

電圧/電流変換

電圧/電流変換

電圧制御電流源 (VCCS) は、部品の試験やモーターのトルク制御で使用する能動負荷などの用途で使用できます。トルクはモーター電流の一次関数のため、トルクの制御は容易に行うことができます。サーボ・ループで電流を駆動することで、モーターのインダクタンスによる位相遅れが減り、ループを簡単に安定させることができます。

パワー・オペアンプを使用している VCCS では、負荷を接地する必要があるかどうかに応じて 2 つの基本形態のいずれかが想定されます。

電流源: 浮動負荷

図 1A は、浮動負荷に対応した VCCS の基本回路を表しています。この負荷は実際には帰還パス内にあります。R_S は、負荷電流に比例した電圧を生成する電流センス抵抗です。

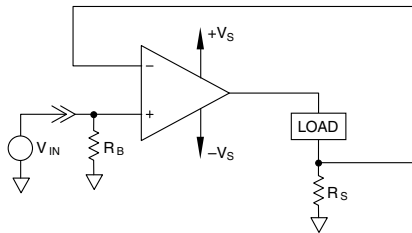


図 1A. 浮動負荷に対応する VCCS 基本回路

非反転 VCCS を説明している図 1A 以降の図に抵抗 R_B が組み込まれていることに注意してください。この抵抗は、入力電圧源が切断されたりパワー・オン・サイクル中に高インピーダンスになった場合に、非反転入力に浮動状態にならないようにするために存在しています。R_B は、アンプの入力バイアス電流の経路を与え、V_{IN} が切断されたり高インピーダンスになったときにアンプの出力電流を強制的にゼロにします。図 1B は、浮動負荷に対応した VCCS の実装を表しています。周波数が低い場合、追加されている部品 Cf、Rd、R_F は、いかなる影響も及ぼしません。これらは安定性を得るために組み込まれています。これらの部品に関する考慮事項は、このアプリケーション・ノートで後述する「浮動負荷 VCCS の安定化」のセクションで説明します。

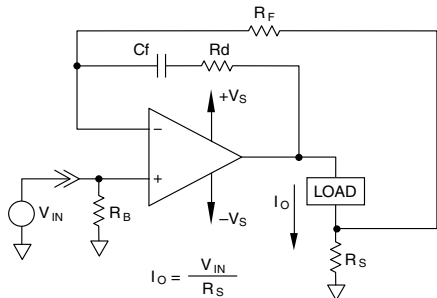


図 1B. 浮動負荷に対応する、安定性が補償された VCCS 回路

アンプのループ・ゲインにより、R_S を通過した電圧は、非反転入力に印加された電圧と同じ値であると強制的に見なされるため、次の伝達関数が得られます。

$$I_o = V_{IN} / R_S$$

この基本回路にはいくつかのバリエーションがあります。R_S から反転入力への直接的な帰還接続は不要です。部品を組み込むことで、回路のゲインを高めることができます。図 2 は、同等の伝達関数を得られる、よりゲインが高い回路を示しています。回路のゲインが高いと、精度と帯域幅が多少失われますが、安定化しやすくなります。

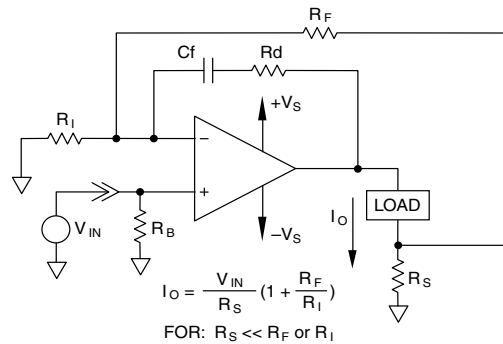


図 2. 浮動負荷に対応する、高ゲイン構成の VCCS 回路

図 3 は反転 VCCS を示しています。入力電圧により電流出力の極性が逆になります。反転電圧アンプの場合と同様、アンプ入力にコモン・モード変動を持たない利点は、精度が高まることと歪が少なくなることです。

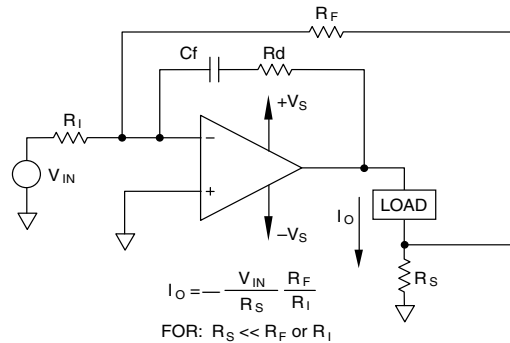


図 3. 浮動負荷に対応する VCCS、反転構成

図 4 は、実際には CCCS、つまり電流制御電流源である電流入力を表しています。これは実際には電流アンプです。この回路は、デジタル/アナログ・コンバーター (DAC) とともに使用した場合や、電流を入力として使用できる任意のアプリケーションで役に立つ可能性があります。

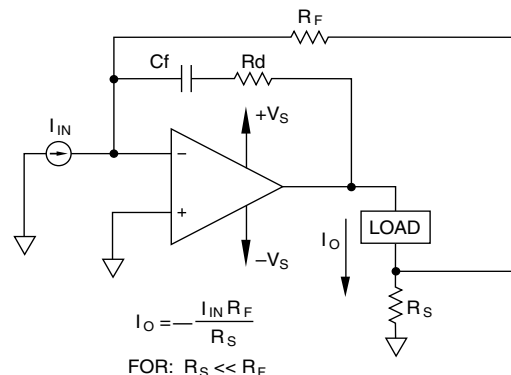


図 4. 浮動負荷に対応する CCCS、反転構成

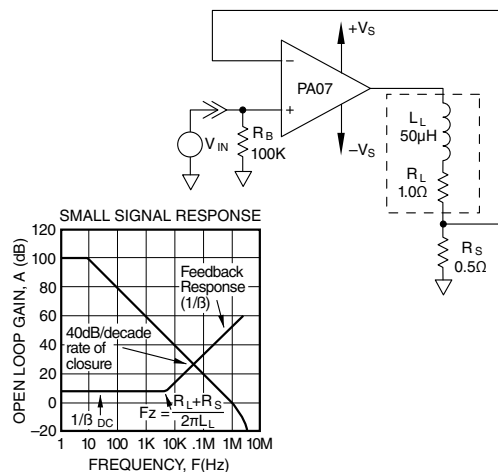
浮動負荷VCCSの安定化

負荷は、これらすべての回路の帰還ループ内にあるため、安定性に多大な影響を与えます。負荷が常に純抵抗であれば、解析は容易になるため、多くの回路では、安定性を保証するために部品 (Cf や Rd など) を追加する必要がなくなります。しかし、現実には通常、これらの回路を使用して、電磁コイルやモーターといった複雑な負荷を駆動することになります。

安定性解析は、帰還応答をアンプの開ループ・ゲインに対してプロットする「減衰率」のテクニックを使用すれば、最も簡単に行えます。この技術で使用する情報は、任意のアンプのデータ・シートから容易に取得できます。

減衰率とは、帰還応答とアンプの Aol がどのように交差するかを表したものです。結合された交点の勾配が 20dB/dec を超えなければ、その回路は安定します。

たとえば、図 1A のアンプについて考えてみます。0.5Ω の電流センス抵抗を持つ PA07 アンプを使用して、1Ω の直列抵抗を持つ 50 μH のコイルを駆動すると想定します。図 5 では、PA07 の Aol グラフ上に負荷の応答とセンス抵抗を重ね合わせています。



$$\beta_{DC} = \frac{.5}{1.5} = .333 \rightarrow 1/\beta = 9.5\text{dB} \quad F_z = \frac{1.0 + .5}{2 \cdot 50\mu\text{H}} = 4.77\text{kHz}$$

図5. 帰還応答のグラフ

これらの応答の交点では、結合された勾配が 40dB/dec となり、リングングまたは大規模な発振が発生します。ここでは、このポイントを「交点臨界周波数」と呼ぶことにします。この回路は、その応答が交点臨界周波数で優位となる代替帰還パスを使用することで最良の補償が得られます。

代替帰還応答に対する適切な基準は次のようになります。

1. 交点臨界周波数で 1 桁 (20 dB) 以上優位となる応答です。
2. 代替帰還応答には、交点臨界周波数より 1 桁小さい周波数で発生するコーナー周波数を持ちます。

この応答を提供するために、図 6 に示す補償応答を提供する代替帰還部品が選択されています。図 6 の FB は、閉ループ構成時にアンプで見られる支配的な帰還パスです。RF は単に、代替帰還ループの接地脚リターン・インピーダンスとして動作するため、100 ~ 1000 Ω の低い値となります。その後、希望の高周波ゲインを提供する Rd が選択され、代替帰還のカーブを生成する Cf が選択されています。

なお、これらの技術は、Apex Precision Power AN05「精密磁気偏向」で説明した電磁偏向アンプの安定化に使用される技術と類似している点に注意してください。

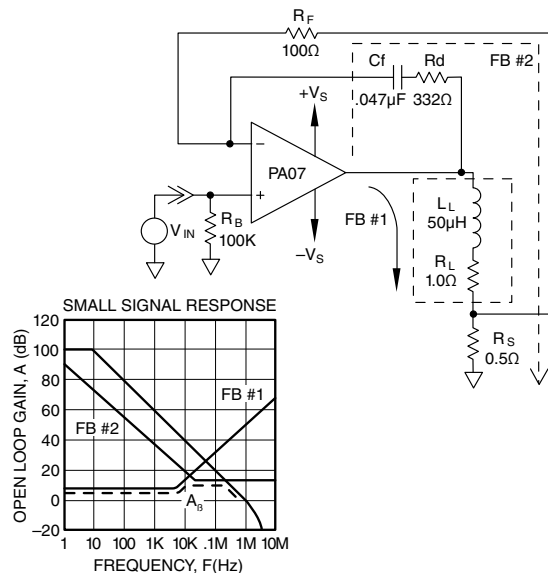


図6. アンプの補償

接地された負荷に対する電流出力

接地された負荷に使用する VCCS は「改良型 Howland Current Pump」と呼ばれることがあります。これは、実際には、入力信号と帰還の両方を分けてセンスする差動アンプです。

図 7 は、関連する伝達関数を使用したこの VCCS の一般的な例を示しています。

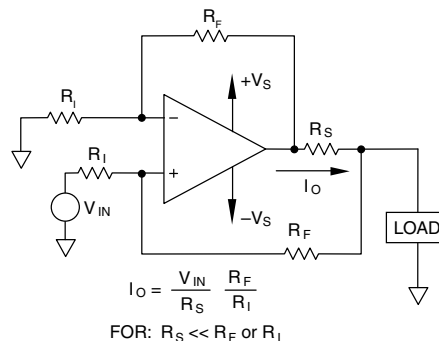


図7. 接地された負荷に対応するVCCS

最初に考慮すべきこの回路特有の事項は、2つの入力抵抗 (Ri) および 2つの帰還抵抗 (RF) を厳密に一致させる必要があることです。わずかな不一致であっても、伝達関数で大きな誤差が発生し、出力インピーダンスが低下するため、回路は本来の電流源とはなりません。

一致要件の一例として、図 8 の PA07 を使用した実際の例を考えてみましょう。抵抗を許容誤差にできるだけ厳密に一致させることで、43K Ω の出力インピーダンスが生成されています。1% の不一致で、出力インピーダンスは 200Ω に低下し、伝達関数に約 20% の誤差が生まれています。

このことから、0.1% より優れた一致率が必要であることがわかります。一致率が完全で、あらかじめパッケージングされている抵抗ネットワークを使用した場合におそらく最良の結果が得られます。図 8 の回路では、他の箇所の不一致を補償するために、2つの抵抗 (RF) での若干の不一致が必要となり、最高の性能を得るためにはトリムポットを組み込む必要がある場合があることを示唆しています。

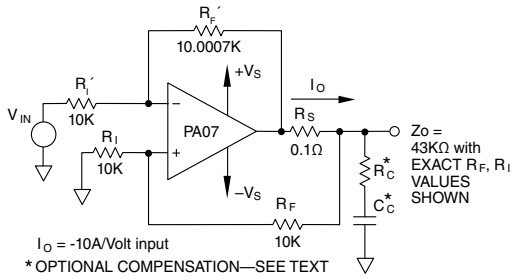


図8. 実際のPA07を使用したVCCS

接地された負荷回路を使用した場合の安定性

接地された負荷回路は、安定性の観点からいえば、際立って寛容です。一般的に、安定性を保証するために追加の対策を行う必要はありません。

安定性に関するなんらかの問題が発生した場合、多くは容量性として見える回路の出力インピーダンスが原因です。これと等価な容量は次のように表すことができます。

$$C_{eq} = \frac{R_1 + R_F}{2\pi f_o R_I R_S}$$

ここで: f_o = アンプのゲインと帯域幅の積

この容量は誘導性負荷と共振できるため、多くの場合、急激な遷移時にリングングの問題が発生します。これに対する唯一の有効な補償は、単純な「Q スナバ」技術です。この技術では、まず誘導性負荷と回路の出力容量の共振周波数を決定します。次に、共振周波数時のインダクタのリアクタンスの 10 分の 1 の抵抗値を選択します。この抵抗値の 10 分の 1 に等しい共振周波数時のリアクタンスを持つ直列コンデンサを追加します。もう 1 つの方法として、小型インダクタとダンピング抵抗を R_S と直列に組み込む方法もあります。

なお、この式では、 R_1 と R_S を大きくし、ゲイン / 帯域幅が優れたオペアンプを使用して実効容量を減らす方が有利である点にも注意してください。優れた高周波性能が必要な回路の場合、浮遊容量およびアンプの入力容量が最も顕著になる点を上限として、 R_1 および R_S のいずれかまたは両方を増加する必要があります。

この回路の不安定性を引き起こす 2 つ目のまれな原因は、回路の出力インピーダンス特性における負性抵抗です。この問題は、帰還抵抗を調整して一致率を向上させることで解決できます。

電流ミラー

電流ミラー回路は、入力電流とは比例し、方向は逆となる第 2 の電流を生成するのに便利なデバイスです。

入力で柔軟な電圧コンプライアンスを得るために、図 9 のミラーは実際の電流源から駆動する必要があります。任意の入力電流は、 R_2 の両端での降下と一致する降下を R_1 の両端で発生させようとするため、 R_2 を通過した電流は R_1 の電流と比例することになります。たとえば、 R_1 が 1.0 KΩ であり R_2 が 1 Ω である場合、1mA の入力電流により 1A の出力電流が生成されます。

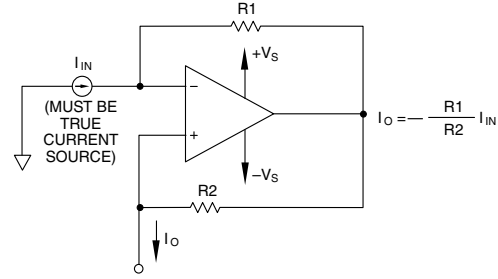


図9. 電流ミラー

減衰率および帰還応答

減衰率安定性解析技術とは、帰還応答をアンプの応答に対してプロットして安定性を判別する手法です。

任意の帰還アンプの閉ループ・ゲインは次の式で求められます。

$$A_{cl} = A_{ol}/(1 - \beta A_{ol})$$

ここで: A_{ol} はアンプの開ループ・ゲインであり、 A_{cl} は結果として得られる閉ループ・ゲインです。

β は、出力信号から、入力に帰還された信号までの減衰を表します (図 10 を参照してください)。つまり、 β とは、アンプの出力電圧を介してアンプに帰還された電圧の比率のことです。 ($V_{feedback} = \beta V_{out}$)

このアプリケーション・ノートで使用している例では、アンプ回路の対応する閉ループ応答 ($1/\beta$) をプロットし、この応答をアンプの開ループ応答に重ね合わせることで β をアンプの応答にプロットしています。この「**対応する閉ループ応答**」はノイズ・ゲイン $A_v(n)$ とも呼ばれます。

図 5 の例では、帰還ネットワークはヨークとセンス抵抗で構成されているため、帰還応答と呼ばれている曲線は、実際にはアンプの開ループ・ノイズ・ゲイン応答を表しています。図 6 では、 C_f , R_d , R_F の追加帰還応答は、他のすべての応答とは独立してプロットされています。これらのグラフを使用する際に注意すべきいくつかの重要なポイントを次に示します。

1. 図 1 のように帰還ネットワークが複数ある場合、任意の周波数で最も低いノイズ・ゲインを有する応答が支配的な帰還パスとなります。図 6 では、この支配的な帰還パスには FB というラベルが付いています。
2. ノイズ・ゲインおよび開ループ・ゲインが結合された傾きと交差する、つまり減衰率が 20dB/dec を超えるときには常に、安定性が悪くなります。40dB/dec の場合には、180 度の位相変化が起こるため、当然、発振が起こります。この例は図 5 に示されています。

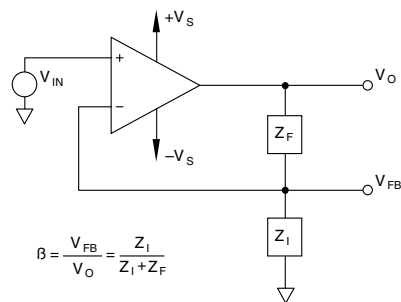


図10. 帰還の要素β