



(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 009 563.2**

(22) Anmeldetag: **27.01.2011**

(43) Offenlegungstag: **04.08.2011**

(51) Int Cl.: **H02P 6/08 (2006.01)**

(66) Innere Priorität:

10 2010 006 337.1 30.01.2010

(72) Erfinder:

Hirt, Markus, 78052, Villingen-Schwenningen, DE

(71) Anmelder:

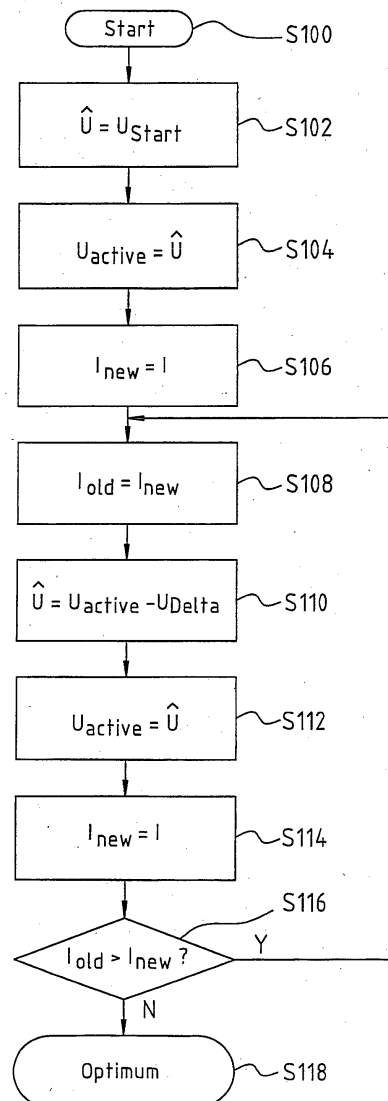
**ebm-papst St. Georgen GmbH & Co. KG, 78112,
St. Georgen, DE**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Verbesserung des Wirkungsgrades bei einem mehrphasigen Motor, und Motor zur Durchführung eines solchen Verfahrens**

(57) Zusammenfassung: Ein Elektromotor hat einen permanentmagnetischen Rotor (46) und eine Vorrichtung zur Erzeugung eines dreiphasigen sinusförmigen Stromes (i_{202} , i_{204} , i_{206}) zur Stromversorgung dieses Motors (40), ferner einen Mikroprozessor (95) zur Ausführung folgender Schritte:

Während der Motor (40) bei einer Last läuft, die von einem vorgegebenen Wert wenig oder gar nicht abweicht, wird er zunächst bei einer vorgegebenen Betriebsspannung (\hat{U}) betrieben, und eine Amplitude eines zum Motor fließenden Stromes wird gemessen und gespeichert (S106, S108). Danach wird die Amplitude der dem Motor zugeführten Spannung reduziert (S110). Darauf folgend wird erneut eine Amplitude des zum Motor (40) fließenden Stromes gemessen, und diese Amplitude wird mit der zuvor gespeicherten Amplitude verglichen (S116). Falls dabei festgestellt wird, dass der zum Motor fließende Strom durch die Reduzierung der Spannungsamplitude nicht abgenommen hat, wird der Motor (40) bei diesem Strom betrieben. Falls aber festgestellt wird, dass der zum Motor fließende Strom als Folge der Reduzierung der dem Motor (40) zugeführten Spannung abgenommen hat, werden die Messungen und der Vergleich, ggf. mehrfach, wiederholt, um Werte für einen optimierten Wirkungsgrad zu erhalten.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Verbesserung des Wirkungsgrades bei einem mehrphasigen Motor, und sie betrifft einen Motor zur Durchführung eines solchen Verfahrens. Beim Motor handelt es sich bevorzugt um einen permanentmagnetisch erregten Drehstrom-Synchronmotor (PMSM).

[0002] Beim Betrieb eines elektronisch kommutierten Motors ist ein guter Wirkungsgrad bei niedrigem Hardwareaufwand wünschenswert.

[0003] Der Wirkungsgrad eines Motors ist definiert durch

$$\text{Wirkungsgrad} = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} \quad (1)$$

[0004] Wenn der Wirkungsgrad sein Maximum hat, muss folglich der Quotient $P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ sein Maximum haben.

[0005] Hierbei sind

$$P_{\text{in}} = U \cdot I = \text{aufgenommene elektrische Leistung des Motors} \quad (2)$$

$$P_{\text{out}} = T \cdot n = \text{abgegebene mechanische Wellenleistung} \quad (3)$$

[0006] Hierbei sind

U = Spannung

I = Strom

T = Drehmoment

n = Drehzahl.

[0007] Bei konstantem Lastmoment $T = \text{constant}$ und konstanter Drehzahl $n = \text{constant}$, also bei einem Zustand konstanter Last, wie er z. B. bei einem Lüfter im Dauerbetrieb gegeben ist, ist die variable Komponente in Gleichung (1) die zugeführte Leistung $P_{\text{in}} = U \cdot I$.

[0008] Im Normalfall ist die Spannung \hat{U} konstant, und folglich ist der Strom I die zu regelnde Größe.

[0009] Die Definition des sogenannten Luftspaltmoments ist

$$T_{\text{Mi}}(t) = C_{\text{M}} \cdot \Psi(t) \cdot I(t) \quad (4)$$

[0010] Hierbei sind

T_{Mi} = inneres Moment oder Luftspaltmoment des Motors

C_{M} = Maschinenkonstante

Ψ = verketteter Fluss

I = Strom zum Stator, z. B. Strom in einer Phase, oder Gesamtstrom zum Stator, wie nachfolgend erläutert

[0011] Aus der Forderung, dass der Verlauf von T_{Mi} gleichmäßig oder „glatt“ sein sollte, ergibt sich die Forderung, dass sowohl der verkettete Fluss Ψ wie auch der Strom I sinusförmig sein sollten. Daraus resultiert die Forderung, die Phasenlage zwischen Strom I und Fluss Ψ so zu bestimmen, dass man ein maximales Drehmoment T_{Mi} erhält.

[0012] Sind bei einem dreiphasigen Synchronmotor der Statorfluss Ψ und der Statorstrom I parallele Vektoren, so ist das Drehmoment T, das vom Motor erzeugt wird, gleich Null. Steht dagegen der Raumvektor rechtwinklig zum Statorstrom, so entsteht ein maximales Drehmoment. Das ist ähnlich wie bei einem Gleichstrommotor.

[0013] Um diesen rechten Winkel durch einen Regelvorgang zu erzeugen, ist ein Regelkreis mit Rückkopplung zur Maschine erforderlich, welcher die Lage des Rotors angibt. Diese Rückkopplung wurde bei Synchronmaschinen oft mit drei Hallsensoren realisiert. Heute werden meistens Encoder (Resolver), optische Inkremental- und Absolutwertgeber, oder induktive Geber eingesetzt. Sensorlose Regelungen können bei Blockkommutierung durch das Messen der im Motor induzierten Gegen-EMK realisiert werden.

[0014] Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, mit Hilfe der feldorientierten Regelung FOR einen dreiphasigen Synchronmotor mit gutem Wirkungsgrad zu betreiben. Dabei werden, wie in [Fig. 8](#) dargestellt, die Rotorposition und somit die Phasenlage des Flusses entweder über einen Rotorstellungssensor oder durch sensorlose Verfahren, z. B. sogenannten Beobachterentwurf, bestimmt.

[0015] Die gemessenen Phasenströme werden bei der feldorientierten Regelung (FOR) durch Matrizenoperationen (Park-Clarke-Transformation bzw. inverse Park-Clarke-Transformation) in die beiden Komponenten feldbildender Teil i_d und momentbildender Teil i_q zerlegt. Durch diese Art der Aufteilung in Komponenten ist es bei der FOR möglich, die feldbildende Größe i_d unabhängig von der momentbildenden Größe i_q zu verändern bzw. zu regeln. Die feldbildende Größe ist an der Stelle des maximalen Wirkungsgrades gleich Null. Hieraus ergibt sich ein Spezialfall, der auf einfache Weise realisiert werden kann, ohne dass hierzu aufwändige Matrizenoperationen durchgeführt werden müssten, d. h. bei diesem Spezialfall kommt man ohne FOR aus.

[0016] Da Matrizenoperationen nicht erforderlich sind, kann ein einfacher Mikroprozessor verwendet werden, während sonst für die FOR teure Mikroprozessoren mit DSP (digitalem Signalprozessor) benötigt werden.

[0017] In diesem Fall kann man durch einen kurzen Messvorgang die Phasenlage zwischen dem Fluss Ψ und dem Motorstrom I bestimmen, bei welcher sich das maximale Drehmoment T ergibt. Es gilt:

$$F(x) = \int_0^{\pi} \sin(x) * \sin(x + \alpha) = \frac{\cos(\alpha) * \pi}{2} = \max.$$

[0018] Hierbei sind:

x = Drehwinkel des Rotors, gewöhnlich gemessen in rad

α = Phasenunterschied zwischen dem Strom I und dem Fluss Ψ , vgl. [Fig. 1](#)

1. Notwendig:

$$f'(\alpha) = \frac{d}{d(\alpha)} \frac{\cos(\alpha) * \pi}{2} = 0 \Rightarrow \frac{-\sin(\alpha) * \pi}{2} = 0 \Rightarrow \alpha = 0$$

2. Hinreichend:

$$f''(\alpha) = \frac{d}{d(\alpha)} \frac{-\sin(\alpha) * \pi}{2} > 0 \text{ bei } \alpha = 0 \Rightarrow f''(0) = \frac{\cos(0) * \pi}{2} = \frac{\pi}{2}$$

[0019] Aus dieser Berechnung ergibt sich die Forderung für einen sinusförmigen Strom, dass dieser phasengleich mit dem verketteten Fluss Ψ sein muss, damit der Wirkungsgrad optimal wird.

[0020] Dies ist in [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) dargestellt. Bei **20** ist die Überlappung zwischen einem Phasenstrom, z. B. i_U , und der Größe Ψ dargestellt. Man sieht, dass die Fläche **20** ihr Maximum erreicht, wenn Ψ und i_U phasengleich sind.

[0021] Wenn der Fluss Ψ und der Strom I von der Sinusform abweichen, ergibt sich aus [Fig. 1](#) ebenfalls die Forderung nach Phasengleichheit, um einen verbesserten Wirkungsgrad zu erhalten.

[0022] Es ist deshalb eine Aufgabe der Erfindung, ein neues Verfahren zum Betrieb eines PMSM, und einen neuen PMSM, bereit zu stellen.

- [0023] Nach der Erfindung wird diese Aufgabe gelöst durch ein Verfahren nach Anspruch 1 und einen Motor nach Anspruch 2.
- [0024] Weitere Einzelheiten und vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den im Folgenden beschriebenen und in der Zeichnung dargestellten, in keiner Weise als Einschränkung der Erfindung zu verstehenden Ausführungsbeispielen, sowie aus den Unteransprüchen. Es zeigt:
- [0025] [Fig. 1](#) die Phasenrelationen zwischen dem verketteten Fluss Ψ (entspricht etwa der Motorspannung U) und dem Strom i_U in der Statorphase U eines PMSM, wobei eine Phasenverschiebung α vorhanden ist, die einem optimalen Wirkungsgrad entgegenwirkt,
- [0026] [Fig. 2](#) eine Phasenrelation bei optimiertem Wirkungsgrad; hier sind Fluss Ψ und Strangstrom i_U in Phase, und der Wirkungsgrad ist im Bereich seines Optimums,
- [0027] [Fig. 3](#) den Aufbau einer Schaltung zur automatischen Optimierung des Wirkungsgrads für einen PMSM,
- [0028] [Fig. 4](#) eine Darstellung des Motors **40** mit Dreieckschaltung der Statorwicklung **44**,
- [0029] [Fig. 5](#) einen Algorithmus zur Ermittlung von elektrischen Werten zur Erzielung eines optimierten Wirkungsgrades des PMSM,
- [0030] [Fig. 6](#) den schematischen Aufbau eines permanentmagnetisch erregten dreiphasigen Motors,
- [0031] [Fig. 7](#) ein Schaubild, welches die Erzeugung eines Drehstromsystems erläutert,
- [0032] [Fig. 8](#) eine Darstellung der Digitalisierung einer sinusförmigen Spannung, und
- [0033] [Fig. 9](#) die Darstellung einer Anordnung nach dem Stand der Technik.
- [0034] [Fig. 3](#) zeigt ein Ausführungsbeispiel eines permanentmagnetisch erregten, mehrphasigen Synchronmotors **40**, der im Betrieb über einen Wechselrichter **42** mit einer mehrphasigen Wechselspannung gespeist wird. Dargestellt ist ein dreiphasiger Motor **40** mit einer Statorwicklung **44** in Sternschaltung. Alternativ ist eine Dreieckschaltung möglich, vgl. [Fig. 4](#). Andere Phasenzahlen sind ebenfalls möglich. Der Motor **40** hat einen symbolisch dargestellten permanentmagnetischen Rotor **46**, der zweipolig dargestellt ist, aber naturgemäß 4, 6, 8, 10 etc. Pole haben kann. Dieser Rotor **46** hat bevorzugt eine sinusförmige Magnetisierung, da sich dann bei Verwendung sinusförmiger Statorströme ein weitgehend konstantes Drehmoment des Motors **40** ergibt
- [0035] In [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) ist jeweils der Strangstrom i_U dargestellt, und dieser ist deshalb auch in [Fig. 3](#) eingezeichnet. Die Bauart der Motors **40** ist beliebig, z. B. Innenläufer, Außenläufer, Motor mit ebenem Luftspalt, etc.
- [0036] Der Motor **40** dient z. B. zum Antrieb eines Lüfters **48**, der im Betrieb eine weitgehend konstante Last darstellt und der z. B. dazu dient, ein elektronisches Gerät zu kühlen, z. B. einen Computer. Eine andere Anwendung ist z. B. der Antrieb einer Pumpe zur Flüssigkeitskühlung eines Prozessors, wo ebenfalls die Last weitgehend konstant ist.
- [0037] Beim Ausführungsbeispiel wird ein Gleichstrom-Zwischenkreis **50** verwendet. Dieser kann z. B. an die Amtsbatterie eines Telefonamts angeschlossen sein. Dargestellt ist die Speisung des Zwischenkreises **50** über einen Gleichrichter **52** aus einem Wechselstromnetz **54**.
- [0038] Der Strom I im Zwischenkreis **50** wird an einem Messorgan **56** gemessen, z. B. einem Messwiderstand oder einem Stromwandler, vgl. [Fig. 3](#).
- [0039] Ein FOR-Bauteil **42** erhält an seinem Eingang **60** eine (variable) Spannung U . Die Amplitude \hat{U} dieser Spannung wird während der Optimierung des Wirkungsgrads stufenweise verändert. Außerdem erhält das Bauteil **42** an seinem Eingang **62** einen Winkel β , der die Geschwindigkeit des im Motor **40** erzeugten Drehfelds vorgibt. Als Synchronmotor benötigt der Motor **40** an sich keinen Rotorstellungsgeber, doch kann ein solcher notwendig sein, um ständig feststellen zu können, ob sich der Rotor **46** im Betrieb dreht, oder ob er durch Überschreiten seines Kippmoments zum Stillstand gekommen ist. Das FOR-Bauteil **42** steuert einen Dreiphasen-Wechselrichter **43**, an den die Wicklung **44** des Motors **40** angeschlossen ist.

[0040] Der Motor **40** hat zur Festlegung der Frequenz des von den Bauteilen **42**, **43** erzeugten Drehfelds einen Drehzahlsteller **70**. Das Ausgangssignal des Stellers **70** wird einem Summierer **72** zugeführt, welcher eine Drehzahlrampe von der Drehzahl Null bis zur Drehzahl n bewirkt, also einen langsamen Anstieg der Drehzahl. Das Ausgangssignal des Summierers **72** wird einem Integrator **74** zugeführt, welcher die Rampenfunktion erzeugt und dessen Ausgangssignal einem negativen Eingang des Summierers **72** zugeführt wird.

[0041] Der Motor hat einen Schalter **78** mit zwei Schaltstellungen „1” und „2”. Die Schaltstellung „1” wird verwendet:

- a) beim Hochlaufen des Motors, also beim Beschleunigen
und
- b) bei Drehzahländerungen.

[0042] Diese Schaltstellung „1” wird auch als „gestellter” Betrieb bezeichnet, weil der Motor auf bestimmte Betriebsdaten eingestellt ist.

[0043] Die Schaltstellung „2” bedeutet Suchfunktion und wird eingestellt, wenn der Wirkungsgrad durch eine Suchfunktion optimiert werden soll, vgl. die [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#).

[0044] Am Ausgang des Integrators **74** erhält man ein Signal für die Drehzahl n , welches einem Glied **76** zugeführt wird, das einen drehzahlabhängigen Faktor P erzeugt. Dieser bestimmt die Spannungsamplitude nach der Formel

$$\hat{U} = n \cdot P \quad (5)$$

d. h. mit steigender Drehzahl nimmt die Spannungsamplitude \hat{U} zu. Diese wird im „gestellten” Betrieb über den Schalter **78** (Schaltstellung 1) dem Eingang **60** des Wechselrichters **42** zugeführt, wodurch dieser in einem optimalen Betriebspunkt arbeitet.

[0045] Die Stellung „2” des Schalters **78** wird eingestellt wenn der Wirkungsgrad durch eine Suchfunktion optimiert werden soll. In dieser Stellung ist der Anschluss **60** verbunden mit einem Summierglied **80**, das dazu dient, die Amplitude \hat{U} zu berechnen, wenn das Suchverfahren für den optimalen Wirkungsgrad aktiviert ist.

[0046] Einem positiven Eingang des Summierglieds **80** wird das Signal $n \cdot P$ (Gleichung 5) zugeführt. Einem negativen Eingang wird über einen Schalter **82** das Signal „Null” zugeführt, wenn sich der Schalter **78** in Stellung „1” befindet. In der Stellung „2” (Suchbetrieb) wird ihm das Signal „1” zugeführt. Einem anderen negativen Eingang des Summierglieds **80** wird das Ausgangssignal eines Integrators **84** zugeführt. Dieser bewirkt eine Amplitudenreduktion im Dauerbetrieb.

[0047] Dem Eingang des Integrators **84** wird das Ausgangssignal eines Multiplikators **86** zugeführt. Dieser dient zur Erzeugung einer Amplituden-Reduktionsrampe. Diese erzeugt einen Wert von 0-drehzahlabhängige Reduktion, oder 1-drehzahlabhängige Reduktion.

[0048] Dem einen Eingang des Multiplikators **86** wird von einem Geber **88**, dessen Eingang die Drehzahl n zugeführt wird, ein drehzahlabhängiger Faktor P für die Reduktion der Amplitude \hat{U} zugeführt.

[0049] Dem anderen Eingang des Multiplikators **86** wird das Ausgangssignal eines Entscheidungsglieds **90** zugeführt, welches entscheidet zwischen dem Kriterium „größer als” ($>$), und dem Kriterium „kleiner/gleich” (\leq).

[0050] Dem Eingang des Entscheidungsglieds **90** wird das Ausgangssignal eines Differenzglieds **92** zugeführt, welches dazu dient, die Differenz zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen des Stromes I festzustellen. Im Verlauf der Suchfunktion ändert nämlich der Strom I seine Amplitude, bis er ein Minimum erreicht hat und nach Erreichen dieses Minimums steigt der Strom I wieder an.

[0051] Ein Integrator **94** integriert den Drehzahlwert n und erzeugt an seinem Ausgang den Winkelwert β , der dem Eingang **62** des Wechselrichters **42** zugeführt wird.

[0052] Die Bauteile der [Fig. 3](#), die von einer strichpunktieren Linie **95** umgeben sind, sind Bestandteile eines Mikroprozessors **95**. Beim Ausführungsbeispiel wurde ein 8-Bit-Mikrocontroller verwendet, der drei PWM-Generatoren zur Erzeugung der drei Phasenströme hat und der zur Erzeugung der drei Sinusspannungen des dreiphasigen Systems drei Sinusgeber hat. Dies wird bei [Fig. 6](#) beschrieben. Ein geeigneter Typ ist z. B. PIC 16F 1938 von der Firma Microchip.

Arbeitsweise

[0053] Beim Anlauf des Motors **40** wird vom Wechselrichter **42, 43** ein Spannungs-Drehfeld erzeugt. Dieses hat eine Amplitudengröße, die ausreichend groß ist, damit ein Drehmoment erzeugt wird, das für den Start des Motors **40** ausreicht.

[0054] Bei laufendem Motor **40** wird nun die Spannungsamplitude \hat{U} des auszugebenden Drehfeldes stufenweise verkleinert. Dadurch verringert sich zunächst die Stromamplitude. Sie erreicht ihr Minimum an der Stelle des optimalen Wirkungsgrades.

[0055] Hierbei sollte die Last am Motor möglichst konstant sein.

[0056] Nach Erreichen des optimalen Wirkungsgrades wird die Spannungsamplitude \hat{U} auf dem erreichten Wert gehalten, solange keine Stromerhöhung (über einen vorgegebenen Schwellwert hinaus) auftritt. Tritt eine solche Stromerhöhung auf, so ist sie Folge eines Lastwechsels, und es stellt sich dann ein neuer Betriebspunkt ein, d. h. die beschriebene Suchfunktion wird wiederholt.

[0057] Bei der vorliegenden Erfindung wird also die Eigenschaft genutzt, dass an der Stelle des optimalen Wirkungsgrades die Amplitude des Stromes I zu einem Minimum wird. Anders gesagt bedeutet das, dass zur Erreichung desselben Betriebszustandes bei einer anderen Lage (Winkel α in [Fig. 1](#)) des Stromes I relativ zum Fluss Ψ dieser Betriebszustand nur durch eine betragsmäßig höhere Stromamplitude zu erreichen wäre, also mit einem schlechteren Wirkungsgrad. Als Stromwert kann dabei entweder ein Phasenstrom verwendet werden, z. B. i_U , oder der zum Motor **40** fließende Gesamtstrom I , oder bei [Fig. 4](#) der Strom durch den Widerstand **56**, also der Strom durch den Halbleiterschalter **52**.

[0058] Als Vorteile sind u. a. zu nennen:

- Das Verfahren kann mit einem preiswerten Mikroprozessor **95** implementiert werden.
- Das Verfahren benötigt keine motorspezifischen Parameter und kann somit bei allen Motoren dieser Art verwendet werden. (Im Gegensatz dazu benötigen sensorlose Verfahren zur Flussbestimmung motorspezifische Kenngrößen.)
- Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchtigkeit) und Fertigungstoleranzen haben keinen Einfluss. Dies steht im Gegensatz zu sensorlosen Verfahren zur Bestimmung der Rotorstellung, bei denen sich die motorspezifischen Parameter durch die Einflüsse der Temperatur und durch Fertigungstoleranzen verändern können. (Solche Einflüsse können zu einem Fehler bei der Schätzung des Flusses und bei der Bestimmung des Regler-Sollwertes führen.)

[0059] [Fig. 5](#) zeigt schematisch den Ablauf einer Iteration S100, mit der der Motor **40** auf einen optimalen Arbeitspunkt für die augenblickliche Last eingestellt wird.

[0060] Bei S102 wird, im Bauteil **70** der [Fig. 3](#), eine Spannungsamplitude $\hat{U} = U_{\text{Start}}$ eingestellt, vgl. [Fig. 1](#), und bei S104 wird diese im Augenblick aktive Spannungsamplitude \hat{U} gespeichert, also $U_{\text{active}} = \hat{U}$, damit bei der nächsten Iteration der dann verwendete Spannungswert \hat{U} erneut gespeichert werden kann.

[0061] Bei S106 wird der Strom I_{new} gemessen und gespeichert, der sich bei dieser Spannungsamplitude \hat{U} ergibt, also $I_{\text{new}} = I$. Der gemessene Strom kann entweder der Strom in einem Strang des Motors **40** sein, z. B. in [Fig. 3](#) der Strom i_U im Strang U, oder aber der Gesamtstrom I , der in [Fig. 3](#) an einem Messwiderstand **66** gemessen wird. Bei der letzteren Variante sind naturgemäß die Verluste etwas höher, d. h. man erhält einen etwas niedrigeren Wirkungsgrad. Ebenso eignet sich der Strom im Widerstand **56** der [Fig. 4](#).

[0062] Bei S108 wird dieser Strom I_{new} in ein Register I_{old} kopiert, also $I_{\text{old}} = I_{\text{new}}$, damit anschließend im Register I_{new} der nächste Stromwert gespeichert werden kann, der im Verlauf der Iteration gemessen wird.

[0063] In S110 wird die verwendete Spannungsamplitude um einen vorgegebenen Wert U_{Delta} reduziert, also

$$\hat{U} = U_{\text{active}} - U_{\text{Delta}} \quad (6)$$

[0064] Diese neue Spannungsamplitude \hat{U} wird bei S112 im Register für den Wert \hat{U} gespeichert, also $U_{\text{active}} = \hat{U}$.

[0065] Bei dieser reduzierten Spannungsamplitude ergibt sich ein neuer Wert für den Strom I_{new} , der entweder so groß sein kann wie der vorhergehende Stromwert I_{old} , oder kleiner oder größer als dieser Wert. Dieser neue Stromwert I_{new} wird in S114 gemessen und im Register I_{new} gespeichert.

[0066] Anschließend wird im Schritt S116 geprüft, ob I_{old} größer war als I_{new} , d. h. ob man sich dem optimalen Stromwert genähert hat, oder ob die Werte gleich groß geblieben sind, oder ob I_{old} kleiner ist als I_{new} , was bedeuten würde, dass man sich vom Optimum wieder entfernt.

[0067] Falls in S116 die Antwort Ja lautet, ist die Optimierung noch nicht abgeschlossen, und die Routine geht zurück zu S108, d. h. der in S114 gemessene Strom I_{new} wird in das Register I_{old} kopiert, und die Schritte S110, S112, S114 und S116 werden wiederholt.

[0068] Dabei erreicht man schließlich einen Zustand, wo I_{old} nicht mehr größer ist als I_{new} , sondern entweder gleich groß oder sogar kleiner. In diesem Fall lautet in S116 die Antwort Nein, d. h. der Bereich des Optimums (für die augenblickliche Last des Motors **40**) ist gefunden, und die Routine kommt bei S118 zu ihrem Ende, weil der optimale Bereich ermittelt wurde. Der Motor **40** läuft dann mit dieser Spannung U_{active} aus S112, bis sich ggf. die Last ändert.

[0069] Bei Laständerungen geht die Routine zurück zum Schritt S102, und die gesamte Iteration beginnt von neuem, d. h. der Motor **40** sucht dann für die neue Last eine neue optimierte Spannung \hat{U} , bei welcher der Motorstrom (oder der Strangstrom) zu einem Minimum wird.

[0070] [Fig. 6](#) zeigt rechts den Motor **40**, dessen Stator drei Phasen **202**, **204**, **206** hat. Der Motor **40** hat den permanentmagnetischen Rotor **46**, der als vierpoliger Rotor dargestellt ist. Seine Pole sind sinusförmig magnetisiert. Ein Beispiel eines solchen Rotors mit sinusförmiger Magnetisierung ist der Rotor gemäß der DE 100 20 946 A1.

[0071] Die drei Phasen **202**, **204**, **206** werden mit Drehstrom versorgt, der im Motor erzeugt wird, wobei der Motor automatisch auf einen guten Wirkungsgrad eingestellt wird.

[0072] Hierzu erzeugt der μC 95 drei Sinussignale, nämlich

$$\begin{aligned} &\sin t \\ &\sin(t + 120^\circ) \\ &\sin(t + 240^\circ) \end{aligned}$$

[0073] Die Frequenz dieser drei Signale ist am μC 95 durch ein Signal **250** einstellbar. Da diese Frequenz die Geschwindigkeit des Drehfelds und damit die Drehzahl des Rotors **40** bestimmt, ist eine Drehzahlmessung nicht erforderlich, es sei denn, man wünscht eine separate Drehzahlüberwachung des Motors **40**, z. B. für den Fall, dass dieser sein Kippmoment überschreitet und dadurch stehen bleibt.

[0074] Die Signale $\sin t$, $\sin(t + 120^\circ)$ und $\sin(t + 240^\circ)$ werden in Komparatoren **272**, **274**, **276** mit dem Dreieckssignal u_{270} am Ausgang eines Dreiecksgenerators **268** verglichen, das den invertierenden Eingängen der drei Komparatoren **272**, **274**, **276** zugeführt wird. Dem nicht invertierenden Eingang des zugeordneten Komparators wird jeweils das zugeordnete Sinussignal vom μC 95 zugeführt, wie in [Fig. 6](#) dargestellt. Aus Ausgang der Komparatoren **272**, **274**, **276** erhält man dann die Signale PWM1, PWM2, PWM3, die in [Fig. 7](#) dargestellt sind.

[0075] Das Signal PWM1 wird einem Treiberbaustein **286** zugeführt, dessen oberer Ausgang **288** mit dem Gate eines n-Kanal-MOSFET **290** verbunden ist, dessen einer Anschluss mit der Leitung **50** verbunden ist, an welcher die Zwischenkreisspannung U_{ZK} liegt. Sein anderer Anschluss ist mit dem Strang **204** verbunden.

[0076] Der untere Ausgang **294** des Treiberbausteins **286** ist mit dem Gate eines n-Kanal-MOSFET **296** verbunden, dessen oberer Anschluss ebenfalls mit dem Strang **204** und dessen unterer Anschluss über den Messwiderstand **264** mit Masse **300** verbunden ist.

[0077] Das Signal PWM2 wird einem Treiberbaustein **304** zugeführt, dessen oberer Ausgang **306** einen oberen n-Kanal-MOSFET **308** und dessen unterer Ausgang **310** einen unteren n-Kanal-MOSFET **312** steuert. Die Schaltung entspricht derjenigen der MOSFETs **290, 296**, doch steuern die MOSFETs **308, 312** den Strang **202**.

[0078] Das Signal PWM3 wird einem Treiberbaustein **316** zugeführt, dessen oberer Ausgang **318** einen oberen n-Kanal-MOSFET **320** und dessen unterer Ausgang **322** einen unteren n-Kanal-MOSFET **324** steuert. Die Schaltung entspricht derjenigen der MOSFETs **290, 296**, doch steuern die MOSFETs **320, 324** den Strang **206**.

[0079] Wenn z. B. der MOSFET **290** und der MOSFET **324** gleichzeitig leitend sind, fließt ein Strom von der positiven Leitung **50** über den n-Kanal-MOSFET **290**, die Stränge **204, 206**, den n-Kanal-MOSFET **324** und den Messwiderstand **264** nach Masse **300**. Zu den MOSFETs, sind wie dargestellt, Freilaufdioden antiparallel geschaltet.

[0080] **Fig. 7a)** zeigt, stark schematisiert, das Signal PWM1. **Fig. 7b)** zeigt den Strom i_{204} durch die Phase **204**, der durch das Signal PWM1 verursacht wird. Es handelt sich um einen sinusförmigen Strom, der durch die Vielzahl von Umschaltvorgängen bewirkt wird, welche insgesamt bei der Drehung des Rotors **46** stattfinden.

[0081] **Fig. 7c)** zeigt das Signal PWM2 am Ausgang des Komparators **274**, und **Fig. 7d)** zeigt den Strom i_{202} durch den Strang **202**. Dieser Strom ist ebenfalls sinusförmig und gegenüber dem Strom i_{204} um 120° in der Phase versetzt.

[0082] **Fig. 7e)** zeigt das Signal PWM3 am Ausgang **282** des Komparators **276**, und **Fig. 7f)** zeigt den Strom i_{206} durch den Strang **206**. Dieser Strom ist gegenüber dem Strom i_{204} um 240° in der Phase versetzt und ebenfalls sinusförmig.

[0083] Die drei sinusförmigen Ströme i_{204} , i_{202} und i_{206} bilden zusammen ein Drehstromsystem und erzeugen ein Drehfeld, das den permanentmagnetischen Rotor **46** mit der Drehfrequenz dieses Drehfelds antreibt, wie bereits erläutert. Da die Magnetisierung des Rotors **46** sinusförmig ist, ergibt sich ein weitgehend konstantes Drehmoment, und dieses Drehmoment wird mit einem geringen Aufwand erreicht. Insbesondere sind keine komplizierten und teuren Drehwinkelsensoren erforderlich, und der Motor **40** arbeitet mit einem optimierten Wirkungsgrad.

[0084] **Fig. 8a)** zeigt in schematisierter Form das Signal u_{270} , das vom Dreiecksgenerator **268** erzeugt wird. Die Frequenz des Signals u_{270} ist hier als 20 kHz angenommen, d. h. ein Dreieck des Dreiecksignals u_{270} hat eine Periodendauer von 50 μs . Das erste Dreieck, das mit **338** bezeichnet ist, beginnt zum Zeitpunkt 0 μs , erreicht sein Maximum bei 25 μs , und wird bei 50 μs wieder zu Null. Es ist also symmetrisch und hat bevorzugt die Form eines gleichschenkligen Dreiecks. Auch ist seine Frequenz hoch in Relation zur Frequenz des Signals $\sin t$.

[0085] Solange letzteres Signal größer ist als u_{270} , ist das in **Fig. 8b)** dargestellte Signal PWM1 hoch. Wird $H1$ kleiner als u_{270} , so bekommt PWM1 den Wert niedrig (LOW). Dadurch ergibt sich das in **Fig. 8b)** dargestellte typische Bild für PWM1, wo links und rechts das Tastverhältnis hoch ist, z. B. 90%, während es in der Mitte etwa den Wert 10% hat, wodurch sich in **Fig. 8b)** ein weitgehend symmetrischer Verlauf ergibt.

[0086] Es ist darauf hinzuweisen, dass **Fig. 8** eine Vereinfachung zeigt, denn für die Dauer einer Periode des Signals $\sin t$ erhält man in der Realität über 100 Dreiecke des Signals u_{270} , was sich aber zeichnerisch nicht darstellen ließe.

[0087] Durch die symmetrische Dreiecksform der Impulse des Signals u_{270} erhält man den Vorteil, dass die PWM-Signale gemäß **Fig. 8b)** stets im Wesentlichen symmetrisch zum Maximum eines Dreiecks liegen.

[0088] Durch die Erfindung erhält man also einen einfachen Aufbau eines solchen dreiphasigen Motors **40**, wobei die Drehzahl durch das Signal am Eingang **250** (**Fig. 6**) vorgebar ist. Im Normalfall wird der Strom für den Optimierungsvorgang gemäß **Fig. 4** nur an einem einzigen Brückenweig gemessen, z. B. durch den dort dargestellten Messwiderstand **56**, so dass man einen guten Wirkungsgrad erhält.

[0089] Naturgemäß sind im Rahmen der vorliegenden Erfindung vielfache Abwandlungen und Modifikationen möglich.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 10020946 A1 [[0070](#)]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Verbesserung des Wirkungsgrades bei einem permanentmagnetisch erregten dreiphasigen Motor (40), mit folgenden Schritten:
 - a) Bei einer vorgegebenen Betriebsspannung (\hat{U}) wird der Motor (40) bei einer Last betrieben, die während der Durchführung des Verfahrens wenig oder gar nicht von einem vorgegebenen Wert abweicht;
 - b) eine Amplitude eines zum Motor (40) fließenden Stromes wird gemessen und gespeichert (S106, S108);
 - c) die Amplitude der dem Motor zugeführten Spannung (\hat{U}) wird reduziert (S110);
 - d) danach wird erneut eine Amplitude des zum Motor (40) fließenden Stromes gemessen;
 - e) die im Schritt d) gemessene neue Amplitude wird mit der im Schritt b) gespeicherten Amplitude verglichen (S116);
 - f) falls im Schritt e) festgestellt wird, dass der zum Motor (40) fließende Strom durch die Reduzierung der Spannungsamplitude (\hat{U}) nicht abgenommen hat, wird der Motor bei diesem Strom betrieben;
 - g) falls im Schritt e) festgestellt wird, dass der zum Motor (40) fließende Strom durch die Reduzierung der dem Motor zugeführten Spannung (\hat{U}) abgenommen hat, werden die Messungen und der Vergleich wiederholt, um Werte für einen optimierten Wirkungsgrad zu ermitteln.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem bei den Messungen zur Verbesserung des Wirkungsgrades der Motor (40) bei einer im Wesentlichen konstanten Last betrieben wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei welchem bei einer Laständerung das Verfahren zur Verbesserung des Wirkungsgrades wiederholt wird, um neue Werte für einen optimierten Wirkungsgrad zu ermitteln.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem der Motor zu Beginn des Verfahrens mit einer vorgegebenen Spannung (\hat{U}) betrieben wird.
5. Elektromotor (40) mit permanentmagnetischem Rotor (46) und einer Vorrichtung zur Erzeugung eines dreiphasigen sinusförmigen Stromes (i_{202} , i_{204} , i_{206}) zur Stromversorgung dieses Motors (40), und mit einem Mikroprozessor (95) zur Ausführung folgender Schritte:
Während der Motor (40) bei einer Last läuft, die von einem vorgegebenen Wert wenig oder gar nicht abweicht, wird er bei einer vorgegebenen Betriebsspannung (\hat{U}) betrieben und eine Amplitude eines zum Motor fließenden Stromes wird gemessen und gespeichert (S106, S108);
danach wird die Amplitude der dem Motor zugeführten Spannung (\hat{U}) reduziert (S110); darauffolgend wird erneut eine Amplitude des zum Motor (40) fließenden Stromes gemessen (S114);
diese neue Amplitude wird mit der zuvor gespeicherten Amplitude verglichen (S116); falls festgestellt wird, dass der zum Motor fließende Strom durch die Reduzierung der Spannungsamplitude (\hat{U}) nicht abgenommen hat, wird der Motor bei diesem Strom betrieben;
falls festgestellt wird, dass der zum Motor (40) fließende Strom durch die Reduzierung der dem Motor (40) zugeführten Spannung (\hat{U}) abgenommen hat, werden die Messungen und der Vergleich wiederholt, um Werte für einen optimierten Wirkungsgrad zu ermitteln.
6. Motor nach Anspruch 5, bei welchem bei einer Laständerung die Schritte zur Verbesserung des Wirkungsgrades wiederholt werden, und der Motor bei den ermittelten neuen Werten betrieben wird.
7. Motor nach Anspruch 5 oder 6, bei welchem ein Mikrocontroller (95) vorgesehen ist, welcher drei Geber zur Erzeugung von drei um 120° gegeneinander versetzten sinusförmigen Signalen und drei PWM-Geber (272, 274, 276) aufweist, in welchen jeweils ein sinusförmiges Signal ($\sin t$, $\sin(t + 120^\circ)$, ...) mit dem Ausgangssignal (u_{270}) eines Dreiecksgenerators (268) verglichen wird, um Steuersignale für die Ansteuerung eines Drehstrom-Wechselrichters (42, 43) zu erhalten.
8. Motor nach einem der Ansprüche 5 bis 7, bei welchem zur Drehzahlmessung ein vom Mikroprozessor (95) erzeugbares, zur Steuerung des Drehfelds im Motor (40) dienendes Signal ($\sin t$, ...) dient.
9. Motor nach einem der Ansprüche 5 bis 8, bei welchem für die Messung des Stromes (I) während der Optimierung ein Strom-Messglied (56; 264) in der Wechselrichter-Brückenschaltung des Motors (40) vorgesehen ist.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

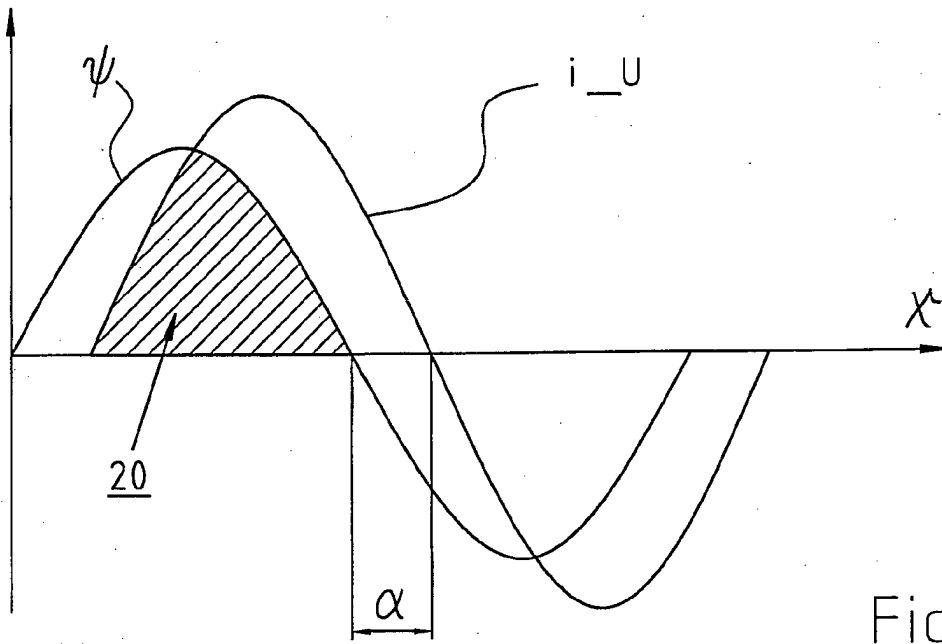


Fig. 1

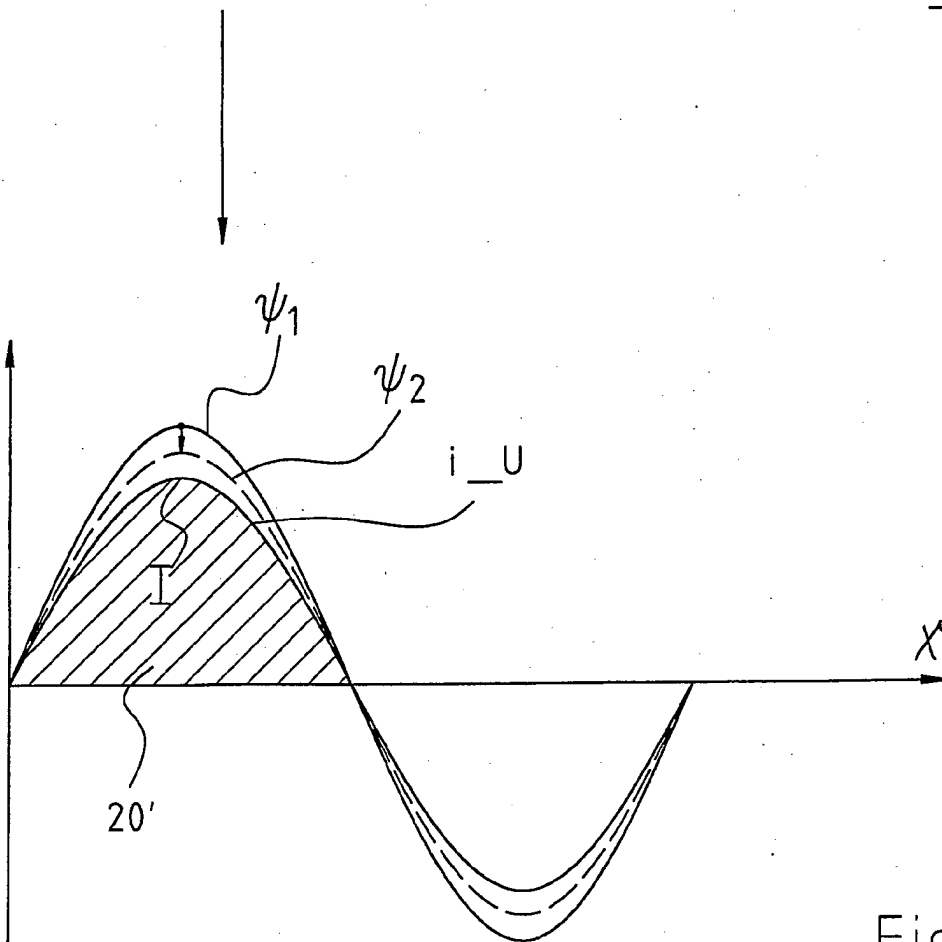


Fig. 2

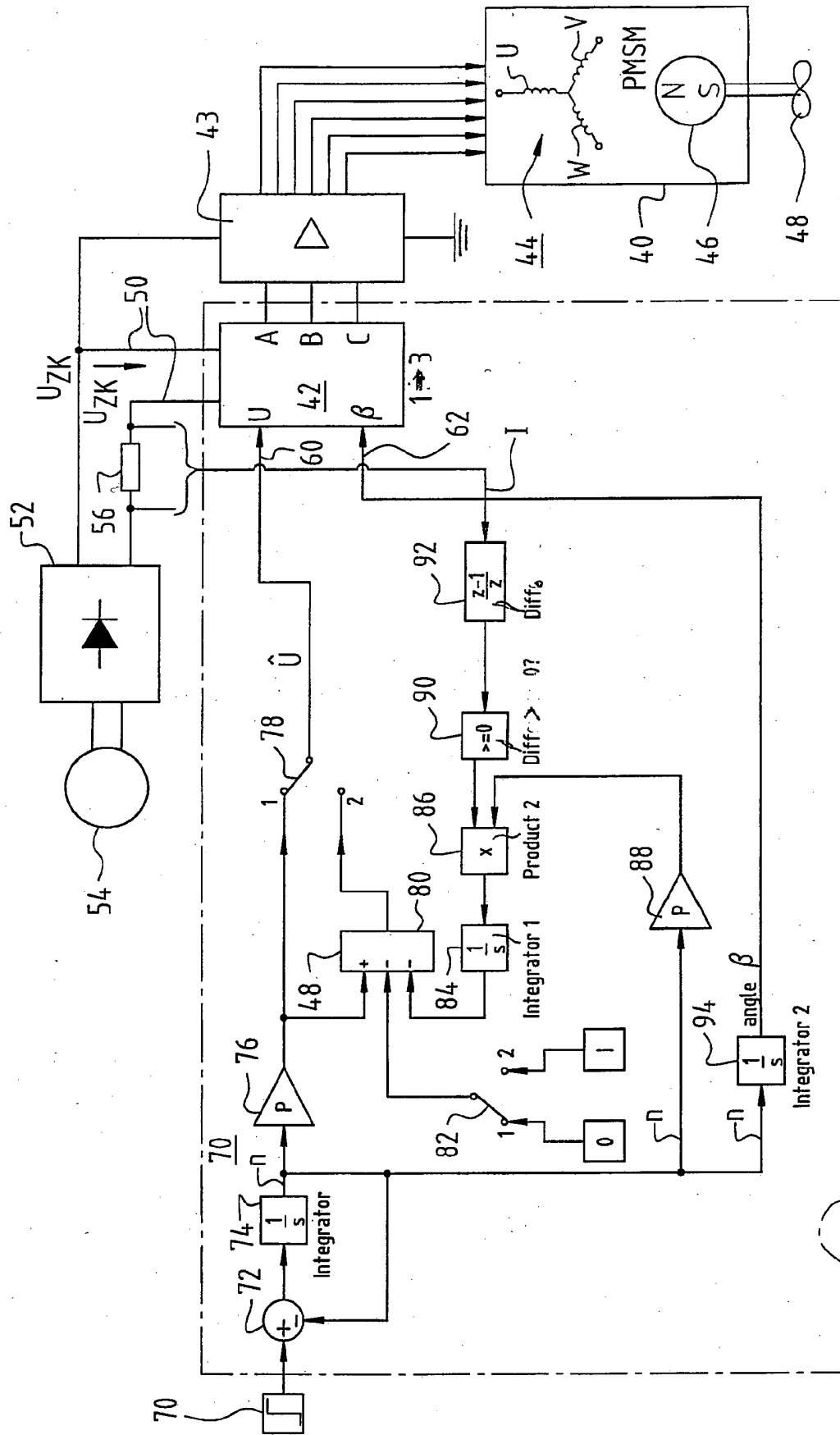


Fig. 3

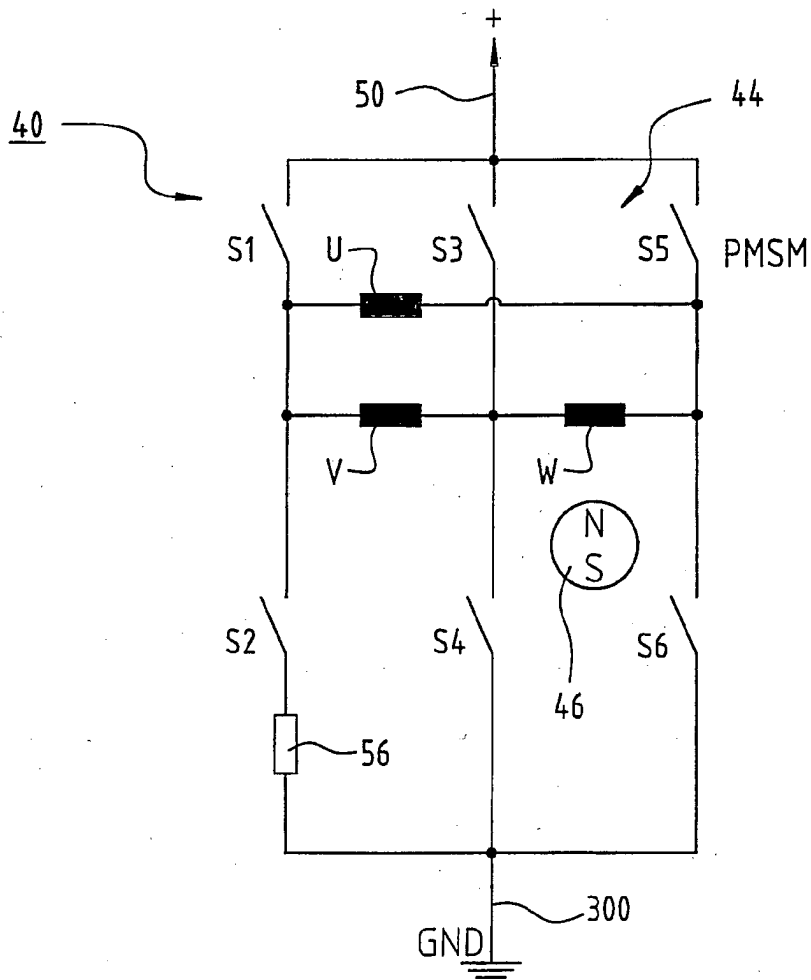


Fig. 4

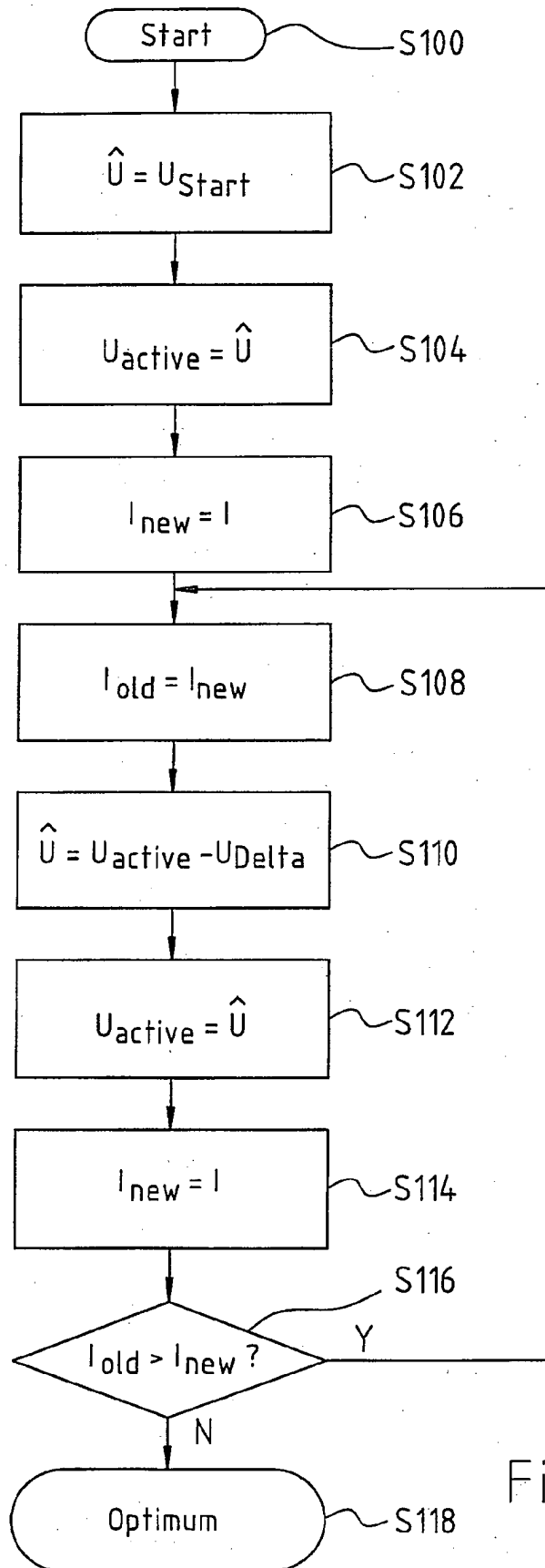


Fig. 5

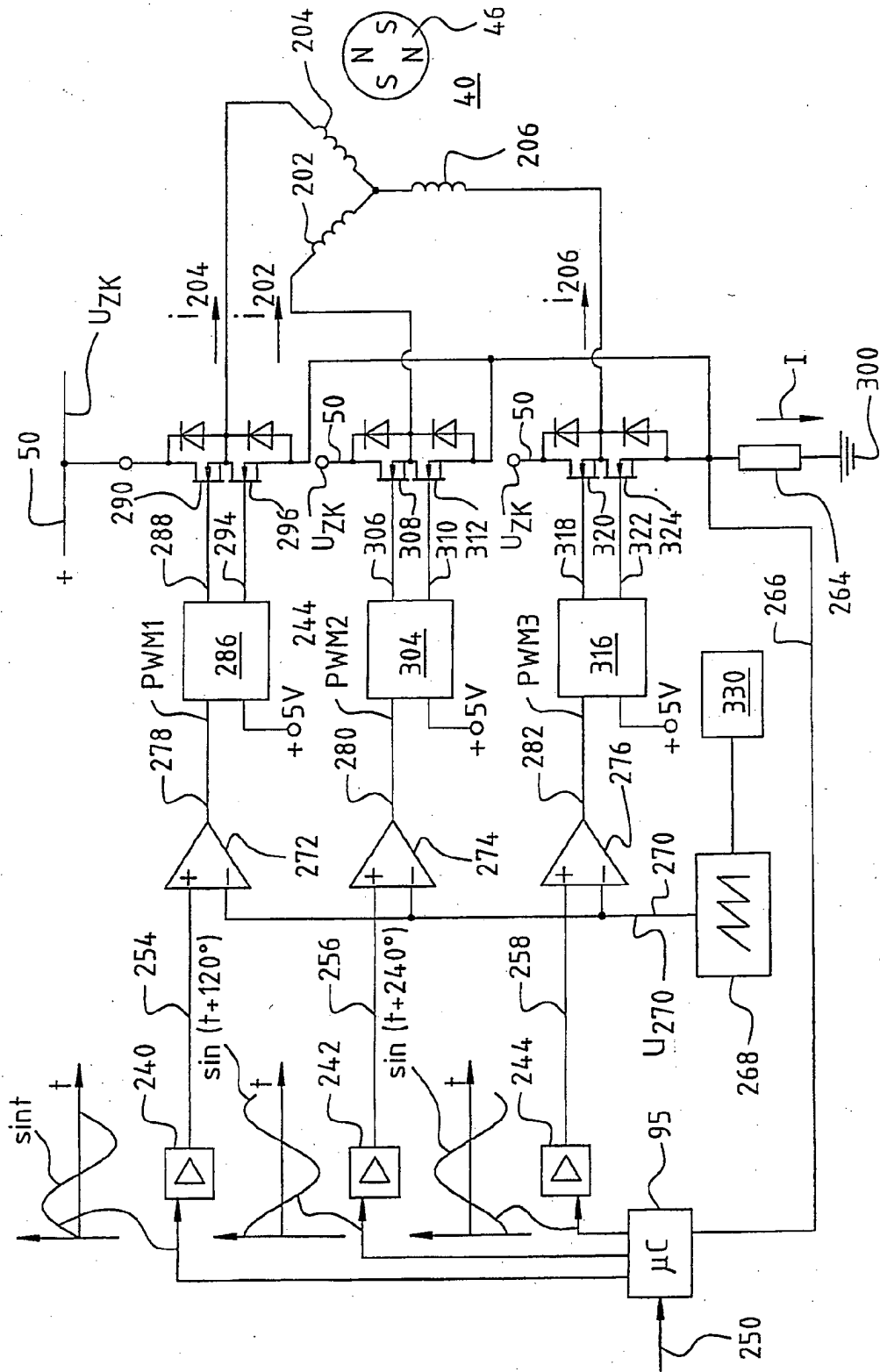


Fig. 6

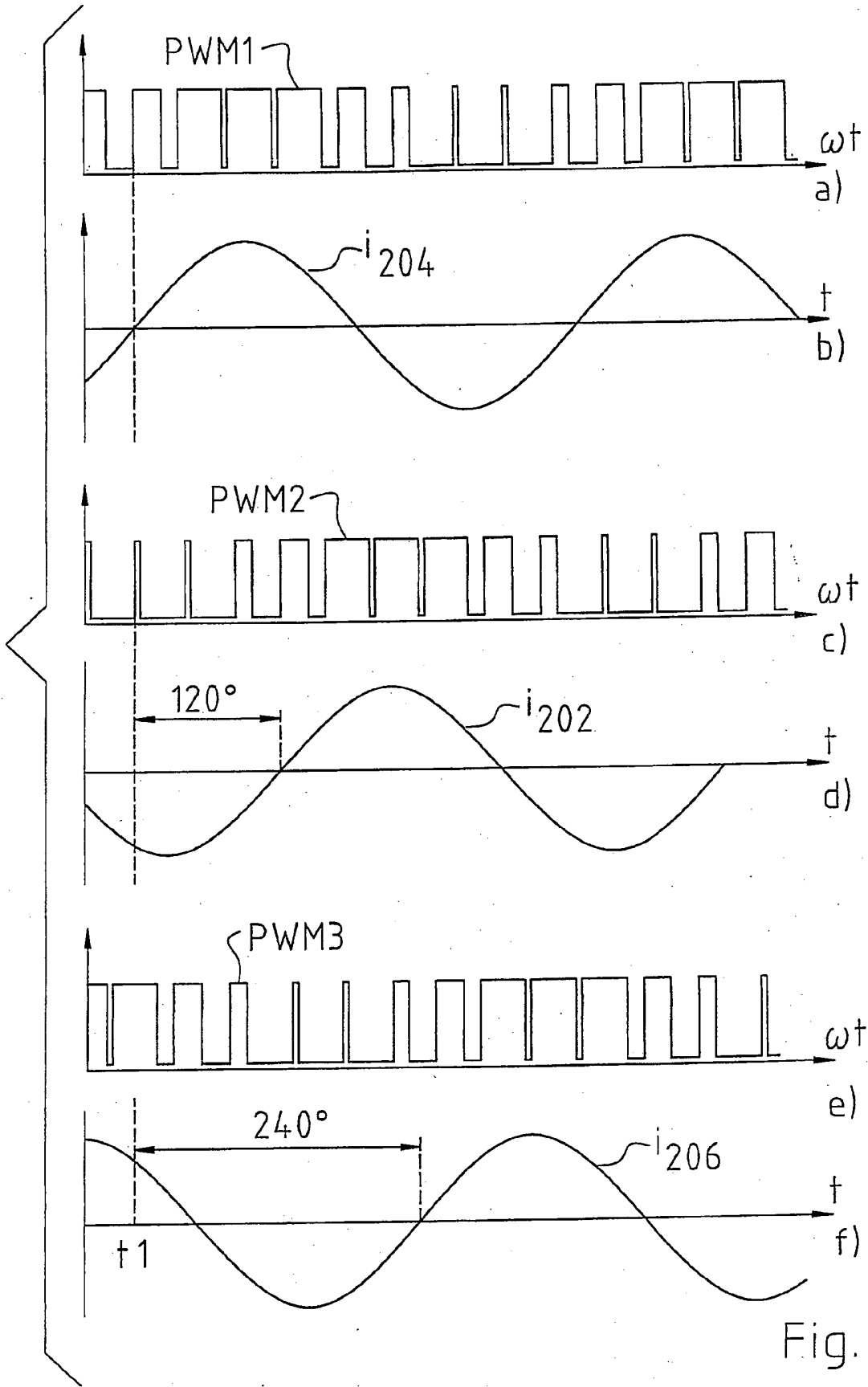


Fig. 7

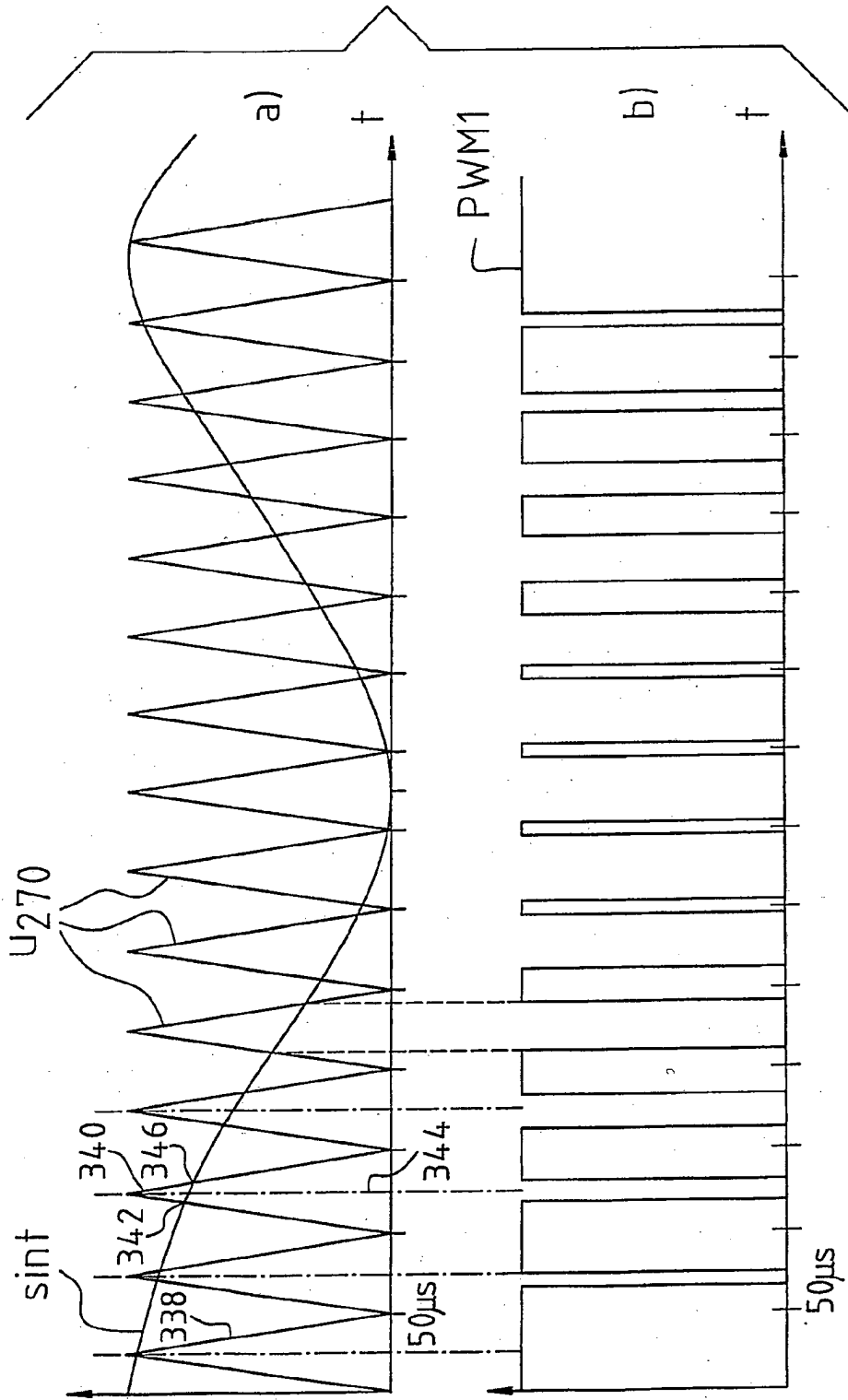


Fig. 8

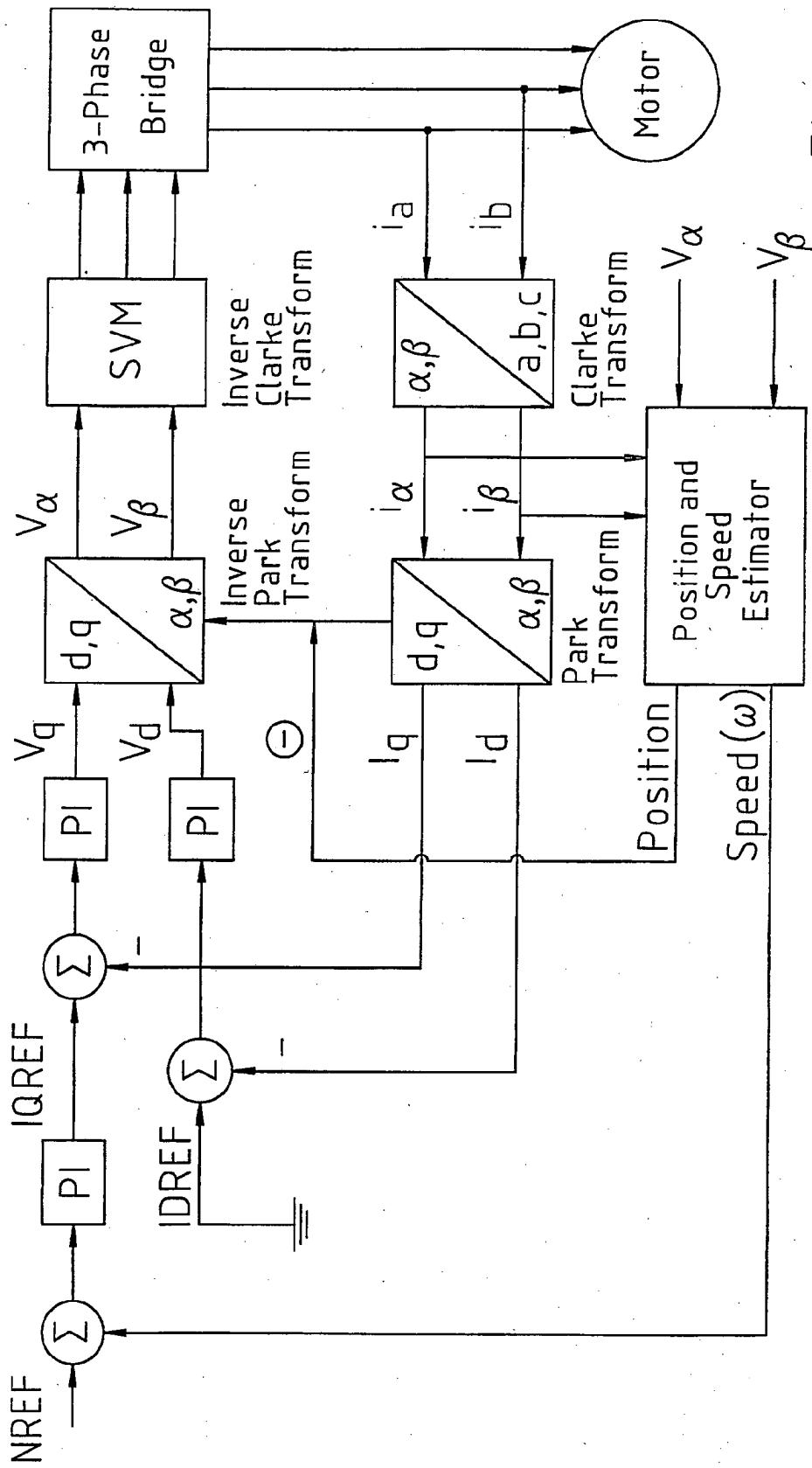


Fig. 9
Prior Art