



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 60 2004 009 239 T2 2008.01.17**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 467 478 B1**

(51) Int Cl.⁸: **H02P 6/00 (2006.01)**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **60 2004 009 239.8**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **04 008 433.7**

(96) Europäischer Anmeldetag: **07.04.2004**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **13.10.2004**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **03.10.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **17.01.2008**

(30) Unionspriorität:
2003102480 07.04.2003 JP

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:
Nissan Motor Co., Ltd., Yokohama, Kanagawa, JP

(72) Erfinder:
**Yoshimoto, Kantaro, Yokohama-shi Kanagawa
231-0842, JP; Kitajima, Yasuhiko, Kamakura-shi
Kanagawa 247-0072, JP**

(74) Vertreter:
**Grünecker, Kinkeldey, Stockmair &
Schwanhäusser, 80538 München**

(54) Bezeichnung: **Motorsteuervorrichtung und Motorsteuerungsverfahren**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Motorregelvorrichtung und ein Verfahren zum Steuern eines Motors.

[0002] Permanentmagnet-Synchronmotoren, die keine mechanischen Teile, wie Bürsten, die verschleifen, erfordern sowie kompakt und hocheffizient sind, werden weit verbreitet als Antriebsmotoren in Elektrofahrzeugen und dergleichen verwendet. In einem idealen Permanentmagnet-Synchronmotor ändert sich die magnetische Flussverteilung des Ankers, die durch den Permanentmagnet erzeugt wird, sinusförmig relativ zu der Phase. Wenn es jedoch jegliche Verzerrung in dem magnetischen Fluss gibt, verhindert die Vektorregelung, die normalerweise in dem Motorstrom implementiert ist, das Auftreten von Drehmomentschwankungen sowie die Verschlechterung der Effizienz des Motors, die auf die Komponenten einer höheren Harmonischen des Motorstroms zurückgeführt werden können, nicht wirksam.

[0003] Es gibt eine Motorregelvorrichtung in dem Stand der Technik, welche das vorangehend beschriebene Problem angeht, indem sie die Grundwellenkomponente und die Komponente der höheren Harmonischen einzeln in einem d-q-Koordinatensystem und in einem dh-qh-Koordinatensystem steuert, die sich synchron zu den entsprechenden Stromkomponenten drehen (siehe japanische Patentoffenlegungsschrift Nr. 2002-223600).

[0004] Es tritt jedoch das folgende Problem in der vorangehend beschriebenen dem Stand der Technik entsprechenden Motorregelvorrichtung auf, wenn der Strombefehlswert der höheren Harmonischen durch das Steuern des Stroms der höheren Harmonischen geändert wird.

[0005] Bei dem Steuern des Stroms der höheren Harmonischen wird die in einem Motorstrom enthaltene Komponente der höheren Harmonischen extrahiert und, nachdem die Komponente des Stroms der höheren Harmonischen in einen Wert in dem dh-qh-Koordinatensystem umgewandelt wurde, implementiert eine Einrichtung zum Steuern des Stroms einer höheren Harmonischen die Steuerung so, dass sie den Strom der höheren Harmonischen mit dem Strombefehlswert der höheren Harmonischen abgleicht. Bei der Grundwellen-Stromregelung wird der erfasste Motorstrom in einen Wert in dem d-q-Koordinatensystem umgewandelt, und anschließend implementiert eine Grundwellen-Stromregelvorrichtung die Regelung so, dass sie den Grundwellen-Strom mit einem Grundwellen-Strombefehlswert abgleicht.

[0006] Der Motorstrom, der in die Grundwellen-Stromregelvorrichtung eingegeben wird, enthält die Komponente der höheren Harmonischen. Die Grundwellen-Stromregelvorrichtung, die die Regelung so implementiert, dass sie den Motorstrom mit dem Grundwellen-Strombefehlswert abgleicht, versucht die Komponente des Stroms der höheren Harmonischen zu unterdrücken. Als ein Ergebnis wird während einem Einschwingverhalten in dem Strom die Konformität des Stroms der höheren Harmonischen mit seinen Strombefehlswerten beeinträchtigt und es wird schwierig, den in den Entwurfspezifikationen hinsichtlich der Regelung gewünschten Wert des Stromregelverhaltens der höheren Harmonischen zu erzielen.

[0007] Die vorliegende Erfindung stellt eine Motorregelvorrichtung sowie ein Verfahren zum Steuern eines Motors bereit, das die Konformität des Stroms der höheren Harmonischen mit dem Befehlswert bei der Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen verbessert.

[0008] Eine Motorregelvorrichtung in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung umfasst eine Grundwellen-Stromregelvorrichtung, die Rückführregelung einer Grundwellenkomponente eines Motorstroms, der zu einem 3-Phasen-Wechselstrommotor fließt, in einem d-q-Koordinatensystem implementiert, das sich synchron zu der Drehung des Motors dreht, eine Einrichtung zum Steuern des Stroms einer höheren Harmonischen, die Rückführregelung einer Komponente einer höheren Harmonischen des Motorstroms in einem dh-qh-Koordinatensystem implementiert, das sich mit einer Frequenz dreht, die ein ganzzahliges Vielfaches einer Frequenz der Grundwellenkomponente des Motorstroms ist, eine Befehlswert-Berechnungseinrichtung, die einen Wechselspannungs-Befehlswert berechnet, indem sie einen Ausgang von der Grundwellen-Stromregelvorrichtung zu einem Ausgang von der Einrichtung zum Steuern des Stroms einer höheren Harmonischen addiert und den Wechselspannungs-Befehlswert an eine Stromrichteinrichtung ausgibt, um eine 3-Phasen-Wechselspannung zu erzeugen, die dem Wechselspannungs-Befehlswert entspricht, sowie eine Einrichtung zum Eliminieren einer Komponente der höheren Harmonischen, die die Komponente der höheren Harmonischen des Motorstroms aus einer Steuerabweichung zwischen einem Motorstrom-Rückführwert und einem Grundwellen-Strombefehlswert in der Grundwellen-Stromregelvorrichtung eliminiert.

[0009] Bei einem Verfahren zum Steuern eines Motors in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung durch Verwendung von Schaltungen, die eine Grundwellen-Stromregelschaltung, die Rückführregelung einer Grundwellenkomponente eines Motorstroms in einem d-q-Koordinatensystem implementiert, und eine Schaltung zum Steuern des Stroms einer höheren Harmonischen enthält, die Rückführregelung einer Komponente der höheren Harmonischen des Motorstroms in einem dh-qh-Koordinatensystem implementiert, werden die Komponenten der höheren Harmonischen des Motorstroms aus einer Steuerabweichung zwischen einem Grundwellen-Strombefehlswert und einem Motorstrom-Rückführwert in der Grundwellen-Stromregelschaltung eliminiert, ein Wechselspannungs-Befehlswert wird durch Addieren eines Ausgangs von der Grundwellen-Stromregelschaltung, aus dem die Komponente der höheren Harmonischen eliminiert worden ist, zu einem Ausgang von der Schaltung zum Steuern des Stroms der höheren Harmonischen berechnet und eine 3-Phasen-Wechselspannung, die dem Wechselspannungs-Befehlswert entspricht, wird erzeugt und die 3-Phasen-Wechselspannung wird an einen 3-Phasen-Wechselstrommotor angelegt.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0010] [Fig. 1](#) ist ein Blockschaltbild der Regelung eines 3-Phasen-Synchronmotors, der über eine Standard-Vektorregelung geregelt wird;

[0011] [Fig. 2](#) ist ein Blockschaltbild der Regelung, das die Struktur der Motorregelvorrichtung in einer ersten Ausführungsform darstellt;

[0012] [Fig. 3](#) stellt ausführlich eine Struktur dar, die in der Einrichtung zum Extrahieren einer höheren Harmonischen eingesetzt werden kann;

[0013] [Fig. 4](#) stellt ausführlich eine weitere Struktur dar, die in der Einrichtung zum Extrahieren einer höheren Harmonischen eingesetzt werden kann;

[0014] [Fig. 5](#) stellt ausführlich eine Struktur dar, die in der dh-qh-Einrichtung zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit eingesetzt werden kann;

[0015] [Fig. 6](#) illustriert das dh-Achsen-Stromverhalten und das qh-Achsen-Stromverhalten, die beide durch schrittweises Ändern des qh-Stromsteuerbefehlswertes über die Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen, die im Zusammenhang mit der in [Fig. 2](#) dargestellten Struktur implementiert wird, erzielt werden;

[0016] [Fig. 7](#) stellt das dh-Achsen-Stromverhalten und das qh-Achsen-Stromverhalten dar, die beide durch schrittweises Ändern des qh-Stromsteuerbefehlswertes in der Motorregelvorrichtung in der ersten Ausführungsform erzielt werden;

[0017] [Fig. 8](#) ist ein Blockschaltbild der Regelung, das die Struktur der Motorregelvorrichtung in einer zweiten Ausführungsform darstellt;

[0018] [Fig. 9](#) stellt ausführlich eine Struktur dar, die in der dh-qh-Einrichtung zum Kompensieren einer elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit eingesetzt werden kann;

[0019] [Fig. 10](#) ist ein Blockschaltbild der Regelung, das die Struktur der Motorregelvorrichtung in einer dritten Ausführungsform darstellt; und

[0020] [Fig. 11](#) ist ein Blockschaltbild der Regelung, das die Struktur der Motorregelvorrichtung in einer vierten Ausführungsform darstellt.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0021] Die im Folgenden dargestellte Gleichung (1) ist eine Schaltungsgleichung, die einen Permanentmagnet-Synchronmotor betrifft, der mit einem 3-Phasen-Wechselstrom angetrieben wird.

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_u & pM_{uv} & pM_{uw} \\ pM_{uv} & R + pL_v & pM_{vw} \\ pM_{uw} & pM_{vw} & R + pL_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0022] In der Gleichung (1) stellen v_u , v_v und v_w die Spannungen in den einzelnen Phasen (U-Phase, V-Phase und W-Phase) dar, i_u , i_v und i_w stellen die Ströme in den einzelnen Phasen dar, e_u , e_v und e_w stellen die elektromotorischen Kräfte der Geschwindigkeit in den einzelnen Phasen dar, die auf den Magnet zurückzuführen sind, L_u , L_v und L_w stellen die Selbstinduktivitäten in den einzelnen Phasen dar, M_{uv} , M_{vw} und M_{wu} stellen Gegeninduktivitäten zwischen den Phasen dar, R stellt den Ankerwiderstand dar und p stellt einen Differentialoperator ($= d/dt$) dar.

[0023] Wenn die Induktivitäten durch Einbeziehen der räumlichen Änderungen der Induktivitäten ausgedrückt werden, werden die Selbstinduktivitäten wie in der nachstehenden Gleichung (2) ausgedrückt und die Gegeninduktivitäten werden wie in der Gleichung (3) ausgedrückt.

$$\begin{aligned} L_u &= L_0 + \sum L_n \cos 2n\theta, \\ L_v &= L_0 + \sum L_n \cos n \left(2\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \\ L_w &= L_0 + \sum L_n \cos n \left(2\theta - \frac{2}{3}\pi \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M_{uv} &= -\frac{1}{2}L_0 + \sum L_n \cos n \left(2\theta - \frac{2}{3}\pi \right) \\ M_{vw} &= -\frac{1}{2}L_0 + \sum L_n \cos 2n\theta, \\ M_{wu} &= -\frac{1}{2}L_0 + \sum L_n \cos n \left(2\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \end{aligned} \quad (3)$$

[0024] In den vorstehenden Gleichungen (2) und (3) stellt θ die elektrische Phase des Rotors dar. Darüber hinaus ist n eine natürliche Zahl.

[0025] Unter Berücksichtigung der Komponente des Stroms der höheren Harmonischen werden die elektromotorischen Kräfte der Geschwindigkeit e_u , e_v und e_w , die durch den Permanentmagnet induziert werden, wie in der Gleichung (4) ausgedrückt.

$$\begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} = -\omega_e \begin{bmatrix} \phi' \sin \theta_e + \sum \phi'_m \sin(m\theta_e) \\ \phi' \sin(\theta_e - 2/3\pi) + \sum \phi'_m \sin(m(\theta_e - 2/3\pi)) \\ \phi' \sin(\theta_e + 2/3\pi) + \sum \phi'_m \sin(m(\theta_e + 2/3\pi)) \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0026] In der Gleichung (4) stellt ω_e die elektrische Winkelgeschwindigkeit dar, Φ' stellt die Grundwellenkomponente in der Flussverkettung dar, Φ'_m stellt die Komponente der höheren Harmonischen in der Flussverkettung dar und m stellt eine natürliche Zahl dar, die gleich oder größer als 2 ist.

[0027] [Fig. 1](#) ist ein Blockschaltbild der Regelung eines 3-Phasen-Synchronmotors, der über die Standard-Vektorregelung geregelt wird. Um sicherzustellen, dass die Erläuterung der Motorregelvorrichtungen, die in den Ausführungsformen der an späterer Stelle beschriebenen vorliegenden Erfindung erzielt werden, eindeutig verstanden wird, wird zunächst in Bezug auf [Fig. 1](#) die Vektorregelung entsprechend dem Stand der Technik erläutert.

[0028] Die Stromsensoren **9a** und **9b** erfassen jeweils einen U-Phasen-Strom i_u und einen W-Phasen-Strom i_w in einem 3-Phasen-Synchronmotor **11**. Eine d-q \leftarrow 3-Phasen-Umwandlungseinrichtung **6** führt eine Koordinatenumwandlung durch, um die Ströme i_u und i_w , die durch die Stromsensoren **9a** und **9b** erfasst wurden, in die Ströme i_d und i_q in einem d-q-Koordinatensystem umzuwandeln. Das d-q-Koordinatensystem dreht sich synchron zu der Grundwellenkomponente des magnetischen Flusses in dem 3-Phasen-Synchronmotor **11**.

[0029] Die Phase θ_e , die durch die d-q \leftarrow 3-Phasen-Umwandlungseinrichtung **6** verwendet wird, wenn die Koordinatenumwandlung ausgeführt wird, repräsentiert die Stellung des Rotors in dem 3-Phasen-Synchronmotor **11** ausgedrückt als eine elektrische Phase. Die Rotorstellung wird zunächst mit einem Drehstellungssensor **10**, wie beispielsweise einem Geber oder Drehmelder, erfasst, und anschließend wird auf Basis der Rotorstellung die elektrische Phase θ_e durch eine Einrichtung **8** zum Berechnen der Phasengeschwindigkeit berechnet. Die Einrichtung **8** zum Berechnen der Phasengeschwindigkeit berechnet des Weiteren die elektrische Winkelgeschwindigkeit ω_e des 3-Phasen-Synchronmotors **11** über die Zeitdifferentiation der Phase θ_e .

[0030] Der d-Achsen-Strom i_d und der q-Achsen-Strom i_q , die durch die d-q \leftarrow 3-Phasen-Umwandlungseinrichtung **6** erhalten werden, werden durch Rückführregelung gesteuert, um jeweils einen d-Achsen-Strombefehl i_d^* und einen q-Achsen-Strombefehl i_q^* abzugleichen. Zunächst berechnen die Subtrahiereinrichtungen **1a** und **1b** die Stromsteuerabweichungen $(i_d^* - i_d)$ und $(i_q^* - i_q)$ des d-Achsen-Stroms i_d und des q-Achsen-Stroms i_q jeweils relativ zu dem d-Achsen-Strombefehlswert i_d^* und dem q-Achsen-Strombefehlswert i_q^* .

[0031] Anschließend wendet die d-q-Achsen-Stromregeleinrichtung **2** die PI-Regelung auf die Stromsteuerabweichungen $(i_d^* - i_d)$ und $(i_q^* - i_q)$ an. Dies bedeutet, dass eine d-Achsen-Steuerspannung v_d und eine q-Achsen-Steuerspannung v_q , die die Stromsteuerabweichungen auf 0 setzen, bestimmt werden.

[0032] Eine nicht interaktive Steuereinrichtung **3** erhält eine d-Achsen-Kompensationsspannung v_{d_cmp} und eine q-Achsen-Kompensationsspannung v_{q_cmp} durch die Gleichungen (5) und (6), die im Folgenden dargestellt werden, auf Basis der Motorwinkelgeschwindigkeit ω_e , des d-Achsen-Strombefehlswertes i_d^* und des q-Achsen-Strombefehlswertes i_q^* , um eine Vorwärtskompensation für die d-Achsen- und die q-Achsen-Interferenz zu erzielen.

$$v_{d_cmp} = -L_q \cdot \omega_e \cdot i_q^* \quad (5)$$

$$v_{q_cmp} = \omega_e \cdot (L_d \cdot i_d^* + \Phi) \quad (6)$$

[0033] In den Gleichungen (5) und (6) stellt L_q die Grundwellenkomponente in der q-Achsen-Induktivität dar, L_d stellt die Grundwellenkomponente in der d-Achsen-Induktivität dar und $\Phi = \sqrt{(3/2)} \cdot \Phi'$.

[0034] Die Addiereinrichtungen **4a** und **4b** berechnen jeweils einen d-Achsen-Steuerspannungsbefehlswert v_d^* sowie einen q-Achsen-Steuerspannungsbefehlswert v_q^* durch Addieren der Kompensationsspannungen v_{d_cmp} und v_{q_cmp} , die durch die nicht interaktive Steuereinrichtung **3** ausgegeben werden, zu der d-Achsen-Steuerspannung v_d und der q-Achsen-Steuerspannung v_q , die durch die d-q-Achsen-Stromregeleinrichtung **2** ausgegeben werden.

[0035] Eine d-q \rightarrow 3-Phasen-Umwandlungseinrichtung **5** wandelt die d-Achsen-Steuerspannung v_d^* und die q-Achsen-Steuerspannung v_q^* in die 3-Phasen-Spannungsbefehlswerte v_u^* , v_v^* und v_w^* um. Eine Stromrichtereinrichtung **7** führt eine PWM- (Pulse Width Modulation – Pulsbreiten-Modulation) Steuerung auf Basis der 3-Phasen-Spannungsbefehlswerte v_u^* , v_v^* und v_w^* aus, wodurch der Gleichstrom von einer Gleichstromquelle **7a** in den 3-Phasen-Wechselstrom umgewandelt wird. Der 3-Phasen-Wechselstrom, der aus der Umwandlung resultiert, wird anschließend dem 3-Phasen-Synchronmotor **11** zugeführt.

[0036] Wenn die Vektorregelung implementiert wird, indem ein Strom der höheren Harmonischen in dem 3-Phasen-Synchronmotor **11** als ein Strom der höheren Harmonischen in dem d-q-Koordinatensystem betrachtet wird, gibt es eine Beschränkung, die hinsichtlich des Frequenzbereiches des d-Achsen-Stroms und des q-Achsen-Stroms in Übereinstimmung mit dem Regelkreis und dem in der PI-Stromregeleinrichtung ein-

gestellten Zuwachs auferlegt wird und folglich ist es schwierig, einen Strom der höheren Harmonischen mit einer hohen Frequenz zu regeln. Dementsprechend wird ein Strom der höheren Harmonischen in dem Motor in einem Koordinatensystem geregelt, das sich mit einer Rate dreht, die ein ganzzahliges Vielfaches der Grundwellenkomponenten der Motorströme ist, wie dies an späterer Stelle erläutert wird.

– Erste Ausführungsform –

[0037] **Fig. 2** ist ein Blockschaltbild der Struktur, die in der Motorregelvorrichtung in der ersten Ausführungsform eingesetzt wird. Es sollte beachtet werden, dass dieselben Referenznummern den Komponenten zugewiesen werden, die denjenigen, die in **Fig. 1** gezeigt werden, identisch sind, und die folgende Erläuterung konzentriert sich auf die Unterschiede zu der in **Fig. 1** dargestellten Vorrichtung.

[0038] Eine neues Koordinatensystem, das heißt, ein dh-qh-Koordinatensystem, das sich synchron zu dem Strom der höheren Harmonischen dreht, der Ziel der Regelung ist, wird eingestellt und der Strom der höheren Harmonischen wird in dem dh-qh-Koordinatensystem gesteuert. Die in **Fig. 2** dargestellte Motorregelvorrichtung enthält eine d-q-Achsen-Stromregeleinrichtung (Grundwellen-Stromregeleinrichtung) **2** sowie eine dh-qh-Achsen-Stromsteuereinrichtung (Einrichtung zum Steuern des Stroms der höheren Harmonischen) **15**, die in einen einzigen Mikroprozessor integriert werden können.

[0039] Die d-q-Stromregeleinrichtung **2** implementiert Rückführregelung der Grundwellenkomponente des Motorstroms in dem d-q-Achsen-Koordinatensystem, das sich synchron zu der Drehung des Motors **11** dreht. Die dh-qh-Stromsteuereinrichtung **15** implementiert Rückführregelung der Komponente der höheren Harmonischen des Motorstroms in dem dh-qh-Koordinatensystem. Das dh-qh-Koordinatensystem ist ein orthogonales Koordinatensystem, das sich mit einer Frequenz dreht, die ein ganzzahliges Vielfaches der Frequenz der Grundwellenkomponente in dem Motorstrom ist.

[0040] Eine Einrichtung **12** zum Extrahieren einer höheren Harmonischen extrahiert die Ströme der höheren Harmonischen, die in dem d-Achsen-Strom und in dem q-Achsen-Strom enthalten sind. **Fig. 3** stellt detailliert eine Struktur dar, die in der Einrichtung **12** zum Extrahieren einer höheren Harmonischen eingesetzt wird. Wie dies in **Fig. 3** dargestellt ist, passieren die d-Achsen- und q-Achsen-Strombefehlswerte i_d^* und i_q^* die Tiefpassfilter (LPF – Low Pass Filter) **12a** und **12b** und folglich werden jeweils die geschätzten Stromverhaltenswerte i_{d_i} und i_{q_i} erhalten. Die Grenzfrequenzen in den Tiefpassfiltern **12a** und **12b** sollten im Voraus auf den Steuerfrequenzbereich der d-q-Achsen-Stromregeleinrichtung **2** eingestellt werden. Der auf diese Weise erhaltene Stromverhaltenswert i_{d_i} wird durch eine Subtrahiereinrichtung **12c** von dem d-Achsen-Strom i_d subtrahiert, und als ein Ergebnis wird ein d-Achsen-Strom der höheren Harmonischen i_{d_hoch} bestimmt. Gleichermaßen wird der geschätzte Stromverhaltenswert i_{q_i} von dem q-Achsen-Strom i_q durch eine Subtrahiereinrichtung **12d** subtrahiert, und als ein Ergebnis wird ein q-Achsen-Strom der höheren Harmonischen i_{q_hoch} bestimmt.

[0041] Es sollte beachtet werden, dass die Tiefpassfilter **12a** und **12b**, wie dies in **Fig. 4** dargestellt ist, in der Einrichtung **12** zum Extrahieren einer höheren Harmonischen weggelassen werden können. Das bedeutet, dass der Wert, der durch Subtrahieren des d-Achsen-Strombefehlswerts i_d^* von dem d-Achsen-Strom i_d erhalten wird, wie der d-Achsen-Strom der höheren Harmonischen i_{d_hoch} eingestellt werden kann, und dass der Wert, der durch Subtrahieren des q-Achsen-Strombefehlswerts i_q^* von dem q-Achsen-Strom i_q erhalten wird, wie der q-Achsen-Strom der höheren Harmonischen i_{q_hoch} eingestellt werden kann.

[0042] Wenn die geschätzten Stromverhaltenswerte i_{d_i} und i_{q_i} , die in **Fig. 3** dargestellt sind, verwendet werden, erreichen sowohl das d-Achsen-Stromverhalten als auch das q-Achsen-Stromverhalten Werte, die dem für die d-q-Achsen-Stromregeleinrichtung **2** in der Regelungs-Entwurfsphase eingestellten Frequenzbereich nahe kommen. Wenn demgegenüber die Tiefpassfilter **12a** und **12b** weggelassen werden (siehe **Fig. 4**), erreichen das d-Achsen-Stromverhalten und das q-Achsen-Stromverhalten Werte, die höher als der in der Regelungs-Entwurfsphase eingestellte Frequenzbereich sind.

[0043] Der d-Achsen-Strom der höheren Harmonischen i_{d_high} und der q-Achsen-Strom der höheren Harmonischen i_{q_high} , die in der Einrichtung **12** zum Extrahieren der höheren Harmonischen erhalten werden, werden in die dh-qh \leftarrow d-q-Umwandlungseinrichtung **13** eingegeben. Die dh-qh \leftarrow d-q-Umwandlungseinrichtung **13** wandelt i_{d_hoch} und i_{q_hoch} jeweils in die Werte i_{dh} und i_{qh} in dem dh-qh-Koordinatensystem um. Eine Phase θ_{eh} , die durch die dh-qh \leftarrow d-q-Umwandlungseinrichtung **13** verwendet wird, wenn die Koordinatenumwandlung ausgeführt wird, kann durch die folgende Gleichung (7) unter Verwendung des Grades k der höheren Harmonischen in dem d-q-Koordinatensystem bestimmt werden.

$\theta_{eh} = k \cdot \theta_e$

(7)

[0044] Die Beziehung zwischen dem Grad q des Stroms der höheren Harmonischen in dem 3-Phasen-Wechselstrom-Koordinatensystem und dem Grad k des Stroms der höheren Harmonischen in dem d-q-Koordinatensystem wird in Tabelle 1 zusammengefasst. Beispielsweise entspricht der Strom der höheren Harmonischen des fünften Grades in dem 3-Phasen-Wechselstrom-Koordinatensystem dem Strom der höheren Harmonischen des negativen sechsten (= -5 - 1) Grades in dem d-q-Koordinatensystem, und der Strom der höheren Harmonischen des siebenten Grades in dem 3-Phasen-Wechselstrom-Koordinatensystem wird zu dem Strom der höheren Harmonischen des sechsten (= 7 - 1) Grades in dem d-q-Koordinatensystem.

GRAD q IN DEM 3-PHASENWECHSELSTROMKOORDINATENSYSTEM	GRAD k IN DEM d-q-KOORDINATENSYSTEM
q = 1, 4, 7, ...	k = q - 1
q = 2, 5, 8, ...	k = -q - q

Tabelle 1

[0045] Die Subtrahiereinrichtungen **14a** und **14b** subtrahieren jeweils den Strom der höheren Harmonischen i_{dh} und i_{qh} in dem dh-qh-Koordinatensystem von den Strombefehlswerten der höheren Harmonischen i_{dh}^* und i_{qh}^* und erhalten auf diese Weise die Stromsteuerabweichungen der höheren Harmonischen ($i_{dh}^* - i_{dh}$) und ($i_{qh}^* - i_{qh}$).

[0046] Eine dh-qh-Achsen-Stromsteuereinrichtung **15**, die beispielsweise mit einer PI-Steuereinrichtung bereitgestellt werden kann, berechnet die Steuerspannungen v_{dh} und v_{qh} , um die Stromsteuerabweichungen der höheren Harmonischen auf 0 zu setzen.

[0047] Eine Schaltungsgleichung in dem dh-qh-Koordinatensystem kann auf Basis der Gleichung (1) zu der folgenden Gleichung (8) modifiziert werden.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} v_{dh} \\ v_{qh} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} R & -\frac{1}{2}(k+1)L_0\omega \\ \frac{1}{2}(k+1)L_0\omega & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} + \frac{3}{2}L_0p \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{dh0} \\ e_{qh0} \end{bmatrix} \\
 & + \frac{3}{2}(-k+1)L_1\omega \begin{bmatrix} \sin 2\theta_{eh} & \cos 2\theta_{eh} \\ \cos 2\theta_{eh} & -\sin 2\theta_{eh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} + \frac{3}{2}L_1 \begin{bmatrix} \cos 2\theta_{eh} & -\sin 2\theta_{eh} \\ -\sin 2\theta_{eh} & -\cos 2\theta_{eh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p i_{dh} \\ p i_{qh} \end{bmatrix} \\
 & + \sum_n [X_{ndh,qh}] + \sum_m [e_{mdh,qh}]
 \end{aligned}$$

(8)

[0048] In der Gleichung (8) sind die räumlichen höheren Harmonischen in den Selbstinduktivitäten und in den Gegeninduktivitäten sowie die räumlichen höheren Harmonischen in den elektromotorischen Kräften der Geschwindigkeit, die durch den Magnet induziert werden, einbezogen. Die Komponente der räumlichen höheren Harmonischen X_n -dh-qh der Induktivitäten wird in der Tabelle 2 dargestellt, und die Komponente der räumlichen höheren Harmonischen e_m -dh-qh der elektromotorischen Kräfte der Geschwindigkeit, die durch den Magnet induziert werden, wird in der Tabelle 3 dargestellt. Die Tabellen 2 und 3 geben an, dass die Komponente der räumlichen höheren Harmonischen, welche der vorrangige Grund des Induzierens des Stroms der höheren Harmonischen ist, als eine Gleichstrom-Quantität ausgedrückt werden kann.

KOMPONENTE DER RÄUMLICHEN HÖHEREN HARMONISCHEN DER INDUKTIVITÄT $[X_{n-dh-qh}]$		
dh-qh-KOORDINATENUMWANDLUNG $\theta_h = k\theta$	$n = 4,7,10\dots$	$n = 2,5,8\dots$
$k = 2n - 2$	$\frac{3}{2}(2n-1)L_n\omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$ $+ \frac{3}{2}L_n \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} pi_d \\ pi_q \end{bmatrix}$	Wechselstromkomponente
$k = -(2n + 2)$	Wechselstromkomponente	$-\frac{3}{2}(2n+1)L_n\omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$ $+ \frac{3}{2}L_n \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} pi_d \\ pi_q \end{bmatrix}$

Tabelle 2

KOMPONENTE DER RÄUMLICHEN HÖHEREN HARMONISCHEN DER DURCH DEN PERMANETMAGNET INDUZIERTEN ELEKTROMOTORISCHEN KRAFT DER GESCHWINDIGKEIT $[e_{m-dh-qh}]$		
dh-qh-KOORDINATENUMWANDLUNG $\theta_h = k\theta$	$m = 4,7,10\dots$	$m = 2,5,8\dots$
$k = m - 1$	$\begin{bmatrix} 0 \\ m\sqrt{\frac{3}{2}}\phi'_m\omega \end{bmatrix}$	Wechselstromkomponente
$k = -(2n + 2)$	Wechselstromkomponente	$\begin{bmatrix} 0 \\ -m\sqrt{\frac{3}{2}}\phi'_m\omega \end{bmatrix}$

Tabelle 3

[0049] In der Gleichung (8) enthalten die Terme, die zu den elektromotorischen Kräften der Geschwindigkeit gehören, Terme, die auf idh und iqh zurückgeführt werden können, Terme, die auf id und iq zurückgeführt werden können, sowie Terme, die auf die Komponente der höheren Harmonischen in dem durch den Magnet erzeugten magnetischen Fluss zurückgeführt werden können. Diese elektromotorischen Kräfte der Geschwindigkeit stellen eine äußere Störung zu der Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen dar, die in dem dh-qh-Koordinatensystem implementiert ist. Eine dh-qh-Einrichtung **18** zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit ist eine Vorwärtskompensationseinrichtung, die die nachteilige Auswirkung der elektromotorischen Kräfte der Geschwindigkeit kompensiert.

[0050] Nehmen wir an, dass 2 der Grad n der Induktivität der räumlichen höheren Harmonischen ist, 5 der Grad m der räumlichen höheren Harmonischen des magnetischen Flusses ist, der durch den Magnet erzeugt wird, und -6 der Grad k ist, der für die dh-qh-Koordinatenumwandlung verwendet wird. Unter Verwendung dieser Werte für die Substitution in der Gleichung (8) kann die dh-qh-Schaltungsgleichung wie in der nachstehenden Gleichung (9) ausgedrückt werden.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} v_{dh} \\ v_{qh} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R & \frac{15}{2} L_0 \omega \\ -\frac{15}{2} L_0 \omega & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} L_0 p \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{dh0} \\ e_{qh0} \end{bmatrix} \\
 &+ \frac{21}{2} L_1 \omega \begin{bmatrix} \sin 2\theta_h & \cos 2\theta_h \\ \cos 2\theta_h & -\sin 2\theta_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} L_1 \begin{bmatrix} \cos 2\theta_h & -\sin 2\theta_h \\ -\sin 2\theta_h & -\cos 2\theta_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} pi_{dh} \\ pi_{qh} \end{bmatrix} \\
 &- \frac{15}{2} L_2 \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{3}{2} L_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} pi_d \\ pi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -5\sqrt{3/2}\phi'_s \omega \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{9}$$

[0051] [Fig. 5](#) zeigt die Struktur, die in der dh-qh-Einrichtung **18** zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit eingesetzt wird. Die dh-qh-Einrichtung **18** zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit berechnet die Steuerspannungen v_{dh_cmp} und v_{qh_cmp} auf Basis des d-Achsen-Strombefehlswertes i_d^* , des q-Achsen-Strombefehlswertes i_q^* , des dh-Achsen-Strombefehlswertes i_{dh}^* , des qh-Achsen-Strombefehlswertes i_{qh}^* , der Motor-Winkelgeschwindigkeit ω , der Induktivitäten L_0 und L_2 sowie des Parameters der Komponente der höheren Komponente Φ'_s des magnetischen Flusses.

[0052] Die Addiereinrichtungen **19a** und **19b** addieren jeweils die Steuerspannungen v_{dh} und v_{qh} , die in der dh-qh-Achsen-Stromsteuereinrichtung **15** bestimmt werden, zu den berechneten Steuerspannungen v_{dh_cmp} und v_{qh_cmp} , und erhalten folglich die dh-qh-Steuerspannungen v_{dh}^* und v_{qh}^* .

[0053] Eine dh-qh → 3-Phasen-Umwandlungseinrichtung **16** wandelt die dh-qh-Steuerspannungen v_{dh}^* und v_{qh}^* in 3-Phasen-Wechselspannungen $v_{u'}$, $v_{v'}$ und $v_{w'}$ um. Die Addiereinrichtungen **17a**, **17b** und **17c** addieren die 3-Phasen-Wechselspannungen $v_{u'}$, $v_{v'}$ und $v_{w'}$ jeweils zu den Steuerspannungen v_{u^*} , v_{v^*} und v_{w^*} , die durch die d-q-Achsen-Stromregelung erhalten werden, und erhalten folglich die Spannungsbefehlswerte $v_{u''}$, $v_{v''}$ und $v_{w''}$ in Übereinstimmung mit den einzelnen Phasen.

[0054] Durch Hinzufügen eines solchen Systems zum Steuern des Stroms der höheren Harmonischen zu dem Standard-Vektorregelungssystem wird es möglich, den Strom der höheren Harmonischen in dem Motor mit einem besseren Verhalten im Vergleich zu dem Verhalten zu steuern, das bei der Standard-Vektorregelung allein erzielt wird. Es ist zu beachten, dass, wenn eine Vielzahl von Graden des Stroms der höheren Harmonischen gesteuert werden, ein System zum Steuern des Stroms der höheren Harmonischen in Übereinstimmung mit jedem Grad des Stroms der höheren Harmonischen, der zu steuern ist, hinzugefügt werden sollte.

[0055] [Fig. 6](#) zeigt das dh-Achsen-Stromverhalten und das qh-Achsen-Stromverhalten, die beide durch schrittweises Ändern des qh-Strombefehlswertes über die in der vorangehend beschriebenen Struktur implementierte Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen erzielt werden. Eine Störung wird sowohl in dem dh-Strom als auch in dem qh-Strom in der Ausregelzeit beobachtet. Die Störung tritt aus dem folgenden Grund auf. Und zwar enthalten sowohl der d-Achsen-Strom i_d als auch der q-Achsen-Strom i_q , die in die d-q-Stromregelungseinrichtung **2** eingegeben werden, die Komponente der höheren Harmonischen. Da die d-q-Stromregelungseinrichtung **2** den Regelungsausgang bestimmt, indem sie den d-Achsen-Strom i_d und den q-Achsen-Strom i_q jeweils mit den Strombefehlswerten i_d^* und i_q^* abgleicht, versucht sie die Komponente der höheren Harmonischen zu unterdrücken. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass, da die d-q-Achsen-Stromregelungseinrichtung **2** die dh-qh-Stromsteuerung störend beeinflusst, die Konformität der dh-qh-Ströme der höheren Harmonischen mit den jeweiligen Befehlswerten in der Stromausregelzeit negativ beeinflusst wird.

[0056] Um das Problem hinsichtlich des vorangehend beschriebenen Stromverhaltens anzugehen, enthält die Motorregelvorrichtung in der ersten Ausführungsform eine dh-qh → d-q-Umwandlungseinrichtung **20** sowie die Addiereinrichtungen **21a** und **21b**.

[0057] Die dh-qh → d-q-Umwandlungseinrichtung **20** wandelt den dh-Achsen-Strombefehlswert i_{dh}^* und den qh-Achsen-Strombefehlswert i_{qh}^* jeweils in die Werte $i_{d_hoch}^*$ und $i_{q_hoch}^*$ in dem d-q-Koordinatensystem um. Die Koordinatenumwandlung, die durch die dh-qh → d-q-Umwandlungseinrichtung **20** durchgeführt wird, wird wie in der folgenden Gleichung (10) ausgedrückt.

$$\begin{bmatrix} i_{d_hoch}^* \\ i_{q_hoch}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ch} & -\sin \theta_{ch} \\ \sin \theta_{ch} & \cos \theta_{ch} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d}^* \\ i_{q}^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0058] Die Strombefehlswerte der höheren Harmonischen $i_{d_hoch}^*$ und $i_{q_hoch}^*$, die aus der Koordinatenumwandlung resultieren, werden jeweils durch die Addiereinrichtungen **21a** und **21b** zu dem d-Achsen-Strombefehlswert i_d^* und dem q-Achsen-Strombefehlswert i_q^* addiert und folglich werden ein d-Achsen-Strombefehlswert i_{d1}^* und ein q-Achsen-Strombefehlswert i_{q1}^* bestimmt (siehe Gleichungen (11) und (12)).

$$i_{d1}^* = i_d^* + i_{d_hoch}^* \quad (11)$$

$$i_{q1}^* = i_q^* + i_{q_hoch}^* \quad (12)$$

[0059] Es ist zu beachten, dass die Differenz (Stromregelabweichung) zwischen dem d-Achsen-Strombefehlswert i_{d1}^* und dem d-Achsen-Strom i_d , die durch die Subtrahiereinrichtung **1a** berechnet wird, sowie die Differenz (Stromregelabweichung) zwischen dem q-Achsen-Strombefehlswert i_{q1}^* und dem q-Achsen-Strom i_q , die durch die Subtrahiereinrichtung **1b** berechnet wird, in die d-q-Achsen-Stromregleinrichtung **2** eingegeben werden.

[0060] In der Motorregelvorrichtung in der ersten Ausführungsform werden die Werte der Komponente der höheren Harmonischen $i_{d_hoch}^*$ und $i_{q_hoch}^*$ jeweils zu dem d-Achsen-Strombefehlswert i_d^* und dem q-Achsen-Strombefehlswert i_q^* addiert und anschließend werden sowohl der d-Achsen-Strom i_d als auch der q-Achsen-Strom i_q (Rückführwerte), die beide die Komponente der höheren Harmonischen enthalten, von den Summen subtrahiert, die aus der Addition, das heißt, des d-Achsen-Strombefehlswertes i_{d1}^* und des q-Achsen-Strombefehlswertes i_{q1}^* , resultieren.

[0061] Das bedeutet, dass die Komponente der höheren Harmonischen, die in dem d-Achsen-Strombefehl i_{d1}^* und in dem q-Achsen-Strombefehl i_{q1}^* enthalten ist, durch die Komponente der höheren Harmonischen, die jeweils in dem d-Achsen-Stromrückführwert i_d und in dem q-Achsen-Stromrückführwert i_q enthalten ist, aufgehoben wird, wobei es als ein Ergebnis möglich ist, zu verhindern, dass jegliche Komponente der höheren Harmonischen in die d-q-Achsen-Stromregleinrichtung **2** eingegeben wird. Folglich wird der Strom der höheren Harmonischen nicht durch die Regelung unterdrückt, die durch die d-q-Achsen-Stromregleinrichtung **2** implementiert wird, und die Stromregelung in dem d-q-Koordinatensystem sowie die Stromsteuerung in dem dh-qh-Koordinatensystem können vollständig unabhängig voneinander implementiert werden.

[0062] Wenn die Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen mit dem schlechteren Verhalten des Standes der Technik in einem Antriebsmotor in einem Elektrofahrzeug eingesetzt wird, das häufig zwischen Beschleunigen und Abbremsen abwechselt, wird die Konformität eines Stroms der höheren Harmonischen mit seinem Befehlswert verringert, und als ein Ergebnis wird die Drehmomentschwankung, die während einem Beschleunigen und Abbremsen auftritt, nicht auf ein zufriedenstellendes Maß verringert. Demgegenüber reduziert die Motorregelvorrichtung in der ersten Ausführungsform, die eine Verbesserung hinsichtlich der Konformität des Stroms der höheren Harmonischen mit den jeweiligen Befehlswerten bei der Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen erreicht, den Umfang der Drehmomentschwankung und verbessert die Motoreffizienz, wenn die Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen in einem Fahrzeug eingesetzt wird, das häufig beschleunigt und abbremst.

[0063] Die Motorregelvorrichtung in der ersten Ausführungsform enthält eine nicht interaktive Steuereinrichtung **3** sowie die Addiereinrichtungen **4a** und **4b**, die bereitgestellt werden, um jegliche nachteilige Auswirkung der d-Achsen- und der q-Achsen-Interferenz auf den Ausgang v_d und v_q von der d-q-Achsen-Stromregleinrichtung **2** auf Basis des d-Achsen-Strombefehlswertes i_d^* und des q-Achsen-Strombefehlswertes i_q^* sowie der Motor-Drehgeschwindigkeit ω_e zu kompensieren, und als ein Ergebnis wird die nachteilige Auswirkung der d-Achsen- und der q-Achsen-Interferenz eliminiert, um das Verhalten der Grundwellen-Stromregelung weiter zu verbessern. Darüber hinaus wird, da die dh-qh-Einrichtung **18** zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit und die Addiereinrichtungen **19a** und **19b** bereitgestellt werden, um die nachteilige Auswirkung der elektromagnetischen Kräfte der Geschwindigkeit in dem Motor **11** auf den Ausgang v_{dh} und v_{qh} von der dh-qh-Stromsteuereinrichtung **15** auf Basis des d-Achsen-Strombefehlswertes i_d^* und des q-Achsen-Strombefehlswertes i_q^* , des dh-Achsen-Strombefehlswertes i_{dh}^* und des qh-Achsen-Strombefehlswertes i_{qh}^* sowie der Motor-Drehgeschwindigkeit ω_e zu kompensieren, die nachteilige Auswirkung der elektromotorischen Kräfte der Motorgeschwindigkeit eliminiert, um das Regelverhalten des Stroms der höheren

Harmonischen weiter zu verbessern.

[0064] Das dh-Achsen-Stromverhalten und das qh-Achsen-Stromverhalten, welche durch schrittweises Ändern des qh-Strombefehlswertes in der Motorregelvorrichtung in der ersten Ausführungsform erzielt werden, werden in [Fig. 7](#) dargestellt. [Fig. 7](#) gibt an, dass keine Störung eine vorübergehende Änderung in dem Strom hervorruft und dass ein hohes Maß an Konformität mit dem Strombefehlswert erreicht wird.

– Zweite Ausführungsform –

[0065] [Fig. 8](#) ist ein Blockschaltbild der Struktur, die in der Motorregelvorrichtung in der zweiten Ausführungsform eingesetzt wird. Es ist zu beachten, dass dieselben Referenznummern den Komponenten zugewiesen werden, die denjenigen, die in den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) gezeigt werden, identisch sind, und die folgende Beschreibung konzentriert auf die Unterschiede zu der ersten Ausführungsform.

[0066] In der Motorregelvorrichtung in der ersten Ausführungsform werden der d-Achsen-Strombefehlswert i_d^* und der q-Achsen-Strombefehlswert i_q^* sowie die Motor-Winkelgeschwindigkeit ω_e in die nicht interaktive Steuereinrichtung **3** eingegeben. In der Motorregelvorrichtung in der zweiten Ausführungsform werden demgegenüber die Strombefehlswerte der höheren Harmonischen $i_{d_hoch}^*$ und $i_{q_hoch}^*$, die auf Basis der Gleichung (10) berechnet wurden, sowie der d-Achsen-Strombefehlswert i_{d1}^* und der q-Achsen-Strombefehlswert i_{q1}^* , die jeweils auf Basis der Gleichungen (11) und (12) berechnet wurden, zusätzlich zu der Motor-Winkelgeschwindigkeit ω_e in die nicht aktive Steuereinrichtung **3A** eingegeben. Die nicht interaktive Steuereinrichtung **3A** berechnet eine d-Achsen-Kompensationsspannung v_{d_cmp} sowie eine q-Achsen-Kompensationsspannung v_{q_cmp} anhand der folgenden Gleichungen (13) und (14).

$$v_{d_cmp} = -L_q \cdot \omega_e \cdot i_{q1}^* - k \cdot L_d \cdot \omega_e \cdot i_{q_hoch}^* \quad (13)$$

$$v_{q_cmp} = \omega_e \cdot (L_d \cdot i_{d1}^* + \Phi) + k \cdot L_q \cdot \omega_e \cdot i_{d_hoch}^* \quad (14)$$

[0067] Die zweiten Terme auf der rechten Seite der Gleichungen (13) und (14) sind enthalten, um die elektromotorischen Kräfte der Geschwindigkeit zu kompensieren, die durch den Strom der höheren Harmonischen in dem d-q-Koordinatensystem in den Gleichungen (5) und (6) induziert werden.

[0068] Durch Kompensieren der elektromotorischen Kräfte der Geschwindigkeit, die durch den Strom der höheren Harmonischen induziert werden, mit der nicht interaktiven Steuereinrichtung **3A** kann die arithmetische Operation, die durch die dh-qh-Einrichtung **18** zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit in der in [Fig. 2](#) dargestellten ersten Ausführungsform durchgeführt wird, teilweise weggelassen werden. [Fig. 9](#) stellt ein strukturelles Beispiel der dh-qh-Einrichtung **18A** zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit in der zweiten Ausführungsform dar, wenn die dh-qh-Schaltungsgleichung des Motors wie in der Gleichung (9) ausgedrückt wird. Durch Einsetzen der dh-qh-Einrichtung **18A** zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit in der zweiten Ausführungsform kann die arithmetische Operation, die für den d-Achsen-Strombefehlswert i_d^* und den q-Achsen-Strombefehlswert i_q^* in der dh-qh-Einrichtung **18** zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit in [Fig. 5](#) durchgeführt wird, weggelassen werden.

[0069] Mit der Motorregelvorrichtung in der zweiten Ausführungsform kann die Stromregelung in dem d-q-Koordinatensystem und die Stromsteuerung in dem dh-qh-Koordinatensystem implementiert werden, ohne dass zugelassen wird, dass die d-q-Achsen-Stromregelvorrichtung **2** die dh-qh-Achsen-Stromsteuerung stört. Als ein Ergebnis verbessert sich die Konformität der Ströme mit den jeweiligen Befehlswerten bei der Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen und das Ausmaß der Drehmomentschwankung kann reduziert werden und die Motoreffizienz wird verbessert, selbst wenn die Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen in einem Fahrzeug eingesetzt wird, das häufig beschleunigt und abbremst.

[0070] Darüber hinaus wird, da die Motorregelvorrichtung in der zweiten Ausführungsform die nicht interaktive Steuereinrichtung **3A** sowie die Addiereinrichtungen **4a** und **4b** enthält, die bereitgestellt sind, um die nachteilige Auswirkung auf den Ausgang v_d und v_q von der d-q-Achsen-Stromregelvorrichtung **2**, die durch die d-Achsen- und die q-Achsen-Interferenz verursacht wird, auf Basis der Strombefehlswerte $i_{d_hoch}^*$ und $i_{q_hoch}^*$ in den d-q-Koordinatensystemen, die durch das Umwandeln des dh-Achsen-Strombefehlswertes und des qh-Achsen-Strombefehlswertes in Werte in dem d-q-Koordinatensystem erhalten werden, der d-Achsen- und q-Achsen-Strombefehlswerte i_{d1}^* und i_{q1}^* , die beide die Komponente der höheren Harmonischen enthalten, und der Motor-Drehgeschwindigkeit ω_e zu eliminieren, der nachteilige Effekt der d-Achsen-Interferenz sowie

der q-Achsen-Interferenz eliminiert, um das Verhalten der Grundwellen-Stromregelung weiter zu verbessern.

[0071] Darüber hinaus wird durch das Enthalten der dh-qh-Einrichtung **18a** zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit sowie der Addiereinrichtungen **19a** und **19b**, die bereitgestellt sind, um die nachteilige Auswirkung der elektromotorischen Kräfte der Geschwindigkeit in dem Motor **11** auf den Ausgang vdh und vqh von der dh-qh-Achsen-Stromsteuereinrichtung **15** auf Basis des dh-Achsen-Strombefehlswertes id_h^* und des qh-Achsen-Strombefehlswertes iq_h^* sowie der Motor-Drehgeschwindigkeit ω_e zu kompensieren, der nachteilige Effekt der elektromotorischen Kräfte der Geschwindigkeit des Motors eliminiert, um das Verhalten der Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen weiter zu verbessern.

– Dritte Ausführungsform –

[0072] **Fig. 10** ist ein Blockschaltbild der Struktur, die in der Motorregelvorrichtung in der dritten Ausführungsform eingesetzt wird. Es ist zu beachten, dass dieselben Referenznummern den Komponenten zugewiesen werden, die denjenigen, die in den **Fig. 1** und **Fig. 2** gezeigt werden, identisch sind, und die folgende Erläuterung konzentriert sich auf die Unterschiede zu der ersten Ausführungsform.

[0073] In der Motorregelvorrichtung in der dritten Ausführungsform werden ein d-Achsen-Strom und ein q-Achsen-Strom (Rückführwerte), die keine Komponente der höheren Harmonischen enthalten, durch Subtrahieren der Werte der Komponente der höheren Harmonischen id_{hoch}^* und iq_{hoch}^* (der Ausgang von der dh-qh \rightarrow d-q-Umwandlungseinrichtung **20**) jeweils von dem d-Achsen-Strom id und dem q-Achsen-Strom iq (Rückführwerte), die die Komponente der höheren Harmonischen enthalten, erzeugt, und der d-Achsen-Strom sowie der q-Achsen-Strom werden auf Basis der Steuerabweichungen relativ zu den Strombefehlswerten der Grundwellenkomponente id^* und iq^* gesteuert.

[0074] Die Strombefehlswerte der höheren Harmonischen id_{hoch}^* und iq_{hoch}^* , die aus der durch die dh-qh \rightarrow d-q-Umwandlungseinrichtung **20** (siehe Gleichung (10)) durchgeführten Umwandlung resultieren, werden jeweils in die Subtrahiereinrichtungen **22a** und **22b** eingegeben. Die Subtrahiereinrichtungen **22a** und **22b** subtrahieren jeweils die Strombefehlswerte der höheren Harmonischen id_{hoch}^* und iq_{hoch}^* von dem d-Achsen-Strom id und dem q-Achsen-Strom iq , die beide die Komponente der höheren Harmonischen enthalten, und erhalten folglich einen d-Achsen-Strom id_1 und einen q-Achsen-Strom iq_1 , die keine Komponente der höheren Harmonischen enthalten (Gleichungen (15) und (16)).

$$id_1 = id - id_{hoch}^* \quad (15)$$

$$iq_1 = iq - iq_{hoch}^* \quad (16)$$

[0075] Die Subtrahiereinrichtungen **1a** und **1b** berechnen die Differenzen (Stromsteuerabweichungen) ($id^* - id_1$) und ($iq^* - iq_1$) durch Subtrahieren des d-Achsen-Stroms id_1 und des q-Achsen-Stroms iq_1 (Rückführwerte), die allein aus der Grundwellenkomponente bestehen, jeweils von dem d-Achsen-Strombefehlswert id^* und dem q-Achsen-Strombefehlswert iq^* , die allein die Grundwellenkomponente enthalten. Die auf diese Weise berechneten Differenzen werden in die d-q-Achsen-Stromregleinrichtung **2** eingegeben.

[0076] Die Motorregelvorrichtung in der dritten Ausführungsform eliminiert die Komponente der höheren Harmonischen von dem d-Achsen-Strom id und dem q-Achsen-Strom iq (Rückführwerte), die in die d-q-Achsen-Stromregleinrichtung **2** eingegeben werden, und als ein Ergebnis können die d-q-Achsen-Stromregelung und die dh-qh-Achsen-Stromsteuerung vollständig unabhängig voneinander implementiert werden, ohne zuzulassen, dass die d-q-Achsen-Stromregleinrichtung **2** die dh-qh-Stromsteuerung stört. Auf diese Weise verbessert sich die Konformität der Ströme mit den jeweiligen Befehlswerten bei der Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen und das Ausmaß der Drehmomentschwankung kann verringert werden und die Motoreffizienz wird verbessert, selbst wenn die Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen in einem Fahrzeug eingesetzt wird, das häufig beschleunigt und abbremst.

– Vierte Ausführungsform –

[0077] **Fig. 11** ist ein Blockschaltbild der Struktur, die in der Motorregelvorrichtung in der vierten Ausführungsform eingesetzt wird. Es ist zu beachten, dass dieselben Referenznummern den Komponenten zugewiesen werden, die denjenigen, die in den **Fig. 1** und **Fig. 2** gezeigt werden, identisch sind, und die folgende Erläuterung konzentriert sich auf die Unterschiede zu der ersten Ausführungsform.

[0078] In der Motoregelvorrichtung in der vierten Ausführungsform wird die Einrichtung zum Extrahieren des Stroms der höheren Harmonischen unter Verwendung eines Hochpassfilters **12A** gebildet, um dem d-Achsen-Strom der höheren Harmonischen i_{d_hoch} und den q-Achsen-Strom der höheren Harmonischen i_{q_hoch} zu extrahieren. Anschließend subtrahieren die Subtrahiereinrichtungen **23a** und **23b** die Ströme der höheren Harmonischen i_{d_hoch} und i_{q_hoch} jeweils von dem d-Achsen-Strom i_d und dem q-Achsen-Strom i_q (Rückführwerte), die die Komponente der höheren Harmonischen enthalten, wodurch ein d-Achsen-Strom und ein q-Achsen-Strom erzeugt werden, die keine Komponente der höheren Harmonischen enthalten und allein aus der Grundwellenkomponente bestehen. Die Steuerabweichungen des d-Achsen-Stroms und des q-Achsen-Stroms, die auf diese Weise erzeugt werden, relativ zu dem d-Achsen-Strombefehlswert i_d^* und dem q-Achsen-Strombefehlswert i_q^* werden anschließend in die d-q-Achsen-Stromregeleinrichtung **2** eingegeben.

[0079] Die Motorregelvorrichtung in der vierten Ausführungsform erzielt einen Vorteil, der dem entspricht, der durch das Passieren des d-Achsen-Stroms i_d und des q-Achsen-Stroms i_q durch einen Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz gleich der des Hochpassfilters **12A** umgesetzt wird. Und zwar kann die Komponente der höheren Harmonischen aus den Rückführwerten in der d-q-Achsen-Stromregeleinrichtung **2** ausgeschlossen werden. Als ein Ergebnis kann die d-q-Achsen-Stromregeleinrichtung **2** die dh-qh-Achsen-Stromsteuereinrichtung **3** nicht stören, und die Stromregelung in dem d-q-Koordinatensystem sowie die Stromsteuerung in dem dh-qh-Koordinatensystem können vollständig unabhängig voneinander implementiert werden. Auf diese Weise verbessert sich die Konformität der Ströme mit den jeweiligen Befehlswerten in der Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen und das Ausmaß der Drehmomentschwankung kann verringert werden und die Motoreffizienz wird verbessert, selbst wenn die Steuerung des Stroms der höheren Harmonischen in einem Fahrzeug eingesetzt wird, das häufig beschleunigt und abbremst.

[0080] Es ist zu beachten, dass die Motorregelvorrichtung alternativ unter Verwendung eines Tiefpassfilters, der eine Grenzfrequenz gleich der des Hochpassfilters **12A** aufweist, sowie unter Verwendung von Werten erzielt werden kann, die durch Passieren des d-Achsen-Stroms i_d und des q-Achsen-Stroms i_q durch diesen Tiefpassfilter als d-Achsen- und q-Achsen-Strom-Rückführwerte erhalten werden.

[0081] Die vorangehend beschriebenen Ausführungsformen sind Beispiele, und es können verschiedene Modifizierungen durchgeführt werden, ohne von dem in den angehängten Patentansprüchen definierten Umfang der Erfindung abzuweichen. Beispielsweise werden keine Beschränkungen hinsichtlich des Umfangs der vorliegenden Erfindung durch den bestimmten Typ des Motors **11** auferlegt, bei dem die Regelung implementiert wird.

Patentansprüche

1. Motorregelvorrichtung, die umfasst:

eine Grundwellen-Stromregeleinrichtung (**2**), die Rückführregelung einer Grundwellenkomponente eines Motorstroms, der zu einem 3-Phasen-Wechselstrommotor (**11**) fließt, in einem d-q-Koordinatensystem implementiert, das sich synchron zu der Drehung des Motors (**11**) dreht;

eine Einrichtung (**15**) zum Steuern eines Stroms einer höheren Harmonischen, die Rückführregelung einer Komponente einer höheren Harmonischen des Motorstroms in einem dh-qh-Koordinatensystem implementiert, das sich mit einer Frequenz dreht, die ein ganzzahliges Vielfaches einer Frequenz der Grundwellenkomponente des Motorstroms ist;

eine Befehlswert-Berechnungseinrichtung (**5**, **16**, **17a**, **17b**, **17c**), die einen Wechselspannungs-Befehlswert berechnet, indem sie einen Ausgang von der Grundwellen-Stromregeleinrichtung (**2**) zu einem Ausgang von der Einrichtung (**15**) zum Steuern des Stroms einer höheren Harmonischen addiert und den Wechselspannungs-Befehlswert an eine Stromrichteinrichtung (**7**) ausgibt, um eine 3-Phasen-Wechselspannung zu erzeugen, die dem Wechselspannungs-Befehlswert entspricht; und

eine Einrichtung (**20**, **21a**, **21b**) zum Eliminieren einer Komponente der höheren Harmonischen, die die Komponente der höheren Harmonischen des Motorstroms aus einer Steuerabweichung zwischen einem Motorstrom-Rückführwert und einem Grundwellen-Strombefehlswert in der Grundwellen-Stromregeleinrichtung (**2**) eliminiert.

2. Motorregelvorrichtung nach Anspruch 1, wobei:

die Einrichtung (**20**, **21a**, **21b**) zum Eliminieren der Komponente der höheren Harmonischen Strombefehlswerte der höheren Harmonischen in dem dh-qh-Koordinatensystem über Koordinatenumwandlung in Strombefehlswerte der höheren Harmonischen in dem d-q-Koordinatensystem umwandelt und einen d-Achsen-Strombefehlswert sowie einen q-Achsen-Strombefehlswert, die beide die Komponente der höheren Harmonischen enthalten, berechnet, indem sie die Strombefehlswerte der höheren Harmonischen, die aus der Koordinaten-

umwandlung entstehen, in Grundwellen-Strombefehlswerte umwandelt; und die Grundwellen-Stromregelvorrichtung (2) die Grundwellenkomponente des Motorstroms so steuert, dass sie Motorstrom-Rückführwerten entspricht, wobei der d-Achsen-Strombefehlswert und der q-Achsen-Strombefehlswert die Komponente der höheren Harmonischen enthalten.

3. Motorregelvorrichtung nach Anspruch 2, die des Weiteren umfasst:
eine Drehgeschwindigkeits-Erfassungseinrichtung (8, 10), die eine Drehgeschwindigkeit des Motors (11) erfasst;
eine nicht interaktive Steuereinrichtung (3, 3A, 4a, 4b), die einen nachteiligen Effekt auf den Ausgang von der Grundwellen-Stromregelvorrichtung (2), der durch Interferenz der d-Achse und der q-Achse verursacht wird, auf Basis der Grundwellen-Strombefehlswerte und der Motor-Drehgeschwindigkeit kompensiert; und
eine Einrichtung (18, 18A, 19a, 19b) zum Kompensieren einer elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit, die eine nachteilige Auswirkung, die auf den Ausgang von der Einrichtung (15) zum Steuern des Stroms der höheren Harmonischen durch eine elektromotorische Kraft der Geschwindigkeit in dem Motor ausgeübt wird, auf Basis der Grundwellen-Strombefehlswerte, der Strombefehlswerte der höheren Harmonischen und der Motor-Drehgeschwindigkeit kompensiert.

4. Motorregelvorrichtung nach Anspruch 2, die des Weiteren umfasst:
eine Drehgeschwindigkeits-Erfassungseinrichtung (8, 10) zum Erfassen einer Drehgeschwindigkeit des Motors;
eine nicht interaktive Steuereinrichtung (3, 3A, 4a, 4b), die eine nachteilige Auswirkung auf den Ausgang von der Grundwellen-Stromregelvorrichtung, die durch Interferenz der d-Achse und der q-Achse ausgeübt wird, auf Basis der Strombefehlswerte der höheren Harmonischen, die über eine Umwandlung in das d-q-Koordinatensystem ermittelt werden, des d-Achsen-Strombefehlswertes und des q-Achsen-Strombefehlswertes, die beide die Komponente der höheren Harmonischen enthalten, sowie der Motordrehgeschwindigkeit kompensiert; und
eine Einrichtung (18, 18A, 19a, 19b) zum Kompensieren der elektromotorischen Kraft der Geschwindigkeit, die eine durch eine elektromotorische Kraft der Geschwindigkeit in dem Motor induzierte nachteilige Auswirkung auf den Ausgang von der Einrichtung (15) zum Steuern des Stroms der höheren Harmonischen auf Basis der Strombefehlswerte der höheren Harmonischen und der Motor-Drehgeschwindigkeit kompensiert.

5. Motorregelvorrichtung nach Anspruch 1, wobei:
die Einrichtung (20, 21a, 21b) zum Eliminieren der Komponente der höheren Harmonischen Strombefehlswerte der höheren Harmonischen in dem dh-qh-Koordinatensystem über Koordinatenumwandlung in Strombefehlswerte der höheren Harmonischen in dem d-q-Koordinatensystem umwandelt und Motorstrom-Rückführwerte berechnet, die die Grundwellenkomponente sind, indem sie Strombefehlswerte der höheren Harmonischen, die aus der Koordinatenumwandlung resultieren, von Motorstrom-Rückführwerten der Grundwellen-Stromregelvorrichtung (2) subtrahiert; und
die Grundwellen-Stromregelvorrichtung (2) die Grundwellenkomponente des Motorstroms so steuert, dass sie die Motorstrom-Rückführwerte, die die Grundwellenkomponente sind, mit Grundwellen-Strombefehlswerten abgleicht.

6. Motorregelvorrichtung nach Anspruch 1, wobei:
die Einrichtung (20, 21a, 21b) zum Eliminieren der Komponente der höheren Harmonischen Hochpassfilterverarbeitung des Motorstrom-Rückführwertes ausführt und den Motorstrom-Rückführwert, der die Grundwellenkomponente ist, berechnet, indem sie Ergebnisse der Hochpassfilter-Verarbeitung von dem Motorstrom-Rückführwert subtrahiert; und
die Grundwellen-Stromregelvorrichtung (2) die Grundwellenkomponente des Motorstroms so steuert, dass sie den Motorstrom-Rückführwert, der die Grundwellenkomponente ist, mit dem Grundwellen-Strombefehlswert abgleicht.

7. Motorregelvorrichtung nach Anspruch 1, wobei:
die Einrichtung (20, 21a, 21b) zum Eliminieren der Komponente der höheren Harmonischen Tiefpassfilterverarbeitung des Motorstrom-Rückführwertes ausführt, um den Motorstrom-Rückführwert zu berechnen, der die Grundwellenkomponente ist; und
die Grundwellen-Stromregelvorrichtung (2) die Grundwellenkomponente des Motorstroms so steuert, dass sie den Motorstrom-Rückführwert, der die Grundwellenkomponente ist, mit dem Grundwellen-Strombefehlswert abgleicht.

8. Verfahren zum Steuern eines Motors durch Verwendung von Schaltungen, die eine Grundwellen-Stromregelschaltung (2), die Rückführregelung einer Grundwellenkomponente eines Motorstroms in einem d-q-Ko-

ordinatensystem implementiert, das sich synchron mit der Drehung des Motors **(11)** dreht, und eine Schaltung **(15)** zum Steuern des Stroms einer höheren Harmonischen enthält, die Rückführregelung einer Komponente der höheren Harmonischen des Motorstroms in einem d-h-Koordinatensystem implementiert, das sich mit einer Frequenz dreht, die ein ganzzahliges Vielfaches der Frequenz der Grundwellenkomponente des Motorstroms ist, wobei es umfasst:

Eliminieren der Komponenten der höheren Harmonischen des Motorstroms aus einer Steuerabweichung zwischen einem Grundwellen-Strombefehlswert und einem Motorstrom-Rückführwert in der Grundwellen-Stromregelschaltung **(2)**;

Berechnen eines Wechselspannungs-Befehlswertes durch Addieren eines Ausgangs von der Grundwellen-Stromregelschaltung **(2)**, aus dem die Komponente der höheren Harmonischen eliminiert worden ist, zu einem Ausgang von der Schaltung **(15)** zum Steuern des Stroms der höheren Harmonischen; und

Erzeugen einer 3-Phasen-Wechselspannung, die dem Wechselspannungs-Befehlswert entspricht, und Anlegen der 3-Phasen-Wechselspannung an einen 3-Phasen-Wechselstrommotor **(11)**.

Es folgen 10 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG.1

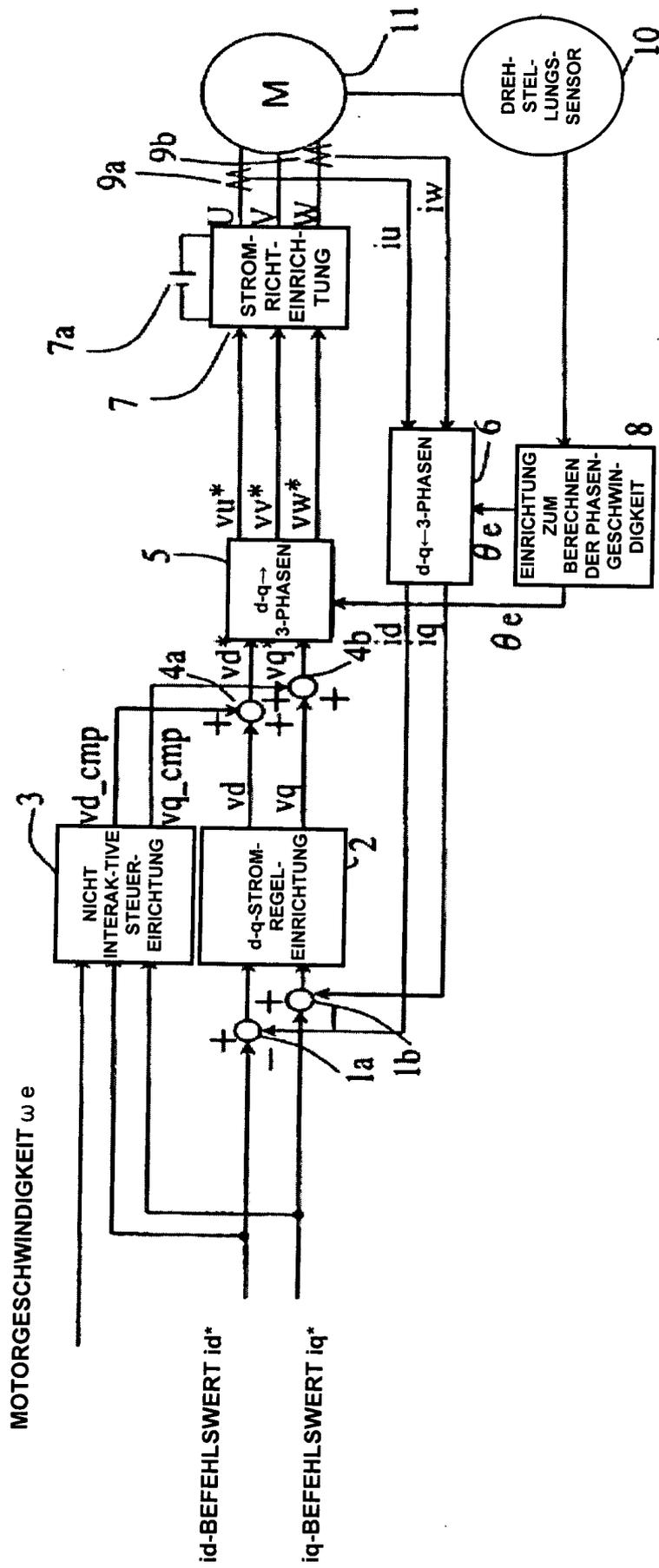


FIG.2

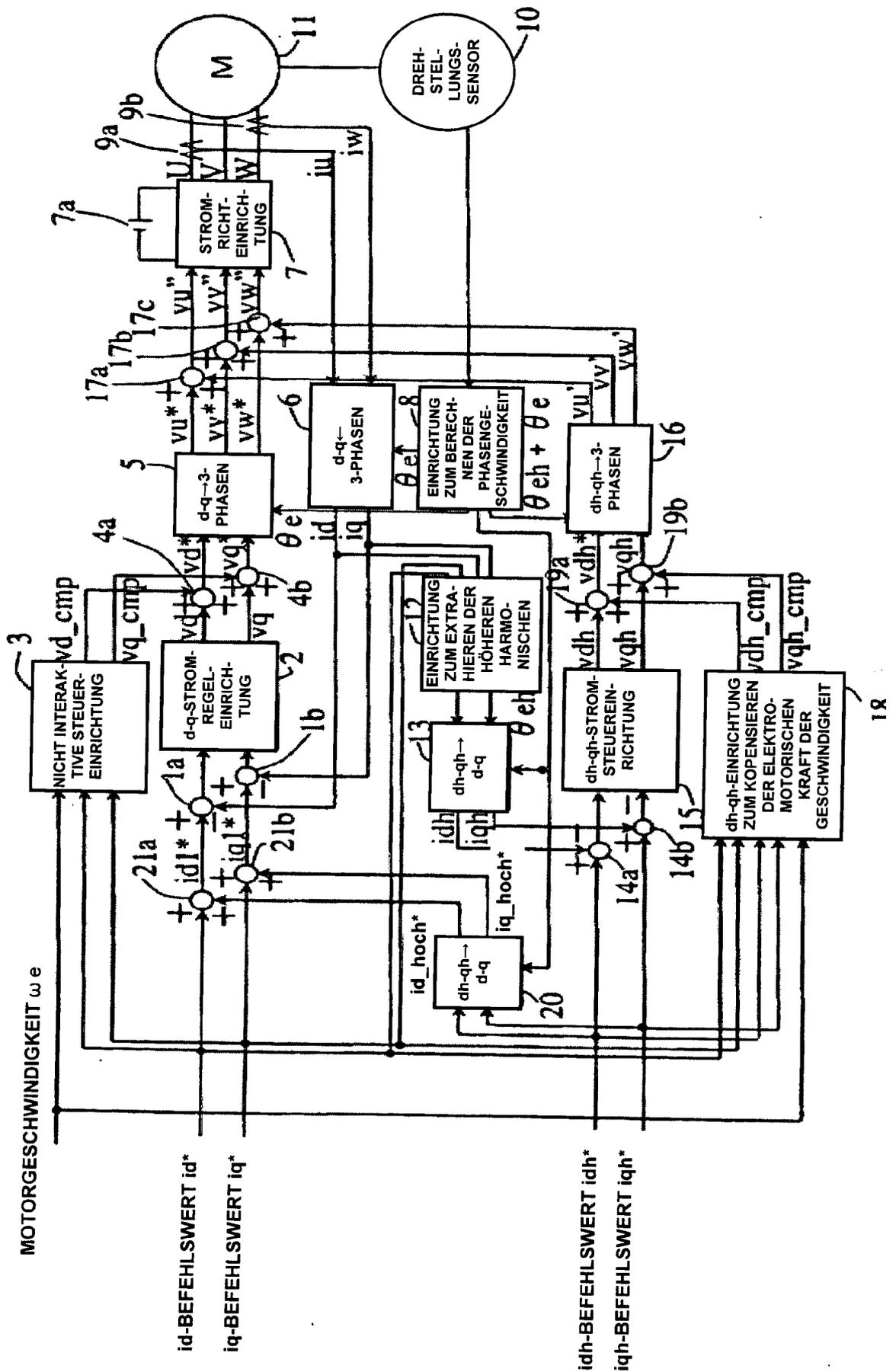


FIG.3

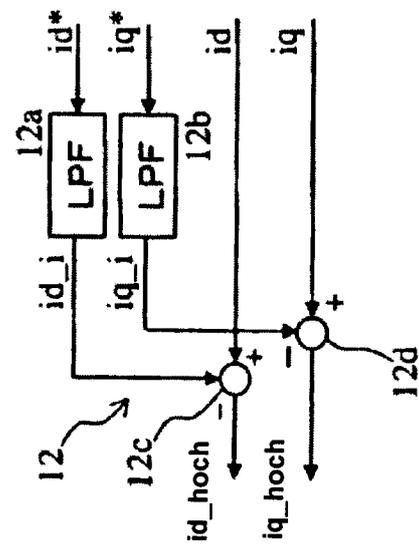


FIG.4

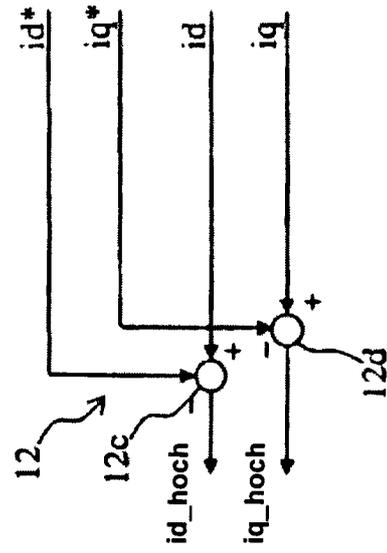


FIG.5

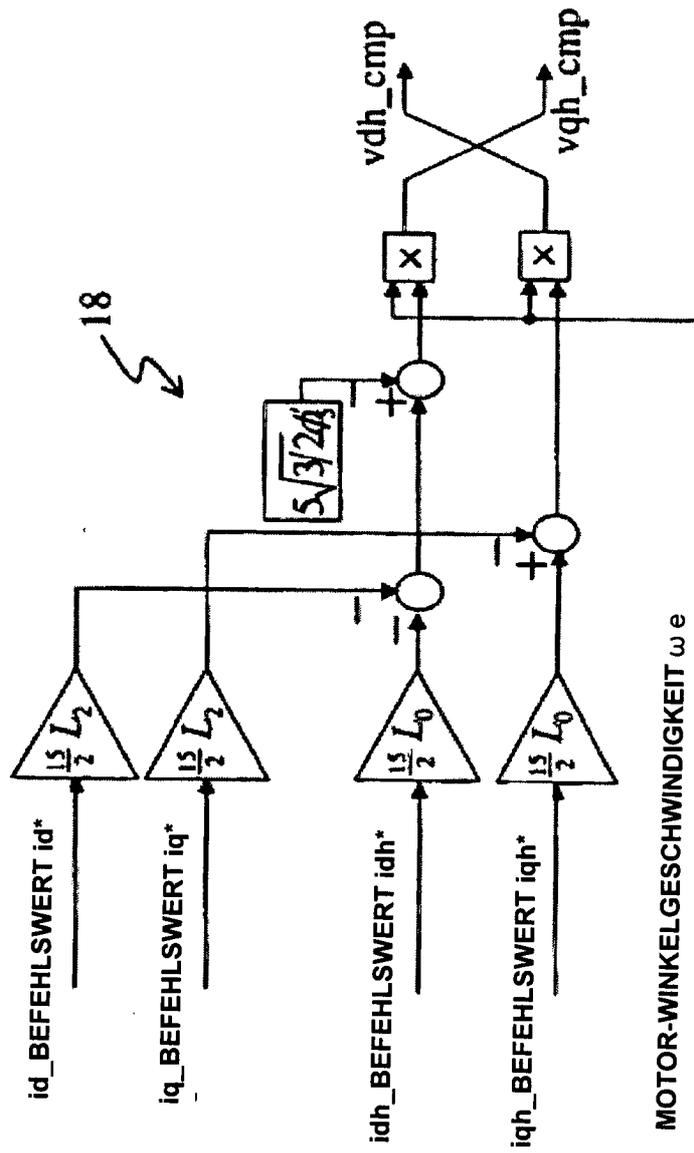


FIG.6

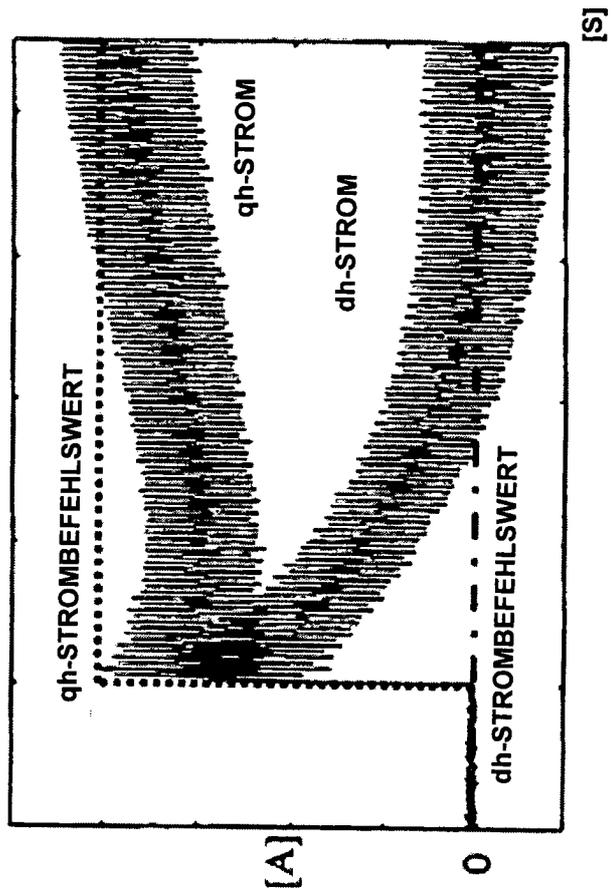


FIG.7

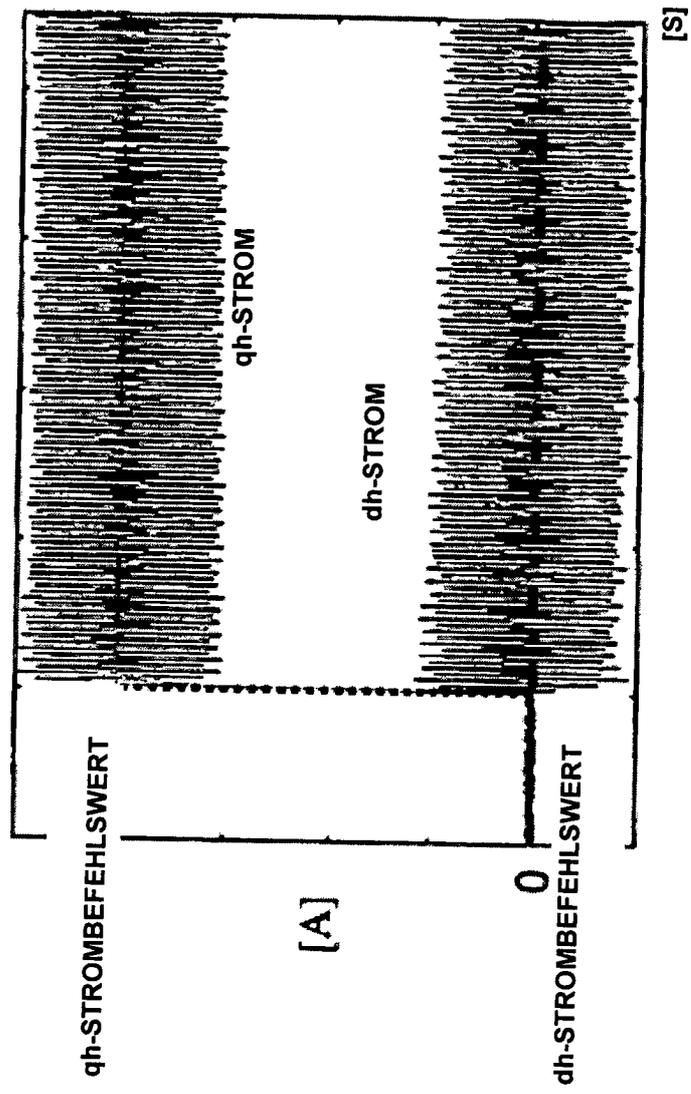


FIG.8

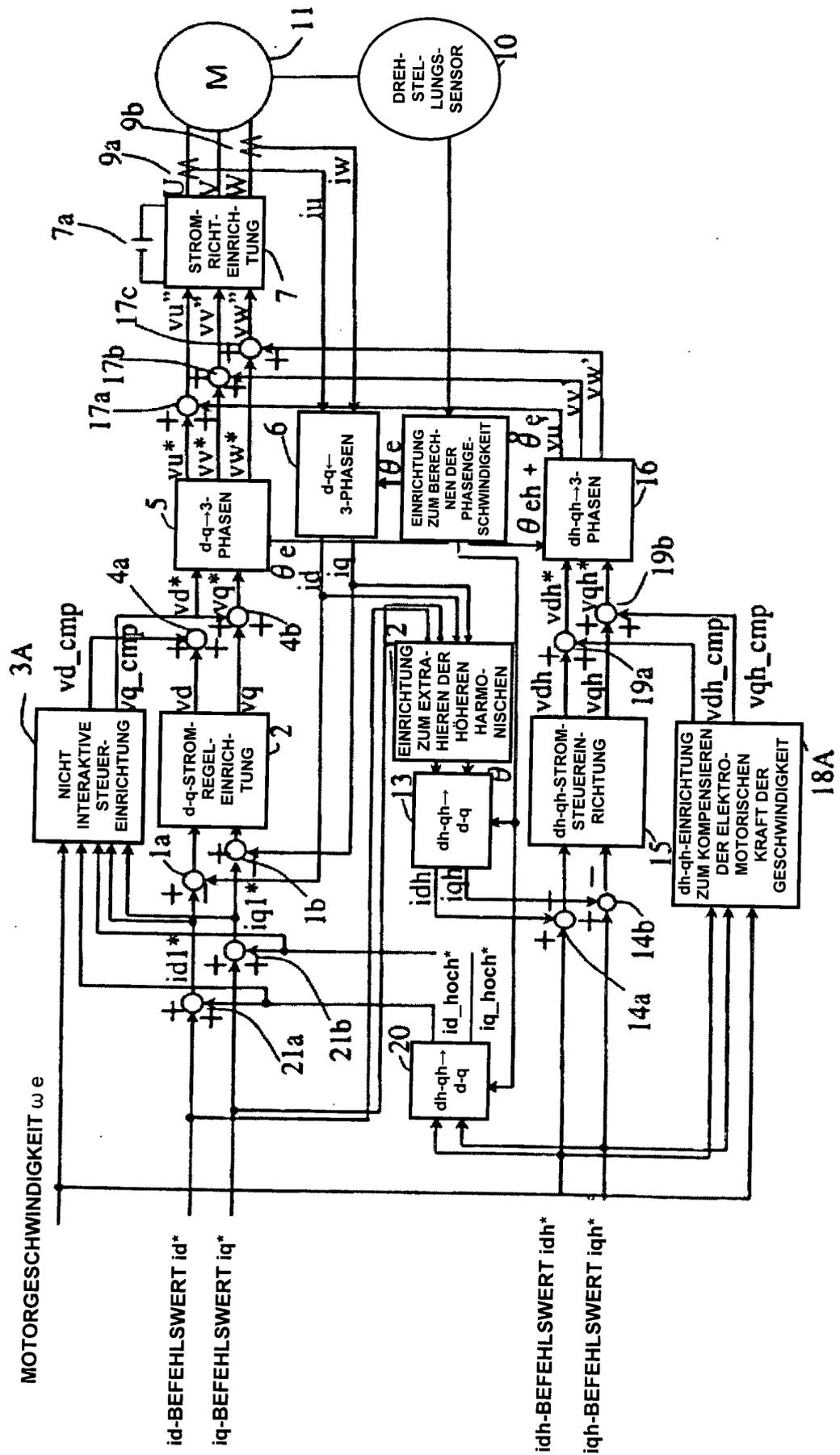


FIG.9

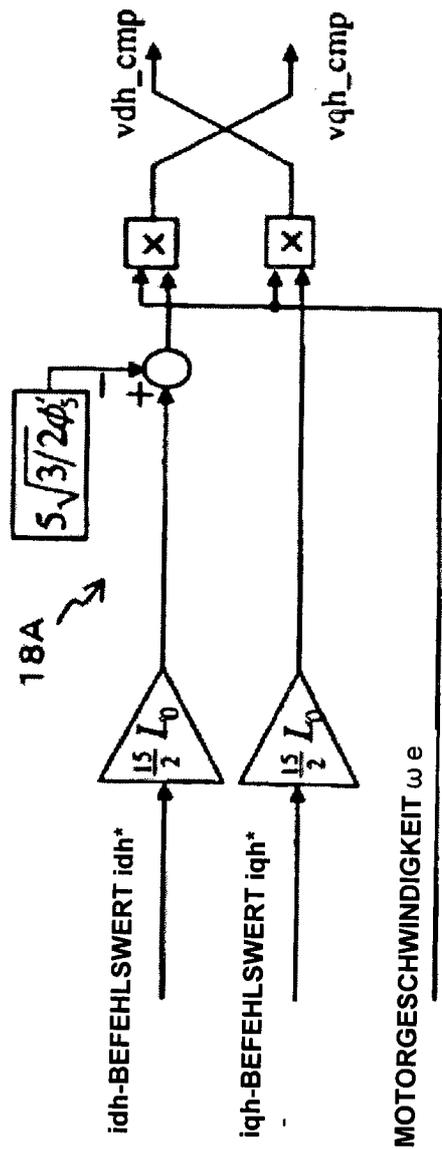


FIG.10

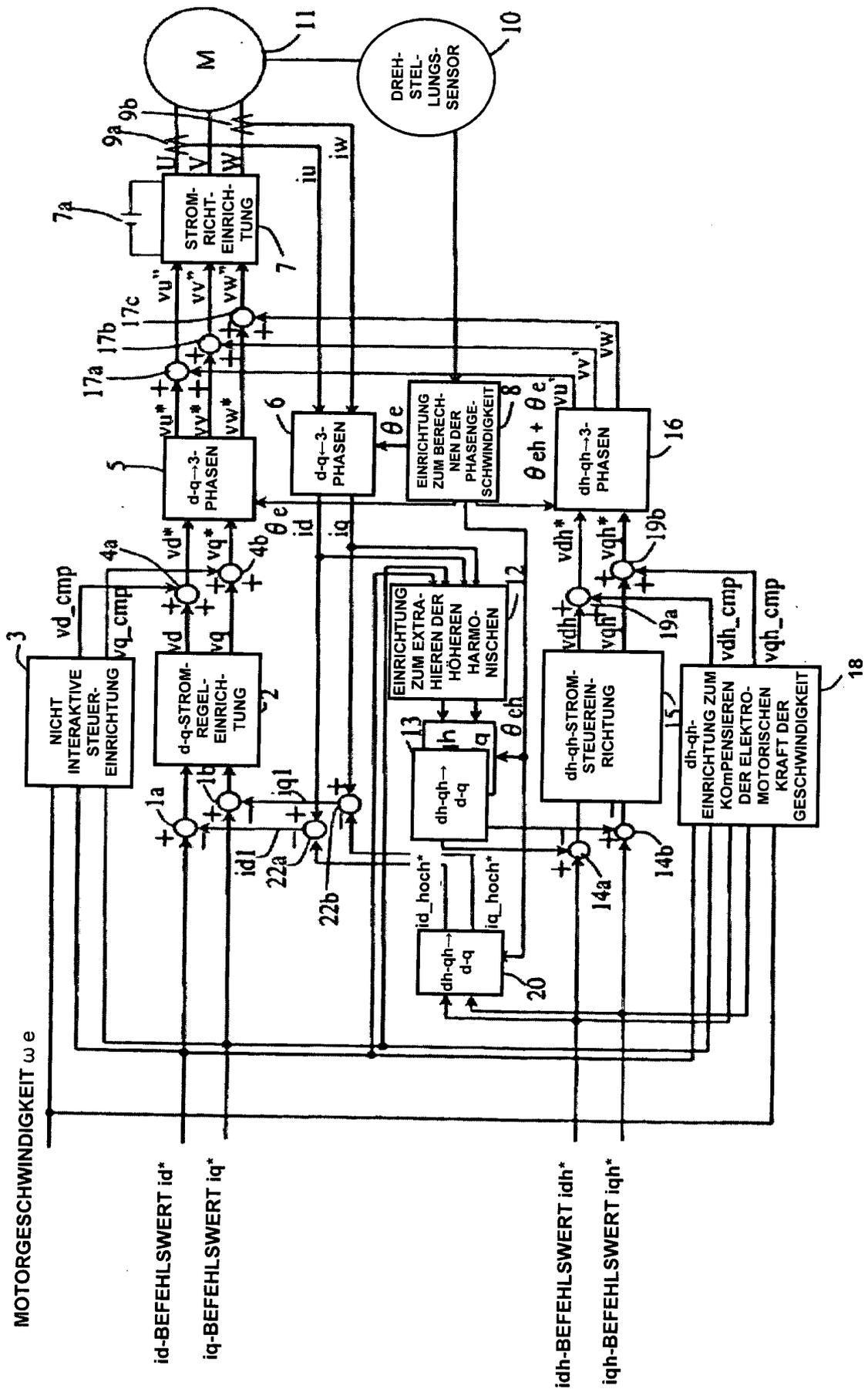


FIG.11

