

電気電子工学科の情報・通信実験における実験項目 「直流モータの基本特性と制御」に関する検討

Study on Basic Characteristics and Control of a DC Motor

袴田 吉朗*

Yoshiro HAKAMATA

山本 健司**

Kenji YAMAMOTO

Abstract: In the Information and Electronic Experiment class of the Electrical and Electronic Engineering department, an experimental task on basic characteristics of DC motor and the control system has been performed more than about ten years. In the paper, the basic idea of the experiments is shown. After that, how to determine the load torque, which is applied to the DC motor with a generator and resistor, and the error of which had been the issue required to be improved in the task, is studied. Because the brush resistance of the generator has been identified as the major source of the torque error, a compensation circuit for the voltage drop across the resistance is proposed, which consists of an operational amplifier and several resistors and has proved to be able to successfully compensate the error in enough precision through simulations and experiments on the setup.

1. はじめに

電気電子工学科では3年生の情報・通信コースにおけるコース実験として、これまで「直流モータの基本特性と制御」と題して小型モータに関する実験を行わせてきた。この実験では以下に示す6項目の測定を行なっている。

- 項目① 直流モータの逆起電力,
- 項目② モータを単独で回転させた場合の供給電圧と回転数,
- 項目③ モータと発電機を連結して回転させた場合の供給電圧と回転数の関係の測定と発電定数,
- 項目④ モータと発電機を連結し、モータの負荷を増大させた場合の、負荷電流と回転数(定速制御のない場合),
- 項目⑤ モータと発電機を連結し、モータの負荷を増大させた場合の、負荷電流と回転数(定速制御を用いた場合),
- 項目⑥ モータを低速から高速に切り替えた場合の過渡応答.

使用しているモータには12パルス/回転のパルス発生器が装備されておりこれより回転数を求め、項目②において供給電圧-回転数の特性を測定している。項目③では、同じ特性のモータをフレキシブルカップリングにより連結して発電機として回転させ、回転数と出力電圧の関係いわゆる発電定数の測定を行っている。この発電定数と発電機の出力電圧を用いて項目④~項目⑥におけるモータの回転数を求めている。

なお、項目④および⑤においてモータの負荷電流を増大させるために、マイクロメータを用いてモータのシャフトにテフロン材を押しつけて物理的な負荷を加えている。発電機は単にタコジェネレータの役目を果たし、回転数の検出を専ら行っているだけであり、負荷の増大には直接関与していない。最初のうちはこの方法で特に問題がなかった。

しかしながら実験開始以来10年に及ぶ年月が経過したことにより、テフロン材の劣化が進み、マイクロメータの緩み等の不具合が日立つようになってきた。ここ数年項目④および⑤の実験において実験中にモータの電流が変動する傾向が見られ、また良好な再現性を得にくい傾向が顕著になってきた。以上の課題を解決するために始めたのが今回の検討である。

2015年1月27日受理

***理工学部 電気電子工学科

本論文では、発電機の負荷として抵抗負荷を用いる場合の検討結果を示す。抵抗負荷を使用すると、安定な特性を実現できる。一方フィードバックループ形成時に検出される誤差電圧がモータの回転数変化に対応する電圧と、発電機の電機子抵抗における電圧降下の和となる。このため何も対策を施さないとモータの回転数を正しく検出できなくなり、良好な定速制御を実現できない。本論文では、この課題を解決するための回路を提案し、実験によりこの回路が正しく動作することを示す。

2. 実験システムの特性

2.1 実験システムの回路図

従来から使用してきた実験システムの回路図を図2.1に示す。電源電圧は±15Vである。定速動作時には外部直流電源からモータ駆動用のトランジスタ 2SD880 を介してモータに電源を加える。モータ単独の試験は、SW1 および SW2 を切り替えて外部直流電源(Ext-V)あるいはAC100Vからトランスを介してモータに電圧を加えている。なお実験に先立ちフィインタを構成する電解コンデンサを新品の無極性コンデンサに交換した。

2.2 項目②および項目③の測定結果

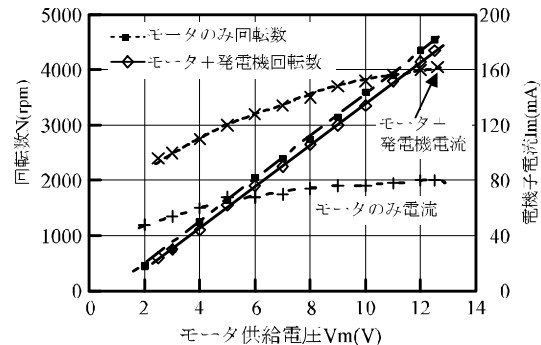


図2.2 小型モータにおける回転数の測定結果

項目②ではモータ単独に電圧を加えた場合の供給電圧-回転数特性を、項目③においてはモータと発電機をフレキシブルカップリングにより連結して回転させた場合の供給電圧-回転数特性を測定する。測定結果を図2.2に示す。回転数はモータに接続されているパルス発生器出力(12パルス/回転)を、図示していないFV変換器を用いて電圧に変換し測定する。FV変換器出力端子(回転数測定端子J1)の出力電圧 V_c (V)と回転数 N (rpm)は次式により計算する。

$$N = 526 \times V_c \text{ (rpm)} \quad (2.1)$$

2.3 モータ+発電機の構成における回転数 N と発電機出力電圧 V_g の測定結果

項目③の測定では、発電機出力電圧 V_g と回転数 N の関係も同時に測定している。測定結果を図2.3に示す。これより発電機定数を 0.00225 V/rpm (0.0215 V/(rad/s))とした。

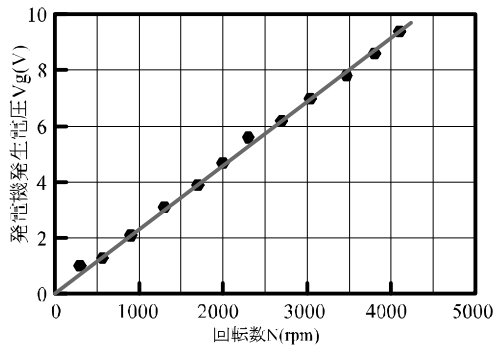


図2.3 発電定数の測定結果

2.4 モータの負荷電流依存性(項目④および⑤)の測定結果

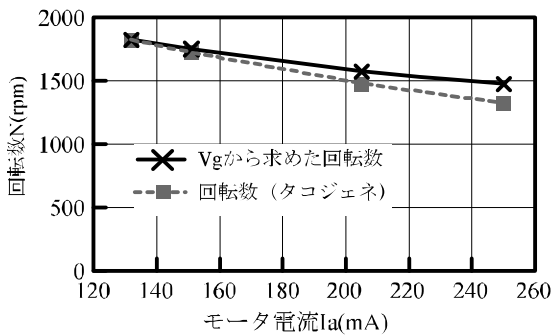


図2.4 物理負荷印加時の回転数(定速制御なし)

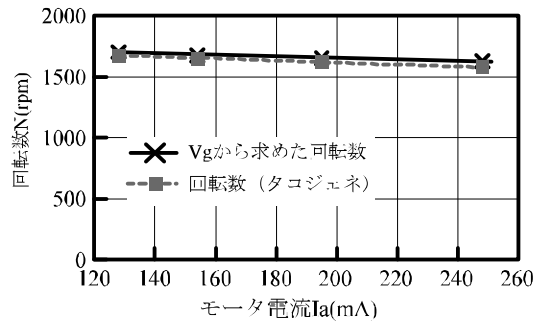


図2.5 物理負荷印加時の回転数(定速制御あり)

マイクロメータを用いてテフロン材をモータの軸に押しつけることによりシステムに物理的な負荷を加えた場合のモータの電機子電流-回転数の測定結果を図2.4, 2.5に示す。図2.4は定速制御の無い場合、図2.5は定速制御を行った場合である。速度指令電圧は低速であり、またスイッチSS4をONにしてシステムの利得を低利得に設定して測定した。

2.5 項目⑥の測定結果

本測定ではスイッチSS4をONにしてシステムの利得を低利得に設定し、速度指令スイッチSS1を低速→高速に切り替えて発電機出力電圧 V_g の測定を行った。結果を図2.6~2.8に示す。

図2.6は、図2.1の回路図においてSS2およびSS3を両方ともOFFとし、位相補償フィルタを未使用とした場合である。低速(1700rpm)から高速(3480rpm)に切り替えた時点で大きなオーバーシュートが観測されている。

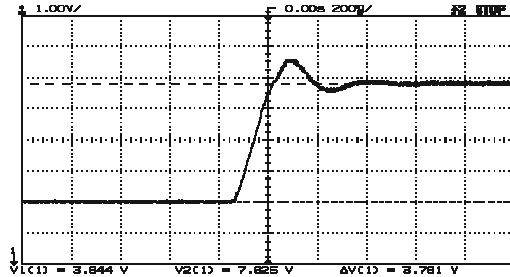


図2.6 位相フィルタ未使用時の過渡応答, 低利得

図2.7はSS2のみをONとし、位相進みフィルタをシステムに挿入した場合である。過補償の場合を想定しており、リングングの継続が観測されている。

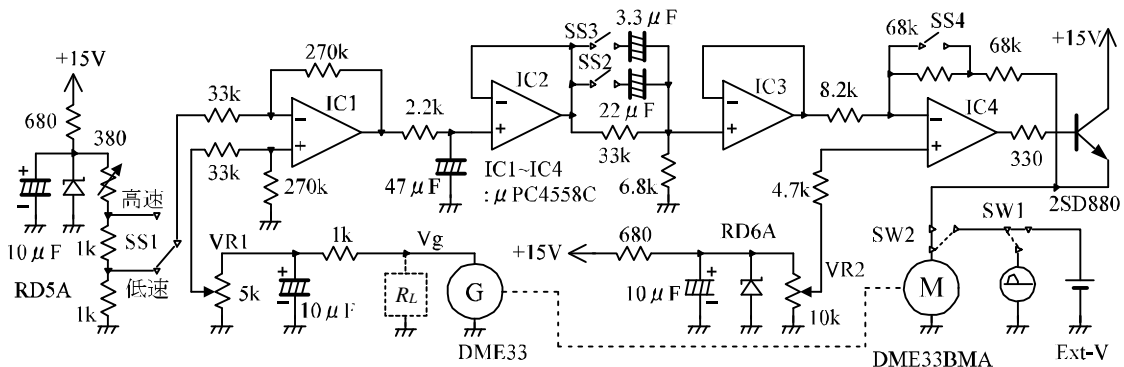


図2.1 モータ+発電機の構成における定速制御の回路図

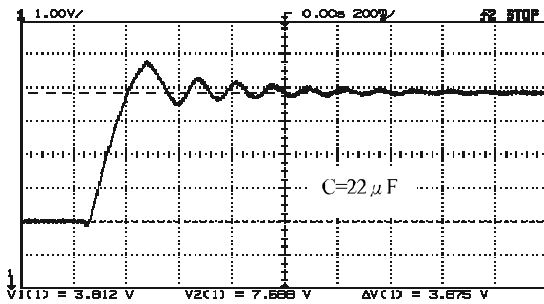


図 2.7 位相フィルタ使用時の過渡応答, 低利得

図 2.8 は SS3 のみを ON とし, 位相進みフィルタをシステムに挿入した場合である. 位相余裕を大きく取れる適切なフィルタを用いており, 良好な過渡応答が観測されている.

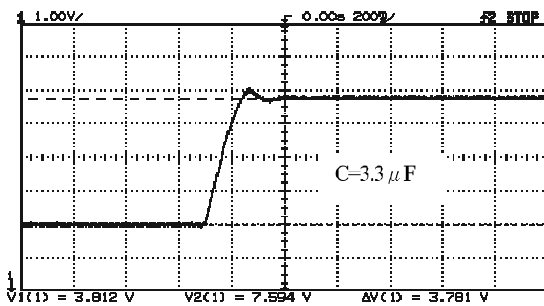


図 2.8 位相フィルタ使用時の過渡応答, 低利得

3. システムのシミュレーション

図 2.1 に示したシステムをシミュレーションにより評価することにした. そこでフリーで頒布されている C コンパイラ Bcc を用いてプログラムを作成した. また統合開発環境としてフリーの BccDev を, グラフ作成ソフトとしてフリーの GrWin グラフィックス・ライブラリを用いた.

3.1 シミュレーションのブロック構成

モータを定速制御する図 2.1 の回路をシミュレーションした. 文献²⁹⁾を参考にしてブロック図を作成し図 3.1 に示した. モータと発電機が連結されており, 発電機によるトルクがモータのトルクを打ち消す向きであることを考慮して発電機のトルク T_g

(x_{55}) をモータの発生トルク T (x_5) から差し引いた. 1 次遅れ要素系および位相進みフィルタ (leadlag) は 4 次のルンゲークッタ法により近似してシミュレーションした.

(1) 主な変数名と内容

- x_1 : モータ電機子電圧[V]
- x_3 : モータ電機子電流[A]
- x_5 : モータ発生トルク[Nm]
- x_8 : 回転角速度[rad/s]
- x_{22} : 発電機発生電圧[V]
- x_{44} : 発電機電機子電流 I_g [A]
- x_{55} : 発電機発生トルク[Nm]

(2) モータパラメータ

巻線抵抗 R_a	18 Ω
巻線インダクタンス	6 mH
逆起電力定数 K_E	0.0215 V/(rad/s)
トルク定数 K_T	0.0215 Nm/A
粘性制動係数 D	1.2×10^{-3} Nm/(rad/s)
機械的時定数 J/D	0.4 s

(3) 発電機パラメータ

巻線抵抗 R_g	実験により決定
その他のパラメータ	モータのパラメータと同じ

3.2 動作パラメータの抽出

(1) 発電定数 K_E , トルク定数 K_T

項目③の結果に基づく図 2.3 のモータ端子電圧が 3.0V~4.0V における値より 0.00225 V/rpm とした. シミュレーションでは $K_E=0.0215$ V/(rad/s), $K_T=0.0215$ Nm/A (=K) とした.

(2) モータの電機子抵抗 R_a , 電機子インダクタンス

過渡応答が収束しシステムが定常状態に落ち着いた時には次式の関係式が成り立つ.

$$R_a = \frac{V_m - K \times \omega}{I_a} \tag{3.1}$$

$$T = I_a K \tag{3.2}$$

$$I_g = \frac{K \omega}{R_g + R_L} \tag{3.3}$$

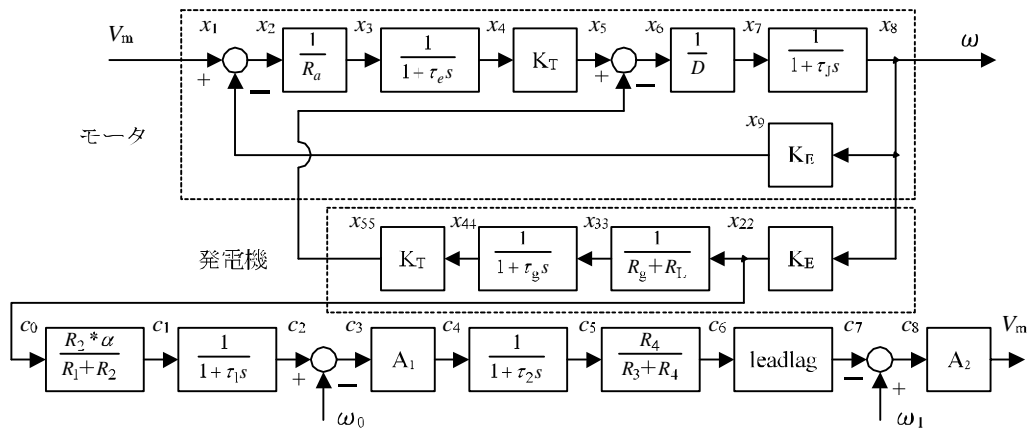


図 3.1 図 2.1 のシステム (モータの定速制御) のブロック図

$$T_g = \frac{K^2}{R_g + R_L} \omega \tag{3.4}$$

$$\omega = \frac{T - T_g}{D} \tag{3.5}$$

使用しているモータ DME33 のカタログデータには電機子抵抗 R_a の明示的な記述はない。図 2.2 の実測値に基づき(3.1)を用いて電機子抵抗 R_a を計算した結果を図 3.2 に示す。モータの定速制御の実験では「モータ+発電機」の構成を用いるので、この場合の電機子抵抗を用いるものとし R_a を 18Ω とした。

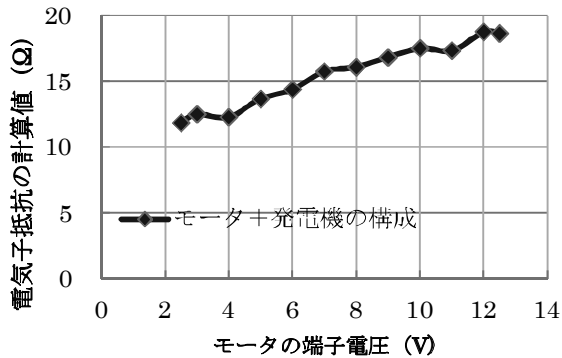


図3.2 電機子抵抗 R_a の計算値

なお電機子のインダクタンスおよび抵抗を実際に測定してみた。ブラシ付きの DC モータを用いており、整流子の影響を見るために、回転角度を 9° おきに変えて測定した。その結果、インダクタンスは約 $6mH$ であり安定して測定できた。一方電機子抵抗は $14\Omega \sim 140\Omega$ と大きくばらついた。

(3) 粘性係数の計算

(3.1)~(3.4)を用いて計算した結果が図 3.3 である。粘性係数の値はモータに加える端子電圧 V_m の値により変化している。速度指令電圧を低速に設定した場合、実験に使用したモータの回転数は約 $2000rpm$ であり、このときのモータ端子電圧 V_m は約 $6V$ である。これより粘性係数の値を $D=1.5 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-5} Nm/(rad/s)$ とした。

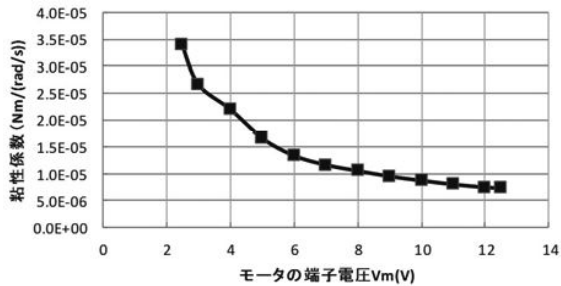


図3.3 モータの端子電圧 V_m (V)

(4) 慣性モーメント J と粘性係数 D の比 J/D

図 2.1 の回路図において IC4 のマイナス入力端子に接続されている抵抗 $8.2k\Omega$ の接続を IC3 側で切り、 $8.2k\Omega$ の抵抗に同数発生器を接続してステップ入力を加え、発電機の出力電圧 V_g を測

定した。その測定結果を図 3.4 に示す。CH2 が入力電圧、CH1 が発電機の出力電圧 V_g である。これにより時定数は $0.1s$ であった。この値はサーボアナライザを用いて測定した $3dB$ 遮断周波数 $1.6Hz$ と一致していることを確認している。

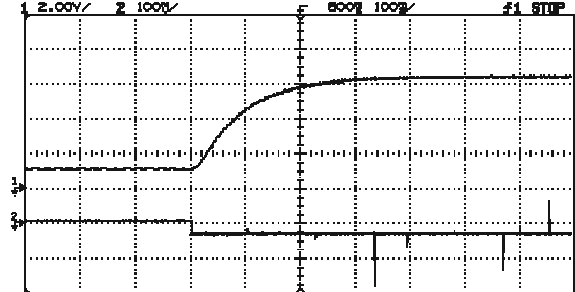


図 3.4 モータ+発電機対向のステップ応答 (上 CH1 : 発電機出力電圧, 下 CH2 : 入力電圧)

3.3 シミュレーション結果

(1) 過渡応答

- ・ 第1 差動増幅器の利得 8.2
- ・ 第2 差動増幅器の利得 8.3 (低利得)
- ・ 速度指令電圧 (低速) 2.1 V
- ・ 位相補償フィルタ スイッチにより切り替え
- ・ 発電機の負荷 6000Ω
- ・ VR1 の設定値 α 0.548
- ・ 時間の刻み 0.0005 s
- ・ シミュレーション時間 5 s

以上の条件に設定し、フィードバックを掛けた状態で開始 2s 後に速度指令電圧を低速→高速に切り替えて過渡応答をシミュレーションした。

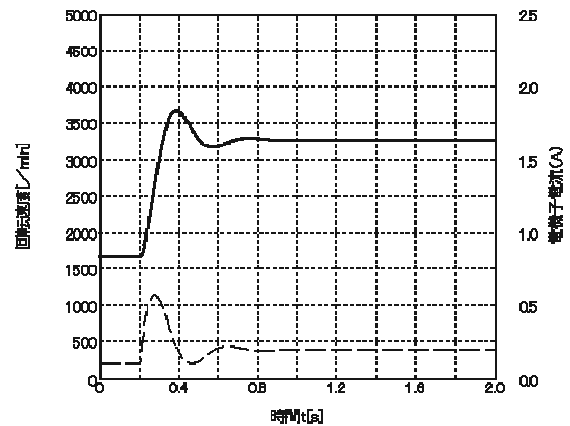


図 3.5 ブラシ付き DC モータのシミュレーション結果

図 3.5 はスイッチ SS2 および SS3 を両方とも ON とし、位相進みフィルタを使用しない場合の特性である。図 2.6 の実測値と比較するとほぼ同様の波形が得られており、良好にシミュレートできていることが分かる。

図 3.6 は SS2 のみを ON とし、過補償となる位相進みフィル

タを挿入した場合である。図 2.7 の実測値と比較すると、リングが過剰であり、また固有振動数が小さく、必ずしも実測値を十分にシミュレートすることができなかった。

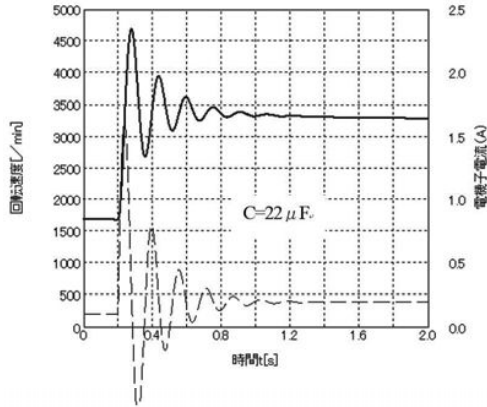


図 3.6 ブラシ付き DC モータのシミュレーション結果

図 3.7 は SS3 のみを ON とし、適切な位相進みフィルタを挿入した場合のシミュレーションである。図 2.8 の実測値と比較すると、立ち上がり時間がやや短いものの比較的良好な波形に近似できている。

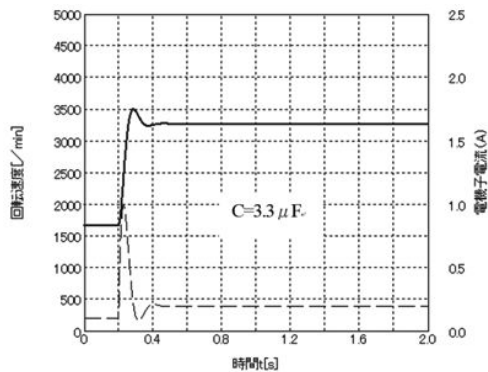


図 3.7 ブラシ付き DC モータのシミュレーション結果

(2) 回転数-負荷電流特性のシミュレーション

以下の条件下で発電機に 6000 Ω, 100 Ω, 50 Ω, 30 Ω, 20 Ω, 10 Ω の抵抗負荷を加えてシミュレーションを実施した。これ以外は、今までに述べた条件と同一である。

- ① フィードバックなし時
 - ・ モータ印加電圧 6.0 V
- ② フィードバックあり時
 - ・ 速度指令電圧 低速
 - ・ 第 2 オペンプ利得 16.6 (高利得)
 - ・ 位相補償フィルタ C=3.3 μF に設定, 最適過渡応答状態
- ② シミュレーション時間 5 s

結果を図 3.8 に示す。N1(rpm)および Ig(mA)はフィードバックをかけない場合の回転数およびモータの電機子電流である。

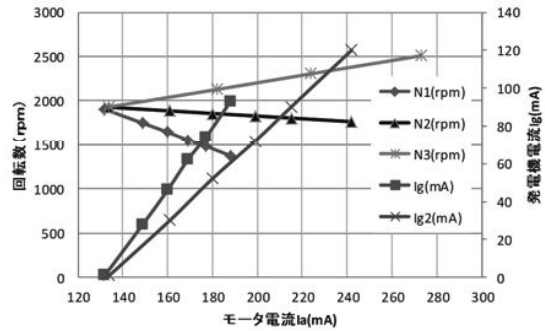


図 3.8 電機子電流 I_a の変化に対する回転数の変化

$$(3.1)より \frac{d\omega}{dI} = -\frac{R_a}{K}$$

を rpm に直して考えると $-9.5rpm/mA$ であり、 R_a/K の値にほぼ一致している。また N2(rpm)および Ig2(mA)は、電機子抵抗における電圧降下を含まない発電機の発生電圧そのものを検出できたものと仮定して NFB をかけた場合の回転数およびモータの電機子電流である。この場合にはモータ電流の増加に対する回転数の低下割合は 帰還量分の 1 になる。図 3.1 のブロック図では直流におけるループ利得は 5.3 (帰還量 6.3) であり、一方回転数の低下割合は $-1.5rpm/mA$ であるのでほぼ計算通りである。

N3(rpm)は発電機の電機子抵抗による電圧降下を考慮して図 3.9 のように検出電圧を x22 から x44 に変更し実際の回路に合わせた場合である。発電機の電機子抵抗 R_g による電圧降下のため、過剰に低い電圧が検出される。この検出された電圧はモータの回転数を正しく反映していないので、このため負荷電流の増大に伴って回転数が増大し、図 2.5 に示した現実の定速制御の測定結果とは異なる結果になっている。

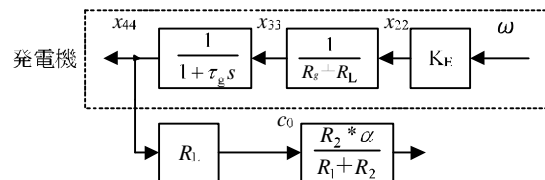


図 3.9 電機子抵抗の電圧降下を考慮したブロック図 (一部)

低速時におけるモータ電流の最大値は $R_g=10\Omega$ 時に 0.2A であり、この時の消費電力は 0.7W である。またこのとき発電機の電流は 0.12A であり、消費電力は 0.26W である。負荷抵抗の電力は 0.14W である。

一方速度指令値を高速にした時には、モータ電流の最大値は $R_g=10\Omega$ 時に 0.4A となり、消費電力は 2.9W になった。またこのとき発電機の電流は 0.25A であり、消費電力は 1.1W である。負荷抵抗の電力は 0.63W である。

モータのカタログでは定格電流が 0.42A, 3700rpm となっており、また従来の実験でもモータ電流を 0.5A まで流しているもので、この値であれば特に問題はないと思われる。しかしながらモータ巻線の焼損の危険を極力避けるために、速度指令値を低速に設定して実験を進めることにした。

4. 発電機の電機子電圧降下を発電機出力電圧に加算する方法

4.1 抵抗負荷を用いる場合に生ずる不具合の解決方法

発電機に抵抗負荷を接続してモータに負荷を加えると、発電機の電機子抵抗 R_g によって電圧降下が生ずるため、発電機出力電圧として過剰に低い電圧が検出される。この電圧はモータの回転数を正しく反映した電圧ではないので、NFB をかけると負荷電流が増大しても回転数が一定になる定速制御が本来行われる筈であるが、逆に回転数が増大してしまうと言う不具合を生ずる。これを解決するには以下の方法が考えられる。

- ① 発電機は負荷を加えることに専念させ、モータに装備されているタコジェネレータ出力を用いてNFBをかける。
- ② 電機子抵抗 R_g と等しい抵抗を抵抗負荷 R_L に直列接続し、その電圧降下を発電機出力に加算することにより、 R_g において電圧降下する以前の発電機出力を得てこれを NFB に使用する。

以下後者の方法に関する検討を示す。

4.2 回路構成

図 4.1 に回路構成を示す。点線で囲った部分が既存回路に追加する部分であり、非反転の加算回路になっている。抵抗 R の値は負荷抵抗 R_L (100Ω~10Ω) に比べて十分に大きい必要があり、ここでは 18kΩ を用いた。

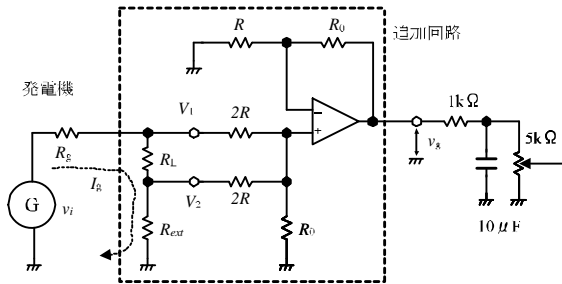


図 4.1 非反転加算回路を適用した回路

図 4.1 において発電機～負荷抵抗 R_L ～外付けの抵抗 R_{ext} を流れる電流 I_g がオペアンプには流れないものとすれば次式が成り立つ。

$$V_1 = v_i \times \frac{R_L + R_{ext}}{R_g + R_L + R_{ext}} \tag{4.1}$$

$$V_2 = v_i \times \frac{R_{ext}}{R_g + R_L + R_{ext}} \tag{4.2}$$

$$V_1 + V_2 = v_i \times \frac{R_L + 2R_{ext}}{R_g + R_L + R_{ext}} \tag{4.3}$$

したがって $R_{ext} = R_g$ にできれば、 $V_1 + V_2 = v_i$ を実現できる。なおオペアンプにおける+端子の電圧 v_p は、オペアンプの入力インピーダンスを ∞ であるものとすれば次式で表される。

$$\frac{V_1 - v_p}{2R} + \frac{V_2 - v_p}{2R} = \frac{v_p}{R_0}$$

$$\left(1 + \frac{R}{R_0}\right) v_p = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$\therefore v_p = \frac{V_1 + V_2}{2} \frac{R_0}{R + R_0} \tag{4.4}$$

一方周知のようにオペアンプの一端子において

$$v_g = \left(\frac{R + R_0}{R}\right) v_p \tag{4.5}$$

が成り立つので、結局次式が成立する。

$$v_g = \left(\frac{R + R_0}{R}\right) \frac{R_0}{R + R_0} \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{R_0}{R} \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{4.6}$$

したがって以後 $R_0 = 2R = 36k\Omega$ とし、利得を 1 として検討を進めた。

4.3 発電機における電機子抵抗 R_g の推定

図 4.1 に示す回路において $R \gg R_g$ であり、従ってオペアンプ回路には電流が流れないと考えて良い。したがって発電機回路において次式が成り立つ。

$$v_i - V_1 = R_g \times I_g \tag{4.7}$$

また $v_i = K \times \omega$ であるから

$$K \times \omega - V_1 = R_g \times I_g \tag{4.8}$$

が抵抗負荷使用時における発電機回路の電圧-電流特性を表す式となる。

抵抗負荷 R_L を変えて発電機電流 I_g を増大させると、回転角速度 ω および発電機電圧 V_1 は低下する。したがって次式が成り立つ。

$$\Delta V_1 = R_g \times \Delta I_g + K \times \Delta \omega \tag{4.9}$$

(4.9)より以下が得られる。

$$\Delta \omega = 0 \text{ のとき } R_g = \frac{\Delta V_1}{\Delta I_g} \tag{4.10}$$

$$\Delta I_g = 0 \text{ のとき } K = \frac{\Delta V_1}{\Delta \omega} \tag{4.11}$$

$\Delta \omega = 0$ とし、外付けの抵抗 R_{ext} を 10Ω および 5Ω として発電機回路における電圧-電流特性を後述の抵抗負荷を用いて測定した。その結果を図 4.2 (1825rpm 一定) および図 4.3 (1923rpm 一定) に示した。

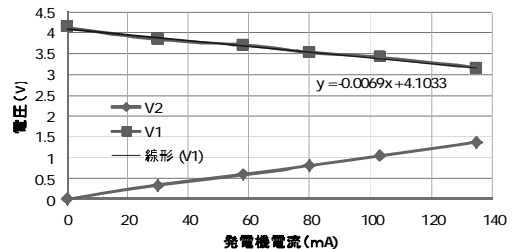


図 4.2 $\Delta \omega = 0$ 時の発電機電圧-電流特性, $R_{ext} = 10\Omega$

図 4.2, 4.3 の測定結果より回帰直線を求め、ブラシにおける電圧降下の影響を除くために回帰直線の傾きから発電機電機子抵抗 R_g を求めると各々 6.9Ω, 6.7Ω になった。これより発電機の電機子抵抗 R_g は 7Ω 程度であることが分かった。

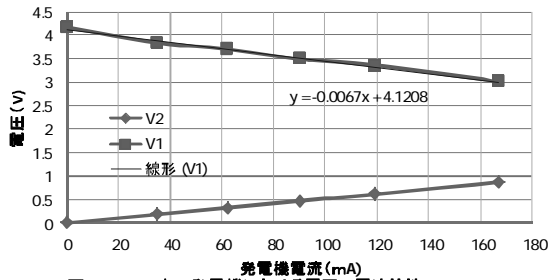


図 4.3 $\Delta\omega=0$ 時の発電機における電圧-電流特性, $R_{ext}=5\Omega$

次に $\Delta I_g=0$ ($I_g=50\text{mA}$ 一定) とし, 外付けの抵抗 $R_{ext}=6.8\Omega$ とし て発電機回路における電圧 V_1 -電流 I_g 特性を測定した. 結果を 図 4.4 に示す.

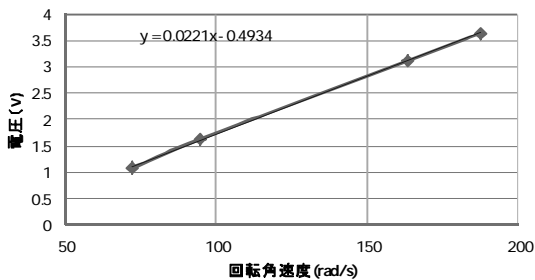


図 4.4 $\Delta I_g=0$ 時における ω -電圧 V_1 特性

回帰直線の傾きより発電定数は $0.0221\text{ V}/(\text{rad/s})$ である. 単位 を変換するとこの発電定数は $0.0023\text{ V}/\text{rpm}$ となり, 図 2.3 の 結果とほぼ一致した.

4.4 抵抗負荷と加算回路使用時における負荷電流特性の実測

(1) 加算回路および抵抗負荷の構成と負荷電流特性の実測

オペアンプ NJM4580D を使用して図 4.1 に示した加算回路を 試作した. 金属被膜抵抗を使用して $R_0=2R=36\text{k}\Omega$ とし, 利得を 1 とした. また 20Ω (10W) の抵抗を組み合わせて 10Ω , 20Ω , 40Ω および 80Ω の単位抵抗を作成し, スイッチを用いて切り替 えることにより $10\Omega\sim 150\Omega$ の抵抗負荷を設定できる抵抗負荷 装置を試作した. 外観を図 4.5 に示す. スイッチを上には倒すと 単位抵抗が直列に挿入され, 下に倒すとスルーになる. 一番左 側のスイッチを ON にすると抵抗負荷が接続され, OFF にする と抵抗負荷全体が OFF となる.

外付けの抵抗 R_{ext} を 20Ω , 15Ω , 10Ω , 9Ω , 6.8Ω および 5Ω の値に設定し, 順次負荷電流特性を測定した. 最初の内は発電 機電機子抵抗 R_g が不明であったため, 手探り状態に種々の R_{ext} を用いて測定を行って見たが, R_g が約 7Ω であることが推定で きた段階で R_{ext} を 7Ω 近傍の値に絞った. 測定項目はモータ電機 子電流 I_a , タコジェネレータ出力 V_c , 発電機電圧の検出電圧 V_g (以下検出電圧), 発電機の出力電圧 V_1 , 外付け抵抗 R_{ext} の出 力電圧 V_2 , 発電機電機子電流 I_g である. V_c および V_g はオシロ スコープの電圧計測機能を用いて測定した. また V_1 はデジタル電圧計を, V_2 , I_a および I_g はアナログ電圧計/電流計 (いずれ も 2.5 級) を用いて測定した.

なおフィードバックループの利得を高利得 (図 2.1 における

SS4 を OFF) に設定した. また NFB なし時も測定した.



図 4.5 抵抗負荷装置の外観

(2) 抵抗負荷印加, NFB なし時の負荷電流特性

モータへの供給電圧を $V_m=6\text{V}$, NFB なし, 抵抗負荷を OFF, 100Ω , 50Ω , 30Ω , 20Ω および 10Ω に設定してモータの電機子電 流を増大させながら負荷電流特性を測定した. 外付け抵抗 $R_{ext}=6.8\Omega$ 時における測定例を図 4.6 に示す.

$N(\text{rpm})$ はタコジェネレータの出力電圧 V_c を 526 倍して回転数 に変換した値である. 一方図 4.1 におけるオペアンプの出力電 圧 V_g に発電定数を掛け, 回転数に変換した値が V_g 回転数 (rpm) である. 両者は良く一致した値を示している.

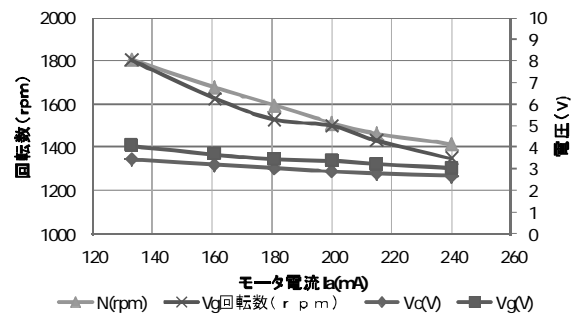


図 4.6 外付け $R_g=6.8\Omega$ 時, NFB なし時の負荷電流特性

(3) 抵抗負荷印加, NFB あり (定速制御) 時の負荷電流特性

速度指令電圧を低速に設定し, システムの利得を高利得にし て定速制御時の特性を測定した. 外付け抵抗 $R_{ext}=6.8\Omega$ とし, 横 軸に発電機電流, 縦軸に加算回路における各種電圧を取った測 定結果を図 4.7 に示す. 加算回路の作用により発電機電流が増 大してもほぼ一定の検出電圧 V_g が得られている.

なお抵抗負荷を OFF から 100Ω に変化させると, 回転数を反 映するモータのタコジェネレータ出力 V_c が増大すると言う結 果が得られた. 図 4.8 は同時に測定した回転数の測定結果であ る. 検出電圧 V_g を発電定数で割って求めた回転数はほぼ一定で あり, システムとして定速制御が行われていることを示してい る. しかしながら実際には負荷の増大に伴いモータの回転数 N が増大すると言う結果が観測された. これはモータの回転音の 増大からも裏付けられた. 回転数 N は周波数カウンタを用いて モータのタコジェネレータ出力を直接計測した.

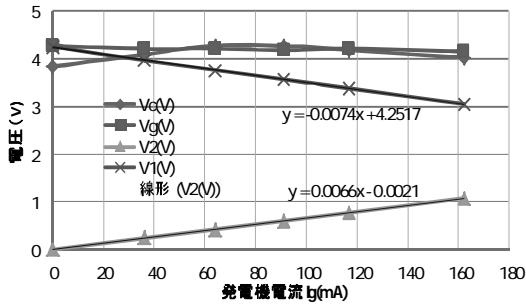


図 4.7 $R_{ext}=6.8\Omega$ 時、定速制御あり

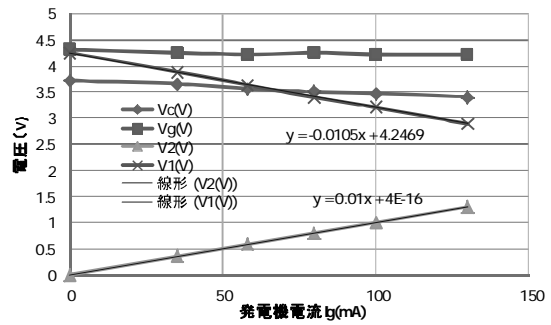


図 4.11 $R_{ext}=10\Omega$ 時、定速制御あり

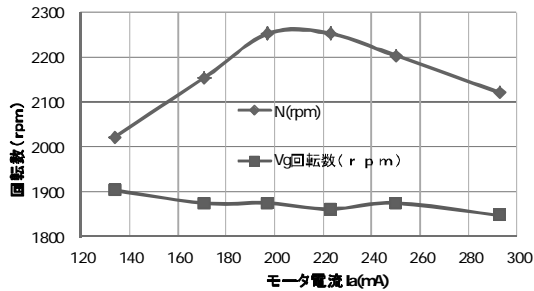


図 4.8 $R_{ext}=6.8\Omega$ 時、定速制御あり、回転数の変化

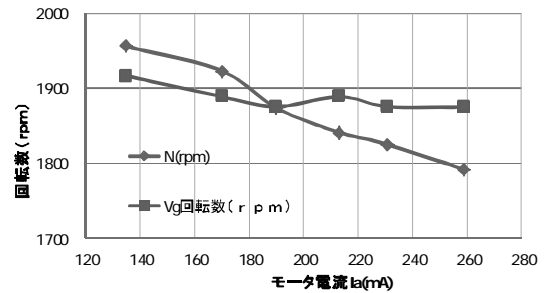


図 4.12 $R_{ext}=10\Omega$ 時、定速制御あり、回転数特性

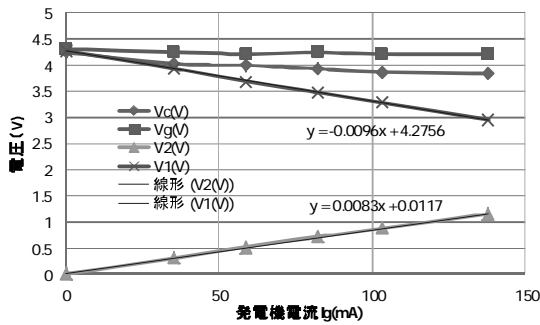


図 4.9 $R_{ext}=9\Omega$ 時、定速制御あり

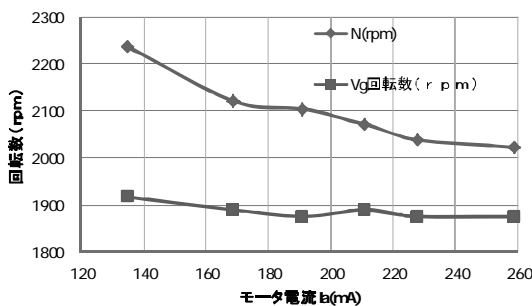


図 4.10 $R_{ext}=9\Omega$ 時、定速制御あり、回転数

外付け抵抗 $R_{ext}=9\Omega$ および 10Ω のありの場合の測定例を図 4.9～図 4.12 に示す。2つのケースとも負荷電流が増大しても検出電圧 V_g がほぼ一定になっており、一方回転数は低下するという合理的な特性になっている。特に $R_{ext}=10\Omega$ の場合には回転数の低下割合は -8.4% であり、図 2.5 に示した従来の物理負荷を使用した場合における回転数の低下割合 -7.7% とほぼ同等の特性が得られている。

4.6 ブラシにおける電圧降下の影響

図 4.7 および図 4.8 において発電機の電機子電流 I_g が増大すると回転数が増大するのは、発電機におけるブラシの電圧降下の影響であると考えられる。 I_g が $0\sim 60\text{mA}$ ではブラシの電圧降下の影響が現れているが、一方 NFB の効果によって検出電圧 V_g はほぼ一定であるため、ブラシの電圧降下を補償するためにモータの回転数が増大しているものと考えられる。

外付け抵抗 $R_{ext}=9\Omega$ および 10Ω の場合には図 4.1 の加算回路において加算される電圧 V_1 が大きくなり、ブラシの電圧降下を補償するものと考えられる。

図 4.13 は一例としてブラシにおける電圧降下を 1mA 以上の電流が流れた場合に 0.1V になるものと仮定し、 $R_{ext}=7\Omega\sim 10\Omega$ とした場合の回転数のシミュレーション結果である。横軸はモータの電機子電流である。上記の仮説を裏付ける結果が得られている。

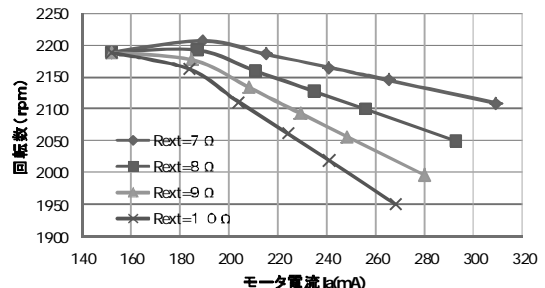


図 4.13 回転数の R_{ext} 依存性(シム)、ブラシ電圧=0.1V

5. 差動増幅器における駆動源インピーダンスの補正

(1) 駆動源インピーダンスの評価

図4.7の結果から加算回路出力電圧 V_o から求めた回転数は、タコジェネレータ出力 V_c から求めた回転数とはまだ幾分の相違がある。

そこで図2.1における初段の差動増幅器(IC1)における駆動源インピーダンスについて検討を進めることにした。IC1をインストルメントアンプに取り替えることも考えたが、実装スペースの点で無理であった。そこで発電機をショートし、可変抵抗器VR1のスライダ端子から発電機側を見込んだ直流抵抗を測定したところ1.49kΩであった。これはVR1におけるスライダの電圧から割り出した抵抗値(アース側2.7kΩ、ホット側2.3kΩ)を用いて計算したテブナン等価回路に基づく出力抵抗とほぼ一致した。

一方、オペアンプのマイナス端子側における駆動源インピーダンスは、スイッチSS1における低速側の配線を外し、ここに直流安定化電源を接続して電圧-電流特性を測定し、これより直接抵抗値を計算した。その結果を図5.1に示す。

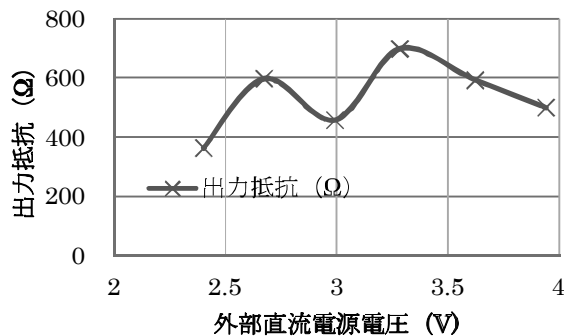


図5.1 レファレンス側出力抵抗の測定結果

これよりオペアンプにおけるマイナス端子側の駆動源インピーダンスは500~600Ωであることが分かった。

(2) 駆動源インピーダンスの補正を施した負荷特性

図2.1におけるスイッチSS1の低速端子と2つの1kΩ抵抗の接続点間に1kΩの抵抗を直列に接続し、オペアンプにおける一側、一側の両駆動源インピーダンスが等しくなるような簡易的な補正を施した。この手法を適用して前節の負荷電流と特性の測定を行った。

6. 学生実験における測定結果

5章における検討から発電機の電機子抵抗を補償するための外付け抵抗 R_{ext} の値を10Ωに設定して実験を進めることにした。ID26年度における情報・通信コースの3年生は19人であり、5グループに分けて実験を行った。ここでは代表的な測定結果を示し、今後の参考となるようにしたい。

6.1 逆起電力の測定結果

図6.1に示す。AC100VをトランスによりAC8Vに変換し、これをダイオードにより半波整流してモータに加えその端子電圧を測定した。入力を加えていない期間における電圧の平均値から、逆起電力は7.5Vになった。

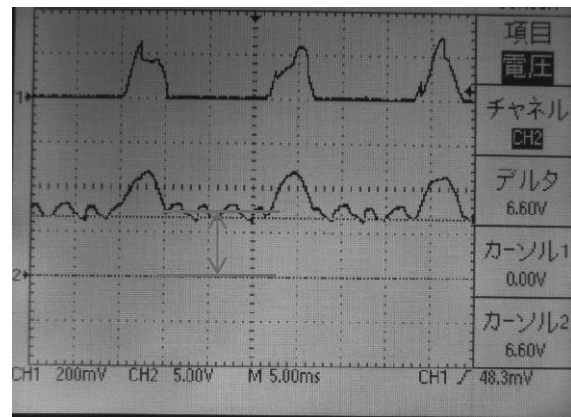


図6.1 逆起電力の測定例(上:入力電圧,下:出力電圧)

6.2 モータの回転数の供給電圧依存性

図6.2に5班の測定結果を示す。図2.2に示した予備実験の結果と同様な測定結果が得られた。但し、発電機を連結した場合の特性において、同一電圧における回転数の低下が大きくなっていった。他の班の測定では、フレキシブルカップリングの締め付け具合にも関係すると思われるが、特性が直線にならなかったり、途中で交差するなどの特性になっているものもあった。

図6.3は発電定数の測定結果である。2.1mV/rpmであり、予備実験の結果よりも幾分低い測定結果が得られた。

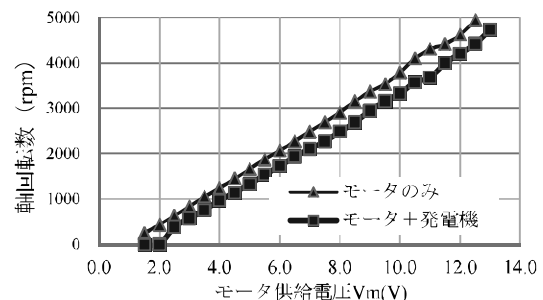


図6.2 回転数-印加電圧特性

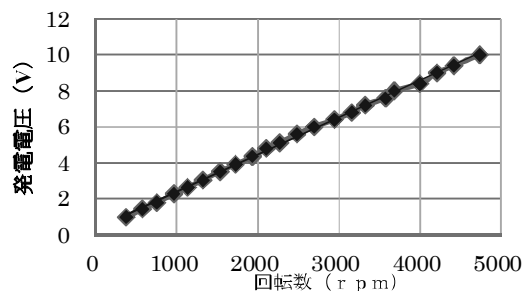


図6.3 発電定数の測定例

6.3 負荷電流特性の測定結果

図6.4に抵抗負荷を用いて5班が測定した負荷電流特性の測定結果を一例として示す。図2.4および図2.5に示した従来から実験に用いていた物理負荷による特性とほぼ同様な結果が得られた。他のグループの測定結果は、定速制御あり/なし時とも

相対的には図 6.4 と同様な特性が得られたので、学生達が定速制御あり/なしの意味を理解するの十分に意味があるデータを測定できるものと思われる。しかしながら回転数の絶対値には大きなバラツキが見られた。これは発電定数の測定結果がばらついていたことが一原因であると考えているが、現時点ではその原因はまだ十分に明らかになっていない。

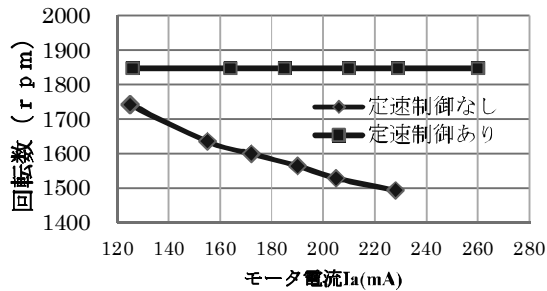


図 6.4 負荷電流特性の測定例

6.4 過渡応答特性

図 6.5~図 6.7 に 3 班の測定結果を示す。図 6.5 は位相フィルタ未使用時の特性である。この特性は図 2.6 の測定結果とほぼ同様の結果が得られた。

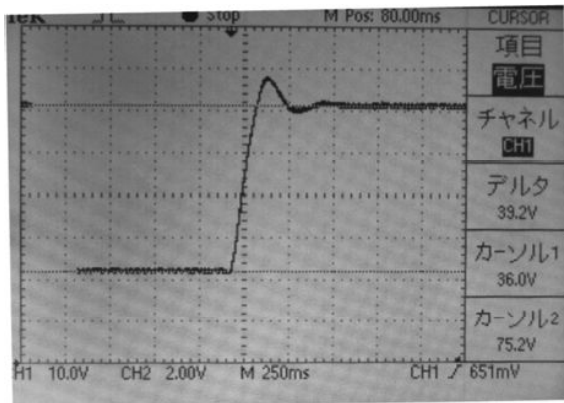


図 6.5 位相フィルタ未使用時の過渡応答の測定例

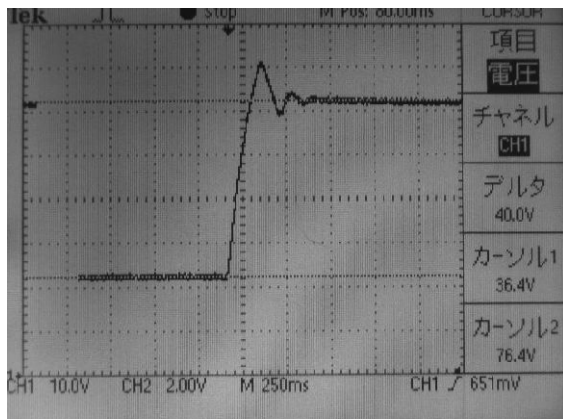


図 6.6 過補償を想定した位相フィルタ使用時の過渡応答の測定例

図 6.6 は位相フィルタ ($C=22\mu\text{F}$) を使用した場合であり、過補償を想定した場合である。図 2.7 の予備実験の結果および図 3.6 のシミュレーションよりもリングングの継続時間が短くなっていた。図 6.7 は位相フィルタ ($C=3.3\mu\text{F}$) を使用した場合であり、最適な補償を想定した場合である。図 2.8 の予備実験の結果や、図 2.8 におけるシミュレーション結果と符合する結果が得られた。

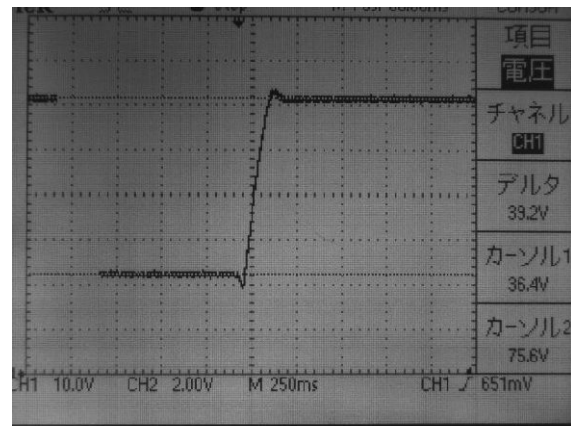


図 6.7 最適な位相フィルタ使用時の過渡応答の測定例

7. むすび

本論文では、DC モータと発電機を連結したシステムにおいて、発電機の負荷として抵抗負荷を用いる場合の定速制御に関する検討結果を主として示した。抵抗負荷を使用すると、安定な特性を実現できるものの、フィードバックループ形成時に検出される誤差電圧がモータの回転数変化に対応する電圧と、発電機の電機子抵抗における電圧降下の和となる。このため何も対策を施さないとモータの回転数を正しく検出できなくなり、良好な定速制御を実現できない。

本論文では、この課題を解決するために発電機回路に発電機の電機子抵抗と等しい外付けの抵抗を接続し、この端子電圧を発電機の出力電圧に加える回路を提案した。5 回に亘る学生実験の結果を示し、提案した回路が良好に動作し、学生達がモータの定速制御を理解するのに十分有益なデータを取得できることを示した。

なお参考のために、他の全ての測定項目に関する測定結果も併せて示した。

【参考文献】

- 1). “情報・通信実験指導書 (2013 年度版)”, 静岡理科大学電気電子工学科
- 2). 小池慎一, “連続系シミュレーション”, CQ 出版 (1988)
- 3). 高橋 久, “C言語によるモータ制御入門講座”, 電波新聞社 (2007)