

マイクロプロセッサによる電動機速度制御

Microprocessor Based Speed Control System of Motors

原島文雄*・田岡久雄*

Fumio HARASHIMA and Hisao TAOKA

電動機の変速駆動は、産業を支える基礎的技術の一つであるが、その制御特性に対する要求はますます高度のものとなりつつある。半導体電力変換装置の発達により、駆動の主回路は過去十数年の間に格段の進歩を遂げたが、最近、LSIの発達により制御系の情報処理部が新しい発展を遂げつつある。本文では、マイクロプロセッサによる速度制御系を中心として、新しい電動機制御の方向を考える。

1. はじめに

電動機の変速駆動は、産業を支える基礎的技術の一つであるが、速度制御の精度、動特性などの制御特性に対する要求は、ますます高度のものになりつつある。半導体電力変換装置の発達により、駆動装置の主回路は過去十数年の間に格段の進歩を遂げたが、最近IC技術の発達により、制御系の情報処理回路が新しい発展の段階にある。その中でも、デジタルICは制御のデジタル化を進め、電動機のデジタル制御が一つの新しい方向となっている。

また、従来より電動機速度制御といえば、回転数検出器により測定された回転周波数をフィードバックし、制御する方法がとられているが、これにフィードバック量として位相も加えて制御を行うPLL制御(Phase-Locked Loop)も、制御の新しい形態として見のがすことはできない。

こうした背景の上に、ここ1~2年急速に各方面で普及しつつあるマイクロプロセッサを、この分野でも用いようという動きがでてきている。ここでは、最近特に注目を集めはじめた、マイクロプロセッサによる速度制御を中心として、新しい電動機制御の方向を解説する。

2. 新しい制御方式

2-1 アナログ制御とデジタル制御^{1)~3)}

従来のアナログ制御は、安価であるが次にあげるようなくつかの欠点がある。

- 1) 速度変換器の特性の高精度の線形性が確保できない。
- 2) アナログ信号の正確な伝達が難しい。
- 3) 温度、機器の経年変化、外乱等の影響により誤差が生じやすい。

これらは、制御系をデジタル化することにより改善できる。¹⁾

まず、信号がデジタル信号であることから、速度変換器の非線形性がなくなり、伝達も正確にできる。また、温度変化や経年変化、外乱等によって信号波形が歪んでも、アナログ信号のように制御特性に影響を与えることは少ない。さらに、デジタル制御では、制御系の一部をマイクロプロセッサに置き換えることでコストを下げ系に融通性をもたせ、幅広い制御ができるようになる。

2-2 周波数制御とPLL制御^{4)~13)}

周波数制御というのは、周波数つまり回転数を検出し、フィードバックして速度制御を行うものである。フィードバック量として、周波数に加えて位相も用いれば、精度は一段と向上させることができる。これがPLL制御である。

PLL(Phase-Locked Loop)は、従来、通信の分野でテレビ受像機の周波数同期とか、人工衛星からの微弱な信号の追跡等に用いられていた。しかしながら、最近、安価なPLL-ICが作られ、システムの設計も比較的楽になったため、各方面に応用されるようになってきている。⁴⁾ 電動機制御の分野でも、精密な速度制御が可能なることから、PLLを用いた制御の研究が進められている。^{5)~13)} PLLの基本構成は、Fig.1の通りである。

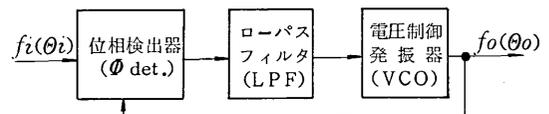


Fig.1 PLLの基本構成

- 1) 位相検出器…二つの入力信号の位相差を位相の進み/遅れを含めて1サイクルごとに検出し、電圧に変換する。
- 2) ローパス・フィルタ…位相検出器の出力電圧を積分して平滑し、高調波成分やノイズを取り除き、位相差に比例する連続な電圧成分を取り出す。
- 3) 電圧制御発振器…ローパス・フィルタからの制御電圧によって発振周波数を制御する。

こうして、出力信号の周波数を入力信号の基準周波数にロックさせる。これを電動機速度制御に用いた場合の

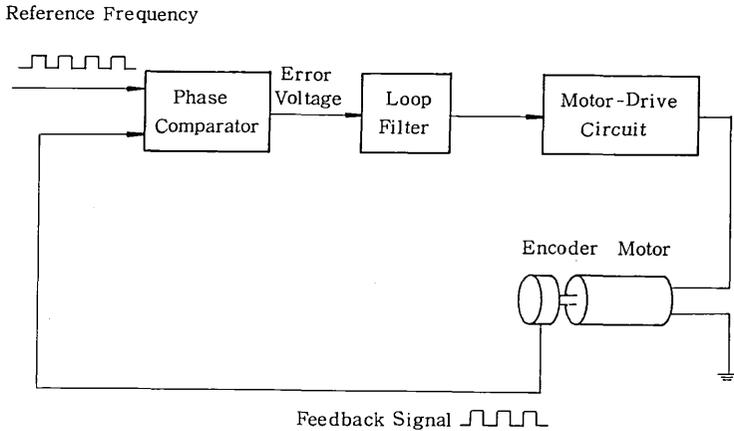


Fig. 2 PLLによる電動機速度制御系の基本構成

制御系の基本構成を示したのが Fig. 2 である。

PLL制御を用いると、理論上、今までの制御方式と比較して、数百倍の精度である0.002%という精度が得られることが報告されている。⁶⁾ また、制御系の構成はアナログ形にもデジタル形にもできるが、デジタル形を用いた方がPLLを有効に使うことが可能である。

以上のような背景のもとに、PLLを用いた安価なデジタル速度制御が可能となり、多くの電動機を一度に同一速度で運転させたり、外部のクロック信号に同期させたりする等の応用が期待されている。

2-3 マイクロプロセッサによる速度制御^{14)~20)}

マイクロプロセッサが出現してから、まだ5年余りの年月しか経っていない。それにもかかわらず、その急速な低価格化と性能の向上に伴い、各方面で応用技術の研究が盛んになっている。パワーエレクトロニクス分野でも、マイクロプロセッサの応用は、ここ1~2年の間に、とみに脚光を浴びるようになった。^{14)~16)}

マイクロプロセッサが、このような急速な成長を遂げた理由として、従来のランダム・ロジックやワイヤードロジックによる機器設計が不便であり、その点マイクロプロセッサは柔軟性・融通性に富んでいることが挙げられる。電動機制御においても、一方で精度の向上が、また一方で広範囲な制御機能が要求されるようになると、回路構成も複雑になり、少しパラメータを変更しようと思っても、回路を組み直さねばならず、わずらわしさがつきまとう。そこで、プログラミングにより容易にパラメータの変更ができるマイクロプロセッサが有効になってくる。前節で挙げたPLL等の複雑な制御系を組み合わせる場合でも、マイクロプロセッサを用いれば制御系の設計は容易となる。しかしながら、従来のワイヤード・ロジックによる制御系に比べて、マイクロプロセッサの演算速度は遅く、応答性が悪いのが難点である。したがって、それぞれ適切に使い分けが必要であろう。¹⁷⁾

次章以下では、以上に挙げたいくつかの制御形態につ

いて、その実例を紹介する。

3. デジタル制御の実例

T. J. Maloney等¹⁾は、直流電動機速度制御にデジタル制御を用いて実験を行っている。制御系の構成は、Fig. 3に示すように次のような機能をもっている。

- 1) 速度検出
- 2) 基準速度との比較
- 3) 誤差の検出
- 4) 誤差の大きさに応じた信号の発生
- 5) 電機子電圧の加減

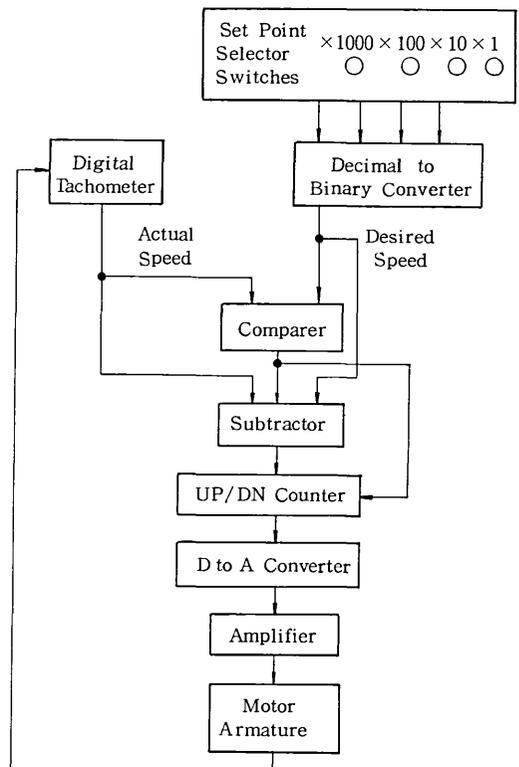


Fig. 3 システムの流れ図

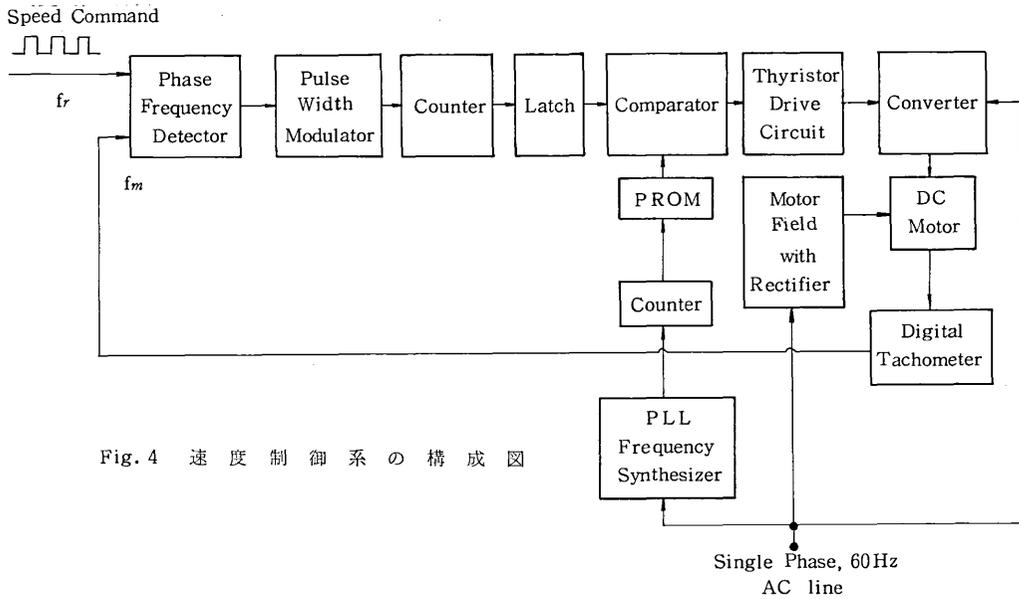


Fig. 4 速度制御系の構成図

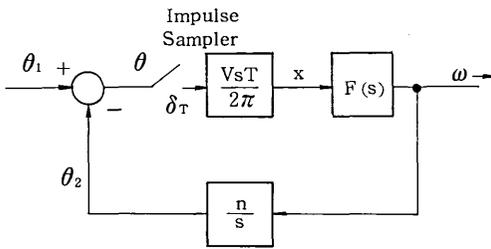


Fig. 5 PLL制御系の線形モデル

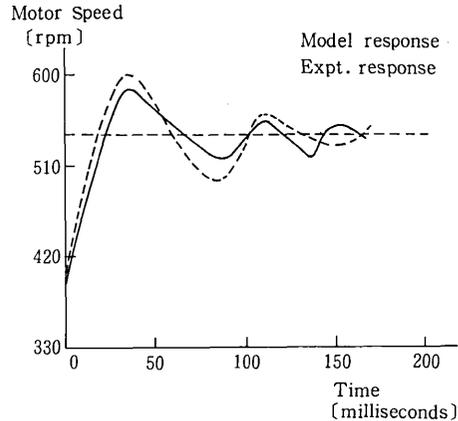


Fig. 6 速度のステップ応答

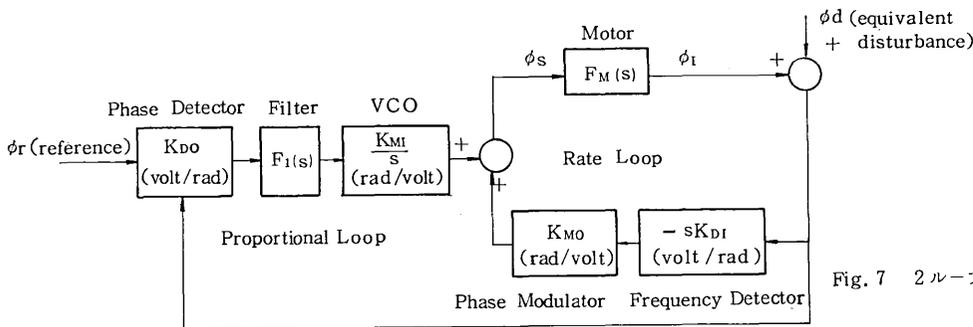


Fig. 7 2ループ電動機速度制御系

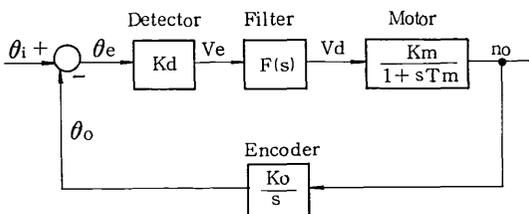


Fig. 8 速度制御系のブロック図

実験では、デジタル・タコメータのパルス数を60パルス/1周とし、サンプル時間200 msecで行った結果、速度誤差5 rpm 最高速度の0.2%以下を得ている。デジタル・タコメータのパルス数を150パルス/1周に増やせば、誤差は0.1%以下にすることも可能である。応答速度がそれほど問題にならない場合には、ロジック回路の部分をマイクロプロセッサで置き換えることにより、コストを下げ、融通性をもたせることが可能であろう。

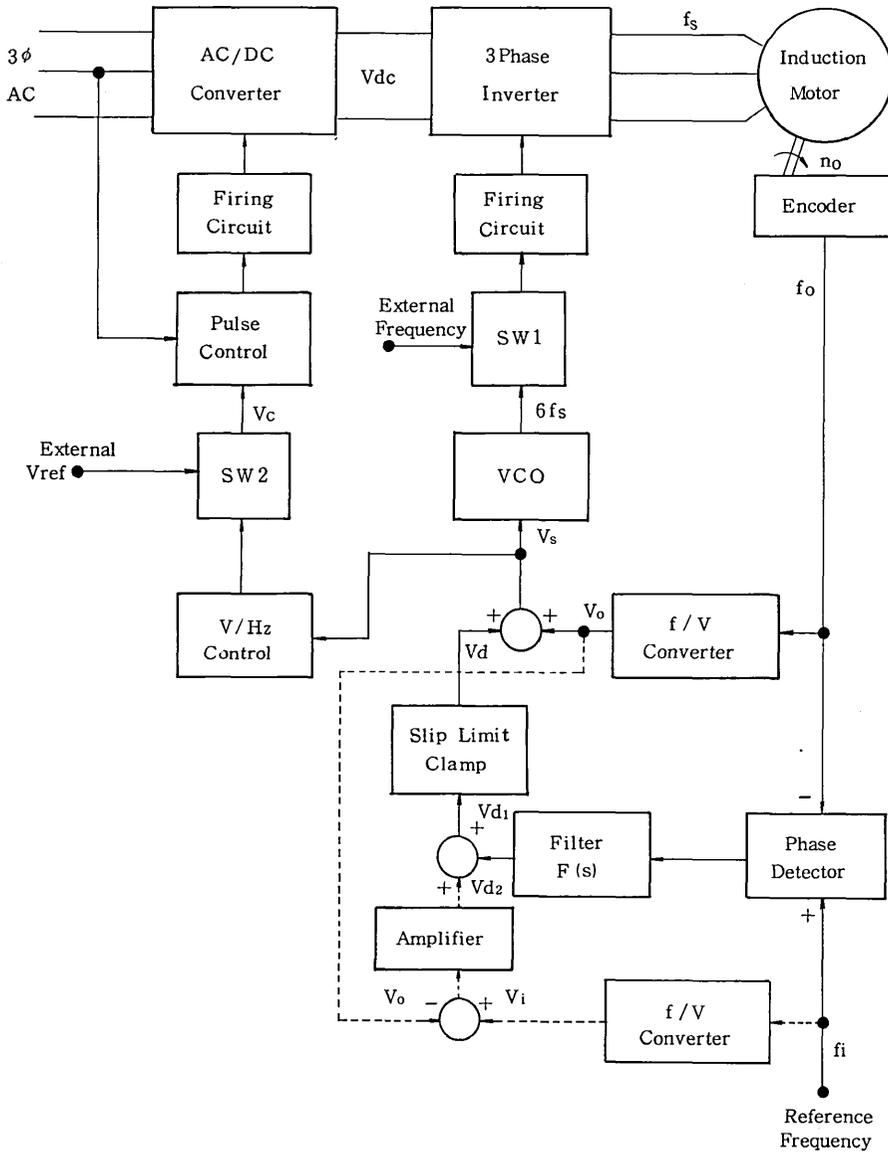


Fig. 9 電動機駆動システムの全体図

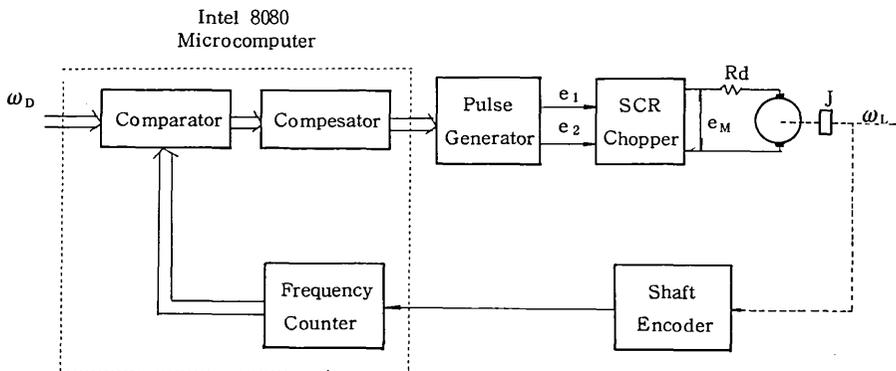


Fig. 10 マイクロコンピュータによる速度制御系の構成図

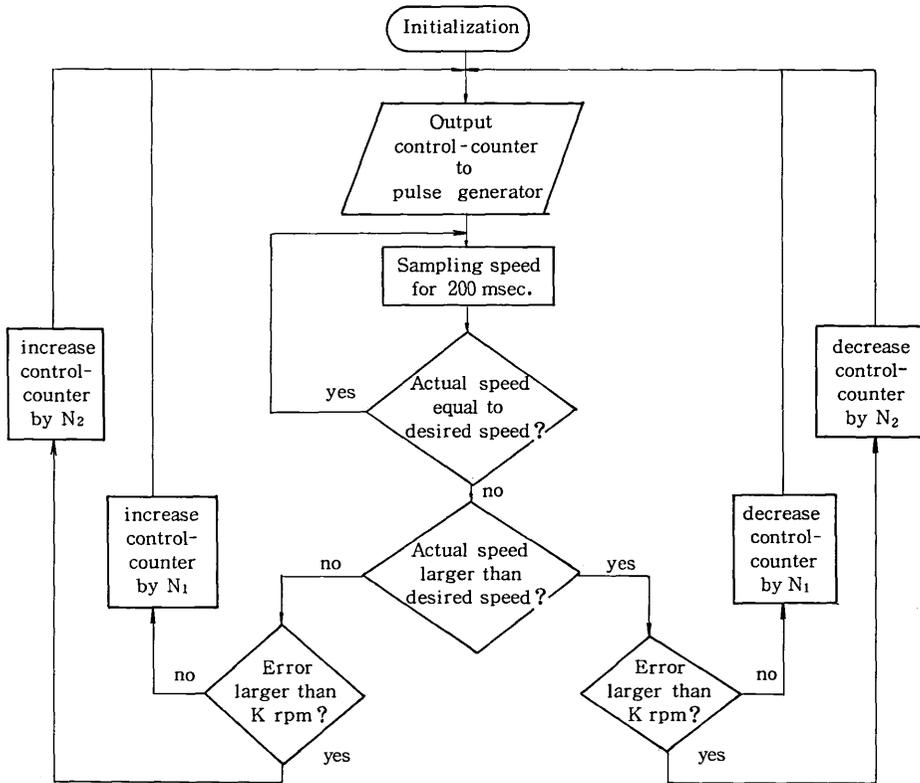


Fig. 11 速度制御のためのプログラムの流れ図

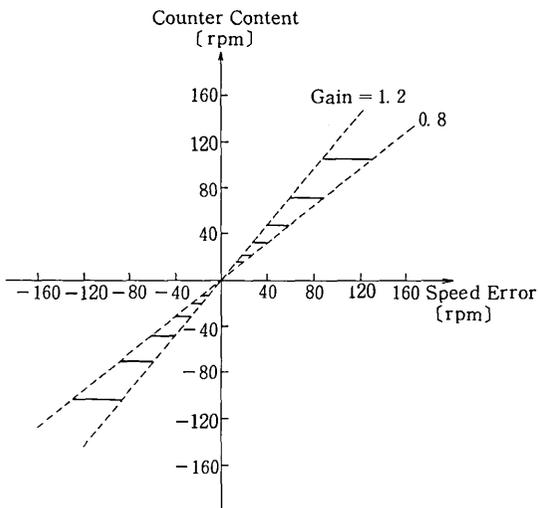


Fig. 12 速度誤差に対するカウンタの設定値

4. デジタルPLL制御の実例

4-1 直流電動機のPLL制御

A.W. Moore⁶⁾は、周波数シンセサイザの設計法を用いて制御系の設計をし、PLL制御により理論的に誤差を0.002%以内におさえることができることを示した。B.K. Bose等⁷⁾は、0.75 HPの分巻直流電動機を用い

てFig. 4に示される制御系を組み、速度範囲110~1200 rpmで実験を行っている。Jacob Tal⁸⁾は、PLL制御系をFig. 5のような線形モデルでシミュレーションを行い、低速で不安定領域があることを示している。D.H. Smithgall⁹⁾は、速度範囲120~2520 rpmで実験を行い、Fig. 6のような動特性を求めている。図のステップ応答において、その増加部分と減少部分の変化速度が異なっているが、これは位相検出器の特性によるものである。R.L. Labinger¹⁰⁾は、PLLをサーボ機構に応用している。

4-2 同期電動機のPLL制御

G.T. Volpe¹¹⁾は、Fig. 7のような2ループ制御により、同期電動機の負荷トルクの変動等による乱調を防ごうとしている。この場合、二つのループ間に時間遅れがあると、特性が悪くなることを示している。

4-3 誘導電動機のPLL制御

P.C. Sen等¹²⁾は、誘導電動機にPLLを応用して制御回路を組み、Fig. 8に示すブロック線図で種々のフィルターによる特性の違いを比較している。制御回路の構成は、Fig. 9の通りである。これにより、0.01%の精度を得ている。W.L. Kenly等¹³⁾は、トライアックの制御にPLLを用いている。

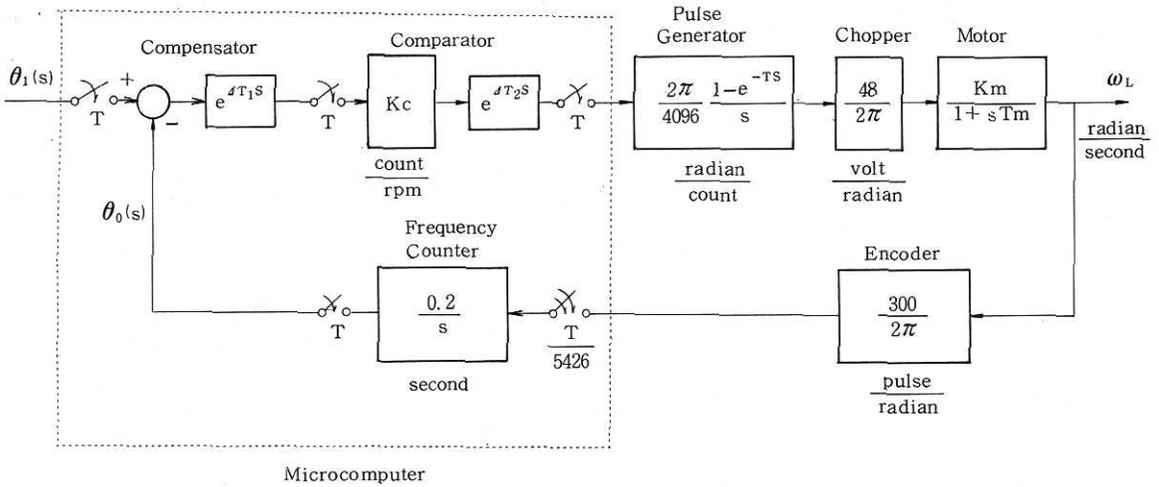


Fig. 13 マイクロコンピュータによる速度制御系のブロック図

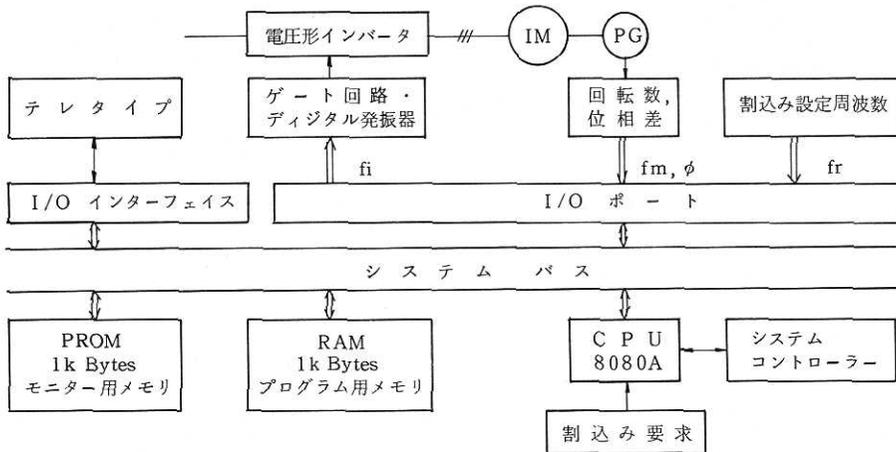


Fig. 14 マイクロコンピュータによる誘導電動機速度制御系のブロック図

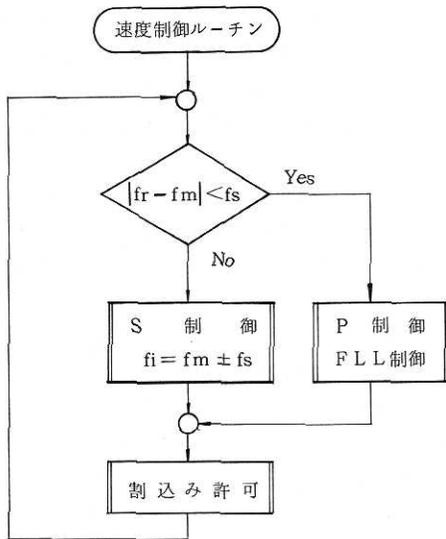
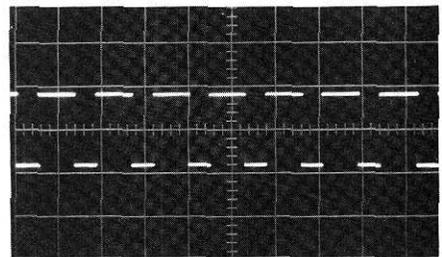
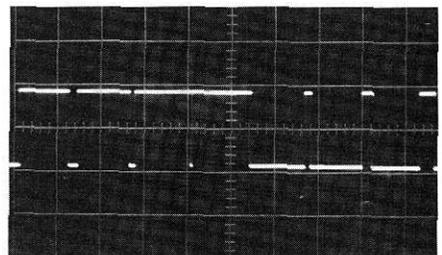


Fig. 15 システムプログラムの流れ図



a) PLL制御



b) 速度フィードバック

Fig. 16 位相検出器の出力波形

5. マイクロプロセッサによる速度制御の実例

5-1 マイクロプロセッサによる直流電動機のPLL制御

A. K. Lin等¹⁷⁾は、Fig.10に示すようなマイクロプロセッサを用いたデジタル制御系を組み、マイクロプロセッサの有効性を論じている。

ランダム・ロジック回路とマイクロプロセッサ Intel 8080を用いることにより、性能・価格・融通性・信頼性・電力消費の面で、すぐれた特性を得ることが可能である。速度制御の方法は、Fig.11に示すフローチャートに示されており、 K , N_1 , N_2 の値はFig.12のようにして定められる。このデジタル制御系は、Fig.13に示すようにサンプル値制御系として解析することができる。そして、Fig.13をもとにして、制御系が安定であるような K_c の値を求めることが可能である。実験では $K_c = 1.67$ とした。速度範囲は200~2500rpmで、誤差は200rpmのときで0.2%、2500rpmのときで0.02%である。設定値を変えた時、新しい設定値にほぼ落ち着くまでの時間は約5secである。マイクロプロセッサの演算時間は110 μ secで、そのうちの大部分はメモリーへの出し入れに要する時間である。今後、アクセスタイムの速いメモリー素子が期待される。

5-2 マイクロプロセッサによる誘導電動機のPLL制御²¹⁾

筆者らは、インバータによって可変周波数駆動される誘導電動機のPLL制御にマイクロプロセッサを用いた全デジタル制御系の実験を行った。このシステムの基本的構成は、Fig.14に示されている。また、速度制御方式は次のように行われている。すなわち、設定周波数 f_r と回転周波数 f_m の差が、あらかじめ決められた f_s より大きいときには、一定トルクで加減速を行う「すべり周波数制御」を行う。また、 f_r と f_m の差が f_s より小さいときには、位相差の誤差を修正するPLL制御動作を行う。これらの様子はFig.15に示されている。この系の実験結果として、PLL制御を行った場合と単なる速度フィードバックを行った場合の位相検出器の出力をFig.16に示す。

6. おわりに

以上紹介してきたもののほかに、マイクロプロセッサによる電動機制御の例として、P. Burger等¹⁸⁾、松本氏¹⁹⁾によるマイクロプロセッサのサーボ機構への応用、V. I. John等²⁰⁾による同期電動機制御への応用などが報告されている。

電動機制御の分野へのマイクロプロセッサの導入によ

り、電動機の制御技術は新しい発展の段階を迎えている。マイクロプロセッサ自体の発展と共に、その応用技術の進歩により、電動機制御の技術が、その要求を満たすべく、更に発展することが期待されている。

(1977年12月8日受理)

参考文献

- 1) T. J. Maloney, F. J. Alvarado
IEEE Trans. on IECI, Vol. IECI-23, p.44, Feb. 1976.
- 2) R. A. Millar IEEE Spectrum, p.90, Jan. 1968.
- 3) Y. Koren
IEEE Trans. on IECI, Vol. IECI-24, p. 145, May 1977.
- 4) Semiconductor Application Seminar
“PLLとその応用”アルプス・モトローラ・セミコンダクターズ(株)
- 5) J.E.Rathke IEEE IECI'77 Conference Proc., p. 65, Mar. 1977.
- 6) A. W. Moore IEEE Spectrum, p. 61, Apr. 1973.
- 7) B. K. Bose, K. J. Jentzen
IEEE IECI'77 Conference Proc., p. 164, Mar. 1977.
- 8) Jacob Tal
IEEE Trans. on IECI, Vol. IECI-24, p. 118, Feb. 1977.
- 9) D. H. Smithgall
IEEE Trans. on IECI, Vol. IECI-22, p. 487, Nov. 1975.
- 10) R. L. Labinger Control Engineering, p. 46, Feb. 1973.
- 11) G. T. Volpe
IEEE Trans. on AC, Vol. AC-15, p. 88, Feb. 1970.
- 12) P. C. Sen, M. MacDonald IEEE/IAS, p. 413, Mar. 1977.
- 13) W. L. Kenly, B. K. Bose
IEEE Trans. on IA, Vol. IA-12, p. 492, Sep./Oct. 1976.
- 14) V. Rajagopalan, D. Veillette, M. Provencher
IEEE IECI'77 Conference Proc., p. 13, Mar. 1977.
- 15) H. H. Chen
IEEE IECI'77 Conference Proc., p. 8, Mar. 1977.
- 16) M. Read, H. W. Mergler
IEEE IECI'77 Conference Proc., p. 211, Mar. 1977.
- 17) A. K. Lin, W. W. Koepsel
IEEE IECI'77 Conference Proc., p. 144, Mar. 1977.
- 18) P. Burger, S. Ronchinsky
IEEE IECI'77 Conference Proc., p. 159, Mar. 1977.
- 19) Y. Matsumoto
IEEE Trans. on IECI, Vol. IECI-23, p. 359, Nov. 1976.
- 20) V. I. John, D. J. Clarke
IEEE Trans. on IECI, Vol. IECI-23, p. 233, Aug. 1976.
- 21) 原島・羽根吉・松田
第16回SICE 学術講演会 1977年