



(10) **DE 10 2018 122 674 B4** 2022.06.09

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 122 674.8**
(22) Anmeldetag: **17.09.2018**
(43) Offenlegungstag: **19.03.2020**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **09.06.2022**

(51) Int Cl.: **H02P 21/00 (2016.01)**
H02P 25/08 (2016.01)
H02K 11/35 (2016.01)
H02K 11/33 (2016.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT, 38440
Wolfsburg, DE**

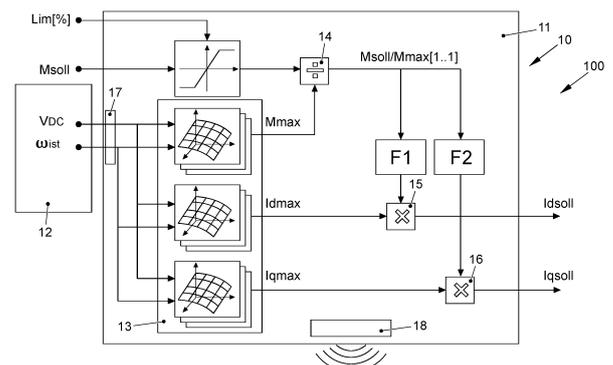
(72) Erfinder:
**Hallmann, Udo, 31246 Lahstedt, DE; Bulakhov,
Vadym, 38102 Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:
**Bals & Vogel Patentanwälte PartG mbB, 44801
Bochum, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:
DE 10 2010 050 344 A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Steuern eines Elektromotors**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Steuern eines Elektromotors (10) in der Form eines Reluktanzmotors, um ein gewünschtes Drehmoment (M_{soll}) des Elektromotors (10) bereitzustellen, das durch zwei Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) in Feldkoordinaten (d , q) erzeugt wird, wobei die Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) durch eine motorseitige Steuereinheit (11) mithilfe von Betriebspunktabhängigen Kennfeldern ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) ermittelt werden, welche ein maximales Drehmoment (M_{max}) des Elektromotors (10) und/oder zwei entsprechende Stromwerte (I_{dmax} , I_{qmax}) in Abhängigkeit von einer angelegten Zwischenkreis-Spannung (V_{DC}) und/oder einer Drehzahl (ω_{ist}) des Elektromotors (10) abbilden, und wobei beim Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) mindestens eine Abbildungsfunktion ($F1$, $F2$) für die Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) berücksichtigt wird, die ein Verhältnis zwischen dem maximalen Drehmoment (M_{max}) und dem gewünschten Drehmoment (M_{soll}) des Elektromotors (10) abbildet, dadurch gekennzeichnet, dass die Betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) bei einer optimalen Betriebstemperatur ($T1$) des Elektromotors (10) modelliert werden, dass beim Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) mindestens ein Korrekturkennfeld ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) berücksichtigt wird, und dass der mindestens ein Korrekturkennfeld ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) bei einer optionalen Betriebstemperatur ($T2$, $T3$) des Elektromotors (10) modelliert wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Steuern eines Elektromotors, insbesondere eines Reluktanzmotors, nach dem Oberbegriff des unabhängigen Verfahrensanspruches. Ferner betrifft die Erfindung einen Elektromotor nach dem Oberbegriff des unabhängigen Vorrichtungsanspruches. Zudem betrifft die Erfindung ein System zum Steuern eines Elektromotors, insbesondere eines Reluktanzmotors, nach dem Oberbegriff des unabhängigen Systemsanspruches.

[0002] Im Antrieb eines Elektroautos wird zumeist eine permanentmagneterregte Synchronmaschine als ein Elektromotor eingesetzt. Ein Nachteil der permanentmagneterregten Synchronmaschine sind höhere Kosten durch die Verwendung von seltenen Erden. Der Einsatz eines Reluktanzmotors als ein Elektromotor stellt eine kostenreduzierte Alternative dar. Für optimale Ausnutzung der Zwischenkreisspannung wird oft eine Regelung eines Elektromotors eingesetzt, die die D-Komponente des Stromes als Stellgröße verwendet. Eine solche Regelung der Zwischenkreisspannung kann bei der Veränderung der Regelstrecke-Parameter jedoch instabil werden. Eine konservative Auslegung der Regler kann wiederum eine nicht ausreichende Regelgeschwindigkeit aufweisen.

[0003] Weiterer Stand der Technik ist aus der gattungsgemäßen Schrift DE 10 2010 050 344 A1 bekannt.

[0004] Die Aufgabe der Erfindung ist es daher, mindestens einen aus dem Stand der Technik bekannten Nachteil beim Regeln von Elektromotoren teilweise zu überwinden. Insbesondere ist es Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zum Steuern eines Elektromotors, insbesondere eines Reluktanzmotors, bereitzustellen, welches einfach und schnell ausgeführt werden kann und welches eine zuverlässige, stabile und sichere Ansteuerung eines Elektromotors ermöglicht.

[0005] Die erfindungsgemäße Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zum Steuern eines Elektromotors, insbesondere eines Reluktanzmotors, mit den Merkmalen des unabhängigen Verfahrensanspruches, insbesondere aus dem kennzeichnenden Teil, durch einen entsprechenden Elektromotor mit den Merkmalen des unabhängigen Vorrichtungsanspruches sowie durch ein System zum Steuern eines Elektromotors, insbesondere eines Reluktanzmotors, mit den Merkmalen des unabhängigen Systemsanspruches, insbesondere aus dem kennzeichnenden Teil. In den abhängigen Ansprüchen sind bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung aufgeführt. Merkmale, die zu den einzelnen Erfindungsaspekten offenbart werden, können in der Weise mit-

einander kombiniert werden, dass bzgl. der Offenbarung zu den Erfindungsaspekten der Erfindung stets wechselseitig Bezug genommen wird bzw. werden kann.

[0006] Die Erfindung stellt ein Verfahren zum Steuern eines Elektromotors in Form eines Reluktanzmotors bereit, um ein gewünschtes Drehmoment des Elektromotors bereitzustellen, das durch zwei Strom-Sollwerte in Feldkoordinaten erzeugt wird. Hierzu ist es erfindungsgemäß vorgesehen, dass die Strom-Sollwerte durch eine motorseitige Steuereinheit mithilfe von betriebspunktabhängigen Kennfeldern ermittelt werden, welche ein maximales Drehmoment des Elektromotors und/oder zwei entsprechende Stromwerte in Abhängigkeit von einer angelegten Zwischenkreisspannung und/oder einer Drehzahl des Elektromotors abbilden.

[0007] Unter Kennfeldern im Rahmen der Erfindung können Funktionen verstanden werden, die die Größen (ein maximales Drehmoment des Elektromotors und/oder zwei entsprechende Stromwerte) in Abhängigkeit von einer angelegten Zwischenkreisspannung und/oder einer Drehzahl des Elektromotors abbilden. Für jede Größe kann mindestens ein, vorteilhafterweise mehrere Kennfelder bereitgestellt werden. Die Vielzahl an Kennfeldern für jede Größe kann bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen des Elektromotors erstellt werden. Als Stellgrößen können die zwei dem maximalen Drehmoment entsprechenden Stromwerte verwendet werden. Betriebspunktabhängig heißt im Sinne der Erfindung, dass die Größen als Funktionen unterschiedlicher, beispielsweise zweier, Betriebsparameter des Elektromotors abgebildet werden. Als Betriebsparameter kann/können dabei eine Zwischenkreisspannung und/oder eine Drehzahl und/oder die Temperatur des Elektromotors dienen. Die Betriebsparameter sind im Betrieb des Elektromotors bekannt und/oder messbar, sodass aus der Summe der Betriebsparameter der Betriebspunkt des Elektromotors bestimmbar ist. Für jeden Betriebspunkt kann folglich einfach, ohne hohe rechnerische Leistung mithilfe von klein dimensionierten und kostengünstigen Steuereinheiten die Strom-Sollwerte aus den Kennfeldern abgelesen werden, die eingestellt werden sollen, um ein gewünschtes Drehmoment des Elektromotors zu erhalten.

[0008] Ein Erfindungsgedanke liegt dabei darin, dass der Elektromotor nicht geregelt, was mit aufwendigen Messungen von Drehmomenten im Betrieb des Elektromotors und hohem Rechenbedarf einhergeht, sondern im klassischen Sinne gesteuert wird. Das vorgeschlagene Verfahren der Sollwertbestimmung benutzt die vorberechneten Kennfelder für die Steuerung des Elektromotors.

[0009] Vorab wird der Elektromotor in Kenntnis seiner Topologie modelliert, um die Kennfelder, wie oben definiert, zu erstellen. Das Erstellen von Kennfeldern kann völlig unabhängig von dem Elektromotor geschehen. Der Elektromotor braucht beim Erstellen der Kennfelder nicht betrieben werden. Sämtliche motorseitigen Steuereinheiten können beim Erstellen der Kennfelder offline bleiben. Im Betrieb des Elektromotors werden schließlich die modellierten, betriebspunktabhängigen Kennfelder dazu genutzt, um den Elektromotor anzusteuern. Die Kennfelder können in einem Speicher einer motorseitigen Steuereinheit hinterlegt werden, die nun kleindimensioniert und kostengünstig ausgestaltet werden kann, weil sie eine deutlich reduzierte Rechenleistung aufbringen muss als beim Regeln des Elektromotors. Erfindungsgemäß wird somit eine wirkungsgradoptimale und CPU-Ressourcen sparende Berechnung der Strom-Sollwerte eines Reluktanzmotors bereitgestellt.

[0010] Ferner kann die Erfindung im Rahmen eines Verfahrens zum Steuern eines Elektromotors vorsehen, dass vor dem Ermitteln der Strom-Sollwerte durch eine motorseitige Steuereinheit die betriebspunktabhängigen Kennfelder durch eine externe Steuereinheit modelliert werden, während die motorseitige Steuereinheit offline ist. Vorteilhafterweise kann somit die Rechenleistung vor der motorseitigen Steuereinheit zu der externen Steuereinheit ausgelagert werden.

[0011] Weiterhin kann die Erfindung im Rahmen eines Verfahrens zum Steuern eines Elektromotors vorsehen, dass vor dem Ermitteln der Strom-Sollwerte durch eine motorseitige Steuereinheit die betriebspunktabhängigen Kennfelder in einem Speicher der motorseitigen Steuereinheit hinterlegt werden. Somit kann eine einfache Steuerung des Elektromotors ermöglicht werden. Als Stellgrößen werden dabei die ermittelten Strom-Sollwerte in Feldkoordinaten verwendet. Das so steuerbare Drehmoment des Elektromotors wird nicht gemessen und wirkt sich daher nicht auf die Stellgrößen zurück. Somit kann ein einfaches, stabiles und zuverlässiges Steuerverfahren für den Elektromotor bereitgestellt werden.

[0012] Des Weiteren kann die Erfindung im Rahmen eines Verfahrens zum Steuern eines Elektromotors vorsehen, dass die betriebspunktabhängigen Kennfelder in Form von künstlichen neuronalen Netzwerken bereitgestellt werden. Somit kann eine intelligente Steuerung bzw. ein intelligentes Netzwerk bereitgestellt werden, die oder das lernfähig ist. Mit anderen Worten können die Kennfelder nicht nur statisch sein, sondern auch überprüfbar, trainierbar und aktualisierbar sein. Dazu kommt noch, dass künstliche neuronale Netzwerke vorausschauend agieren können, bspw. in Erwartung einer roten Ampel und/o-

der eines Staus das Drehmoment reduzieren. Hierzu können Daten eines Navigationssystems herangezogen werden. Auch kann die Motoralterung vorausschauend berücksichtigt werden und das Drehmoment entsprechend angepasst werden. Ferner ist dabei vorteilhaft, dass künstliche neuronale Netzwerke unvollständige Daten vervollständigen können. Denkbar sind dabei Vervollständigungen von fehlenden Bereichen in den Kennfeldern oder sogar ein Interpolieren zwischen den Kennfeldern zum Erzeugen von neuen Kennfeldern, bspw. für (noch nicht) modellierte Betriebstemperaturen des Elektromotors.

[0013] Zudem sieht die Erfindung im Rahmen eines Verfahrens zum Steuern eines Elektromotors vor, dass beim Ermitteln der Strom-Sollwerte mindestens eine Abbildungsfunktion für die Strom-Sollwerte berücksichtigt wird, die ein Verhältnis zwischen dem maximalen Drehmoment und dem gewünschten Drehmoment des Elektromotors abbildet. Das maximale Drehmoment, welches erreicht werden kann, um die Zwischenkreisspannung optimal auszunutzen, entspricht quasi dem maximalen Wirkungsgrad und kann daher mit hoher Genauigkeit modelliert werden. Das Verhältnis zwischen dem maximalen Drehmoment und dem gewünschten Drehmoment des Elektromotors kann einfach berechnet werden und als Maß dafür genommen werden, um wieviel die Strom-Sollwerte, die zu dem gegebenen Betriebspunkt des Elektromotors aus dem Kennfeldern abgelesen werden, reduziert werden müssen, um das gewünschten Drehmoment des Elektromotors zu erreichen.

[0014] Außerdem kann die Erfindung vorsehen, dass die Abbildungsfunktion in Abhängigkeit einer Topologie des Elektromotors modelliert wird. Somit kann der genaue Aufbau bzw. die Geometrie (d. h. Topologie) des Motors zuverlässig beim Ansteuern des Motors berücksichtigt werden. In einer bestimmten Annäherung oder in einem optimalen Falle kann die Abbildungsfunktion für einen Reluktanzmotor eine einfache Linearfunktion sein.

[0015] Die betriebspunktabhängigen Kennfelder werden im Rahmen der Erfindung bei einer optimalen Betriebstemperatur, beispielsweise von 80°C, des Elektromotors modelliert. Somit könne Werte modelliert werden, die für die optimale Betriebstemperatur des Elektromotors passen. Grundsätzlich ist es denkbar, dass solche Kennfelder dem Normalbetrieb des Motors am nächsten kommen.

[0016] Ferner sieht die Erfindung vor, dass beim Ermitteln der Strom-Sollwerte mindestens ein Korrektorkennfeld berücksichtigt wird. Über das mindestens eine Korrektorkennfeld kann die aktuelle Temperatur des Motors mit in die Steuerung einfließen. Zwischen einem Korrektorkennfeld und den Kennfel-

dem im Sinne des Anspruches 1 können vorteilhafterweise weiteren Kennfelder interpoliert werden.

[0017] Im Rahmen der Erfindung ist es vorgesehen, dass der mindestens eine (vorteilhafterweise zwei) Korrekturkennfeld(er) durch eine externe Steuereinheit modelliert wird (werden). Somit kann auch hier die Rechenleistung ausgelagert werden.

[0018] Noch weiter ist es denkbar, dass mindestens ein Korrekturkennfeld bei einer optionalen Betriebstemperatur, insbesondere von 120°C oder 90°C, des Elektromotors modelliert wird. Somit kann der typische Bereich an Temperaturen abgedeckt werden, der im laufenden Betrieb des Elektromotors auftritt.

[0019] Weiterhin kann die Erfindung im Rahmen eines Verfahrens zum Steuern eines Elektromotors vorsehen, dass das maximale Drehmoment des Elektromotors aus Bauteilschutzgründen unterhalb einer zulässigen Obergrenze modelliert wird. Somit können die Bauteile des Elektromotors und die anliegende Bauteile vor Beschädigungen geschützt werden.

[0020] Des Weiteren kann die Erfindung im Rahmen eines Verfahrens zum Steuern eines Elektromotors vorsehen, dass die betriebspunktabhängigen Kennfelder durch Vermessen des Elektromotors bereitgestellt und/oder verifiziert und/oder korrigiert werden. Ein Vermessen des Elektromotors zum Herstellen der Kennfelder ist ebenfalls denkbar (bspw. auf einem Prüfstand). Die vermessenen Werte können grundsätzlich dazu genutzt werden, um die modellierten Werte zu überprüfen, d. h. zu verifizieren. Zudem können die vermessenen Werte zu einer Korrektur der modellierten Werte herangezogen werden. Somit kann das Verfahren im Rahmen der Erfindung verbessert werden, um genauere Ergebnisse für die Strom-Sollwerte zu liefern.

[0021] Zudem kann die Erfindung im Rahmen eines Verfahrens zum Steuern eines Elektromotors vorsehen, dass die betriebspunktabhängigen Kennfelder in Form von Updates von einer externen Steuereinheit an die motorseitige Steuereinheit bereitgestellt werden. Somit kann sichergestellt werden, dass die Version der Kennfelder aktualisiert werden kann.

[0022] Außerdem kann die Erfindung im Rahmen eines Verfahrens zum Steuern eines Elektromotors vorsehen, dass beim Abweichen eines Drehmoments des Elektromotors, der durch die zwei ermittelten Strom-Sollwerte erzeugt wird, von dem gewünschten Drehmoment des Elektromotors, der gemäß den Kennfeldern erwartet wird, die motorseitige Steuereinheit eine Fehlermeldung an eine externe Steuereinheit und/oder eine Abfrage nach einem Update aussendet. Somit kann eine Überprüfung der Kennfelder erfolgen, die für eine sichere und

zuverlässige Ansteuerung des Elektromotors sorgt. Denkbar ist dabei, dass das Drehmoment stichprobenartig, beispielsweise in regelmäßigen Abständen, gemessen wird, um die Kennfelder zu überprüfen.

[0023] Ferner wird die erfindungsgemäße Aufgabe durch einen Elektromotor, insbesondere ein Reluktanzmotor gelöst, aufweisend eine motorseitige Steuereinheit, um ein gewünschtes Drehmoment des Elektromotors bereitzustellen, das durch zwei Strom-Sollwerte in Feldkoordinaten erzeugt wird. Hierzu ist erfindungsgemäß ein Speicher vorgesehen, in welchem betriebspunktabhängige Kennfelder hinterlegt sind, welche ein maximales Drehmoment des Elektromotors und/oder zwei entsprechende Stromwerte in Abhängigkeit von einer angelegten Zwischenkreisspannung und/oder einer Drehzahl des Elektromotors abbilden, und dass die motorseitige Steuereinheit eine Steuerelektronik aufweist, um die Strom-Sollwerte mithilfe von betriebspunktabhängigen Kennfeldern zu ermitteln. Im Rahmen der Erfindung ist es denkbar, dass das oben beschriebene Verfahren zum Steuern des Elektromotors verwendet wird. Mithilfe des erfindungsgemäßen Elektromotors werden die gleichen Vorteile erreicht, die oben im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren beschrieben wurden. Auf diese Vorteile wird vorliegend vollumfänglich Bezug genommen.

[0024] Weiterhin kann die Erfindung bei einem Elektromotor vorsehen, dass die motorseitige Steuereinheit eine Schnittstelle aufweist, über die eine Kommunikationsverbindung mit einer externen Steuereinheit aufbaubar ist, die dazu ausgeführt ist, die betriebspunktabhängigen Kennfelder zu modellieren. Somit können Informationen zwischen der motorseitigen Steuereinheit und der externen Steuereinheit ausgetauscht werden. Als eine mögliche Kommunikationsverbindung ist eine kontaktfreie Kommunikationsverbindung, bspw. eine Funkverbindung, oder eine kontaktbehaftete Kommunikationsverbindung, bspw. ein USB-Anschluss, ein Busanschluss, oder dergleichen denkbar.

[0025] Zudem ist es denkbar, dass die motorseitige Steuereinheit einen Internetanschluss aufweisen kann. Somit kann die motorseitige Steuereinheit Informationen aus dem Internet abrufen und ggf. Fehlermeldungen und/oder Anfragen nach einem Update ins Internet stellen.

[0026] Im Sinne der Erfindung ist es denkbar, dass der Speicher innerhalb der motorseitigen Steuereinheit integriert sein kann. Außerdem ist es im Rahmen der Erfindung denkbar, dass der Speicher durch einen externen Datenspeicher, bspw. Cloud, bereitgestellt sein kann. Somit können im Rahmen des Elektromotors nicht nur Rechenkapazitäten, sondern auch Speicherkapazitäten ausgelagert werden.

[0027] Das Weiteren wird die erfindungsgemäße Aufgabe durch ein System zum Steuern eines Elektromotors, insbesondere eines Reluktanzmotors, gelöst, um ein gewünschtes Drehmoment des Elektromotors bereitzustellen, das durch zwei Strom-Sollwerte in Feldkoordinaten erzeugt wird. Hierzu ist erfindungsgemäß eine motorseitige Steuereinheit vorgesehen, um die Strom-Sollwerte mithilfe von betriebspunktabhängigen Kennfeldern zu ermitteln, welche ein maximales Drehmoment des Elektromotors und/oder zwei entsprechende Stromwerte in Abhängigkeit von einer angelegten Zwischenkreisspannung und/oder einer Drehzahl des Elektromotors abbilden. Weiterhin ist eine externe Steuereinheit vorgesehen, um die betriebspunktabhängigen Kennfelder zu modellieren. Im Rahmen der Erfindung ist es denkbar, dass das oben beschriebene Verfahren mithilfe des Systems ausgeführt wird. Mithilfe des erfindungsgemäßen Systems werden die gleichen Vorteile erreicht, die oben im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren und/oder dem erfindungsgemäßen Elektromotor beschrieben wurden. Auf diese Vorteile wird vorliegend vollumfänglich Bezug genommen.

[0028] Zudem kann die Erfindung bei einem System einen Speicher vorgesehen, in welchem betriebspunktabhängige Kennfelder hinterlegt sind, wobei der Speicher innerhalb der motorseitigen Steuereinheit integriert ist, oder wobei der Speicher durch einen externen Datenspeicher, insbesondere Cloud, bereitgestellt ist. Außerdem ist es denkbar, dass die externe Steuereinheit durch einen externen Datendienst, insbesondere Cloud, bereitgestellt sein kann. Somit können im Rahmen des Systems nicht nur Rechenkapazitäten, sondern auch Speicherkapazitäten ausgelagert werden.

[0029] Weitere, die Erfindung verbessernde Maßnahmen werden nachstehend mit der Beschreibung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Figur näher dargestellt. Dabei können die in den Ansprüchen und in der Beschreibung erwähnten Merkmale jeweils einzeln für sich oder in beliebiger Kombination erfindungswesentlich sein. Dabei ist zu beachten, dass die Figur nur einen beschreibenden Charakter hat und nicht dazu gedacht ist, die Erfindung in irgendeiner Form einzuschränken. Es zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Systems zum Steuern eines Elektromotors, insbesondere eines Reluktanzmotors.

[0030] Die **Fig. 1** zeigt ein System 100 zum Steuern eines Elektromotors 10, welches insbesondere in Form eines Reluktanzmotors ausgebildet sein kann. Das System 100 dient dazu, ein gewünschtes Drehmoment M_{soll} des Elektromotors 10 bereitzustellen, das durch zwei Strom-Sollwerte I_{dsoll} , I_{qsoll} in Feldkoordinaten d , q erzeugt wird. Hierzu ist es erfin-

dungsgemäß vorgesehen, dass die Strom-Sollwerte I_{dsoll} , I_{qsoll} durch eine motorseitige Steuereinheit 11 mithilfe von betriebspunktabhängigen Kennfeldern $M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$ ermittelt werden, welche ein maximales Drehmoment M_{max} des Elektromotors 10 und/oder zwei entsprechende Stromwerte I_{dmax} , I_{qmax} in Abhängigkeit von einer angelegten Zwischenkreisspannung V_{DC} und/oder einer Drehzahl ω_{ist} des Elektromotors 10 abbilden.

[0031] Für die Erzeugung des gewünschten Drehmoments M_{soll} bzw. eines Sollmomentes des Elektromotors 10 werden im Rahmen der Erfindung zwei Strom-Sollwerte I_{dsoll} , I_{qsoll} in Feldkoordinaten d , q ermittelt. Diese Strom-Sollwerte I_{dsoll} , I_{qsoll} dienen als Eingangswerte für zwei Stromsteller 15, 16 im Rahmen einer Steuerelektronik 14, 15, 16 der motorseitigen Steuereinheit 11. Erfindungsgemäß wird eine wirkungsgradoptimale Steuerung des Elektromotors 10 und CPU-Ressourcen sparende Berechnung der Strom-Sollwerte I_{dsoll} , I_{qsoll} bereitgestellt.

[0032] In der **Fig. 1** ist die Struktur der Sollwertberechnung dargestellt. Das gewünschte Drehmoment M_{soll} des Elektromotors 10 kann beispielsweise aus Bauteilschutzgründen mit $\text{Lim} [\%]$ begrenzt sein.

[0033] Es werden betriebspunktabhängig (T , V_{DC} , ω_{ist}) folgenden Größen ermittelt: ein maximal umsetzbares Drehmoment M_{max} und zwei zu diesem maximalen Drehmoment M_{max} passenden Ströme I_{dmax} und I_{qmax} in Feldkoordinaten d , q .

[0034] Für die Modellierung der Kennfelder $M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$ werden drei gemessenen Betriebsparameter T , V_{DC} , ω_{ist} des Elektromotors 10 als Eingangsgrößen verwendet: die aktuelle Zwischenkreisspannung V_{DC} , die Drehzahl ω_{ist} und die Temperatur T des Elektromotors 10.

[0035] Die Modellierung der Kennfelder $M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$ erfolgt in einer externen Steuereinheit 12.

[0036] Die Kennfeldberechnung kann ausgeführt werden, während die motorseitige Steuereinheit 11 offline ist.

[0037] Es werden drei Kennfelder $M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$ für zwei Eingangsgrößen bzw. zwei Betriebsparameter (die Zwischenkreisspannung V_{DC} und/oder die Drehzahl ω_{ist}) des Elektromotors 10 vorberechnet. Die Kennfelder $M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$ werden für eine optimale Betriebstemperatur T_1 (beispielsweise 80°C) des Elektromotors 10 bestimmt.

[0038] Es können weiterhin, beispielsweise zwei, Korrekturkennfelder $M_{\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{d\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{q\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$ pro modellierte Größe M_{\max} , $I_{d\max}$ und $I_{q\max}$ für eine optionale Betriebstemperatur T_2 , T_3 (beispielsweise 0°C und/oder 120°C), um den Temperatureinfluss zu berücksichtigen, vorteilhafterweise zu kompensieren. Die Korrekturkennfelder $M_{\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{d\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{q\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$ stellen einen prozentualen Korrekturfaktor dar. Diese Darstellung reduziert den Speicherbedarf.

[0039] Die Kennfelder $M_{\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{d\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{q\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$ und ggf. die Korrekturkennfelder $M_{\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{d\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{q\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$ können in einem Speicher 13 hinterlegt werden.

[0040] Das erfindungsgemäße System 100 erreicht den optimalen Wirkungsgrad und eine maximale Ausnutzung der Zwischenkreisspannung V_{DC} bei einem maximalen Drehmoment M_{\max} des Elektromotors 10. Für ein kleineres gewünschtes Drehmoment M_{soll} des Elektromotors 10 werden die aus den Tabellen abgelesenen Stromwerte $I_{d\max}$ und $I_{q\max}$ abhängig vom Verhältnis zwischen dem gewünschten Drehmoment M_{soll} und dem maximalen Drehmoment M_{\max} des Elektromotors 10 reduziert. Dafür sind zwei Abbildungsfunktion F1 und F2 vorgesehen. Im einfachsten Falle können diese Abbildungsfunktion F1, F2 eine proportionale Senkung beider Stromwerte $I_{d\max}$ und $I_{q\max}$ darstellen. Dabei spricht man von linearen Kennlinien. Denkbar ist es aber auch, dass die Abbildungsfunktionen F1 und F2 sich als nichtlineare Kennlinien implementieren lassen, die einer konkreten Topologie des Elektromotors 10 entsprechen können. In diesem Fall kann eine bessere Ansteuerung des Elektromotors 10 für kleinere Sollmomente M_{soll} erreicht werden.

[0041] Für eine Kommunikation mit der externen Steuereinheit 12 kann die motorseitige Steuereinheit 11 eine Schnittstelle 17 aufweisen. Zudem ist es denkbar, dass die motorseitige Steuereinheit 11 einen Internetanschluss 18 aufweisen kann.

[0042] Im Rahmen der Erfindung ist es denkbar, dass der Speicher 13 innerhalb der motorseitigen Steuereinheit 11 (baulich) integriert sein kann, oder dass der Speicher 13 durch einen externen Datenspeicher, insbesondere Cloud, bereitgestellt sein kann.

[0043] Außerdem ist es im Rahmen der Erfindung denkbar, dass die externe Steuereinheit 12 ebenfalls durch einen externen Datendienst, insbesondere Cloud, bereitgestellt sein kann.

[0044] Die voranstehende Beschreibung der Figuren beschreibt die vorliegende Erfindung ausschließlich im Rahmen von Beispielen. Selbstverständlich können einzelne Merkmale der Ausführungsformen,

sofern es technisch sinnvoll ist, frei miteinander kombiniert werden, ohne den Rahmen der Erfindung zu verlassen.

Bezugszeichenliste

10	Elektromotor
11	motorseitige Steuereinheit
12	externe Steuereinheit
13	Speicher
14	Stuerelektronik
15	Stuerelektronik, Stromsteller
16	Stuerelektronik, Stromsteller
17	Schnittstelle
18	Internetanschluss
100	System
d	Feldkoordinate
q	Feldkoordinate
M_{soll}	Drehmoment
M_{\max}	Drehmoment
$I_{d\text{soll}}$	Strom
$I_{q\text{soll}}$	Strom
$I_{d\max}$	Strom
$I_{q\max}$	Strom
V_{DC}	Zwischenkreisspannung
ω_{ist}	Drehzahl
T	Temperatur
T1	optimale Betriebstemperatur
T2	optionale Betriebstemperatur
T3	optionale Betriebstemperatur
$M_{\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$	Kennfeld, Korrekturkennfeld
$I_{d\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$	Kennfeld, Korrekturkennfeld
$I_{q\max}(V_{DC}, \omega_{ist})$	Kennfeld, Korrekturkennfeld
F1	Abbildungsfunktion
F2	Abbildungsfunktion

Patentansprüche

1. Verfahren zum Steuern eines Elektromotors (10) in der Form eines Reluktanzmotors, um ein gewünschtes Drehmoment (M_{soll}) des Elektromotors (10) bereitzustellen, das durch zwei Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) in Feldkoordinaten (d , q) erzeugt wird, wobei die Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) durch eine motorseitige Steuereinheit (11) mithilfe von betriebspunktabhängigen Kennfeldern ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) ermittelt werden, welche ein maximales Drehmoment (M_{max}) des Elektromotors (10) und/oder zwei entsprechende Stromwerte (I_{dmax} , I_{qmax}) in Abhängigkeit von einer angelegten Zwischenkreisspannung (V_{DC}) und/oder einer Drehzahl (ω_{ist}) des Elektromotors (10) abbilden, und wobei beim Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) mindestens eine Abbildungsfunktion ($F1$, $F2$) für die Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) berücksichtigt wird, die ein Verhältnis zwischen dem maximalen Drehmoment (M_{max}) und dem gewünschten Drehmoment (M_{soll}) des Elektromotors (10) abbildet, **dadurch gekennzeichnet**, dass die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) bei einer optimalen Betriebstemperatur ($T1$) des Elektromotors (10) modelliert werden, dass beim Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) mindestens ein Korrekturkennfeld ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) berücksichtigt wird, und dass der mindestens eine Korrekturkennfeld ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) bei einer optionalen Betriebstemperatur ($T2$, $T3$) des Elektromotors (10) modelliert wird.
2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass vor dem Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) durch eine motorseitige Steuereinheit (11) die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) durch eine externe Steuereinheit (12) modelliert werden, während die motorseitige Steuereinheit (11) offline ist.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass vor dem Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) durch eine motorseitige Steuereinheit (11) die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) in einem Speicher (13) der motorseitigen Steuereinheit (11) hinterlegt werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}},$

$\omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) in Form von künstlichen neuronalen Netzwerken bereitgestellt werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Abbildungsfunktion ($F1$, $F2$) in Abhängigkeit einer Topologie des Elektromotors (10) modelliert wird, und/oder dass eine lineare Abbildungsfunktion ($F1$, $F2$) verwendet wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der mindestens eine Korrekturkennfeld ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) durch eine externe Steuereinheit (12) modelliert wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das maximale Drehmoment (M_{max}) des Elektromotors (10) aus Bauteilschutzgründen unterhalb einer zulässigen Obergrenze modelliert wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) durch Vermessen des Elektromotors (10) bereitgestellt und/oder verifiziert und/oder korrigiert werden.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) in Form von Updates von einer externen Steuereinheit (12) an die motorseitige Steuereinheit (11) bereitgestellt werden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Abweichen eines Drehmoments (M_{soll}^*) des Elektromotors (10), der durch die zwei ermittelten Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) erzeugt wird, von dem gewünschten Drehmoment (M_{soll}) des Elektromotors (10), der gemäß den Kennfeldern ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{dmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$, $I_{\text{qmax}}(V_{\text{DC}}, \omega_{\text{ist}})$) erwartet wird, die motorseitige Steuereinheit (11) eine Fehlermeldung an eine externe Steuereinheit (12) und/oder eine Abfrage nach einem Update aussendet.

11. Elektromotor (10) in der Form eines Reluktanzmotors, aufweisend: eine motorseitige Steuereinheit (11), um ein gewünschtes Drehmoment (M_{soll}) des Elektromotors (10) bereitzustellen, das durch zwei Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) in Feldkoordinaten (d , q) erzeugt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Speicher (13) vorgesehen ist, in welchem betriebspunktabhängige Kennfelder ($M_{\text{max}}(V_{\text{DC}},$

ω_{ist}), $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) hinterlegt sind, welche ein maximales Drehmoment (M_{max}) des Elektromotors (10) und/oder zwei entsprechende Stromwerte (I_{dmax} , I_{qmax}) in Abhängigkeit von einer angelegten Zwischenkreisspannung (V_{DC}) und/oder einer Drehzahl (ω_{ist}) des Elektromotors (10) abbilden,
 und dass die motorseitige Steuereinheit (11) eine Steuerelektronik (14, 15, 16) aufweist, um die Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) mithilfe von betriebspunktabhängigen Kennfeldern ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) zu ermitteln, wobei beim Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) mindestens eine Abbildungsfunktion (F1, F2) für die Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) berücksichtigt wird,
 die ein Verhältnis zwischen dem maximalen Drehmoment (M_{max}) und dem gewünschten Drehmoment (M_{soll}) des Elektromotors (10) abbildet,
 und dass die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) bei einer optimalen Betriebstemperatur (T1) des Elektromotors (10) modelliert sind,
 dass beim Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) mindestens ein Korrekturkennfeld ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) berücksichtigt wird,
 und dass der mindestens eine Korrekturkennfeld ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) bei einer optionalen Betriebstemperatur (T2, T3) des Elektromotors (10) modelliert ist.

12. Elektromotor (10) nach dem vorhergehenden Anspruch,
dadurch gekennzeichnet,
 dass die motorseitige Steuereinheit (11) eine Schnittstelle (17) aufweist, über die eine Kommunikationsverbindung mit einer externen Steuereinheit (12) aufbaubar ist, die dazu ausgeführt ist, die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) zu modellieren,
 und/oder dass die motorseitige Steuereinheit (11) einen Internetanschluss (18) aufweist.

13. Elektromotor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche 11 oder 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Speicher (13) innerhalb der motorseitigen Steuereinheit (11) integriert ist, oder dass der Speicher (13) durch einen externen Datenspeicher, insbesondere Cloud, bereitgestellt ist.

14. System (100) zum Steuern eines Elektromotors (10) in der Form eines Reluktanzmotors, um ein gewünschtes Drehmoment (M_{soll}) des Elektromotors (10) bereitzustellen, das durch zwei Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) in Feldkoordinaten (d, q) erzeugt wird,
dadurch gekennzeichnet,
 dass eine motorseitige Steuereinheit (11) vorgese-

hen ist, um die Strom-Sollwerte (I_d , I_q) mithilfe von betriebspunktabhängigen Kennfeldern ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) zu ermitteln, welche ein maximales Drehmoment (M_{max}) des Elektromotors (10) und/oder zwei entsprechende Stromwerte (I_{dmax} , I_{qmax}) in Abhängigkeit von einer angelegten Zwischenkreisspannung (V_{DC}) und/oder einer Drehzahl (ω_{ist}) des Elektromotors (10) abbilden,
 und dass eine externe Steuereinheit (12) vorgesehen ist, um die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) zu modellieren,
 wobei beim Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) mindestens eine Abbildungsfunktion (F1, F2) für die Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) berücksichtigt wird, die ein Verhältnis zwischen dem maximalen Drehmoment (M_{max}) und dem gewünschten Drehmoment (M_{soll}) des Elektromotors (10) abbildet,
 dass die betriebspunktabhängigen Kennfelder ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) bei einer optimalen Betriebstemperatur (T1) des Elektromotors (10) modelliert sind,
 dass beim Ermitteln der Strom-Sollwerte (I_{dsoll} , I_{qsoll}) mindestens ein Korrekturkennfeld ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) berücksichtigt wird,
 und dass der mindestens eine Korrekturkennfeld ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) bei einer optionalen Betriebstemperatur (T2, T3) des Elektromotors (10) modelliert ist.

15. System (100) nach dem vorhergehenden Anspruch,
dadurch gekennzeichnet,
 dass ein Speicher (13) vorgesehen ist, in welchem betriebspunktabhängige Kennfelder ($M_{max}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{dmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$, $I_{qmax}(V_{DC}, \omega_{ist})$) hinterlegt sind, wobei der Speicher (13) innerhalb der motorseitigen Steuereinheit (11) integriert ist, oder wobei der Speicher (13) durch einen externen Datenspeicher, insbesondere Cloud, bereitgestellt ist,
 und/oder dass die externe Steuereinheit (12) durch einen externen Datendienst, insbesondere Cloud, bereitgestellt ist.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

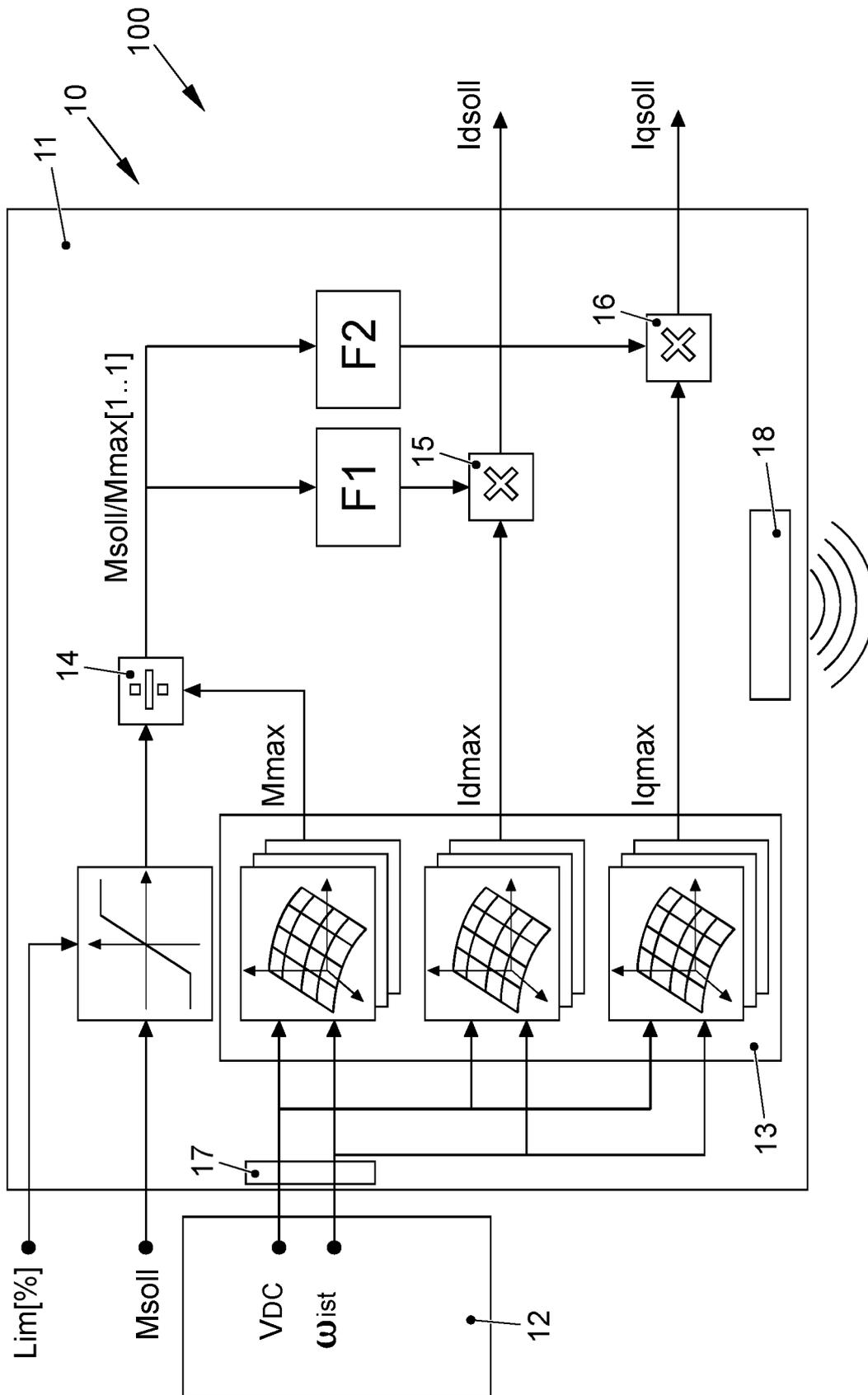


FIG. 1