



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 218 547.9**

(22) Anmeldetag: **29.11.2019**

(43) Offenlegungstag: **02.06.2021**

(51) Int Cl.: **H02P 21/05 (2006.01)**

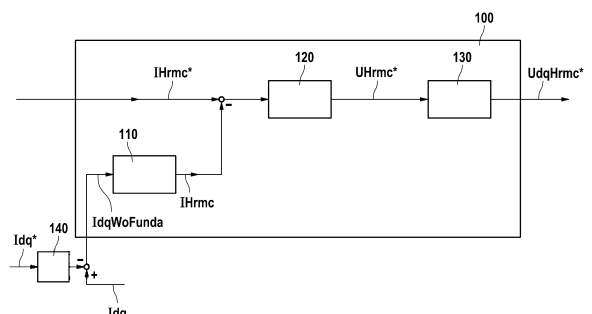
(71) Anmelder:  
**Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:  
**Lee, Wei-Lung, 74321 Bietigheim-Bissingen, DE;  
Paulus, Sebastian, 73728 Esslingen, DE; Hirsch,  
Michele, 73730 Esslingen, DE**

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Regelung einer elektrischen Maschine**

(57) Zusammenfassung: Verfahren (400) zur Regelung einer elektrischen Maschine (190) mit einem Filter (140) und einem Oberwellenregler (100), wobei der Oberwellenregler (100) eine Eingangstransformation (110) umfasst, mit den Schritten:  
Ermitteln (410) einer Rückführgröße ( $I_{dq}$ );  
Filtern (412) einer vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße ( $I_{dq}^*$ );  
Ermitteln (414) der gefilterten Rückführgröße ohne Grundwellenanteil ( $I_{dqWoFunda}$ );  
Transformieren (420) der gefilterten Rückführgröße ohne Grundwellenanteil ( $I_{dqWoFunda}$ ) mittels der Eingangstransformation (110);  
Bestromen (480) mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine (190) in Abhängigkeit der Gleichrückführgröße ( $I_{Hrnc}$ ).



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Regelung einer elektrischen Maschine. Ferner betrifft die Erfindung ein elektrisches Antriebssystem mit einer entsprechenden Vorrichtung und ein Fahrzeug mit einem elektrischen Antriebssystem sowie ein Computerprogramm und ein computerlesbares Speichermedium.

## Stand der Technik

**[0002]** Die Druckschrift DE 2017 102 036 91 A1 offenbart eine Regelung für eine elektrische Maschine, bei der gleichzeitig eine Störgröße kompensiert und ein Sollwert eingestellt wird. Für den Betrieb einer elektrischen Maschine wird als Sollwert ein Phasenstrom eingeregelt. Der Phasenstrom wird bevorzugt als sinusförmige Grundwelle eingeregelt. Der Phasenstrom bewirkt beim Betrieb der elektrischen Maschine die Abgabe eines gleichmäßigen mittleren Drehmomentes. Aufgrund von nicht ideal sinusförmigen Magnetfeldern, Windungsanordnungen, Nutung, Zahnform, Sättigungseffekten und/oder anderen Effekten bilden sich neben dem gleichmäßigen mittleren Drehmoment auch harmonische Oberschwingungen des Drehmomentes aus. Solche Effekte führen zu Kraftwellen zwischen Rotor und Stator, die bei charakteristischen Ordnungen als tangential und radiale Zahnkräfte auf die Statorzähne wirken. Durch das mechanische Übertragungsverhalten der elektrischen Maschine werden diese Kräfte als Schwingungen in der Maschine, des Maschinengehäuses und angekoppelten Elementen und damit als Körper- und Luftschall oder Oberflächenschwingungen wahrnehmbar. Die harmonischen Oberschwingungen des Drehmomentes bewirken dabei auch Oberwellen der elektrischen Frequenz der elektrischen Maschine auf dem Phasenstrom als Störgrößen. Zur Minimierung dieser Störgrößen werden gezielt Oberwellen eingeregelt und vorgegeben, welche dem eingeregelt und vorgegebenen Phasenstrom überlagert werden.

**[0003]** Es besteht ein Bedürfnis für alternative Verfahren und Vorrichtungen zur Regelung einer elektrischen Maschine, mit dem die Oberwellen möglichst robust, stabil, mit hoher Dynamik und Flexibilität zur Berücksichtigung relevanter Frequenzanteile geregelt werden.

## Offenbarung der Erfindung

**[0004]** Es wird ein Verfahren zur Regelung einer elektrischen Maschine mit einem Filter und einem Oberwellenregler bereitgestellt. Der Oberwellenregler umfasst eine Eingangstransformation. Das Verfahren umfasst die Schritte:

Ermitteln einer Rückführgröße, wobei die Rückführgröße eine Istgröße einer Oberwelle einer vorgegebenen Frequenz in einem feldorientierten System umfasst;

Filtern einer vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße mittels des Filters;

Ermitteln einer gefilterten Rückführgröße ohne Grundwellenanteil als Differenz der Rückführgröße und der gefilterten GW-Gleichführungsgröße; Transformieren der gefilterten Rückführgröße ohne Grundwellenanteil mittels der Eingangstransformation zu einer Gleichrückführgröße in einem oberwellenorientierten System;

Bestromen mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine in Abhängigkeit der Gleichrückführgröße.

**[0005]** Zur Regelung elektrischer Maschinen werden verbreitet feldorientierte Regelungen verwendet. Dabei werden die Wechselgrößen der im Zeitbereich, bevorzugt sinusförmigen, einzuregelnden Phasenströme, auch die Grundwellen genannt, mittels einer mathematischen Transformation jeweils in ein mit der Frequenz der Wechselgrößen rotierendes Koordinatensystem übertragen. Die Frequenz der Wechselgrößen bestimmt auch die Frequenz des magnetischen Feldes in der Maschine, sodass dieses mit der Frequenz der Wechselgrößen rotierende Koordinatensystem auch feldorientiertes System genannt wird. Im stationären Betrieb der elektrischen Maschine ergeben sich aus den Wechselgrößen im Zeitbereich Gleichgrößen im feldorientierten System, welche mittels der üblichen Verfahren der Regelungstechnik geregelt werden können. Das feldorientierte System wird auch d/q-Koordinatensystem genannt. Dabei zeigt dessen d-Achse in Richtung des Rotorflusses. Die q-Achse ist senkrecht zu der d-Achse. Ein sinusförmiger Phasenstrom wird als Statorstromzeiger oder Statorstromvektor repräsentiert, welcher über seine Länge und seine Richtung charakterisiert wird. Dieser Stromzeiger dreht sich synchron mit dem rotierenden Stator- oder Rotorfluss der elektrischen Maschine. In dem d/q Koordinatensystem kann der Stromzeiger entsprechend seiner Länge und seiner Richtung mittels zwei senkrecht aufeinander stehenden Komponenten  $I_d$  und  $I_q$  dargestellt werden, welche im stationären Fall Gleichgrößen sind.

**[0006]** Zur Regelung einer mit dem Oberwellenregler verbindbaren oder anschließbaren elektrischen Maschine wird eine Rückführgröße der elektrischen Maschine in dem feldorientierten System erfasst. Diese Rückführgröße umfasst eine Oberwelle, welche den Phasenstrom, eine Grundwelle, durch die elektrische Maschine überlagert. In dem feldorientierten System ist der Phasenstrom eine Gleichgröße wohingegen die Oberwelle eine Wechselgröße ist. Eine vorgebbare GW-Gleichführungsgröße wird mittels des Filters gefiltert. Bevorzugt entspricht hierbei die

gefilterte GW-Gleichführungsgröße einem modellierten Grundwellenanteil von dem geschlossenen Regelkreis der feldorientierten Regelung. Als Differenz der Rückführgröße und der gefilterten GW-Gleichführungsgröße wird eine gefilterte Rückführgröße ohne Grundwellenanteil ermittelt. Zur Verwendung der Rückführgröße ohne Grundwellenanteil in einem Oberwellenregler wird die Rückführgröße ohne Grundwellenanteil mittels der Eingangstransformation zu einer Gleichrückführgröße in einem oberwellenorientierten System transformiert. Anschließend wird mindestens eine Wicklung der elektrischen Maschine in Abhängigkeit der Gleichrückführgröße bestromt.

**[0007]** Für eine Regelung einer Oberwelle in einem Oberwellenregler erfolgt, ähnlich der Transformation aus dem Zeitbereich in den feldorientierten Bereich, mittels der Eingangstransformation eine mathematische Transformation mit einer Frequenz der Oberwelle aus dem feldorientierten System in ein oberwellenorientiertes System. Hierzu wird die Rückführgröße ohne Grundwellenanteil mittels einer Eingangstransformation zu einer Gleichrückführgröße in das oberwellenorientierte System transformiert. Größen, die im feldorientierten System als Wechselgrößen dargestellt werden, werden im stationären Betrieb der elektrischen Maschine im oberwellenorientierten System als Gleichgrößen dargestellt. Diese können mittels der üblichen Verfahren der Regelungstechnik geregelt werden.

**[0008]** Vorteilhaft wird ein Verfahren für eine effektive Bestimmung einer Gleichrückführgröße für einen Oberwellenregler bereitgestellt.

**[0009]** Die Formulierung, dass eine Größe des Regelkreises eine Oberwelle oder eine Grundwelle umfasst, bedeutet im Rahmen dieser Anmeldung, dass eine Größe des Regelkreises zumindest eine Oberwelle oder Grundwelle charakterisiert oder beschreibt, wobei die jeweilige Größe des Regelkreises auch weitere Signalanteile, beispielsweise Grundwelle und eine oder mehrere Oberwellen sowie zusätzlich noch vorhandene Störgrößen beinhalten kann.

**[0010]** Zur Regelung elektrischer Maschinen werden verbreitet in Abhängigkeit einer Drehmomentvorgabe Soll-Phasenströme in Abhängigkeit ermittelter Ist-Phasenströme vorgegeben, wobei als Stellgrößen die Phasenspannungen eingestellt werden. Folglich umfassen bevorzugt im Rahmen dieser Anmeldung die Rückführgröße ( $I_{dq}$ ), die Gleichrückführgröße ( $I_{Hrmc}$ ), die Gleichführungsgröße ( $I_{Hrmc}^*$ ), die Maschinen-Rückführgröße ( $I_{abc}$ ) oder die vorgebbare GW-Gleichführungsgröße ( $I_{dq}^*$ ) jeweils einen Stromwert und/ oder die Gleichstellgröße ( $U_{Hrmc}^*$ ), die Stellgröße ( $U_{dqHrmc}^*$ ), die GW-Gleichstellgröße oder die Maschinen-Stellgröße ( $U_{abc}^*$ ) jeweils einen Spannungswert.

**[0011]** Bevorzugt umfasst die Rückführgröße in dem feldorientierten System eine Oberwelle mit einer positiven Frequenz mit einer ersten Amplitude und einer ersten Phase einer k-ten Ordnung einer elektrischen Frequenz der elektrischen Maschine und/oder eine Oberwelle mit einer negativen Frequenz mit einer zweiten Amplitude und einer zweiten Phase der k-ten Ordnung einer elektrischen Frequenz der elektrischen Maschine.

**[0012]** Die Rückführgröße in dem feldorientierten System umfasst mindestens eine Oberwelle. Bezogen auf die elektrische Frequenz der elektrischen Maschine weist die Oberwelle oder die Oberwellen eine positive und/ oder negative Frequenz k-ter Ordnung auf mit jeweiliger Amplitude und Phasenlage. Eine Ordnung, die eine relevante Störgröße darstellt, da insbesondere deren Amplituden besonders groß sind, ist beispielsweise die 6. Ordnung, bevorzugt in positiver und negativer Richtung. Beispielsweise bei einer elektrischen Frequenz der elektrischen Maschine, also der Grundwelle, von 450 Hz im Zeitbereich, ist die Frequenz der 6. Ordnung bei  $450\text{Hz} + 450\text{Hz} \cdot 6 = 3150\text{Hz}$  sowie in negativer Richtung bei  $450\text{Hz} - 6 \cdot 450\text{Hz} = -2250\text{Hz}$ . Im feldorientierten System, dessen Koordinatensystem mit der elektrischen Frequenz der elektrischen Maschine rotiert, wird die elektrische Frequenz der elektrischen Maschine auf 0 Hz abgebildet und es ergeben sich die Frequenzen +2700 Hz und -2700 Hz für die Oberwellen +/- 6. Ordnung. In Abhängigkeit der Größe der Amplituden und der Phasenlage ergeben sich Kraftwellen zwischen Rotor und Stator der elektrischen Maschine, die als tangentiale und radiale Zahnkräfte auf die Statorzähne wirken und die harmonischen Oberschwingungen des Drehmomentes bewirken. Je mehr relevante Ordnungen der Rückführgrößen für die Regelung berücksichtigt werden, desto effektiver werden die Störgrößen ausgeregelt.

**[0013]** Bevorzugt erfolgt das Transformieren der Rückführgröße in Abhängigkeit eines ermittelten aktuellen Rotorwinkels der elektrischen Maschine und umfasst eine Drehung mit einem Drehwinkel, der dem k-fachen des aktuellen Rotorwinkels entspricht. Die Drehung wird dabei in positive Richtung und/ oder negative Richtung ausgeführt. Die Transformation aus dem feldorientierten System in das oberwellenorientierte System umfasst bevorzugt eine Drehung mittels einer Drehmatrix oder Rotationsmatrix. Eine Wechselgröße im feldorientierten System wird somit zu einer Gleichgröße im oberwellenorientierten System. Hierzu wird die Rückführgröße mit einem Drehwinkel, der dem k-fachen des aktuellen Rotorwinkels entspricht gedreht, also bei der Transformation der Oberwelle der 6. Ordnung der elektrischen Frequenz mit dem 6-fachen des aktuellen Rotorwinkels. Für die Oberwellen der k-ten Ordnung in positiver Richtung erfolgt die Drehung in positive Richtung, bei den Oberwellen der k-ten Ordnung in negativer Richtung

erfolgt die Drehung in negative Richtung. Die resultierenden Gleichgröße im oberwellenorientierten System können mittels komplexer Zahlen oder als komplexe Parameter, bspw. als  $i\text{PosReal}$ ,  $i\text{PosImag}$  bzw. als  $i\text{NegReal}$  und  $i\text{NegImag}$  angegeben, charakterisiert oder beschrieben werden.

**[0014]** Neben der Drehung sind alternativ auch andere Transformationen verwendbar. Beispielsweise kann auch durch Multiplikation von dem d-Strom mit dem Sinus abhängig von dem k-fachen Rotorwinkel sowie mit dem Kosinus die komplexen Anteile  $i\text{DSin}$ ,  $i\text{DCos}$  und durch Multiplikation von dem q-Strom mit dem Sinus sowie mit dem Kosinus die komplexen Anteile  $i\text{QSIn}$ ,  $i\text{QCos}$  berechnet werden (auch Frequenzmischen oder Heterodyning genannt).

**[0015]** Als eine weitere alternative Beschreibung können komplexe Oberwellen mit Amplitude und Phase jeweils von dem d-Strom und q-Strom verwendet werden.

**[0016]** Ebenso lassen sich die Anteile auch als Ellipse mit Höhe, Breite, Drehung und Phase durch eine Überlagerung von zwei gegenläufig drehenden Zeigern mit unterschiedlicher Amplitude und Phase darstellen, bevorzugt für eine besonders effiziente Kalibrierung.

**[0017]** In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung umfasst die vorgebbare GW-Gleichführungsgröße des feldorientierten Systems eine Sollgröße zur Erzeugung der Grundwelle eines sinusförmigen Phasenstroms zur Bestromung mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine.

**[0018]** Die GW-Gleichführungsgröße ist ein Sollwert zur Erzeugung einer Grundwelle mit der elektrischen Frequenz der elektrischen Maschine zur Bestromung der elektrischen Maschine. Dieser Sollwert wird insbesondere in Abhängigkeit einer Drehmomentvorgabe, eines (Phasen-)Stromsollwertes oder eines Ist-Stromwertes, bevorzugt eines ermittelten Phasenstroms, analytisch oder mittels Kennfeld vorgegeben. Zur Verwendung im GW-Regler im feldorientierten System wird er bereits entsprechend transformiert vorgegeben.

**[0019]** Vorteilhaft wird eine GW-Gleichführungsgröße bereitgestellt zur Bestimmung einer Gleichrückführgröße für einen Oberwellenregler.

**[0020]** In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung umfasst das Filtern der vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße mittels des Filters ein Tiefpassfiltern der GW-Gleichführungsgröße.

**[0021]** Vorteilhaft wird ein effektives Verfahren zur Entfernung des Grundwellenanteils der GW-Gleichführungsgröße bereitgestellt.

**[0022]** In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung entspricht die Filterzeitkonstante des Filters der Bandbreite des feldorientierten Systems oder der Bandbreite des geschlossenen feldorientierten Regelkreises.

**[0023]** Die Filterzeitkonstante wird gleich oder abhängig von der Einschwingzeit des geschlossenen Regelkreises der feldorientierten Regelung vorgegeben.

**[0024]** Vorteilhaft wird eine Möglichkeit bereitgestellt, den Verlauf der GW-Gleichrückführgröße basierend auf der GW-Gleichführungsgröße zu modellieren.

**[0025]** In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung umfasst der Oberwellenregler neben der Eingangstransformation einen Regler und eine Ausgangstransformation. Das Verfahren weist folgende weitere Schritte auf:

Ermitteln einer Regelabweichung als Differenz einer vorgebbaren Gleichführungsgröße und der Gleichrückführgröße in dem oberwellenorientierten System;

Ermitteln einer Gleichstellgröße mittels des Reglers in Abhängigkeit der Regelabweichung;

Rücktransformieren der Gleichstellgröße mittels der Ausgangstransformation zu einer Stellgröße in dem feldorientierten System;

Bestromen mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine in Abhängigkeit der Stellgröße.

**[0026]** Es wird eine Regelabweichung als Differenz einer vorgebbaren Gleichführungsgröße und der Gleichrückführgröße in dem oberwellenorientierten System ermittelt. Mittels eines Reglers wird eine Gleichstellgröße in Abhängigkeit der Regelabweichung ermittelt. Diese Gleichstellgröße als Gleichgröße im oberwellenorientierten System wird zur weiteren Verwendung in der feldorientierten Regelung der elektrischen Maschine mittels der Ausgangstransformation rücktransformiert zu einer Stellgröße in dem feldorientierten System. Im feldorientierten System umfasst die Stellgröße eine Wechselgröße, eine Oberwelle. Schließlich umfasst das Verfahren einen Schritt zum Bestromen der elektrischen Maschine in Abhängigkeit der Stellgröße.

**[0027]** Vorteilhaft wird ein Verfahren für einen effektiven Oberwellenregler bereitgestellt.

**[0028]** Bevorzugt umfasst die vorgebbare Gleichführungsgröße des oberwellenorientierten Systems eine Sollgröße in dem oberwellenorientierten System zur Erzeugung einer Oberwelle auf einem sinusförmigen

gen Phasenstrom zur Bestromung mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine.

**[0029]** Die Gleichführungsgröße ist bevorzugt ein Sollwert zur Erzeugung einer Oberwelle einer vorgebbaren Frequenz oder k-ten Ordnung der elektrischen Frequenz der elektrischen Maschine zur Überlagerung des sinusförmigen Phasenstroms oder der Grundwelle zur Bestromung der elektrischen Maschine. Dieser Sollwert wird insbesondere in Abhängigkeit einer Drehmomentvorgabe, eines (Phasen-)Stromsollwertes oder eines Ist-Stromwertes, eines ermittelten Phasenstroms analytisch oder mittels Kennfeld vorgegeben. Zur Verwendung im Oberwellenregler im oberwellenorientierten System wird er bereits entsprechend transformiert vorgegeben.

**[0030]** Bevorzugt erfolgt das Rücktransformieren der Gleichstellgröße in Abhängigkeit eines ermittelten aktuellen Rotorwinkels der elektrischen Maschine. Das Rücktransformieren umfasst eine Drehung mit einem Drehwinkel, der dem k-fachen des aktuellen Rotorwinkels entspricht. Das Rücktransformieren umfasst jeweils eine Drehung in positive und/ oder negative entgegengesetzter Richtung des Drehens der Rückführgröße mittels der Eingangstransformation. Die Transformation aus dem oberwellenorientierten System in das feldorientierte System umfasst eine Drehung mittels einer Drehmatrix oder Rotationsmatrix. Eine Gleichgröße im oberwellenorientierten System wird so zu einer Wechselgröße im feldorientierten System. Hierzu wird die Gleichstellgröße mit einem Drehwinkel, der dem k-fachen des aktuellen Rotorwinkels entspricht gedreht, also bei der Transformation der Oberwelle der 6. Ordnung der elektrischen Frequenz mit dem 6-fachen des aktuellen Rotorwinkels. Für die Oberwellen der k-ten Ordnung in positiver Richtung erfolgt die Drehung in positive Richtung, bei den Oberwellen der k-ten Ordnung in negativer Richtung erfolgt die Drehung in negative Richtung. Es resultierenden Wechselgrößen im feldorientierten System. Bevorzugt werden bei einer Drehung in negative und positive Richtung die resultierenden Wechselgrößen im feldorientierten System komplex addiert zu der Stellgröße.

**[0031]** In einer anderen Ausgestaltung des Verfahrens zur Regelung einer elektrischen Maschine umfasst diese weiter einen Grundwellenregler, wobei der Grundwellenregler eine GW-Eingangstransformation, einen GW-Regler und eine GW-Ausgangstransformation umfasst. Das Verfahren umfasst die weiteren Schritte: Ermitteln einer Maschinen-Rückführgröße, wobei die Maschinenrückführgröße eine Istgröße der elektrischen Maschine umfasst; Transformieren der Maschinen-Rückführgröße mittels der GW-Eingangstransformation zu der Rückführgröße in dem feldorientierten System; Ermitteln der GW-Regelabweichung als Differenz einer vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße und der Rück-

führgröße in dem feldorientierten System Ermitteln einer GW-Gleichstellgröße mittels des GW-Reglers in Abhängigkeit der GW-Regelabweichung; Überlagern der GW-Gleichstellgröße mit der Stellgröße Rücktransformieren der Ausgangsgröße der Überlagerung mittels der GW-Ausgangstransformation zu einer Maschinen-Stellgröße, und Bestromen mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine in Abhängigkeit der Maschinen-Stellgröße

**[0032]** Neben der Oberwellenregelung umfasst die Regelung eine Grundwellenregelung. Mittels der Grundwellenregelung werden die Wechselgrößen der im Zeitbereich, bevorzugt sinusförmigen, einzuregelnden Phasenströme geregelt. Zur Regelung einer mit dem Grundwellenregler verbindbaren oder anschließbaren elektrischen Maschine wird eine Maschinen-Rückführgröße, eine Istgröße, der elektrischen Maschine im Zeitbereich erfasst. Die Maschinen-Rückführgrößen sind bevorzugt die Phasenströme einer elektrischen Maschine. Diese Maschinen-Rückführgröße umfasst den Phasenstrom als Grundwelle und als Störgrößen Oberwellen, welche den Phasenstrom durch die elektrische Maschine überlagern. In dem Zeitbereich ist der Phasenstrom eine Wechselgröße welche mit weiteren Wechselgrößen der Oberwellen überlagert ist. Zur Regelung der Grundwelle erfolgt eine Transformation aus dem Zeitbereich in den feldorientierten Bereich. Hierzu wird die Maschinen-Rückführgröße mittels einer GW-Eingangstransformation zu der Rückführgröße in dem feldorientierten System transformiert. Bevorzugt steht „GW“ im Rahmen dieser Anmeldung als Kennzeichnung für die Regelschritte und Transformationen, die für die Regelung der Grundwelle verwendet werden. Im stationären Betrieb der elektrischen Maschine ergeben Wechselgrößen im Zeitbereich Gleichgrößen im feldorientierten System. Diese können mittels der üblichen Verfahren der Regelungstechnik geregelt werden. Entsprechend wird eine GW-Regelabweichung als Differenz einer vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße und der Rückführgröße in dem feldorientierten System ermittelt. Mittels eines GW-Reglers wird eine GW-Gleichstellgröße in Abhängigkeit der GW-Regelabweichung ermittelt. Die Stellgröße als Ausgangssignal des Oberwellenreglers wird mit der GW-Gleichstellgröße im feldorientierten System überlagert oder addiert. Diese Ausgangsgröße der Überlagerung im feldorientierten System wird zur weiteren Verwendung zur Ansteuerung oder Bestromung der elektrischen Maschine im Zeitbereich mittels der GW-Ausgangstransformation rücktransformiert zu einer Maschinen-Stellgröße in dem Zeitbereich. Im Zeitbereich umfasst die Maschinen-Stellgröße eine Wechselgröße, eine Grundwelle, und mindestens eine weitere überlagerte Wechselgröße, eine Oberwelle. Schließlich umfasst das Verfahren einen Schritt zum Bestromen der elektrischen Maschine in Abhängigkeit der Maschinen-Stellgröße.

**[0033]** Vorteilhaft wird ein Verfahren für einen effektiven Grundwellen- und Oberwellenregler bereitgestellt.

**[0034]** Ferner betrifft die Erfindung ein Computerprogramm, welches Befehle umfasst, die bei der Ausführung durch einen Computer diesen veranlassen, die Schritte des bisher beschriebenen Verfahrens auszuführen.

**[0035]** Ferner betrifft die Erfindung ein computerlesbares Speichermedium, umfassend Befehle, die bei der Ausführung durch einen Computer diesen veranlassen, die Schritte des bisher beschriebenen Verfahrens auszuführen.

**[0036]** Ferner betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Regelung einer elektrischen Maschine, mit einer Recheneinheit, einem Filter und einem Oberwellenregler, wobei der Oberwellenregler eine Eingangstransformation umfasst. Die Vorrichtung ist dazu eingerichtet, die Schritte des beschriebenen Verfahrens auszuführen.

**[0037]** Vorteilhaft wird eine Vorrichtung für eine effektive Bestimmung einer Gleichrückführgröße für einen Oberwellenregler bereitgestellt.

**[0038]** In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung umfasst die Vorrichtung einen Oberwellenregler, wobei der Oberwellenregler neben der Eingangstransformation, einen Regler und eine Ausgangstransformation umfasst. Die Vorrichtung ist dazu eingerichtet, die Schritte des beschriebenen Verfahrens auszuführen.

**[0039]** Vorteilhaft wird eine Vorrichtung für eine effektive Oberwellenregelung einer elektrischen Maschine bereitgestellt.

**[0040]** In einer anderen Ausgestaltung der Erfindung umfasst die Vorrichtung einen Grundwellenregler, wobei der Grundwellenregler eine GW-Eingangstransformation, einen GW-Regler und eine GW-Ausgangstransformation umfasst. Die Vorrichtung ist dazu eingerichtet, die Schritte des beschriebenen Verfahrens auszuführen.

**[0041]** Vorteilhaft wird eine Vorrichtung für eine effektive, kombinierte Grundwellen- und Oberwellenregelung einer elektrischen Maschine bereitgestellt.

**[0042]** Ferner betrifft die Erfindung ein elektrisches Antriebssystem mit einer elektrischen Maschine und einer beschriebenen Vorrichtung. Ein derartiges elektrisches Antriebssystem dient beispielsweise dem Antrieb eines elektrischen Fahrzeugs. Mittels des Verfahrens und der Vorrichtung wird ein optimierter Betrieb des Antriebstrangs ermöglicht.

**[0043]** Ferner betrifft die Erfindung ein Fahrzeug, mit einem beschriebenen Antriebssystem. Vorteilhaft wird somit ein Fahrzeug bereitgestellt, welches eine Vorrichtung umfasst, mit der eine elektrische Maschine effektiv geregelt wird.

**[0044]** Es versteht sich, dass die Merkmale, Eigenschaften und Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens entsprechend auf die Vorrichtung bzw. das Antriebssystem und das Fahrzeug und umgekehrt zutreffen bzw. anwendbar sind.

**[0045]** Weitere Merkmale und Vorteile von Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnung

**[0046]** Im Folgenden soll die Erfindung anhand einiger Figuren näher erläutert werden, dazu zeigen:

**Fig. 1** eine schematische Regelstruktur eines Oberwellenreglers

**Fig. 2** eine schematische Regelstruktur zur Regelung einer elektrischen Maschine

**Fig. 3** ein schematisch dargestelltes Ablaufdiagramm für ein Verfahren zur Regelung einer elektrischen Maschine.

**Fig. 4** eine schematische dargestellte Vorrichtung zur Regelung einer elektrischen Maschine

**Fig. 5** ein schematisch dargestelltes Fahrzeug mit einem elektrischen Antriebssystem

#### Ausführungsformen der Erfindung

**[0047]** Die **Fig. 1** zeigt eine schematische Regelstruktur eines Oberwellenreglers **100** mit einem Filter **140**. Der Oberwellenregler **100** umfasst eine Eingangstransformation **110**. Mittels des Filters **140** wird eine vorgebbare GW-Gleichführungsgröße  $I_{dq}^*$  gefiltert, bevorzugt tiefpassgefiltert. Weiter wird eine Rückführgröße  $I_{dq}$  in einem feldorientierten System ermittelt. Als Differenz der Rückführgröße  $I_{dq}$  und der gefilterten GW-Gleichführungsgröße  $I_{dq}^*$  wird eine gefilterte Rückführgröße ohne Grundwellenanteil  $I_{dq}^* - I_{dq}$  ermittelt. Diese gefilterte Rückführgröße ohne Grundwellenanteil  $I_{dq}^* - I_{dq}$  wird mittels der Eingangstransformation **110** zu einer Gleichrückführgröße  $I_{Hr}^*$  in einem oberwellenorientierten System transformiert. Bevorzugt wird mindestens eine Wicklung einer anschließbaren elektrischen Maschine **190** in Abhängigkeit der Gleichrückführgröße  $I_{Hr}^*$  bestromt. Bevorzugt umfasst der Oberwellenregler **100** weiter einen Regler **120** und eine Ausgangstransformation **130**. Bevorzugt wird eine ermittelte Differenz aus einer vorgebbaren Gleichführungsgröße  $I_{Hr}^*$  und der Gleichrückführgröße  $I_{Hr}$  in dem oberwellenorientierten System als Regelabweichung

und Eingangsgröße dem Regler **120** zugeführt. Bevorzugt wird mittels des Reglers **120** in Abhängigkeit von der Regelabweichung eine Gleichstellgröße  $UH_{rnc}^*$  ermittelt. Bevorzugt wird diese Gleichstellgröße  $UH_{rnc}^*$  im oberwellenorientierten System mittels der Ausgangstransformation zu einer Stellgröße  $Ud_{qHrnc}^*$  in dem feldorientierten System transformiert. Bevorzugt wird mindestens eine Wicklung einer elektrischen Maschine **190** in Abhängigkeit der Stellgröße  $Ud_{qHrnc}^*$  bestromt.

**[0048]** Die **Fig. 2** zeigt eine schematische Regelstruktur zur Regelung einer elektrischen Maschine **190**. Die elektrische Maschine **190** ist als eine Einheit aus Inverter **192** und eines elektrischen Motors **194** dargestellt. Der Grundwellenregler **200** umfasst eine GW-Eingangstransformation **210**, einen GW-Regler **220** und eine GW-Ausgangstransformation **230**. Eine Maschinen-Rückführgröße  $labc$  der elektrischen Maschine wird im Zeitbereich ermittelt und der GW-Eingangstransformation **210** zugeführt. Die Maschinen-Rückführgröße  $labc$  wird mittels der GW-Eingangstransformation **210** zu der Rückführgröße  $Id_q$  in das feldorientierte System transformiert. Als Differenz einer vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße  $Id_q^*$  und der Rückführgröße  $Id_q$  in dem feldorientierten System wird eine GW-Regelabweichung ermittelt. In Abhängigkeit der GW-Regelabweichung wird eine GW-Gleichstellgröße mittels des GW-Reglers **220** ermittelt. Wie in **Fig. 1** dargestellt wird parallel mittels des Oberwellenreglers **100** die Stellgröße  $Ud_{qHrnc}^*$  ermittelt. Die GW-Gleichstellgröße wird mit der Stellgröße  $Ud_{qHrnc}^*$  überlagert. Die Ausgangsgröße der Überlagerung im feldorientierten System wird mittels der GW-Ausgangstransformation **230** zu einer Maschinen-Stellgröße  $U_{abc}^*$  in den Zeitbereich transformiert. Die Maschinen-Stellgröße  $U_{abc}^*$ , bevorzugt eine Phasenspannung, wird zur Bestromung mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine **190** dieser bereitgestellt. Mittels des Inverters **192** wird die Phasenspannung generiert und mindestens an einer Wicklung des elektrischen Motors **194** angelegt.

**[0049]** Die **Fig. 3** zeigt ein schematisch dargestelltes Ablaufdiagramm für ein Verfahren **400** zur Regelung einer elektrischen Maschine **190**. Mit Schritt **401** beginnt das Verfahren. Bevorzugt wird in Schritt **402** eine Maschinen-Rückführgröße  $labc$  der elektrischen Maschine im Zeitbereich ermittelt. Bevorzugt wird in Schritt **404** diese Maschinen-Rückführgröße  $labc$  mittels der GW-Eingangstransformation **210** zu der Rückführgröße  $Id_q$  in das feldorientierte System transformiert. Bevorzugt wird in Schritt **406**, als Differenz einer vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße  $Id_q^*$  und der Rückführgröße  $Id_q$  in dem feldorientierten System, eine GW-Regelabweichung ermittelt. Bevorzugt wird in Schritt **408** in Abhängigkeit der GW-Regelabweichung eine GW-Gleichstellgröße mittels des GW-Reglers **220** ermittelt.

**[0050]** In Schritt **410** wird eine Rückführgröße  $Id_q$  ermittelt. In Schritt **412** wird mittels des Filters **140** eine vorgebbare GW-Gleichführungsgröße  $Id_q^*$  gefiltert. In Schritt **414** wird die gefilterte Rückführgröße ohne Grundwellenanteil  $Id_{qWoFunda}$  als Differenz der Rückführgröße  $Id_q$  und der gefilterten GW-Gleichführungsgröße  $Id_q^*$  ermittelt. In Schritt **420** wird die gefilterte Rückführgröße ohne Grundwellenanteil  $Id_{qWoFunda}$  mittels der Eingangstransformation **110** zu einer Gleichrückführgröße  $I_{Hrnc}$  in einem oberwellenorientierten System transformiert. Bevorzugt wird in Schritt **480** mindestens eine Wicklung einer elektrischen Maschine **190** in Abhängigkeit der Gleichrückführgröße  $I_{Hrnc}$  bestromt. In Schritt **430** wird eine Differenz aus einer vorgebbaren Gleichführungsgröße  $I_{Hrnc}^*$  und der Gleichrückführgröße  $I_{Hrnc}$  als Regelabweichung ermittelt und als Eingangsgröße dem Regler **120** zugeführt. In Schritt **440** wird mittels des Reglers in Abhängigkeit von der Regelabweichung eine Gleichstellgröße  $UH_{rnc}^*$  ermittelt. In Schritt **450** wird diese Gleichstellgröße  $UH_{rnc}^*$  im oberwellenorientierten System mittels der Ausgangstransformation zu einer Stellgröße  $Ud_{qHrnc}^*$  in dem feldorientierten System transformiert. Bevorzugt wird in Schritt **480** mindestens eine Wicklung einer elektrischen Maschine **190** in Abhängigkeit der Stellgröße  $Ud_{qHrnc}^*$  bestromt.

**[0051]** Bevorzugt wird In Schritt **460** die GW-Gleichstellgröße wird mit der Stellgröße  $Ud_{qHrnc}^*$  überlagert. Bevorzugt wird in Schritt **470** die Ausgangsgröße der Überlagerung im feldorientierten System mittels der GW-Ausgangstransformation **230** zu einer Maschinen-Stellgröße  $U_{abc}^*$  in den Zeitbereich transformiert. Bevorzugt wird in Schritt **480** mindestens eine Wicklung der elektrischen Maschine **190** in Abhängigkeit der Maschinen-Stellgröße  $U_{abc}^*$  bestromt. Mit Schritt **490** endet das Verfahren.

**[0052]** Die **Fig. 4** zeigt eine schematische dargestellte Vorrichtung **300** zur Regelung einer elektrischen Maschine **190**. Die elektrische Maschine **190** ist als eine Einheit aus Inverter **192** und eines elektrischen Motors **194** dargestellt. Die Vorrichtung **300** umfasst einen Oberwellenregler **100** und eine Recheneinheit **310** zur Steuerung und Umsetzung der Struktur des Oberwellenreglers **100**. Die Vorrichtung umfasst bevorzugt einen Grundwellenregler **200**, der ebenfalls mittels der Recheneinheit **310** gesteuert und umgesetzt wird. Die Vorrichtung ist dazu eingerichtet die oben beschriebenen Verfahrensschritte auszuführen und somit die elektrischen Maschine **190** zu betreiben und zu regeln.

**[0053]** Die **Fig. 5** zeigt ein schematisch dargestelltes Fahrzeug **600**, welches ein elektrisches Antriebssystem **500** umfasst. Das Antriebssystem **500** umfasst die elektrische Maschine **190**, welche einen Inverter **192** und einen elektrischen Motor **194** umfasst, und eine Vorrichtung **300** zur Regelung der elektrischen

Maschine, wie zu **Fig. 4** beschrieben. Bevorzugt umfasst das elektrische Antriebssystem eine Batterie zur Versorgung des elektrischen Antriebssystems **500** mit elektrischer Energie.



**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**

- DE 201710203691 A1 [0002]

## Patentansprüche

1. Verfahren (400) zur Regelung einer elektrischen Maschine (190) mit einem Filter (140) und einem Oberwellenregler (100), wobei der Oberwellenregler (100) eine Eingangstransformation (110) umfasst, mit den Schritten:

Ermitteln (410) einer Rückführgröße ( $I_{dq}$ ), wobei die Rückführgröße eine Istgröße einer Oberwelle einer vorgegebenen Frequenz in einem feldorientierten System umfasst;

Filtern (412) einer vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße ( $I_{dq}^*$ ) mittels des Filters (140);

Ermitteln (414) der gefilterten Rückführgröße ohne Grundwellenanteil ( $I_{dqWoFunda}$ ) als Differenz der Rückführgröße ( $I_{dq}$ ) und der gefilterten GW-Gleichführungsgröße ( $I_{dq}^*$ );

Transformieren (420) der gefilterten Rückführgröße ohne Grundwellenanteil ( $I_{dqWoFunda}$ ) mittels der Eingangstransformation (110) zu einer Gleichrückführgröße ( $I_{Hrnc}$ ) in einem oberwellenorientierten System;

Bestromen (480) mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine (190) in Abhängigkeit der Gleichrückführgröße ( $I_{Hrnc}$ ).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die vorgebbare GW-Gleichführungsgröße ( $I_{dq}^*$ ) des feldorientierten Systems eine Sollgröße zur Erzeugung der Grundwelle eines sinusförmigen Phasenstroms zur Bestromung mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine (190) umfasst.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Filtern der vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße ( $I_{dq}^*$ ) mittels des Filters (140) ein Tiefpassfiltern der GW-Gleichführungsgröße ( $I_{dq}^*$ ) umfasst.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Filterzeitkonstante des Filters (140) der Bandbreite des feldorientierten Systems entspricht.

5. Verfahren (400) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Oberwellenregler (100) einen Regler (120) und eine Ausgangstransformation (130) umfasst, mit den Schritten:

Ermitteln (430) einer Regelabweichung als Differenz einer vorgebbaren Gleichführungsgröße ( $I_{Hrnc}^*$ ) und der Gleichrückführgröße ( $I_{Hrnc}$ ) in dem oberwellenorientierten System;

Ermitteln (440) einer Gleichstellgröße ( $U_{Hrnc}^*$ ) mittels des Reglers (120) in Abhängigkeit der Regelabweichung;

Rücktransformieren (450) der Gleichstellgröße ( $U_{Hrnc}^*$ ) mittels der Ausgangstransformation zu einer Stellgröße ( $U_{dqHrnc}^*$ ) in dem feldorientierten System;

Bestromen (480) mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine (190) in Abhängigkeit der Stellgröße ( $U_{dqHrnc}^*$ ).

6. Verfahren nach Anspruch 5, mit einem Grundwellenregler (200), wobei der Grundwellenregler eine (Grundwellen)GW-Eingangstransformation (210), einen GW-Regler (220) und eine GW-Ausgangstransformation (230) umfasst, mit den Schritten:

Ermitteln (402) einer Maschinen-Rückführgröße ( $I_{abc}$ ), wobei die Maschinenrückführgröße eine Istgröße der elektrischen Maschine umfasst;

Transformieren (404) der Maschinen-Rückführgröße ( $I_{abc}$ ) mittels der GW-Eingangstransformation (210) zu der Rückführgröße ( $I_{dq}$ ) in dem feldorientierten System;

Ermitteln (406) der GW-Regelabweichung als Differenz einer vorgebbaren GW-Gleichführungsgröße ( $I_{dq}^*$ ) und der Rückführgröße ( $I_{dq}$ ) in dem feldorientierten System

Ermitteln (408) einer GW-Gleichstellgröße mittels des GW-Reglers (220) in Abhängigkeit der GW-Regelabweichung;

Überlagern (460) der GW-Gleichstellgröße mit der Stellgröße ( $U_{dqHrnc}^*$ ) Rücktransformieren (470) der Ausgangsgröße der Überlagerung mittels der GW-Ausgangstransformation (230) zu einer Maschinen-Stellgröße ( $U_{abc}^*$ ), und

Bestromen (480) mindestens einer Wicklung der elektrischen Maschine (190) in Abhängigkeit der Maschinen-Stellgröße ( $U_{abc}^*$ ).

7. Computerprogramm, umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch einen Computer diesen veranlassen, das Verfahren/die Schritte des Verfahrens (400) nach Anspruch 1 bis 6 auszuführen.

8. Computerlesbares Speichermedium, umfassend Befehle, die bei der Ausführung durch einen Computer diesen veranlassen, das Verfahren/die Schritte des Verfahrens (400) nach Anspruch 1 bis 6 auszuführen.

9. Vorrichtung (300) zur Regelung einer elektrischen Maschine (190), mit einer Recheneinheit (310), einem Filter (140) und einem Oberwellenregler (100), wobei der Oberwellenregler eine Eingangstransformation (110) umfasst, wobei die Vorrichtung dazu eingerichtet ist, die Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1-6 auszuführen.

10. Vorrichtung (300) nach Anspruch 9, wobei der Oberwellenregler einen Regler (120) und eine Ausgangstransformation (130) umfasst, wobei die Vorrichtung dazu eingerichtet ist, die Schritte des Verfahrens nach Anspruch 5 auszuführen.

11. Vorrichtung (300) nach Anspruch 10, mit einem Grundwellenregler (200), wobei der Grundwellenregler eine GW-Eingangstransformation (210), einen GW-Regler (220) und eine GW-Ausgangstransformation (230) umfasst, wobei die Vorrichtung dazu

eingrichtet ist, die Schritte des Verfahrens nach Anspruch 6 auszuführen.

12. Elektrisches Antriebssystem (500) mit einer elektrischen Maschine (190) und einer Vorrichtung (300) nach einem der Ansprüche 9 bis 11.

13. Fahrzeug (600) mit einem elektrischen Antriebssystem (500) nach Anspruch 12.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

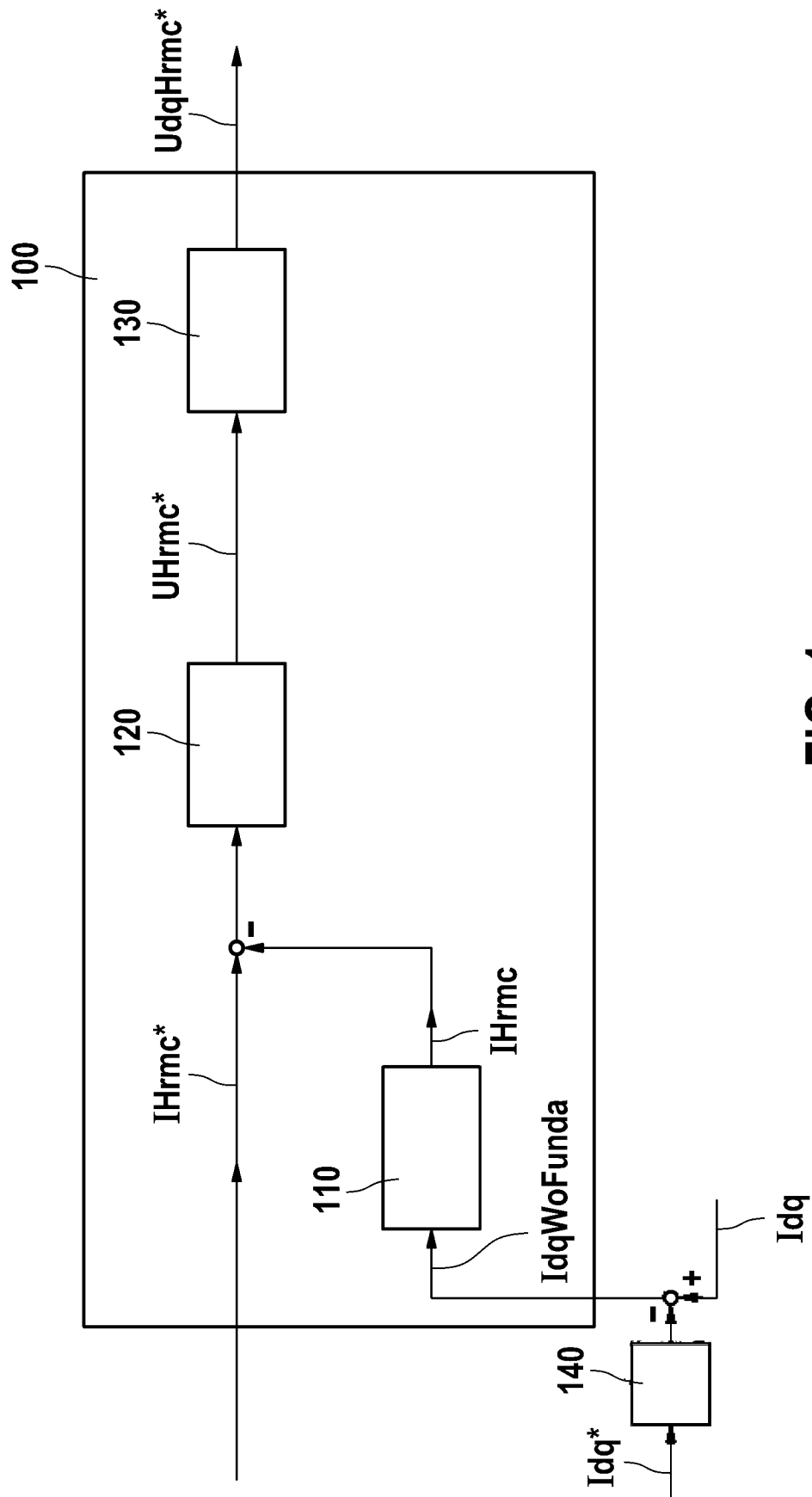


FIG. 1

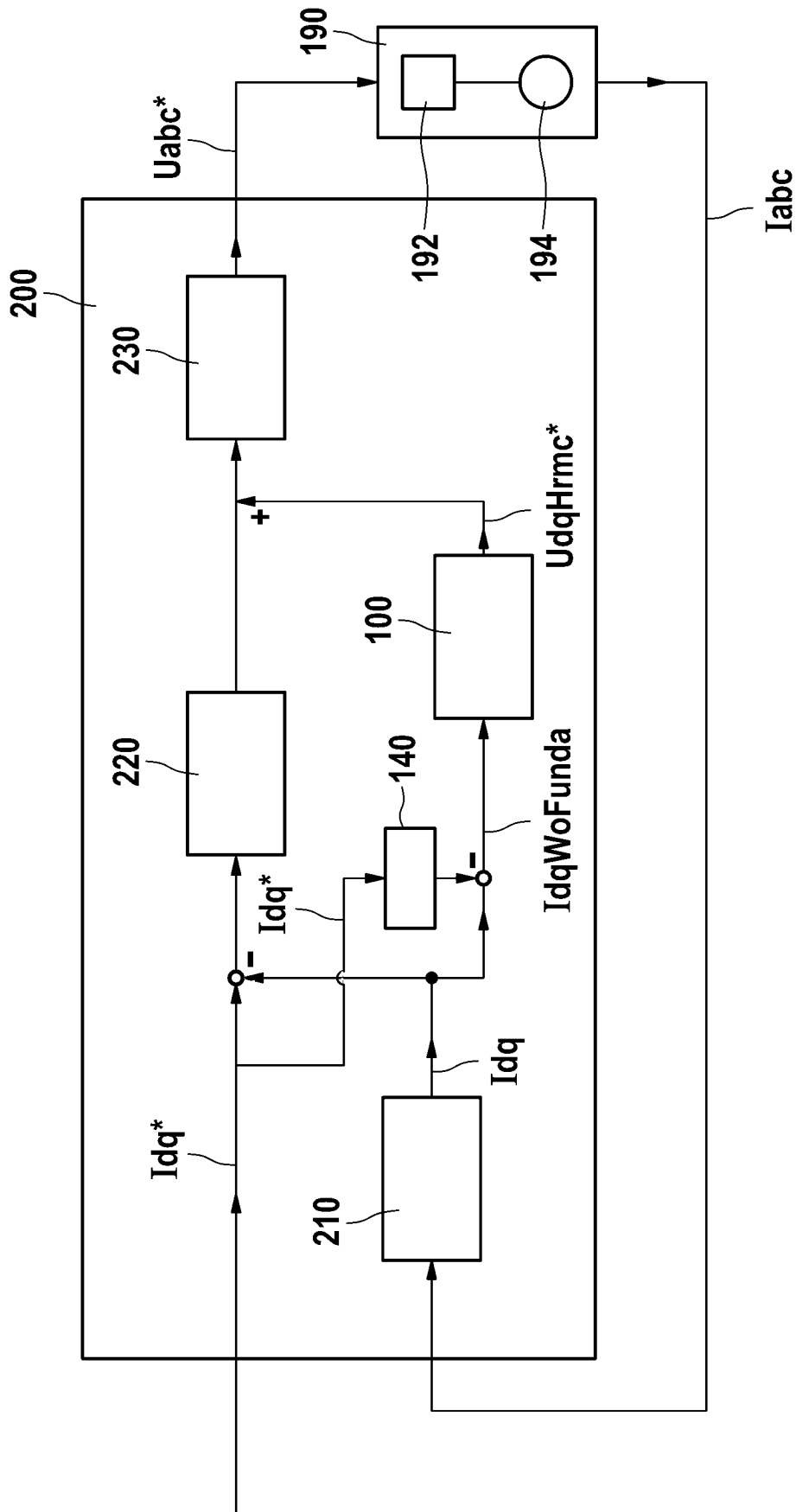
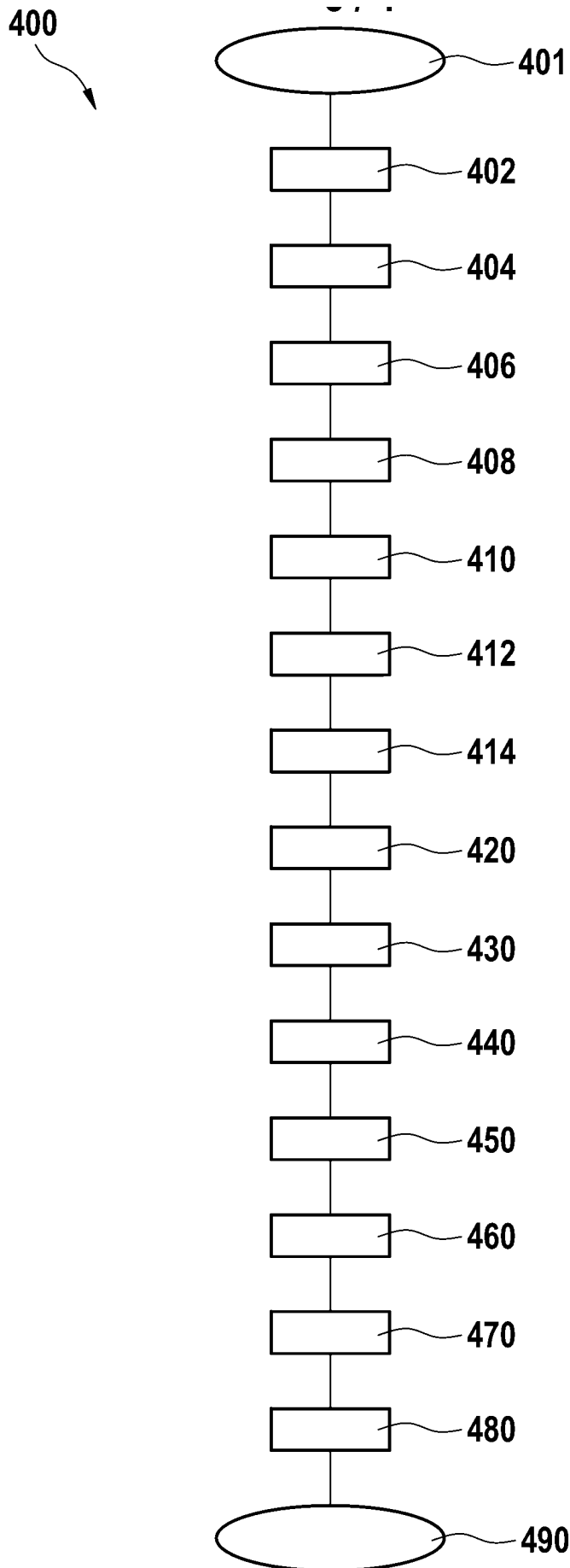


FIG. 2



**FIG. 3**

...

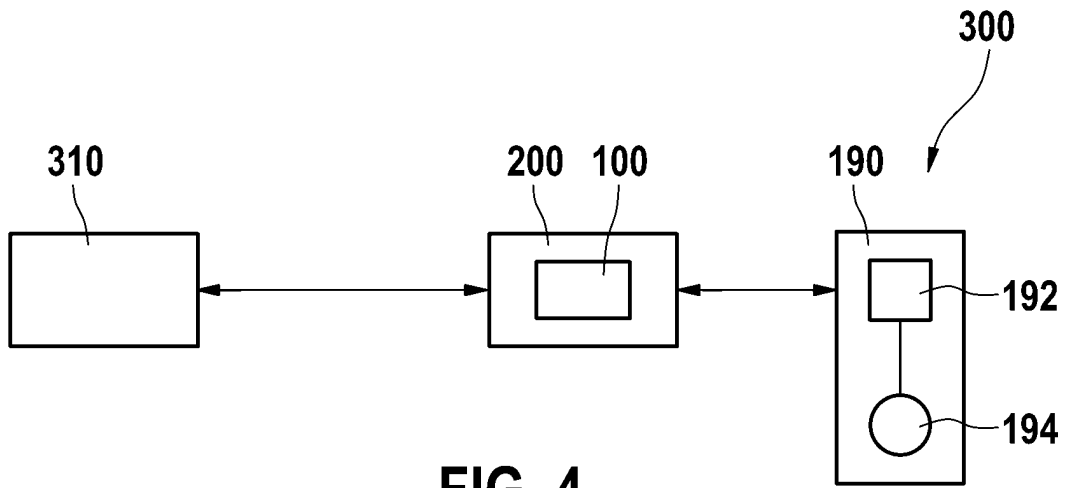


FIG. 4

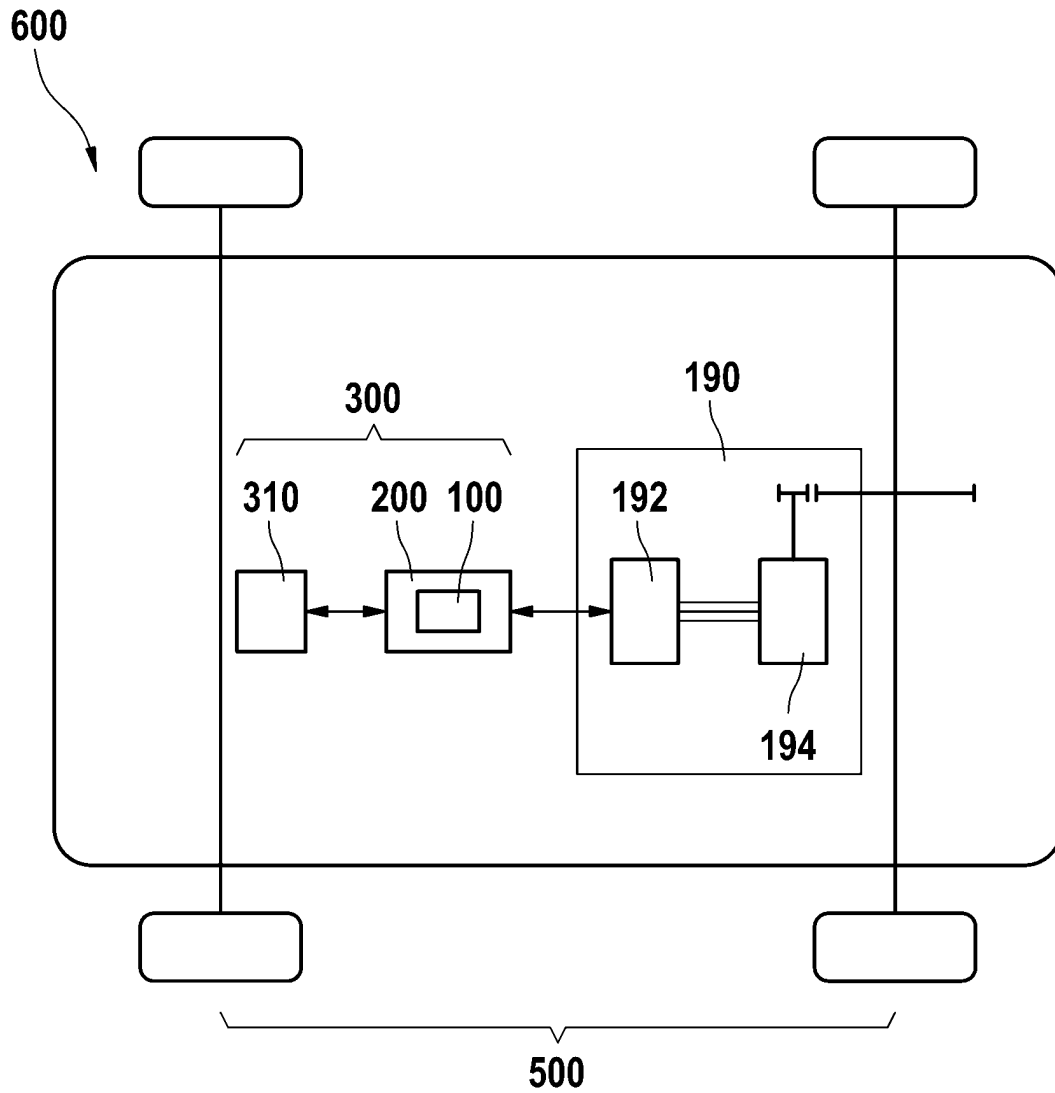


FIG. 5