



(10) **DE 10 2012 218 017 A1** 2013.04.18

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2012 218 017.6**

(22) Anmeldetag: **02.10.2012**

(43) Offenlegungstag: **18.04.2013**

(51) Int Cl.: **H02P 6/10 (2012.01)**

**H02P 21/00 (2012.01)**

**B60L 15/00 (2012.01)**

(30) Unionspriorität:  
**13/273,699**                      **14.10.2011**      **US**

(74) Vertreter:  
**derzeit kein Vertreter bestellt**

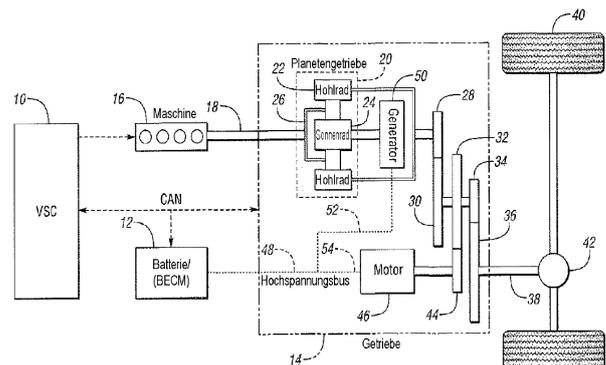
(71) Anmelder:  
**Ford Global Technologies, LLC, Dearborn, Mich.,  
US**

(72) Erfinder:  
**Leonardi, Franco, Dearborn Heights, Mich., US;  
Canini, Dean Richard, Warren, Mich., US; Degner,  
Michael W., Novi, Mich., US**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Steuern der Drehmomentwelligkeit in Maschinen mit innerem Permanentmagneten**

(57) Zusammenfassung: Ein System zum Steuern eines Fahrzeugs, wobei das Fahrzeug einen Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) und eine Steuereinheit umfasst. Die Steuereinheit ist konfiguriert, den Motor mit einem Motorstrom zu steuern. Bei Vorliegen einer vorgegebenen Bedingung hat der Motorstrom einen erhöhten Wicklungsverlust und eine verringerte Drehmomentwelligkeit in Bezug auf den optimalen Motorstrom für minimalen Wicklungsverlust zur Folge.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung bezieht sich auf die Drehmomentwelligkeitsreduzierung in Maschinen mit innerem Permanentmagneten (PM-Maschinen) mittels einer Steuerwinkelmanipulation.

**[0002]** Hybrid-Elektrofahrzeuge (HEVs) verwenden als Energiespeichersystem Batterien. Das Einsteck-Hybridelektrofahrzeug (PHEV) ist eine Erweiterung der existierenden Hybridelektrofahrzeug-Technologie (HEV-Technologie). Ein PHEV verwendet eine Batteriepackung mit größerer Kapazität als ein Standard-Hybridelektrofahrzeug und ist um die Fähigkeit erweitert, die Batterie von einem Standardstromanschluss aufzuladen, um den Kraftstoffverbrauch zu senken und ferner die Kraftstoffwirtschaftlichkeit in einem elektrischen Antriebsmodus oder in einem gemischten Antriebsmodus zu verbessern. Es gibt auch Batterieelektrofahrzeug-Anwendungen (BEV-Anwendungen), in denen die elektrische Maschine die Brennkraftmaschine vollständig ersetzt.

**[0003]** Das HEV, PHEV und BEV enthält jeweils ein Elektromotor-Antriebssystem, das einen Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) enthalten kann. Ein PM-Synchronmotor enthält einen Rotor mit Permanentmagneten, die am Rotorumfang montiert sind oder im Rotor untergebracht sind. Das Elektromotor-Antriebssystem erzeugt Drehmomentwelligkeiten. Das Motorausgangsdrehmoment enthält Drehmomentwelligkeiten, die durch Magnetkraftschwankungen in Abhängigkeit von der Rotorposition des Motors verursacht werden.

**[0004]** In einer bekannten Herangehensweise zum Reduzieren der Drehmomentwelligkeit in Maschinen mit innerem Permanentmagneten (PM-Maschinen) wird die Drehmomentwelligkeit durch den Maschinenentwurf minimiert.

**[0005]** Hintergrundinformationen finden sich in der US-Veröffentlichung Nr. 2008/0246425 A1 und in JP 2009195049 A.

**[0006]** In einer Ausführungsform der Erfindung enthält ein System zum Steuern eines Fahrzeugs, wobei das Fahrzeug einen Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) enthält, eine Steuereinheit. Die Steuereinheit ist konfiguriert, den Motor mit einem Motorstrom zu steuern. Bei Vorliegen einer vorgegebenen Bedingung hat der Motorstrom einen erhöhten Wicklungsverlust und eine reduzierte Drehmomentwelligkeit in Bezug auf den optimalen Motorstrom für minimalen Wicklungsverlust zur Folge.

**[0007]** Die Steuereinheit kann ferner konfiguriert sein, eine Motordrehzahl zu erreichen und das Vorhandensein der vorgegebenen Bedingung anhand der Tatsache zu bestimmen, ob die Motordrehzahl in einen vorgegebenen Drehzahlbereich fällt. Das Vorliegen der vorgegebenen Bedingung kann ferner darauf beruhen, ob ein Drehmomentbefehl einen vorgegebenen Wert überschreitet.

**[0008]** Gemäß einem möglichen Merkmal hat bei Vorliegen der vorgegebenen Bedingung der Motorstrom einen um wenigstens 5 Grad verringerten Steuerwinkel in Bezug auf den optimalen Motorstrom für minimalen Wicklungsverlust zur Folge.

**[0009]** In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung wird ein Verfahren zum Steuern eines Fahrzeugs, das einen Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) enthält, geschaffen. Der Motor ist in der Weise kalibriert, dass für jeden Drehmomentbefehl ein Direktachsen-Strombefehl (d-Achsen-Strombefehl) und ein Quadraturachsen-Strombefehl (q-Achsen-Strombefehl) vorhanden sind. Das Verfahren umfasst das Erzeugen eines Drehmomentbefehls; das Bestimmen von d-Achsen- und q-Achsen-Strombefehlen  $I_d$  bzw.  $I_q$ , die dem Drehmomentbefehl entsprechen; und das Steuern des Motors anhand von  $I_d$  und  $I_q$ . Bei Vorliegen der vorgegebenen Bedingung haben  $I_d$  und  $I_q$  einen erhöhten Wicklungsverlust und eine reduzierte Drehmomentwelligkeit in Bezug auf einen optimalen  $I_d$  und einen optimalen  $I_q$  für minimalen Wicklungsverlust zur Folge.

**[0010]** Ausführungsformen der Erfindung können ein oder mehrere verschiedene zusätzliche Merkmale enthalten. In einem Merkmal haben bei Nichtvorliegen der vorgegebenen Bedingung  $I_d$  und  $I_q$  einen verringerten Wicklungsverlust und eine erhöhte Drehmomentwelligkeit in Bezug auf den optimalen  $I_d$  und den optimalen  $I_q$  für minimale Drehmomentwelligkeit zur Folge. Gemäß einem weiteren Merkmal kann das Verfahren ferner das Erzeugen einer Motordrehzahl und das Bestimmen des Vorliegens der vorgegebenen Bedingung anhand der Tatsache, ob die Motordrehzahl in einen vorgegebenen Drehzahlbereich fällt, umfassen. Gemäß einem weiteren Merkmal kann das Verfahren das Bestimmen des Vorliegens der vorgegebenen Bedingung ferner anhand der Tatsache, ob der Drehmomentbefehl einen vorgegebenen Wert überschreitet, umfassen.

**[0011]** Gemäß einem möglichen Merkmal haben bei Vorliegen der vorgegebenen Bedingung  $I_d$  und  $I_q$  einen erhöhten Spitzenstrom in Bezug auf den optimalen  $I_d$  und den optimalen  $I_q$  für minimalen Wicklungsverlust zur Folge.

**[0012]** Gemäß einem weiteren möglichen Merkmal haben bei Vorliegen der vorgegebenen Bedingung  $I_d$  und  $I_q$  einen verringerten Steuerwinkel von wenigstens 5 Grad in Bezug auf den optimalen  $I_d$  und den optimalen  $I_q$  für minimalen Wicklungsverlust zur Folge.

**[0013]** In einer weiteren Ausführungsform wird ein System zum Steuern eines Fahrzeugs, das einen Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) enthält, geschaffen. Der Motor ist in der Weise kalibriert, dass für jeden Drehmomentbefehl ein entsprechender Direktachsen-Strombefehl (d-Achsen-Strombefehl) und ein entsprechender Quadraturachsen-Strombefehl (q-Achsen-Strombefehl) vorhanden sind. Das System umfasst eine Steuereinheit, die konfiguriert ist, einen Drehmomentbefehl zu erzeugen; einen d-Achsen-Strombefehl und einen q-Achsen-Strombefehl  $I_d$  bzw.  $I_q$  zu bestimmen, die dem Drehmomentbefehl entsprechen; und den Motor anhand von  $I_d$ ,  $I_q$  zu steuern. Bei Vorliegen einer vorgegebenen Bedingung haben  $I_d$  und  $I_q$  einen erhöhten Wicklungsverlust und eine verringerte Drehmomentwelligkeit in Bezug auf den optimalen  $I_d$  und den optimalen  $I_q$  für minimalen Wicklungsverlust zur Folge.

**[0014]** [Fig. 1](#) ist eine schematische Darstellung einer Systemkonfiguration mit leistungsverzweigtem Antriebsstrang;

**[0015]** [Fig. 2](#) ist eine schematische Darstellung in Blockform eines Antriebsstrangsystem-Leistungsflussdiagramms;

**[0016]** [Fig. 3](#) veranschaulicht eine Elektromotorvorrichtung, die eine Motorsteuereinheit und einen Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) enthält;

**[0017]** [Fig. 4](#) veranschaulicht die Steuerung eines Fahrzeugs, das einen Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) in einer Ausführungsform der Erfindung enthält;

**[0018]** [Fig. 5](#) veranschaulicht ein durchschnittliches Drehmoment und Drehmomentharmonische, die durch eine Maschine mit innerem PM mit 8 Polen und 48 Schlitzen bei einem Spitzenstrom von 300 A als Funktion des Steuerwinkels ( $\theta$ ) erzeugt werden;

**[0019]** [Fig. 6](#) veranschaulicht einen Vergleich von Drehmomentwellenformen, die mit einem für minimalen Verlust optimierten Steuerwinkel ( $\theta = 40$  Grad) bzw. mit einem für minimale Drehmomentwelligkeit optimierten Steuerwinkel ( $\theta = 26$  Grad) erhalten werden; und

**[0020]** [Fig. 7](#) veranschaulicht ein Verfahren zum Verringern der Drehmomentwelligkeit in einer Ausführungsform der Erfindung.

**[0021]** Wie erforderlich, werden hier genaue Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung offenbart; selbstverständlich sind jedoch die offenbarten Ausführungsformen lediglich beispielhaft für die Erfindung, die in vielen verschiedenen und alternativen Formen ausgeführt werden kann. Die Figuren sind nicht notwendig maßstabsgerecht; einige Merkmale können vergrößert oder minimiert sein, um Einzelheiten einer besonderen Komponente zu zeigen. Daher sollen die spezifischen strukturellen und funktionalen Einzelheiten, die hier offenbart sind, nicht als begrenzend interpretiert werden, sondern lediglich als eine repräsentative Grundlage, um den Fachmann auf dem Gebiet zu lehren, wie die vorliegende Erfindung auf verschiedene Weise zu verwenden ist.

**[0022]** Die Erfindung enthält mehrere Aspekte zum Steuern der Drehmomentwelligkeit in Maschinen mit innerem Permanentmagneten (PM-Maschinen) mittels einer Steuerwinkelmanipulation. Motorsteuereinheiten sind typischerweise abgestimmt, um Verluste zu minimieren und um den Kraftstoffwirkungsgrad zu maximieren. Gemäß der Erfindung können Motorsteuereinheiten abgestimmt sein, um unter bestimmten Bedingungen die Drehmomentwelligkeit zu minimieren, beispielsweise bei bestimmten Motordrehzahl- und Motordrehmomentniveaus. Genauer kann die Maschine bei einem spezifischen Drehzahl- und Drehmomentniveau mit Steuerparametern betrieben werden, die statt des Verlusts die Welligkeit minimieren.

**[0023]** Ausführungsformen der Erfindung können in vielen verschiedenen Anwendungen implementiert sein. Ein Beispiel ist ein Hybridelektrofahrzeug-Antriebsstrang.

**[0024]** In [Fig. 1](#) ist ein Hybridelektrofahrzeug-Antriebsstrang gezeigt. Eine Fahrzeugsystem-Steuereinheit (VSC) **10**, ein Batterie- und Batteriesteuermodul (BECM) **12** und ein Getriebe **14** zusammen mit einem Motor/Generator-Untersystem umfassen ein Steuerbereichsnetz (CAN). Eine Brennkraftmaschine **16**, die durch die VSC **10** gesteuert wird, verteilt Drehmoment über eine Drehmomenteingangswelle **18** an das Getriebe **14**.

**[0025]** Das Getriebe **14** umfasst eine Planetengetriebeeinheit **20**, die ein Hohlrads **22**, ein Sonnenrad **24** und eine Planetenträgeranordnung **26** enthält. Das Hohlrads **22** verteilt Drehmoment an Stufenverhältnis-Zahnrad, die kämmende Zahnradenelemente **28**, **30**, **32**, **34** und **36** umfassen. Eine Drehmomentausgangswelle **38** für das Getriebe **14** ist über einen Differential- und Achsenmechanismus **42** mit Fahrzeugantriebsrädern **40** antriebstechnisch verbunden.

**[0026]** An einer Gegenwelle sind Zahnrad **30**, **32** und **34** angebracht, wobei das Zahnrad **32** mit einem durch den Motor angetriebenen Zahnrad **44** in Eingriff ist. Der Elektromotor **46** treibt das Zahnrad **44** an, das als ein Drehmomenteingang für das Gegenwellenvorgelege wirkt.

**[0027]** Die Batterie liefert über einen Leistungsflussweg **48**, **54** elektrische Leistung an den Motor. Der Generator **50** ist mit der Batterie und mit dem Motor **46** auf bekannte Weise wie bei **52** gezeigt elektrisch verbunden.

**[0028]** Das leistungsverzweigte Antriebsstrangsystem von [Fig. 1](#) kann in vielen verschiedenen Betriebsarten betrieben werden, wie für den Fachmann auf dem Gebiet offensichtlich ist. Wie gezeigt, gibt es zwei Leistungsquellen für den Endantrieb. Die erste Leistungsquelle ist eine Kombination aus den Maschinen- und Generator-Untersystemen, die unter Verwendung der Planetengetriebeeinheit **20** miteinander verbunden sind. Die andere Leistungsquelle umfasst das elektrische Antriebssystem, das den Motor **46**, den Generator **50** und die Batterie enthält, wobei die Batterie als ein Energiespeichermedium für den Generator **50** und den Motor **46** wirkt.

**[0029]** Im Allgemeinen berechnet die VSC **10** die gesamte Maschinenleistung, die erforderlich ist, um die Antriebsradleistungsanforderung zuzüglich aller Zubehörlasten zu erreichen, wobei sie unabhängig den Maschinendrehzahl- und Maschinenlast-Betriebspunkt mit oder ohne Rückkopplung der tatsächlichen Maschinenleistung zeitlich plant, um die gesamte Leistungsanforderung zu erfüllen. Dieser Herangehenstyp wird typischerweise verwendet, um die Kraftstoffwirtschaftlichkeit zu maximieren, und kann in anderen Typen von Antriebsstrangsystemen, die solche VSCs besitzen, verwendet werden.

**[0030]** Die Leistungsflusswege zwischen den verschiedenen Elementen des in [Fig. 1](#) gezeigten Diagramms des leistungsverzweigten Antriebsstrangs sind in [Fig. 2](#) veranschaulicht. Die Kraftstoffversorgung wird anhand von Fahrereingaben und anderen Eingaben zeitlich geplant. Die Maschine **16** gibt Leistung an die Planetengetriebeeinheit **20** aus. Die verfügbare Maschinenbremsleistung wird durch Zubehörlasten reduziert. Die Leistung wird von dem Planetenhohlrads an die Gegenwellenzahnrad **30**, **32**, **34** geliefert. Die Leistungsausgabe von dem Getriebe treibt die Räder an.

**[0031]** Der Generator **50** kann, wenn er als Motor wirkt, Leistung an das Planetengetriebe liefern. Wenn er als Generator wirkt, wird der Generator **50** durch das Planetengetriebe angetrieben. Ebenso kann die Leistungsverteilung zwischen dem Motor **46** und den Gegenwellenzahnrad **30**, **32**, **34** in jeder beliebigen Richtung verteilt werden.

**[0032]** Wie in den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) gezeigt ist, kann die Maschinenleistungsausgabe durch Steuern des Generators **50** auf zwei Wege aufgeteilt werden. Im Betrieb bestimmt das System die Fahrerforderung für Drehmoment und erzielt die optimale Verzweigung von Leistung zwischen den zwei Leistungsquellen.

**[0033]** [Fig. 3](#) veranschaulicht einen Elektromotor **70**. Der Elektromotor **70** umfasst eine Motorsteuereinheit **72** und einen Permanentmagnet-Synchronmotor **74** (PM-Synchronmotor). Der Elektromotor **70** kann in Übereinstimmung mit einer Ausführungsform der Erfindung gesteuert werden. Ausführungsformen der Erfindung sind in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, die PM-Synchronmotoren verwenden, nützlich. Beispielsweise können der Motor **46** oder der Generator **50** ([Fig. 1](#) und [Fig. 2](#)) als ein PM-Synchronmotor implementiert sein, wobei der Elektromotor **70** den Motor **46** oder den Generator **50** repräsentieren kann. Ausführungsformen der Erfindung sind auch in anderen Anwendungen nützlich, wobei der Elektromotor **70** irgendeinen anderen Elektromotor repräsentiert.

**[0034]** Im Allgemeinen arbeitet der Elektromotor **70** in diesem Beispiel dadurch, dass er einen Drehmomentbefehl für die Motorsteuereinheit **72** bereitstellt, die den PM-Synchronmotor **74** steuert und versucht, die befohlene Drehmomentausgabe bereitzustellen. Die Motorsteuereinheit **72** kann andere Eingänge wie beispiels-

weise die verfügbare Spannung und die momentane Motordrehzahl empfangen, wie der Fachmann auf dem Gebiet erkennt.

[0035] Genauer veranschaulicht [Fig. 4](#) ein beispielhaftes Verfahren zum Steuern des PM-Synchronmotors **74**. Der Elektromotor ist so kalibriert, dass für jeden durchschnittlichen Drehmomentbefehl und jede durchschnittliche Motordrehzahl ein entsprechender Direktachsen-Strom (d-Achsenstrom)  $I_{d\_cmd}$  bzw. ein entsprechender Quadraturachsenstrom (q-Achsenstrom)  $I_{q\_cmd}$  vorhanden sind, wie durch die Nachschlagtabelle oder das Kennfeld **80** dargestellt ist.

[0036] Der PM-Synchronmotor **74** wird anhand von  $I_{d\_cmd}$  und  $I_{q\_cmd}$  durch einen Stromregulierer **90** gesteuert. Genauer erzeugt der Stromregulierer **90** einen d-Achsen-Spannungsbefehl  $V_{d\_cmd}$  und einen q-Achsen-Spannungsbefehl  $V_{q\_cmd}$ . Die Rückkopplungs-d-Achsen und -q-Achsen-Ströme  $I_{d\_fdb}$  bzw.  $I_{q\_fdb}$  werden auf bekannte Weise gemessen. Der Stromregulierer **90** empfängt  $I_{d\_fdb}$  und  $I_{q\_fdb}$ .

[0037] [Fig. 4](#) ist ein Beispiel für die Steuerung des PM-Synchronmotors **74**. Andere Steuertechniken sind möglich.

[0038] Ausführungsformen der Erfindung ermöglichen, dass die Motorsteuerung abgestimmt wird, um die Drehmomentwelligkeit unter bestimmten Bedingungen zu minimieren, beispielsweise bei bestimmten Motordrehzahl- und Drehmomentniveaus. Genauer enthält die Nachschlagtabelle **80** Steuerparameter zum Betreiben des Motors bei den verschiedenen Drehmoment/Drehzahl-Paaren. Bei den meisten Drehmoment/Drehzahl-Paaren können der Steuerparameter  $I_d$ , d. h. der Strombefehl  $I_{d\_cmd}$ , und der Steuerparameter  $I_q$ , d. h. der Steuerbefehl  $I_{q\_cmd}$ , abgestimmt werden, um Verluste zu minimieren und den Kraftstoffwirkungsgrad zu maximieren. Bei bestimmten Drehmoment/Drehzahl-Paaren können die Steuerparameter  $I_{d\_cmd}$  und  $I_{q\_cmd}$  jedoch so abgestimmt werden, dass statt des Verlusts die Welligkeit minimiert wird, wie später mit Bezug auf die [Fig. 5–Fig. 7](#) erläutert wird.

[0039] Die Drehmomentwelligkeit ist die unerwünschte Oszillation des Drehmoments, die durch eine elektrische Maschine um ihr stationäres Drehmoment erzeugt wird. Die Drehmomentwelligkeit kann unerwünschte Geräusche und Vibrationen hervorrufen. Ausführungsformen der Erfindung verringern die Drehmomentwelligkeit durch Ändern des Steuerwinkels ( $\text{atan}(I_d/I_q)$ ). Vorteilhaft ermöglicht dieses Herangehen an die Verringerung der Drehmomentwelligkeit, Geräusch- und Vibrationsbelange in einem vorhandenen Elektromaschinenentwurf anzusprechen.

[0040] In einer vorhandenen Motorsteuereinheit ist die Motorsteuerung so abgestimmt oder programmiert, dass sie für eine gegebene Drehmomentanforderung die Steuerparameter ( $I_{d\_cmd}$ ,  $I_{q\_cmd}$ ), die Motorverluste minimieren, automatisch anwendet. Gemäß der Erfindung ist die Motorsteuerung so abgestimmt oder programmiert, dass bei bestimmten Drehmoment/Drehzahl-Paaren die Drehmomentwelligkeit verringert wird.

[0041] Die Drehmomentharmonischen sind eine starke Funktion des Steuerwinkels ( $\text{atan}(I_d/I_q)$ ). [Fig. 5](#) veranschaulicht das durchschnittliche Drehmoment und Drehmomentharmonische, die durch eine Maschine innerem PM mit 8 Polen und 48 Schlitzen bei einem Spitzenstrom von 300 A erzeugt werden, als Funktion des Steuerwinkels ( $\theta$ ). Das durchschnittliche Drehmoment ist allgemein bei **100** angegeben. Vom Standpunkt der Verlustminimierung ist der optimale Steuerwinkel  $\theta = 40$  Grad, der bei **102** dargestellt ist. Der optimale Steuerwinkel für minimale Harmonische ist  $\theta = 26$  Grad, der bei **104** dargestellt ist. Das 24. harmonische Drehmoment ist allgemein bei **110** angegeben. Das 48. harmonische Drehmoment ist allgemein bei **120** angegeben. Wie gezeigt ist, nehmen die 24. und die 48. Harmonische stark zu, wenn sich der Steuerwinkel dem optimalen Wert vom Standpunkt der Verlustminimierung annähert. In HEV-, PHEV- und BEV-Traktionsanwendungen ist es nicht wünschenswert, ununterbrochen mit Steuerparametern zu arbeiten, die den Verlust nicht minimieren. Falls es jedoch eine spezifische Motordrehzahl gibt, bei der es Geräusch- und Vibrationsbelange gibt, wird die Anwendung einer neuen Steuerstrategie für diesen spezifischen Arbeitspunkt eine erhebliche Verringerung der Drehmomentwelligkeit ohne erheblichen Einfluss auf die Fahrzeugkraftstoffwirtschaftlichkeit ermöglichen.

[0042] Wie weiterhin in [Fig. 5](#) gezeigt ist, kann in diesem Beispiel die Maschine 122 Nm mit Phasenströmen von 300 A und bei einem Steuerwinkel  $\theta = 40^\circ$  erzeugen. Die gleiche Maschine kann das gleiche Drehmoment von 122 Nm mit Phasenströmen von 350 A und bei einem Steuerwinkel  $\theta = 26^\circ$  erzeugen, wie in [Fig. 6](#) gezeigt ist. [Fig. 6](#) veranschaulicht einen Vergleich von Drehmomentwellenformen, die mit einem für minimalen Verlust optimierten Steuerwinkel ( $\theta = 40^\circ$ ) und für einen für minimale Drehmomentwelligkeit optimierten Steuerwinkel ( $\theta = 26^\circ$ ) erhalten werden. Die Drehmomentwellenform **140** besitzt den Steuerwinkel  $\theta =$

40° für minimalen Verlust. Die Drehmomentwellenform **150** besitzt einen Steuerwinkel  $\theta = 26^\circ$  für minimale Drehmomentwelligkeit. Die letztere Steuerstrategie ( $\theta = 26^\circ$ ) liefert um 36 % höhere Wicklungsverluste, sie verringert jedoch die 24. und die 48. Harmonische auf 56,6 % bzw. 47,5 %. Der erste Steuerwinkel ( $\theta = 40^\circ$ ) sollte gewählt werden, wann immer die Drehmomentharmonischen toleriert werden können, während der Steuerwinkel ( $\theta = 26^\circ$ ) für verringerte Welligkeit und höheren Verlust gewählt werden kann, um spezifische Geräusch- und Vibrationsbelange anzusprechen.

**[0043]** Der Vergleich der Drehmomentwellenformen, die mit den für minimalen Verlust optimierten Steuerwinkel ( $\theta = 40^\circ$ ) und den für minimale Drehmomentwelligkeit optimierten Steuerwinkel ( $\theta = 26^\circ$ ) erhalten werden, sind in der folgenden Tabelle gezeigt:

Tabelle 1

	theta = 40 Grad	theta = 26 Grad	Verhältnis	
Strom	(Apk)	300	350	116,70%
Wicklungsverlust	(%)	100%	136%	136,00%
Tave	(Nm)	122,6	121,7	99,30%
H_24th	(Nm)	4,22	2,39	56,60%
H_48th	(Nm)	1,38	0,66	47,50%

**[0044]** [Fig. 7](#) veranschaulicht ein Verfahren zum Verringern der Drehmomentwelligkeit in einer Ausführungsform der Erfindung. In diesem Beispiel besitzt ein Hybridfahrzeug eine unerwünschte Vibration, die auftritt, wenn der elektrische Traktionsmotor mit einer Drehzahl  $Sp_{crit} = 300 \text{ min}^{-1}$  läuft und ein Ausgangsdrehmoment erzeugt, das größer ist als das Drehmoment  $T_{crit} = 120 \text{ Nm}$ . Um die Vibration zu vermeiden, muss die Motorsteuereinheit detektieren, dass sich die Motordrehzahl und das Drehmoment den kritischen Werten annähern. Ein Weg hierzu besteht darin, zu detektieren, wann die Drehzahl zwischen einer ersten Drehzahl  $Sp_1 = Sp_{crit} - \delta$  und einer zweiten Drehzahl  $Sp_2 = Sp_{crit} + \delta$  liegt, wobei  $\delta$  ein bestimmter Betrag ist, der bestimmt wird, um die Robustheit des Verfahrens zu erhöhen, und zu detektieren, wann das Drehmoment größer ist als  $T_{crit}$ . Wenn diese Bedingungen detektiert werden, schaltet die Motorsteuereinheit zu einer speziellen Betriebsart um, in der der Steuerwinkel auf der Grundlage der Verringerung der Welligkeit statt der Minimierung des Verlusts gewählt wird. Nachdem das Drehzahlniveau und das Drehmomentniveau auf Werte zurückgekehrt sind, die von den kritischen Werten entfernt sind, kann die normale Steuerstrategie wieder aufgenommen werden.

**[0045]** In [Fig. 7](#) startet der Ablauf im Block **160**. Im Block **162** werden Drehmoment- und Drehzahlbefehle von der Fahrzeugsystem-Steuereinheit (VSC) erhalten. Im Block **164** wird die Motordrehzahl geprüft, um festzustellen, ob sich die Motordrehzahl dem kritischen Wert  $Sp_{crit}$  annähert. Im Block **166** wird das Drehmoment geprüft, um festzustellen, ob sich das Drehmoment dem kritischen Drehmomentwert  $T_{crit}$  annähert. Wenn bestimmt wird, dass sich die Motordrehzahl und das Drehmoment den kritischen Werten annähern, geht der Ablauf weiter zum Block **168** und verwendet die Motorsteuereinheit das  $I_d$ - und  $I_q$ -Kennfeld, das für eine geringe Drehmomentwelligkeit optimiert ist. Andernfalls geht der Ablauf weiter zum Block **170** und verwendet die Motorsteuereinheit das  $I_d$ - und  $I_q$ -Kennfeld, das für Kraftstoffwirtschaftlichkeit optimiert ist.

**[0046]** Es wird anerkannt werden, dass die  $I_d$ - und  $I_q$ -Befehle für geringe Drehmomentwelligkeit auf viele verschiedene Weisen implementiert werden können. In einem ersten Beispiel enthält eine einzige Nachschlagtabelle oder ein einziges Kennfeld die  $I_d$ - und  $I_q$ -Befehle, wobei spezifische Abschnitte des Kennfeldes Steuerparameter  $I_d$  und  $I_q$  für die Minimierung der Welligkeit statt des Verlusts enthalten können, während der Rest des Kennfeldes Steuerparameter  $I_d$  und  $I_q$  für die Minimierung des Verlusts enthalten kann. In einem weiteren Beispiel enthält eine erste Nachschlagtabelle Steuerparameter  $I_d$  und  $I_q$  für die Minimierung des Verlusts; und enthält eine zweite Nachschlagtabelle Steuerparameter  $I_d$  und  $I_q$  für die Minimierung der Welligkeit. Die Drehzahl- und Drehmomentwerte werden verwendet, um zu wählen, welche Nachschlagtabelle verwendet wird.

**[0047]** Obwohl oben beispielhafte Ausführungsformen beschrieben worden sind, ist nicht beabsichtigt, dass diese Ausführungsformen alle möglichen Formen der Erfindung beschreiben. Vielmehr sind die in der Beschreibung verwendeten Worte lediglich erläuternde Worte und nicht Worte der Beschränkung, wobei selbstverständlich viele verschiedene Änderungen vorgenommen werden können, ohne vom Erfindungsgedanken und vom Schutzbereich der Erfindung abzuweichen. Außerdem können die Merkmale der verschiedenen implementierenden Ausführungsformen kombiniert werden, um weitere Ausführungsformen der Erfindung zu bilden.

**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**

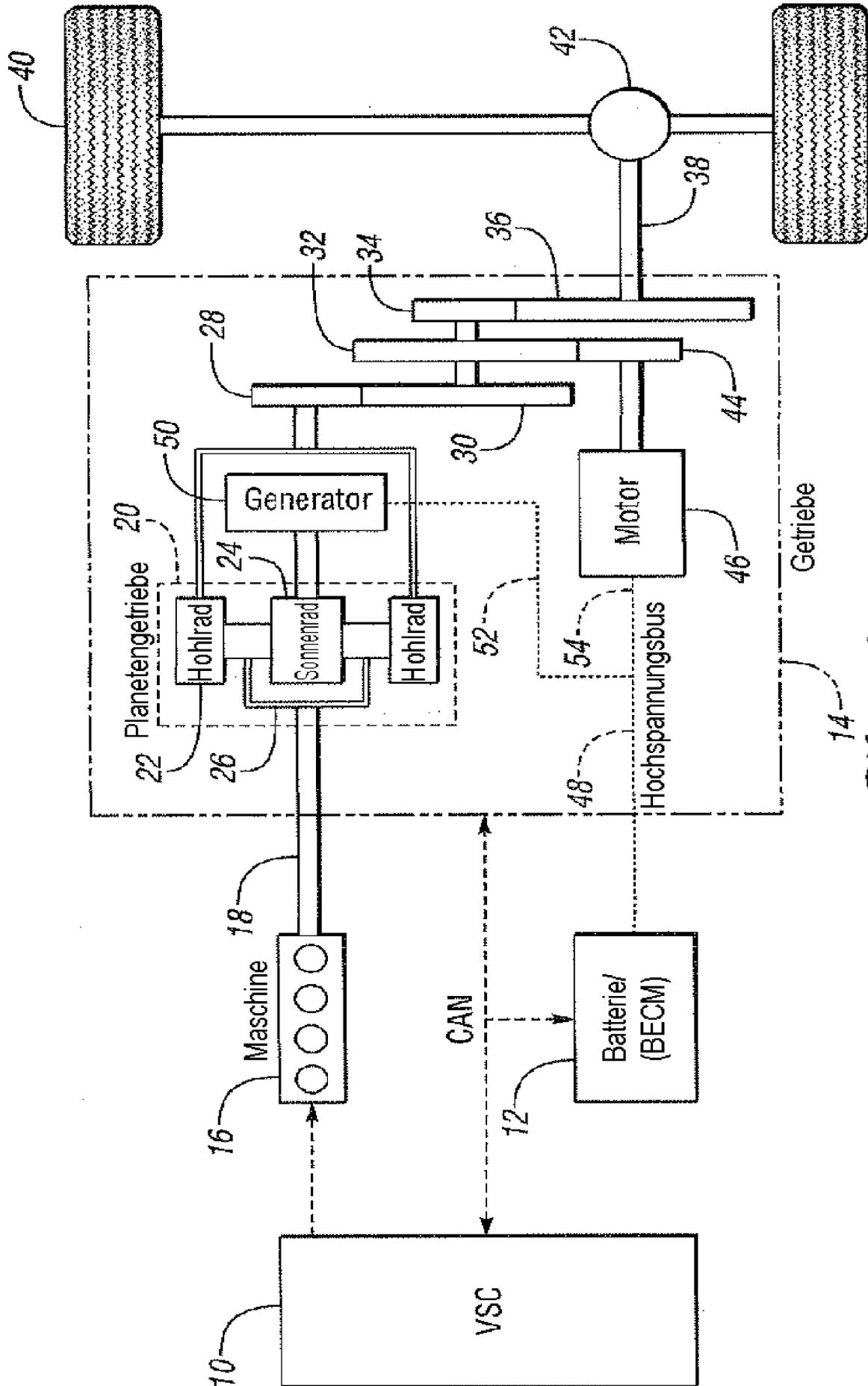
- US 2008/0246425 A1 [0005]
- JP 2009195049 A [0005]

**Patentansprüche**

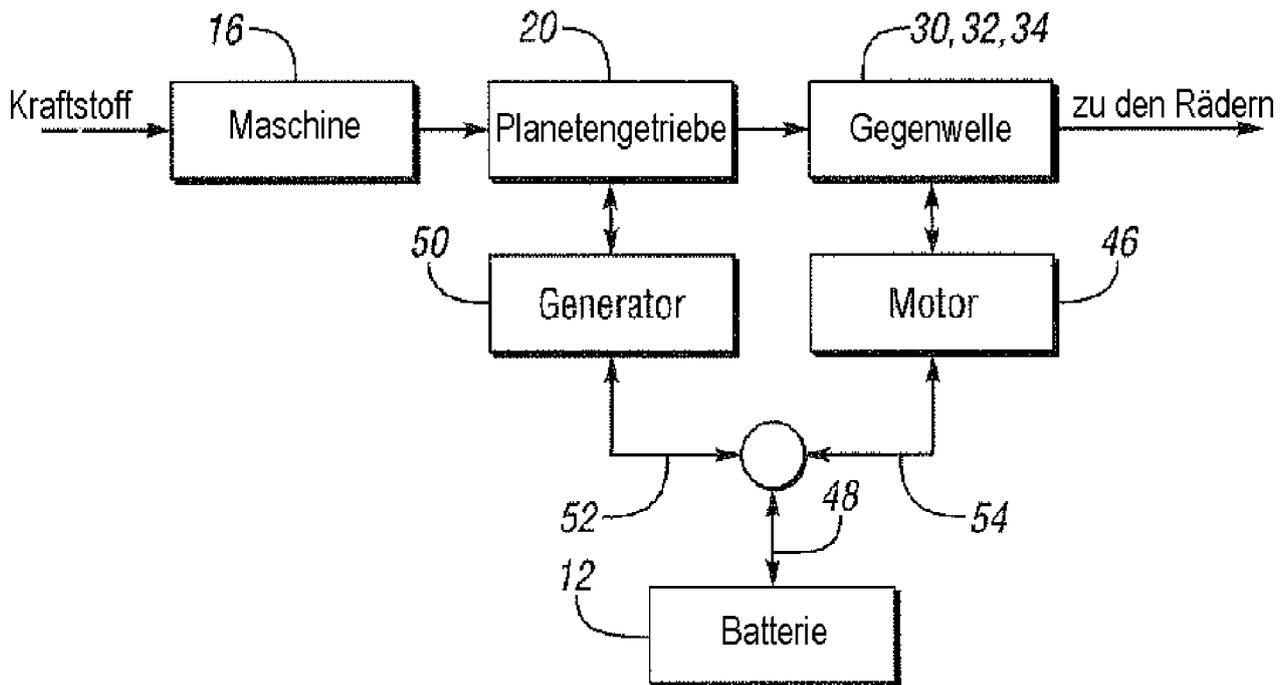
1. System zum Steuern eines Fahrzeugs, das einen Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) enthält, wobei das System eine Steuereinheit umfasst, die konfiguriert ist: den Motor mit einem Motorstrom zu steuern, wobei bei Vorliegen einer vorgegebenen Bedingung der Motorstrom einen erhöhten Wicklungsverlust und eine verringerte Drehmomentwelligkeit in Bezug auf den optimalen Motorstrom für minimalen Wicklungsverlust zur Folge hat.
2. System nach Anspruch 1, wobei die Steuereinheit ferner konfiguriert ist: eine Motordrehzahl zu erzeugen; und das Vorliegen der vorgegebenen Bedingung anhand der Tatsache zu bestimmen, ob die Motordrehzahl in einem vorgegebenen Drehzahlbereich liegt, und ferner anhand der Tatsache zu bestimmen, ob ein Drehmomentbefehl einen vorgegebenen Wert überschreitet.
3. System nach Anspruch 2, wobei bei Vorliegen der vorgegebenen Bedingung der Motorstrom einen um wenigstens 5 Grad verringerten Steuerwinkel in Bezug auf den optimalen Motorstrom für minimalen Wicklungsverlust zur Folge hat.
4. System nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei bei Vorliegen der vorgegebenen Bedingung der Motorstrom einen um wenigstens 5 Grad verringerten Steuerwinkel in Bezug auf den optimalen Motorstrom für minimalen Wicklungsverlust zur Folge hat.
5. Verfahren zum Steuern eines Fahrzeugs, insbesondere für ein System nach einem der vorherigen Ansprüche, das einen Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) enthält, wobei der Motor in der Weise kalibriert ist, dass für jeden Drehmomentbefehl ein entsprechender Direktachsen-Strombefehl (d-Achsen-Strombefehl) und ein Quadraturachsen-Strombefehl (q-Achsen-Strombefehl) vorhanden sind, wobei das Verfahren Folgendes umfasst:  
Erzeugen eines Drehmomentbefehls;  
Bestimmen des d-Achsen-Strombefehls  $I_d$  bzw. des q-Achsen-Strombefehls  $I_q$ , die dem Drehmomentbefehl entsprechen;  
Steuern des Motors anhand von  $I_d$  und  $I_q$ ; und  
wobei bei Vorliegen einer vorgegebenen Bedingung  $I_d$  und  $I_q$  einen erhöhten Wicklungsverlust und eine verringerte Drehmomentwelligkeit in Bezug auf optimale  $I_d$  und  $I_q$  für minimalen Wicklungsverlust zur Folge haben.
6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei bei Nichtvorliegen der vorgegebenen Bedingung  $I_d$  und  $I_q$  einen verringerten Wicklungsverlust und eine erhöhte Drehmomentwelligkeit in Bezug auf optimalen  $I_d$  und optimalen  $I_q$  für minimale Drehmomentwelligkeit zur Folge haben.
7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, das ferner Folgendes umfasst:  
Erzeugen einer Motordrehzahl; und  
Bestimmen des Vorliegens der vorgegebenen Bedingung anhand der Tatsache, ob die Motordrehzahl in einem vorgegebenen Drehzahlbereich liegt.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, das ferner Folgendes umfasst:  
Bestimmen des Vorliegens einer vorgegebenen Bedingung ferner anhand der Tatsache, ob der Drehmomentbefehl einen vorgegebenen Wert überschreitet.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, wobei bei Vorliegen der vorgegebenen Bedingung  $I_d$  und  $I_q$  einen erhöhten Spitzenstrom in Bezug auf optimalen  $I_d$  und optimalen  $I_q$  für minimalen Wicklungsverlust zur Folge haben.
10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei bei Vorliegen der vorgegebenen Bedingung  $I_d$  und  $I_q$  einen um wenigstens 5 Grad verringerten Steuerwinkel in Bezug auf den optimalen  $I_d$  und den optimalen  $I_q$  für minimalen Wicklungsverlust zur Folge haben.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 10, wobei bei Vorliegen der vorgegebenen Bedingung  $I_d$  und  $I_q$  einen erhöhten Spitzenstrom in Bezug auf den optimalen  $I_d$  und den optimalen  $I_q$  für minimalen Wicklungsverlust zur Folge haben.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

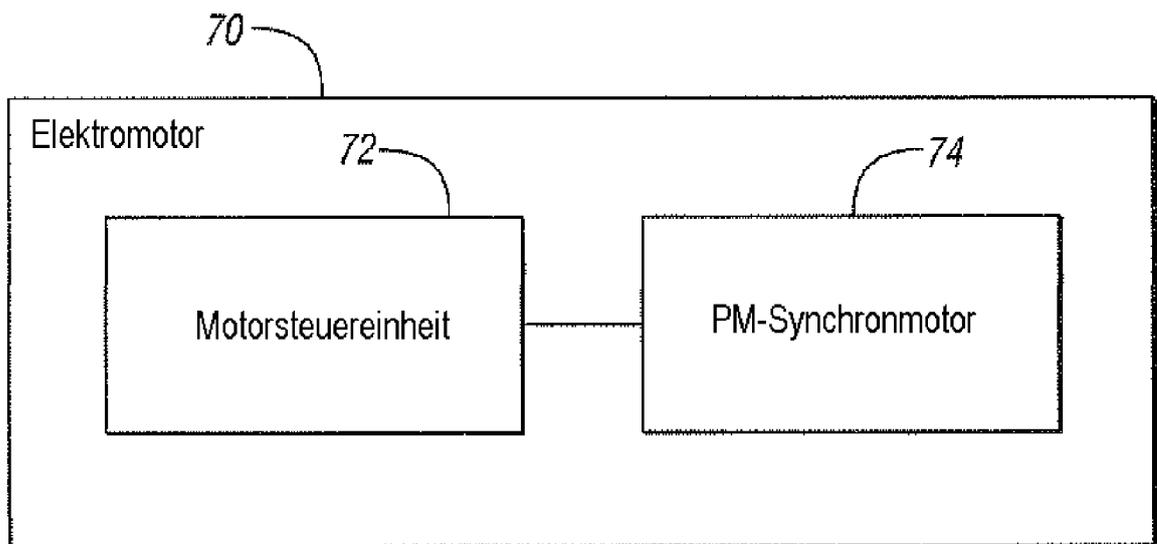
Anhängende Zeichnungen



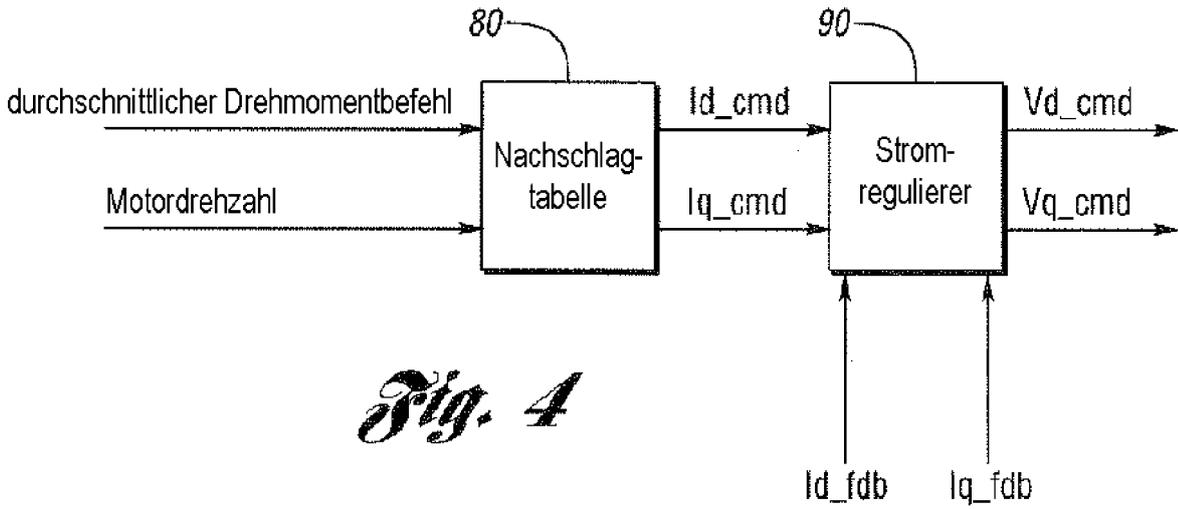
*Fig. 1*



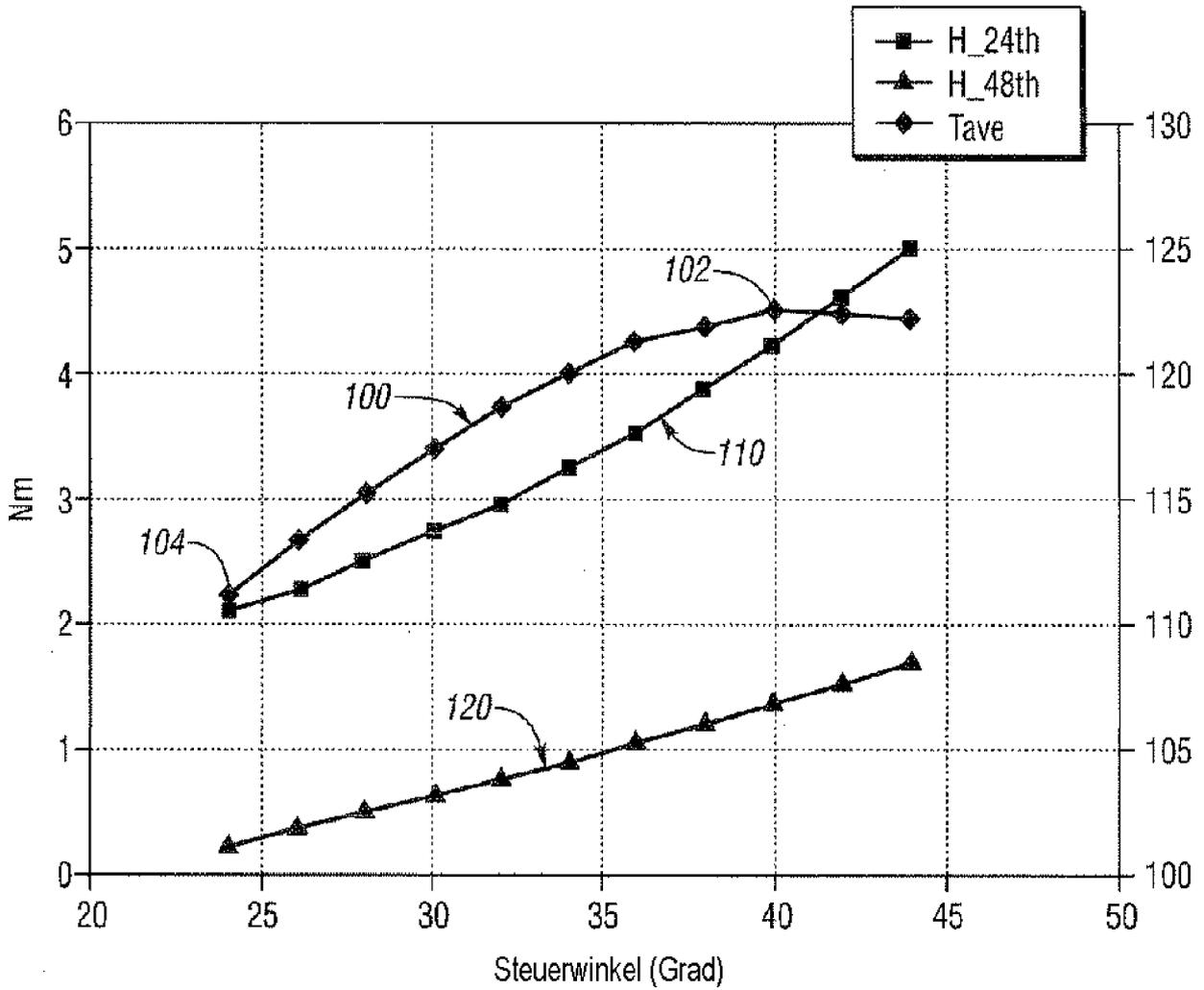
*Fig. 2*



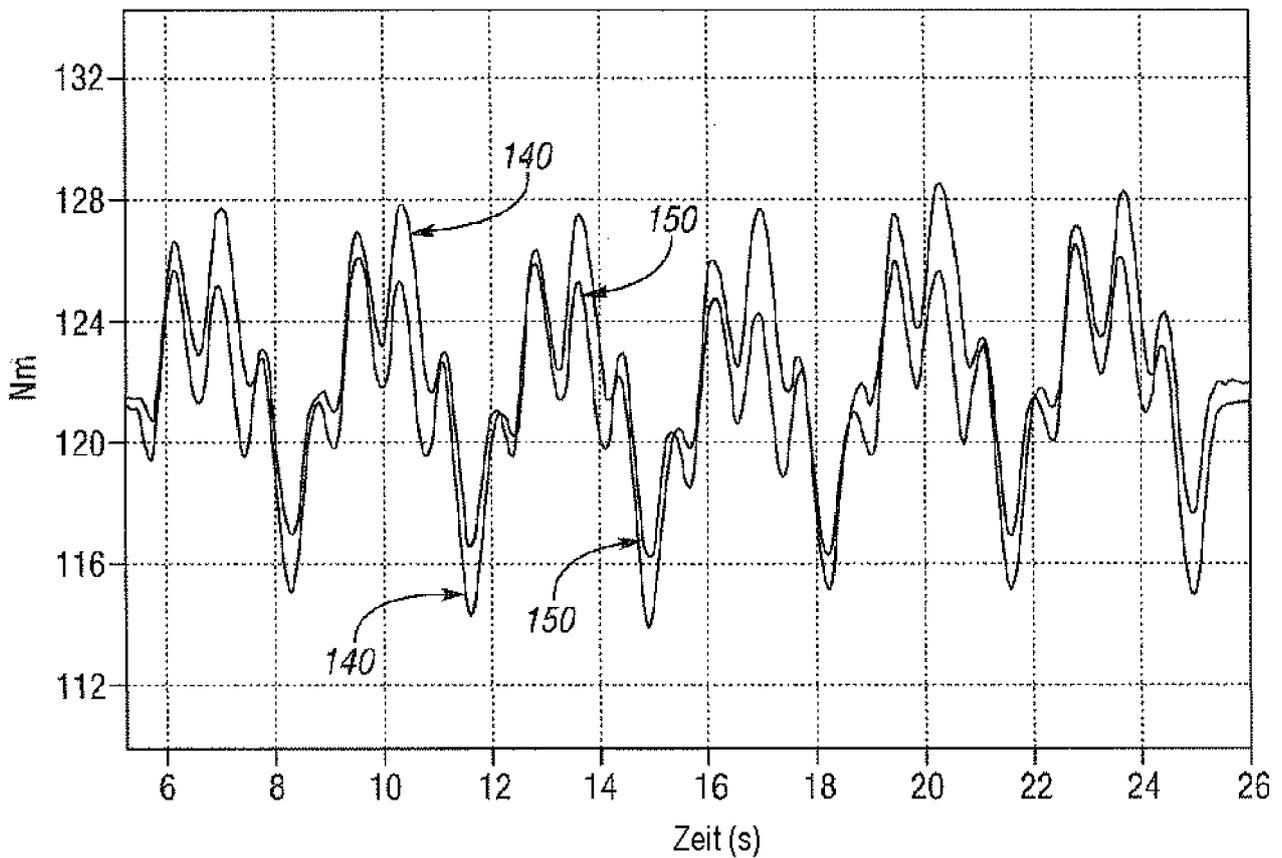
*Fig. 3*



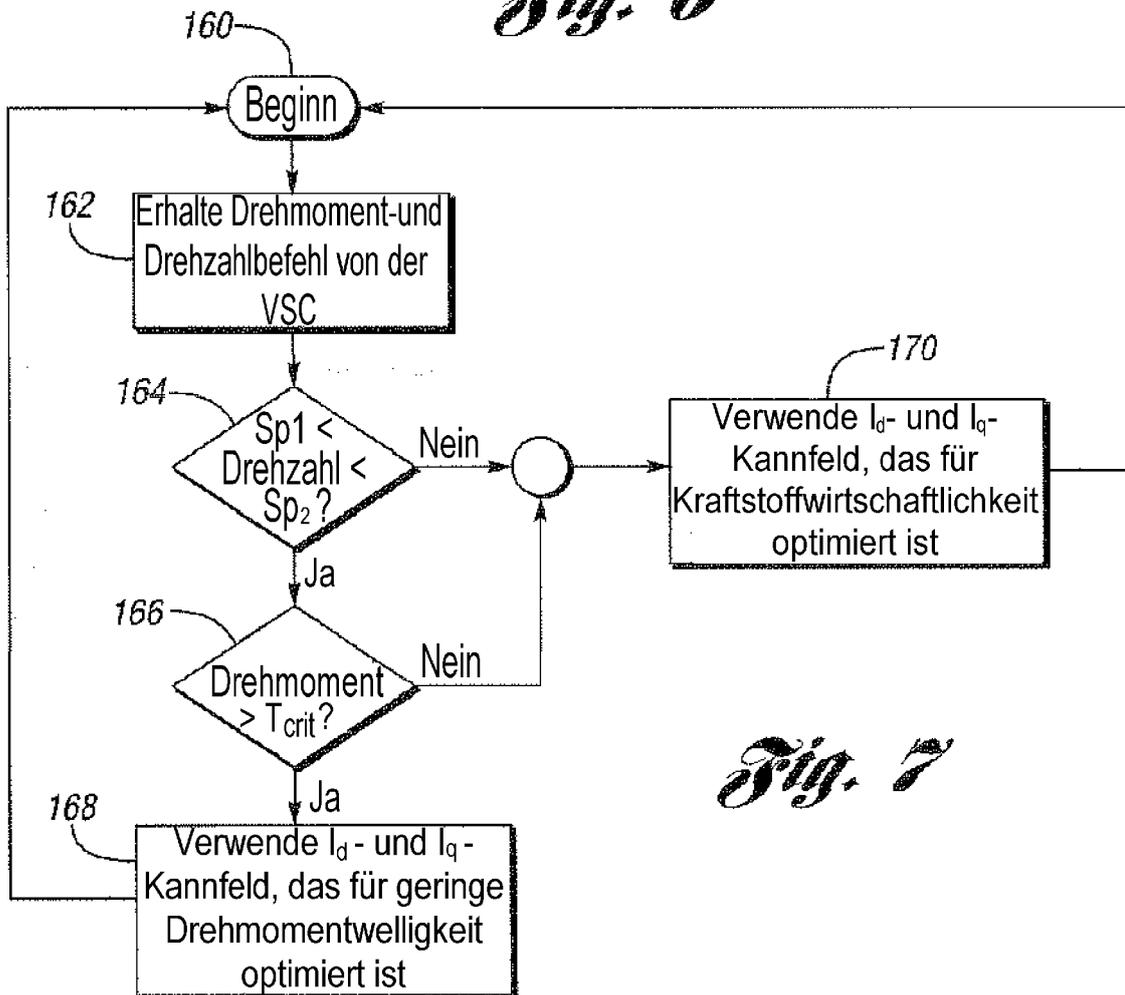
*Fig. 4*



*Fig. 5*



*Fig. 6*



*Fig. 7*