

モータ制御をベースとしたエネルギー・情報・制御教育教材の開発

Development of Educational Materials on Energy, Information and Control, Based on Motor Control Technology

園田 敏勝¹⁾

Toshikatsu SONODA

久良 修郭²⁾

Nobuhiro KYURA

原谷 直実³⁾

Naomi HARATANI

平野 剛⁴⁾

Go HIRANO

松崎 隆哲⁵⁾

Takanori MATSUZAKI

Abstract : In recent years electrical energy has become the most commonly cited technological issue in resolving global environmental problems. Simultaneously, the importance of motors as sources of motive force continues to increase. In spite of this social environment, there is little significant discussion of appropriate direction for university-level education in electrical science. In our Electrical and Communication Engineering over the last few years, while teaching discrete courses in individual subjects, the authors have also engaged in serious discussion on how to teach various subjects so that they can be easily digested by students, including how electrical energy is utilized, how information can be utilized and how to implement it, and how to control sophisticated industrial equipment. In particular the authors focused on mechatronics technology, a field in which Japanese industry leads the world, and developed methods of teaching knowledge and technology related to the core motor control technology in a collaborative, interactive fashion. Concretely, the authors (a) designed and fabricated a power amplifier appropriate for educational usage, (b) designed and fabricated an embedded computer capable of utilizing a variety of motor control methods, and (c) developed software to facilitate a clearer understanding of motor control internal operation. This paper discusses the functions and implementation methods of the power amplifier in detail. The other items will be detailed in future papers.

キーワード : 教育教材、モータ制御、速度制御、電力増幅器、線形性、周波数特性、電流制御

Keywords : Educational material, motor control, speed control, power amplifier, linearity, frequency characteristics, current control

1. まえがき

今日、日本で教材用として市販されているモータ制御装置は、産業用メカトロニクス機器の制御方式と異なる面がある。例えば、増幅器出力の飽和やクロスオーバに基づく零近傍出力時の非線形性等によって、制御系には常に非線形な部分が生じてくる。また、制御対象の始動特性と停止特性とは、一般に異なった振舞をするので、これらは極力一致させなければならない。といった現象をしばしば経験する。また、市販されている専門書でモータ制御の詳細までを記述するのは、紙面の関係で望めない場合がある^{1),2)}。そのために学生は、授業で学んだ制御方式と産業用メカトロニクス機器の制御方式との関連に関する理解が困難になっている。

そこで、本稿では、モータ制御をベースとし、産業用ドライブシステムの制御方式を実装し、その中で、特に電力増幅器と密接に関係する種々の留意点をとり上げ、その制

御方式の機能と役割、効果等が現象として可視化できる教育教材の開発を目指す。

本稿で取扱うモータは、取り扱いと動作原理の説明が容易であり、かつ全てのモータ制御の基礎である永久磁石型の小型直流モータである。この直流モータを駆動する電源には、従来電源効率とコンピュータ制御の容易さからスイッチング電源を用いる場合が多かった。しかしながら、教材用としては、極めて精密なモータ制御に適し、理論と実際の対比及び可視化が容易であるアナログ電力増幅器を用いて構成した電源を用いることにする。そして、モータ制御を行う上で、アナログ電力増幅器に要求される具備条件とアナログ電力増幅器の設計指針を与えた上でいくつかの応用例を示すことにする。

2. 本稿で用いる単位系について

周知のように1,960年、第11回国際度量衡総会において、

- 1) 近畿大学産業理工学部電気通信工学科 特任教授 sonoda@fuk.kindai.ac.jp
- 2) 近畿大学産業理工学部電気通信工学科 元特任教授 kyura@fuk.kindai.ac.jp
- 3) 近畿大学産業理工学部電気通信工学科 教授 haratani@fuk.kindai.ac.jp
- 4) 近畿大学産業理工学部電気通信工学科 講師 hira@fuk.kindai.ac.jp
- 5) 近畿大学産業理工学部電気通信工学科 講師 takanori@fuk.kindai.ac.jp

世界共通の実用的な計量単位を使用することが決議されている。これに対して日本では、国際化の措置として、1,959年メートル単位系の使用が計量法で義務付けられている。そして、1,992年これまでの計量法を大改正し、国際的に合意されたSI単位系を全面的に採用した新たな計量法が公布されている。

従来、産業分野で多く使用されてきた重力単位系のSI化に対しては、移行措置や費用の面を考慮し1,999年9月30日までの最終猶予期間が与えられている。このような単位系の変遷に対し、本稿で目指す教材で用いる単位は、基本的にSI単位を用いることにする。しかしながら、今日に至るまで移行が進まず、産業界で定着している単位に対しては、一部SI単位から外れる場合がある。例えば、回転機器の回転角速度はrad/sで表記すべきだが、1分間当たりの回転数rpmで、またモータの粘性摩擦係数もkgf・m/rpmを用いる場合がある。

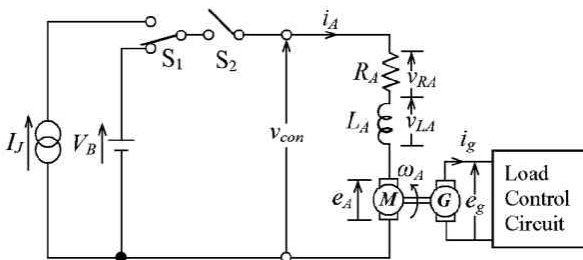


図1 永久磁石型小型直流モータを直流電圧源或いは電流源で駆動する場合の等価回路

3. 永久磁石型小型直流モータ

図1は、永久磁石型の小型直流モータMを直流電圧源 V_B 或いは電流源 I_J に繋いで運転する場合の等価回路である。いま、スイッチ S_1 を V_B 側に繋ぎ $t=0$ で S_2 を閉じるとキルヒホッフの電圧則より(1), (2)式が得られ、(3)式の運動方程式が得られる。

$$V_B - R_A i_A - L_A \frac{di_A}{dt} - K_e \omega_A = 0 \quad (1)$$

$$V_B - v_{RA} - v_{LA} - e_A = 0 \quad (2)$$

$$J_M \frac{d\omega_A}{dt} + D_M \omega_A + f(\omega_A) = K_t i_A \quad (3)$$

ここに

- i_A : 電機子電流
- R_A : 電機子抵抗
- L_A : 電機子インダクタンス
- K_e : 誘起電圧定数

- ω_A : 電機子の回転角速度
- e_A : 電機子の速度起電力
- J_M : モータの慣性モーメント
- D_M : モータの粘性摩擦係数
- $f(\omega_A)$: クーロン摩擦
- K_t : トルク定数

S_2 を閉じて十分時間が経過した定常状態では、(1)~(3)式は(4)~(6)式となる。

$$V_B - R_A I_A - K_e \omega_A = 0 \quad (4)$$

$$V_B - V_{RA} - E_A = 0 \quad (5)$$

$$D_M \omega_A + f(\omega_A) = K_t I_A \quad (6)$$

ここに

- I_A : i_A の平均値
- V_{RA} : v_{RA} の平均値
- E_A : e_A の平均値

ここで、(4)式と(7)式の関係を用いると、定常状態における電機子の回転数 n は、多くの教科書に示されている(8)式となる。この(8)式は、仮に電機子抵抗が小さく誘起電圧定数が電機子反作用等の影響を受けずに一意に定まれば³⁾、直流モータの回転数は、電源電圧の大きさに比例する定速度回転機となる⁴⁾。

$$\omega_A = 2\pi n \quad (7)$$

$$n = \frac{V_B - R_A I_A}{2\pi K_e} \quad (8)$$

次に、モータの発生トルクは(3)式に示す $K_t i_A$ であることから、図1に示す直流電圧 V_B を電流源 I_J に置きかえてスイッチ S_2 を投入すると(9)式の運動方程式が得られる。ここで、 $D_M \omega_A$ と $f(\omega_A)$ は共に十分に小さく無視すると ω_A は、 I_J を時間積分した時間的に単調に増大する(10)式となる。ここに、 $\omega_{A,0}$ は、スイッチ S_2 を投入する直前の電機子の回転角速度である。

$$J_M \frac{d\omega_A}{dt} + D_M \omega_A + f(\omega_A) = K_t I_J \quad (9)$$

$$\omega_A = \frac{K_t}{J_M} \int I_J dt + \omega_{A,0} \quad (10)$$

また、定常状態における軸出力 P_{SH} は、 D_M と $f(\omega_A)$ は共に小さく無視すると(11)式となる。

$$P_{SH} = \omega_A K_t I_A \quad (11)$$

表1は、教材に用いる直流モータの仕様であり、表2は、そのモータを運転する際にアナログ電力増幅器に要求される具備条件をまとめたものである。

表1 直流モータの仕様

定格電圧 V_{rate}	25 [V]
定格電流 I_{rate}	3.9 [A]
電機子抵抗 R_A	1.1 [Ω]
電機子インダクタンス L_A	2.2 [mH]
瞬時最大電流 $I_{i,m}$	19.5 [A]
定格回転速度 n_{rate}	3,000 [rpm]
定格トルク T_{rate}	0.191 [N・m]
慣性モーメント J_M	0.157×10^{-4} [kgf・m・s ²]
定格出力 P_{rate}	60 [W]

表2 アナログ電力増幅器に要求される具備条件

項目	具備条件
最大出力電圧 $v_{out,m}$	$v_{out,m} > R_A i_A - L_A \frac{di_A}{dt} - K_e \omega_A \quad (12)$ (12)式を満たす最大振幅が必要
最大出力電圧 v_{max} の制限	アナログ電力増幅器の入力側で行う
最大出力電流 $i_{out,m}$	直流モータの最大許容電流程度
最大出力電流 i_{max} の制限	直流モータの瞬時最大許容電流に設定可能な機能を有すること
周波数特性 f_{char}	理想的には、(12)式の $L_A \frac{di_A}{dt}$ に追従可能な周波数特性を有する必要がある。しかしながら、 J_M を考えると直流から数 kHz もあれば十分である

4. モータ制御用アナログ電力増幅器

〈4.1〉アナログ電力増幅器の仕様

表3は、表2に示す具備条件を満たすに必要なアナログ電力増幅器の仕様であり、この増幅器の設計指針を示して製作を行う。

〈4.2〉アナログ電力増幅器の設計指針

次は、アナログ電力増幅器を設計・製作する際の指針である。

- (a) 用いる電子部品は、基本的に市販されているものを用いる
- (b) 増幅器を駆動する電源は、一般家庭に供給されている

表3 アナログ電力増幅器の仕様

最大出力電圧 $v_{out,m}$	± 30 [V] だが、今回は製作費用の関係で ± 12 V とする
最大出力電圧 v_{max} の制限	入力側で行う
最大出力電流 $i_{out,m}$	20 [A]
最大出力電流 i_{max} の制限	3~20 [A] に設定可能
周波数特性	直流~数kHz

商用電源(100/110 V, 50/60 Hz)とする

- (c) 増幅器に用いるOPアンプを動作させる直流電源 (± 15 V) は、簡単のためシリーズレギュレータを用いる
- (d) 増幅器は、高ゲインのOPアンプと電流増幅用のバイポーラトランジスタをエミッタフロアとした回路とを組み合わせて構成する
- (e) 増幅器使用上の安全性から電流増幅用のバイポーラトランジスタが過大出力電流によって熱暴走しないようにする
- (f) 増幅器の出力電圧と出力電流は、共に直流モータを駆動する性能を有すること
- (g) 増幅器の出力インピーダンスは、理想的には零だが、モータの特性に大きな影響を与えずに直流モータを駆動する性能を有すること
- (h) モータを駆動する際、種々の特性を把握できるようにするため、最大出力電流 i_{max} の制限回路を内蔵すること
- (i) 入力インピーダンスは、高く定ゲインの同相増幅器とする

〈4.3〉製作したアナログ電力増幅器

図2は、表3に示すアナログ電力増幅器の仕様に基づいて構成した増幅器の回路図で、写真1は、その外観である。ここで、各電子部品の機能を概説すると次のようになる。

- (1) IC₃: 高ゲインのOPアンプで、電力増幅器の誤差アンプとして動作する
- (2) 電力増幅器の誤差アンプは、IC₃, R₂₂, R₂₃, R₂₄, C₂₁で構成された1次遅れの回路である。ここでR₂₃は、外付け抵抗であり通常は繋がらない。R₂₃を外付けにした理由は、仮に誤差アンプのゲインが小さくなった時、電力増幅器はどのような電気的特性(線形性と周波数特性)になるかを調べるためのものである
- (3) Tr1周辺: 出力段の電流増幅用バイポーラトランジスタに流すバイアス電流の調整用である
- (4) Tr4, Tr5は、並列接続したエミッタホロワで、共に電流負帰還を施している。そのため、出力電流は、両トラ

- ンジスタに等分に分担されやすくなる
- (5) Tr2：並列接続したエミッタホロワTr4, Tr5とダーリントン接続されている
 - (6) Tr8部：正方向出力電流のリミッタ回路である。R62は電流検出抵抗であり、R62の電圧降下を分圧した電圧V_{BE}が0.7V近傍に達するとTr8がONして、出力電流を制限するように動作する
 - (7) R_d：実際にモータに流れる電流を検出するための電流検出抵抗である
 - (8) 増幅器ゲイン:IC₃の開ループゲインは、150dB~160dB程度あることから、外付け抵抗R₂₃を繋がない場合には、増幅器の伝達関数A_{AMP}は、(13)式となる。

$$A_{AMP} = 1 + \frac{R_{23}}{R_{22}} \frac{1}{1 + C_{21}R_{23}s} \quad (13)$$

図2の左上部に示す2個のOPアンプIC₁, IC₂周辺回路は、産業用ドライブシステムの制御方式の多くで採用されているもので、直流モータをコンピュータ制御するのに適する。この回路の動作の概ねは、次のようになる。

IC₁のバッファ回路(+端子)に繋がる抵抗R_f左端に入力されたデューティ比(T_{on}/T)信号は、C_f, R_fで平滑されてIC₂部の一次遅れ回路に入力されている。また、(T_{on}/

T)=1/2でモータが軸から見て時計方向(正回転)或いは反時計方向(逆回転)に回転せずに静止するように-15VをR₁₃のポテンショ抵抗で分圧してIC₂に入力している。その結果、(T_{on}/T)>1/2で正回転、(T_{on}/T)<1/2では逆回転させることができる。

(4.4) アナログ電力増幅器の特性

図3は、製作した増幅器の出力電圧の最大値を10V{=7.07V(rms)}で測定した周波数特性である。無負荷時の帯域幅は、80kHzで利得は20dBである。これに対して、出力端子に2Ωの負荷抵抗を繋いだ1/2負荷時では19.5dBと

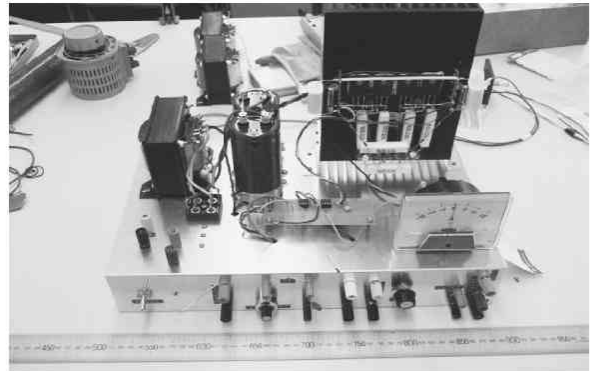


写真1 電力増幅器の外観

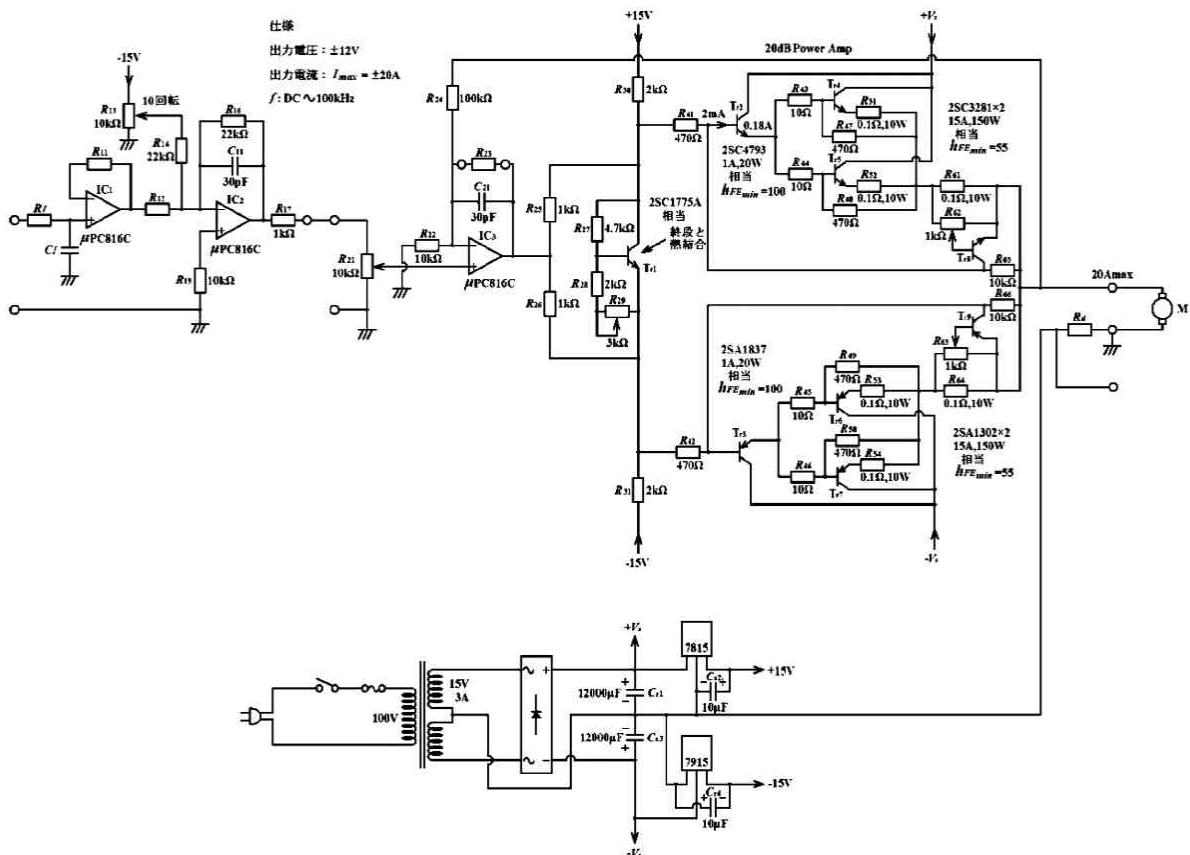


図2 市販演算増幅器とトランジスタを用いて構成した電力増幅器回路

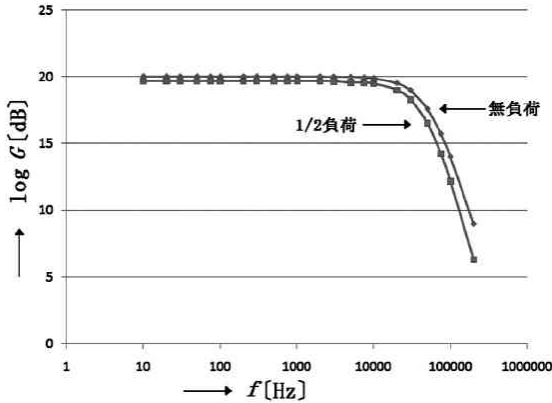


図3 製作した電力増幅器の周波数特性

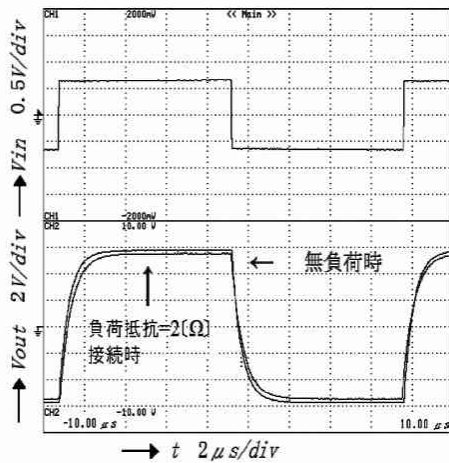


図4 製作した電力増幅器のステップ応答

なり、帯域幅は、70kHzに悪化している。また、図4は矩形波入力に対するステップ応答である。応答性には、負荷依存性があり正・負の入力電圧に対してそれぞれ2 μ s程度の遅れで応答している。しかしながら、製作した電力増幅器は、表1に示す直流モータを教材用として駆動するには、十分な性能である。

5. アナログ電力増幅器の応用例

図5は、表1に示す直流モータより一回り大きい表4に示す永久磁石付き直流モータを最大出力電圧が ± 30 Vの電力増幅器を用いて駆動した場合の動作波形例である。

(a)図は、電力増幅器の電流リミッタが動作しない程度のステップ電圧を印加している。増幅器入力信号が負から正、正から負に切り換わった瞬間 i_A は大きく変化し最大で25Aに達している。これは、切り換わった瞬間における(1)式に示す $K_e \omega_A$ の極性が異なっているためである。つまり、入力信号が切り換わる瞬間における初期回転角速度 $\omega_{A,0}$ を(1)式に反映させた上での(1)式を満足する i_A が流れることにな

表4 実験に用いた直流モータの仕様

定格電圧 V_{rate}	24 [V]
定格電流 I_{rate}	8 [A]
定格回転数 n_{rate}	2,500 [rpm]
定格トルク T_{rate}	0.47 [N \cdot m]
慣性モーメント J_M	1×10^{-3} [kgf \cdot m \cdot s 2]
定格出力 P_{rate}	120 [W]

る。定常回転数なるとモータを無負荷運転に要する i_A の大きさになっており、0.5A程度である。なおここでは、モータにステップ電圧を印加したが、これは極めて危険な運転法である。産業界や学生実験では、図1に示す電機子と直列に始動抵抗 R_{start} を挿入し、回転数の増加に伴い R_{start} を徐々に小さくし最後は短絡させている⁴⁾。

モータの回転数検出信号 n_{det} は、正・逆回転の極性がなく単に回転数のみを検出する方式のセンサを用いた。そこで、図5の中に正・逆回転を明示した。図から明らかなように、概ね0.2秒で回転方向が変わっている。本来、正回転から逆回転に転じる瞬間は、 $n_{det}=0$ となるはずであるが、なっていないのは、センサの応答性の悪さである。

モータの端子電圧 v_{con} は、パワーアンプの内部インピーダンスと図2に示す電流検出抵抗 R_d (= 0.1 Ω)が共に零であれば、アンプ入力電圧 v_{in} と同じ方形波になる。

図5(b)は、 v_{in} を更大きくした場合の動作波形例である。 v_{in} の極性が変わった瞬間 i_A は、 ± 28 A程度の大きさに抑えられている。これは、パワーアンプに内蔵する電流リミッタ回路が動作したためである。

図6は、図1に示す電流源 I_f で駆動した場合の例である。なお、製作した電力増幅器を電流源として動作させる方法については、文献(5-7)に示しているので、ここでの説明は割愛する。

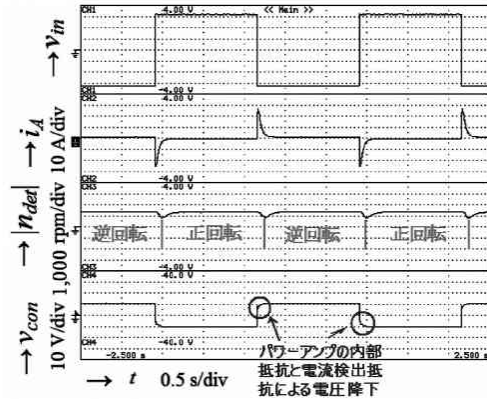
ここで、モータの粘性摩擦係数 D_M とクーロン摩擦 $f(\omega_A)$ は共に小さく無視すると、図6に示す n_{det} は、電流源で駆動しているので、(10)式に示すように ω_A は、 I_f を時間積分した時間的に単調に増大することになる。

従って、図6に示す回転検出信号 n_{det} の時間変化 Δt に対する回転数の変化 Δn に着目すると理論的には、電機子の慣性モーメント J_M が求まるはずである。具体的に求めてみると次の(A),(B)の2つのモードになっているのが確認できる。

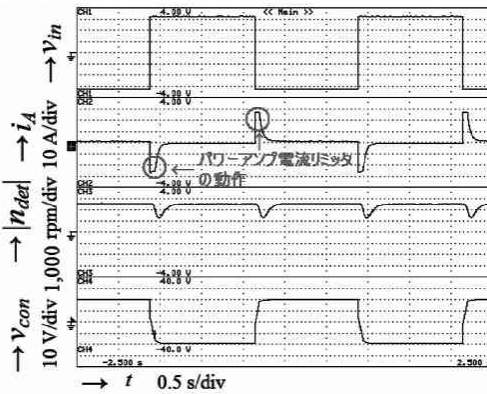
(A) 回転数が零から正或いは逆回転方向に加速している
場合： $\Delta n / \Delta t \doteq 4,100$ rpm/s

(B) 正・逆の最大回転数から零になるまでの減速している
場合： $\Delta n / \Delta t \doteq 7,350$ rpm/s

本来、 J_M は、電機子の材質と構造に依存して定まると考えていたが、加速時と減速時とでは異なる結果になった。



(a) 電流リミッタが動作しない大きさの電圧を印加した場合の例



(b) 電流リミッタが動作した場合の例

図5 直流モータを電力増幅器で駆動した場合の動作波形例

この理由については、モータの粘性摩擦係数 D_M とクーロン摩擦 $f(\omega_A)$ の影響ではないかと考えている。

6. まとめ

本稿では、我が国の産業分野で世界をリードしているメカトロニクス技術の中心的な役割を担っている「モータ制御技術」の教材に適した電力増幅器について示した。

製作した電力増幅器は、ブラックボックス化していないために、直流モータに供給する電圧・電流波形等の細部に亘って直接観測することができる。将来的には、モータをコンピュータ制御した場合の入力信号に対する各部の電圧・電流波形等の可視化を容易にしたい。また、直流モータを電圧源に近い電源で駆動した場合と電流源で駆動した場合の例を示し、電気系と機械系の振舞の特徴も示した。しかしながら、実験データから慣性モーメントを求める手法に関しては、粘性摩擦係数等が関与して課題を残した。今後は、モータの制御方法を種々実現するための組込コンピュータ部の詳細、モータ制御系内部の動きを分かり易くするためのソフトウェアの構成等について報告する予定で

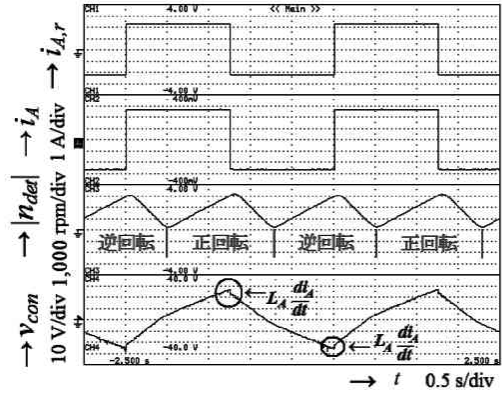


図6 直流モータを電流源で駆動した場合の動作波形例

ある。

本学M2の宗貞君とM1の萩原君には、論文作成にご協力を頂いた、ここに感謝の意を表す。

文献

- 1) 高森 年 編著「新世代工学シリーズ メカトロニクス」、平成11年3月10日発行、(株) オーム社
- 2) 石島 勝「小型ACサーボ・モータの制御回路設計」、2009年3月1日発行、CQ出版(株)
- 3) 唐原宏行・田中俊輔・園田敏勝「電動機におけるトルク定数と誘起電圧定数に関する一検討」、信学技報 IEICE Technical Report Vol.109, No.241, pp.99-103、09/10 盛岡
- 4) 宮入 庄太「大学講座 最新電気機器学」、昭和42年10月25日発行、p.44、丸善(株)
- 5) 園田敏勝・上田隆三「B-Hループの励磁電源依存性について」、電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-89-197、1989-12-1、長崎
- 6) 山本 哲也・田中 清貴・園田 敏勝「変圧器を用いた交流電圧制御回路の高精度化」、電学論A, Vol.128, No.6, pp.373-378、2008-6
- 7) 萩原慶一・園田敏勝「小型電動機用負荷装置の構成」、電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-10-128、2010-10-1、福岡