

技術論文

永久磁石を併用した半波整流ブラシなし同期電動機について

On the Half-Wave Rectified Brushless Synchronous Motor with Permanent Magnets

正 阿部 貴志	(長崎大)	正 小山 純	(長崎大)
正 樋口 剛	(長崎大)	正 山田 英二	(長崎大)

Takashi ABE, Nagasaki University, 1-14 Bunkyou-machi Nagasaki-city, Nagasaki
 Jun OYAMA, Nagasaki University,
 Tsuyoshi HIGUCHI, Nagasaki University,
 Eiji YAMADA, Nagasaki University,

We proposed, in the previous papers, a "half-wave rectified brushless synchronous motor" as a novel servo motor. The rotor winding emf of the motor is induced by the stator current mmf which rotates at synchronous speed and pulsates at bias frequency. The field excitation is produced by the field current obtained from rectifying the emf with a diode inserted into the field winding. In order to improve the power factor and the efficiency, we also proposed a new type half-wave rectified brushless synchronous motor with permanent magnets. This motor has not only simple and robust brushless structure but also high efficiency and power factor, and is anticipated for a new ac-servo drive motor. In this paper, we describe the principle of this motor, and present overall test results, such as steady-state characteristics of the produced motor (VARIFIELD). Then we present position sensor-less control for this motor.

Key Words: Half-wave Rectified, Brushless Synchronous Motor, AC-Servo Motor, Sensor-less Control

1 緒言

近年 OA, FA などの分野において, サーボモータの用途が拡大し, 特に AC サーボモータの製品開発が盛んに行われている. 永久磁石形同期電動機は, 技術的にはほぼ完成された段階にあるが, 大容量化および価格の点で問題があり, かご形誘導電動機をベクトル制御する方法においては, 二次側定数の変動の影響や位置制御が問題となっている.

筆者らはさきに, 回転子位置を検出することによって, バイアス周波数で脈動しながら回転子 d 軸に同期して回転する交番起磁力を作り, この起磁力によって回転子界磁巻線に誘導する起電力を, 回転子巻線に挿入したダイオードにより半波整流することにより励磁を得る, 新方式の AC サーボモータ「半波整流ブラシなし同期電動機」を提案した⁽¹⁾⁽²⁾. この電動機は, (1) 簡単かつ堅牢なブラシなし構造である, (2) 回転子位置を検出するだけで励磁電流やトルク電流を独立して容易に制御できる, (3) 誘導電動機などに比べ

てパラメータ変動の影響を受けにくい, などの特長がある.

また, 本電動機の回転子磁極に永久磁石を埋め込むことにより, 先のダイオードによる半波整流ブラシなし励磁に永久磁石による励磁を加えることで, 高効率化を図った改良型「半波整流ブラシなし同期電動機」を提案した⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

本論文では, この「半波整流ブラシなし同期電動機」の動作原理を紹介し, 特長について述べる. また, 最近製品化された本電動機 (商標名: VARIFIELD) の概要, およびその特性について示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾. さらに, 本電動機を用いた位置センサレス制御について報告する⁽⁸⁾.

2 本電動機の原理

2.1 電動機の構成

図 1 に永久磁石を併用した半波整流ブラシなし同期電動機の構成図を示す. 図に示すように, 本電動機は

以下のように構成される。

- (1) 磁極に永久磁石が埋め込まれ、ダイオードで単相短絡された界磁巻線を持つ回転子と、普通の三相固定子巻線が施された固定子からなる同期電動機。
- (2) 回転子位置に同期し、必要な三相電流波形指令を発生する電流波形演算指令回路。
- (3) 指令された波形の三相交流電流を発生する PWM インバータ。

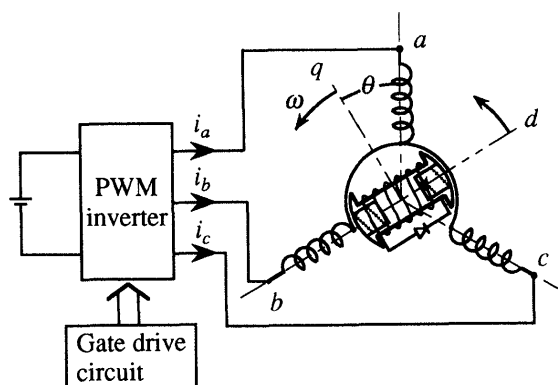


Fig. 1: The circuit diagram.

2.2 d, q 軸電圧方程式

図2に永久磁石を併用した半波整流ブラシなし同期電動機の原理図を示す。本ブラシなし同期電動機の d, q 軸に対する電圧方程式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} e_d &= \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega \lambda_q + r_a i_d \\ e_q &= \frac{d}{dt} \lambda_q + \omega \lambda_d + r_a i_q \\ e_{fd} &= \frac{d}{dt} \lambda_{fd} + r_{fd} i_{fd} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} \lambda_d &= L_d i_d + M_{fd} i_{fd} + \frac{M_{fd}}{L_{fd}} \lambda_{PM} \\ \lambda_q &= L_q i_q \\ \lambda_{fd} &= M_{fd} i_d + L_{fd} i_{fd} + \lambda_{PM} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 e_d, e_q : d, q 軸電圧、 i_d, i_q : d, q 軸電流、 λ_d, λ_q : d, q 軸鎖交磁束、 e_{fd} : 界磁巻線電圧、 i_{fd} : 界磁巻線電流、 λ_{fd} : 界磁巻線鎖交磁束、 λ_{PM} : 永久磁石が作る鎖交磁束、 L_d, L_q : d, q 軸自己インダクタンス、 L_{fd} : 界磁巻線自己インダクタンス、 M_{fd} : 相互インダクタンス、 r_a, r_{fd} : 巻線抵抗

いま、 q 軸と a 相の成す角度を θ 、 q 軸と a 相が一致した瞬間を $t = 0$ 、同期角速度を ω とすると

$$\theta = \omega t \quad (3)$$

である。

2.3 ブラシなし励磁の原理

ブラシなし励磁およびトルク発生の原理を説明するために、図3に変調波形および各部波形を示す。簡単のため、図には固定子三相電流のうち a 相電流のみを示している。図3に示すように回転子位置 θ に同期し、

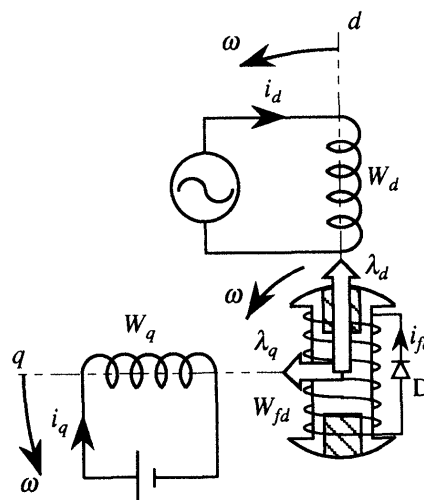


Fig. 2: Motor principle in dq -axis.

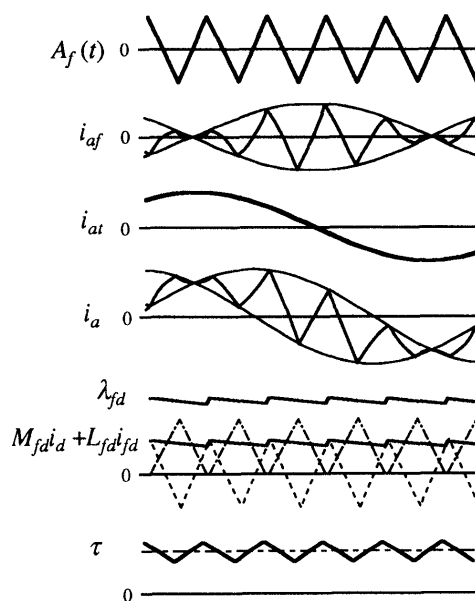


Fig. 3: Principle of torque generation.

バイアス周波数 ω_b の変調波形 $A_f(t)$ によって振幅変調された三相交流電流

$$\begin{aligned} i_{af} &= A_f(t) \sin \theta \\ i_{bf} &= A_f(t) \sin (\theta - 2\pi/3) \\ i_{cf} &= A_f(t) \sin (\theta - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (4)$$

を固定子三相巻線に流すと、回転子に同期して回転する d 軸単相巻線 (図 2 の W_d 巻線) に交流電流

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{\frac{2}{3}} \{i_{af} \sin \theta + i_{bf} \sin (\theta - 2\pi/3) + i_{cf} \sin (\theta - 4\pi/3)\} \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}} A_f(t) \end{aligned} \quad (5)$$

を流して得られるような脈動起磁力が得られる。すなわち、回転子軸上にはバイアス周波数で脈動する鎖交磁束 $M_{fd}i_d$ が現れる。

界磁巻線 W_{fd} に挿入されたダイオード D は、界磁巻線に鎖交する磁束が増加するときにはオフとなるが、磁束が減少しようとするときオンとなり、磁束を一定に保つような界磁電流 i_{fd} を流す。すなわち、界磁巻線に鎖交する磁束のピーク値を保持するように動作する。

界磁鎖交磁束 λ_{fd} は、励磁電流によって作られる鎖交磁束 $M_{fd}i_d$ 、界磁電流によって作られる鎖交磁束 $L_{fd}i_{fd}$ および永久磁石によって作られる鎖交磁束 λ_{PM} の和となり、回路のインダクタンスが十分大きい場合には図 3 に示すように時間的にほぼ一定となる。

いま、簡単のため界磁巻線の抵抗 $r_{fd} = 0$ とし、 $A_f(t)$ が実効値 I_f の三角波形とすると λ_{fd} は次式で与えられる。

$$\lambda_{fd} = \lambda_{PM} + \frac{3}{\sqrt{2}} M_{fd} I_f \quad (6)$$

ただし、 λ_{PM} は永久磁石によって作られる鎖交磁束である。また、 d 軸巻線の鎖交磁束 λ_d は次式で与えられる。

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma L_d A_f(t) + \frac{3}{\sqrt{2}} (1 - \sigma) L_d I_f + \frac{M_{fd}}{L_{fd}} \lambda_{PM} \quad (7)$$

ここで、 σ は漏れ係数を表し、次式で与えられる。

$$\sigma = 1 - \frac{M_{fd}^2}{L_d L_{fd}} \quad (8)$$

なお、変調波形 $A_f(t)$ は任意であるが、三角波形を採用することにより、正弦波などに比べて、励磁電流の実効値を減少でき、力率・効率の向上などの効果が期待される。

2.4 トルク発生原理

次に、トルク成分を表す多相交流電流

$$\begin{aligned} i_{at} &= \sqrt{2} I_t \cos \theta \\ i_{bt} &= \sqrt{2} I_t \cos (\theta - 2\pi/3) \\ i_{ct} &= \sqrt{2} I_t \cos (\theta - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (9)$$

を固定子三相巻線に流すと、図 2 の q 軸単相巻線に直流電流

$$\begin{aligned} i_q &= \sqrt{\frac{2}{3}} \{i_{at} \cos \theta + i_{bt} \cos (\theta - 2\pi/3) + i_{ct} \cos (\theta - 4\pi/3)\} \\ &= \sqrt{3} I_t \end{aligned} \quad (10)$$

を流した場合と同様の起磁力が得られ、 q 軸巻線の鎖交磁束は次のようになる。

$$\lambda_q = \sqrt{3} L_q I_t \quad (11)$$

したがって、励磁電流成分 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} とトルク電流成分 i_{at}, i_{bt}, i_{ct} を加えた多相交流電流

$$\begin{aligned} i_a &= i_{af} + i_{at} \\ i_b &= i_{bf} + i_{bt} \\ i_c &= i_{cf} + i_{ct} \end{aligned} \quad (12)$$

を固定子三相巻線に流したとすると、トルク τ は

$$\tau = \lambda_d i_q - \lambda_q i_d \quad (13)$$

で求められ、次式のように書ける。

$$\begin{aligned} \tau &= 3 \sqrt{\frac{3}{2}} (1 - \sigma) L_d I_f I_t + \sqrt{3} \frac{M_{fd}}{L_{fd}} \lambda_{PM} I_t \\ &\quad + \frac{3}{\sqrt{2}} (\sigma L_d - L_q) A_f(t) I_f \end{aligned} \quad (14)$$

これが永久磁石を併用した半波整流ブラシなし同期電動機のトルク発生原理である。

(14) 式の第 1 項は励磁電流によって生じる平均トルク、第 2 項は永久磁石によって生じる平均トルクを表し、第 3 項は $A_f(t)$ で変動する脈動トルクを表す。

このようにトルクは、バイアス周波数を基本波とする脈動トルクを含むが、バイアス周波数を機械的共振周波数に比べて十分大きく設定し、かつ $\sigma L_d - L_q$ をできるだけ小さく選定することにより、実用上問題にはならない。

3 本電動機の特長

半波整流励磁方式だけでも同期電動機のブラシなし励磁は可能であり、この電動機は次のような特長を持つ

ている。

- (1) 回転子巻線はダイオードで短絡された単相巻線、固定子巻線は通常が多層巻線であり、簡単かつ堅牢なブラシなし構造である。
- (2) 回転子の位置の検出だけで励磁電流・トルク電流の計算ができるので、誘導電動機のベクトル制御などに比べてはるかに容易に静止状態（ポジションコントロールも含む）から定格速度までのトルク制御ができる。
- (3) 界磁巻線で保持される鎖交磁束の大きさは、固定子三相巻線に供給される励磁電流のピーク値で決まる。すなわち、本電動機の特長は温度上昇などに起因するパラメータ変動の影響をほとんど受けない。

これらの特長に加えて、回転子巻線に永久磁石を埋め込み、永久磁石励磁を併用することにより、さらに次のような効果が期待できる。

- (4) 永久磁石単独の場合に比べて、界磁磁束を大きくでき、大容量化が容易である。
- (5) 界磁磁束の制御が可能のため、高速運転領域で弱め界磁運転ができる。
- (6) 半波整流励磁方式のみの場合に比べて励磁電流が減少し、力率・効率が向上する。
- (7) 回転子は常に一方向に励磁され、永久磁石減磁起磁力が発生しない。従って、回転子構造が簡単にできる。
- (8) 永久磁石ならびに界磁巻線を回転子上に適切に配置することにより界磁磁束分布を正弦波に近づけることができ、コギングトルクを減少できる。

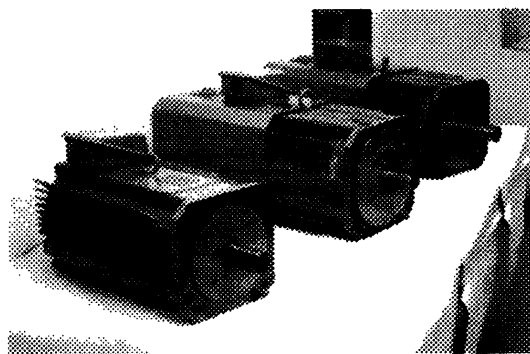


Fig. 4: Photo of VARIFIELD's

4 本電動機の製品化

4.1 システムの構成

最近、出力 5.5kW, 7.5kW, 11kW の半波整流ブラシなし同期電動機本体およびドライバの製品化が、協和機電工業株式会社より行われた（商標名：VAR IFIELD）。図4、5にモータ本体およびドライバの外観を示す。

図6に VARIFIELD のシステム構成を示す。マイクロ CPU は回転子位置を検出し、これに同期した励磁電流・トルク電流の位相を表す三相波形を出力する。同時に回転子速度を演算し、指令速度と比較してデジタル的に PI 制御を行い、トルク電流の振幅指令を出力する。また、キーボードより与えられる励磁電流の振幅指令を出力する。

励磁電流成分を表す三相波形を、乗算器を用いてバイアス周波数 120Hz の三角波によって振幅変調することにより励磁電流指令が得られ、更にトルク電流指令を加算して三相電流指令値が作られる。この指令値は、ホールセンサを通して得られる実際の電流波形と比較され、IGBT インバータの PWM 制御指令が作られる。

4.2 実験結果

図7に 11kW モータの出力特性を示す。定格速度 1,800rpm で皮相力率 65%, 効率 90%程度であるが、負荷や指令速度によってほとんど変化しないという特長がある。また、本電動機は3倍トルクが保証されている。



Fig. 5: Photo of the drivers.

5 本電動機を用いた位置センサレス制御

5.1 センサレス制御の原理

最近、誘導機のセンサレスベクトル制御や永久磁石型同期電動機の位置センサレス制御など、メンテナンスや価格に問題のあるセンサを取り除く研究がなされている。しかしながら、これらのセンサレス制御は、静止状態での位置の推測や低速域での駆動に問題がある。本電動機においても、回転子の位置を知るために、ロータリーエンコーダが必要不可欠であった。そこで、本章では、本電動機を用いた位置センサレス制御について示す。

本電動機の回転子巻線はダイオードで単相短絡されているため、図8に示すように、回転子 α 軸が固定子巻線 W_d に対して、 $\Delta\theta$ だけずれた時を考えると、回転子短絡巻線の配置が変わり、磁気回路が変化する。したがって、回転子の位置によりインピーダンスが変化する。このことを利用して、 d 軸固定子電圧を測定し、回転子位置を推測しようとするものである。

5.2 始動位置決定法

回転子が静止している状態で、固定子にトルク電流成分振幅指令を零とした励磁電流成分のみの電流指令を与え、位相指令を回転させた時の固定子 d 軸電圧を測定したものが、図9に示す実線波形である。この波形の最小値が、固定子 d 軸と回転子 α 軸との差 $\Delta\theta$ が

零のときであり、この位置（図中 a 点）を回転子磁極の位置とすることが出来る。

しかしながら、以上の方法で得られた回転子磁極位置で始動を行うと磁極の区別が出来ていないため、回転子が反転してしまうことがある。そこで、先の方法で求めた回転子磁極位置において、微小のトルク電流を与えると回転子は少しだけ回転し、先ほどと同様に磁極位置の測定を行うと、回転子磁極位置は、正転、もしくは逆転をしており、図中の点線のようにどちらかに最小点が移動することになる。よって今回の最小値が先の場所よりも進んでいる場合、その点を磁極情報も含んだ始動位置として決定することが出来る。

5.3 位置センサレス駆動時の制御

始動位置を決定しモータを回転させると、励磁位置と回転子位置の間にずれが生じてくる。そこで、回転中も先ほどと同じように固定子 d 軸電圧を測定しその変化の様子を観察する。すると、励磁位置と回転子位置の間のずれが大きくなるに従い、 d 軸電圧も大きくなってくる。そこで、この d 軸電圧が最小値を保つように励磁位置を前後させてやり、常に一定の最小値を保持するように制御を行う。

図10、11に位置センサレス駆動時の実験結果を示す。図10は、静止状態から100rpmまでのステップ応答結果であり、応答速度は180msであり、良好な結果が得られている。図11は、50rpmから150rpmへのステップ応答であるが、多少時間がかかるものの、

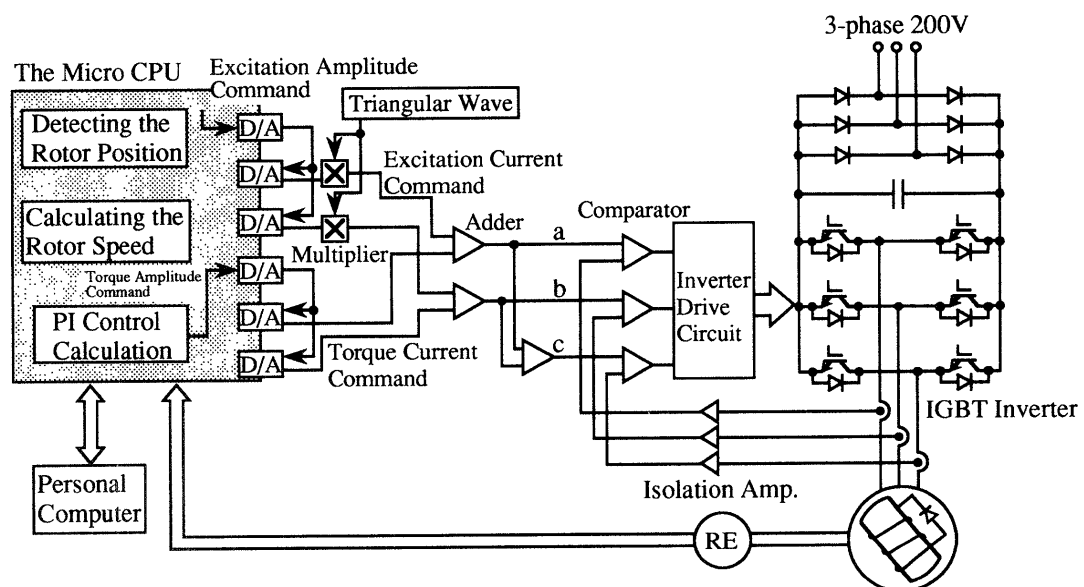


Fig. 6: System configuration of VARIFIELD.

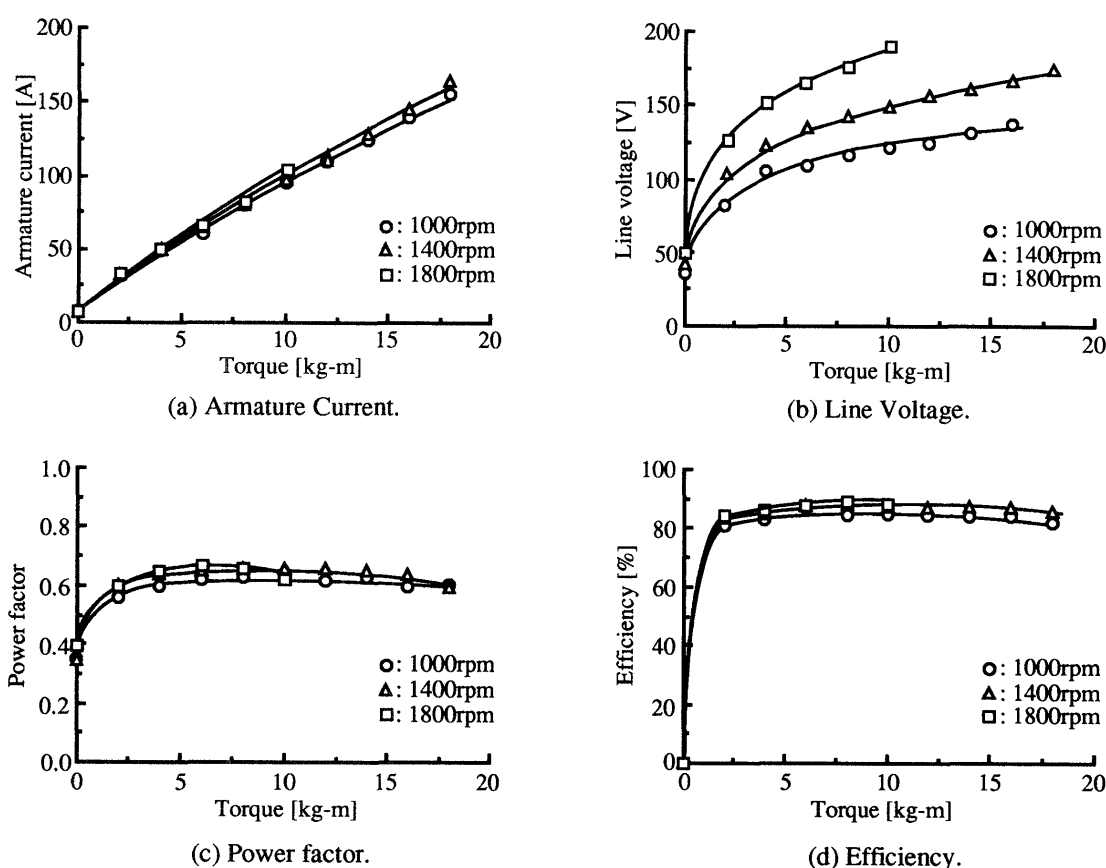


Fig. 7: Output characteristics (11kW VARIFIELD).

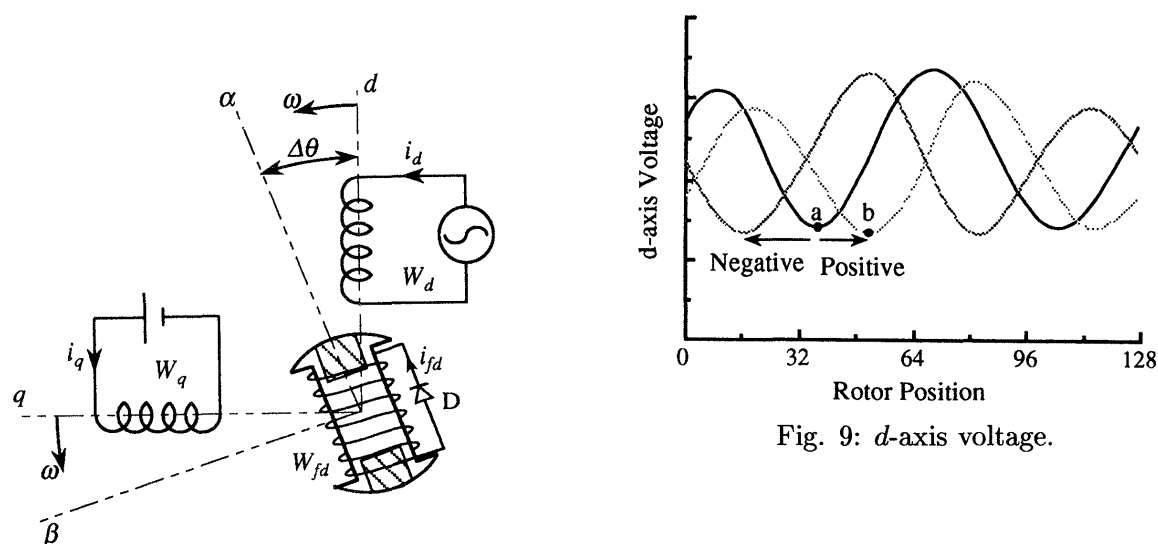


Fig. 9: d-axis voltage.

Fig. 8: Principle of position sensor-less control.

位置の推測が確実に行われていることがわかる。

以上から本電動機的位置センサレス制御は、静止状態においての位置の推測が可能であり、また、低速域において、良好な速度応答が得られている。

6 結言

以上、本電動機は、同期角速度で回転子ながらバイアス周波数で脈動する交番起磁力を励磁に応用し、ポジションコントロールや比較的低速な AC サーボモータに適した電動機である。さらに、位置センサを取り除くことにより、保守の省力化、コストの削減などが可能となる。

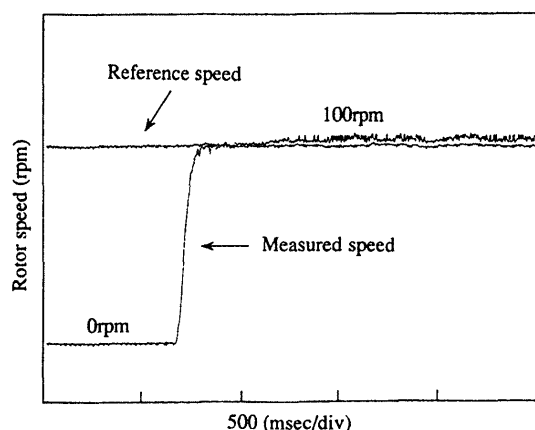


Fig.10 Step response (0rpm to 100rpm).

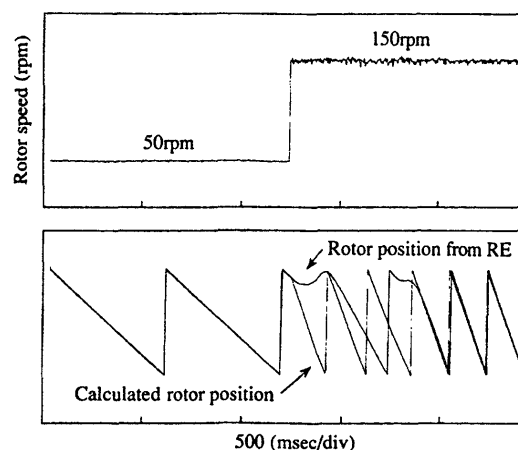


Fig.11 Step response (50rpm to 150rpm).

本電動機は簡単かつ堅牢なブラシなし同期電動機であり、永久磁石形 AC サーボモータと比較して、

- (1) 界磁磁束を大きくでき、大容量化が容易
- (2) 界磁磁束の制御ができ、弱め界磁運転が可能
- (3) 界磁磁束分布を正弦波に近づけることができ、コギングトルクを減少できる。

などの特長を持つ。また、誘導電動機と比較しても

- (4) 永久磁石を併用するため力率効率が良い
- (5) 温度上昇などに起因するパラメータ変動の影響をほとんど受けない

などの利点をもっている。従って、特殊雰囲気中でも使用可能であり、高精度で安価な AC サーボモータである。

(1994 年 9 月 27 日受付)

参考文献

- [1] 小山・鳥羽・樋口・山田：「半波整流ブラシなし同期電動機の原理と基礎特性」，電学論 D，107，p.1257 (昭 62-10)
- [2] J.Oyama, S.Toba, T.Higuchi & E.Yamada : "The Characteristics of A Half Wave Rectified Brushless Synchronous Motor", Conf. Rec. BICEM87, p.654(1987)
- [3] 小山・樋口・阿部・山田：「永久磁石を併用した半波整流ブラシなし同期電動機の定常特性」，電学論 D，109，p.507 (平元-7)
- [4] J.Oyama, T.Higuchi, T.Abe & E.Yamada : "Characteristics of Half Wave Rectified Brushless Synchronous Motor with Permanent Magnets", Proc. of EPE, p.1513(1989.10)
- [5] 小山・樋口・阿部・山田：「永久磁石を併用した半波整流ブラシなし同期電動機の特長解析」，電学論 D，113，p.238 (平 5-2)
- [6] 小山・樋口・阿部・山田・柴原・杉尾：「半波整流ブラシなし同期電動機の製品化 (商標名 VARIFIELD) とその特性」，電気学会産業応用部門全大，No.128，p.226 (平 4-8)
- [7] J.Oyama, T.Higuchi, T.Abe, E.Yamada K.Shibahara "Principle and Characteristics of a New Type AC Servo Motor 'VARIFIELD'", Proc. of EPE, Vol.6, p.123(1993. 9)
- [8] 小山・樋口・阿部・山田：「半波整流ブラシなし同期電動機の位置センサレス制御について」，電気学会産業応用部門全大，No.134，p.582 (平 3-8)