

基本電圧安定化回路を用いたトラッキング・レギュレーターの追従特性改善法について

紫 藤 進*

The Improvement of Following Characteristic for Tracking Regulator using Typical Voltage Regulator Circuits

Susumu SHITO

IC化演算増巾器等のリアICを用いた電子回路実験に必要となる、広い可変範囲を持った、正負追従出力形安定化電源について、基本電圧安定化回路を用いた場合に生ずる追従誤差について、ベース・エミッタ間の特性を直線で近似することによって解析し、その追従誤差を改善する方法について述べた。実験結果によれば、出力 2V から 20V にわたって、追従誤差 0.2%以下であった。また、この方法は良好な温度特性を持つ。

まえがき

最近の広範なリア回路の IC 化と、その量産化により、手軽にリアICを使用することが可能となったが、特に、IC化演算増巾器は極めて汎用性の広いICである。これらのICは普通正負両極性の電源電圧を必要とする、従ってこのような素子を用いた電子回路実験を行う場合、出力電圧の可変範囲が広くて、正負出力電圧が等しい安定化電源が必要である。単極出力で可変範囲の広い基本的な電圧安定化回路は、トランジスタ 2、ツェナー・ダイオード 1 個により簡単に構成できるが、この回路によって安定化された電圧を基準電圧として、同一構成の安定化回路を対称に加えることによって、正負出力追従形の安定化回路が得られる。ところが誤差増巾器としてのトランジスタのベース・エミッタ間の電圧降下が、オフセットとなって、一方の出力がもう一方の出力に正しく追従せず大きな追従誤差を生ずる。このオフセット

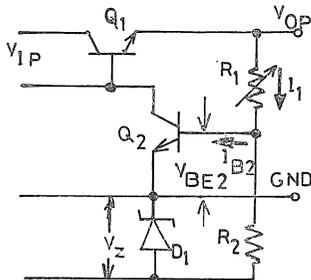


図1-1 出力回変範囲を広く取る場合の基本的電圧安定化回路

による誤差と、その改善方法について、トランジスタのベース・エミッタ電流電圧特性の直線近似による解析から導いた。この方法で必要となるトランジスタは 2 個で構成上から良好な温度特性を

持たせることができる。

1. 基本動作と追従誤差

図1-1は広い可変範囲を持つ、最も基本的な安定化回路である。R₁、R₂を適当に選ぶことによって、

$$I_1 \gg I_{B2} \quad (1-1)$$

と考えると、出力電圧 V_{OP} は

$$V_{OP} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{BE2} + \frac{R_1}{R_2} V_Z \quad (1-2)$$

となる。R₁=0 の時 V_{OP} = V_{BE2} である。

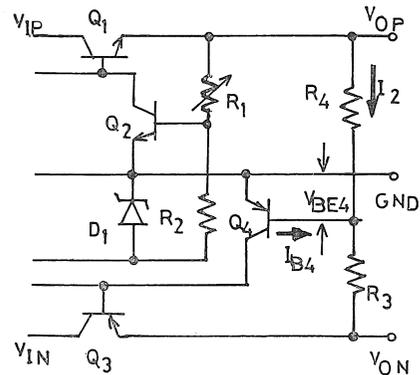


図1-2 基本回路を対称に接続し正負追従出力を得る

図1-2は図1-1と同一構成の負出力安定化回路を対称に加えた回路で、基準電圧として正側の安定化出力 V_{OP} を用い、R₁ を変化して正出力 V_{OP} を変化させ、それに負側出力を追従させて正負追従出力を得ることができ

る。前と同様に

$$I_2 \gg I_{B4} \quad (1-3)$$

として、追従誤差を考えやすくするために、図1-2を図1-3のようにかきかえる、ここで V_{OFS} は誤差増巾器のトランジスタのベース・エミッタ間電圧降下に起因するオフセット電圧で、誤差増巾器の比較レベルが0Vではなく V_{OFS} であることを示す。

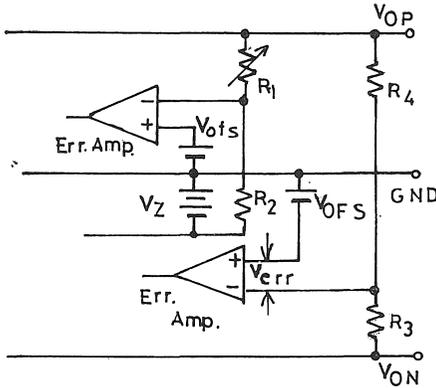


図1-3 トランジスタのベース・エミッタ電圧 V_{BE} によって生ずるオフセット電圧

今、出力 V_{ON} が安定化されて誤差電圧 $V_{err}=0$ となっているとすると、負出力 V_{ON} は

$$V_{ON} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} V_{OFS} - \frac{R_3}{R_4} V_{OP} \quad (1-4)$$

であるが、これより第2項が第1項より十分に大きい場合については、負出力 V_{ON} はほぼ V_{OP} に追従していると言えるが、 V_{OP} が小さい場合 V_{OFS} は無視できなくなり、 $V_{OP}=0$ の時には

$$V_{ON} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} V_{OFS} \quad (1-5)$$

となり、大きな追従誤差となることがわかる

2. オフセット補償電圧

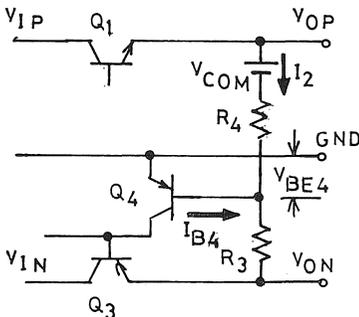


図2-1 オフセット補償電圧源 V_{COM}

図2-1は V_{OP} と R_4 との間に電圧源 V_{COM} を加えた点のぞいて図1-2と全く同様である。今、

$$I_2 \gg I_{B4} \quad (2-1)$$

とすると、負出力電圧 V_{ON} は

$$V_{ON} = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) V_{BE4} - \frac{R_3}{R_4} V_{OP} + \frac{R_3}{R_4} V_{COM} \quad (2-2)$$

となる。この式より

$$\left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) V_{BE4} = -\frac{R_3}{R_4} V_{COM} \quad (2-3)$$

とすれば

$$V_{ON} = -\frac{R_3}{R_4} V_{OP} \quad (2-4)$$

となって、完全に V_{ON} を V_{OP} に追従させることができる。ところが、出力電圧 V_{OP} の変化範囲が広い場合 V_{BE4} は一定とはならない。今、出力電圧 V_{OP} に対する V_{BE4} の変化を

$$V_{BE4} = V_{OFS4} + A V_{OP} \quad (2-5)$$

なる直線で近似する。式 (2-3) から V_{COM} についても

$$V_{COM} = V_{COM0} + B V_{OP} \quad (2-6)$$

と変化出来るものとすれば、 V_{ON} は

$$V_{ON} = \frac{R_3}{R_4} \left\{ B + \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) A - 1 \right\} V_{OP} + \frac{R_3}{R_4} V_{COM0} + \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) V_{OFS4} \quad (2-7)$$

となる。ここで常に $V_{ON} = -V_{OP}$ とするためには (2-7) 式の定数項の和が0、すなわち

$$V_{COM0} = -\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) V_{OFS4} \quad (2-8)$$

でなければならない。第2に第1項、 V_{OP} の係数が -1 でなければならない、すなわち

$$\frac{R_3}{R_4} \left\{ B + \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) A - 1 \right\} = -1 \quad (2-9)$$

書きなおせば

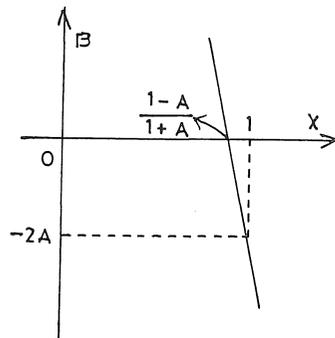


図2-2 オフセット補償条件

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{1-A-B}{1+A} \quad (2-9')$$

図1-2の回路構成の場合ではAは正である。R₄/R₃ = Xとおいて(2-9')式を図にすると図2-2となる。これよりAの値からBとXの関係を求めることができる。

3. 補償電圧発生回路

図3-1のQ₅, R₅, R₆からなる回路は集積回路等によく用いられる電圧源の回路で、これを補償電圧源として考える。

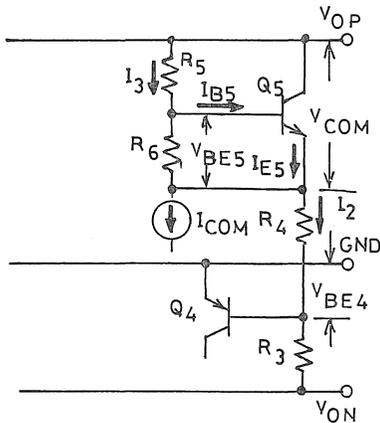


図3-1 オフセット補償用電圧源 V_{COM} の構成

今R₅, R₆, h_{FE5}を適当に選ぶことによって

$$I_3 \gg I_{B5} \quad (3-1)$$

とした時、トランジスタ Q₅ のコレクタ・エミッタ間電圧 V_{COM} は

$$V_{COM} = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) V_{BE5} \quad (3-2)$$

となる。ここで Q₅ のベース・エミッタ間電流、電圧特性を

$$V_{BE5} = V_{OF55} + C I_{E5} \quad (3-3)$$

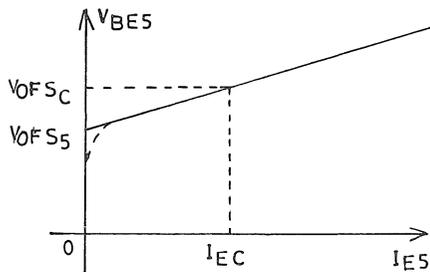


図3-2 直線で近似したベース・エミッタ間電流電圧特性

なる直線で近似する(図3-2参照)。実際には小電流部では近似直線からのズレが極めて大きく使用できないので、電圧源に一定電流 I_{COM} を流しておき(3-3)式の源

点を移動して

$$V_{BE5} = V_{OF5C} + C (I_{E5} - I_{EC}) \quad (3-4)$$

とする。ただし

$$\begin{aligned} I_{COM} &= (I_3 + I_{E5}) \Big|_{V_{BE5} = V_{OF5C}} \\ &= (I_{3C} + I_{EC}) \quad \text{とおく} \end{aligned} \quad (3-5)$$

また

$$\left. \begin{aligned} V_{BE5}' &= V_{BE5} - V_{OF5C} \\ I_{E5}' &= I_{E5} - I_{EC} \\ I_3' &= I_3 - I_{3C} \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

とおくと、R₄ に流れる電流 I₂ は

$$I_2 = I_{E5}' + I_3' = I_{E5}' + C \cdot I_{E5}' / R_6$$

となるが、h_{FE5}を数100, I_{EC}を数mA, R₆をkΩのオーダーに選べば、

$$\frac{C}{R_6} \ll 1 \quad (3-7)$$

となり

$$I_2 \approx I_{E5}' = I_{E5} - I_{EC} \quad (3-8)$$

とすることができるので、(3-4)式から

$$V_{BE5} \approx V_{OF5C} + C I_2 \quad (3-9)$$

とかける。(3-2)式に代入すれば

$$V_{COM} = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) V_{OF5C} + \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) C I_2 \quad (3-10)$$

ところで I₂ は

$$I_2 = \frac{V_{OP} - V_{COM} - V_{BE4}}{R_4} \quad (3-11)$$

であるから(2-5)式とともに(3-10)に代入すれば

$$\begin{aligned} V_{COM} &= \frac{1 + \frac{R_5}{R_6}}{1 + \frac{C}{R_4} \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right)} \left\{ V_{OF5C} - \frac{C}{R_4} V_{OF54} \right. \\ &\quad \left. + \frac{C}{R_4} (1-A) V_{OP} \right\} \end{aligned} \quad (3-12)$$

ここで(3-7)の場合と同様に R₄ を kΩ オーダーに選べば

$$C/R_4 \ll 1 \quad (3-13)$$

であり、(2-5)より A << 1 (実際には A < 5 × 10⁻³)、又(2-3), (2-4), (3-2)から R₃ ≈ R₄, R₅ ≈ R₆ となることを考えると(3-12)式は次のように近似できる、すなわち

$$V_{COM} \approx \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) \left(V_{OF5C} + \frac{C}{R_4} V_{OP} \right) \quad (3-14)$$

ここで

$$\left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) V_{OF5C} \equiv V_{COM0} \quad (3-15)$$

$$\left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) \frac{C}{R_4} \equiv B \quad (3-16)$$

とおけば (3-14) 式は (2-6) 式と同じとなる。以上のことから、 $R_3, R_4, R_5, R_6, h_{FE4}, h_{FE5}$ が (2-1), (2-8), (2-9'), (3-1), (3-7), (3-13) 式をそれぞれ満足するように選ばれるならば、所期の目的である、出力の広い変化範囲にわたって

$$V_{ON} = -V_{OP} \quad (3-17)$$

を成立させることができる。

4. 温度特性

4-1 正出力側温度特性

式 (1-2) について各電圧の温度に対する変化を考えると

$$\frac{dV_{OP}}{dT} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{dV_{BE}}{dT} + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{dV_Z}{dT} \quad (4-1)$$

V_{BE} および V_Z の温度係数をそれぞれ α, β とすると (4-1) 式は

$$\frac{dV_{OP}}{dT} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)\alpha + \frac{R_1}{R_2} \cdot \beta \quad (4-1')$$

これより

$$\beta = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\alpha \quad (4-2)$$

となるように β , すなわちツェナ電圧, 電流を選ぶことによって温度係数を 0 とすることができる。ただしこれは R_1, R_2 の 1 つの組合せについてのみ言えることで、ここでは出力を変化させるために R_1 を変化させるので、常に温度係数を 0 とすることはできない。

4-2 負出力側温度特性

正出力側と同様に, (2-2)

式の各電圧に対する温度変化について考えると,

$V_{BE4} = -V_{BE}$ として

$$\frac{dV_{ON}}{dT} = -\frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{dV_{OP}}{dT} + \frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{dV_{COM}}{dT} - \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \frac{dV_{BE}}{dT} \quad (4-3)$$

今 $dV_{OP}/dT = 0$ なる場合について考えると

$$\frac{dV_{ON}}{dT} = \frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{dV_{COM}}{dT} - \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)\alpha \quad (4-4)$$

(2-4), 又は (2-9') より $R_3 \approx R_4$ であるから

$$\frac{dV_{COM}}{dT} = 2\alpha \quad (4-5)$$

とすれば良い, ここで V_{COM} は

$$V_{COM} = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right)V_{BE5} \quad (4-6)$$

で, $R_5 \approx R_6$ に選ばれることを考えると (4-5) 式はほぼ満足されることがわかる。以上のことより負側の温度特性はほとんど正側出力の温度特性に支配されると言える。

5. 実験と結果

図5-1は上記解析に基づく実験回路である。図中 $R_6, R_4, h_{FE4}, h_{FE5}$ は2. 3. 中の条件を満足するように

$$h_{FE5} > 200, h_{FE4} > 300$$

$$R_6 = 1,000 \Omega, R_4 > 1,000 \Omega$$

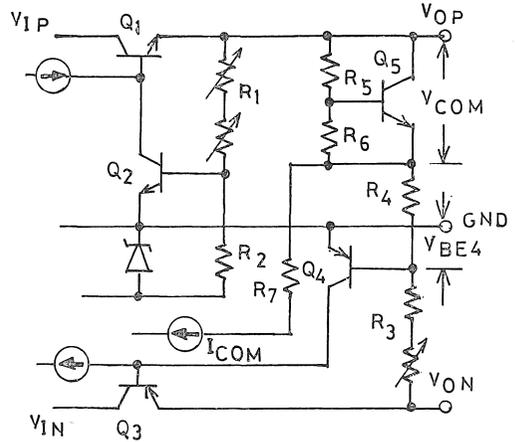


図5-1 解析にもとづく実験回路

に選んである。図5-2 (A), (B) は R_5, R_6, Q_5 からなる、補償電圧発生回路の電流電圧特性で、これより V_{OP} の変化範囲を考慮して、 R_4, R_5, R_6 および I_{COM} を (2-9'), (3-15), (3-16) を満足するように選ばば良い。

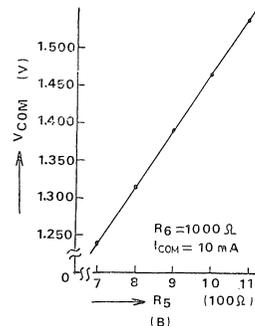
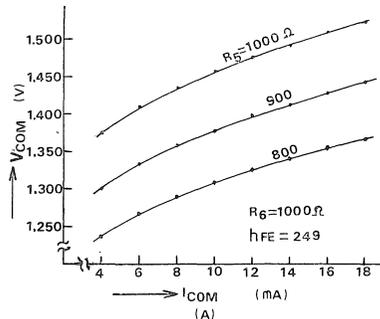


図5-2 補償電圧回路の電流電圧特性

図5-4は $V_{OP} \approx V_{BE2}$ (V_{OP} はこれより小さくならない)において $V_{COM0} = 2V_{OFS4}$ となるように R_5 を設定した後、 $V_{OP} = 15V$ において $V_{ON} = -15V$ になるように R_3 を設定した場合の正出力 V_{OP} に対する各部の電圧を測定したものである。従って $R_3 \sim R_6$ の設定は厳密に解析通りではない。すなわち $I_{COM} = 10mA$, $R_4 = 3k\Omega$ で $V_{OFS4} = 0.654V$ であることから $V_{COM0} = 1,308V$ に R_5 を設定後、 $V_{OP} = -V_{ON} = 15V$ になるように R_3 を設定した場合の特性である。ここで追従誤差 Err は

$$Err = \frac{|V_{ON}| - V_{OP}}{V_{OP}} \times 100 (\%) \quad (5-1)$$

より求めてある。図5-3は補償電圧源のない場合の特性で、 R_3 は $V_{OP} = -V_{ON} = 15V$ となるように設定した場合である。

以下簡単に各特性についての考察を試みると、補償電圧源については、 V_{OP} の変化範囲を $20V$ と考えると、 $R_4 = 3k\Omega$ と選んだ場合、 I_2 の変化範囲はほぼ $7mA$ で、その間の V_{COM} の変化はほぼ直線的である。図5-4の追従誤差について考えると、 $V_{OP} = 3V$ 以上での偏差の原因は各抵抗の設定の不十分さの外、 V_{BE4} , V_{COM} の変

化が直線的でないことによる。 $V_{OP} = 3V$ 以下において偏差が急に大きくなっているのは追従誤差の定義式(5-1)の分母が小さくなっていくことにもよるが、 I_{B4} の大きさが I_2 に比して無視できなくなることにもよる、すなわち R_3 に流れる電流は $I_2 + I_{B4}$ であるが V_{OP} が小さい場合、(3-11)からもわかるように、 I_2 は小さくなり、逆に I_{B4} は大きくなる、従って $R_3 \cdot I_{B4}$ はそのまま大きな誤差となる。また V_{COM0} の設定が $V_{OP} = 0V$ でなされるのではなく $V_{OP} \approx V_{BE2}$ で設定されることも偏差の原因となっていよう。

図5-3は補償回路のない場合であるが、その追従誤差は極めて大きく、 V_{OP} が小さくなるほど大きくなるのは理論通りである。なお温度特性については測定器の関係から厳密には測定していないが、 $V_{OP} = |V_{ON}| = 15V$ に設定後、室温 $10^\circ C$ から $25^\circ C$ の変化に対し、 V_{ON} の変化は $10mV$ 以下であった。

むすび

主として実験用を目的とした正負出力追従形の安定化回路について、最も基本的な電圧安定化回路を用いた場合に生ずるオフセット誤差と、その補償法について、直線近似を用いた解析を行い、その解析に基づく実験によりほぼ満足できる結果を得た。この方法は極めて簡単な構成で、設計、調整も大へん簡単であるにもかかわらず、その追従誤差を出力 $2V$ から $20V$ 以上にわたって、 $\pm 0.2\%$ 以下におさえることができる。この方法による電源を用いれば、 $\pm 15V$ を用いる一段の演算増巾器から、差動増巾器やマイクロ・パワー・オペアンプ等に、自由に電圧設定や、電源変動特性を測定することができる。この回路の温度特性は、ほとんど被追従側の温度特性で済まる。

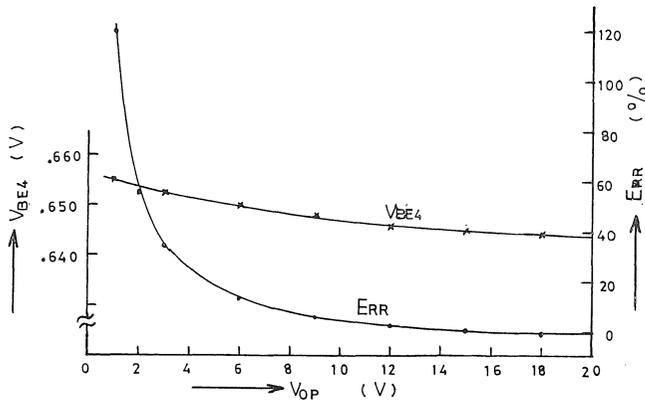


図5-3 補償回路を持たない場合の追従誤差

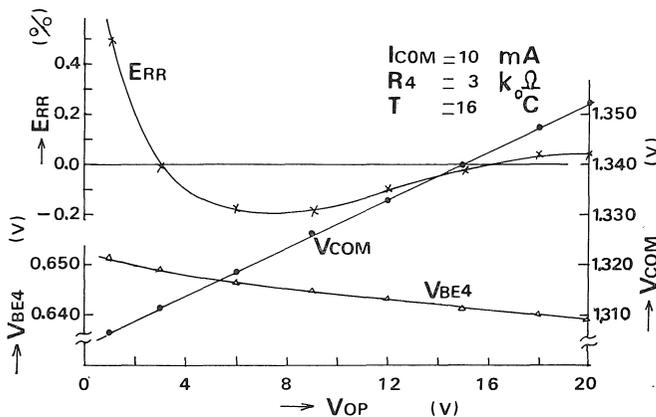


図5-4 補償回路を持った場合の追従特性