

(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. September 2012 (27.09.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer

WO 2012/126029 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/AT2012/000072
- (22) Internationales Anmeldedatum:
21. März 2012 (21.03.2012)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
A 397/2011 21. März 2011 (21.03.2011) AT
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): KRISTL, SEIBT & CO. GESELLSCHAFT M.B.H. [AT/AT]; Baiernstr. 122a, A-8052 Graz (AT).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): BAUER, Robert [AT/AT]; Murfelderstraße 71, A-8041 Graz (AT). BUCH, Norbert [AT/AT]; Am Anger 7/W8, A-8054 Seiersberg (AT). SCHLICHTNER, Bernhard [AT/AT]; Blaikenweg 32, A-6353 Going (AT). SOMMER, Wolfgang [AT/AT]; Gartenweg 21, A-8410 Wildon (AT).
- (74) Anwalt: SONN & PARTNER Patentanwälte; Riemergasse 14, A-1010 Wien (AT).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY,

BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

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

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

Veröffentlicht:

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

(54) Title: METHOD AND APPARATUS FOR CORRECTING PHASE CURRENTS OF A THREE-PHASE MACHINE

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR KORREKTUR VON STRANGSTRÖMEN EINER DREHSTROMMASCHINE

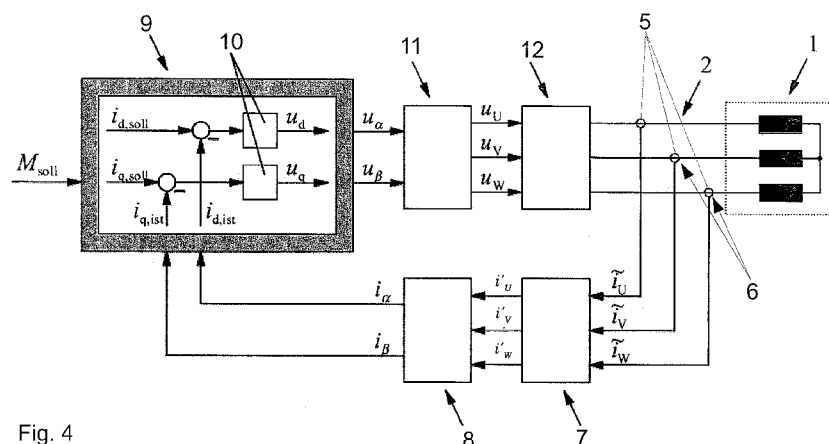


Fig. 4

(57) Abstract: Method and apparatus for correcting phase currents (i_u , i_v , i_w) of a three-phase machine (1), wherein measurement values of the phase currents ($\tilde{i}$, $\tilde{i}$, $\tilde{i}$), which measurement values are affected by gain errors and/or by offset errors, are detected and are used to control the phase currents (i_u , i_v , i_w), characterized in that, during operation of the three-phase machine (1), correction parameters (α ; α_u , α_v , α_w , β_u , β_v , β_w) for correcting the gain errors or offset errors are calculated from the measurement values of the phase currents ($\tilde{i}$, $\tilde{i}$, $\tilde{i}$), wherein corrected phase currents (i'_u , i'_v , i'_w) are determined using the correction parameters (α ; α_u , α_v , α_w , β_u , β_v , β_w) and said corrected phase currents are passed on to the control system for the phase currents (i_u , i_v , i_w).

(57) Zusammenfassung: Verfahren und Vorrichtung zur Korrektur

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



von Strangströmen (i_U, i_V, i_W) einer Drehstrommaschine (1), wobei mit Verstärkungs- und/oder mit Offsetfehlern behaftete Messwerte der Strangströme ($\tilde{i}_U, \tilde{i}_V, \tilde{i}_W$) erfasst werden, die zur Regelung der Strangströme (i_U, i_V, i_W) herangezogen werden, dadurch gekennzeichnet, dass im Betrieb der Drehstrommaschine (1) aus den Messwerten der Strangströme ($\tilde{i}_U, \tilde{i}_V, \tilde{i}_W$) Korrekturparameter ($\alpha; \alpha_U, \alpha_V, \alpha_W, \beta_U, \beta_V, \beta_W$) zur Korrektur der Verstärkungs- bzw. Offsetfehler berechnet werden, wobei mit den Korrekturparametern ($\alpha; \alpha_U, \alpha_V, \alpha_W, \beta_U, \beta_V, \beta_W$) korrigierte Strangströme (i'_U, i'_V, i'_W) bestimmt werden, die an die Regelung der Strangströme (i_U, i_V, i_W) übergeben werden.

Verfahren und Vorrichtung zur Korrektur von Strangströmen einer
Drehstrommaschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Korrektur von Strangströmen einer Drehstrommaschine, wobei mit Verstärkungs- und/oder mit Offsetfehlern behaftete Messwerte der Strangströme erfasst werden, die zur Regelung der Strangströme herangezogen werden, sowie eine Vorrichtung zur Korrektur von Strangströmen einer Drehstrommaschine, mit einer Messeinrichtung zum Messen von mit Verstärkungs- und/oder mit Offsetfehlern behafteten Strangströmen einer Drehstrommaschine, und mit einer mit der Messeinrichtung verbundenen Regeleinrichtung zur Regelung der Strangströme.

Drehstrommaschinen, welche als Asynchron- oder Synchronmaschinen ausgeführt sein können, werden mit Dreiphasenwechselstrom bzw. Drehstrom betrieben, welcher in drei getrennten Leitern jeweils einen eigenen Wechselstrom führt. Die Wechselströme in den Leitern sind zueinander um 120° in der Phase versetzt. Die Drehstrommaschine weist drei Anschlüsse bzw. Stränge auf, an die der Drehstrom angelegt wird. Um die Drehzahl (bzw. das Drehmoment) der Drehstrommaschine im Betrieb regeln zu können, wird die Drehstrommaschine üblicherweise von einem Frequenzumrichter gespeist. Der Frequenzumrichter weist einen Wechselrichter auf, der die Strangspannungen bzw. -ströme aus einer konstanten Zwischenkreisspannung erzeugt, die durch Gleichrichtung aus einem öffentlichen Drehstromnetz gewonnen werden kann. Der Wechselrichter arbeitet mit Leistungsschaltern, die über einen entsprechenden Algorithmus, beispielsweise eine feldorientierte Regelung (FOC, "field oriented control"), derart angesteuert werden, dass an den Strängen der Drehstrommaschine die gewünschten Strangströme auftreten. Zur Regelung der Drehstrommaschine werden laufend Messwerte der Strangströme erfasst, die an die Regelung übergeben werden. Die Messwerte der Strangströme sind zwangsläufig mit Verstärkungs- und/oder Offsetfehlern behaftet, so dass die an die Regelung der Strangströme überlieferten Messwerte von den realen Strangströmen abweichen können. Die Verstärkungsfehler stellen dabei einen zum Strom proportionalen Fehleranteil dar. Die Offsetfehler (auch als Nullpunktfehler bezeichnet) bewirken eine Verschiebung zwischen den realen

Strangströmen und den gemessenen Strangströmen. Die fehlerhafte Strommessung wirkt sich insbesondere durch einen im Betrieb der Drehstrommaschine unerwünschten Drehmomentrippel, d.h. eine Welligkeit im Verlauf des Drehmoments, aus. Ein reiner Verstärkungsfehler bewirkt dabei einen Drehmomentrippel mit doppelter Drehstrom-Frequenz. Ein reiner Offsetfehler ruft einen Drehmomentrippel mit einfacher Drehstrom-Frequenz hervor. Wenn die Messwerte der Strangströme sowohl Verstärkungs- als auch Offsetfehler aufweisen, wird ein Drehmomentrippel mit zwei Spektralannteilen, nämlich mit einfacher und doppelter Drehstrom-Frequenz, erhalten.

Aus der US 2009/0189553 A1 ist ein Verfahren zur Regelung einer Drehstrommaschine bei Hybridfahrzeugen bekannt. Die Maschine wird mit einer Regeleinheit angesteuert, welche einen Schaltkreis zur Regelung der Verstärkungsfaktoren der Strangströme aufweist. Die Strangströme werden mittels Sensoren gemessen, woraus Verstärkungs-Korrekturfaktoren für die Strangströme gebildet werden. Zur Bestimmung des Verstärkungs-Korrekturfaktors für den ersten Sensor werden die Messgrößen des ersten und dritten Sensors herangezogen. Der Verstärkungs-Korrekturfaktor für den zweiten Sensor wird aus den Messgrößen für den zweiten bzw. dritten Strangstrom-Sensor bestimmt. Hierbei wird eine Abweichung zwischen dem Mittelwert der gemessenen Stromamplitude in den jeweiligen Strängen und einer vorgegebenen Amplitude als Regelgröße herangezogen. Demnach ist es aus diesem Stand der Technik bekannt, reine Verstärkungsfehler der Strangstrom-Sensoren in Echtzeit unter wechselnden Bedingungen zu reduzieren. Das bekannte Korrekturverfahren weist jedoch eine Reihe von Einschränkungen auf. Nachteiligerweise ist bei diesem Verfahren einerseits ein weiterer, hochgenauer und daher kostspieliger Stromsensor für den dritten Strangstrom zwingend erforderlich. Weiters muss die elektrische Kreisfrequenz in einem bestimmten Bereich liegen und die Drehstrommaschine muss über weite Strecken stationär betrieben werden, da ansonsten die notwendige Filterung der Zwischengrößen, d.h. der Amplituden der entsprechenden Strangströme, nicht durchgeführt werden kann. Wird die Drehstrommaschine hochdynamisch betrieben, können die Korrekturwerte nicht im Normalbetrieb bestimmt werden. Demnach ist das Einsatzgebiet des bekannten Verfahrens nachteiligerweise stark

eingeschränkt. Zudem werden bei dem bekannten Verfahren ausschließlich Verstärkungsfehler der Messsensoren berücksichtigt. Somit ist der Stand der Technik nicht dazu in der Lage, eine dynamische, komplexe Fehlerstruktur in der Messung der Strangströme auszugleichen.

In der JP 2009/303283 A ist weiters ein Verfahren zur Steuerung eines Drehstrommotors beschrieben, bei welchem bei Überschreitung einer maximalen Stromdifferenz das Vorhandensein eines Offsetfehlers erkannt wird. Nachteiligerweise können jedoch vorhandene Verstärkungsfehler das Verfahren massiv beeinflussen. Somit ist auch dieses Verfahren nicht dazu geeignet, die bei hochdynamischen Prozessen auftretenden Fehler zuverlässig zu kompensieren.

Im Stand der Technik ist es weiters bekannt, vor dem eigentlichen Betrieb der Drehstrommaschine Verstärkungsfaktoren und Offsetwerte der verwendeten Messfühler experimentell zu bestimmen, um daraus resultierende Verstärkungs- bzw. Offsetfehler zu verhindern. Die Verstärkungsfaktoren und Offsetwerte der Messfühler können sich jedoch im laufenden Betrieb der Drehstrommaschine ändern, so dass eine einmalige Kalibrierung der Messfühler - vor Inbetriebnahme der Drehstrommaschine - in den wenigsten Fällen zielführend ist.

In der US 2008/265829 A1 ist eine Umrichteranordnung zur Ansteuerung eines Dreiphasen-Motors offenbart, welche eine Strangstrom-Korrektureinheit aufweist, um Fehler zwischen den gemessenen Strangströmen auszugleichen. Die gemessenen Strangströme werden an die Korrektureinheit übergeben, welche korrigierte Strangströme bildet, aus welchen die Strangspannungen gebildet werden. Hierbei werden die Verstärkungsfehler bei der Strommessung vor dem eigentlichen Betrieb durch eine Identifikationsprozedur mit speziellen Schalterstellungen im Frequenzumrichter ermittelt. Im Normalbetrieb werden die gefundenen - konstanten - Korrekturwerte zur Korrektur der Verstärkungsfehler eingesetzt. Demnach kann bei diesem Stand der Technik nachteiligerweise keine Anpassung der Korrekturwerte im Normalbetrieb erfolgen. Somit können die Änderungen der Messfehler im Betrieb nicht berücksichtigt werden.

In der JP 2005/318739 A ist ein ähnliches Verfahren wie in der US 2008/265829 A1 beschrieben, welches die gleichen Nachteile bzw. Einschränkungen aufweist.

Im Stand der Technik sind zudem verschiedenste Parameter-Schätzverfahren bekannt, um die sich im laufenden Betrieb ändernden Parameter von Drehfeldmaschinen abzuschätzen. Hierfür wurde jedoch bislang von identischen Strangströmen an den einzelnen Strängen der Drehstrommaschine ausgegangen, indem Abweichungen zwischen den Messwerten der einzelnen Strangströme vernachlässigt werden. Ein Beispiel dafür ist die DE 41 107 16 A1, welche sich mit der Modifikation einer Rotarzeitkonstante einer Asynchronmaschine beschäftigt. Hierfür werden u.a. Statorspannung und Statorstrom als Eingangsgrößen für ein Parameter-Schätzverfahren herangezogen. Das Parameter-Schätzverfahren, welches die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet, geht von einem identischen Statorwiderstand für die drei Stränge der Asynchronmaschine aus, so dass prinzipbedingt Messfehler in den einzelnen Strängen nicht berücksichtigt werden können.

Demgegenüber besteht die Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung, wie oben angegeben, zu schaffen, mit welchem bzw. mit welcher die nachteiligen Auswirkungen einer fehlerbehafteten Messung der Strangströme auf die Regelung der Drehstrommaschine reduziert werden können; hierdurch soll insbesondere das Auftreten von Drehmomentrippeln im Betrieb der Drehstrommaschine verringert bzw. vermieden werden.

Diese Aufgabe wird beim Verfahren der eingangs angeführten Art dadurch gelöst, dass im Betrieb der Drehstrommaschine aus den Messwerten der Strangströme Korrekturparameter zur Korrektur der Verstärkungs- bzw. Offsetfehler berechnet werden, wobei mit den Korrekturparametern korrigierte Strangströme bestimmt werden, die an die Regelung der Strangströme übergeben werden.

Demnach werden im laufenden Betrieb der Drehstrommaschine erfasste Messwerte der Strangströme dazu verwendet, Korrekturparameter für die Strangströme zu bestimmen. Die Korrekturparameter werden mit den fehlerbehafteten Messwerten der Strangströme zu

korrigierten Strangströmen verknüpft, welche an die Regelung der Strangströme übergeben werden. Da auf Basis der Korrekturparameter korrigierte Strangströme gebildet werden, die der Regelung der Strangströme zugrundegelegt werden, können die negativen Auswirkungen von Messfehlern weitestgehend behoben werden. Die Korrektur der gemessenen Strangströme birgt insbesondere den Vorteil, dass das von der Drehstrommaschine bereitgestellte Drehmoment eine geringere Welligkeit aufweist, indem Drehmomentrippel reduziert oder gänzlich vermieden werden. Zur Korrektur der Verstärkungs- bzw. Offsetfehler ist insbesondere vorgesehen, dass für jeden Strangstrom ein eigener Korrekturparameter bestimmt wird, um die korrigierten Strangströme zu erhalten. Hierfür werden die Strangströme vorzugsweise an jedem Strang der Drehstrommaschine einzeln gemessen. Demnach können Abweichungen zwischen den einzelnen Strangströmen gezielt durch die zugehörigen Korrekturparameter berücksichtigt werden. Zudem können vorteilhafterweise auch solche Messfehler korrigiert werden, die erst im Betrieb der Drehstrommaschine auftreten oder sich im laufenden Betrieb der Drehstrommaschine verändern, so dass eine vorangehende Kalibrierung der Strommessung nicht ausreichend wäre. Wie eingangs erwähnt, können die Messfehler in der Messung der Strangströme Verstärkungs- und/oder Offset-Anteile aufweisen. Im Fall eines reinen Verstärkungsfehlers werden zweckmäßigerweise drei Korrekturparameter (je ein Korrekturparameter pro Strangstrom) bestimmt, wobei vorzugsweise ein Korrekturparameter durch Anwendung der Kirchhoff'schen Knotenregel vorgegeben wird; die Anzahl der Korrekturparameter erhöht sich bei Auftreten von Offsetfehlern entsprechend.

Da die Messfehler der Strangströme im Betrieb der Drehstrommaschine typischerweise ständigen Veränderungen unterliegen, ist es günstig, wenn zur laufenden Anpassung der Korrekturparameter im Betrieb der Drehstrommaschine eine zeitliche Abfolge von Messwerten der Strangströme verarbeitet wird. Demnach werden die Strangströme laufend überwacht, um aus den Messwerten der Strangströme die einzelnen Korrekturparameter zu bilden, welche zur Berechnung korrigierter Strangströme für die Regelung der Drehstrommaschine genutzt werden.

Damit die Strangströme sensibel und rasch an Veränderungen in

den Messwerten der Strangströme angepasst werden können, ist es von Vorteil, wenn für die Berechnung der Korrekturparameter eine zeitliche Gewichtung der Messwerte der Strangströme vorgenommen wird, wobei aktuelle Messwerte der Strangströme stärker als frühere Messwerte der Strangströme gewichtet werden. Die Korrekturparameter werden laufend, zweckmäßigerweise nach jeder Messung der Strangströme, angepasst, wobei vorzugsweise den jüngsten Messwerten das höchste Gewicht beigemessen wird.

Zur effizienten Berechnung der Korrekturparameter ist es günstig, wenn die Korrekturparameter mittels eines rekursiven Algorithmus berechnet werden. Demnach werden die aktuellen Korrekturparameter bevorzugt dadurch bestimmt, dass die aktuellen Messwerte der Strangströme mit den in vorangehenden Zeitschritten berechneten Korrekturparametern verknüpft werden. Jeder Zeitschritt entspricht dabei vorzugsweise einer Messung der Strangströme zu einem bestimmten Zeitpunkt. Hierdurch kann die Berechnung der Korrekturparameter erheblich vereinfacht werden, da auf die Ergebnisse früherer Berechnungen zurückgegriffen werden kann. Zudem kann eine Reduktion der Rechenzeit erreicht werden. Eine bevorzugte Implementierung des rekursiven Algorithmus sieht vor, dass ausschließlich die Korrekturparameter des vorangehenden Schrittes zur Berechnung der aktuellen Korrekturparameter herangezogen werden.

Damit der rekursive Algorithmus Veränderungen in den gemessenen Strangströmen präzise und zeitnah abbilden kann, ist es von Vorteil, wenn als rekursiver Algorithmus eine Methode der kleinsten Fehlerquadrante, vorzugsweise mit einem Vergessensfaktor zur zeitlichen Gewichtung der Messwerte der Strangströme, verwendet wird. In der Praxis hat sich insbesondere der Algorithmus auf Basis kleinster Fehlerquadrante mit Vergessensfaktor als vorteilhaft herausgestellt. Der Vergessensfaktor, welcher dem Algorithmus als Eingangsgröße übergeben wird, ist ein Maß dafür, wie lange bestimmte Messwerte der Strangströme in der Berechnung der Korrekturparameter berücksichtigt werden.

Zur Regelung der Drehstrommaschine, insbesondere im Hinblick auf ein vorgegebenes Drehmoment, ist es günstig, wenn die korrigierten Strangströme an eine feldorientierte Regelung der

Strangströme übergeben werden. Die feldorientierte Regelung erhält die korrigierten Strangströme als Eingangsgröße. In der feldorientierten Regelung werden die korrigierten Strangströme in das Rotorfluss-Koordinatensystem (d-q-Koordinatensystem) umgerechnet, welches den Vorteil aufweist, dass die Strangströme im stationären Zustand der Drehstrommaschine bezogen auf die Rotorfluss-Koordinaten konstant - und somit leicht regelbar - sind. Die korrigierten Strangströme werden vor Übermittlung an die Regelung zweckmäßigerweise in Stromraumzeiger-Koordinaten (α - β -System) umgewandelt.

Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe wird weiters durch eine Vorrichtung der eingangs angeführten Art gelöst, bei welcher die Messeinrichtung mit einer Recheneinheit verbunden ist, welche dazu eingerichtet ist, im Betrieb der Drehstrommaschine aus den Messwerten der Strangströme Korrekturparameter zur Korrektur der Verstärkungs- bzw. Offsetfehler zu berechnen, wobei die Recheneinheit zur Übertragung korrigierter Strangströme mit der Regeleinrichtung verbunden ist. Die hiermit erzielbaren Vorteile bzw. Effekte wurden im Zusammenhang mit dem zugehörigen Verfahren beschrieben, so dass auf die vorstehenden Ausführungen verwiesen werden kann.

Zur Erfassung der einzelnen Strangströme ist es günstig, wenn die Messeinrichtung jeweils einem Strang der Drehstrommaschine zugeordnete Stromsensoren, insbesondere Kompensationsstromwandler, zum Messen der zugehörigen Strangströme aufweist. Die Recheneinheit weist im Betrieb jedem Strangstrom einen eigenen Korrekturparameter zu; die Korrekturparameter werden zweckmäßigerweise nach jeder Messung der Strangströme angepasst.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispielen, auf die sie jedoch nicht beschränkt sein soll, noch weiter erläutert.

Im Einzelnen zeigen in der Zeichnung:

Fig. 1 eine schematische Ansicht einer umrichter gespeisten Drehstrommaschine, deren Strangströme gemessen werden;

Fig. 2a schematisch die Strangströme als Funktion der Zeit;

Fig. 2b schematisch die Strangströme nach Transformation in Stromraumzeiger-Koordinaten (α - β -Koordinaten);

Fig. 3a schematisch den Stromraumzeiger gemäß Fig. 2b, welcher durch einen Verstärkungsfehler in der Messung der Strangströme verzerrt ist;

Fig. 3b schematisch den Stromraumzeiger gemäß Fig. 2b, welcher durch einen Offsetfehler in der Strommessung aus dem Ursprung verschoben ist; und

Fig. 4 ein erfindungsgemäßes Regelschema zur Korrektur der mit Verstärkungsfehlern nach Fig. 3a bzw. mit Offsetfehlern nach Fig. 3b behafteten Messwerte der Strangströme, wobei aus den Messwerten der Strangströme in einer Recheneinheit Korrekturparameter bestimmt werden, welche zur Berechnung korrigierter Strangströme für die Regelung der Strangströme herangezogen werden.

Fig. 1 zeigt schematisch die Anbindung einer Drehstrommaschine 1 an einen Frequenzumrichter 2. Die Drehstrommaschine 1 kann als Asynchron- oder Synchronmaschine ausgeführt sein, welche je nach Betriebsweise als Motor oder Generator arbeitet. Der Frequenzumrichter 2 weist einen Wechselrichter 3 auf, welcher an den insgesamt drei Strängen 4 der Drehstrommaschine 1 Strangsströme i_U , i_V , i_W anlegt. Der Wechselrichter 3 erzeugt die Strangsströme i_U , i_V , i_W aus einer konstanten Zwischenkreisspannung u_{ZK} , die beispielsweise durch Gleichrichtung aus einem öffentlichen Drehstromnetz (nicht gezeigt) gewonnen wird. Um die Drehstrommaschine 1 mit den Strangströmen i_U , i_V , i_W zu versorgen, weist der Wechselrichter 3 Leistungsschalter 3' auf, die über einen entsprechenden Algorithmus, beispielsweise eine feldorientierte Regelung (FOC, "field oriented control") derart angesteuert werden, dass auf den Strängen 4 der Drehstrommaschine 1 die gewünschten Strangströme i_U , i_V , i_W erzielt werden. Als Leistungsschalter können insbesondere Thyristoren, Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET), Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT), oder dergl. eingesetzt

werden. Die Strangströme i_U , i_V , i_W fließen durch die an der Drehstrommaschine 1 anliegenden Stränge.

In Fig. 1 sind weiters schematisch Stromsensoren 5 einer Messeinrichtung 6 zum Messen der Strangströme i_U , i_V , i_W eingezeichnet. Die Messwerte der Strangströme $\tilde{i}_U$, $\tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ werden zur Regelung der Strangströme i_U , i_V , i_W hinsichtlich eines vorgegebenen Sollwerts, insbesondere für das Drehmoment der Drehstrommaschine 1 (vgl. Fig. 4), herangezogen. Aufgrund der Kirchhoff'schen Knotenregel gemäß Gleichung (1) ist die Summe der Strangströme i_U , i_V , i_W gleich Null.

$$i_U + i_V + i_W = 0 \quad (1)$$

Demnach könnte ein Strangstrom i_W aus den Messwerten der beiden anderen Strangströme i_U , i_V berechnet werden. In der Praxis ist es jedoch zweckmäßig, wenn alle drei Strangströme i_U , i_V , i_W gemessen werden.

Wie aus Fig. 2 ersichtlich, können die Strangströme i_U , i_V , i_W mit einem in der Literatur zu Drehstrommaschinen 1 üblichen Stromraumzeiger $\vec{i}$ dargestellt werden, welcher Komponenten i_α und i_β aufweist, die gemäß Gleichung (2) bzw. Gleichung (3) aus den Strangströmen i_U , i_V und i_W berechnet werden können.

$$i_\alpha = \frac{2}{3}i_U - \frac{1}{3}i_V - \frac{1}{3}i_W \quad (2)$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}i_V - \frac{\sqrt{3}}{3}i_W \quad (3)$$

Im stationären Zustand der Drehstrommaschine 1 mit konstanter Drehzahl und konstantem Drehmoment sind die sinusförmigen Strangströme i_U , i_V , i_W um 120° zueinander in der Phase versetzt, während der Stromraumzeiger $\vec{i}$ mit konstanter Länge in Pfeilrichtung gleichförmig rotiert. Die Spitze des Stromraumzeigers $\vec{i}$ beschreibt dabei einen Kreis mit dem Ursprung des Koordinatensystems als Mittelpunkt. Somit kann die Darstellung des stationären Zustands der Drehstrommaschine 1 mit Hilfe des Stromraumzeigers $\vec{i}$ wesentlich vereinfacht werden.

Die gemessenen Strangströme $\tilde{i}_U$, $\tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ können die realen

Strangströme i_U , i_V , i_W nicht exakt abbilden, da die Messung der Strangströme i_U , i_V , i_W mit Fehlern behaftet ist. Diese Fehler können für die einzelnen Strangströme i_U , i_V , i_W verschieden sein; zudem können sich die Fehler während des Betriebs der Drehstrommaschine 1 ändern. Die Messwerte der Strangströme $\tilde{i}_U$, $\tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ hängen gemäß den Gleichungen (4), (5) und (6) über Verstärkungsfaktoren k_U , k_V , k_W und Offsetwerte d_U , d_V , d_W mit den wahren Strangströmen i_U , i_V und i_W zusammen.

$$\tilde{i}_U = k_U i_U + d_U \quad (4)$$

$$\tilde{i}_V = k_V i_V + d_V \quad (5)$$

$$\tilde{i}_W = k_W i_W + d_W \quad (6)$$

Die Verstärkungsfaktoren k_U , k_V , k_W bewirken zu den Strangströmen i_U , i_V und i_W proportionale Verstärkungsfehler. Die Offsetwerte d_U , d_V , d_W rufen von den Strangströmen i_U , i_V und i_W unabhängige Offsetfehler hervor.

Wie aus Fig. 3a ersichtlich, bewirkt ein reiner Verstärkungsfehler in den gemessenen Strangströmen $\tilde{i}_U$, $\tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ eine Verformung der durch den Stromraumzeiger $\vec{i}$ beschriebenen Bahn in eine Ellipse, so dass pro Umdrehung des Stromraumzeigers $\vec{i}$ zwei Maxima und zwei Minima auftreten. Die Auswirkung eines solchen Verstärkungsfehlers sind in Fig. 3a übertrieben dargestellt.

Aus Fig. 3b ist ein Stromraumzeiger $\vec{i}$ ohne Verstärkungs-, aber mit einem Offsetfehler ersichtlich. Der Offsetfehler bewirkt eine Verschiebung des kreisförmig umlaufenden Stromraumzeigers $\vec{i}$ aus dem Ursprung des Koordinatensystems. Dies hat zur Folge, dass der Betrag des Stromraumzeigers $\vec{i}$ pro Umdrehung ein Maximum und ein Minimum aufweist. Im Betrieb der Drehstrommaschine 1 ist die Messung der Strangströme i_U , i_V und i_W üblicherweise sowohl mit Verstärkungs- als auch mit Offsetfehlern behaftet, so dass die Bahn des Stromraumzeigers $\vec{i}$ eine Verformung und eine Verschiebung erfährt.

Die fehlerbehaftete Strommessung wirkt sich nachteilig auf die Regelung der Strangströme i_U , i_V und i_W aus, welche auf den Messwerten der Strangströme $\tilde{i}_U$, $\tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ beruht. Im stationären Zustand der Drehstrommaschine 1 zielt die Regelung der

Strangströme i_U , i_V und i_W darauf ab, den gemessenen, mit Verstärkungs- bzw. Offsetfehlern behafteten Stromraumzeiger $\vec{i}$ an die gewünschte Kreisform anzugleichen, wodurch sich allerdings der wahre Stromraumzeiger $\vec{i}$ von der Kreisform entfernt. Da die Länge des Stromraumzeigers $\vec{i}$ und das Drehmoment der Drehstrommaschine 1 zusammenhängen, verursachen die fehlerbehafteten Messwerte der Strangströme einen Drehmomentrippel, d.h. eine dem Verlauf des Drehmoments überlagerte Welligkeit. Ein reiner Verstärkungsfehler bewirkt dabei einen Drehmomentrippel mit zwei Maxima und zwei Minima pro Umlauf des Stromraumzeigers $\vec{i}$, d.h. eine Welligkeit mit doppelter Drehstrom-Frequenz. Ein reiner Offsetfehler bewirkt einen Drehmomentrippel mit einem Maximum und einem Minimum pro Umlauf, was einer Welligkeit mit einfacher Drehstrom-Frequenz entspricht. Wenn Verstärkungs- und Offsetfehler auftreten, wird ein Drehmomentrippel mit zwei Spektralanteilen erhalten.

Um die für den Betrieb der Drehstrommaschine 1 nachteiligen Drehmomentrippel zu verringern, werden die gemessenen Strangströme $\tilde{i}_U$, $\tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ erfindungsgemäß im laufenden Betrieb der Drehstrommaschine 1 korrigiert. Hierfür werden aus den Messwerten der Strangströme $\tilde{i}_U$, $\tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ Korrekturparameter α zur Korrektur der Verstärkungs- und/oder Offsetfehler berechnet. Auf Basis der Korrekturparameter α werden korrigierte Strangströme i'_U , i'_V , i'_W bestimmt, die an die Regelung der Strangströme i_U , i_V , i_W übergeben werden.

In Fig. 4 ist schematisch ein Regelschema zur Regelung der korrigierten Strangströme i'_U , i'_V , i'_W dargestellt. Demnach liefern die Stromsensoren 5 der Messeinrichtung 6 fehlerbehaftete Messwerte der Strangströme $\tilde{i}_U$, $\tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ an eine Recheneinheit 7, welche die Korrekturparameter α bestimmt, die mit den gemessenen Strangströmen $\tilde{i}_U$, $\tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ zu den korrigierten Strangströmen i'_U , i'_V , i'_W verknüpft werden. Die korrigierten Strangströme i'_U , i'_V , i'_W werden mittels eines Konverters 8 in Stromraumzeiger-Komponenten i_α und i_β umgerechnet (vgl. Fig. 2). Die als Stromraumzeiger $\vec{i}$ dargestellten, korrigierten Strangströme i'_U , i'_V , i'_W werden einer feldorientierten Regeleinrichtung 9 übergeben, welche die Stromraumzeiger-Komponenten i_α und i_β in Rotorfluss-Komponenten $i_{q,ist}$ und $i_{d,ist}$ transformiert. Die Regeleinrichtung

9 weist zwei Stromregler 10 zum Regeln der in das Rotorfluss-Koordinatensystem (d-q-System) transformierten Ist-Werte der Ströme $i_{q,ist}$ und $i_{d,ist}$ auf. Die Ist-Werte der Ströme $i_{q,ist}$ und $i_{d,ist}$ werden von den Stromreglern 10 mit Soll-Werten der Ströme $i_{q,soll}$ und $i_{d,soll}$ verglichen, welche aus einem vorgegebenen Soll-Drehmoment M_{soll} berechnet werden. Je nach Regelabweichung liefern die Stromregler 10 passende Spannungen u_d und u_q , die in einem Konverter 11 auf Strangspannungen u_U , u_V , und u_W umgerechnet und mit einem Wechselrichter 12 an der Drehstrommaschine 1 angelegt werden.

Hierbei ist zu beachten, dass ohne zusätzliche Strommessgeräte aus den gemessenen, fehlerhaften Strangströmen $\tilde{i}_U, \tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ zwar nicht die wahren Strangströme i_U, i_V, i_W ermittelt werden können; die Korrektur der gemessenen Strangströme über die Korrekturparameter α kann jedoch dazu beitragen, den durch die fehlerhafte Strommessung verursachten Drehmomentrippel zu verringern bzw. gänzlich zu vermeiden, wie nachstehend anhand von bevorzugten Ausführungsvarianten näher beschrieben wird.

Zur Korrektur der gemessenen Strangströme $\tilde{i}_U, \tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ werden Gleichungen (4)-(6) zu Gleichungen (7)-(9) umgeformt, worin $\alpha_U, \alpha_V, \alpha_W$ Korrekturparameter für die Verstärkungsfehler und $\beta_U, \beta_V, \beta_W$ Korrekturparameter für die Offsetfehler bezeichnen.

$$i_U = \frac{1}{k_U}(\tilde{i}_U - d_U) = \alpha_U \tilde{i}_U + \beta_U \quad (7)$$

$$i_V = \frac{1}{k_V}(\tilde{i}_V - d_V) = \alpha_V \tilde{i}_V + \beta_V \quad (8)$$

$$i_W = \frac{1}{k_W}(\tilde{i}_W - d_W) = \alpha_W \tilde{i}_W + \beta_W \quad (9)$$

Der Zusammenhang zwischen den Korrekturparametern $\alpha_U, \alpha_V, \alpha_W, \beta_U, \beta_V, \beta_W$ und den Verstärkungsfaktoren k_U, k_V, k_W bzw. den Offsetwerten d_U, d_V, d_W ist in den Gleichungen (10)-(12) angegeben.

$$\alpha_U = \frac{1}{k_U} \quad \beta_U = -\frac{d_U}{k_U} \quad (10)$$

$$\alpha_V = \frac{1}{k_V} \quad \beta_V = -\frac{d_V}{k_V} \quad (11)$$

$$\alpha_W = \frac{1}{k_W} \quad \beta_W = -\frac{d_W}{k_W} \quad (12)$$

In einem ersten Fall wird von einem reinen Verstärkungsfehler in den Messwerten der Strangströme $\tilde{i}_U, \tilde{i}_V$ und $\tilde{i}_W$ ausgegangen. Diese Einschränkung ist für einen Stromsensor 5 sinnvoll, dessen Verstärkungsfehler sich im laufenden Betrieb ändern können, wogegen die Offsetfehler im Betrieb konstant bleiben. Ein solches Verhalten weisen beispielsweise Stromsensoren 5 in Form von Kompensations-Stromwandlern mit einer Spule mit hochpermeablem Kern anstelle eines Hall-Elements auf. In diesem Fall kann der konstante Offsetfehler in einer dem Betrieb der Drehstrommaschine 1 vorangehenden Kalibrierung experimentell ermittelt und entsprechend korrigiert werden. Wenn kein Offsetfehler vorliegt ($d_U = d_V = d_W = 0$ sowie $\beta_U = \beta_V = \beta_W = 0$), können die Strangströme i_U, i_V, i_W mit den Gleichungen (13)-(15) bestimmt werden.

$$i_U = \alpha_U \tilde{i}_U \quad (13)$$

$$i_V = \alpha_V \tilde{i}_V \quad (14)$$

$$i_W = \alpha_W \tilde{i}_W \quad (15)$$

Durch Einsetzen in Gleichung (1) folgt Gleichung (16), welche die modifizierte Kirchhoff'sche Knotenregel darstellt.

$$\alpha_U \tilde{i}_U + \alpha_V \tilde{i}_V + \alpha_W \tilde{i}_W = 0 \quad (16)$$

Da es prinzipbedingt nicht möglich ist, sämtliche Korrekturparameter $\alpha_U, \alpha_V, \alpha_W$ zu bestimmen, wird gemäß Gleichung (17) ein Korrekturparameter α_U konstant auf 1 gesetzt.

$$\alpha_U = 1 \quad (17)$$

Wenn die beiden anderen Korrekturparameter α_V, α_W relativ zu dem vorgegebenen Korrekturparameter α_U richtig geschätzt werden, können zwar die wahren Strangströme i_U, i_V und i_W nicht exakt bestimmt werden, eine kreisförmige Bahn des Stromraumzeigers $\vec{i}$ der wahren Strangströme i_U, i_V und i_W wird aber auch auf eine kreisförmige Bahn des gemessenen und korrigierten Stromraumzei-

gers $\tilde{i}$ abgebildet, so dass der durch die fehlerhafte Strommessung verursachte Drehmomentrippel eliminiert wird. Gleichung (17) in Gleichung (16) eingesetzt führt zur linearen, unterbestimmten Gleichung (18) mit zwei Unbekannten α_V und α_W , die mit den Messwerten eines einzigen Zeitpunkts nicht eindeutig bestimmbar wären.

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_V & \tilde{i}_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_V \\ \alpha_W \end{bmatrix} = -\tilde{i}_U \quad (18)$$

Daher werden die Messwerte vieler aufeinanderfolgender Zeitpunkte k verwendet, so dass sich ein überbestimmtes Gleichungssystem, vgl. Gleichung (19), ergibt, worin der zusätzliche Index $0, \dots, k$ für die gemessenen Strangströme $\tilde{i}_{U,k}, \tilde{i}_{V,k}, \tilde{i}_{W,k}$ den k -ten Zeitschritt bezeichnet.

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{V,0} & \tilde{i}_{W,0} \\ \tilde{i}_{V,1} & \tilde{i}_{W,1} \\ \vdots & \vdots \\ \tilde{i}_{V,k} & \tilde{i}_{W,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_V \\ \alpha_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{i}_{U,0} \\ -\tilde{i}_{U,1} \\ \vdots \\ \tilde{i}_{U,k} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Dieses überbestimmte Gleichungssystem kann mit einem rekursiven Algorithmus gelöst werden, wofür sich insbesondere die Methode der kleinsten Fehlerquadrate eignet. Damit in jedem Zeitschritt k die neuen Messwerte der Strangströme $\tilde{i}_{U,k}, \tilde{i}_{V,k}, \tilde{i}_{W,k}$ stärker als die vorangehenden Messwerte der Strangströme $\tilde{i}_{U,k-1}, \tilde{i}_{V,k-1}, \tilde{i}_{W,k-1}$ berücksichtigt werden, wird vorzugsweise ein rekursiver adaptiver Filteralgorithmus verwendet. Hierfür bietet sich insbesondere der rekursive kleinste Fehlerquadrate-Algorithmus mit Vergessensfaktor λ ("recursive least squares with forgetting factor") an. Dieser Algorithmus wird für den Zeitschritt $k-1$ auf k durch die Gleichungen (20)-(22) bestimmt.

$$p_k = \frac{R_{k-1} a_k}{\lambda + a_k^T R_{k-1} a_k} \quad (20)$$

$$R_k = \frac{1}{\lambda} (R_{k-1} - p_k a_k^T R_{k-1}) \quad (21)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + p_k (z_k - a_k^T \hat{x}_{k-1}) \quad (22)$$

In den Gleichungen (20)-(22) bezeichnet $\mathbf{a}_k$ einen Vektor, der als Komponenten die Messwerte der Strangströme $\tilde{i}_{V,k}, \tilde{i}_{W,k}$ aufweist, $\hat{\mathbf{x}}_k$ einen Vektor, der als Komponenten die gesuchten Korrekturparameter $\alpha_{V,k}, \alpha_{W,k}$ zum k-ten Zeitschritt aufweist, vgl. Gleichung (23), und λ den Vergessensfaktor.

$$\mathbf{a}_k = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{V,k} \\ \tilde{i}_{W,k} \end{bmatrix} \quad z_k = -\tilde{i}_{U,k} \quad \hat{\mathbf{x}}_k = \begin{bmatrix} \alpha_{V,k} \\ \alpha_{W,k} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Der Vergessensfaktor λ wird in einem Bereich zwischen 0 und 1 gewählt, wobei ein Wert für den Vergessensfaktor λ nahe 0 schnelles Vergessen und $\lambda = 1$ kein Vergessen bedeutet; in der Praxis hat sich ein Wert knapp unter 1 als zweckmäßig herausgestellt. Für den ersten Zeitschritt $k = 0$ müssen die Matrix $\mathbf{R}_{-1}$ und der Vektor $\hat{\mathbf{x}}_{-1}$ initialisiert werden; zweckmäßige Werte hierfür sind in Gleichung (24) angegeben.

$$\mathbf{R}_{-1} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad \hat{\mathbf{x}}_{-1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Die korrigierten Strangströme $i'_{U,k}, i'_{V,k}$ und $i'_{W,k}$ zum k-ten Zeitschritt können nun mit den Gleichungen (25)-(27) bestimmt werden.

$$i'_{U,k} = \tilde{i}_{U,k} \quad (25)$$

$$i'_{V,k} = \alpha_{V,k} \tilde{i}_{V,k} \quad (26)$$

$$i'_{W,k} = \alpha_{W,k} \tilde{i}_{W,k} \quad (27)$$

Nach kurzer Adaptierungszeit im Regelkreis sind die durch fehlerhafte Strommessung verursachten Drehmomentrippel eliminiert.

Im folgenden wird die Korrektur der gemessenen Strangströme $\tilde{i}_{U,k}, \tilde{i}_{V,k}, \tilde{i}_{W,k}$ beschrieben, wenn sowohl Verstärkungs- als auch Offsetfehler auftreten.

In diesem Fall wird durch Einsetzen der Gleichungen (7)-(9) in Gleichung (1) Gleichung (28) erhalten.

$$\alpha_U \tilde{i}_U + \alpha_V \tilde{i}_V + \alpha_W \tilde{i}_W + (\beta_U + \beta_V + \beta_W) = 0 \quad (28)$$

Wie zuvor für reine Verstärkungsfehler wird ein Korrekturparameter, hier α_U , gleich 1 gesetzt, vgl. Gleichung (29).

$$\alpha_U=1 \quad (29)$$

Da ein gemeinsamer Offsetfehler auf allen Strangströmen i_U , i_V , i_W keinen Einfluß auf den Stromraumzeiger hat, wird weiters ein Offsetwert, hier β_U , 0 gesetzt, vgl. Gleichung (30).

$$\beta_U=0 \quad (30)$$

Mit den Gleichungen (29) und (30) können zwar die tatsächlichen Strangströme i_U , i_V und i_W nicht bestimmt, aber die Auswirkungen auf den Drehmomentrippel günstig beeinflusst werden. Aus Gleichung (28) wird mit den Gleichungen (29) und (30) Gleichung (31) erhalten.

$$\alpha_V \tilde{i}_V + \alpha_W \tilde{i}_W + (\beta_V + \beta_W) = -\tilde{i}_U \quad (31)$$

Aus Gleichung (31) ist ersichtlich, dass zwischen den Korrekturparametern β_V und β_W nicht unterschieden werden kann. Dies bedeutet, dass - im Gegensatz zur Korrektur eines reinen Verstärkungsfehlers - der durch fehlerhafte Strommessung verursachte Drehmomentrippel nicht vollständig eliminiert, aber deutlich reduziert werden kann. Hierzu wird ein neuer Korrekturparameter β_{VW} gemäß Gleichung (32) als Summe der Korrekturparameter β_V und β_W eingeführt.

$$\beta_{VW} = \beta_V + \beta_W \quad \text{bzw.} \quad \beta_V = \beta_W = \frac{\beta_{VW}}{2} \quad (32)$$

Gleichung (32) in Gleichung (31) eingesetzt ergibt Gleichung (33), woraus direkt Gleichung (34) folgt.

$$\alpha_V \tilde{i}_V + \alpha_W \tilde{i}_W + \beta_{VW} = -\tilde{i}_U \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_V & \tilde{i}_W & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_V \\ \alpha_W \\ \beta_{VW} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{i}_U \end{bmatrix} \quad (34)$$

Gleichung (34) stellt eine lineare, unterbestimmte Gleichung mit den drei Unbekannten α_V , α_W und β_{VW} dar. Durch Verwendung von

Messwerten vieler aufeinander folgender Zeitpunkte k kann ein überbestimmtes Gleichungssystem gemäß Gleichung (35) erhalten werden, worin der zusätzliche Index $0, \dots, k$ sich wiederum auf den k -ten Zeitschritt bezieht:

$$\begin{bmatrix} \tilde{z}_{V,0} & \tilde{z}_{W,0} & 1 \\ \tilde{z}_{V,1} & \tilde{z}_{W,1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{z}_{V,k} & \tilde{z}_{W,k} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_V \\ \alpha_W \\ \beta_{VW} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{z}_{U,0} \\ -\tilde{z}_{U,1} \\ \vdots \\ \tilde{z}_{U,k} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Dieses Gleichungssystem kann erneut durch Anwendung des rekursiven kleinsten Fehlerquadrate-Algorithmus mit Vergessensfaktor λ nach Gleichungen (20)-(22) gelöst werden. Für den Vektor der Messwerte $\mathbf{a}_k$ und den Vektor der gesuchten Korrekturparameter $\hat{\mathbf{x}}_k$ zum k -ten Zeitschritt gilt Gleichung (36).

$$\mathbf{a}_k = \begin{bmatrix} \tilde{z}_{V,k} \\ \tilde{z}_{W,k} \\ 1 \end{bmatrix} \quad z_k = -\tilde{z}_{U,k} \quad \hat{\mathbf{x}}_k = \begin{bmatrix} \alpha_{V,k} \\ \alpha_{W,k} \\ \beta_{VW,k} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Günstige Startwerte für die Matrix $\mathbf{R}_{-1}$ und den Korrekturparameter-Vektor $\hat{\mathbf{x}}_{-1}$ sind in Gleichung (37) angegeben.

$$\mathbf{R}_{-1} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad \hat{\mathbf{x}}_{-1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Die korrigierten Strangströme $i'_{U,}$, $i'_{V,}$ und $i'_{W,}$ zum k -ten Zeitschritt können nun mit den Gleichungen (38)-(40) bestimmt werden.

$$i'_{U,k} = \tilde{z}_{U,k} \quad (38)$$

$$i'_{V,k} = \alpha_{V,k} \tilde{z}_{V,k} + \frac{\beta_{VW,k}}{2} \quad (39)$$

$$i'_{W,k} = \alpha_{W,k} \tilde{z}_{W,k} + \frac{\beta_{VW,k}}{2} \quad (40)$$

Die Recheneinheit 7 übermittelt die korrigierten Strangströme $i'_{U,}$, $i'_{V,}$ und $i'_{W,}$ an die Regeleinrichtung 9, welche somit die Verstärkungs- bzw. Offsetfehler in der Strommessung berücksichtigt und weitestgehend kompensiert. Nach kurzer Adaptierungszeit wird

eine deutliche Reduktion der durch fehlerhafte Strommessung verursachten Drehmomentrippel im Betrieb der Drehstrommaschine 1 beobachtet.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Korrektur von Strangströmen (i_U, i_V, i_W) einer Drehstrommaschine (1), wobei mit Verstärkungs- und/oder mit Offsetfehlern behaftete Messwerte der Strangströme ($\tilde{i}_U, \tilde{i}_V, \tilde{i}_W$) erfasst werden, die zur Regelung der Strangströme (i_U, i_V, i_W) herangezogen werden, dadurch gekennzeichnet, dass im Betrieb der Drehstrommaschine (1) aus den Messwerten der Strangströme ($\tilde{i}_U, \tilde{i}_V, \tilde{i}_W$) Korrekturparameter ($\alpha; \alpha_U, \alpha_V, \alpha_W, \beta_U, \beta_V, \beta_W$) zur Korrektur der Verstärkungs- bzw. Offsetfehler berechnet werden, wobei mit den Korrekturparametern ($\alpha; \alpha_U, \alpha_V, \alpha_W, \beta_U, \beta_V, \beta_W$) korrigierte Strangströme (i'_U, i'_V, i'_W) bestimmt werden, die an die Regelung der Strangströme (i_U, i_V, i_W) übergeben werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass im Fall von reinen Verstärkungsfehlern je ein Korrekturparameter ($\alpha; \alpha_U, \alpha_V, \alpha_W$) pro Strangstrom zur Korrektur der Verstärkungsfehler bestimmt wird, wobei bei Auftreten von Offsetfehlern eine entsprechende Anzahl von Korrekturparametern ($\beta_U, \beta_V, \beta_W$) zur Korrektur der Offsetfehler bestimmt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zur laufenden Anpassung der Korrekturparameter ($\alpha; \alpha_U, \alpha_V, \alpha_W, \beta_U, \beta_V, \beta_W$) im Betrieb der Drehstrommaschine (1) eine zeitliche Abfolge von Messwerten der Strangströme ($\tilde{i}_{U,k}, \tilde{i}_{V,k}, \tilde{i}_{W,k}$) verarbeitet wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass für die Berechnung der Korrekturparameter ($\alpha; \alpha_U, \alpha_V, \alpha_W, \beta_U, \beta_V, \beta_W$) eine zeitliche Gewichtung der Messwerte der Strangströme ($\tilde{i}_{U,k}, \tilde{i}_{V,k}, \tilde{i}_{W,k}$) vorgenommen wird, wobei aktuelle Messwerte der Strangströme ($\tilde{i}_{U,k}, \tilde{i}_{V,k}, \tilde{i}_{W,k}$) stärker als frühere Messwerte der Strangströme ($\tilde{i}_{U,k-1}, \tilde{i}_{V,k-1}, \tilde{i}_{W,k-1}$) gewichtet werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Korrekturparameter ($\alpha; \alpha_U, \alpha_V, \alpha_W, \beta_U, \beta_V, \beta_W$) mittels eines rekursiven Algorithmus berechnet werden.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass als rekursiver Algorithmus eine Methode der kleinsten Fehlerquadra-

te, vorzugsweise mit einem Vergessensfaktor zur zeitlichen Gewichtung der Messwerte der Strangströme ($\tilde{i}_{U,k}, \tilde{i}_{V,k}, \tilde{i}_{W,k}$), verwendet wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die korrigierten Strangströme (i'_U, i'_V, i'_W) an eine feldorientierte Regelung der Strangströme (i_U, i_V, i_W) übergeben werden.

8. Vorrichtung zur Korrektur von Strangströmen (i_U, i_V, i_W) einer Drehstrommaschine (1), mit einer Messeinrichtung (6) zum Messen von mit Verstärkungs- und/oder mit Offsetfehlern behafteten Strangströmen ($\tilde{i}_U, \tilde{i}_V, \tilde{i}_W$) einer Drehstrommaschine (1), und mit einer mit der Messeinrichtung (6) verbundenen Regeleinrichtung (9) zur Regelung der Strangströme (i_U, i_V, i_W), dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (6) mit einer Recheneinheit (7) verbunden ist, welche dazu eingerichtet ist, im Betrieb der Drehstrommaschine (1) aus den Messwerten der Strangströme ($\tilde{i}_U, \tilde{i}_V, \tilde{i}_W$) Korrekturparameter ($\alpha; \alpha_U, \alpha_V, \alpha_W, \beta_U, \beta_V, \beta_W$) zur Korrektur der Verstärkungs- bzw. Offsetfehler zu berechnen, wobei die Recheneinheit (7) zur Übertragung korrigierter Strangströme (i'_U, i'_V, i'_W) mit der Regeleinrichtung (9) verbunden ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (6) jeweils einem Strang (4) der Drehstrommaschine (1) zugeordnete Stromsensoren (5), insbesondere Kompensationsstromwandler, zum Messen der zugehörigen Strangströme (i_U, i_V, i_W) aufweist.

1/4

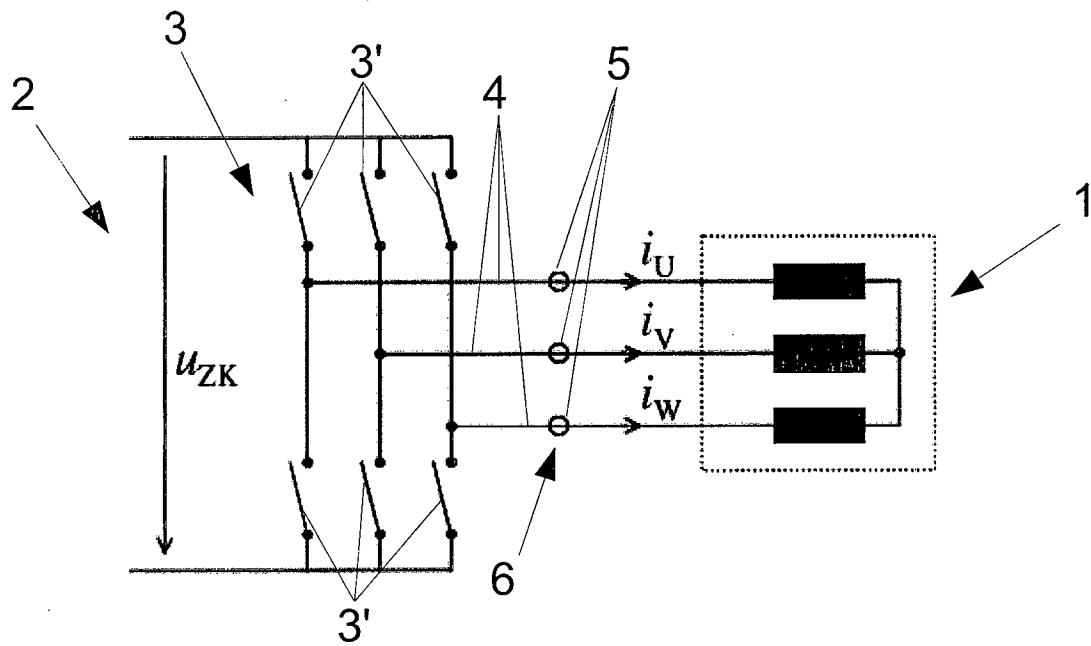


Fig. 1

2/4

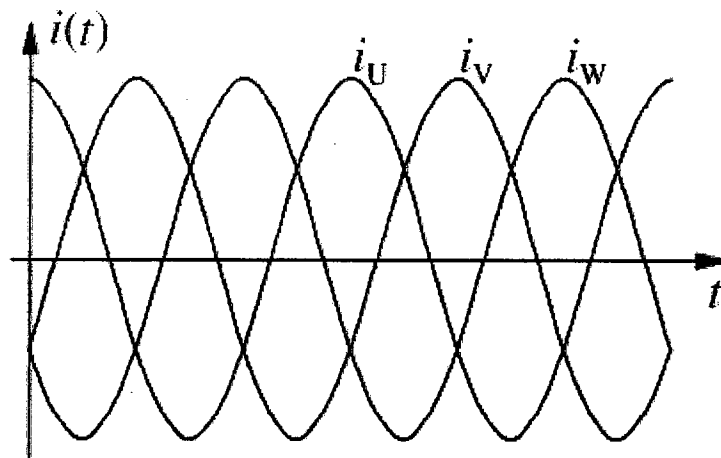


Fig. 2a

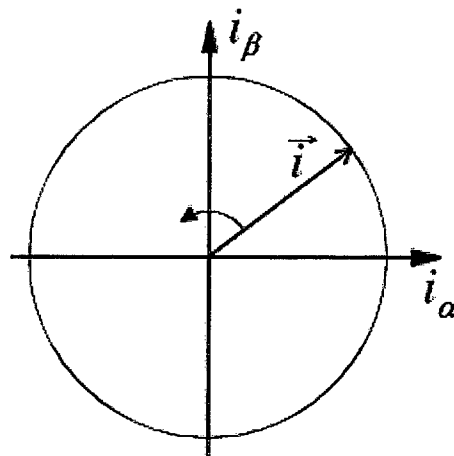


Fig. 2b

3/4

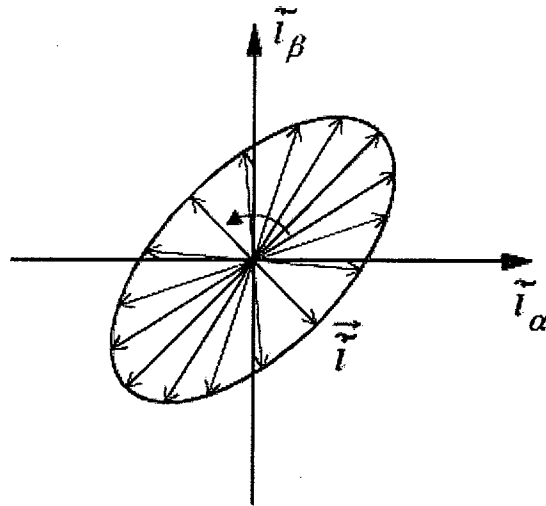


Fig. 3a

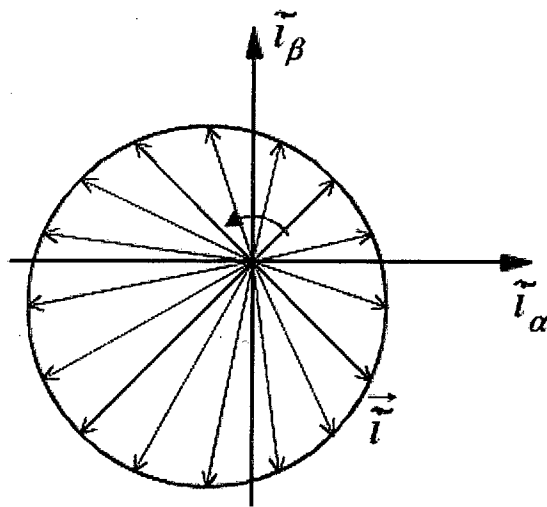


Fig. 3b

4/4

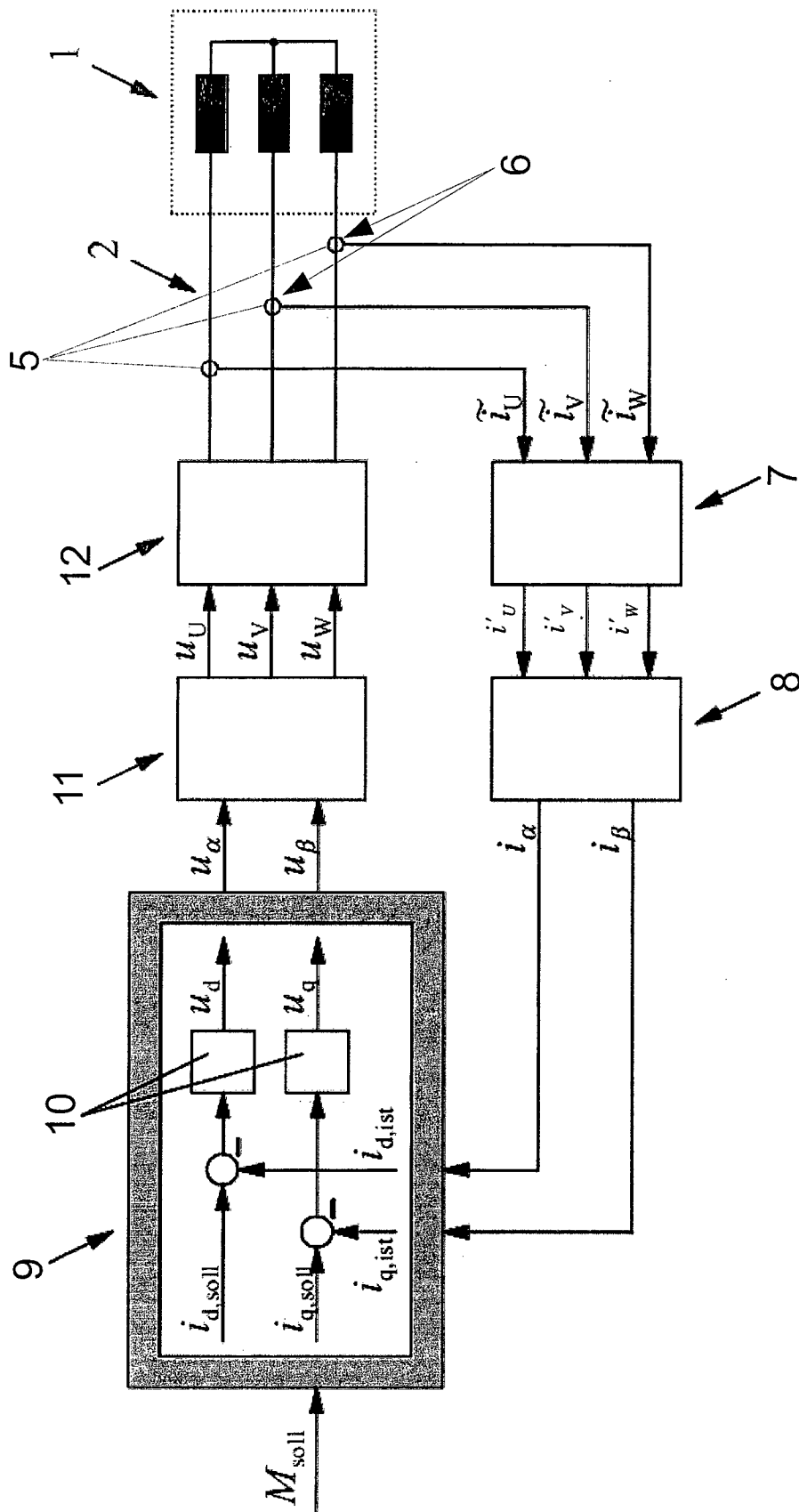


Fig. 4