

直流定電圧電源による自動制御系実験教材の製作

青森職業能力開発短期大学校 工藤 光 昭

Production of the Experimental Teaching Material for Automatic Controls by DC Power Supply

Mitsuaki KUDŌ

要約 直流定電圧電源は、電圧負帰還をかけた直流増幅器に基準電圧を与えて安定な出力電圧を取り出している。このとき、直流増幅器の gain が大きいほど出力電圧は一定に保たれる。

本直流定電圧電源は、電圧制御回路を自動制御系のブロック線図にそって構成し、それぞれの要素のもつ意味と系における gain のもつ意味を理解させる教材に展開した。そのために、一般的な電源とは異なり出力端子と別に独立したフィードバック端子をもち、直流増幅器(誤差増幅器)の gain を任意に設定できるようにした。

実験において使用する機器は、直流電圧計、直流電流計、抵抗負荷だけで済み、特別な測定器を必要としない。

電圧制御回路は、パワートランジスタと4回路内蔵の汎用 OP アンプ等一般的な部品で構成されているので、容易に製作できる。また、組み立て実習を行い、その後実験に供用することもできる。

1 はじめに

直流定電圧電源(以下定電圧電源という)は、半導体デバイスを組み込んだ電子機器には不可欠のものであり、その電圧変動などは機器の性能に影響を与える。

今日、IC化された定電圧制御回路が多用されているときに、OPアンプを使った定電圧制御回路をそれと同じ目的に使うことは、IC化された定電圧制御回路の限界を越えた高安定度および高機能の要求あるいは教育的配慮をする場合以外にない。

定電圧電源は、電圧負帰還をかけた直流増幅器に入力信号として基準電圧を与えて、その出力信号として安定した出力電圧を取り出しているに過ぎない。このことは、自動制御系における gain の概念を理解させる教材として展開できる。

製作した定電圧電源の構成は、自動制御系のブロック線図(block diagram)に従ったものとしている。こ

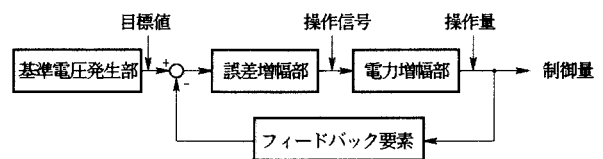
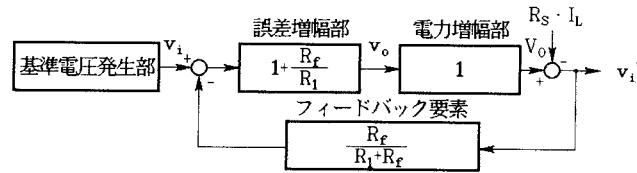


図1 自動制御系ブロック線図

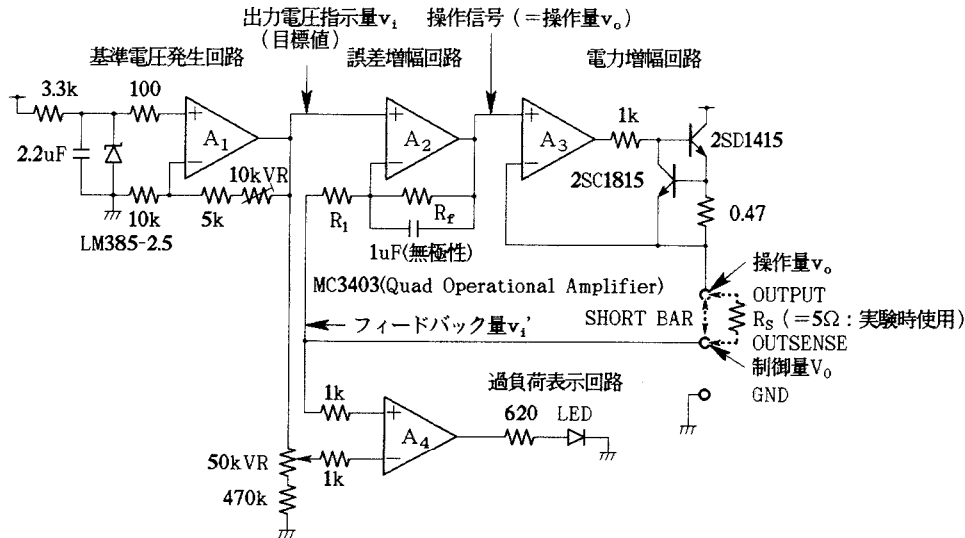
の定電圧電源の制御回路は、指示量とフィードバック量の差を検出し増幅する誤差増幅回路以外は gain をもたず、しかも誤差増幅回路の gain を変更することで自動制御系の特性がどのように変わるかを実験することができ、実験教材として活用できる。

II 回路構成および出カインピーダンス

図1は、自動制御系のブロック線図を示す。これは、



(a) ブロック線図



(b) 定電圧制御回路

図2 ブロック線図と定電圧制御回路

フィードバック量 (=制御量) と目標値を比較して、目標値からの偏差を打ち消そうとする訂正動作機能をもった負のフィードバック系である。

図2は図1を定電圧電源に展開した具体的なブロック線図と定電圧制御回路を示す。この回路は、基準電圧発生回路、誤差増幅回路、電力増幅回路、過負荷表示回路で構成されている。過負荷表示回路を除くと、自動制御系のブロック線図に従って構成している。

基準電圧発生回路は、非反転直流増幅器で構成し、入力電圧が一定であれば外部抵抗の比で出力電圧が決まる。入力電圧 V_{ref} は、定電圧素子 LM385-2.5 (2.500 V \pm 3%、 $20\mu\text{A} \leq I_R \leq 20\text{mA}$) で与える。基準電圧発生回路の出力電圧 (系の指示量) を 5.00V とすれば非反転増幅器における外部抵抗は、1:1 の比であるが、若干の調整を必要とすることから可変抵抗を付加している。

誤差増幅回路は、出力電圧指示量 (目標値) とフィー

ドバック量の偏差を増幅する。したがって、系の中で唯一 gain をもつ。

電力増幅回路は、OP アンプに電流ブースタ用トランジスタを付加した電圧ホロワ (Voltage follower) で構成している。電力増幅回路の実効出力抵抗 R_{of} は、定電圧電源としての内部抵抗であり、出力電圧 V_o / 負荷電流 I_L で求められる。

一般的に回路の出力抵抗は、入力信号源を短絡して出力端子から内部を見た抵抗として求められ、帰還が多い程出力抵抗は小さくなる。

図3は電力増幅回路の実効出力抵抗 R_{of} を求める直流等価回路を示す。これは、OP アンプに電流ブースタを付加して100%の帰還をかけた電圧ホロワの gain が極めて1に近いものとして、操作信号 = 操作量 v_o = 出力電圧 V_o で等価回路を描いている⁽¹⁾⁽²⁾。

なお、 R_B は過渡的なトラブルを除くための保護抵抗として 1k Ω を与えている。

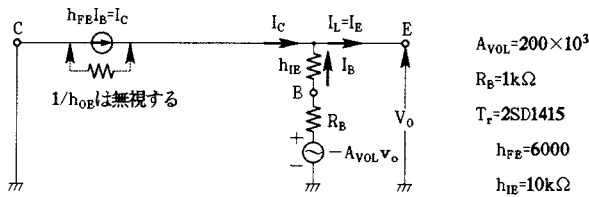


図3 電力増幅回路の実効出力抵抗を求める等価回路

この等価回路をキルヒホッフの法則で解く。ここで、 A_{VOL} はOPアンプの開ループ利得とする。

$$v_o = V_o \quad [1]$$

$$I_B = \frac{V_o - (-A_{VOL} \cdot v_o)}{h_{IE} + R_B} \quad [2]$$

$$I_L = h_{FE} \cdot I_B + I_B \quad [3]$$

上式から実効出力抵抗 R_{of} は、次のようになる。

$$R_{of} = \frac{V_o}{I_L} = \frac{h_{IE} + R_B}{(1 + A_{VOL})(1 + h_{FE})} \quad [4]$$

また、一般的に $1 \ll A_{VOL}$ および $1 \ll h_{FE}$ であり、この場合式 [4] は次のように近似される。

$$R_{of} \cong \frac{h_{IE} + R_B}{A_{VOL} h_{FE}} \quad [5]$$

さらに、トランジスタのベース電流が小さい範囲において $R_B \ll h_{IE}$ が成立するときは次のようになる。

$$R_{of} \cong \frac{h_{IE}}{A_{VOL} h_{FE}} \quad [6]$$

このようにトランジスタとOPアンプで構成したブースト回路の実効出力抵抗 R_{of} は、OPアンプの開ループ利得 A_{VOL} が大きいほど、またトランジスタの h_{IE} が小さく、 h_{FE} が大きいほど小さくなる。

式 [4] に図3の等価回路に併記している定数を代入すると次のようになる。

$$\begin{aligned} R_{of} &= \frac{10 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3}{(1 + 200 \cdot 10^3)(1 + 6000)} \\ &= 0.009 \cdot 10^{-3} = 0.009 \text{m}\Omega \end{aligned}$$

また、同様に式「5」および「6」に定数を代入しても大差はない。このように、実効出力抵抗が無視できるほど小さいということは、実験を行うとき定電圧制御回路を理想電圧源として扱うことができる。出力

電流はトランジスタの能力で決まる限界まで電流を流すことができるが出力トランジスタ保護のため、出力電流を抑制する機能を付加している。

過負荷表示回路は、OPアンプをコンパレータとして使用し、出力電流が定格電流を超えることによって生じる出力電圧の低下を検出してLEDを点灯させる。

このように、本実験教材は、過負荷表示回路を付加することで、通常定電圧電源として使用できる機能も有している。

III gainの設定

比例動作のgainは誤差増幅回路で与える。定電圧制御回路において、電力増幅回路の実効出力抵抗が極めて小さくgainは1であることから、誤差増幅回路だけがgainをもつ。

図4は誤差増幅回路のブロック線図と入出力関係を求める回路を示す。誤差増幅回路において、OPアンプの入力抵抗が大きく、流入電流が無視できるものとし、キルヒホッフの法則によって式を連立する。

$$I_f = I_1 \quad [7]$$

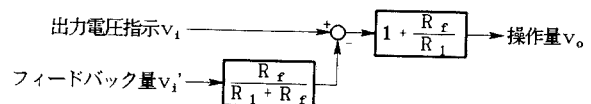
$$I_1 = \frac{v_i' - v}{R_1} \quad [8]$$

$$I_f = \frac{v - v_o}{R_f} \quad [9]$$

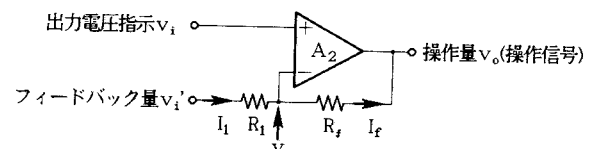
$$v_i = v \quad [10]$$

これを整理し、入力と出力の関係を求める。

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)v_i - \frac{R_f}{R_1}v_i' \quad [11]$$



(a) ブロック線図



(b) 誤差増幅回路

図4 誤差増幅回路のブロック線図と回路

この v_o は、電力増幅回路の入力電圧（操作信号）をあらわしているが、電力増幅回路の gain が 1 であることから操作量 v_o および制御量 V_O と等価である。 v_i' は、フィードバック量をあらわしている。したがって、定常状態においては、 $v_o = v_i' = V_O$ となる。

いま、電力増幅回路の実効出力抵抗は限りなく 0 に近いので作為的に内部抵抗として直列抵抗 R_s を与える。このとき、直列抵抗 R_s は出力端子 (OUTPUT) とフィードバック端子 (OUTSENSE) に接続する。この結果、出力端子は操作量 v_o を示すことになり、実際の出力電圧 V_o はフィードバック端子から出力することになる。したがって、実験時には、フィードバック端子から負荷へ接続することになり、この量は制御量 V_o そのものをあらわし、フィードバック量 v_i' となる。

ここで、直列抵抗 R_s を与えたときの v_o 、 v_i' 、 V_o の関係は次のようになる。

$$v_o = R_s \cdot I_L + v_i' = R_s \cdot I_L + V_o \quad [12]$$

いままでのことを整理すると、系の gain を設定する R_i 、 R_f の関係は次のようになる。

$$R_s \cdot I_L + v_i' = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) v_i - \frac{R_f}{R_i} v_i' \quad [13]$$

出力電圧指示量 $v_i = 5.00V$ 、直列抵抗 $R_s = 5.00\Omega$ （作為的に与えた内部抵抗）、負荷電流 I_L が $0.00 \sim 1.00A$ の間で変動する場合、 R_s で最大 $5.00V$ の電圧降下がある。すなわち出力電圧の変動は $0.00 \sim 5.00V$ となる。これはフィードバックのない無制御状態であり、負荷の変動による影響を 100% 受けることを意味する。したがって、 $gain = 100$ における出力の変化分は、 $gain = 1$ の出力変化分が $5.00V$ であることから、 $5.00V / 100 = 0.05V$ となる。

これは、負荷電流 I_L による出力電圧 V_o の変動率が 1% であることを意味している。このことから、負荷

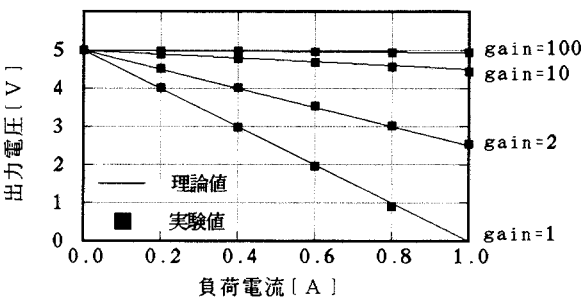


図5 それぞれの gain における出力特性

電流 $I_L = 1.00A$ のときのフィードバック電圧 v_i' は、 $v_i' = V_o = 5.00 - 0.05 = 4.95V$ となる。

gain = 100 とするための R_i 、 R_f の関係は、式 [13] にそれぞれの値を代入することで求まる。

$$5.00 \cdot 1.00 + 4.95 = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \cdot 5.00 - \frac{R_f}{R_i} \cdot 4.95$$

$$99 \cdot R_i = R_f$$

ここで、 $R_i = 1k\Omega$ とすれば $R_f = 99k\Omega$ となる。同様に、gain が 10、2、1 の場合における外部抵抗の関係は、 $9R_i = R_f$ 、 $R_i = R_f$ 、 $R_f = 0$ となる。したがって、gain の設定は、 R_i を固定し R_f を変更するだけでできる。

IV 実験結果

自動制御系における gain は、抑え込みたい出力の変動率の逆数で与えられる。図5は出力電圧指示量 $v_i = 5.00V$ 、直列抵抗 $R_s = 5.00\Omega$ を与えたときの負荷電流と出力電圧の関係を示す。実験回路に供給する電源電圧は、 R_s の電圧降下およびトランジスタ 2SD1415 の $V_{CE(sat)}$ と出力電圧を考慮し $15V$ を与えた。

図5の結果から、作為的に与えた直列抵抗 R_s は、等価的に $1/gain$ の値になる。このことを図6に示す。

実験の gain 設定は 100 までしか行っていないが、それは実験結果を明確に読みとるためであり、電源として活用する場合はそれ以上にしてよい。

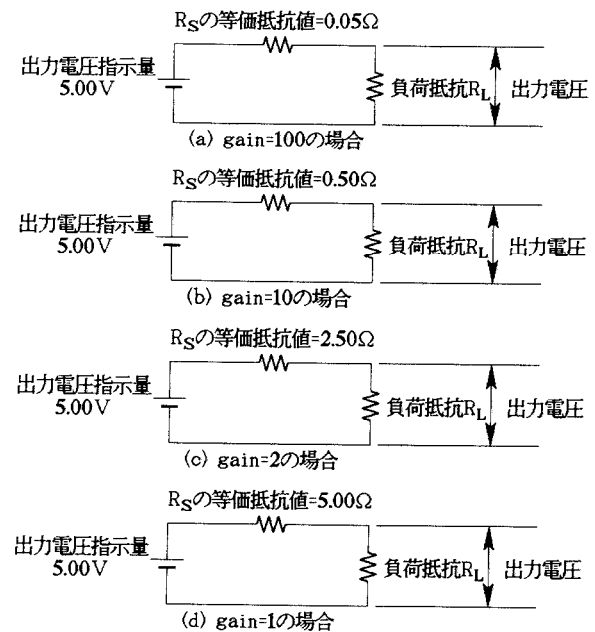


図6 それぞれの gain における R_s の等価抵抗値

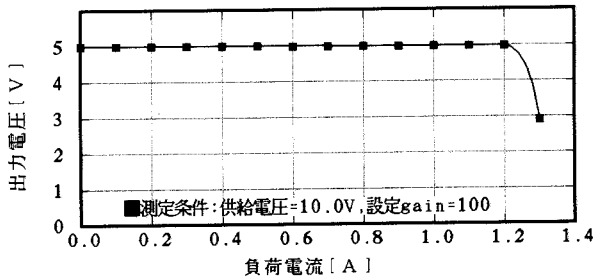


図7 直流定電圧電源としての出力特性

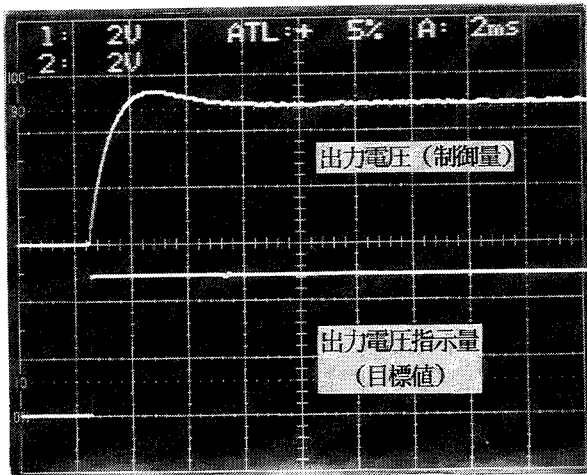


図8 立ち上がり応答特性

図7は、定電圧電源回路を $gain=100$ として使用した場合の出力特性を示す。この場合は、 R_s を取り付けないことから、電力増幅回路の実効出力抵抗は極めて小さく、 $gain=100$ でも十分実用になる。このとき、回路に供給する電源電圧は、OP アンプの出力振幅(電源電圧 $-3V$) およびトランジスタの V_{BE} (ダーリントン接続のため $1.2V$) を考慮し $9.2V$ 以上とする。

図8は $gain=100$ 、出力電流 $0.2A$ 時における立ち上がり特性を示す。これは、オーバーシュートはみられるものの振動はなく $6ms$ 以内で定常状態になっている。

V おわりに

独立したフィードバック端子を持つ定電圧電源は、その回路構成から自動制御系における $gain$ の持つ意味を理解させる教材として活用でき、実験に使用する測定器も電圧計、電流計、可変負荷抵抗だけで特別なものを必要としない。

定電圧電源の制御回路の動作は、個々に独立して実験できる要素から成り立っているため、要素実験から始めて全体的に理解を得ることもできる。

本定電圧電源は、通常の電子回路実験に使用できる。その場合のフィードバック端子は、短絡片 (SHORT

BAR) で出力端子に接続する。また、電源を供給するケーブルが長いときには、短絡片を出力端子に接続するのではなく、電源供給先の端子まで延長し接続することで負荷の端子電圧を補償できる。

参考文献

- (1) 丹野頼元「演習オペアンプ回路」森北出版 1982 pp.18~21
- (2) 堤坂秀樹 田中勝廣「回路技術者のための等価回路」日本理工出版会 1984 再版発行 pp.286~289
- (3) 宮崎誠一 宮崎仁「パソコンで学ぶ自動制御の実用学」CQ出版 1991 pp.149~153