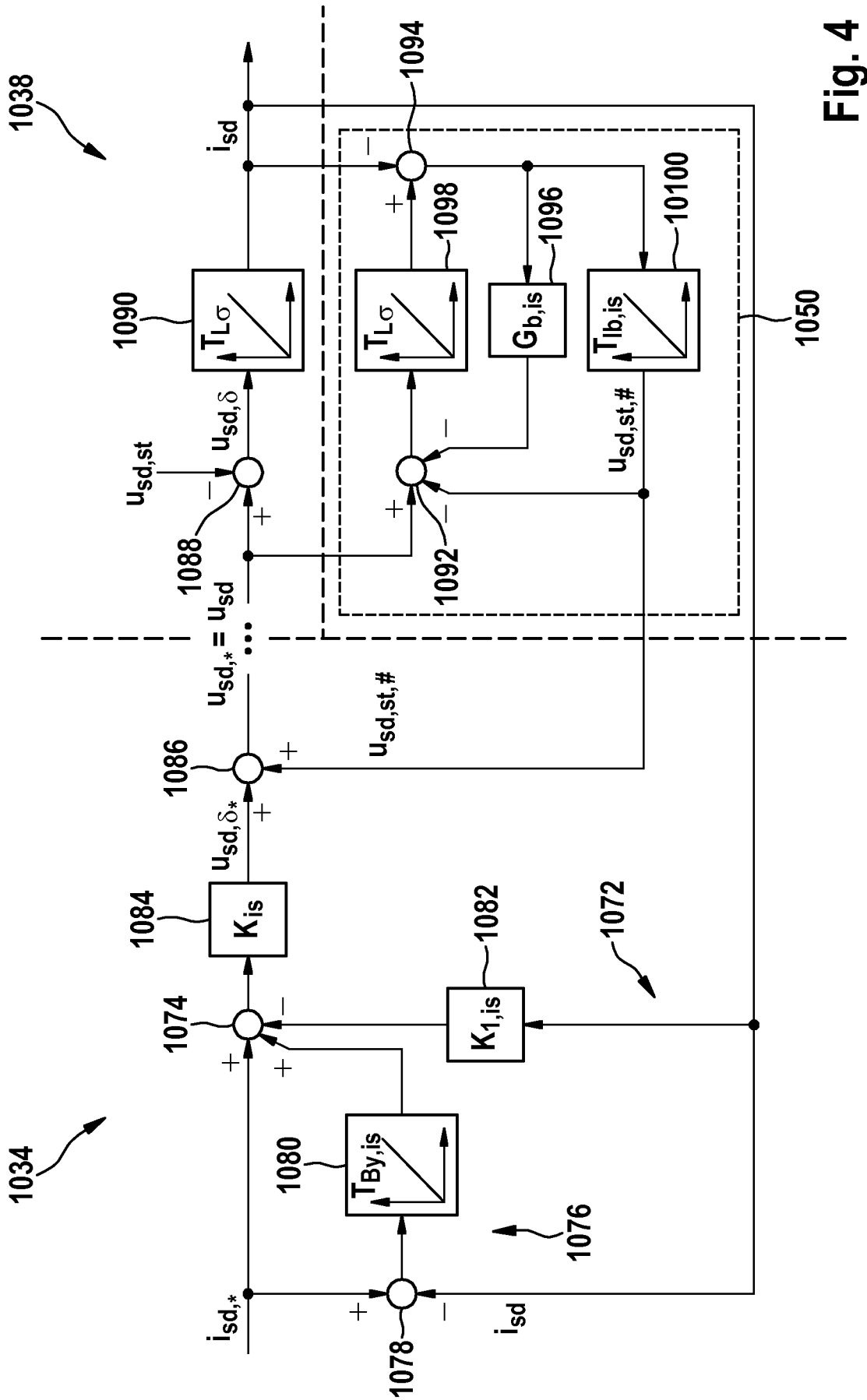


Fig. 4

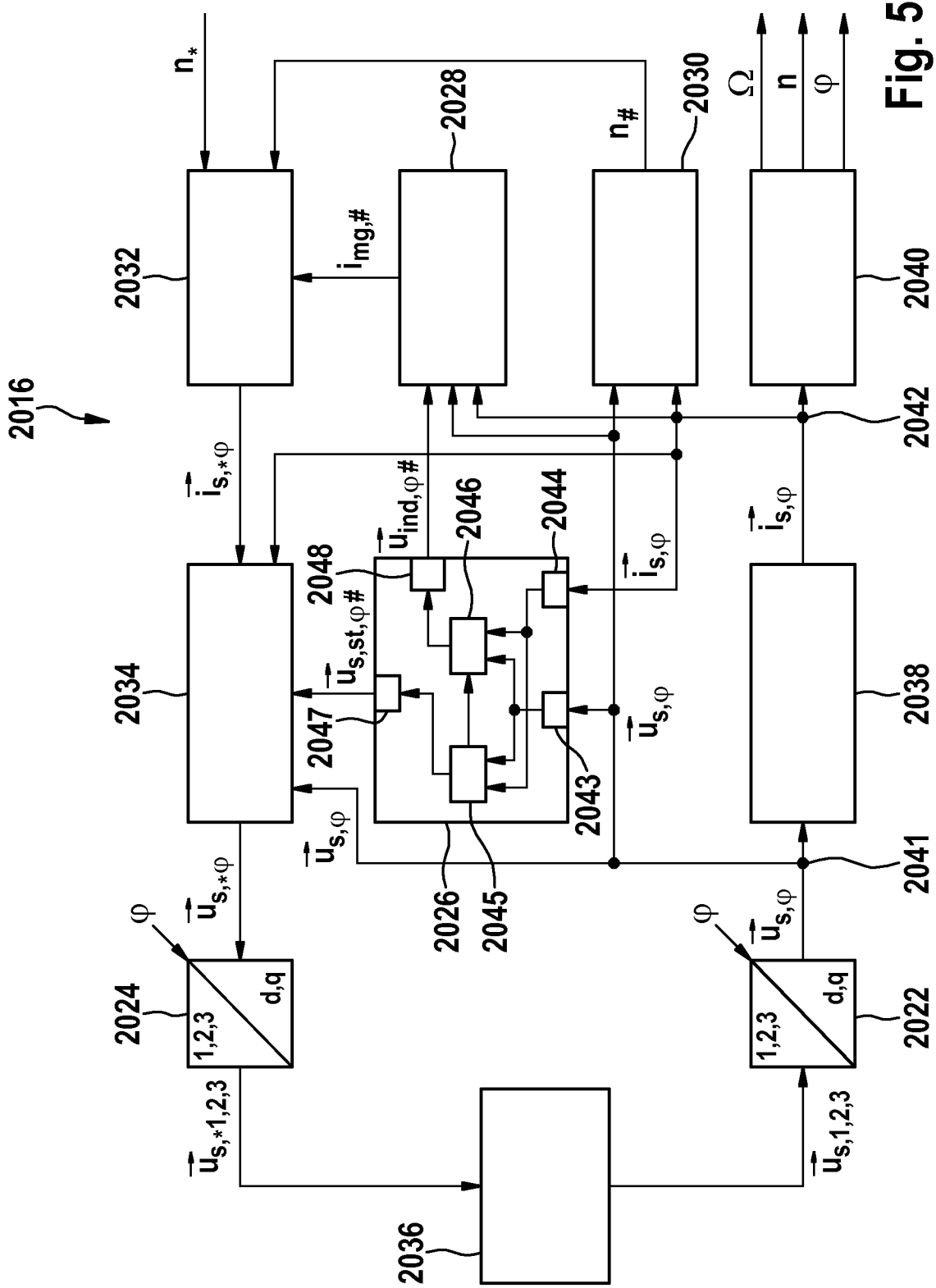


Fig. 5

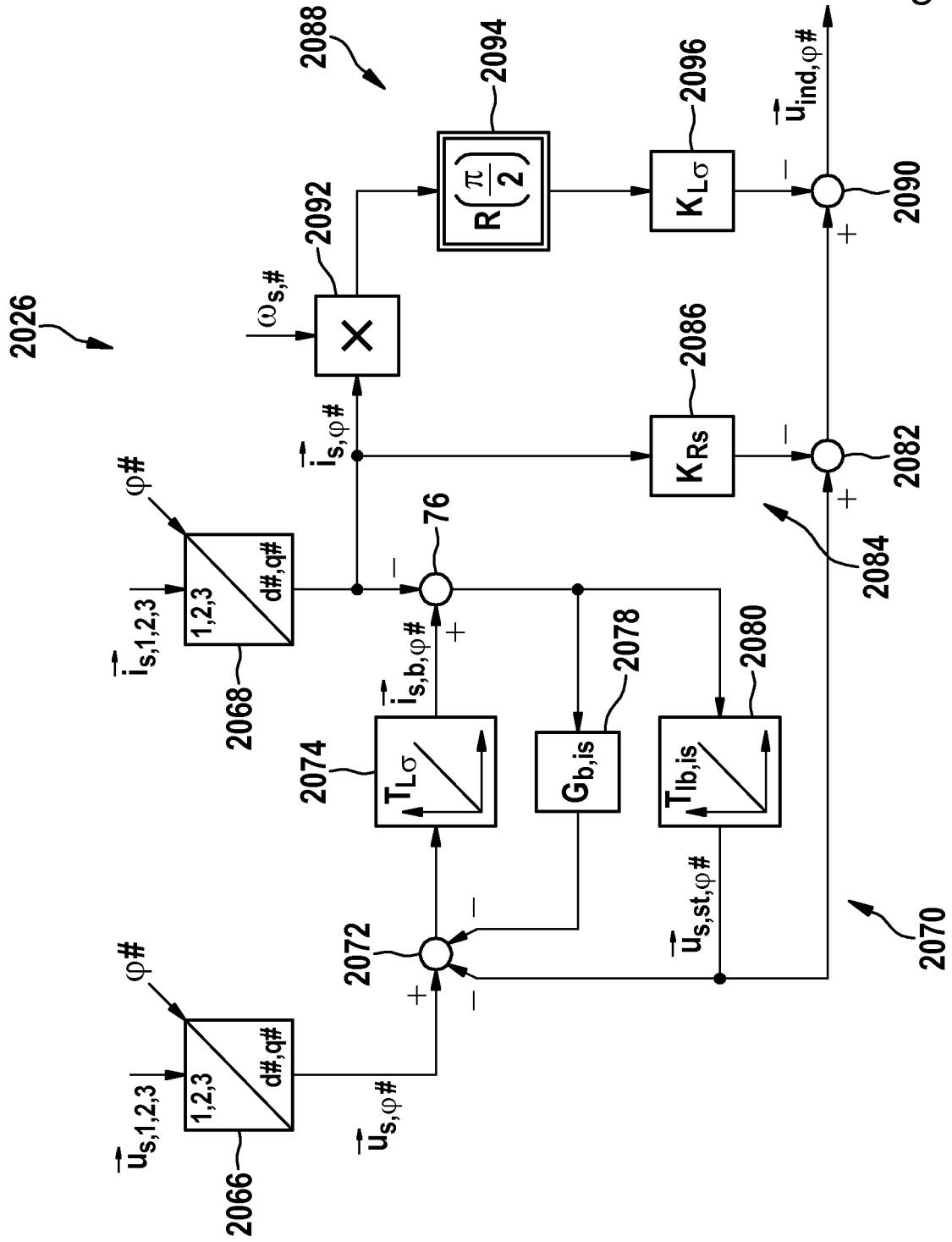
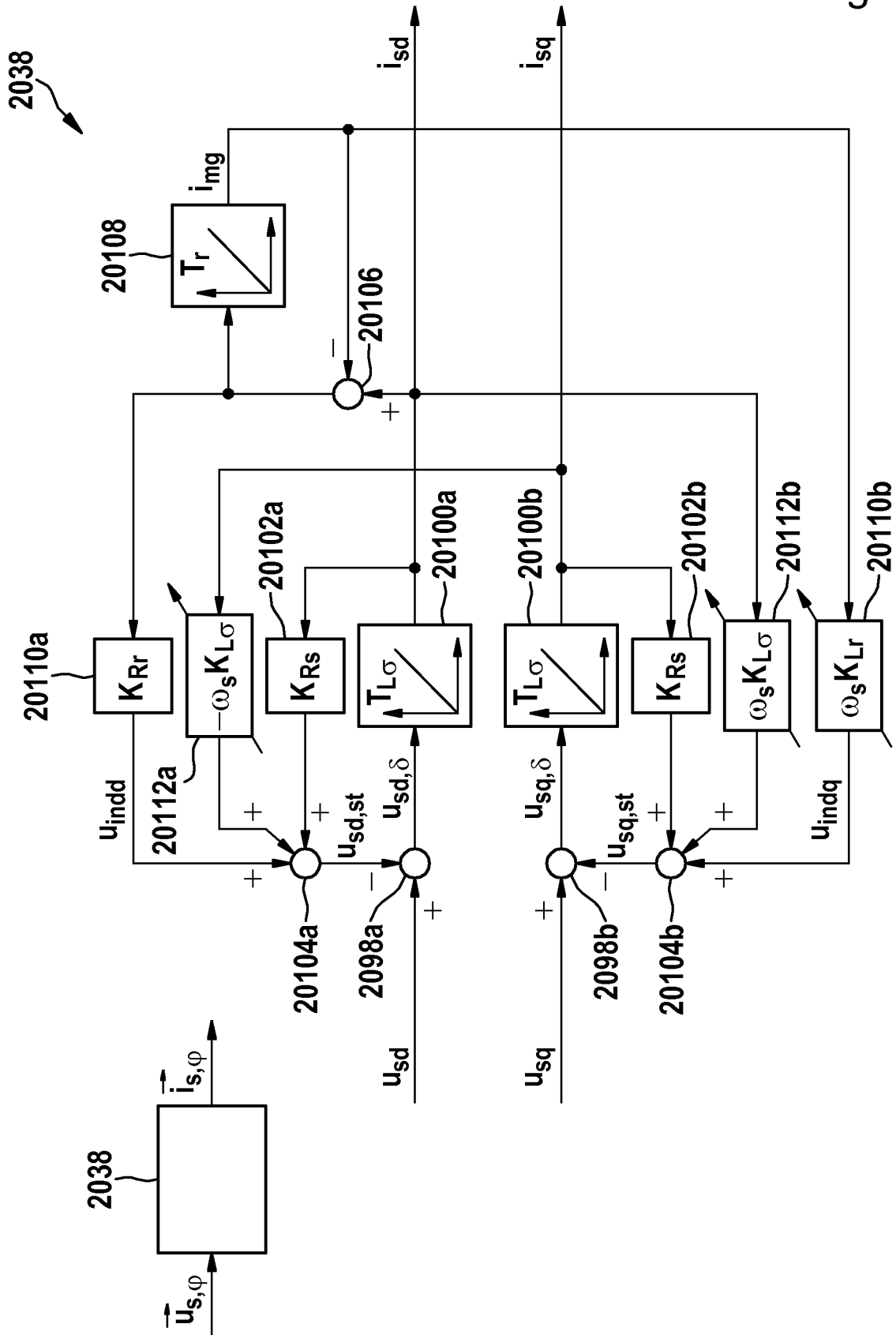


Fig. 6

Fig. 7



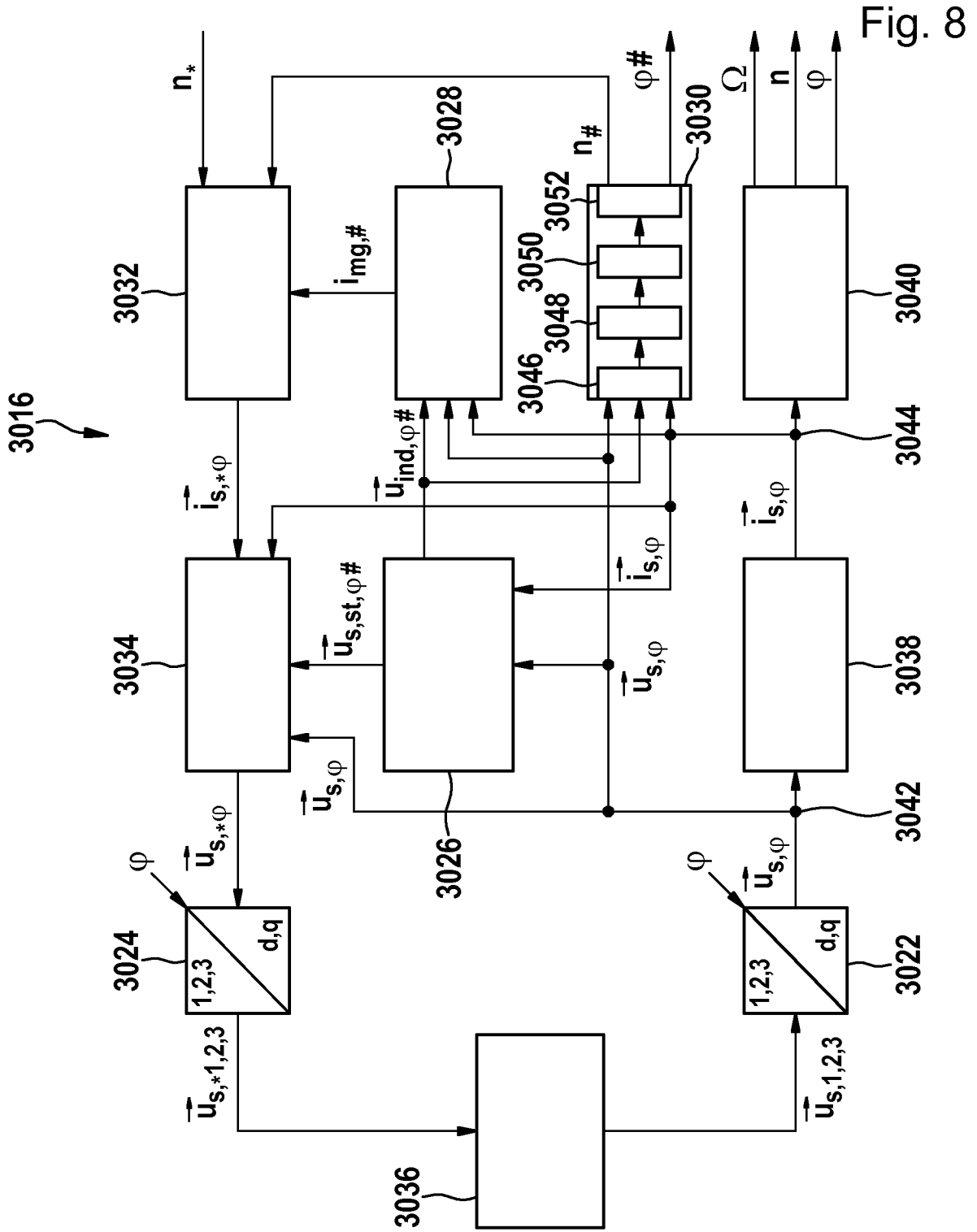


Fig. 8

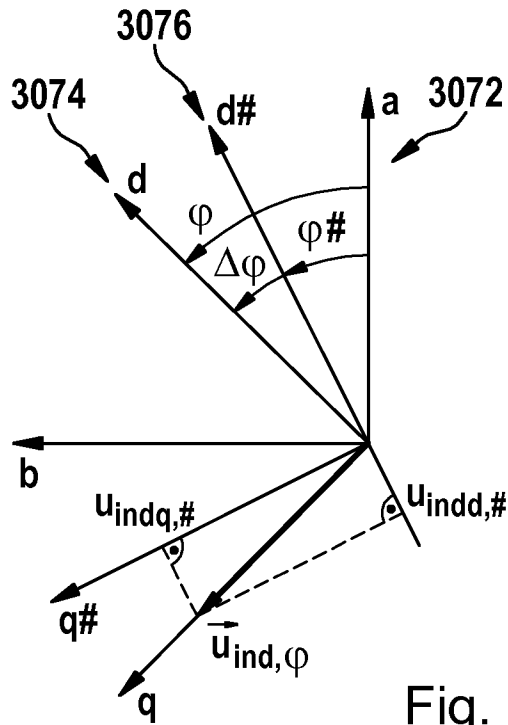


Fig. 9

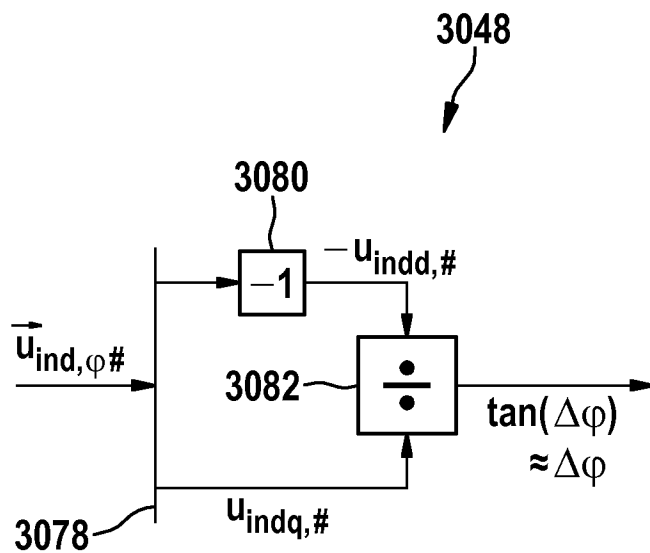


Fig. 10

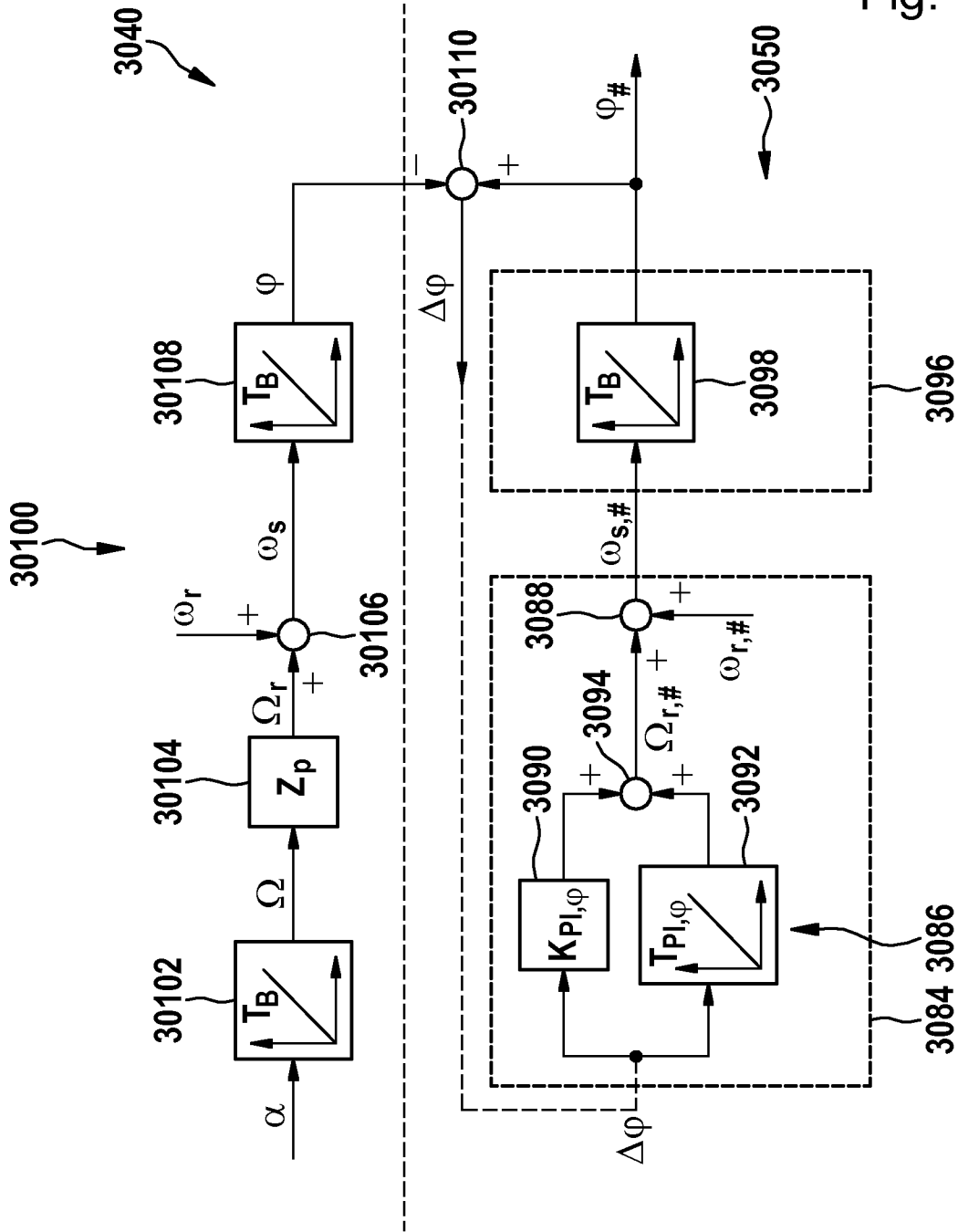


Fig. 11

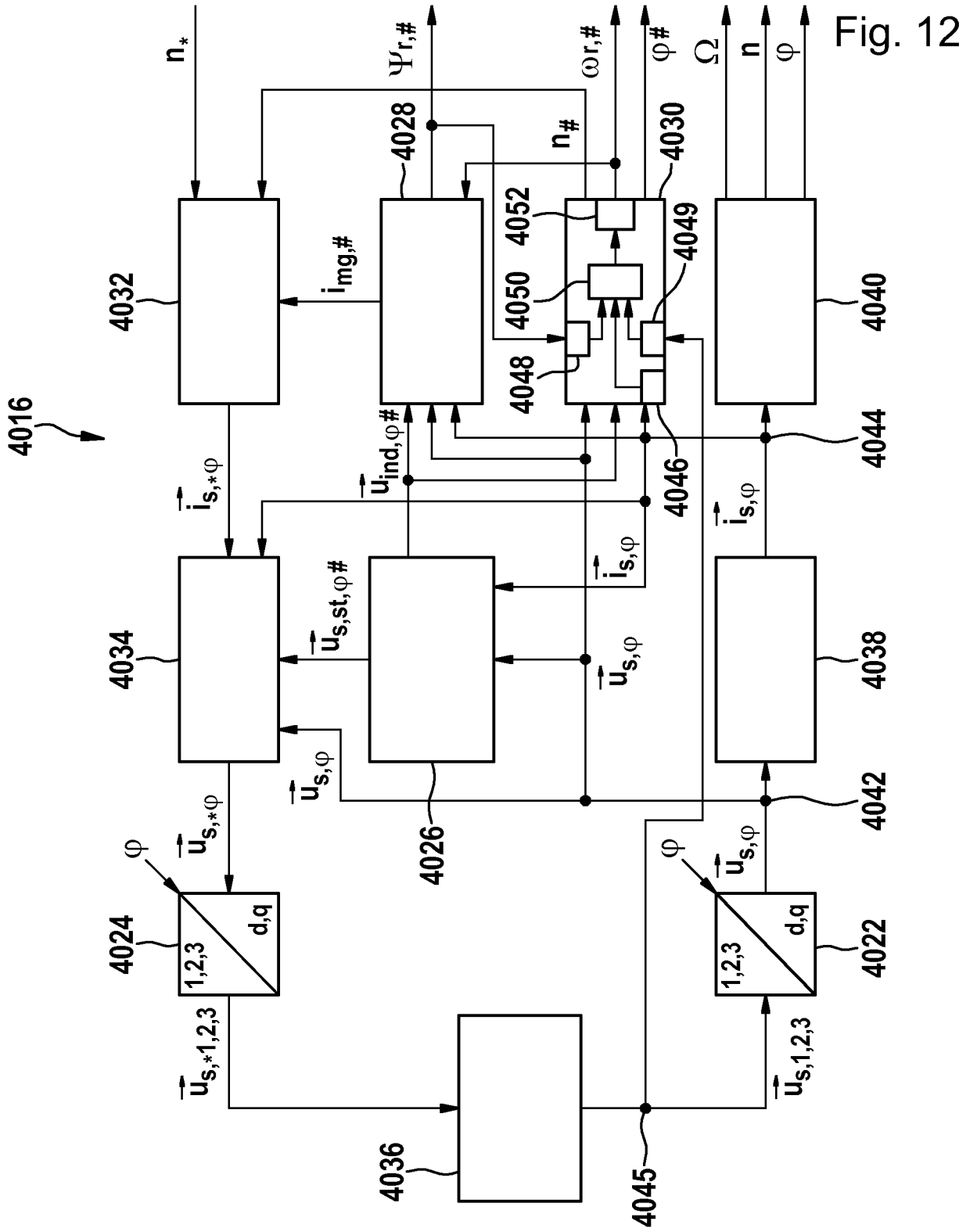


Fig. 12



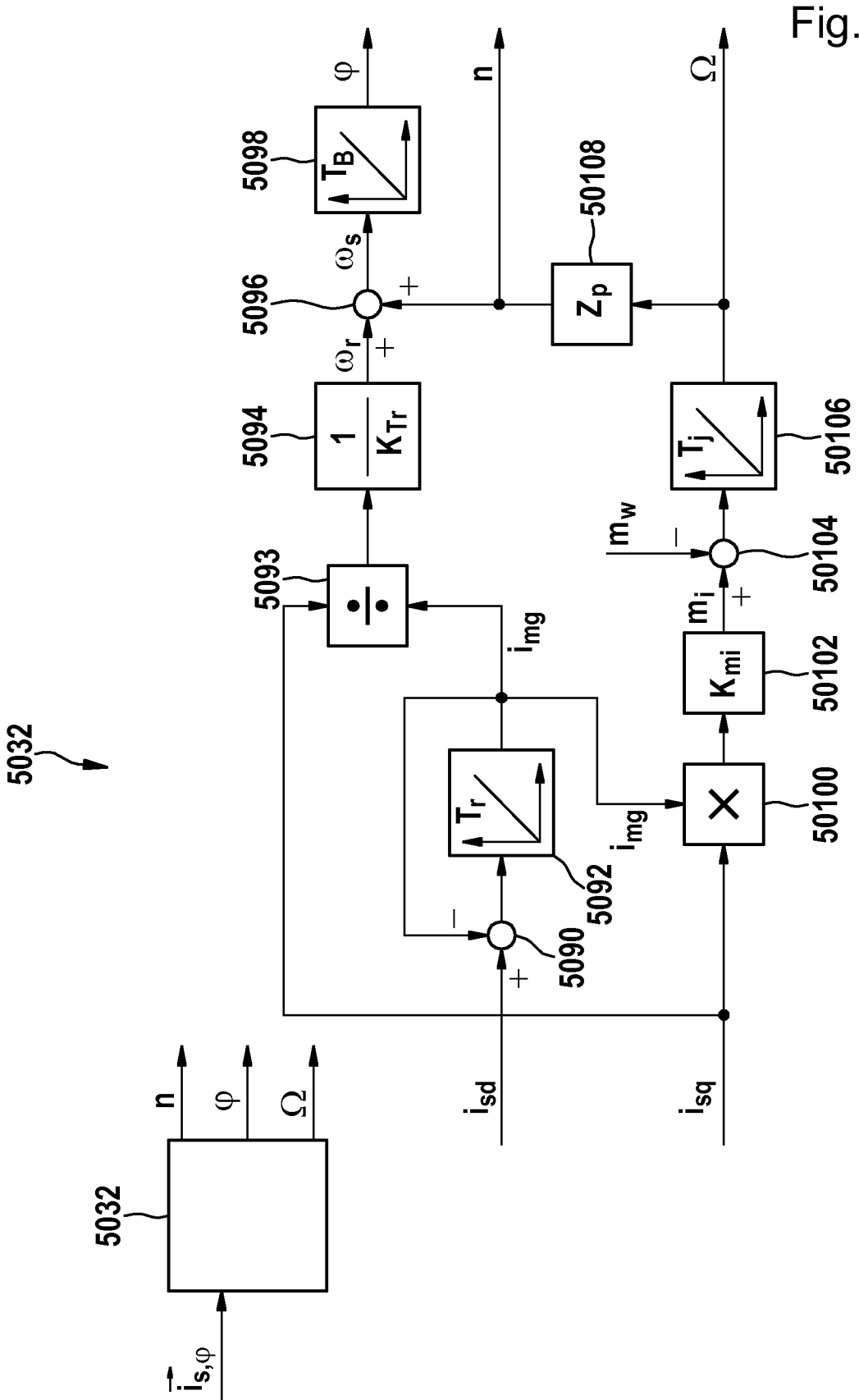


Fig. 14

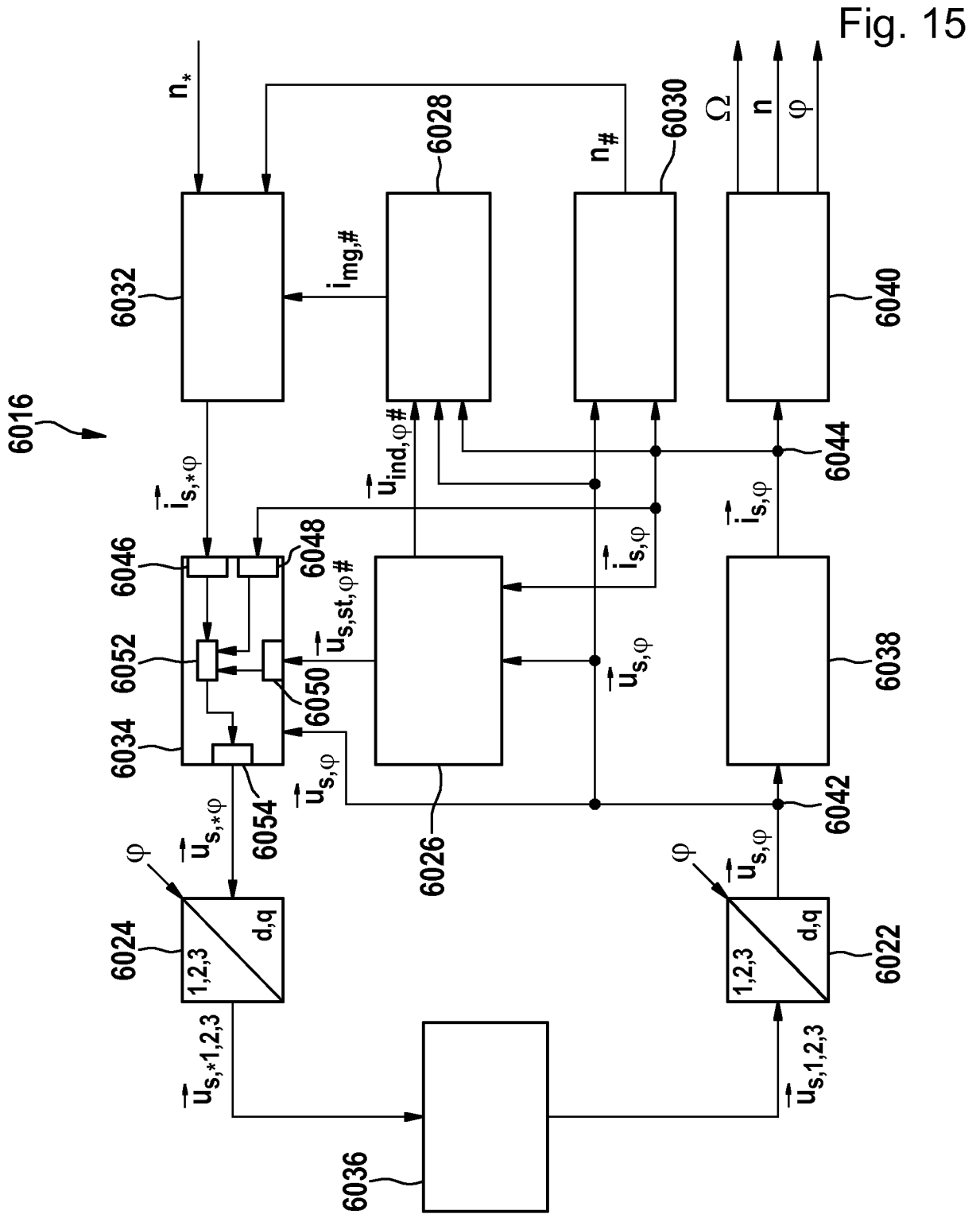
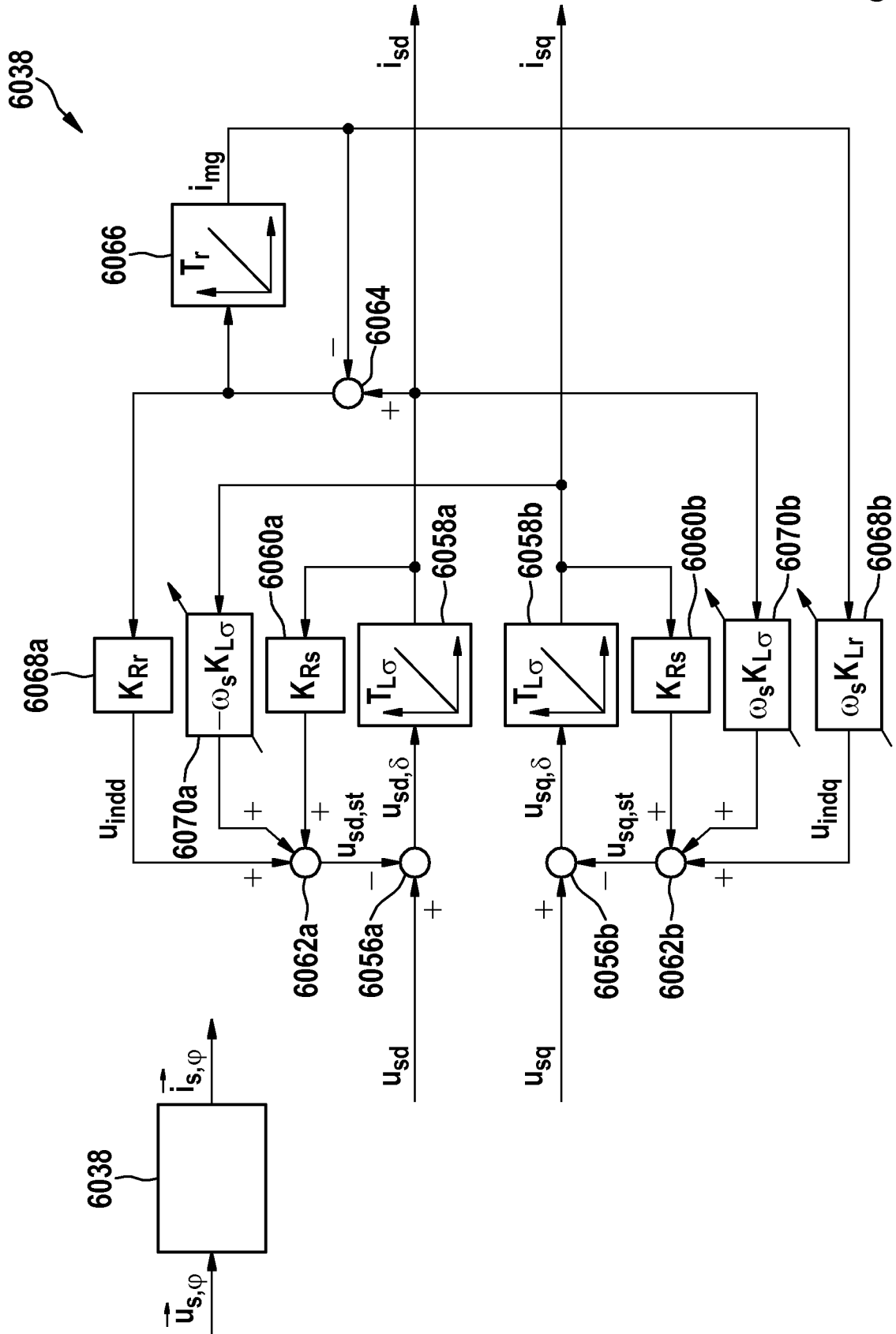


Fig. 16



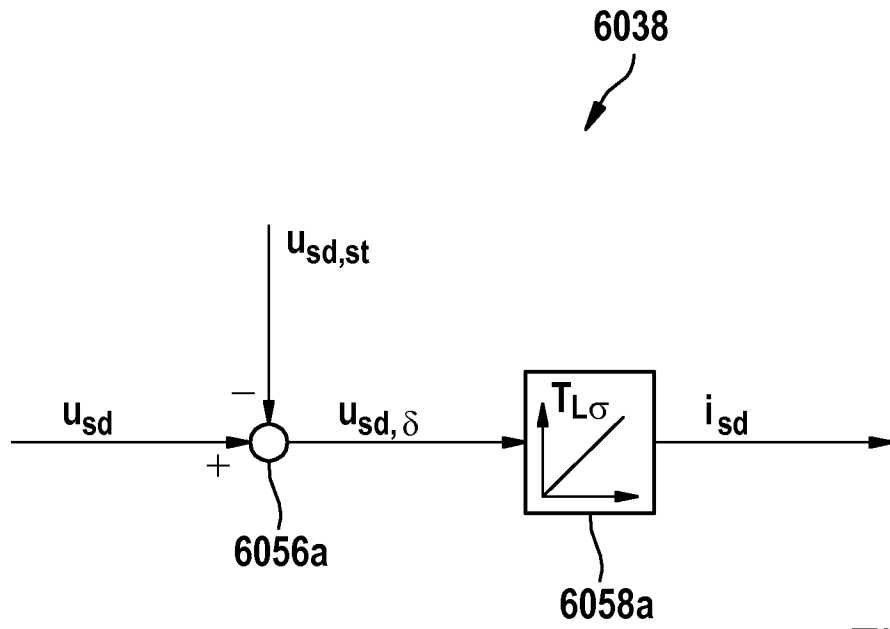


Fig. 17

