



(10) **DE 10 2011 112 647 A1** 2012.04.19

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2011 112 647.7**
 (22) Anmeldetag: **06.09.2011**
 (43) Offenlegungstag: **19.04.2012**

(51) Int Cl.: **H02P 21/14 (2011.01)**
H02P 21/13 (2011.01)

Mit Einverständnis des Anmelders offengelegte Anmeldung gemäß § 31 Abs. 2 Ziffer 1 PatG

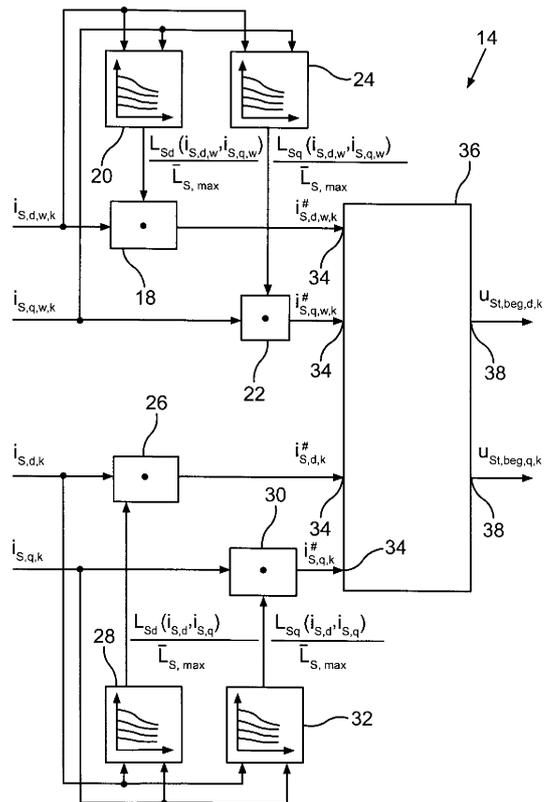
(71) Anmelder:
Daimler AG, 70327, Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Nuß, Uwe, 76275, Ettlingen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Regeln eines Statorstroms einer stromrichter-gespeisten Drehfeldmaschine und zugehörige Vorrichtung zum Regeln des Statorstroms**

(57) Zusammenfassung: Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen stabilen Betrieb einer Drehfeldmaschine auch bei schnellen Änderungen des Sättigungszustands der Motorinduktivitäten zu ermöglichen. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird ein Statorstrom einer Drehfeldmaschine mittels einer Stromregelvorrichtung (36) geregelt. Dabei werden Eingangsgrößen der Stromregelvorrichtung derart skaliert, dass sich ein linearisiertes Übertragungsverhalten des Reglersystems ergibt. Gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren wird dazu wenigstens ein Wert ($i_{S,d,w,k}$, $i_{S,q,w,k}$, $i_{S,d}$, $i_{S,q}$) für den Statorstrom als Eingangswert empfangen und in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Eingangswert wenigstens ein Induktivitätswert ($L_{S,d}(i_{S,d,w}$, $i_{S,q,w})$, $L_{S,q}(i_{S,d,w}$, $i_{S,q,w})$, $L_{S,d}(i_{S,d}$, $i_{S,q})$, $L_{S,q}(i_{S,d}$, $i_{S,q})$) für eine Induktivität der Drehfeldmaschine ermittelt. Der wenigstens eine Eingangswert wird dann mit einem des wenigstens einen ermittelten Induktivitätswerts multipliziert und das so jeweils erhaltene Produkt ($i_{S,d,w,k}^{\#}$, $i_{S,q,w,k}^{\#}$, $i_{S,d,k}^{\#}$, $i_{S,q,k}^{\#}$) als Stromeingangswert an einen Eingang (34) der Stromregelvorrichtung (36) übertragen. Zu der Erfindung gehört auch eine Vorrichtung zum Regeln eines Statorstroms einer Drehfeldmaschine.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft Verfahren zum Regeln eines Startenorstroms einer stromrichter gespeisten Drehfeldmaschine mittels eines Stromreglers. Die Erfindung betrifft auch eine Vorrichtung zum Regeln des Statorstroms. Unter einer Drehfeldmaschine werden hier insbesondere eine permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) und eine Asynchronmaschine (ASM) verstanden.

[0002] Um mithilfe von elektrischen Maschinen zum Beispiel bei Elektrofahrzeugen hohe Beschleunigungswerte zu erhalten, wird bei manchen Applikationen mit konventionellen Motorentwicklungen – wenn auch nur kurzzeitig – ein mehrfaches des Motornennstroms eingeprägt. Unabhängig davon werden seit einigen Jahren unter anderem zur Reduzierung von Fertigungskosten neue Wickeltechniken für Drehstrommotoren entwickelt. Den beiden genannten Fällen ist gemein, dass die Motorinduktivitäten aufgrund von Sättigungserscheinungen mit zunehmendem Strom abnehmen. D. h. die Motorparameter sind dann nicht mehr konstant. Bisher wurden für solche Fälle Identifikations- und Adaptionsverfahren eingesetzt, die mithilfe von Mess- und rechnerinternen Größen betriebspunktabhängige Schätzwerte unter anderem für die gegebenenfalls sättigungsabhängigen Motorinduktivitäten liefern und die Stromreglerparameter betriebsabhängig an die identifizierten Werte anpassen. Eine derartige Adaption besitzt eine verhältnismäßig geringe Dynamik.

[0003] Nehmen die dynamischen Anforderungen weiter zu, d. h. soll zum Beispiel innerhalb einer Millisekunde oder darunter eine Stromänderung von einem kleinen auf einen großen Wert oder umgekehrt erfolgen, dann reicht es nicht mehr aus, eine der eher langsamen Motorparameteradaptation durchzuführen, die in ihrem Kern von einem linearen Maschinenmodell ausgehen und deshalb nur in einer engen Umgebung des jeweiligen Betriebspunkts gültig sind. Vielmehr muss eine nichtlineare Stromregelung durchgeführt werden, die in der Lage ist, das nichtlineare Antriebsverhalten in der gewünschten Weise zu beeinflussen.

[0004] Zusammenfassend ist festzustellen, dass Stromregler, die den Sättigungsgrad der Komponenten des magnetischen Kreises einer Drehfeldmaschine nicht berücksichtigen, bei Arbeitspunktwechseln, die den Sättigungsgrad der Maschine beeinflussen, ein ungünstiges Einschwingverhalten bis hin zur Instabilität aufweisen. Aus diesem Grund werden üblicherweise die Stromreglerparameter an den momentanen Sättigungsgrad der Maschine angepasst. Bei sehr schnellen Stromsollwertänderungen, wie z. B. bei Stromsollwertsprüngen, die zugleich eine schnelle und starke Änderung des Sättigungszustands der Drehfeldmaschine zur Folge haben, führt eine ge-

wöhnliche Stromregleradaption zu Stromüberschwingern, die den Betrieb des Drehstromantriebs beeinträchtigen oder gar zur Fehlerabschaltung führen können und somit die Verfügbarkeit des Antriebs herabsetzen.

[0005] Aus der US 7,187,155 B2 ist eine feldorientierte Stromregelung bekannt, bei welcher zu einem in einer Drehfeldmaschine fließenden Strom eine ein Drehmoment erzeugende q-Komponente und eine einen magnetischen Fluss erzeugende d-Komponente ermittelt wird. Ein Regelkreis für die Drehzahl der Drehfeldmaschine umfasst einen Regler, welcher einen Steuerwert für einen Schlupf in Abhängigkeit von einer momentanen Induktivität der Drehfeldmaschine erzeugt.

[0006] Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen stabilen Betrieb einer Drehfeldmaschine auch bei schnellen Änderungen des Sättigungszustands der Motorinduktivitäten zu ermöglichen.

[0007] Die Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Patentanspruch 1 sowie durch eine Vorrichtung gemäß Patentanspruch 9 gelöst. Die Aufgabe wird auch durch einen Kraftwagen gemäß Patentanspruch 10 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind durch die Unteransprüche gegeben.

[0008] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird ein Statorstrom einer Drehfeldmaschine mittels einer Stromregeleinrichtung geregelt. Dabei werden Eingangsgrößen der Stromregeleinrichtung in vorteilhafter Weise derart skaliert, dass sich ein linearisiertes Übertragungsverhalten der Stromregeleinrichtung ergibt. Nach dem erfindungsgemäßen Verfahren wird dazu wenigstens ein Wert für den Statorstrom als Eingangswert empfangen und in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Eingangswert wenigstens ein Induktivitätswert für eine Induktivität der Drehfeldmaschine ermittelt. Der wenigstens eine Eingangswert wird dann mit einem des wenigstens einen ermittelten Induktivitätswerts multipliziert und das so jeweils erhaltene Produkt als Stromeingangswert an einen Eingang der Stromregeleinrichtung übertragen wird. Aus dem Eingangswert für den Statorstrom wird also bei dem Verfahren auf einen Induktivitätswert rückgeschlossen. Dies kann ein tatsächlich vorhandener oder ein zu erwartender Sättigungsgrad einer magnetischen Komponente der Drehfeldmaschine sein. Die Erfindung beruht dabei auf der Erkenntnis, dass durch Multiplizieren des Eingangswerts mit dem zugehörigen Induktivitätswert der Einfluss der Sättigungserscheinungen auf das Reglerverhalten kompensiert wird. Somit können Übertragungsfunktionen für das Reglerverhalten vorgegeben werden und dadurch das Einschwingverhalten gezielt beeinflusst werden.

[0009] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird als ein Eingangswert ein Istwert einer Längskomponente des Statorstroms (q-Komponente) und als ein weiterer Eingangswert ein Istwert einer Querkomponente des Statorstroms (d-Komponente) empfangen und zumindest ein Induktivitätswert in Abhängigkeit von zumindest einem dieser empfangenen Istwerte ermittelt. Ein so gebildeter Induktivitätswert spiegelt dann den tatsächlichen, derzeitigen Sättigungsgrad wider. Die Multiplikation der Stromistwerte mit stromistwertabhängigen Induktivitäten bzw. dazu proportionalen Größen bewirkt eine Linearisierung des Stromregelkreisverhaltens, da in der Regelstrecke die Kehrwerte der stromistwertabhängigen Induktivitäten auftreten.

[0010] Bei einer anderen vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird als ein Eingangswert ein Sollwert für die Längskomponente und als ein weiterer Eingangswert ein Sollwert für die Querkomponente empfangen und zumindest ein Induktivitätswert in Abhängigkeit von zumindest einem der empfangenen Sollwerte ermittelt wird. Die Multiplikation der Stromsollwerte mit stromsollwertabhängigen Induktivitäten bzw. dazu proportionalen Größen führt dazu, dass sich auch ein lineares Führungsverhalten des Stromregelkreises einstellt.

[0011] Eine weitere Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dazu ausgelegt, mittels der Stromregleinrichtung einen Statorstrom einer Asynchronmaschine zu regeln. Bei dieser Ausführungsform wird zumindest ein Induktivitätswert ermittelt, welcher einer totalen Streuinduktivität oder einer dazu proportionalen Größe entspricht.

[0012] Mittels einer anderen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird mittels der Stromregleinrichtung ein Statorstrom einer permanentmagneterregten Synchronmaschine gesteuert. Hierbei werden wenigstens ein Induktivitätswert, welcher einer Statorlängsinduktivität oder einer dazu proportionalen Größe entspricht, und wenigstens ein weiterer Induktivitätswert, welcher einer Statorquerinduktivität oder einer dazu proportionalen Größe entspricht, ermittelt.

[0013] Als besonders günstig hat es sich erwiesen, wenn wenigstens ein Induktivitätswert mittels eines Kennlinienspeichers ermittelt wird, in welchem wenigstens eine Kennlinie für eine Abhängigkeit der Induktivität von zumindest einem der Eingangswerte gespeichert ist.

[0014] Die Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens mittels einer herkömmlichen Reglerstruktur wird besonders einfach, wenn der wenigstens eine Eingangswert zusätzlich zur Multiplikation mit dem zu diesem ermittelten Induktivitätswert noch auf einen Wert einer Bezugsgröße bezogen wird. Die aus

der jeweiligen Multiplikation (Eingangswert mal Induktivitätswert) sich ergebenden Produkte können durch eine geeignete Wahl der Bezugsgröße wiederum als Stromkomponenten interpretiert werden und eignen sich daher als Stromeingangswerte für eine herkömmliche Stromregleinrichtung. So ist es beispielsweise möglich, dass durch die Stromregleinrichtung auf der Grundlage der bezogenen Eingangswerte in an sich bekannter Weise eine feldorientierte Stromregelung durchgeführt wird.

[0015] Zu der Erfindung gehört auch eine Vorrichtung zum Regeln eines Statorstroms einer Drehfeldmaschine. Sie umfasst eine Statorstrom-Messeinrichtung zum Ermitteln wenigstens eines Istwerts eines Statorstroms als einen Ist-Eingangswert, eine Sollwert-Empfangeeinrichtung zum Empfangen eines Sollwerts für den Statorstrom als einen Soll-Eingangswert und wenigstens eine Bestimmungseinrichtung zum Bestimmen eines Induktivitätswerts für eine Induktivität der Drehfeldmaschine in Abhängigkeit von zumindest einem der Eingangswerte. Eine Bestimmungseinrichtung kann z. B. einen Kennlinienspeicher umfassen. Des Weiteren ist wenigstens eine Multipliziereinrichtung bereitgestellt. Die Multipliziereinrichtung ist mit einer der wenigstens einen Bestimmungseinrichtungen gekoppelt und dazu ausgelegt, durch Multiplizieren eines der Eingangswerte mit einem Induktivitätswert der Bestimmungseinrichtung, mit welcher sie gekoppelt ist, einen skalierten Eingangswert zu bilden. Die eigentliche Stromregelung wird durch eine Stromregelereinrichtung bewirkt, welche dazu ausgelegt ist, die skalierten Eingangswerte aller Multipliziereinrichtungen an einem Eingang zu empfangen und in Abhängigkeit von den empfangenen skalierten Eingangswerten eine Steuerspannung an einem Ausgang zu erzeugen. Mittels der erfindungsgemäßen Vorrichtung lassen sich das erfindungsgemäße Verfahren durchführen und somit auch die damit erzielbaren Vorteile erlangen. Zu der Erfindung gehören auch Weiterbildungen der erfindungsgemäßen Vorrichtung, deren Merkmale Merkmalen der Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens entsprechen.

[0016] Die Erfindung umfasst auch einen Kraftwagen, der eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung aufweist.

[0017] Die Erfindung ist im Folgenden anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert. Dabei zeigen:

[0018] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung,

[0019] [Fig. 2](#) ein Grobblockschaltbild eines Steuergeräts der Vorrichtung von [Fig. 1](#) und

[0020] [Fig. 3](#) ein Strukturbild eines Stromzustandsreglers für eine PMSM mit integrierter Kompensation von Sättigungseffekten in komplexer Darstellungsform, wobei der Stromzustandsregler ein Bestandteil der Vorrichtung von [Fig. 1](#) ist.

[0021] Das Ausführungsbeispiel stellt eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung dar.

[0022] In [Fig. 1](#) ist eine permanentmagneterregte Synchronmaschine **10** gezeigt, die von einem Stromrichter **12** mit Drehstrom gespeist wird. Der Stromrichter **12** wird von einem Steuergerät **14** gesteuert. Dazu empfängt der Stromrichter **12** von dem Steuergerät **14** ein zeitdiskretes Steuersignal mit einer Steuerspannungslängskomponente $u_{St,beg,d,k}$ und einer Steuerspannungsquerkomponente $u_{St,beg,q,k}$. Das Steuergerät **14** erzeugt das Steuersignal in Abhängigkeit von Sollwertkomponenten für den Drehstrom und entsprechenden Istwertkomponenten. Die Sollwertkomponenten empfängt das Steuergerät **14** von einer (nicht dargestellt) Steuercomputer. Die Istwertkomponenten werden von einer Stromermittlungseinrichtung **16** aus Messwerten für den Drehstrom erzeugt. Dazu ist die Stromermittlungseinrichtung **16** mit Phasenleitern gekoppelt, über welche der Drehstrom von dem Stromrichter **12** zu der Synchronmaschine **10** geleitet wird. Das Steuergerät **14** und die Stromermittlungseinrichtung **16** bilden zusammen eine Ausführungsform der Erfindungsgemäßenvorrichtung. Als Sollwertkomponenten empfängt das Steuergerät **14** eine Statorstromsollwertlängskomponente $i_{S,d,w,k}$ und eine Statorstromsollwertquerkomponente $i_{S,q,w,k}$. Als Istwertkomponenten empfängt das Steuergerät **14** eine Statorstromistwertlängskomponente $i_{S,d,k}$ und eine Statorstromistwertquerkomponente $i_{S,q,w}$. Anstelle der Synchronmaschine **10** kann bei der gezeigten Anordnung auch eine Asynchronmaschine bereitgestellt sein.

[0023] Im Zusammenhang mit [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) ist im folgenden erläutert, wie durch das Steuergerät **14** das Steuersignal für den Stromrichter **12** aus den empfangenen Istwertkomponenten und Sollwertkomponenten gebildet wird.

[0024] [Fig. 2](#) zeigt eine multiplikative Verknüpfung **18** der Statorstromsollwertlängskomponente $i_{S,d,w,k}$ mit einer aus einem Kennlinienfeld **20** hervorgehenden, auf eine konstante Größe bezogenen Induktivität sowie eine multiplikative Verknüpfung **22** der Stromsollwertquerkomponente $i_{S,q,w,k}$ mit einer aus einem Kennlinienfeld **24** hervorgehenden, auf eine konstante Größe bezogene Induktivität. Des Weiteren sind eine multiplikative Verknüpfung **26** der Statorstromistwertlängskomponente $i_{S,d,k}$ mit einer aus einem Kennlinienfeld **28** hervorgehenden, ebenfalls auf eine konstante Größe bezogenen Induktivität sowie eine multiplikative Verknüpfung **30** der Statorstromistwertquerkomponente $i_{S,q,k}$ mit einer aus ei-

nem Kennlinienfeld **32** hervorgehenden, ebenfalls auf eine konstante Größe bezogenen Induktivitäten gezeigt. Bei den Kennlinienfeldern **20**, **24** handelt es sich um stromsollwertabhängige Induktivitätskennlinienfelder, bei den Kennlinienfeldern **28**, **32** um stromistwertabhängige Induktivitätskennlinienfelder. Als Bezugsgröße ist beispielhaft ein Mittelwert $\bar{L}_{S,max}$ aus maximaler Statorlängs- und Querinduktivität gewählt. Die aus den jeweiligen Multiplikationen sich ergebenden Produkte können aufgrund der gewählten Bezugsgröße wiederum als Stromkomponenten interpretiert werden. Sie sind gemäß [Fig. 2](#) mit $i_{S,d,w,k}^{\#}$ und $i_{S,q,w,k}^{\#}$ für die Sollwerte sowie mit $i_{S,d,k}^{\#}$ und $i_{S,q,k}^{\#}$ für die Istwerte bezeichnet und werden nachfolgend als induktivitätsangepasste Stromkomponenten $i_{S,d,w,k}^{\#}$, $i_{S,q,w,k}^{\#}$, $i_{S,d,k}^{\#}$, $i_{S,q,k}^{\#}$ bezeichnet. Diese werden an Eingänge **34** für Stromeingangswerte eines Stromreglerskerns **36** übertragen. Die induktivitätsangepassten Stromkomponenten $i_{S,d,w,k}^{\#}$, $i_{S,q,w,k}^{\#}$, $i_{S,d,k}^{\#}$, $i_{S,q,k}^{\#}$ bilden die Eingangsgrößen des Stromreglerkerns **36**. Als Stromreglerausgangs- oder Stellgrößen werden die (gegebenenfalls auf vorbestimmte Werte begrenzte) Steuerspannungslängskomponente $u_{St,beg,d,k}$ und Steuerspannungsquerkomponente $u_{St,beg,q,k}$ an Ausgängen **38** des Stromreglerskerns **36** erzeugt. Sämtliche Größen sind in [Fig. 2](#) mit einem Zeitindex k versehen, da es sich um einen zeitdiskret arbeitenden Regler handelt.

[0025] In [Fig. 3](#) ist die Einbettung der Grobstruktur aus [Fig. 2](#) in das Beispiel eines Stromzustandsreglers für die Synchronmaschine **10** veranschaulicht. Die Statorstromsoll- und -istwertkomponenten sowie die Steuerspannungskomponenten sind darin als Raumzeiger zusammengefasst. Hierbei bezeichnet $\underline{i}_{S,w}^r$ den rotorfest beschriebenen Raumzeiger der Statorstromsollwerte und \underline{i}_S^r den ebenfalls rotorfest beschriebenen Raumzeiger der Statorstromistwerte. Die Induktivitätsanpassung wird wiederum durch den hochgestellten Index „#“ symbolisiert. $\underline{u}_{St,begg}^r$ ist der gegebenenfalls begrenzte Steuerspannungsraumzeiger. Die Indizes „ k “ und „ $k + 1$ “ deuten wieder auf die zeitdiskrete Arbeitsweise des Stromreglers sind. Ein komplexwertiges Übertragungsglied **40** repräsentiert die Zusammenfassung der Übertragungsglieder **18** bis **24**, ein komplexwertiges Übertragungsglied **42** die Zusammenfassung der Übertragungsglieder **26** bis **32**. Die stromsollwertabhängigen Längs- und Querinduktivitäten sind in [Fig. 3](#) mit $L_{S,d,w}$ und $L_{S,q,w}$ die stromistwertabhängigen Längs- und Querinduktivitäten mit $L_{S,d}$ und $L_{S,q}$ bezeichnet. Die komplexwertigen Übertragungsglieder **48** bis **54** sind drehfrequenzunabhängige, die komplexwertigen Übertragungsglieder **56** bis **62** sind drehfrequenzabhängige Reglerelemente eines an sich bekannten Stromzustandsreglers (Nuß, Ulrich: „Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe“, Seite 222, Berlin, Offenbach, VDE Verlag, 2010). Das Übertragungsglied **64** bildet zusammen mit der sich anschließenden Rückführung das komplexe Integrier-

glied des Reglers. Seine Ausgangsgröße ist mit v_i^r bezeichnet. Mithilfe eines Totzeitglieds **66** wird unter der Annahme, dass die Stellgrößen des Reglers aufgrund einer Rechentotzeit verzögert werden, diese Rechentotzeit im Regler nachgebildet, so dass dem Zustandsregler alle Zustandsgrößen für Regelzwecke zur Verfügung stehen.

[0026] Die Ausgangsgrößen des im Stromreglers implementierten Totzeitglieds **66** ist v_i^r . Die Übertragungsglieder **68** und **70** bilden schließlich die Stellgrößenbegrenzung und die Anti-Wind-up-Maßnahme. Der Strom Zustandsregler besitzt optional noch die Möglichkeit zur Vorsteuerung **72** des Steuerspannungsraumzeigers durch den Polredspannungsraumzeiger u_p^r . Für überlagerte Regler wird noch der im Begrenzungsfall korrigierte Statorstromsollwertraumzeiger $i_{S,w,korr}^r$ zur Verfügung gestellt. Er geht aus dem induktivitätsangepassten korrigierten Statorstromsollwerteraumzeiger $i_{S,w,korr}^{\#}$ durch dessen Division durch die sollwertabhängigen Induktivitätskennlinienfelder **74** hervor.

[0027] Neuartig an dem vorgestellten Verfahren ist, dass die Stromistwerte in Form des rotor- bzw. rotorflussfest dargestellten Stromistwertraumzeigers i_s^r (mit der Statorstromistwertlängskomponente $i_{S,d}$ und der Statorstromistwertquerkomponente $i_{S,q}$) und die Stromsollwerte in Form des rotor- bzw. rotorflussfest dargestellten Stromsollwertraumzeigers $i_{S,w}^r$ (mit der Statorstromsollwertlängskomponente $i_{S,d,w}$ und der Statorstromsollwertquerkomponente $i_{S,q,w}$) jeweils mit unterschiedlichen Induktivitätsfunktionen multipliziert werden. Als Induktivitätsfunktion kommen dabei – insbesondere bei der Synchronmaschine – die Quotienten aus der Längsinduktivität $L_{S,d}$ bzw. der Querinduktivität $L_{S,q}$ und dem Mittelwert $L_{S,max}$ aus dem jeweiligen Maximalwert der Längs- und Querinduktivitäten oder dazu proportionalen Größen infrage. Während die Stromistwerte in diesem Fall vorzugsweise mit bezogenen Induktivitäten $L_{S,d}(i_{S,d}, i_{S,q})/\bar{L}_{S,max}$ und $L_{S,q}(i_{S,d}, i_{S,q})/\bar{L}_{S,max}$ multipliziert werden, die auf Induktivitäten beruhen, die wegen des Sättigungsverhaltens von den Stromistwerten – und zwar speziell von der Statorstromistwertlängskomponente $i_{S,d}$ und der Statorstromistwertquerkomponente $i_{S,q}$ – abhängen, werden die Stromsollwerte mit bezogenen Induktivitäten $L_{S,d}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})/\bar{L}_{S,max}$ und $L_{S,q}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})/\bar{L}_{S,max}$ multipliziert, die ausschließlich von der Statorstromsollwertlängskomponente $i_{S,d,w}$ und der Statorstromsollwertquerkomponente $i_{S,q,w}$ abhängen. Wegen des üblicherweise eindeutigen Zusammenhangs zwischen den ursprünglichen und den mit Induktivitätsfunktionen multiplizierten Statorstromkomponenten bewirkt die Vorgabe eines überschwingungsfreien Einschwingverhaltens mit vorgegebener Dynamik in den multiplizierten Größen auch in den nicht multiplikativ veränderten Statorstromkomponenten ein überschwingungsfreies Einschwingen mit ähnlicher Dynamik.

[0028] Die Erfindung beschränkt sich nicht auf den Einsatz eines Zustandsreglers, wie er in **Fig. 3** gezeigt ist. Genauso kann die Erfindung auch für nichtlineare Stromregler bei Asynchronantrieben verwendet werden. Hierbei hat sich gezeigt, dass qualitativ vergleichbare Ergebnisse wie bei der Anwendung auf Synchronantriebe erzielt werden können.

[0029] Insgesamt ist die durch das Beispiel ein Verfahren zur rotor- bzw. feldorientierten Stromregelung einer stromrichter gespeisten Drehfeldmaschine mit hochgradig sättigbaren Motorinduktivitäten beschrieben. Das Verfahren lässt sich wie folgt zusammenfassen: Verfahren zur rotor- bzw. feldorientierten Stromregelung stromrichter gespeister Drehfeldmaschinen mit hochgradig sättigbaren Motorinduktivitäten, insbesondere von permanentmagneterregten Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- a) die Längs- und Querkomponente der Statorstromsollwerte wird jeweils mit der als Kennlinie oder Kennlinienfeld vorliegenden Statorlängs- bzw. querinduktivität (bei der PMSM) respektive der totalen Streuinduktivität (bei ASM) oder mit einer dazu proportionalen Größe multipliziert, wobei die Induktivitätskennlinien von den Stromsollwertkomponenten abhängen,
- b) die Längs- und Querkomponente der Statorstromistwerte wird jeweils mit der als Kennlinie oder Kennlinienfeld vorliegenden Statorlängs- bzw. querinduktivität (bei der PMSM) respektive der totalen Streuinduktivität (bei ASM) oder mit einer dazu proportionalen Größe multipliziert, wobei die Induktivitätskennlinien von den Stromistwertkomponenten abhängen,
- c) die durch die Multiplikationen als Teile eines nichtlinearen Stromreglers entstandenen Produkte werden einem linearen oder auch nichtlinearen Stromreglerkern zugeführt, der in einem rotierenden Koordinatensystem arbeitet.

Bezugszeichenliste

10	Synchronmaschine
12	Stromrichter
14	Steuergerät
16	Stromermittlungseinrichtung
18	Multiplikative Verknüpfung
20	Kennlinienfeld
22	Multiplikative Verknüpfung
24	Kennlinienfeld
26	Multiplikative Verknüpfung
28	Kennlinienfeld
30	Multiplikative Verknüpfung
32	Kennlinienfeld
34	Eingänge
36	Stromreglerkern
38	Ausgänge
40	Übertragungsglied
42	Übertragungsglied

44	Übertragungsglied
46	Übertragungsglied
48	Übertragungsglied
50	Übertragungsglied
52	Übertragungsglied
54	Übertragungsglied
56	Übertragungsglied
58	Übertragungsglied
60	Übertragungsglied
62	Übertragungsglied
64	Übertragungsglied
66	Totzeitglied
68	Übertragungsglied
70	Übertragungsglied
72	Vorsteuerung
74	Induktivitätskennlinienfelder
$i_{S,d,k}$	Statorstromistwertlängskomponente
$i_{S,q,k}$	Statorstromistwertquerkomponente
$i_{S,d,w,k}$	Statorstromsollwertlängskomponente
$i_{S,q,w,k}$	Statorstromsollwertquerkomponente
$i_{S,d,w,k}^{\#}$	induktivitätsangepasste Stromkomponente
$i_{S,q,w,k}^{\#}$	induktivitätsangepasste Stromkomponente
$i_{S,d,k}^{\#}$	induktivitätsangepasste Stromkomponente
$i_{S,q,k}^{\#}$	induktivitätsangepasste Stromkomponente
$i_{S,w}^r$	Raumzeiger
i_S^r	Raumzeiger
$i_{S,w,korr}^r$	Statorstromsollwertraumzeiger
k	Zeitindex
$k + 1$	Zeitindex
$L_{S,d,w}$	Stromsollwertabhängige Längsinduktivität
$L_{S,q,w}$	Stromsollwertabhängige Querinduktivität
$L_{S,d}$	Stromistwertabhängige Längsinduktivität
$L_{S,q}$	Stromistwertabhängige Querinduktivität
$\bar{L}_{S,max}$	Mittelwert
$u_{St,beg,d,k}$	Steuerspannungslängskomponente
$u_{St,beg,q,k}$	Steuerspannungsquerkomponente
$\underline{u}_{St,beg}^r$	Steuerspannungsraumzeiger
\underline{u}_P^r	Polradspannungsraumzeiger
\underline{v}_i^r	Ausgangsgröße
\underline{v}_T^r	Ausgangsgröße

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 7187155 B2 [\[0005\]](#)

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Nuß, Ulrich: „Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe“, Seite 222, Berlin, Offenbach, VDE Verlag, 2010 [\[0025\]](#)

Patentansprüche

1. Verfahren zum Regeln eines Statorstroms einer Drehfeldmaschine (10) mittels einer Stromregel-einrichtung (36), bei welchem Verfahren wenigstens ein Wert für den Statorstrom als Eingangswert ($i_{S,d,w,k}$, $i_{S,q,w,k}$, $i_{S,d}$, $i_{S,q}$) empfangen und in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Eingangswert ($i_{S,d,w,k}$, $i_{S,q,w,k}$, $i_{S,d}$, $i_{S,q}$) wenigstens ein Induktivitätswert ($L_{S,d}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})$, $L_{S,q}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})$, $L_{S,d}(i_{S,d}, i_{S,q})$, $L_{S,q}(i_{S,d}, i_{S,q})$) für eine Induktivität der Drehfeldmaschine (10) ermittelt wird; **dadurch gekennzeichnet**, dass der wenigstens eine Eingangswert ($i_{S,d,w,k}$, $i_{S,q,w,k}$, $i_{S,d}$, $i_{S,q}$) mit einem des wenigstens einen ermittelten Induktivitätswerts ($L_{S,d}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})$, $L_{S,q}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})$, $L_{S,d}(i_{S,d}, i_{S,q})$, $L_{S,q}(i_{S,d}, i_{S,q})$) multipliziert und das so jeweils erhaltene Produkt als Stromeingangswert an einen Eingang der Stromregel-einrichtung (36) übertragen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als ein Eingangswert ein Istwert ($i_{S,d}$) einer Längskomponente des Statorstroms und als ein weiterer Eingangswert ein Istwert einer Querkomponente ($i_{S,q}$) des Statorstroms empfangen wird und zumindest ein Induktivitätswert ($L_{S,d}(i_{S,d}, i_{S,q})$, $L_{S,q}(i_{S,d}, i_{S,q})$) in Abhängigkeit von zumindest einem der empfangenen Istwerte ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass als ein Eingangswert ein Sollwert ($i_{S,d,w,k}$) für eine Längskomponente des Statorstroms und als ein weiterer Eingangswert ein Sollwert ($i_{S,q,w,k}$) für eine Querkomponente des Statorstroms empfangen wird und zumindest ein Induktivitätswert ($L_{S,d}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})$, $L_{S,q}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})$) in Abhängigkeit von zumindest einem der empfangenen Sollwerte ermittelt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mittels der Stromregel-einrichtung ein Statorstrom einer Asynchronmaschine geregelt wird und zumindest ein Induktivitätswert ermittelt wird, welcher einer totalen Streuinduktivität oder einer dazu proportionalen Größe entspricht.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mittels der Stromregel-einrichtung ein Statorstrom einer permanentmagneterregten Synchronmaschine gesteuert wird und wenigstens ein Induktivitätswert ermittelt wird, welcher einer Statorlängsinduktivität ($L_{S,d}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})$, $L_{S,d}(i_{S,d}, i_{S,q})$) oder einer dazu proportionalen Größe entspricht, und wenigstens ein weiterer Induktivitätswert ermittelt wird, welcher einer Statorquerinduktivität ($L_{S,q}(i_{S,d,w}, i_{S,q,w})$, $L_{S,q}(i_{S,d}, i_{S,q})$) oder einer dazu proportionalen Größe entspricht.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens

ein Induktivitätswert mittels eines Kennlinienspeichers (20, 24, 28, 32) gebildet wird, in welchem wenigstens eine Kennlinie für eine Abhängigkeit der Induktivität von zumindest einem der Eingangswerte gespeichert ist.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der wenigstens eine Eingangswert zusätzlich zur Multiplikation mit dem einen des wenigstens einen ermittelten Induktivitätswerts noch auf einen Wert einer Bezugsgröße ($\bar{L}_{S,max}$) bezogen wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Stromregel-einrichtung (36) eine feldorientierte Stromregelung durchgeführt wird.

9. Vorrichtung zum Regeln eines Statorstroms einer Drehfeldmaschine, umfassend:

- eine Statorstrom-Messeinrichtung (16) zum Ermitteln wenigstens eines Istwerts eines Statorstroms als einen Ist-Eingangswert;
- eine Sollwert-Empfangseinrichtung (14) zum Empfangen eines Sollwerts für den Statorstrom als einen Soll-Eingangswert;
- wenigstens eine Bestimmungseinrichtung (20, 24, 28, 32) zum Bestimmen eines Induktivitätswerts für eine Induktivität der Drehfeldmaschine in Abhängigkeit von zumindest einem der Eingangswerte;
- wenigstens eine Multipliziereinrichtung (18, 22, 26, 30), welche mit einer der wenigstens einen Bestimmungseinrichtungen gekoppelt ist und welche dazu ausgelegt ist, durch Multiplizieren eines der Eingangswerte mit einem Induktivitätswert der Bestimmungseinrichtung, mit welcher sie gekoppelt ist, einen skalierten Eingangswerts zu bilden;
- eine Stromregel-einrichtung (36), welche dazu ausgelegt ist, die skalierten Eingangswerte aller Multipliziereinrichtungen an einem Eingang zu empfangen und in Abhängigkeit von den empfangenen skalierten Eingangswerten eine Steuerspannung an einem Ausgang zu erzeugen.

10. Kraftwagen mit einer Vorrichtung gemäß Anspruch 9.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

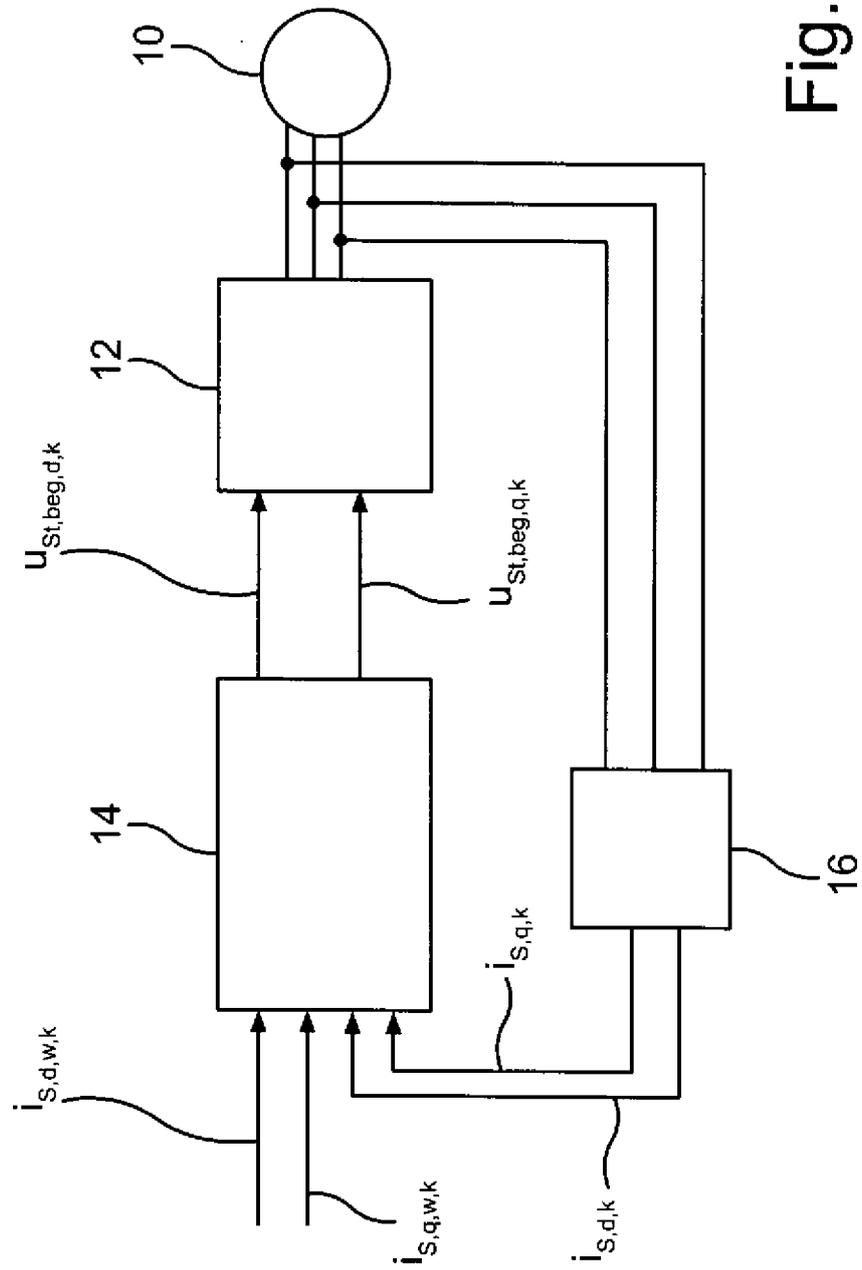


Fig.1

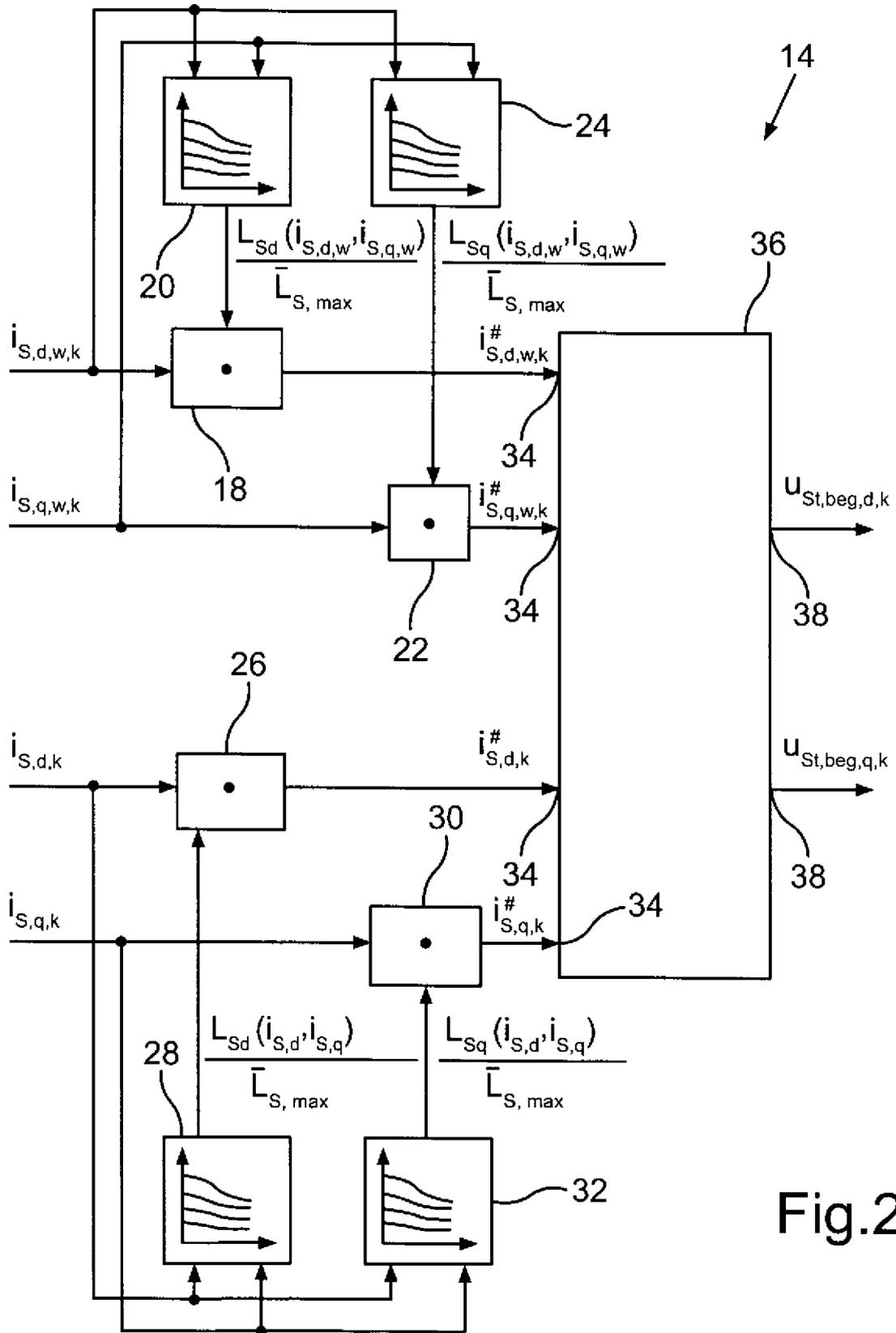


Fig.2

