



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 20 578 T2** 2005.10.06

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 0 966 093 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 20 578.6**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 201 916.6**

(96) Europäischer Anmeldetag: **15.06.1999**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **22.12.1999**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **29.09.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **06.10.2005**

(51) Int Cl.⁷: **H02P 6/00**
H02P 6/08

(30) Unionspriorität:

99007 17.06.1998 US

(73) Patentinhaber:

Delphi Technologies, Inc., Troy, Mich., US

(74) Vertreter:

**Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336
München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT

(72) Erfinder:

**Collier-Hallman, Steven James, Frankenmuth,
Michigan 48734, US; Kleinau, Julie Ann, Bay City,
Michigan 48706, US; Skellenger, Dennis B.,
Vassar, Michigan 48768, US**

(54) Bezeichnung: **Regelverfahren für einen bürstenlosen Gleichstrommotor zur Reduzierung von Kommutationsgeräuschen**

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

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Das technische Gebiet dieser Erfindung ist die Steuerung bürstenloser Gleichstrommotoren, insbesondere zur Verwendung in elektrischen Servolenksystemen.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Ein bürstenloser Gleichstrommotor erfordert ein elektronisches Umschalten seiner Ankerströme. Bei einem Trapezgegenspannungs-Dreiphasenmotor wird dies typisch mittels einer Brückenschalterschaltung ausgeführt, die wie in den [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) gezeigt sechs Halbleiterschalter enthält. Wenn ein vorgegebener oberer Schalter und ein nicht in Reihe geschalteter unterer Schalter gleichzeitig leiten, fließt über zwei der drei in Reihe geschalteten Phasenwicklungen ein Ankerstrom, so dass er mit dem Permanentmagnetrotor elektromagnetisch in Wechselwirkung tritt und ein Drehmoment in einer vorgegebenen Richtung entwickelt. Das Umschalten auf ein anderes Ankerwicklungspaar wird dadurch ausgeführt, dass mit einer Steuerung, die Schaltsignale für die Schaltgatter in der richtigen Reihenfolge und mit der richtigen Zeitgebung liefert, einer der Schalter ausgeschaltet wird, während ein anderer nicht in Reihe geschalteter Schalter derselben Ebene (obere oder untere) eingeschaltet wird. Somit wird der Motorbetrieb dadurch gesteuert, dass die Schalter in einem vorgegebenen Muster aktiviert werden. Beispiele für Motorsteuerungen sind z. B. in EP-A-0822650, US-A-5191269 und US-A-5712359 zu finden.

[0003] Um das Motordrehmoment zu steuern, werden die elektrischen Ströme in den aktivierten Phasen üblicherweise durch Impulsbreitenmodulation mit einer höheren Frequenz gesteuert. Diese Modulation erzeugt zusammen mit der Induktivität der Wicklungen mit Ausnahme während des Umschaltens einen Durchschnittsmotorstrom und somit ein stetiges Motordrehmoment. Beim herkömmlichen Umschalten, bei dem die Phasen plötzlich ein- und ausgeschaltet werden, werden der Anstieg und der Abfall der Phasenströme lediglich durch die Netzeigenschaften des Motors und der Schaltschaltungsanordnung gesteuert. Die Führungsfunktion für das Ausschalten der Phase ist nicht dieselbe wie die für das Einschalten der Phase, wobei sich einer der Ströme (ansteigend oder abfallend) schneller als der andere ändert. Der ungleiche Strom beim Phasenausschalten und beim Phaseinschalten kann bei jedem Umschaltereignis eine Störung des Durchschnittsmotorstroms und somit eine Änderung des Drehmoments erzeugen; wobei solche Störungen die Motorstruktur zwingen können, ein hörbares Rauschen zu erzeugen. Bei einigen Anwendungen solcher Motoren kann dieses Rauschen störend sein. Insbesondere kann die Ver-

wendung einer solchen Steuerung und eines solchen Motors in einem elektrischen Servolenksystem in Betriebsarten, die bei niedriger Motordrehzahl hohe Phasenströme erzeugen, beim Umschalten ein störendes Klickrauschen erzeugen, das "Reißverschluss-Rauschen" genannt werden kann. Es ist eine Aufgabe dieser Erfindung, die Phasenströme eines solchen Motors während des Umschaltens zu steuern, um ein solches störendes Rauschen zu reduzieren oder zu beseitigen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0004] Die Motorsteuerung dieser Erfindung ändert die Motorumschaltereignisse, um das Rauschen dadurch zu reduzieren, dass eine überlappende Aktivierung des deaktivierten Schalters mit dem neu aktivierten Schalter vorgesehen ist, so dass vorübergehend drei Schalter aktiviert sind. Der neu aktivierte Schalter wird mit einem Motordrehmoment-Steuerungstastgrad impulsbreitenmoduliert, und der deaktivierte Schalter wird synchron mit dem neu aktivierten Schalter, jedoch mit einem Tastgrad, der gegenüber dem Drehmoment-Steuerungstastgrad abnimmt, impulsbreitenmoduliert. Die abnehmende Modulation des deaktivierten Schalters ermöglicht eine langsamere Stromabnahme beim Phasenausschalten, um die Störungen und somit das Rauschen zu reduzieren und zu beseitigen. Die abnehmende Modulation ist vorzugsweise exponentiell, wobei sich eine Zeitkonstante umgekehrt zur Motordrehzahl ändert, so dass der Tastgrad in einer vorgegebenen Maximalzahl elektrischer Grade des Motors ein vorgegebenes Minimum erreicht.

[0005] Die abnehmende Modulation kann bei niedrigen Motordrehzahlen, bei denen eine Rauschreduzierung erforderlich ist, eingeschaltet werden und kann bei höheren Motordrehzahlen, bei denen das Potential für eine Störung beim Umschalten größer ist, ausgeschaltet werden. Die abnehmende Modulation ist in einer Doppelschaltbetriebsart anwendbar, in der jeder aktivierte Schalter mit Ausnahme des beim Umschalten deaktivierten Schalters bei dem Drehmoment-Steuerungstastgrad impulsbreitenmoduliert wird. Alternativ ist die abnehmende Modulation in einer modifizierten Einzelschaltbetriebsart anwendbar, in der mit Ausnahme des Umschaltens, während dessen der Schalter, der eingeschaltet bleibt und der zwischen den Gruppen hin und her wechselt, unterbrechungsfrei immer geschlossen ist, der aktivierte Schalter der oberen oder der unteren Gruppe während seiner Aktivierung unterbrechungsfrei immer geschlossen ist. Um jede Schaltbetriebsart in dem Motordrehzahl/Drehmoment-Gebiet anzuwenden, für das sie am besten geeignet ist, reagiert die Steuerung vorzugsweise auf den Motorstrom und/oder auf die Motordrehzahl. Vorzugsweise wird die Steuerstabilität durch eine Abtast/Halte-Schaltung und durch einen durch die Motordrehzahl ge-

steuerten Generator mit veränderlicher Antriebsfunktion verbessert, um ein abgetastetes Stromrückkopplungssignal während des Abschnitts eines Umschalttereignisses, in dem das vorzeitige Öffnen eines der Schalter einen Strom verursacht, der in der Brücke in Umlauf gebracht und durch den Stromsensor nicht abgetastet wird, zu erhöhen.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

[0006] [Fig. 1](#) zeigt ein elektrisches Servolenksystem, das eine Umgebung für die Vorrichtung dieser Erfindung schafft.

[0007] [Fig. 2](#) zeigt einen Blockschaltplan einer Ausführungsform einer Steuereinheit zur Verwendung in einem elektrischen Servolenksystem aus [Fig. 1](#).

[0008] [Fig. 3](#) ist ein Stromlaufplan einer Brückenschaltung zur Verwendung in der Steuereinheit aus [Fig. 2](#).

[0009] [Fig. 4](#) ist eine elektrische Ersatzschaltung eines Elektromotors zur Verwendung in dem elektrischen Servolenksystem aus [Fig. 1](#) mit der Brückenschaltung aus [Fig. 3](#).

[0010] [Fig. 5](#) ist ein Blockschaltplan einer PWM-Schaltung zur Verwendung in der Steuereinheit aus [Fig. 2](#).

[0011] [Fig. 6](#) ist ein Stromlaufplan und ein Blockschaltplan einer Stromabtastschaltung zur Verwendung in der Steuereinheit aus [Fig. 2](#).

[0012] [Fig. 7](#) ist ein Blockschaltplan einer Stromsteuerschaltung zur Verwendung in der Steuereinheit aus [Fig. 2](#).

[0013] [Fig. 8](#) ist ein Blockschaltplan und ein Prinzipschaltbild einer Umschaltsteuerschaltung zur Verwendung in der Steuereinheit aus [Fig. 2](#).

[0014] [Fig. 9](#) zeigt Zeitablaufpläne, die den Betrieb der Steuereinheit aus [Fig. 2](#) in einer ersten Betriebsart veranschaulichen.

[0015] [Fig. 10](#) zeigt Zeitablaufpläne, die den Betrieb der Steuereinheit aus [Fig. 2](#) in einer zweiten Betriebsart veranschaulichen.

[0016] [Fig. 11](#) zeigt einen Zeitablaufplan und ein Stromdiagramm, die bei der Veranschaulichung des Betriebs der Stromabtastschaltung aus [Fig. 6](#) nützlich sind.

[0017] [Fig. 12](#) zeigt eine Drehmoment/Drehzahl-Abbildung, die die Anwendungsbereiche der ersten und der zweiten Betriebsart der Steuereinheit aus [Fig. 2](#) veranschaulicht.

BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORM

[0018] Anhand von [Fig. 1](#) ist ein Kraftfahrzeug **40** mit einem elektrischen Servolenksystem **24** versehen. Das elektrische Servolenksystem **24** kann einen herkömmlichen Zahnstangenlenkmechanismus **36** umfassen, der unter einem Getriebegehäuse **52** eine Zahnstange **50** und ein (nicht gezeigtes) Ritzel enthält. Während ein Lenkrad **26** durch einen Fahrzeugführer gedreht wird, dreht eine obere Lenkwelle **29** über ein Universalgelenk **34** eine untere Welle **51**; während die untere Lenkwelle **51** das Ritzel dreht. Die Drehung des Ritzels bewegt die Stange, was die Spurstangen **38** (wovon lediglich eine gezeigt ist) bewegt, die die Achsschenkel **39** (wovon nur einer gezeigt ist) bewegt, um die Steuerräder **42** (von denen lediglich eines gezeigt ist) zu schwenken.

[0019] Durch eine Steuereinheit **16** und ein Hilfskraft-Stellglied, das einen Elektromotor **46** umfasst, wird eine elektrische Hilfskraft geschaffen. Die Steuereinheit **16** empfängt über eine Leitung **12** elektrische Leistung von einer elektrischen Leistungsquelle **10** des Fahrzeugs, auf der Leitung **14** ein Fahrgeschwindigkeitssignal und auf der Leitung **20** ein Lenkwinkelsignal von einem Drehstellungssensor **32**. Während das Lenkrad **26** gedreht wird, tastet ein Drehmomentsensor **28** das durch den Fahrzeugführer auf das Lenkrad **26** angewendete Drehmoment ab, wobei er auf der Leitung **18** ein Lenkrad-Drehmomentsignal an die Steuereinheit **16** liefert. Außerdem werden in dem Motor **46** für jede Phase Rotorstellungssignale erzeugt und über den Bus **30** an die Steuereinheit **16** geliefert, während sich der Rotor des Motors **46** dreht. Die Steuereinheit **16** leitet in Reaktion auf die Fahrgeschwindigkeit, auf das Drehmoment des Führers, auf den Lenkritzelwinkel und auf die Rotorstellungssignale, die empfangen werden, die gewünschten Motorphasenströme ab und liefert diese Ströme über einen Bus **22** an den Motor **46**, der über die Schnecke **47** und über das Schneckengetriebe **48** ein Hilfsdrehmoment an die Lenkwelle **29**, **51** liefert. Falls der Drehmomentsensor **28** von dem Typ ist, der erfordert, dass die obere Lenkwelle **29** an dem Sensor zwischen dem oberen und dem unteren Abschnitt getrennt ist, was einen gewissen Bereich der Drehunabhängigkeit zulässt, sind sowohl der Drehstellungssensor **32** als auch das Schneckengetriebe **48** wie gezeigt dem unteren Abschnitt der Lenkwelle unter dem Drehmomentsensor **28** zugeordnet.

[0020] [Fig. 2](#) zeigt einen Blockschaltplan der Steuereinheit **16**. Eine in [Fig. 3](#) ausführlicher gezeigte Standard-Sechsschalter-Brückenschaltung **60** schaltet den Ankerstrom für die in [Fig. 4](#) gezeigten Sternschaltungs-Motorphasenwicklungen. Eine Gatteransteuerung **65** liefert in Reaktion auf bestimmte Eingangssignale Gatterschaltssignale für die Gatter der

Schalter in der Brückenschaltung **60**. Die Gatteransteuerung **65** empfängt von einer in [Fig. 5](#) ausführlicher gezeigten PWM-Schaltung **70** zwei impulsbreitenmodulierte Spannungssignale PWM und XPWM. Außerdem empfängt die Gatteransteuerung **65** von den Hall-Effekt-Rotorstellungssignal-Generatoren im Motor **46** die Umschaltinitiiierungssignale H_1 , H_2 und H_3 sowie von einer Umschaltsteuerung **90** ein abnehmendes Modulationszeitgebungssignal XX. Ferner empfängt die Gatteransteuerung **65** von einem Steuercomputer **75** ein Schaltbetriebsart-Steuersignal MODE, ein Motorrichtungs-Steuersignal DIR und ein Freigabesignal XEN der abnehmenden Modulation. Eine in [Fig. 6](#) ausführlicher gezeigte Stromabstastschaltung **80** empfängt von einem Stromabstastwiderstand R_s in der Brückenschaltung **60** die Stromabstast-Signalspannungen V_{HI} und V_{LO} und liefert mit Hilfe einer Spezial-Abtast/Halte-Schaltung ein Motorstrom-Ausgangssignal I_s . Außerdem empfängt die Stromabstastschaltung **80** die Signale PWM und XPWM von der PWM-Schaltung **70** und ein Signal SPEED vom Steuercomputer **75**. Eine in [Fig. 7](#) ausführlicher gezeigte Stromsteuerschaltung **85** empfängt das Motorstromsignal I_s von der Stromabstastschaltung **80**, ein Stromanweisungssignal I_c vom Steuercomputer **75** und ein Signal SLOPE von der PWM-Schaltung **70** und führt der PWM-Schaltung **70** ein Zeitgebungs-Ausgangssignal CMRST zu. Die Umschaltsteuerschaltung **90** liefert in Reaktion auf ein Anfangswert-Eingangssignal INIT von der PWM-Schaltung **70**, auf ein Zeitkonstantensignal T_c und auf ein Modulations-Ende-Signal ENDX vom Steuercomputer **75** sowie auf die Umschaltinitiiierungssignale H_1 , H_2 und H_3 vom Motor **46** ein Zeitgebungs-Ausgangssignal XREF an die PWM-Schaltung **70**. Ferner führt die Umschaltsteuerschaltung **90** der Gatteransteuerschaltung **65** das Signal XX zu. Der Steuercomputer **75** enthält einen zur Steuerung des Motors **46** programmierten Digitalcomputer. Obgleich dies nicht gezeigt ist, liefert eine Schaltungsanordnung auf der Grundlage eines Standardoszillators ein Grundtaktsignal CLK für den synchronen Betrieb des Steuercomputers **75** und der weiteren digitalen Schaltungsanordnung. Der Steuercomputer **75** empfängt die zuvor erwähnten Eingangssignale für die Fahrgeschwindigkeit, für das Lenkraddrehmoment, für den Lenkwinkel und für die Motorstellung (H_1 , H_2 und H_3) und leitet aus diesen und gewissen vorgegebenen Konstanten den angewiesenen Motorstrom I_c sowie die folgenden weiteren Ausgangssignale ab: (1) ein Motordrehzahlsignal SPEED; (2) eine Referenzzählung MAX DUTY für die Impulsbreitenmodulation; (3) ein Motorrichtungssignal DIR; (4) ein Umschaltbetriebsartsignal MODE; (5) ein Freigabesignal XEN der abnehmenden Modulation; (6) eine Zeitkonstante T_c der abnehmenden Modulation; (7) eine Referenzzählung ENDX des Endes des abnehmenden Umschaltens; und (8) eine Divisionszählzahl DIV.

[0021] [Fig. 3](#) zeigt einen Stromlaufplan einer typi-

schen Brückenschaltung, die sechs Halbleiterschalter Q1-Q6 mit den zugeordneten parallelen Rücklaufdioden D1-D6 umfasst. Die Schalter können Transistoren, FETs oder ähnliche Halbleiterschaltvorrichtungen sein, und die Dioden können auf im Gebiet bekannte Weise in die Schalter eingebaut sein. Jeder der Schalter Q1-Q3, die "obere" Schalter genannt werden können, ist über eine spannungsgesteuerte Gleichspannungs-Elektroleistungsquelle $B+$ und über einen Stromabstast-Reihenwiderstand R_s mit einem der Schalter Q4-Q6, die die "unteren" Schalter genannt werden können, in Reihe geschaltet, wobei die Verbindungsstelle jedes Paares der in Reihe geschalteten oberen und unteren Schalter mit einem anderen der drei Motorphasenwicklungsanschlüsse in den Sternschaltungs-Motorankerwicklungen verbunden ist. Insbesondere ist die Verbindungsstelle J_A der Schalter Q1 und Q4 mit dem Anschluss P_A der Motorphasenwicklung A verbunden; ist die Verbindungsstelle J_B der Schalter Q2 und Q5 mit dem Anschluss P_B der Motorphasenwicklung B verbunden; und ist die Verbindungsstelle J_C der Schalter Q3 und Q6 mit dem Anschluss P_C der Motorphasenwicklung C verbunden. Die zu den Schaltern parallelgeschalteten Dioden sind in Bezug auf die Motorphasenwicklungsanschlüsse ähnlich verbunden.

[0022] Der Strom in den Motorphasenwicklungen wird durch Aktivieren eines oberen Schalters und eines nicht in Reihe geschalteten unteren Schalters geliefert, um einen Stromkreis mit der Gleichspannungselektroleistungsquelle, zwei Phasenwicklungen und dem Stromabstastwiderstand R_s in Reihe zu schließen. Die Motorphasenwicklungen werden durch Umschalten der aktivierten Paare geschlossener Schalter in einem im Gebiet wohlbekannten vorgegebenen Muster elektronisch umgeschaltet, um einen Motorbetrieb in einer vorgegebenen Drehrichtung zu erzeugen. Außerdem werden die Motorströme in den Ankerphasenwicklungen dadurch gesteuert, dass die aktivierten Schalter mit einer höheren Frequenz als der des Umschaltens impulsbreitenmoduliert (PWM) werden. Diese PWM-Schaltung kann auf mehrere verschiedene Arten erfolgen, was zu mehreren verschiedenen Betriebsarten der Brückenschaltung führt.

[0023] In einer ersten Betriebsart, die Doppelschaltbetriebsart genannt werden kann, wird die Impulsbreitenmodulation dadurch geliefert, dass sowohl die oberen als auch die unteren aktivierten Schalter mit Ausnahme während des Umschaltens zusammen auf Standardweise geschaltet werden. Während des Umschaltens werden drei Schalter aktiviert. Der neu aktivierte Schalter auf derselben (oberen oder unteren) Ebene wie der deaktivierte Schalter wird zusammen mit dem aktiviert bleibenden Schalter auf der anderen Ebene auf übliche Weise impulsbreitenmoduliert; wobei aber der deaktivierte Schalter ebenfalls impulsbreitenmoduliert wird, wobei jeder Impuls des

deaktivierten Schalters synchron mit den anderen initiiert wird, während die Dauer mit einem gesteuerten, abnehmenden Tastgrad von den anderen abweicht. Die bevorzugte Art der Abnahme des Tastgrads des deaktivierten Schalters ist vorzugsweise exponentiell, da dies dazu neigt, eine lineare Abnahme des Stroms zu erzeugen. Der neu aktivierte Schalter wird zwischen der oberen und der unteren Gruppe hin und her gewechselt. Das gezeigte Muster erzeugt eine Motordrehung in einer vorgegebenen Richtung; das Muster für die Motordrehung in der entgegengesetzten Richtung ist für den Durchschnittsfachmann auf dem Gebiet offensichtlich.

[0024] Anhand von [Fig. 9](#) wird ein Beispiel des Betriebs der Doppelschaltbetriebsart beschrieben. Der Zustand jedes der Schalter 1–6 ist während eines vollständigen elektrischen Zyklus des Motors gezeigt. Für jeden Schalter ist ein aktivierter Zustand hoch gezeigt, während ein inaktiver Zustand tief gezeigt ist. Während jeder Schalter aktiviert ist, ist die Standardimpulsbreitenmodulation mit einer Einfachschraffur gezeigt, während die abnehmende Impulsbreitenmodulation mit einer Doppelschraffur gezeigt ist. Die Nichtumschaltzeitdauern des Motorbetriebs (AB, CB, ...) sind durch nicht bezeichnete Umschaltzeitdauern getrennt gezeigt, deren Dauer der Klarheit halber übertrieben ist. Während der Nichtumschaltzeitdauer AB werden der obere Schalter Q1 und der untere Schalter Q5 bis zum Umschalten zusammen aktiviert und impulsbreitenmoduliert. Während der folgenden Umschaltzeitdauer wird der obere Schalter Q3 aktiviert und mit dem unteren Schalter Q5 impulsbreitenmoduliert; wobei aber die Impulsbreitenmodulation des Schalters Q1, obgleich sie mit Impulsen fortgesetzt wird, die synchron zu den anderen initiiert werden, einen abnehmenden Tastgrad erhält. Wenn der abnehmende Tastgrad des Schalters Q1 abgeschlossen ist, wird der Schalter deaktiviert, um die Umschaltzeitdauer abzuschließen. Die nächste Nichtumschaltzeitdauer CB ist ähnlich, wobei aber die Schalter Q3 und Q5 zusammen bis zur nächsten Umschaltzeitdauer impulsbreitenmoduliert werden, während der Q4, der nächste Schalter, der eingeschaltet wird, mit Q3 impulsbreitenmoduliert wird, wobei der Schalter eingeschaltet bleibt und Q5, der Schalter, der ausgeschaltet wird, mit einem abnehmenden Tastgrad impulsbreitenmoduliert wird. Das Muster wiederholt sich, wobei die passenden Schalter wie in [Fig. 9](#) gezeigt aktiviert und moduliert werden, um einen Zyklus über zusätzliche Nichtumschaltzeitdauern CA, BA, BC und AC und die zugeordneten Umschaltzeitdauern abzuschließen.

[0025] In einer zweiten Betriebsart, die die modifizierte Einzelschaltbetriebsart genannt werden kann, wird die Impulsbreitenmodulation dadurch geschaffen, dass lediglich der obere aktivierte Schalter eingeschaltet wird, während der untere aktivierte Schalter mit Ausnahme während des Umschaltens unterbre-

chungsfrei eingeschaltet gelassen wird. Während des Umschaltens sind drei Schalter aktiviert: der neu aktivierte Schalter (oberer oder unterer) ist impulsbreitenmoduliert; der aktiviert bleibende Schalter ist unterbrechungsfrei eingeschaltet und der Schalter, der deaktiviert wird, wird mit Impulsen, die synchron mit den Standardimpulsen initiiert werden, deren Dauer sich aber mit einem gesteuerten, abnehmenden Tastgrad ändert, impulsbreitenmoduliert. Somit bezieht sich der Begriff "modifiziert" in der modifizierten Schaltbetriebsart auf die Tatsache, dass, obgleich während der Nichtumschaltzeitdauern der untere aktivierte Schalter immer unterbrechungsfrei eingeschaltet gelassen wird, der unterbrechungsfrei eingeschaltet gelassene Schalter während des Umschaltens zwischen einem oberen Schalter und einem unteren Schalter hin und her wechselt. Somit ist der Betrieb während des Umschaltens zwischen den oberen und den unteren Schaltern symmetrisch. Dies unterscheidet sich von der herkömmlichen Einzelschaltbetriebsart des Standes der Technik, in der der untere aktivierte Schalter unterbrechungsfrei immer eingeschaltet gelassen wird und die Modulation immer auf den oberen aktivierten Schalter angewendet wird.

[0026] Anhand von [Fig. 10](#) wird ein Beispiel des Betriebs in der modifizierten Einzelschaltbetriebsart beschrieben. Während der Nichtumschaltzeitdauer AB sind der obere Schalter Q1 und der untere Schalter Q5 aktiviert, wobei der obere Schalter Q1 impulsbreitenmoduliert wird, während der untere Schalter Q5 bis zum Umschalten unterbrechungsfrei eingeschaltet ist. Während der folgenden Umschaltzeitdauer wird der obere Schalter Q aktiviert und impulsbreitenmoduliert, bleibt der untere Schalter Q5 unterbrechungsfrei eingeschaltet und wird der deaktivierte Schalter Q1 synchron mit einem gesteuerten, vorzugsweise exponentiell abfallenden, Tastgrad impulsbreitenmoduliert. Während der nächsten Nichtumschaltzeitdauer CB wird der obere Schalter Q3 impulsbreitenmoduliert und bleibt der untere Schalter Q5 unterbrechungsfrei eingeschaltet. Während der folgenden Umschaltzeitdauer wird der untere Schalter Q4 aktiviert und während der Umschaltzeitdauer impulsbreitenmoduliert, ist der obere Schalter Q3 während der Umschaltzeitdauer unterbrechungsfrei eingeschaltet und wird der deaktivierte Schalter Q5 synchron zum Schalter Q4, aber mit einem gesteuerten, vorzugsweise exponentiell abfallenden, Tastgrad, impulsbreitenmoduliert. Während der nächsten Nichtumschaltzeitdauer CA ist der untere Schalter Q4 unterbrechungsfrei eingeschaltet, während der obere Schalter Q3 impulsbreitenmoduliert wird. Das Muster wiederholt sich, wobei die passenden Schalter wie in [Fig. 10](#) gezeigt aktiviert und moduliert werden, um einen Zyklus über zusätzliche Nichtumschaltzeitdauern BA, BC und AC und die zugeordneten Umschaltzeitdauern abzuschließen.

[0027] Die Erfinder dieser Vorrichtung und dieses Verfahrens haben festgestellt, dass eine gesteuerte, abnehmende Modulation des Schalters beim Phasenausschalten das Umschalten der Phasenströme in dem Motor während des Umschaltens wirksam steuern kann, um das störende "Reißverschluss"-Rauschen zu beseitigen. Somit schafft die Steuereinheit **16** eine gesteuerte, abnehmende Impulsbreitenmodulation des ausgeschalteten Schalters, die synchron zu dem ersten PWM-Impuls des Schalters, der nach einem Umschalten eines der Rotorstellungssignale H_1 , H_2 und H_3 eingeschaltet wird, beginnt. Da diese Änderung dazu neigt, eine lineare Reduzierung des Stroms zu erzeugen, ist diese abnehmende Modulation vorzugsweise exponentiell. Sie beginnt mit dem Tastgrad, der zu Beginn des Umschaltens wirksam ist, und wird mit einem vorgegebenen Prozentsatz (z. B. 10%) des maximalen Tastgrads abgeschlossen, da sich auf diesem Pegel nicht viel ändert und kleine Taktzyklen nicht leicht auf stabile Weise aufrechtzuerhalten sind. Außerdem wird die Abnahmerate umgekehrt zur Motordrehzahl geändert, um eine Dauer einer vorgegebenen maximalen Anzahl elektrischer Grade (z. B. 6) aufrechtzuerhalten, um sicherzustellen, dass sich die Modulation mit keinen Umschaltereignissen überlappt. Um potentielle Umschaltprobleme zu vermeiden, wird sie außerdem vorzugsweise bei hohen Motordrehzahlen ausgeschaltet. Dies ist zulässig, da das "Reißverschluss"-Rauschen, zu dessen Beseitigung die abnehmende Modulation konstruiert ist, bei hohen Motordrehzahlen (z. B. über 1000 U/min) kein Problem ist.

[0028] Die PWM-Schaltung **70** erzeugt eine impulsbreitenmodulierte Standardsignalfom PWM und eine vorzugsweise exponentiell abfallende impulsbreitenmodulierte Signalfom XPWM, die beide der Gatteransteuerschaltung **65** zugeführt werden, um die geforderte Schaltung der Halbleiterschalter Q1-Q6 erzeugen zu helfen. Wie in [Fig. 5](#) zu sehen ist, beruht die PWM-Schaltung **70** auf einem Zähler **701**, der die einem Takteingang CLK zugeführten Taktimpulse zählt und jede neue Zählung an einem digitalen Bus **702** ausgibt. Ein digitaler Komparator **703** empfängt die Zählung am Bus **702** und vergleicht sie mit einer Referenzzählung MAX DUTY, die durch den Steuercomputer **75** zugeführt wird und den Maximalwert der PWM (100 Prozent Tastgrad) darstellt. Wenn die Zählung gleich MAX DUTY ist, gibt der Komparator **703** einen Impuls an einen Rücksetzeingang R des Zählers **701**, um eine neue Zählung zu beginnen, sowie an die Setzeingänge der Flipflops **704** und **705** aus. Das Flipflop **704** liefert das Ausgangssignal XPWM und das Flipflop **705** liefert das Ausgangssignal PWM; somit sind die letzteren zwei Signale zu Beginn jedes Impulses synchronisiert.

[0029] Der Rücksetzeingang des Flipflops **704** empfängt das Ausgangssignal eines digitalen Kompara-

tors **706**, der die Zählung auf dem Bus **702** mit einer Eingangsreferenzzählung XREF vergleicht und, wenn sie gleich sind, einen Impuls erzeugt, der das Ende jedes Impulses in der XPWM-Signalfom veranlasst. Der Wert von XREF ist null, so dass, mit Ausnahme während des Umschaltens, keine XPWM-Impulse geliefert werden. Während des Umschaltens wird er auf einen Wert initialisiert, der veranlasst, dass der erste Impuls von XPWM den gleichen Tastgrad wie PWM hat und daraufhin vorzugsweise exponentiell abnimmt, um zu veranlassen, dass der Tastgrad des XPWM ähnlich, vorzugsweise exponentiell, abnimmt.

[0030] In dieser Schaltung könnte dem Rücksetzeingang des Flipflops **705** außerdem ein Rücksetzimpuls von einem digitalen Komparator zugeführt werden. Aus Gründen, die an einem späteren Punkt in dieser Beschreibung klarer werden, wird ein Vergleich aber in der analogen Schaltungsanordnung in der Stromsteuerung **85** ausgeführt, die ein Signal CMRST (Strombetriebsart zurücksetzen) zum Anlegen an den Rücksetzeingang des Flipflops **705** erzeugt, das das Ende jedes Impulses in der PWM-Signalfom veranlasst.

[0031] Außerdem erzeugt die PWM-Schaltung **70** einige Signale für weitere Schaltungen in der Steuereinheit **16**. Die Zählung auf dem Bus **702** wird durch das Signal CMRST in einem Zwischenspeicher **707** zwischengespeichert, der daraufhin eine digitale Zählung INIT enthält, die den momentanen Tastgrad der PWM-Signalfom darstellt. Wie an einem späteren Punkt in dieser Beschreibung beschrieben wird, wird der Wert INIT der Umschaltsteuerschaltung **90** zugeführt, um den Anfangswert der vorzugsweise exponentiell abfallenden Modulation zu bestimmen. Außerdem wird die Zählung in einem Dividierer **708** durch eine binäre Eingangszahl DIV dividiert, um eine dividierte Zählung SLOPE zu erzeugen, die zur Anstiegskompensation verwendet wird.

[0032] Das Signal XREF, das die vorzugsweise exponentiell abfallende Modulation in der Signalfom XPWM erzeugt, wird durch die anhand von [Fig. 8](#) beschriebene Umschaltsteuerschaltung **90** erzeugt. Grundsätzlich erzeugt diese Schaltung ein Signal, das zu Beginn des Umschaltens mit einem Anfangswert INIT, der gleich dem momentanen Tastgrad des Signals PWM ist, initiiert wird und das mit einer vorgegebenen Rate bis auf einen vorgegebenen Wert abnimmt. Da eine exponentielle Abnahme bevorzugt ist, wird in dieser Ausführungsform ein Tiefpassfilter verwendet. Vorzugsweise wird der vorzugsweise exponentielle Abfall in der Weise gesteuert, dass er einen Endwert erreicht, der einem vorgegebenen Prozentsatz von 100 Prozent Tastgrad in einer vorgegebenen maximalen sicheren Anzahl elektrischer Grade entspricht, so dass er das nächste Umschaltereignis nicht stört.

[0033] Anhand von [Fig. 8](#) sind der Summierer **901**, der Verstärker **902** und das Verzögerungsregister **903** in einer einzelnen digitalen Standard-Tiefpassfilterschleife mit einem digitalen Pol P und einer durch die Abtast- oder Taktrate gesteuerten Zeitkonstanten verbunden. Der Summierer besitzt zwei Eingänge: den Filtereingang selbst und eine verzögerte und skalierte Rückkopplung des Ausgangs XREF. Das Verzögerungsregister **903** kann aber zu irgendeinem Zeitpunkt mit einer von außen zugeführten digitalen Zahl geladen werden, wobei das Filtereingangssignal in den Summierer **901** eine Konstante null ist. Somit nimmt das Ausgangssignal XREF von dieser Zahl mit einer vorgegebenen, vorzugsweise exponentiellen Rate ab, wenn eine neue Zahl in das Verzögerungsregister **903** geladen wird. Da die Abnahmerate sowohl von der Verstärkung des Verstärkers **903** (Filterpol) als auch von der Abtastrate des Filters (Zeitkonstante) abhängt, kann sie durch Ändern einer oder beider gesteuert werden. In dieser Ausführungsform ist die Verstärkerverstärkung P konstant (z. B. 127/128) und wird die Abtastrate (Zeitkonstante) geändert, indem das Taktsignal CLK in der DIV-Schaltung **904** durch den vom Steuercomputer **75** in Abhängigkeit von der Motordrehzahl zugeführten Zeitkonstantenwert T_c dividiert wird. Das Ausgangssignal SAMP der DIV-Schaltung **904** ist ein dividiertes Taktsignal, das anstelle des Signals CLK als Taktsignal in der Filterschleife der Elemente **901–903** zum Steuern der Filterabtastrate verwendet wird.

[0034] Die Filterwirkung wird dadurch begonnen, dass der Wert INIT von der PWM-Schaltung **70** ins Verzögerungsregister **903** geladen wird; während sie dadurch angehalten wird, dass der Wert null ins Verzögerungsregister **903** geladen wird. Zu diesem Zweck ist eine zusätzliche Schaltungsanordnung vorgesehen. Eine Übergangserfassungsschaltung **905** empfängt vom Motor **46** die Umschaltinitiiierungssignale H_1 , H_2 und H_3 und signalisiert die Initiierung jedes Umschaltereignisses an ein Laderegister **906**, das in Reaktion den Wert von INIT in das Verzögerungsregister **903** lädt. Somit gibt das Filter einen Wert XREF aus, der anfangs gleich INIT ist und vorzugsweise während der Zeit von diesem Wert exponentiell abnimmt. Außerdem wird das Ausgangssignal des Summierers **901** einem Eingang eines Komparators **907** zugeführt, dessen anderem Eingang eine Zahl ENDX vom Steuercomputer **75** zugeführt wird. ENDX ist eine Konstante, die einen vorgegebenen Prozentsatz des maximalen Tastgrads MAX DUTY repräsentiert. Wenn XREF auf den Pegel von ENDX fällt, veranlasst ein Ausgangssignal vom Komparator **907** an ein Laderegister **908**, dass die Zahl null in das Verzögerungsregister **903** geladen wird, wobei XREF gegen null geht.

[0035] Der Motorstrom wird durch die Stromsteuerschaltung **85**, eine in Blockschaltbildform in [Fig. 7](#) gezeigte Schaltung, gesteuert. Ein analoger Kompara-

tor **851** erzeugt das Strombetriebsart-Rücksetzsignal CMRST, das einen Impuls der Signalform PWM abschließt, wenn das steigende abgetastete Stromsignal I_s gleich einem anstiegskompensierten gewünschten Stromsignal I_{cs} ist. Das Signal I_{cs} wird durch einen digitalen Summierer **852**, der den Wert SLOPE von dem Wert des gewünschten Stroms I_c subtrahiert, und von einem Digital/Analog-Umsetzer (DAC) **853**, der den Wert von I_{cs} in ein analoges Signal umsetzt, abgeleitet. Die in dieser Vorrichtung verwendete Anstiegskompensation ist eine Anwendung einer Standardtechnik zur Verbesserung der Stromschleifenstabilität in impulsbreitenmodulierten Strombetriebsart-Leistungsversorgungen zur Reduzierung von potentielltem Rauschen, das subharmonische Oszillationen erzeugt, bei der die zur Bestimmung des Tastgrads verwendete Referenzspannung einen kompensierenden abwärtsgerichteten Anstieg erhält, anstatt konstantgehalten zu werden. In dieser Schaltung liefert der in der PWM-Schaltung **70** erzeugte abnehmende Wert von SLOPE. Das Motorstromsignal I_s wird in der in [Fig. 6](#) gezeigten Stromabtastschaltung **80** abgeleitet. Die analogen Spannungssignale V_{HI} und V_{LO} von dem Stromabtastwiderstand RS in der Brückenschaltung **60** werden den Eingängen eines Operationsverstärkers **801** zugeführt, der ein Spannungsausgangssignal ihrer Differenz liefert. Diese Differenzspannung ist proportional dem Motorstrom, der durch den Widerstand R_s fließt, reagiert aber nicht auf einen Anteil des Motorstroms, der über die Rücklaufdioden in Umlauf gebracht wird, ohne über den Widerstand R_s zu fließen. Dies findet während des Umschaltens statt, wenn z. B. ein oberer Schalter eingeschaltet bleibt, während ein unterer Schalter ausgeschaltet wird, und umgekehrt.

[0036] Die Situation kann anhand der [Fig. 3](#) und [Fig. 11](#) erläutert werden. Beispielsweise wird während eines Umschaltens in der Doppelschaltbetriebsart der obere Schalter Q1 deaktiviert und der obere Schalter Q3 aktiviert, während der untere Schalter Q5 aktiviert bleibt. Die beiden Schalter Q1 und Q3 beginnen das Umschaltereignis mit dem gleichen Tastgrad, da dies die abnehmende Modulation des Anfangswerts Q1 ist. Somit arbeiten während des Anfangsimpulses des Umschaltereignisses alle drei Schalter mit demselben PWM-Tastgrad, wobei alle Phasenströme über den Abtastwiderstand R_s fließen. Da aber der Tastgrad des Schalters Q1 während des Umschaltereignisses abnimmt, öffnet der Schalter Q1 um zunehmend größere Zeitdauern vor Q3. Wenn der Schalter Q1 öffnet, während die Schalter Q3 und Q5 geschlossen sind, kann der Strom über die Phasenwicklungen A und B in Reihe, der von B+ über die Schalter Q1 und Q5 zur Masse geflossen ist, nicht mehr über den Schalter Q1 fließen. Die Induktivität der Phasenwicklungen A und B liefert aber eine Führungsspannung, um den Stromfluss der Phasenwicklung A über den Schalter Q5 und die Rücklaufdiode D4 aufrechtzuerhalten. Da dieser Strom nicht

über den Abtastwiderstand R_S fließt, fällt der abgetastete Strom auf einen niedrigeren Pegel als den, auf dem der Gesamtmotorstrom tatsächlich ist.

[0037] **Fig. 11** zeigt in durchgezogenen Linien den XPWM-Impuls **130**, den vom Abtastwiderstand R_S abgetasteten Strom **140a**, **140b** und den PWM-Impuls **120**, der sich ergeben würde, wenn ein Signal mit diesem Strom als Signal I_s ausgegeben würde. Der durch die Linie **140a** dargestellte angegebene Motorstrom beginnt zum Zeitpunkt T_1 und steigt bis zum Zeitpunkt T_2 , wenn der Schalter Q1 öffnet, und fällt daraufhin auf einen niedrigeren Wert, da ein Teil des Motorstroms von dem Stromabtastwiderstand R_S abgeleitet wird, bevor er erneut ansteigt. Die Strichlinie **140c** zeigt den tatsächlichen Strom, der andernfalls zum Zeitpunkt T_3 den Referenzpegel erreichen würde. Der auf die Linie **140b** folgende abgetastete Strom erreicht bis zum Zeitpunkt T_4 nicht den Referenzpegel. Somit würde der Abfall des angegebenen Stroms im vollständigen Vertrauen auf den Stromabtastwiderstand das Strombetriebsart-Rücksetzsignal CMRST verzögern und somit den derzeitigen PWM-Impuls wie durch den PWM-Impuls **120** gezeigt verlängern. Dies kann zu subharmonischen Oszillationen und zu Rauschen bei Bruchteilen ($1/2$, $1/3$...) der PWM-Schaltfrequenz führen. Obgleich die PWM-Schaltfrequenz außerhalb des Hörbereichs liegt, liegen einige der unteren subharmonischen Frequenzen im Hörbereich, wobei das Rauschen hörbar ist.

[0038] Um dieses Rauschen zu verhindern, enthält die Stromabtastschaltung **80** eine Abtast/Halte- und Spannungsführungsschaltungsanordnung. Ein analoger Schalter am Ausgang des Operationsverstärkers **801** wird durch ein Signal HOLD gesteuert, so dass er während des Anfangsanstiegs jedes Impulses geschlossen bleibt, während er offen bleibt, während die Zeitdauer des Umlaufstroms beginnt. Das Signal HOLD wird durch ein Flipflop **808** zugeführt, dessen Setzeingang durch die fallende Flanke des Signals XPWM ausgelöst wird, was das Öffnen des Deaktivierungsschalters angibt, und dessen Rücksetzeingang durch die fallende Flanke von PWM ausgelöst wird, was das Rücksetzen der Strombetriebsart angibt; außerdem reagiert der Schalter **802** auf das Signal HOLD, um während der Zeitdauer zwischen diesen zwei fallenden Flanken zu öffnen.

[0039] Das Ausgangssignal des analogen Schalters **802** ist über einen Widerstand **803** und einen Kondensator **804** zur Masse in Reihe geschaltet; außerdem ist die Verbindungsstelle **805** des Widerstands und des Kondensators der Ausgang der Stromabtastschaltung **80**. Außerdem ist die Verbindungsstelle **805** über einen Widerstand **806** mit einer gesteuerten Spannungsquelle **807** verbunden, die vom Steuercomputer **75** ein Steuersignal SPEED empfängt. Der Wert des Widerstands **806** ist groß gegen den des

Widerstands **803**; somit ist die gesteuerte Spannungsquelle **807** effektiv vom Kondensator **804** getrennt, während der analoge Schalter **802** geschlossen ist. Somit steigt die Spannung an dem Kondensator **804** während des Anfangsstromanstiegs mit dem Ausgangssignal des Operationsverstärkers **801**. Wenn aber der analoge Schalter **802** öffnet, wird der Kondensator **804** vom Operationsverstärker **801** getrennt und fährt, anstatt mit dem angegebenen Strom zu fallen, gemäß der Steuerung der gesteuerten Spannungsquelle **807** fort, die je nach dem Wert ihrer eigenen Spannung relativ zu der des Kondensators Strom an den Kondensator **804** liefert oder Strom von ihm zieht. Das Signal SPEED, das die Spannung der gesteuerten Spannungsquelle **807** einstellt, wird vom Steuercomputer **75** z. B. in einer Nachschlagtabelle aus der Geschwindigkeit des Motors **46** abgeleitet. Die Spannung der gesteuerten Spannungsquelle **807** ist beim Öffnen des analogen Schalters **801** typischerweise größer als die am Kondensator **804**, wobei die Spannung am Kondensator **804** weiter ansteigt, was eine Schätzung des tatsächlichen Motorstroms liefert. Somit folgt das tatsächliche Ausgangssignal I_s der Stromabtastschaltung **80** nach dem Öffnen des Schalters Q1 zum Zeitpunkt T_2 wieder anhand von **Fig. 11** annähernd der Strichlinie **140c**, wobei es den PWM-Impuls annähernd zum richtigen Zeitpunkt T_3 abschließt.

[0040] Die Gatteransteuerschaltung **65** besitzt einen Ausgang, der mit dem Steuergatter jedes der Halbleiterschalter Q1-Q6 in der Brückenschaltung **60** verbunden ist. Jedem der Ausgänge der Gatteransteuerschaltung **65** wird eines von vier möglichen Signalen zugeführt: (1) unterbrechungsfreie Deaktivierung (in dieser Ausführungsform Signal tief, Schalter offen), (2) unterbrechungsfreie Aktivierung (in dieser Ausführungsform Signal hoch, Schalter geschlossen), (3) Signal PWM oder (4) Signal XPWM. Diese Signale sind auf die richtigen Ausgangssignale zu den richtigen Zeitpunkten für den gewünschten Motorbetrieb in Reaktion auf mehrere Eingangssteuersignale gerichtet, die (1) die Umschaltinitiiierungssignale H_1 , H_2 und H_3 vom Motor **46**, (2) MODE, das Richtungssignal (DIR-Signal) und das Freigabesignal der abnehmenden Modulation (XEN-Signal) vom Steuercomputer **75** und (3) das Signal XX von der Umschaltsteuerschaltung **90** umfassen. Das Freigabesignal der abnehmenden Modulation (XEN) bestimmt, ob die Operation die abnehmende Modulation verwendet oder ob sie die herkömmliche Steuerung bürstenloser Motoren mit plötzlicher Schaltung verwendet; wobei die letztere Logik und der letztere Betrieb im Gebiet wohlbekannt sind. Das MODE-Signal bestimmt, ob die Doppelschaltbetriebsart oder die Einzelschaltbetriebsart verwendet wird; wobei das Richtungssignal DIR in jedem Fall die Logik für den Linksbetrieb oder Rechtsbetrieb des Motors auswählt. Es wird angemerkt, dass die Einzelschaltbetriebsart, wenn keine abnehmende Modulation ver-

wendet wird, die herkömmliche Betriebsart ist, in der der aktivierte Schalter, der geschlossen bleibt, stets von derselben Gruppe (üblicherweise der unteren) ist.

[0041] Die Umschaltinitiiierungssignale H_1 , H_2 und H_3 besitzen jeweils zwei Zustände, einen für jeweils 180 Grad eines elektrischen Zyklus für diese Phase. Somit gibt es acht mögliche Kombinationen dieser Signale, von denen sechs zum Signalisieren von Umschaltereignissen verwendet werden. Vorzugsweise wird die Signalerzeugung so eingerichtet, dass die Kombinationen 1, 1, 1 und 0, 0, 0 wie im Gebiet bekannt für die Fehlerangabe reserviert sind. Beginnend mit dem nächsten PWM-Impuls veranlasst jede der weiteren sechs Kombinationen ein Umschalten zu einer neuen Menge von Ausgangssignalen zu den sechs Halbleiterschaltern. In der Doppelschaltbetriebsart ist dies alles, was erforderlich ist, da das Ende des Umschaltens nicht signalisiert zu werden braucht. Beispielsweise veranlasst anhand von [Fig. 9](#) die Kombination der Signale H_1 , H_2 und H_3 , die den Beginn des Umschaltens in die Phase AB angibt, dass die Logik den Schaltern Q1 und Q5 das Signal PWM zuführt, dem Schalter Q6 das Signal XPWM zuführt und die Schaltern Q2, Q3 und Q4 weiter deaktiviert (in dieser Ausführungsform tief), um die Umschaltzeitdauer zu erzeugen. Der einzige Schalter, der am Ende der Umschaltzeitdauer umgeschaltet werden muss, ist der Schalter Q6, wobei aber das bereits an diesem Schalter angelegte Signal XPWM dieses Umschalten selbst liefert, da es für den Rest der Phase tief wird. Für jede der weiteren fünf Phasen in dem elektrischen Zyklus des Motors gibt es ein ähnliches Muster.

[0042] In der modifizierten Einzelspaltbetriebsart ist allerdings ein zusätzliches Signal erforderlich, das das Ende des Umschaltens kennzeichnet. Anhand von [Fig. 10](#) muss der Schalter Q5 am Ende derselben Phase AB, die das Umschaltereignis initiiert, von der drehimpulssteuernden PWM-Signalförm für den Rest der Phase in die unterbrechungsfreie Aktivierung (Signal hoch, Schalter geschlossen) umschalten. Allerdings wird das Signal XPWM zu diesem Zeitpunkt selbst tief. Außerdem muss der Schalter Q1 am Ende desselben Umschaltereignisses von der unterbrechungsfreien Aktivierung (Signal hoch, Schalter geschlossen) für den Rest der Phase in die drehimpulssteuernde PWM-Signalförm umschalten. Somit muss die Gatteransteuerung **65** diese Umschaltungen in dieser Ausführungsform in Reaktion auf ein Signal am Ende der Umschaltzeitdauer durch Umschalten des an den Schalter Q5 angelegten Signals von PWM auf unterbrechungsfreie Aktivierung und Umschalten des an den Schalter Q1 angelegten Signals von ununterbrochener Aktivierung auf PWM selbst erzeugen. Dies ist ähnlich für die weiteren fünf Phasen des elektrischen Zyklus des Motors wahr. Das Signal des Endes der Umschaltzeitdauer könnte

in der Gatteransteuerung **65** aus dem Signal XPWM selbst abgeleitet werden, wird in dieser Ausführungsform aber in der Umschaltsteuerschaltung **90** vom Ausgangssignal des Komparators **907** abgeleitet, dessen Zustand umgeschaltet wird, um das Ende der abnehmenden Modulation zu veranlassen. Dieses hier als XX bezeichnete Signal wird zu diesem Zweck in dieser und in den anderen 5 Phasen des elektrischen Motorzyklus der Gatteransteuerschaltung **65** zugeführt.

[0043] Die oben beschriebene Steuerung wird vorzugsweise von einer festverdrahteten Logikschaltungsanordnung in einem kundenspezifisch entworfenen digitalen Chip geliefert, der auf eine im Gebiet bekannte Weise von den hier gegebenen Informationen abgeleitet ist; eine solche Ableitung ist eine unkomplizierte Aufgabe, die ganz im Rahmen der Möglichkeit eines Durchschnittsfachmanns auf dem Gebiet der Konstruktion von Motorsteuerungen liegt.

[0044] Während der Aus-Zeitdauern jedes Impulsbreitenmodulationszyklus läuft der Motorstrom in der Doppelschaltbetriebsart über die Rücklaufdioden der unteren Seite und der oberen Seite um. Da die Führungsfunktion groß ist, erfolgt der Abfall des induktiven Stroms recht schnell: die negative Batteriespannung plus zwei Diodenabfälle. Wegen dieses schnellen Abfalls ist für die Stromsteuerschleifenstabilität ein erheblicher Betrag der Anstiegskompensation erforderlich. Dagegen erfolgt der Umlauf des Motorstroms in der modifizierten Einzelschaltbetriebsart lediglich über eine einzelne Rücklaufdiode; wobei die Führungsfunktion lediglich ein einzelner Diodenabfall ist. Somit ist die Verzögerung des induktiven Stroms wesentlich weniger schnell, wobei erheblich weniger Anstiegskompensation erforderlich ist. Da die Verwendung der abnehmenden Modulation die Schleife weniger stabil macht, ist mehr Anstiegskompensation erforderlich, wobei das System insbesondere in der Doppelschaltbetriebsart weniger effizient ist, da es bereits weniger stabil ist, bevor die abnehmende Modulation angewendet wird. Somit ist die modifizierte Einzelschaltbetriebsart die gewünschte Betriebsart der Vorrichtung dieser Erfindung. Außerdem erzeugen die kleineren Oberwellenströme dieser Betriebsart weniger abgestrahlte elektromagnetische Störung (EMI). Allerdings besitzt die modifizierte Einzelschaltbetriebsart in einigen Gebieten, die in einem elektrischen Servolenksystem von besonderem Interesse sind, ihre eigenen Probleme. In der modifizierten Einzelschaltbetriebsart können wegen der Vorladewirkungen der Umlaufströme keine kleinen Ströme erreicht werden; dagegen kann die Doppelschaltbetriebsart niedrige Ströme genau steuern. Außerdem ist das Drehmoment beim Betrieb im Motorquadranten II, in dem das Motordrehmoment der Motorrichtung entgegengesetzt ist, in der modifizierten Einzelschaltbetriebsart nicht mit der Motordrehzahl konstant, während es in der Doppelschaltbetriebsart

recht konstant ist, wobei dies stetige und stabile schnelle Lenkrichtungsumkehrungen ermöglicht.

[0045] Somit verwendet die Vorrichtung dieser Ausführungsform beide Betriebsarten, jede in dem Bereich des elektrischen Servolenkbetriebs, in dem sie den größten Vorteil schafft. Wie in Bezug auf die in [Fig. 12](#) gezeigte Motordrehzahl/Drehmoment-Abbildung gezeigt ist, wird die Betriebsart durch den Steuercomputer **75** in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt des Motors bestimmt. Die modifizierte Einzelschaltbetriebsart wird in einem Gebiet **150** (in [Fig. 12](#) schraffiert) über einem vorgegebenen positiven Drehmomentwert (Stromwert) **151** und rechts von einem vorgegebenen negativen Motordrehzahlbetrag **152** in der oberen Hälfte der Ebene, die die Quadranten I und II umfasst, und in einem dementsprechend definierten Gebiet **160** unter einem vorgegebenen negativen Drehmomentbetrag (Strombetrag) **161** und links von einem vorgegebenen positiven Motordrehzahlbetrag **162** in der unteren Hälfte der Ebene, die die Quadranten III und IV umfasst, verwendet. Anderswo wird die Doppelschaltbetriebsart verwendet. Somit wird die stabilere modifizierte Einzelschaltbetriebsart in den gesamten Quadranten I und III mit Ausnahme dort, wo niedrige Ströme nicht erreichbar sind, und außerdem in den Quadranten II und IV bei niedrigen Motordrehzahlen, bei denen Lenkrichtungsumkehrungen in dieser Betriebsart akzeptabel sind, verwendet. Die Doppelschaltbetriebsart wird dort, wo niedrige Ströme erreicht werden müssen, und während schneller Lenkrichtungsumkehrungen verwendet. Der Steuercomputer **75** kann das gewünschte Motorstromsignal I_c als Angabe des Motorstroms oder des Motordrehmoments verwenden und kann ein Motordrehzahlsignal dadurch ableiten, dass er die Zeitdauer zwischen den Umschaltungen in der Kombination der Umschaltinitiierungssignale H_1 , H_2 und H_3 vom Motor **46** bestimmt. Eine solche Ableitung führt eine minimale Zeitverzögerung ein und kann somit auf schnelle Änderungen der Motordrehzahl reagieren. Außerdem liefert die Verwendung der Zeitdauer, die tatsächlich ein inverses Motordrehzahlsignal ist, bei niedrigen Motordrehzahlen, bei denen das "Reißverschluss"-Rauschen störend ist, eine maximale Auflösung. Der Steuercomputer **75** vergleicht in Reaktion auf das somit abgeleitete Drehmoment und auf die somit abgeleitete Drehzahl den Arbeitspunkt des Motors **46** mit der in [Fig. 12](#) gezeigten Abbildung, bestimmt die gewünschte Betriebsart mit der zum Verhindern des Betriebsartpendelns angewendeten Hysterese und sendet das gewünschte MODE-Signal an die Gatteransteuerschaltung **65**. Der Vergleich kann auf eine Anzahl von Arten ausgeführt werden einschließlich, aber nicht beschränkt auf, gespeicherte kalibrierte Zahlen, die die Drehzahl- und Drehmomentlinien **151**, **152**, **161** und **162** darstellen, und Vergleichen der abgeleiteten veränderten Werte damit.

[0046] Der Steuercomputer **75** leitet den angewiesenen Strom I_c und die Motorrichtung DIR gemäß irgendeiner der vielen im Gebiet bekannten elektrischen Servolenksteuerungen unabhängig davon ab, welche Parameter: z. B. Fahrgeschwindigkeit, Lenkraddrehmoment und Lenkwinkel, die ausgewählte Steuerung erfordert. Die Motordrehzahl kann direkt aus der Zeitdauer zwischen Umschaltungen des Status der Motorstellungssignale H_1 , H_2 und H_3 abgeleitet werden. MAX DUTY und ENDX sind als vorgegebene Konstanten in dem Steuercomputer **75** programmiert. MODE wird wie oben beschrieben bestimmt. DIV, das die Anstiegskompensation bestimmt, wird abgesehen davon, dass für die verschiedenen Betriebsarten in Reaktion auf das MODE-Signal getrennte Kalibrierungen vorgesehen sind, auf bekannte Weise bestimmt. Das Signal XEN zur Freigabe der abnehmenden Modulation wird wenigstens in Reaktion auf die Motordrehzahl bestimmt, um bei niedrigen Drehzahlen, bei denen das "Reißverschluss"-Rauschen ein Problem ist, freizugeben und bei höheren Geschwindigkeiten, bei denen es das Umschalten stören könnte, zu sperren. Die Zeitkonstante T_c der abnehmenden Modulation wird in Abhängigkeit von der Motordrehzahl abgeleitet, um eine Modulationsabnahme zu schaffen, die hinsichtlich der elektrischen Grade im Wesentlichen konstant ist.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Schaffung einer Aktivierung mit reduziertem Umschaltrauschen eines bürstenlosen Gleichstrommotors (**46**), der einen Stator mit Dreiphasen-Ankerwicklungen (A, B, C) und einen Permanentmagnetrotor besitzt, wobei die Aktivierung eine Brückenschaltschaltung mit einer ersten (Q1, Q2, Q3) und einer zweiten (Q4, Q5, Q6) Gruppe aus jeweils drei Schaltern umfasst, jeder Schalter der ersten Gruppe über eine elektrische Leistungsquelle (B+) mit einem anderen der Schalter der zweiten Gruppe in Reihe geschaltet ist, eine Verbindungsstelle (JA, JB, JC) jedes Paares von in Reihe geschalteten Schaltern außerdem mit einer anderen der Dreiphasen-Ankerwicklungen verbunden ist und jeder der Schalter ein Halbleiterschalter mit einer parallelen Rücklaufdiode ist, wobei das Verfahren gekennzeichnet ist durch die folgenden Schritte:
wiederholtes Aktivieren ausgewählter Schalter der ersten Gruppe mit ausgewählten, nicht in Reihe geschalteten Schaltern der zweiten Gruppe, um ausgewählte Paare der Dreiphasenwicklungen in einem vorgegebenen Umschaltmuster mit der elektrischen Leistungsquelle in Reihe zu schalten, um in den Wicklungen des Motors drehmomenterzeugende Phasenströme hervorzurufen, wobei das Umschaltmuster Umschaltereignisse definiert, in denen ein Schalter entweder der ersten oder der zweiten Gruppe deaktiviert wird, ein neuer Schalter der ersten oder der zweiten Gruppe aktiviert wird und ein Schalter der jeweils anderen der ersten und der zweiten Gruppe

aktiviert bleibt, wobei der neu aktivierte Schalter bei aufeinander folgenden Umschaltereignissen zwischen der ersten Gruppe und der zweiten Gruppe hin und her wechselt; und

bei jedem Umschaltereignis Vorsehen einer überlappenden Aktivierung des deaktivierten Schalters und des neu aktivierten Schalters und des für die Dauer des Umschaltens aktiviert bleibenden Schalters, wobei der neu aktivierte Schalter mit einem Motordrehmoment-Steuerungstastgrad impulsbreitenmoduliert wird und der deaktivierte Schalter mit Impulsen, die synchron mit jenen des neu aktivierten Schalters initiiert werden, jedoch einen ausgehend von dem Drehmoment-Steuerungstastgrad abnehmenden Tastgrad besitzen, impulsbreitenmoduliert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der aktiviert bleibende Schalter während jedes Umschaltereignisses synchron mit dem neu aktivierten Schalter mit dem Motordrehmoment-Steuerungstastgrad impulsbreitenmoduliert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der aktiviert bleibende Schalter während jedes Umschaltereignisses unterbrechungsfrei geschlossen ist.

4. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem außerhalb der Umschaltereignisse die aktivierten Schalter der ersten Gruppe mit dem Drehmoment-Steuerungstastgrad impulsbreitenmoduliert werden und die aktivierten Schalter der zweiten Gruppe unterbrechungsfrei geschlossen sind.

5. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Motor abwechselnd in einer Einzelschaltbetriebsart, in der der aktiviert bleibende Schalter während der Aktivierung unterbrechungsfrei geschlossen ist, oder in einer Doppelschaltbetriebsart, in der der aktiviert bleibende Schalter synchron mit dem neu aktivierten Schalter mit dem Motordrehmoment-Steuerungstastgrad impulsbreitenmoduliert wird, betrieben wird, und bei dem der Motor in Reaktion auf ein sich mit dem Motordrehmoment änderndes Signal zwischen der Einzelschaltbetriebsart und der Doppelschaltbetriebsart umgeschaltet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem der Motor ferner in Reaktion auf ein sich mit der Motordrehzahl veränderndes Signal zwischen der Einzelschaltbetriebsart und der Doppelschaltbetriebsart umgeschaltet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Tastgrad des deaktivierten Schalters durch das Umschaltereignis jeweils in einer vorgegebenen Anzahl elektrischer Grade des Motors von dem Drehmoment-Steuerungstastgrad kontinuierlich zu einem vorgegebenen minimalen Tastgrad gesenkt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Tast-

grad des deaktivierten Schalters exponentiell gesenkt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem die Zeitkonstante der exponentiellen Absenkung umgekehrt zu der Motordrehzahl geändert wird, um über eine vorgegebene maximale Anzahl elektrischer Grade des Motors einen vorgegebenen minimalen Tastgrad zu erzeugen.

10. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die überlappende Aktivierung des deaktivierten Schalters und des neu aktivierten Schalters und des aktiviert bleibenden Schalters für die Dauer des Umschaltereignisses bei niedrigen Motordrehzahlen, bei denen das Umschaltrauschen am meisten hörbar ist, vorgesehen wird und bei höheren Drehzahlen, wo sie das Umschalten stören könnte, nicht vorgesehen ist.

11. Elektromechanische Aktivierungsvorrichtung, die eine Quelle (B+) für elektrische Gleichstromleistung, einen bürstenlosen Gleichstrommotor (46) mit einem Stator mit Dreiphasen-Ankerwicklungen (A, B, C) und einem Permanentmagnetrotor, eine Brückenschaltschaltung mit einer ersten (Q1, Q2, Q3) und einer zweiten (Q4, Q5, Q6) Gruppe aus jeweils drei Schaltern, wobei jeder Schalter der ersten Gruppe über die elektrische Leistungsquelle mit einem anderen der Schalter der zweiten Gruppe in Reihe geschaltet ist, umfasst, wobei ein Verbindungspunkt (JA, JB, JC) jedes Paares von in Reihe geschalteten Schaltern außerdem mit einer anderen der Dreiphasen-Ankerwicklungen verbunden ist, jeder der Schalter ein Halbleiterschalter mit einer parallelen Rücklaufdiode (D1, D2, D3, D4, D5, D6) ist und eine Steuerung (16) wiederholt ausgewählte Schalter der ersten Gruppe mit ausgewählten, nicht in Reihe geschalteten Schaltern der zweiten Gruppe aktiviert, um ausgewählte Paare der Dreiphasenwicklungen in einem vorgegebenen Umschaltmuster mit der elektrischen Leistungsquelle in Reihe zu schalten, um Drehmomenterzeugungs-Phasenströme in den Wicklungen des Motors zu erzeugen, **dadurch gekennzeichnet**, dass:

das Umschaltmuster Umschaltereignisse definiert, in denen ein Schalter entweder der ersten oder der zweiten Gruppe deaktiviert ist, ein neuer Schalter der ersten oder der zweiten Gruppe aktiviert wird und ein Schalter der jeweils anderen der ersten und der zweiten Gruppe aktiviert bleibt, wobei der neu aktivierte Schalter in aufeinander folgenden Umschaltereignissen zwischen der ersten Gruppe und der zweiten Gruppe hin und her wechselt, und

die Steuerung (60, 65, 70, 75, 80, 85, 90) in jedem Umschaltereignis für die Dauer des Umschaltens eine überlappende Aktivierung des deaktivierten Schalters und des neu aktivierten Schalters und des aktiviert bleibenden Schalters vorsieht, wobei der neu aktivierte Schalter mit einem Motordrehmoment-Steuerungstastgrad impulsbreitenmoduliert ist

und der deaktivierte Schalter mit Impulsen, die synchron mit jenen des neu aktivierten Schalters initiiert sind, jedoch mit einem ausgehend von dem Drehmoment-Steuerungstastgrad abnehmenden Tastgrad, impulsbreitenmoduliert ist.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, ferner dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerung Mittel (**901**, **902**, **903**, **706**) zum exponentiellen Absenken des Tastgrads des deaktivierten Schalters besitzt.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Fig. 2

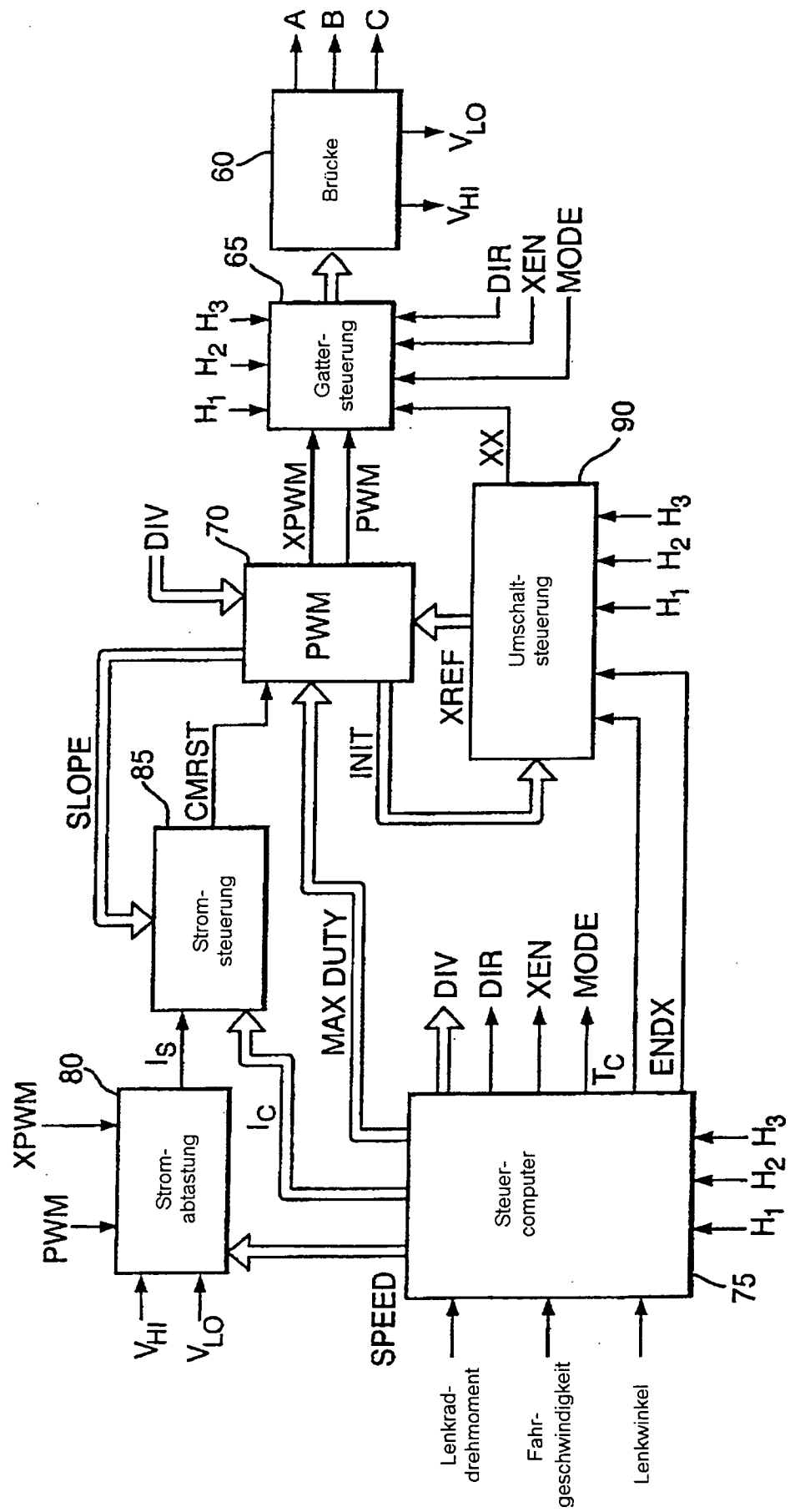


Fig. 3

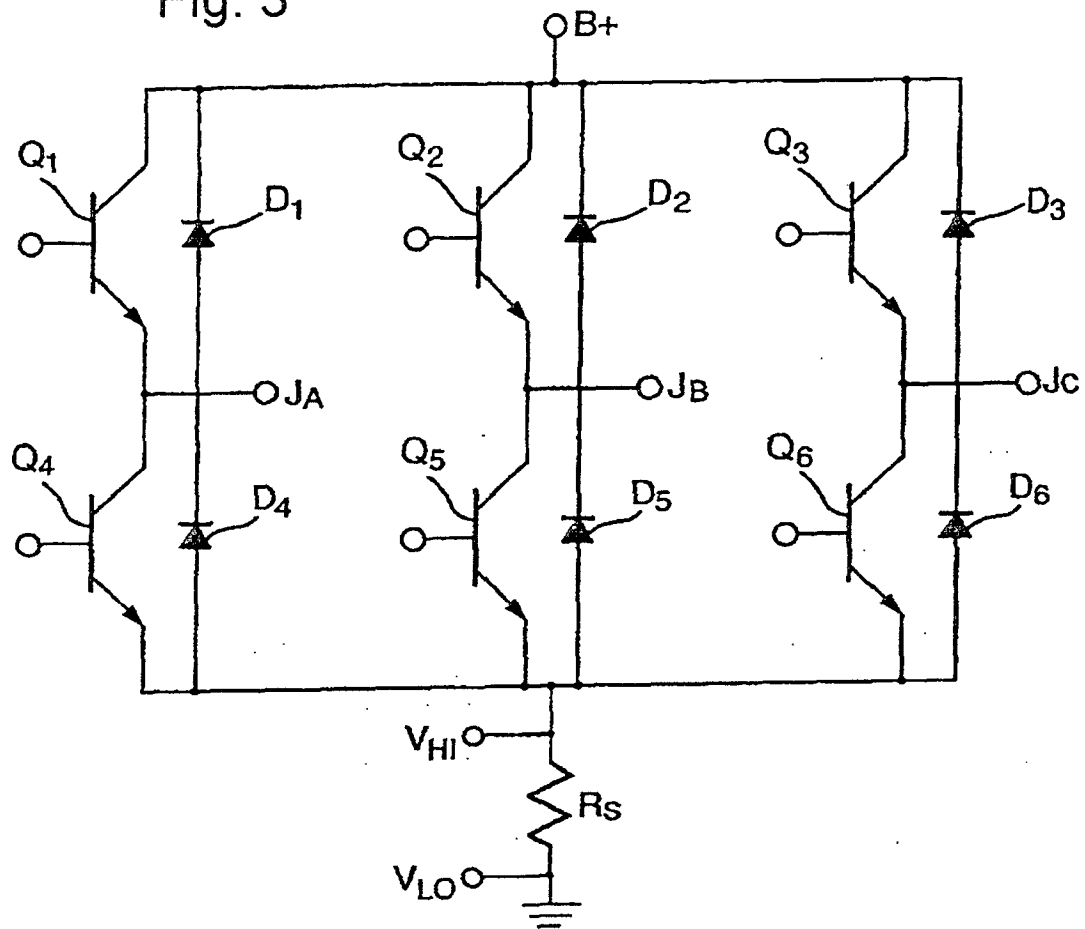
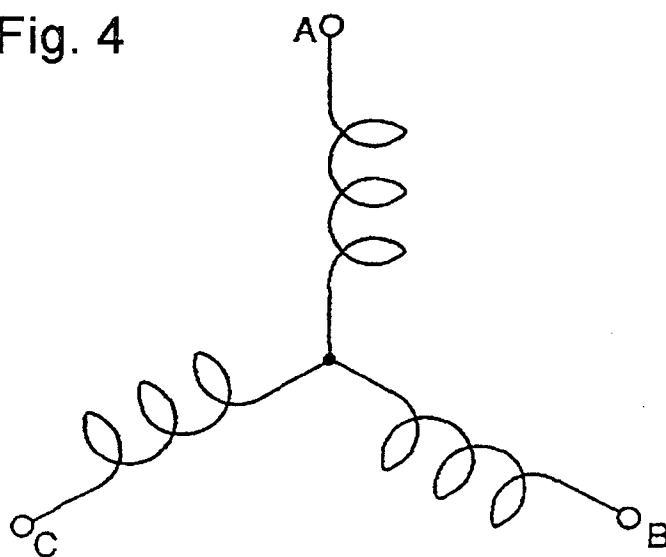


Fig. 4



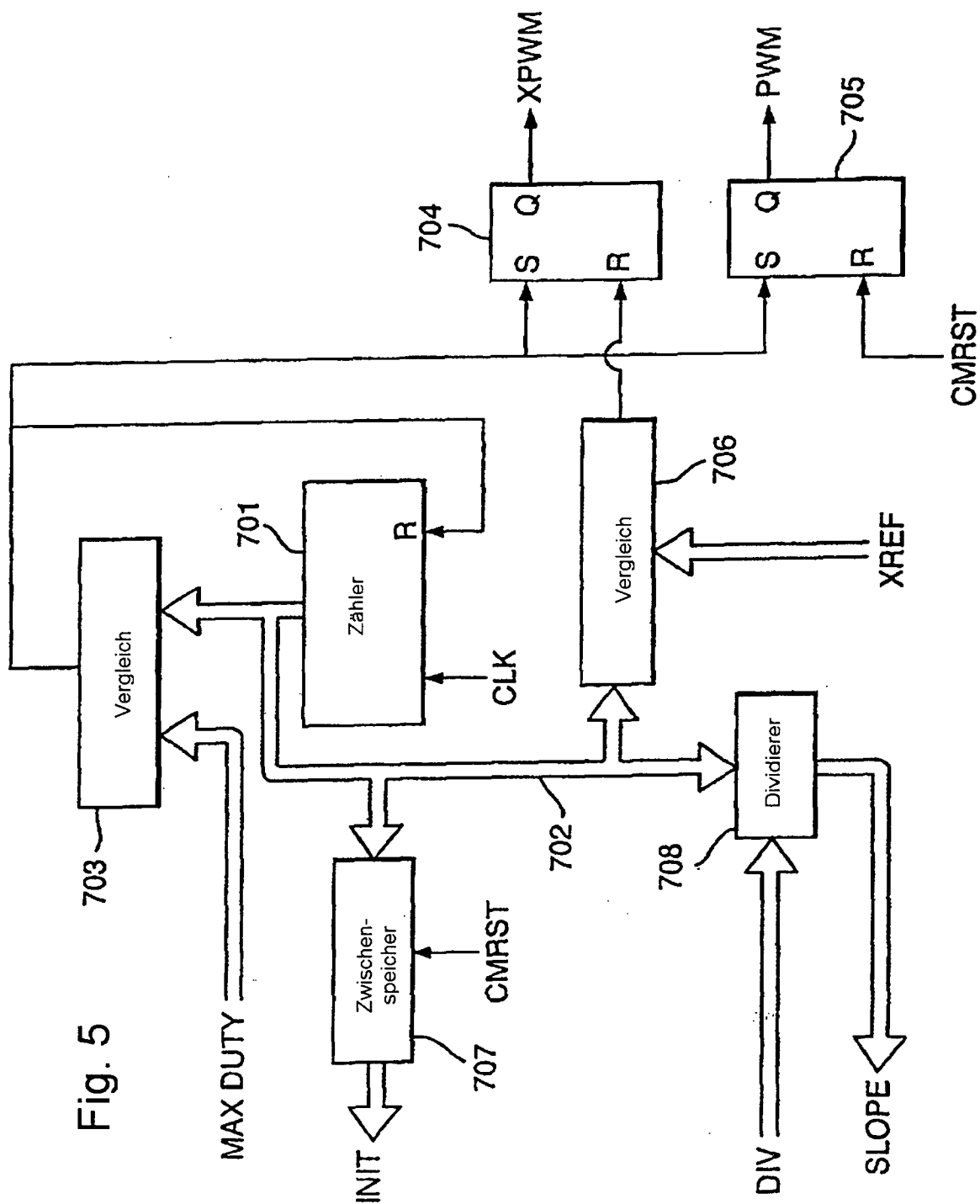


Fig. 6

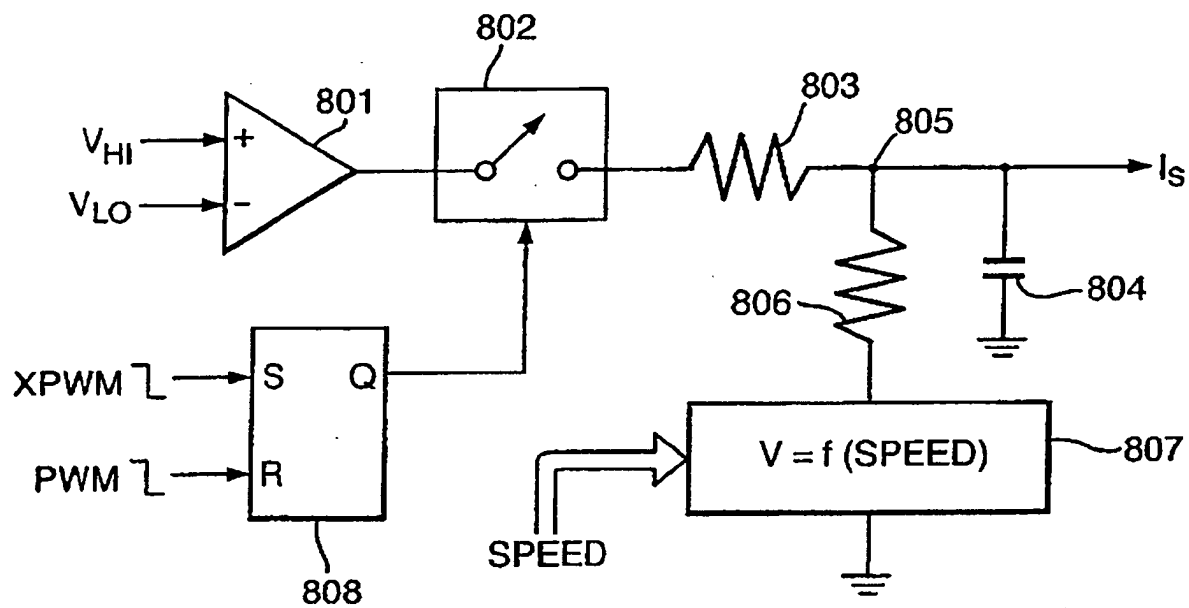


Fig. 7

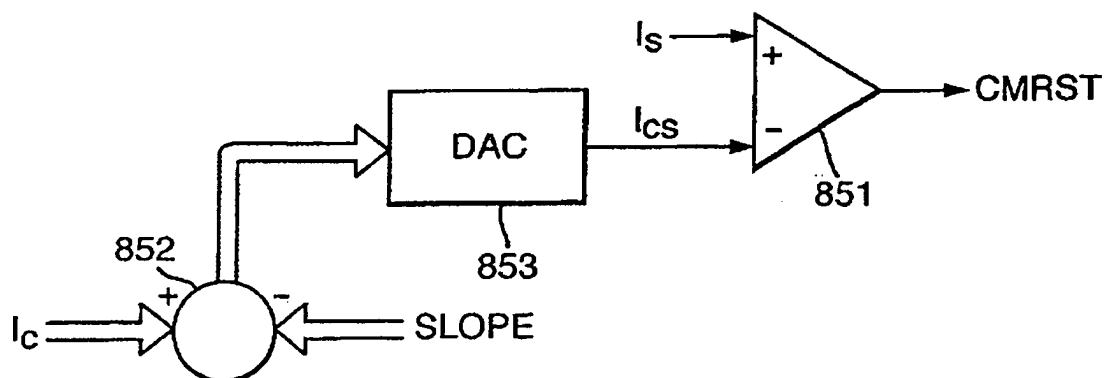


Fig. 8

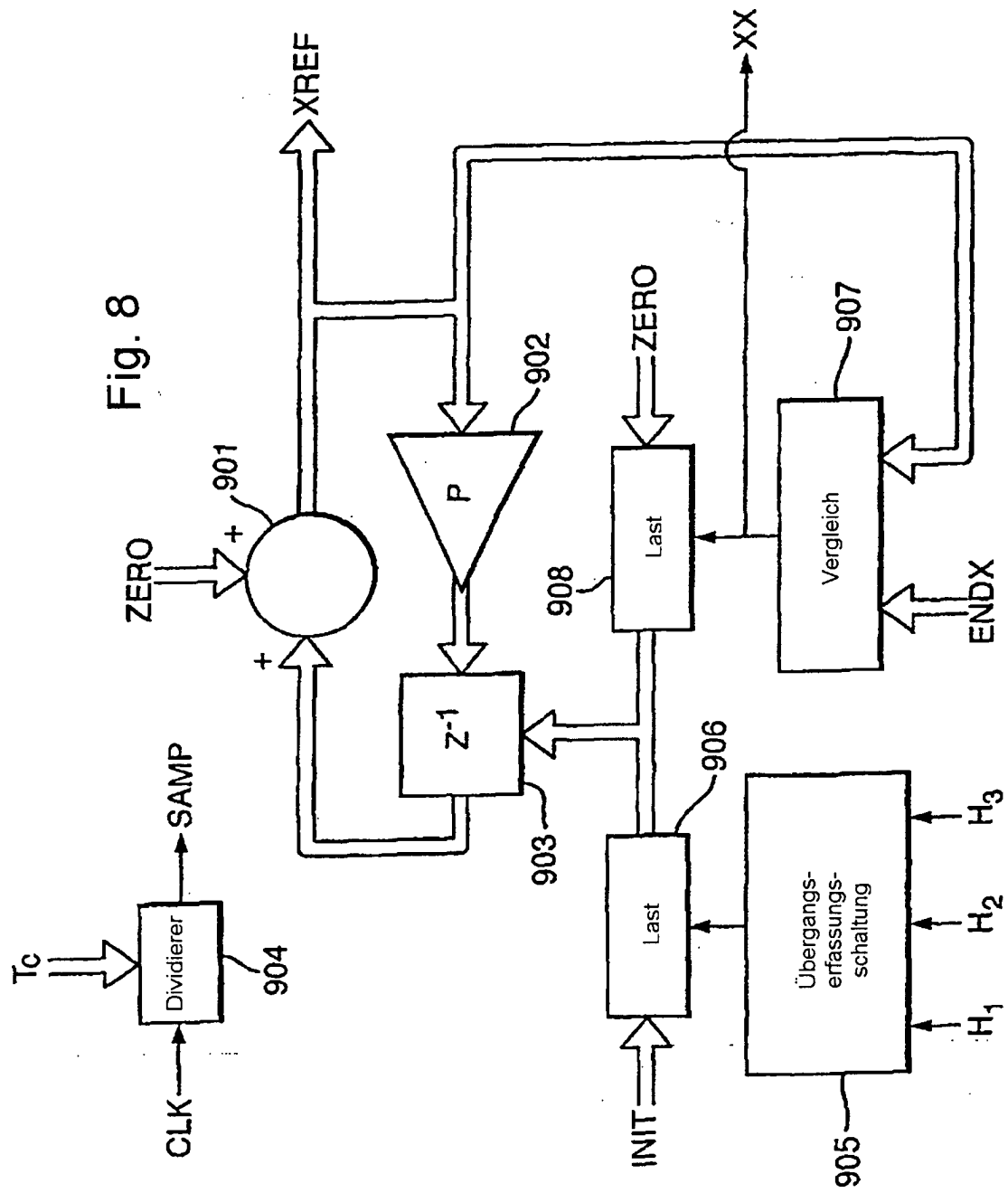


Fig. 9

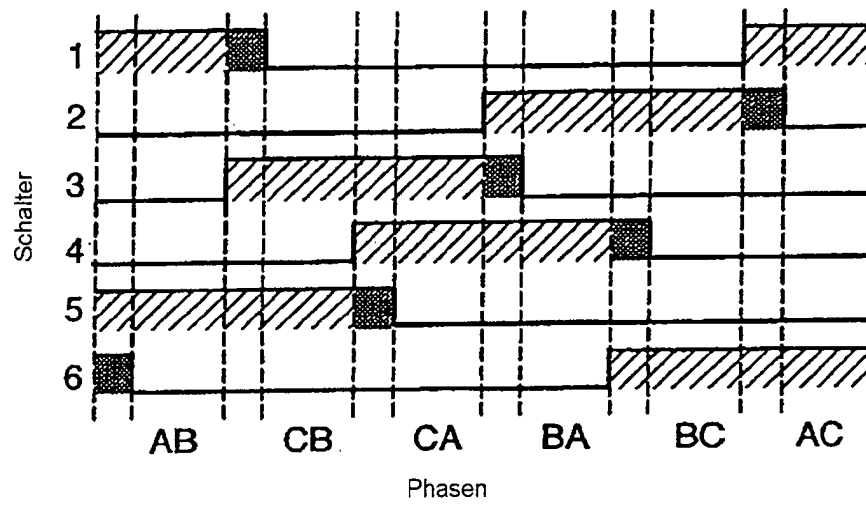


Fig. 10

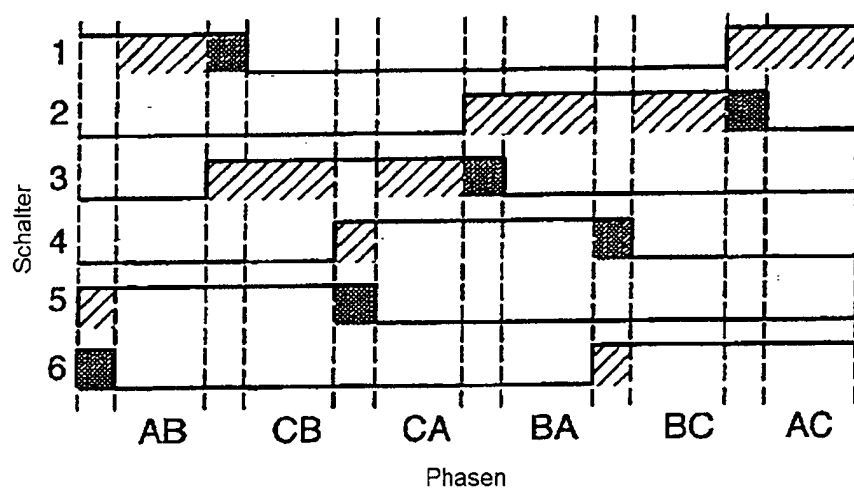


Fig. 11

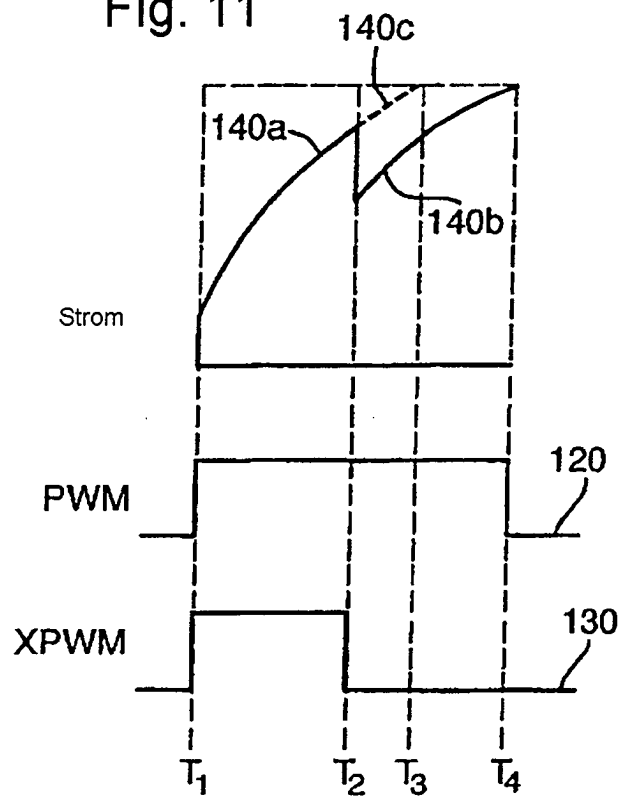


Fig. 12

