

# 磁石モータ用インバータ装置

## Permanent Magnet Motor Inverter System

太田 久義 ※  
Hisayoshi Ōta  
高嶋 修 ※  
Osamu Takashima  
土本 僚一 ※  
Ryōichi Thuchimoto  
高橋 伴文 ※※  
Tomofumi Takahashi

Though variable speed control technics for motors utilized as power generating sources has recently made many significant improvements, there are many users who require the higher efficiency and performance of variable speed control systems including motor. To meet these requirements, we have developed an inverter for the PM motor.

This inverter not only controls the PM motor with a brushless and sensorless system, but also uses unique software to eliminate starting problems of PM motor, commonly experienced with this type of brushless and sensorless system. Much consideration has been expended in assuring the reliability for the system.

## 1 まえがき

近年、可変速を要求される動力源としてのモータ用に、インダクションモータインバータ装置が開発され、民生・産業を問わず広く使用されている。そして、年々、高効率・高性能化あるいはモータとインバータ装置とのマッチング等の向上が図られてきたが、用途によっては、更に高効率・高性能を求める声があり、インダクションモータではこれらの要求を満足させることが困難になってきていた。

このため、基本的にモータ自身が高効率・高性能の要素を有している磁石モータが注目され、この磁石モータをブラシレスで運転するための駆動装置が望まれている。

この要望に応じて、今回、磁石をロータとする三相ブラシレス磁石モータ用のインバータ装置を開発したので、その概要を紹介する。

## 2 装置の概要

本装置は、三相ブラシレス磁石モータ（以下モータという）の有する能力を損うことなく、かつ、取扱いが容易となるよう下記5項目を中心に検討を重ね開発した。

### (1) 正確な位置の検出

線間電圧を利用することにより、入力信号電圧の1周期内における誘起電圧の占有区間を広くする。

### (2) 位置検出回路の簡素化

位置検出に必要な3線間電圧に対して、モータの相端子のひとつをコモンとする2線間電圧を入力し、この2線間電圧を合成して第3の線間電圧を得る。

### (3) モータ起動対策

この種のモータに必要な起動時の同期運転と、同期運転からフィードバック運転への切換をプログラム処理によって行う。

### (4) モータ仕様に対する起動プログラムの共通化

起動時の運転は2段階に分離し、第1段階は確実な位置検出を得るまでの区間をサポートするプログラムで、第2段階は運転切換可能な状態にするためのプログラムで構成する。

### (5) スイッチング素子の電力損失の均一分散化

三相ブリッジ構成のスイッチング素子の通電パターン内における上アームと下アームの各々をオルタネートチョップさせる。

## 2.1 装置の構成

本装置は一般商用電源(AC100V 50/60Hz)を入力し、出力にはモータの三相線を接続するだけでセンサレス・ブラシレスで運転できるように構成されている。図1に本装置の構成を示す。

装置を大別すると、コンバータブロック、インバータブロック、主制御ブロック、PWMブロック、位置検出ブロックの5ブロックに分けられる。

コンバータブロックには整流平滑部・リアクタが含まれ、整流平滑部は配線抵抗による電力損失を低減するために倍電圧整流を採用し、平滑コンデンサへの突入電流防止・力率改善の目的でリアクタを挿入している。この方法の採用で、モータの変速範囲を広げることができる。

インバータブロックはパワースイッチ部とドライバ

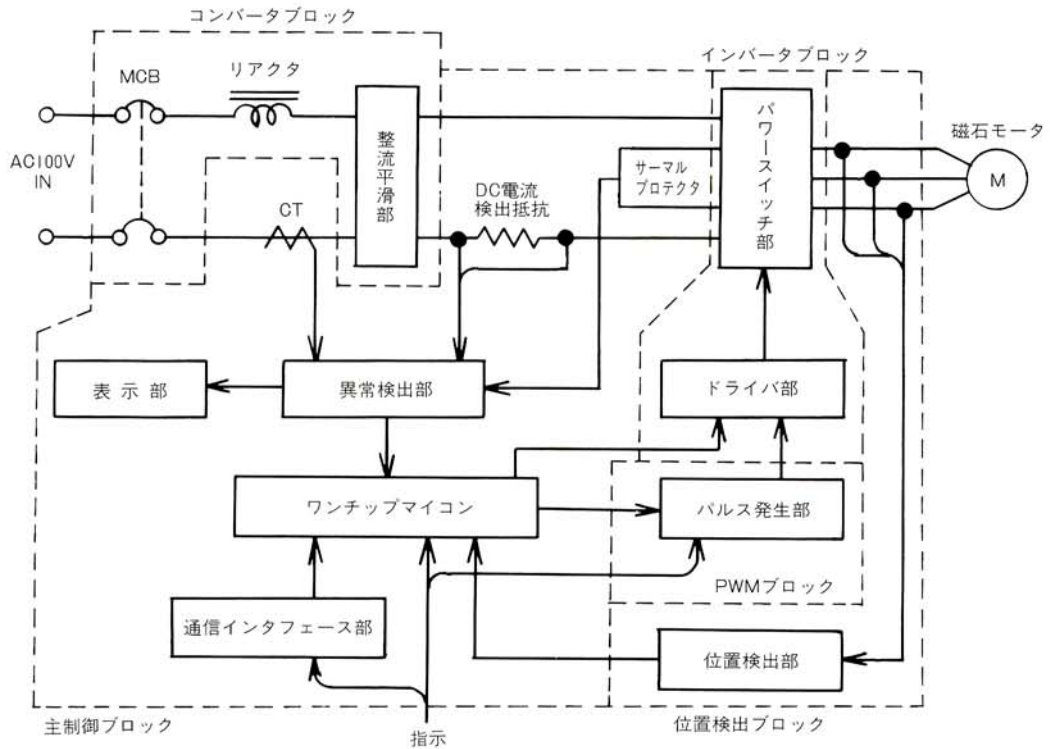


図1 / 装置の構成

Fig. 1/Block diagram of the system

部を指し、パワースイッチ部は三相ブリッジに組まれたトランジスタによって構成され、ドライバ部はモータの持続的回転とモータへの電圧供給量に応じてパルス幅変調させたパルス幅の区間トランジスタをオンさせるアンプである。

主制御ブロックはワンチップマイコン・通信インタフェース部・異常検出部を指し、ワンチップマイコンは外部からの指示などを判断して電圧供給量の指示・インバータブロックへの通電タイミング指示・異常時の事後処理を集中制御し、通信インタフェース部は通信ルートを経て入力される信号レベルを処理してワンチップマイコンへ出力を行い、異常検出部はCT・サーマルプロテクタ・DC電流検出抵抗を介して得られる異常状態をワンチップマイコンへ転送すると同時に緊急遮断指令や異常の種類について表示を行う。

PWMブロックはパルス発生部を指し、ワンチップマイコンから出される電圧指令に見合ったパルスデューティのPWM (Pulse Width Modulation) 信号を作るとともに、パワースイッチ部のトランジスタの上アーム・下アームをオルタネートチョップするための処理を行う。また、このブロックでは、PWM信号周波数を16ステップの範囲で任意に変えることができるようになっている。

位置検出ブロックは位置検出部を指し、モータへの供給電圧とモータからの誘起電圧が混在する電圧を、モ-

ータの線間電圧として検出・処理後、各々の線間電圧の相互関係をロジックとして出力する。

## 2.2 位置検出

本装置における磁石モータの位置検出はモータの発生する誘起電圧から論理処理して行うため、モータの回転を持続させる上で不可欠であるとともに、モータの効率を決定する重要な箇所でもある。したがって、モータの発生する誘起電圧が位置検出部に入力される波形に占める割合が多い程、正確な磁石ロータの位置を検出することが可能となる。本装置では、誘起電圧波形が1周期の区間内において240°分を占有する線間電圧を利用している。図2に位置検出波形タイミングチャートを示す。

相電圧は整流平滑部からのパワー電源電圧 ( $E_B$ ) の $\frac{1}{2}$ を中心に、上限を $E_B$ ・下限をパワー電源にグランドする幅を持っており、誘起電圧は1周期120°を占めている。

これに対し、線間電圧はモータの電機子巻線の各相を順に基準とした他相の電圧波形で、 $v$ 相を基準とした $u$ 相( $u-v$ )・ $w$ 相を基準とした $v$ 相( $v-w$ )・ $u$ 相を基準とした $w$ 相( $w-u$ )を、おのおの振幅の中心を基準として表したものである。

この3線間電圧波形を各々積分することによって90°位相を遅らせると、ほぼ正弦波状の位相シフト信号が得ら

れ、各々の位相シフト信号波形の交差点はモータの電機子巻線への通電タイミングと一致する。したがって、位相シフト信号の相互関係を論理化して位置検出信号 $U_L \cdot V_L \cdot W_L$ を得れば、インバータブロックへの点弧信号を論理処理によって得ることができる。

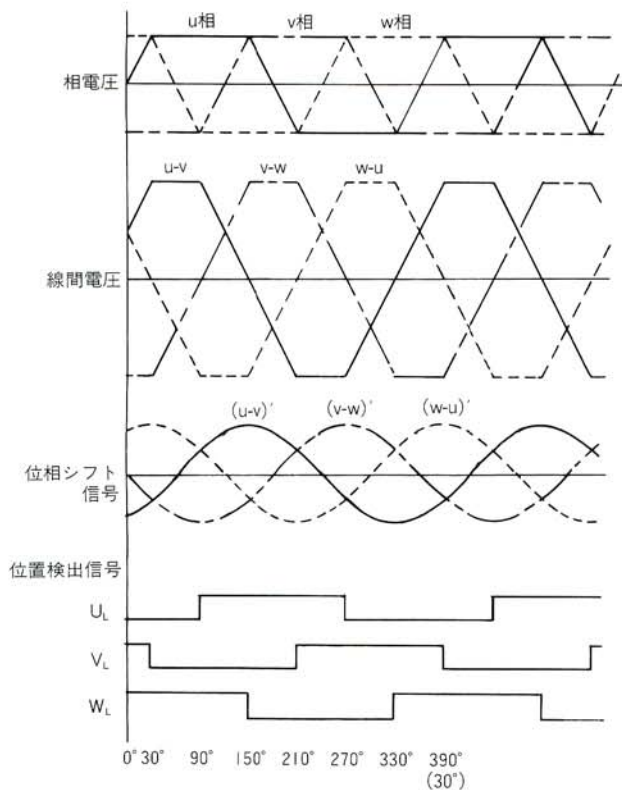


図2 / 位置検出波形タイミングチャート  
Fig. 2 / Waveforms timing of detected rotor position

しかしながら、回路的には図2のような線間電圧を直接制御回路内に取込むことは、各々の線間電圧同士がフローティング状態にあるため不具合であり、本装置では以下に示す手法で線間電圧を検出・処理している。

すなわち、 $v$ 相を基準として $(u-v)$ 線間電圧と $(w-v)$ 線間電圧を入力し、 $(v-w)$ 線間電圧は $(w-v)$ 線間電圧を反転することによって得るとともに、 $(w-u)$ 線間電圧は、 $(w-v)$ 線間電圧を反転した信号と $(u-v)$ 線間電圧とを合成後反転して得る。この様子を図3の2線間電圧-3線間電圧変換に示す。

本装置では、以上の演算処理等は積分後の位相シフト信号で行っており、図4にその位置検出信号処理を示す。

## 2.3 PWM処理

本装置のモータへの供給電圧コントロールはPWMチョップによっている。PWMチョップ自体は一般的な手法であり、この種のモータのインバータ装置では、 $120^\circ$ 通電領域内を通電経路内の上アームと下アームのスイッチング素子の一方をフルオンに、他方をチョップするとい

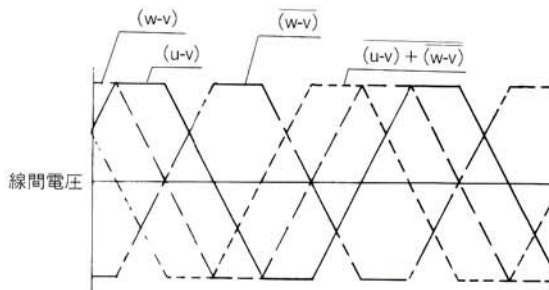


図3 / 2線間電圧-3線間電圧変換  
Fig. 3 / Transformation from 2 line voltage to 3 line voltage

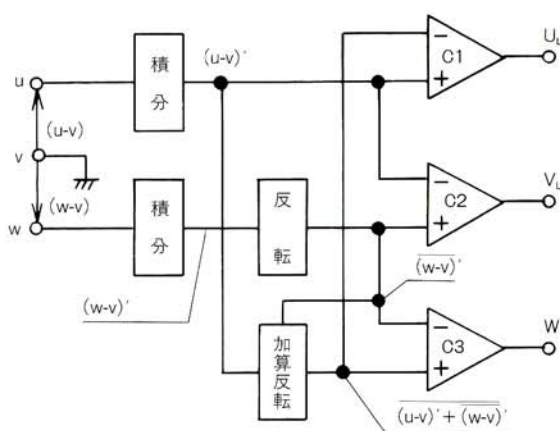


図4 / 位置検出信号処理  
Fig. 4 / Flow of detected rotor position signals

う方法がとられることが多かったが、本装置では上アーム・下アームともに交互にチョップを行い、両スイッチング素子のオン時間の重なりを制御することによって、結果としてモータの供給電圧を変更している。

本装置のパワースイッチ回路を図5に示す。スイッチング素子はフリーホイリングダイオード内蔵タイプのバイポーラトランジスタを採用している。今、トランジスタ $Q_1$ 、 $Q_5$ がオン状態でモータに電圧が供給されるとすると、従来はトランジスタ $Q_1$ 、 $Q_5$ のいずれか一方をPWMチョップすることによってモータへの供給電圧を変えていた(図6(a))。本装置では、トランジスタ $Q_1$ 、 $Q_5$ を互いに時間差を持ってオルタネートチョップさせている。

すなわち、トランジスタ $Q_1$ のPWMチョップに対して、トランジスタ $Q_5$ のPWMチョップがたえず $180^\circ$ の位相差を持って行われる。したがって、両トランジスタのオン時間の重なりはPWM波デューティが50%以下の時「0%」、同デューティが100%の時に「100%」となる(図6(b))。

図6(a)と(b)を比較してみると、(a)の場合にはPWM

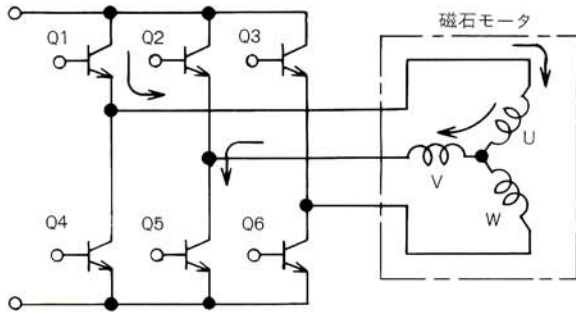


図5/パワースイッチ回路

Fig. 5/Power switch circuit

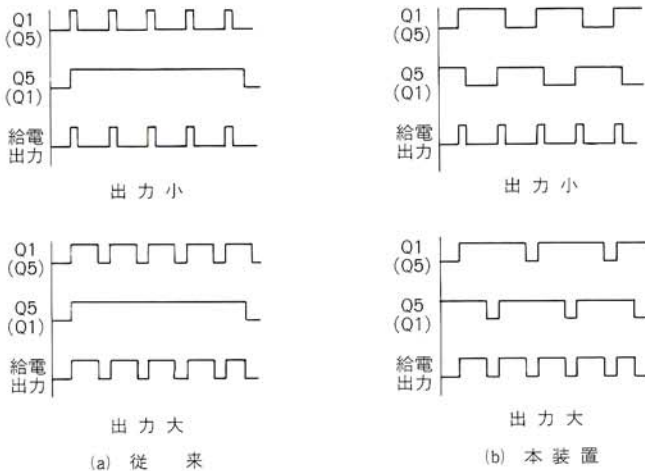


図6/PWM方法

Fig. 6/PWM method

のキャリア周波数がトランジスタQ1(又はQ5)のチョップ周波数であるのに対して、(b)の場合はトランジスタQ1 Q5ともに(a)の場合のキャリア周波数の $\frac{1}{2}$ の周波数でチョップしているにもかかわらず給電出力は(a)の場合と同一である。このことは、(a)の場合はPWMのスイッチング損失が上アーム、下アームのいずれか一方に集中するのに対して、(b)は上下両アームに均等に分散され、電力損失による発熱に対して信頼性が大幅に向上する。

なお、本装置の場合は、電機子への通電の転流タイミングと電圧の給電出力の立上りタイミングとを同期させている。この両者の一致がないと、通電パターンの切換指令に対して実質上の点弧が、給電としての等価的なキャリア周波数の1周期を最大とする遅れとなり、モータの効率を悪化させることがある。この事実は、モータへの通電パターン切換周波数に対するキャリア周波数の比が小さくなるほど指数関数的に大きくなる。

### 3 制御プログラム

本装置は制御の大部分をワンチップマイコンで行っている。図7にワンチップマイコンの処理内容を示す。位置検出信号・運転モニタ・異常モニタ・運転指令のおのをおのを入力し、信号の入力状態に対応した指令を出力する。ただし、本装置の位置検出方法では、モータの起動の際には位置検出信号を得ることができないので、位置検出信号が得られるまではワンチップマイコン内で発生させた点弧指令による同期運転を行わせている。

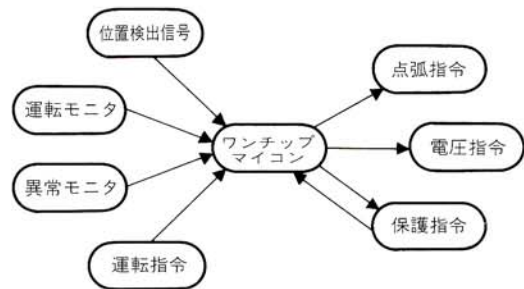


図7/信号処理内容

Fig. 7/Flow of communication signals

この同期運転と位置検出信号によるフィードバック運転への切換処理までを管理する起動プログラムと、フィードバック運転時の運転プログラムとを分離して、両プログラム間は運転切換と停止の条件とを満足する場合に互いにリンクするよう構成されている。図8に本装置の起動プログラムのフローチャートを示す。起動プログラムは2段階に分けられ、第1段階は位置検出信号が全く入力されないか、または、正規の状態で入力されていない区間を処理するブートモードプログラム、第2段階は位置検出信号が一定の条件を満足してから同期とフィードバックの運転切換を完了させるまでの区間を処理するPLLモードプログラムである。起動プログラムは位置検出信号・同期運転用の点弧指令・電圧指令を総合的に制御しつつ進行するが、フィードバック運転時の運転プログラムは位置検出信号の論理タイミングを最優先で処理するよう構成されている。図9に運転プログラムのフローチャートを示す。

一般的に、フィードバック運転においてはモータが高速となった場合、点弧指令の変化周期に対して、その他の運転の処理プログラムが相対的に長くなり、不用意なタイミングで割込み処理命令が発生した場合に、点弧指令が遅れたり、場合によっては点弧指令を損なう等の不具合が生じ、点弧指令の遅れによるモータ効率の悪化や、それに伴う過電流、更には脱調といった事態が生ずる

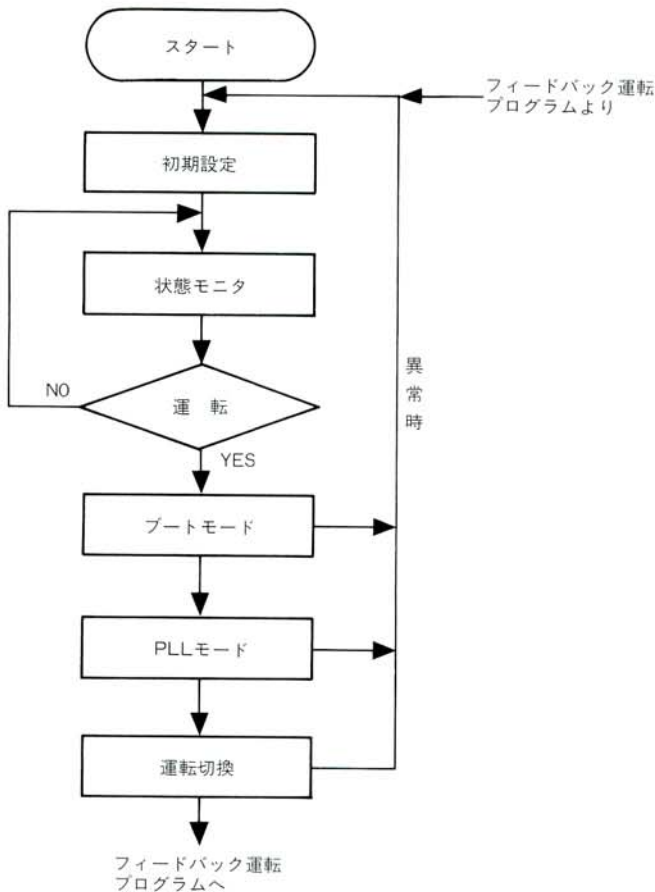


図8 / 起動プログラムフローチャート  
Fig. 8 / Flow chart of starting program

こともある。

したがって、本装置では特定のタイミングでのみ割込許可を行う方法を採用し、運転状態のモニタや運転指令の判読等のプログラムを分散させ、点弧指令のプログラムが適度な時間間隔を持って介在するよう配慮されている。

また、緊急停止はプログラム処理で十分可能であるが、なお一層の安全を確保するため、ハード処理で緊急停止を行った後、プログラムでも停止命令と停止後の事後処理を行い、起動プログラムに復帰する形式をとっている。

## 4 主な仕様

主な仕様を表1に示す。

表1 / 装置の仕様

Tab. 1 / Specification

入力電圧	単相 AC100V ±10% 50/60Hz
入力電流	最大 20A
出力形態	三相120°通電 等幅PWM波重畳
出力周波数	40Hz~250Hz 16ステップ
出力周波数誤差	設定値 ±3Hz

本装置では、過負荷状態における連続運転によって、装置の信頼性の低下を防止するために過電流の抑制処置がとられている。表2に本装置の保護設定値を、表3に出力周波数の設定中心周波数、表4に出力キャリア周波数を示す。

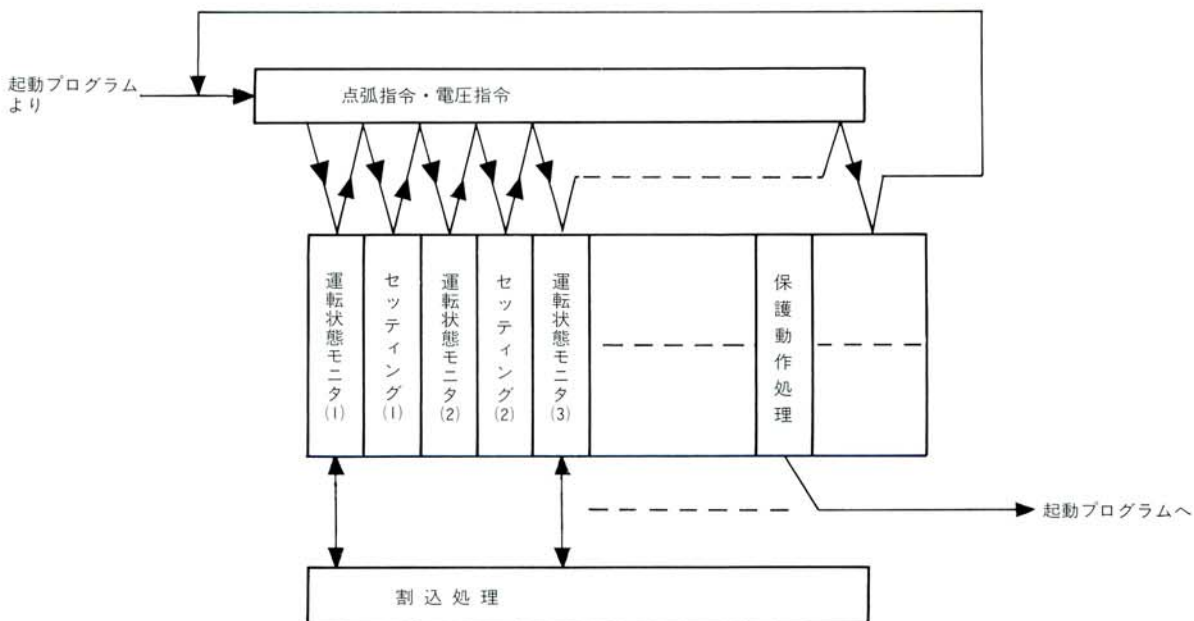


図9 / 運転プログラムフローチャート  
Fig. 9 / Flow chart of running program

表2/保護設定

Tab. 2/Setting constant for system protection

直流過電流遮断	18 A
入力過電流遮断	21 A
入力過電流抑制	19 A
トランジスタ過熱遮断	80℃

表3/出力設定中心周波数

Tab. 3/Center output frequency

単位 Hz

セレクト No.	1	2	3	4	5	6	7	8
中心周波数	40	54	68	82	96	110	124	138
セレクト No.	9	10	11	12	13	14	15	16
中心周波数	152	166	180	194	208	222	236	250

表4/出力キャリア周波数

Tab. 4/Output PWM frequency

単位 kHz

セレクト No.	1	2	3	4	5	6	7	8
キャリア周波数	1.23	1.53	1.84	2.14	2.45	2.76	3.06	3.37
セレクト No.	9	10	11	12	13	14	15	16
キャリア周波数	3.68	3.98	4.29	4.60	4.90	5.21	5.51	5.62

## 5 特性

本装置を当社製のモータと組合せて行ったテスト結果を図10に効率特性で示す。図中には、インダクションモータの可変速システムでの効率特性も併せて示した。テストに使用したモータ及び装置は下記の通りである。

A：三相ブラシレス磁石モータ(径105×厚80)

B：本装置「BL-PACK」

C：三相インダクションモータ(径105×厚80)

D：インダクションインバータ装置(当社製)

本装置と磁石モータとの組合せは、インダクションモータの可変速システムに比べ7%以上も総合効率が上回っており、特に低回転・高回転域では更に効率の差が現われ、7200rpmの点では11%向上している。

仮に、インダクションモータがインバータ装置を使用しないで運転されたとしても、本装置による可変速システムの総合効率が3~4%上回っている。したがって、頻繁に回転数の上昇下降が行われたり、低高速領域での運転時間が長い場合は、更に本装置の有用性が明らかになる。

効率以外にも、本装置によるモータの駆動では、騒音・振動面でインダクションモータの可変速システムに比べ非常に小さくなっている。図10における負荷点3600rpm付近での振動は、インダクションモータの場合が-24dBに対し、磁石モータの場合は-45dBであって、格段の差がある。(ただし、0 dB=10G)

図11に、本装置をキャリア同期で運転した場合と非同期で運転した場合の総合効率を示す。本図から、モータの点弧とキャリアが非同期の場合、同期の場合に比べ2~5%程度効率が低下している。キャリア非同期で運転したとしてもインダクションモータでの可変速システムを上回る効率を示すが、磁石モータそのものの能力を完全に引き出していない点は、前述の「PWM処理」の説明を裏付けている。

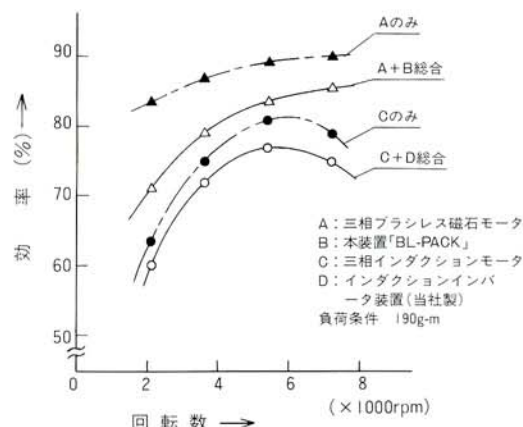


図10/効率特性

Fig. 10/Efficiency curves

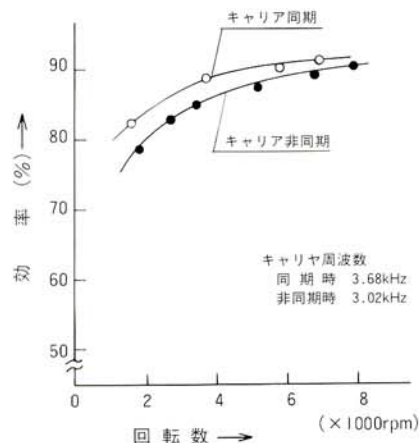


図11/モータ効率特性

Fig. 11/Motor efficiency curves

## 6 あとがき

本装置の製作時に検討された各技術は、磁石モータのスムーズな起動を大幅に改善することに役立っており、特に、PWMチョップ方法・起動プログラム・位置検出方法は有機的な関係で複雑に結び付いているため、全てが特性的に合致しなくてはならないが、パワースイッチング素子の上下アームをオルタネートチョップすることが位置検出信号の対称性を引出しており、線間電圧による位置検出により一層の正確な位置検出を行うことが可能となる等、これを実現することができた。

本装置によって確立された技術はそのまま小型・大型モータ用のインバータ装置に採り入れることができる。

当社では、本装置の技術を生かし、モータの用途に合ったインバータ装置を開発しているが、更にモータとのマッチング等磁石モータ用のインバータ装置について検討を加えていく予定である。

おわりに、本装置の検討・製作に際し、協力頂いた関係各位に対し感謝の意を表す。