



(10) **DE 10 2009 046 583 A1** 2011.05.12

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2009 046 583.9**

(22) Anmeldetag: **10.11.2009**

(43) Offenlegungstag: **12.05.2011**

(51) Int Cl.: **H02P 23/12 (2006.01)**
H02P 29/02 (2006.01)

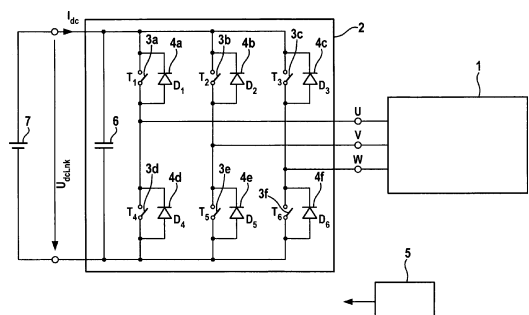
(71) Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Schleser, Roland, 74245 Löwenstein, DE; Raichle, Daniel, 71735 Eberdingen, DE; Heidrich, Torsten, 71665 Vaihingen, DE; Mikulec, Dragan, 70372 Stuttgart, DE; Goetting, Gunther, 70469 Stuttgart, DE; Hanel, Stephan, 71706 Markgröningen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Plausibilisieren des Drehmomentes einer elektrischen Maschine und Maschinenregler zur Regelung einer elektrischen Maschine und zur Durchführung des Verfahrens**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Plausibilisieren eines anhand eines Maschinenmodells berechneten Drehmomentes ($\text{Trq}_{\text{EmMdl}}$) einer elektrischen Maschine (1), bei dem aus dem berechneten Drehmoment ($\text{Trq}_{\text{EmMdl}}$) und einer Drehzahl (n) der elektrischen Maschine (1) ein erster Wert ($\text{Pwr}_{\text{EmMdl}}$) einer elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) bestimmt wird. Aus den Statorströmen (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) und den Statorstrangspannungen (U_{sU} , U_{sV} , U_{sW}) werden Statorstromkomponenten (I_{sA} , I_{sB}) bzw. Statorstrangspannungskomponenten (U_{sA} , U_{sB}) bezüglich eines statorfesten Bezugssystems berechnet. Aus den Statorstromkomponenten (I_{sA} , I_{sB}) und den Statorstrangspannungskomponenten (U_{sA} , U_{sB}) wird ein zweiter Wert ($\text{Pwr}_{\text{EmSens}}$) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) bestimmt. Falls eine Abweichung des ersten Wertes ($\text{Pwr}_{\text{EmMdl}}$) der elektromagnetischen Leistung von dem zweiten Wert ($\text{Pwr}_{\text{EmSens}}$) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) einen vorgegebenen Leistungs-Schwellenwert ($\text{Pwr}_{\text{ErrLim}}$) übersteigt, wird das anhand des Maschinenmodells berechnete Drehmoment ($\text{Trq}_{\text{EmMdl}}$) der elektrischen Maschine (1) als unplausibel eingestuft.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Plausibilisierung eines anhand eines Maschinenmodells berechneten Drehmomentes einer elektrischen Maschine und einen Maschinenregler zur Regelung einer elektrischen Maschine und zur Durchführung des Verfahrens.

Stand der Technik

[0002] Für den Antrieb in Hybrid- oder Elektrofahrzeugen werden in der Regel elektrische Maschinen in Form von Drehfeldmaschinen eingesetzt, welche in Verbindung mit Wechselrichtern – häufig auch als Inverter bezeichnet – betrieben werden. Die elektrischen Maschinen werden dabei wahlweise im Motor- oder Generatorbetrieb betrieben. Im Motorbetrieb erzeugt die elektrische Maschine ein Antriebsmoment, welches beim Einsatz in einem Hybridfahrzeug einen Verbrennungsmotor, zum Beispiel in einer Beschleunigungsphase, unterstützt. Im Generatorbetrieb erzeugt die elektrische Maschine elektrische Energie, die in einem Energiespeicher, wie zum Beispiel einer Batterie oder einem Super-Cap gespeichert wird. Betriebsart und Leistung der elektrischen Maschine werden mittels einer Regeleinheit – häufig als Maschinenregler bezeichnet – über den Wechselrichter eingestellt.

[0003] Es ist bekannt, eine kontinuierliche Momentenüberwachung zur Aufdeckung von Fehlfunktionen in einem Maschinenregler einer elektrischen Maschine durchzuführen. Dies dient insbesondere dem Schutz von Fahrzeuginsassen sowie externen Verkehrsteilnehmern. Es soll eine Momentenüberhöhung und eine dadurch bedingte ungewollte Beschleunigung oder Verzögerung des Fahrzeugs verhindert werden. Der Kern einer kontinuierlichen Momentenüberwachung ist dabei der Vergleich eines von der elektrischen Maschine bereitgestellten Ist-Drehmomentes mit einem zulässigen Drehmoment. Im Normalfall ist das Ist-Drehmoment kleiner als das zulässige Drehmoment. Falls das Ist-Drehmoment das zulässige Drehmoment übersteigt, liegt ein Fehler im Maschinenregler der elektrischen Maschine vor und eine zu einem sicheren Fahrzeugzustand führende Fehlerreaktion wird eingeleitet.

[0004] In herkömmlichen Fahrzeugen wird das Drehmoment der elektrischen Maschine üblicherweise anhand eines mathematischen Maschinenmodells berechnet. Aufgabe der Momentenüberwachung ist es demzufolge, das von einem Maschinenregler modellbasiert berechnete elektromagnetische Drehmoment zu plausibilisieren.

[0005] Aus der WO 2007/025839 A1 ist ein Verfahren zur Steuerung einer Fahrzeug-Antriebseinheit mit mindestens zwei einzelnen Motoren bekannt, bei dem ein Gesamt-Ist-Moment kontinuierlich mit einem zulässigen Gesamtmoment verglichen wird. Dabei wird das Gesamt-Ist-Moment aus Einzel-Ist-Momentwerten der mindestens zwei einzelnen Motoren und das zulässige Gesamtmoment aus zulässigen Einzelmomentwerten der mindestens zwei einzelnen Motoren berechnet. Eine Fehlerreaktion wird dann eingeleitet, wenn das Vergleichen ergibt, dass das Gesamt-Ist-Moment größer ist als das zulässige Gesamtmoment.

Offenbarung der Erfindung

[0006] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Plausibilisieren eines anhand eines mathematischen Maschinenmodells einer elektrischen Maschine berechneten Drehmomentes wird abhängig von dem berechneten Drehmoment und einer Drehzahl der elektrischen Maschine ein erster Wert einer elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine bestimmt. Außerdem werden Statorströme – häufig auch als Phasenströme bezeichnet – und Statorstrangspannungen – häufig auch als Stator- oder Phasenspannungen bezeichnet – in den Phasen der elektrischen Maschine ermittelt. Aus den Statorströmen und den Statorstrangspannungen werden Statorstromkomponenten bzw. Statorstrangspannungskomponenten bezüglich eines statorfesten Bezugssystems berechnet. Abhängig von den Statorstromkomponenten und den Statorstrangspannungskomponenten wird ein zweiter Wert der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine bestimmt, welcher anschließend mit dem ersten Wert der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine verglichen wird. Ergibt sich dabei, dass der zweite Wert der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine um mehr als einen vorgegebenen Schwellenwert von dem ersten Wert der elektromagnetischen Leistung und der elektrischen Maschine abweicht, so wird das anhand des Maschinenmodells der elektrischen Maschine berechnete Drehmoment als unplausibel eingestuft und infolgedessen eine Fehlfunktion des Maschinenreglers detektiert. Als Folge der Fehlerdetektion kann die elektrische Maschine in einen sicheren Betriebszustand überführt werden oder auch ganz abgeschaltet werden.

[0007] Die Plausibilisierung des anhand des Maschinenmodells berechneten elektromagnetischen Drehmomentes beruht somit im Kern auf einer Leistungsbilanz zwischen einer maschinenmodellbasiert ermittelten Leistung (erster Wert der elektromagnetischen Leistung) und einer sensorbasiert ermittelten Vergleichsleistung. Dabei wird der als Vergleichsleistung dienende zweite Wert der elektromagnetischen Leistung auf Basis der Statorströme und Statorstrangspannungen der elektrischen Maschine, insbesondere einer Synchron-, Asynchron-, Reluktanz- oder bürstenlosen Gleichstrom-Maschine, berechnet. Eine Messung des Zwischenkreisstromes und somit eine entsprechende Stromsensorik sind zur Ermittlung der Vergleichsleistung nicht erforderlich, was Kosten spart.

[0008] Gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren geht auch der Flusswinkel nicht in die Berechnung der Vergleichsleistung ein. Dies bietet die zusätzliche Möglichkeit einer Plausibilisierung des Flusswinkels mit Hilfe der berechneten sensorbasiert ermittelten Vergleichsleistung.

[0009] Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung gibt das Maschinenmodell eine Polpaarzahl, einen Längsstrom, einen Querstrom, einen Erregerfluss sowie Längs- und Querinduktivitäten der elektrischen Maschine vor, aus welchen das Drehmoment der elektrischen Maschine berechnet wird. Der Längs- und Querstrom der elektrischen Maschine bezeichnen dabei Statorstromkomponenten in den beiden orthogonalen Richtungen eines feldorientierten Bezugssystems und repräsentieren Statorstrom-Sollwerte in Abhängigkeit von der Art und dem Zustand der elektrischen Maschine. Die Längs- und Querinduktivitäten bezeichnen maschinenspezifische Statorinduktivitäten in den beiden Richtungen des feldorientierten Bezugssystems.

[0010] Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung wird mindestens einer der Statorströme gemessen und alle nicht gemessenen Statorströme werden unter Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften der Statorströme modellbasiert berechnet.

[0011] Werden alle Statorströme mit Hilfe von Stromsensoren gemessen, ist es möglich, durch Auswertung der Statorströme einen Fehler in der Stromsensorik zu detektieren. Dabei wird ausgenutzt, dass die Summe der Statorströme in einem idealen System Null sein muss, so dass ein Fehler detektiert werden kann, falls die Summe der Statorströme einen vorgegebenen ersten Statorstrom-Schwellenwert überschreitet. Auf diese Weise wird ohne zusätzlichen schaltungstechnischen Aufwand eine Fehlererkennung für die Stromsensorik realisiert.

[0012] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung werden die Statorstrangspannungen rechnerisch ermittelt. Ein der elektrischen Maschine vorgeschalteter Wechselrichter weist in der Regel für jede der Phasen der elektrischen Maschine eine Leistungsendstufe auf, welche auch Leistungsschaltelemente umfasst. Diese Leistungsschaltelemente werden von dem Maschinenregler üblicher Weise über pulsweitenmodulierte Steuersignale angesteuert. Aus diesen Steuersignalen lassen sich die Tastverhältnisse für die einzelnen Phasen der elektrischen Maschine unmittelbar ermitteln. Mit Hilfe dieser Tastverhältnisse und einer Zwischenkreisspannung, welche messtechnisch ermittelt werden kann, können die Statorstrangspannungen berechnet werden. Auf eine Messung der Statorstrangspannungen, welche grundsätzlich auch möglich ist, kann auf diese Weise verzichtet werden.

[0013] Bei der Ermittlung der Statorstrangspannungen können auch Fehlerspannungen berücksichtigt werden, welche vorteilhaft aus einem Fehlerspannungs-Kennfeld in Abhängigkeit von den Statorströmen und der Zwischenkreisspannung ausgelesen werden.

[0014] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung wird bei der Bestimmung des zweiten Wertes der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine eine aktuelle Verlustleistung der elektrischen Maschine berücksichtigt, wobei diese vorteilhaft aus einem Verlustleistungs-Kennfeld in Abhängigkeit von den Statorströmen und der Drehzahl der elektrischen Maschine ausgelesen wird.

[0015] Bei kleinen Drehzahlen ist es aufgrund der damit verbundenen kleinen Leistungen sinnvoll, den kritischen Betriebszustand einer ungewollten Momentenüberhöhung über einen zusätzlichen Fehlerpfad abzusichern. Im Grunddrehzahlbereich der elektrischen Maschine kann der Betrag eines maximal wirksamen Drehmoments direkt aus dem Betrag des Statorstroms ermittelt werden. Im fehlerfreien Betrieb entspricht das eingestellte Soll-Drehmoment maximal diesem Maximalwert. Abweichungen sind je nach Temperatur der Elektromaschine und ihres Rotors möglich. Somit kann im Grunddrehzahlbereich der elektrischen Maschine in Abhängigkeit von einem Betrag eines Soll-Drehmoments der Betrag eines Soll-Statorstroms ermittelt werden. Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung wird der auf diese Weise ermittelte Betrag des Soll-Statorstroms mit dem Betrag eines Ist-Statorstroms verglichen und das anhand des Maschinenmodells berechnete Dreh-

moment der elektrischen Maschine wird dann als unplausibel eingestuft, wenn eine Abweichung des Betrages des Soll-Statorstroms von dem Betrag des Ist-Statorstroms einen vorgegebenen zweiten Statorstrom-Schwellenwert übersteigt. Der Betrag des Soll-Statorstromes wird dabei vorteilhaft aus einem Statorstromkennfeld in Abhängigkeit von dem Soll-Drehmoment ausgelesen.

[0016] Außerdem kann abhängig von dem zweiten Wert der elektromagnetischen Leistung und der Drehzahl der elektrischen Maschine ein Vorzeichen des wirksamen Drehmomentes ermittelt werden. Ist das Vorzeichen des wirksamen Drehmomentes ungleich dem Vorzeichen des Soll-Drehmomentes kann das anhand des Maschinenmodells berechnete Drehmoment ebenfalls als unplausibel eingestuft werden.

[0017] Durch Ausnutzung der Abhängigkeit des Drehmoment-Betrages von dem Betrag des Statorstroms im Grunddrehzahlbereich wird in diesem Bereich auf einfache Weise ein zusätzlicher Fehlerpfad geschaffen, welcher die Betriebssicherheit der elektrischen Maschine weiter erhöht.

[0018] Ein erfindungsgemäßer Maschinenregler zur Regelung einer elektrischen Maschine und zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens umfasst Mittel zum Bestimmen eines ersten Wertes einer elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine aus einem anhand eines Maschinenmodells berechneten Drehmoment und einer Drehzahl der elektrischen Maschine, Mittel zum Berechnen von Statorstromkomponenten und Statorstrangspannungskomponenten bezüglich eines statorfesten Bezugssystems aus Statorströmen bzw. Statorstrangspannungen, Mittel zum Bestimmen eines zweiten Wertes der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine aus den Statorstromkomponenten und den Statorstrangspannungskomponenten, Mittel zum Vergleichen des ersten Wertes der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine mit dem zweiten Wert der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine und Mittel zur Fehlererkennung anhand der Abweichung des ersten Wertes der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine von dem zweiten Wert der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine.

[0019] Weitere Merkmale und Vorteile von Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung mit Bezug auf die beigelegte Figur, welche ein schematisches Blockschaltbild einer elektrischen Maschine sowie eines Wechselrichters mit einem erfindungsgemäßen Motorregler.

Beschreibung der Ausführungsbeispiele

[0020] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Darstellung einer dreiphasigen elektrischen Maschine **1**, welche beispielsweise als Synchron-, Asynchron-, Reluktanz- oder bürstenlose Gleichstrom-Maschine ausgeführt sein kann, mit einem daran angeschlossenen Pulswechselrichter **2**. Der Pulswechselrichter **2** umfasst Leistungsschalter **3a–3f**, welche mit einzelnen Phasen U, V, W der elektrischen Maschine **1** verbunden sind und die Phasen U, V, W entweder gegen ein hohes Versorgungsspannungspotential in Form einer Zwischenkreis-Spannung U_{dcLnk} oder ein niedriges Bezugspotential in Form von Masse schalten. Die mit der Zwischenkreis-Spannung U_{dcLnk} verbundenen Schalter **3a–3c** werden dabei auch als „High-Side-Schalter“ und die mit Masse verbundenen Schalter **3d–3f** als „Low-Side-Schalter“ bezeichnet. Der Pulswechselrichter **2** umfasst ferner mehrere Freilaufdioden **4a–4f**, welche jeweils parallel zu einem der Schalter **3a–3f** angeordnet sind.

[0021] Der Pulswechselrichter **2** bestimmt Leistung und Betriebsart der elektrischen Maschine und wird von einem Maschinenregler **5**, welcher in [Fig. 1](#) lediglich schematisch dargestellt ist und auch in den Wechselrichter integriert sein kann, entsprechend angesteuert. Die elektrische Maschine **1** kann dabei wahlweise im Motor- oder Generatorbetrieb betrieben werden.

[0022] Der Pulswechselrichter **2** umfasst außerdem einen sogenannten Zwischenkreis-Kondensator **6**, welcher im Wesentlichen zur Stabilisierung einer Batteriespannung dient. Das Bordnetz des Fahrzeugs mit einer Batterie **7** ist parallel zum Zwischenkreis-Kondensator **6** geschaltet.

[0023] Die elektrische Maschine **1** ist im dargestellten Ausführungsbeispiel dreiphasig ausgeführt, kann aber auch mehr oder weniger als drei Phasen aufweisen. In dem Maschinenregler wird das elektromagnetische Drehmoment Trq_{EmMdl} der elektrischen Maschine **1** anhand eines mathematischen Maschinenmodells in Abhängigkeit von den maschinenspezifischen Parametern Polpaarzahl, Längsstrom, Querstrom, Erregerfluss sowie Längs- und Querinduktivitäten der elektrischen Maschine nach folgender Gleichung berechnet:

$$Trq_{EmMdl} = 3 \cdot p \cdot I_{sq} \cdot (\Psi_{Exc} + I_{sd}(L_{sd} - L_{sq})) \quad (1)$$

mit

$\text{Trq}_{\text{EmMdl}}$	Elektromagnetisches Drehmoment der Maschine (berechnet aus Modelldaten)
p	Polpaarzahl der Maschine
I_{sd}	Längsstrom der Maschine (Statorstrangspannung in d-Richtung eines feldorientierten Bezugssystems)
I_{sq}	Querstrom der Maschine (Statorstrangspannung in q-Richtung eines feldorientierten Bezugssystems)
Ψ_{Exc}	Erregerfluss der Maschine
L_{sd}, L_{sq}	Statorinduktivitäten in d- bzw. q-Richtung des feldorientierten Bezugssystems

[0024] Der Index "Mdl" deutet hier und im Folgenden darauf hin, dass die Berechnung der entsprechenden Größe ausschließlich auf Modelldaten beruht.

[0025] Es ist auch denkbar die modellbasierte Berechnung des Drehmomentes in einer von dem Maschinenregler **5** getrennten Einheit auszuführen und dem Maschinenregler **5** lediglich das Berechnungsergebnis zur Verfügung zu stellen.

[0026] Ein erster Wert der elektromagnetischen Leistung $\text{Pwr}_{\text{EmMdl}}$ der elektrischen Maschine **1** wird gemäß der Gleichung

$$\text{Pwr}_{\text{EmMdl}} = \text{Trq}_{\text{EmMdl}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (2)$$

berechnet, wobei n die Drehzahl der elektrischen Maschine **1** bezeichnet, welche zum Beispiel mit Hilfe eines Drehzahlsensors gemessen werden kann.

[0027] Alternativ dazu kann die Drehzahl n auch aus einem Winkeldifferential $((\alpha_2 - \alpha_1)/(t_2 - t_1))$ zweier zeitlich versetzt zum Zeitpunkt t_1 und t_2 gemessener Stromzeiger ($|I_1| \cdot \exp(i\alpha_1)$ und $|I_2| \cdot \exp(i\alpha_2)$) der elektrischen Maschine **1** berechnet werden. Auf diese Weise kann auf die Messung der Drehzahl n der elektrischen Maschine **1** verzichtet werden. Für eine Synchronmaschine kann dabei zusätzlich ausgenutzt werden, dass diese über ganze elektrische Umdrehungen im Mittel nur dann ein signifikantes Drehmoment abgeben kann, wenn sie synchron angesteuert wird, so dass sich der Rotor nach dem magnetischen Fluss im Stator und somit nach dem Stromzeiger ausrichtet. Das heißt eine Synchronmaschine kann nur dann ein Drehmoment über vollständige elektrische Umdrehungen abgeben, wenn die tatsächliche Drehzahl der elektrischen Maschine synchron zum Winkeldifferential verläuft.

[0028] Wird die Drehzahl n der elektrischen Maschine **1** aber dennoch gemessen, so kann die anhand des Winkeldifferentials berechnete Drehzahl zur Plausibilisierung des Drehzahlsignals des Drehzahlsensors und somit zur Fehlererkennung für die Drehzahlsensorik genutzt werden.

[0029] Statorströme I_{sU} , I_{sV} und I_{sW} in den Phasen U, V bzw. W der elektrischen Maschine **1** werden über drei, in [Fig. 1](#) nicht dargestellte, Stromsensoren gemessen. Sofern der Sternpunkt der elektrischen Maschine nicht geerdet ist oder die Maschinenwicklungen im Dreieck verschaltet sind, muss die Summe der Statorströme gemäß Gleichung (3) Null sein.

$$I_{sU} + I_{sV} + I_{sW} = 0 \quad (3)$$

[0030] Dieser Zusammenhang kann ausgenutzt werden, um einen Fehler in der Stromsensorik zur Messung der Statorströme zu detektieren. Dazu wird der Betrag der Stromsumme mit einem parametrierbaren ersten Statorstrom-Schwellenwert I_{sLim} verglichen. Bei Überschreiten dieses Schwellenwertes wird ein Fehler in der Stromsensorik detektiert.

$$|I_{sU} + I_{sV} + I_{sW}| > I_{sLim} \Rightarrow \text{Fehler!} \quad (4)$$

[0031] Alternativ zur Messung aller Phasenströme ist es auch möglich, nur einen oder zumindest nur einen Teil der Phasenströme zu messen und die übrigen Phasenströme unter Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften modellbasiert zu berechnen. Die beschriebene Plausibilitätsprüfung und die damit verbundene Fehlererkennung in der Stromsensorik sind dann jedoch nicht möglich.

[0032] Aus den Statorströmen I_{sU} , I_{sV} und I_{sW} werden gemäß Gleichung (5) Statorstromkomponenten I_{sA} und I_{sB} in A- und B-Richtung eines statorfesten Bezugssystem – im Weiteren als A/B-System bezeichnet – berechnet.

$$\begin{pmatrix} I_{sA} \\ I_{sB} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{sU} \\ I_{sV} \\ I_{sW} \end{pmatrix} \quad (5)$$

[0033] Mit Hilfe eines gemessenen oder modellbasiert berechneten Flusswinkels α können aus den Statorstromkomponenten I_{sA} und I_{sB} im statorfesten A/B-System zwei Stromkomponenten I_{sd} und I_{sq} in d-Richtung (Längsrichtung) bzw. q-Richtung (Querrichtung) eines feldorientierten Bezugssystems – im Weiteren als d/q-System bezeichnet berechnet werden (vgl. Gleichung (6)). Diese Statorstromkomponenten I_{sd} und I_{sq} im d/q-System dienen als Rückführgrößen bei der Regelung der elektrischen Maschine 1.

$$\begin{pmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{Flx} & \sin \alpha_{Flx} \\ -\sin \alpha_{Flx} & \cos \alpha_{Flx} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{sA} \\ I_{sB} \end{pmatrix} \quad (6)$$

[0034] Der Flusswinkel α_{Flx} stellt dabei den Flusswinkel im statorfesten A/B-System dar.

[0035] Aus den pulsweitenmodulierten Ansteuersignalen der Leistungsschalter **3a** bis **3f** können die Tastverhältnisse dyc_U , dyc_V und dyc_W für die einzelnen Phasen U, V bzw. W unmittelbar ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Tastverhältnisse können die wirksamen Statorstrangspannungen U_{sU} , U_{sV} und U_{sW} rekonstruiert werden. Hierzu muss zusätzlich eine aktuelle Zwischenkreisspannung U_{dcLnk} gemessen werden. Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung werden auch aktuelle Fehlerspannungen U_{sUErr} , U_{sVErr} und U_{sWErr} berücksichtigt, welche vorteilhaft aus einem Kennfeld in Abhängigkeit von den Statorströmen I_{sU} , I_{sV} und I_{sW} und der Zwischenkreisspannung U_{dcLnk} ausgelesen werden. Die Fehlerspannungen U_{sUErr} , U_{sVErr} und U_{sWErr} sind dabei bedingt durch Totzeiten und nichtideales Schaltverhalten der Leistungsschalter **3a–3f**.

[0036] Die Statorstrangspannungen U_{sU} , U_{sV} und U_{sW} ergeben sich somit zu

$$\begin{pmatrix} U_{sU} \\ U_{sV} \\ U_{sW} \end{pmatrix} = c_{PWM} \cdot U_{dcLnk} \cdot \begin{pmatrix} dyc_U \\ dyc_V \\ dyc_W \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} U_{sUErr} \\ U_{sVErr} \\ U_{sWErr} \end{pmatrix} \quad (7)$$

mit

c_{PWM} Faktor zur Umrechnung der Zwischenkreisspannung U_{dcLnk} in eine maximal mögliche Maschinen-spannung

und

$$U_{sUErr} = KF(I_{sU}, U_{dcLnk}) \quad (8.1)$$

$$U_{sVErr} = KF(I_{sV}, U_{dcLnk}) \quad (8.2)$$

$$U_{sWErr} = KF(I_{sW}, U_{dcLnk}) \quad (8.3)$$

wobei "KF" hier und im Folgenden andeutet, dass die Größe in einem Kennfeld in Abhängigkeit von den in Klammern angegebenen Größen hinterlegt ist.

[0037] Die beiden Strangspannungskomponenten U_{sA} und U_{sB} des Stators im statorfesten A/B-System werden schließlich gemäß Gleichung (10) bestimmt.

$$\begin{pmatrix} U_{sA} \\ U_{sB} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{sU} \\ U_{sV} \\ U_{sW} \end{pmatrix} \quad (9)$$

[0038] Mit Hilfe der Statorstromkomponenten I_{sA} und I_{sB} und der Statorstrangspannungskomponenten U_{sA} und U_{sB} im statorfesten A/B-System kann eine elektrische Wirkleistung Pwr_{EIMa} der elektrischen Maschine 1 gemäß Gleichung (11) berechnet werden.

$$Pwr_{EIMa} = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos\varphi = 3 \cdot (U_{sA} \cdot I_{sA} + U_{sB} \cdot I_{sB}) \quad (10)$$

[0039] Vorteilhaft wird die Verlustleistung $Pwr_{EIMaLos}$ der elektrischen Maschine gemäß Gleichung (11) in einem Kennfeld in Abhängigkeit von dem Betrag I_s des Statorstromes und der Drehzahl n hinterlegt.

$$Pwr_{EIMaLos} = KF(I_s, n) \quad (11)$$

[0040] Der Betrag I_s des Statorstromes kann dabei über die geometrische Summe der beiden orthogonalen Statorstrangspannungskomponenten I_{sA} und I_{sB} des A/B-Systems ermittelt werden.

$$I_s = \sqrt{I_{sA}^2 + I_{sB}^2} \quad (12)$$

[0041] Der zweite Wert Pwr_{EmSens} der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine 1 ergibt sich somit zu

$$Pwr_{EmSens} = Pwr_{EIMa} - Pwr_{EIMaLos} \quad (13)$$

[0042] Der Index „Sens“ deutet dabei darauf hin, dass zur Berechnung der Leistung keine Modelldaten, sondern ausschließlich Sensordaten verwendet werden.

[0043] Die Plausibilisierung des mit Hilfe des Maschinenmodells berechneten elektromagnetischen Drehmomentes Trq_{EmMdl} erfolgt über eine Leistungsbilanz. Dabei wird die Leistung, welche das elektromagnetische Drehmoment erzeugt, einerseits aus dem Maschinenmodell gemäß Gleichung (2) und andererseits aus den Sensordaten gemäß Gleichung (13) bestimmt.

[0044] Aus der Differenz dieser beiden Werte kann ein Leistungsfehler

$$Pwr_{Err} = Pwr_{EmMdl} - Pwr_{EmSens} \quad (14)$$

berechnet werden, der im Idealfall Null ist und im Normalbetrieb kleine Werte annimmt. Überschreitet der Betrag des so berechneten Leistungsfehlers Pwr_{Err} einen vorgegebenen parametrierbaren Leistungs-Schwellenwert Pwr_{ErrLim} , so wird das anhand des Maschinenmodells berechnete Drehmoment als unplausibel eingestuft und dementsprechend ein Fehler detektiert.

$$|Pwr_{Err}| > Pwr_{ErrLim} \Rightarrow \text{Fehler!} \quad (15)$$

[0045] Als Folge der Fehlerdetektion kann dann eine Ersatzreaktion angestoßen werden, welche einen sicheren Betrieb der elektrischen Maschine 1 gewährleistet.

[0046] Bei kleinen Drehzahlen ist es aufgrund der damit verbundenen kleinen Leistungen sinnvoll, den kritischen Betriebszustand einer ungewollten Momentenüberhöhung über einen zusätzlichen Fehlerpfad abzusichern.

[0047] Im Grunddrehzahlbereich kann der Betrag eines maximal wirksamen Drehmomentes direkt aus dem Betrag I_s des Statorstroms ermittelt werden. Der Betrag des Statorstroms kann wiederum über die geometrische Summe der beiden Orthogonalen Statorstromkomponenten im statorfesten A/B-System gemäß Gleichung (12) ermittelt werden. Die Abhängigkeit des Betrages des maximal wirksamen Drehmomentes von dem

Betrag des Statorstroms kann vorteilhaft in einer Kennlinie gespeichert werden und ist für jeden Maschinentyp charakteristisch. Dabei gilt:

$$|Trq_{Em}|_{Max} = Trw_{EmAbsMax} = KL(I_s) \quad (16)$$

[0048] Im fehlerfreien Betrieb entspricht das eingestellte Drehmoment genau diesem Maximalwert. Über die Umkehrfunktion kann für jedes geforderte Soll-Drehmoment Trq_{EmDes} der zugehörige Statorstrom-Sollwert I_{sDes} bestimmt werden.

$$I_{sDes} = KL^{-1}(Trq_{EmDes}) \quad (17)$$

[0049] Solange ein Stromfehler I_{sErr} (vgl. Gleichung (18)) unterhalb eines vorgegebenen parametrierbaren zweiten Statorstrom-Schwellenwertes $I_{sErrLim}$ bleibt, ist der Betrag des wirksamen Drehmoments Trq_{Em} kleiner oder gleich dem Betrag des Soll-Drehmoments Trq_{EmDes} . Ansonsten ist ein Fehlerfall zu detektieren.

$$I_{sErr} = I_{sDes} - I_s \quad (18)$$

$$|I_{sErr}| \leq I_{sErrLim} \Rightarrow |Trq_{Em}| \leq |Trq_{EmDes}| \quad (19)$$

$$|I_{sErr}| > I_{sErrLim} \Rightarrow \text{Fehler!} \quad (20)$$

[0050] Außerdem kann auch eine Prüfung des Vorzeichens des wirksamen Drehmomentes Trq_{Em} erfolgen. Dies geschieht wie in Gleichung (21) gezeigt, mit Hilfe des Vorzeichens der elektromagnetischen Leistung Pwr_{EmSens} gemäß Gleichung (13) und der Drehzahl n der elektrischen Maschine 1.

$$sgn(Trq_{Em}) = \frac{sgn(Pwr_{EmSens})}{sgn(n)} \quad (21)$$

[0051] Wenn das auf diese Weise berechnete Vorzeichen nicht mit dem Vorzeichen des Soll-Drehmoments Trq_{EmDes} übereinstimmt, wird ebenfalls ein Fehler detektiert.

$$sgn(Trq_{Em}) \neq sgn(Trq_{EmDes}) \Rightarrow \text{Fehler!} \quad (22)$$

[0052] Wie sich aus den Gleichungen (19) und (20) ergibt, führt der Fall, dass das wirksame Trq_{Em} Drehmoment betragsmäßig kleiner ist als der Betrag des Soll-Drehmoments Trq_{EmDes} über den beschriebenen zusätzlichen Fehlerpfad nicht automatisch zu einer Fehlerdetektion. Dieser weniger kritische Fehlerfall kann aber auch im Grunddrehzahlbereich über die erfindungsgemäße Leistungsbilanz abgefangen werden.

ZITATE ENTHALTEN 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

- WO 2007/025839 A1 [\[0005\]](#)

Patentansprüche

1. Verfahren zum Plausibilisieren eines anhand eines Maschinenmodells berechneten Drehmomentes ($\text{Trq}_{\text{EmMdl}}$) einer elektrischen Maschine (1) bei dem
 - aus dem berechneten Drehmoment ($\text{Trq}_{\text{EmMdl}}$) und einer Drehzahl (n) der elektrischen Maschine (1) ein erster Wert ($\text{Pwr}_{\text{EmMdl}}$) einer elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) bestimmt wird,
 - Statorströme (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) und Statorstrangspannungen (U_{sU} , U_{sV} , U_{sW}) in den Phasen (U, V, W) der elektrischen Maschine (1) ermittelt werden,
 - aus den Statorströmen (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) und den Statorstrangspannungen (U_{sU} , U_{sV} , U_{sW}) Statorstromkomponenten (I_{sA} , I_{sB}) bzw. Statorstrangspannungskomponenten (U_{sA} , U_{sB}) bezüglich eines statorfesten Bezugssystems berechnet werden,
 - aus den Statorstromkomponenten (I_{sA} , I_{sB}) und den Statorstrangspannungskomponenten (U_{sA} , U_{sB}) ein zweiter Wert ($\text{Pwr}_{\text{EmSens}}$) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) bestimmt wird,
 - der erste Wert ($\text{Pwr}_{\text{EmMdl}}$) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) mit dem zweiten Wert ($\text{Pwr}_{\text{EmSens}}$) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) verglichen wird und
 - das anhand des Maschinenmodells berechnete Drehmoment ($\text{Trq}_{\text{EmMdl}}$) der elektrischen Maschine (1) als unplausibel eingestuft wird, falls eine Abweichung des ersten Wertes ($\text{Pwr}_{\text{EmMdl}}$) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) von dem zweiten Wert ($\text{Pwr}_{\text{EmSens}}$) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) einen vorgegebenen Leistungs-Schwellenwert ($\text{Pwr}_{\text{ErrLim}}$) übersteigt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei durch das Maschinenmodell eine Polpaarzahl (p), ein Längsstrom (I_{sd}), ein Querstrom (I_{sq}), ein Erregerfluss (ψ_{Exc}) sowie eine Längsinduktivität (L_{sd}) und eine Querinduktivität (L_{sq}) der elektrischen Maschine (1) vorgegeben wird und aus diesen Parameter das Drehmoment ($\text{Trq}_{\text{EmMdl}}$) der elektrischen Maschine (1) berechnet wird.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei die Drehzahl (n) der elektrischen Maschine gemessen wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei die Drehzahl (n) aus dem Winkeldifferential zweier zeitlich versetzt gemessener Stromzeiger ermittelt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei mindestens einer der Statorströme (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) gemessen wird und alle nicht gemessenen Statorströme (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) rechnerisch ermittelt werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei alle Statorströme (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) gemessen werden und ein Fehler bei der Messung der Statorströme (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) detektiert wird, falls die Summe der Statorströme (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) einen vorgegeben ersten Statorstrom-Schwellenwert (I_{sLim}) übersteigt.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Statorstrangspannungen (U_{sU} , U_{sV} , U_{sW}) rechnerisch ermittelt werden, insbesondere Tastverhältnisse (d_{ycU} , d_{ycV} , d_{ycW}) der einzelnen Phasen (U, V, W) der elektrischen Maschine (1) ermittelt und eine Zwischenkreisspannung (U_{dcLnk}) gemessen werden und aus den Tastverhältnissen (d_{ycU} , d_{ycV} , d_{ycW}) und der Zwischenkreisspannung (U_{dcLnk}) die Statorstrangspannungen (U_{sU} , U_{sV} , U_{sW}) berechnet werden.
8. Verfahren nach Anspruch 6, wobei bei der Ermittlung der Statorstrangspannungen (U_{sU} , U_{sV} , U_{sW}) aktuelle Fehlerspannungen (U_{sUErr} , U_{sVErr} , U_{sWErr}) berücksichtigt werden.
9. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die aktuellen Fehlerspannungen (U_{sUErr} , U_{sVErr} , U_{sWErr}) aus einem Fehlerspannungs-Kennfeld in Abhängigkeit von den Statorströmen (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) und der Zwischenkreisspannung (U_{dcLnk}) ausgelesen werden.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei bei der Bestimmung des zweiten Wertes ($\text{Pwr}_{\text{EmSens}}$) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) eine aktuelle Verlustleistung ($\text{Pwr}_{\text{EIMaLos}}$) der elektrischen Maschine (1) berücksichtigt wird.
11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei die aktuelle Verlustleistung ($\text{Pwr}_{\text{EIMaLos}}$) der elektrischen Maschine (1) aus einem Verlustleistungs-Kennfeld in Abhängigkeit von dem Betrag (I_s) des Statorstromes und der Drehzahl (n) ausgelesen wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im Grunddrehzahlbereich der elektrischen Maschine (1) in Abhängigkeit von einem Betrag eines Soll-Drehmoments (Trq_{EmDes}) der Betrag eines Soll-Statorstroms (I_{sDes}) ermittelt wird, der Betrag des Soll-Statorstroms (I_{sDes}) mit dem Betrag (I_s) des Statorstromes verglichen wird und das anhand des Maschinenmodells berechnete Drehmoment (Trq_{EmMdl}) der elektrischen Maschine (1) als unplausibel eingestuft wird, falls eine Abweichung des Betrages des Soll-Statorstroms (I_{sDes}) von dem Betrag (I_s) des Ist-Statorstroms einen vorgegebenen zweiten Statorstrom-Schwellenwert ($I_{sErrLim}$) übersteigt.

13. Verfahren nach Anspruch 12, wobei der Betrag des Soll-Statorstromes (I_{sDes}) aus einem Statorstromkennfeld in Abhängigkeit von dem Soll-Drehmoment (Trq_{EmDes}) ausgelesen wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 oder 13, wobei abhängig von dem zweiten Wert (Pwr_{EmSens}) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) und der Drehzahl (n) ein Vorzeichen eines wirksamen Drehmomentes (Trq_{Em}) ermittelt wird und das anhand des Maschinenmodells berechnete Drehmoment (Trq_{EmMdl}) als unplausibel eingestuft wird, falls das Vorzeichen des wirksamen Drehmomentes (Trq_{Em}) ungleich dem Vorzeichen des Soll-Drehmomentes (Trq_{EmDes}) ist.

15. Maschinenregler zum Regeln einer elektrischen Maschine und zur Durchführung eines Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 14, mit

- Mitteln zum Bestimmen eines ersten Wertes (Pwr_{EmMdl}) einer elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) aus einem anhand eines Maschinenmodells berechneten Drehmoment (Trq_{EmMdl}) und einer Drehzahl (n) der elektrischen Maschine (1),
- Mitteln zum Berechnen von Statorstromkomponenten (I_{sA} , I_{sB}) und Statorstrangspannungskomponenten (U_{sA} , U_{sB}) bezüglich eines statorfesten Bezugssystems aus Statorströmen (I_{sU} , I_{sV} , I_{sW}) bzw. Statorstrangspannungen (U_{sU} , U_{sV} , U_{sW}),
- Mitteln zum Bestimmen eines zweiten Wertes (Pwr_{EmSens}) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) aus den Statorstromkomponenten (I_{sA} , I_{sB}) und den Statorstrangspannungskomponenten (U_{sA} , U_{sB}),
- Mitteln zum Vergleichen des ersten Wertes (Pwr_{EmMdl}) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) mit dem zweiten Wert (Pwr_{EmSens}) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) und
- Mitteln zur Fehlererkennung anhand der Abweichung des ersten Wertes (Pwr_{EmMdl}) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1) von dem zweiten Wert (Pwr_{EmSens}) der elektromagnetischen Leistung der elektrischen Maschine (1).

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

