

電流制限

概要

適切な電流制限のないパワー・オペアンプは危険を伴います。つまり、動作するかもしれませんが、いつ不具合が発生するかわかりません。パワー・オペアンプには、複雑な回路が使用されてきていますが、多くの場合、簡単にコスト効率のよい回路が使用されています。しかし依然として安全のための技術的課題が残っています。その目標とするところは、SOA を侵すことなく負荷に必要な電力を供給することです。

基本的な電流制限

パワー・オペアンプにおける電流制限回路は、出力段の近辺のみに置かれているため、出力電流を予め決められたレベルに、瞬時に（サブ・マイクロ秒で）減少させることができます。そのような制限を組み込む理由は、次のとおり少なくとも 4 つあります。

1. アンプの出力トランジスタには、ほとんどの場合そのアンプの絶対最大定格を超える電流を供給する能力があります。この制限を超えると、金属部を破壊する可能性があります。通常は、電源に接続されているワイヤー・ボンドまたは出力ピンが溶解します。よくある間違いは、この保護のために電源の電流制限に頼る方法です。この間違いにご注意ください。フィルタ・コンデンサ（電源内部およびオペアンプの近く）が、大量のエネルギーを蓄積し、ワイヤー・ボンドを気化させることがよく起こります。
2. 可変インピーダンス負荷の場合は、起こりうる故障状態に対する保護が必要な場合があります。よい例として、モーター駆動における機械的な停止状態が挙げられます。
3. 電流制限によって、電源の過負荷を防止できます。別の回路が同じ電源を共用している場合は、このことが重大な事態になる可能性があります。
4. パワー・アンプの安全動作領域（SOA）を守ることによって接合温度を妥当なレベルに保つことができます。出力電流は、電力方程式の 1 つの項です。

通常の電流制限であっても、最初の 3 つの理由に対しては十分です。電流制限に対する簡単でコスト効率のよいアプローチを図 1 に示します。出力トランジスタ Q1 を流れる電流は、センス抵抗 Rcl によって電圧に変換されます。この電圧が、電流制限トランジスタ Q2 の Vbe を超えると前段からの駆動電流が出力側に迂回させられ、Q1 をシャットダウンします。Q2 は、アンプとしてだけでなく、制限電流を設定するための、不完全ながらも基準電圧として機能します。室温において、その基準値は約 0.65V です。Rb は、Q2 の容量とともに、発振を防止するのに十分な程度まで回路の速度を低下させます。数式で表現すると次のようになります。

$$I_{cl} = 0.65 / R_{cl} \quad (1)$$

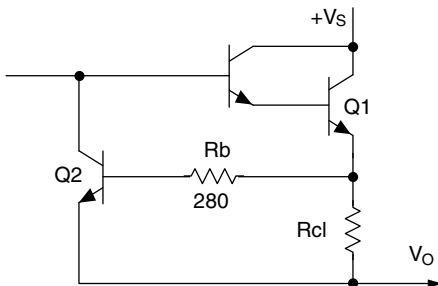


図 1. 従来の電流制限回路

または

$$R_{cl} = 0.65 / I_{cl} \quad (2)$$

ここで、I_{cl} は制限電流で、単位は A、R_{cl} は電流制限抵抗で、単位は Ω です。

4 番目の理由は、より複雑です。図 2 と 3 に、固定の電流制限で SOA の制限を満足するための課題を示します。まず、PA10 の SOA グラフにおける X 軸の表示は出力電圧ではなく、導通しているトランジスタの両端にかかるストレス電圧であることに注意してください。DC 信号と 25°C のケース温度を想定して次に進みます。抵抗負荷であることから、ストレス電圧は供給電圧の片側に限定されること、および出力トランジスタにおける熱の発生は、出力が電源電圧の 50% になったときに、最大になることがわかります。SOA グラフは、25V における最大電流が 2.7A であることを示しています。このことは、最小負荷が約 9.3 Ω であれば、どのような出力電圧であっても安全なレベルまで電流が制限されることを意味しています。最大電流は 4.75A (44V/9.3 Ω) で、最大の出力電力は 209W となります。PA10A の電圧スイングの仕様は、5A 時で V_s-6V であることに注意してください。しかし、そのアプリケーションが出力における部品やケーブルの短絡に耐える必要がある場合、ストレス電圧は 50V に跳ね上がり、安全電流の最大値は 1.05A にすぎない値となります。一度この電流制限が設定されると、44 Ω の負荷に対して 46W（ピーク）に制限されます。エネルギーを蓄積する負荷に対しては、約 -50V の初期電圧および正方向へ立ち上がる信号を想定しています。初期の電源と出力間のストレスは、ほぼ 100V になり、安全電流の最大値は 0.3A にも満たなくなります。

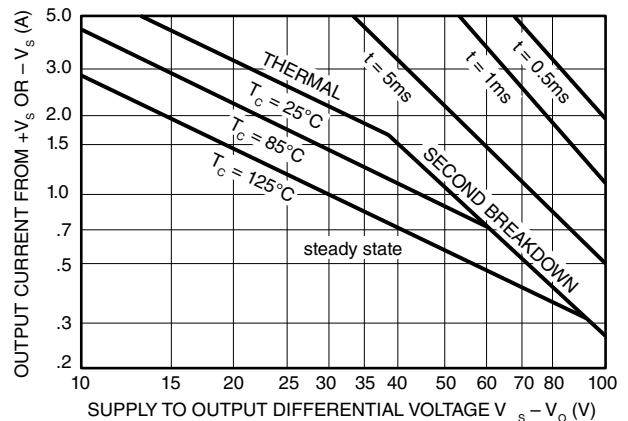


図 2. PA10のSOAグラフ

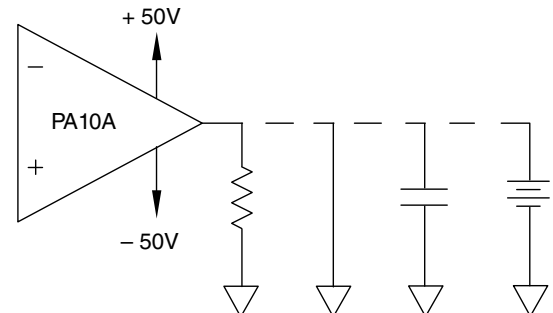


図 3. 難しい負荷または可能な障害条件

移動目標としての電流制限

電流制限回路における最大の変数は、不完全基準電圧、つまり Q2 の V_{be} の温度係数です。これは、ケース温度の上昇に対して 1℃当たり約 2.2mV 低下します。したがって、0.65 という数字は、-55℃における 0.826 から 125℃における 0.43 まで幅を持っています。この勾配と最初に述べた電流制限の理由を比較してみると、次のとおりです。

1. この理由は温度によって変化しない。
2. この理由は負荷によって変化する。
3. この理由は電源によって変化する。
4. この理由は温度によって変化しない。

SOA グラフ上に限界点をプロットし、システムにおける他の要件と比較するのが最適です。詳細は、www.Cirrus.com 内の Apex Precision Power の Web サイトをご覧ください。また、この作業を自動化するソフトウェアについては、Apex Precision Power のアプリケーション・エンジニアリングに問い合わせてください。

再度図 1 を見てみると、実際の電流制限が前述の式と異なるいくつかの原因がわかります。電流制限の状態に入ると、Q2 は駆動段の電流を Q1 から切り離し、出力に直接流します。このことは、実際の電流制限をドライブ段の能力より小さくすることができないことを意味しています。現実的な電流制限の最小値を示しているデータ・シートもあります。ドライブ段の電流は出力能力よりはるかに小さいため、この領域での動作は異常です。つまり、この領域で動作するということは、アンプの能力がそのアプリケーションに対して、おそらく過剰であることを意味しています。

ここで、Q2 が導通しているとき、R_b を通って流れるベース電流があり、これが効果的に基準電圧を上昇させる、ということを検討します。あるアンプでは、この効果は十分大きく、この場合、アンプのデータシートには、前述の式で使った 0.65 よりも大きい独自の値が記載されています。

図 1 を見てもすぐにわかるわけではありませんが、内部ワイヤ・ボンドおよび半田接合部、配線パターン、R_{cl} のリード部のすべての抵抗は、これら 4 つの配線の電流検出を実行するための端子がアンプに備えられていない限り、R_{cl} の定格値を増大させます。大電流アプリケーションでは、試作回路での測定が、設計を完成させるための最適な方法であると言えます。

ここまでで、負荷や耐える必用のある故障状態に関して、きわめて広範囲の「安全な」電流というものを理解しました。また、簡単でコスト効率はよいが、これらの制限回路は基準としての標準にはならず、+/-20% の範囲でものを考える必要がある、ということもわかりました。残念な部分は、通常の電流制限は、ワースト・ケースの故障状態に対して保護するように機能しますが、故障でない状態に対しても電流を制限してしまうところ。非現実的なヒートシンクを想定したことで、安全電流は依然としてアンプの絶対最大定格に比べれば、わずかであることを理解することは重要です。このことは、ヒートシンクと電流制限の両方の重要性を示しています。SOA 保護についての理想的な解決策としては、ワット数に応じた制限となるように、各出力トランジスタへストレス電圧センサーと乗算器を追加する方法もあります。回路のすべてが十分高速であれば、これ以上の SOA に関する心配は不要になります。部品、設計時間およびスペースの観点で見積もったコストは、より大きなアンプを使用した場合に比べて、ほとんどの場合で高くなるため、このアプローチはきわめて稀です。明らかに、電流制限の手法に関するコスト効率のよい改善策が必要とされています。

フォルトオーバー電流制限の基本

Apex Precision Power のモデル PA04、PA05、

PA10、PA12 は、フォルトオーバー電流制限を利用できます。従来の電流制限回路(図 4)に抵抗を 1 つ追加するだけで、出力スイングに対して強力な応答特性を得ることが出来ます。一般的に R_{cl} が R_b に対して 3 桁低い値であることがわかると、R_{cl} を無視して、R_b と R_{fo} で接地と出力電圧の間の電圧分圧器を構成していると考えるのが合理的です。R_b に比べて一般的に 2 桁大きい値の R_{fo} があるため、この分圧器は出力電圧の非常に小さな一部を Q2 のベースに直列に追加します。出力が 0V の場合、電流制限は従来の回路と同じです。しかし、出力が正側に立ち上がるにつれて、分圧器の電圧による増加分が基準電圧 (Q2 の V_{be}) を効果的に増加させ、より大きな電流が流れることができるようになります。負側の出力電圧 (Q1 は依然として導通状態) に対しては、追加された負側の出力のごくわずかな部分によって電流の流れが減少します。別の見方をすると、これは、出力電圧に基づいて電流制限の式に項を加えたにもかかわらず、導通しているトランジスタの電圧ストレスに反比例する方法で電流制限を変更する、という状況です。これは、ワット数を算出する乗算器といった理想からは依然としてかけ離れています。これは可変電源の場合は何もありませんが、電流制限の機能に対しては望ましい勾配を与えています。数式で表現すると次のようになります。

$$I_{CL} = \frac{0.65 + V_o \cdot \left(\frac{R_b}{R_{FO} + R_B} \right)}{R_{CL}} \quad (3)$$

$$R_{CL} = \frac{0.65 + V_o \cdot \left(\frac{R_b}{R_{FO} + R_B} \right)}{I_{CL}} \quad (4)$$

ここで、V_o は出力電圧で、単位は V、抵抗は図 4 で示されており、単位は Ω です。

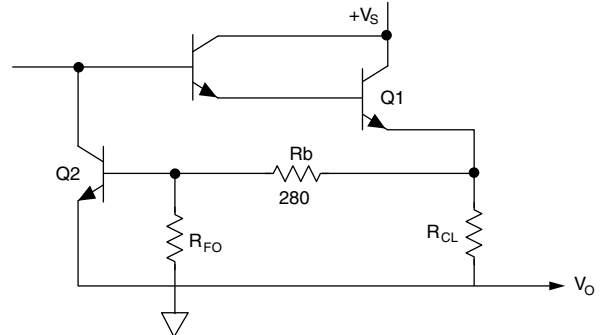


図4. 基本的なフォルトオーバー電流制限回路

出力の短絡に耐える必要のある抵抗負荷駆動の場合を再び考察しながら、22 Ω をピークで 88W (44Wrms、44Vpk、2Apk) まで駆動することを目的とすると仮定します。R_b を 280 Ω、R_{fo} を 20K Ω とし、ピーク電圧時のピーク電流に対して、式 4 を使用して R_{cl} = 0.629Ω を算出します。0.62 Ω の抵抗を使用します。ここで、式 1 は、短絡故障の状態における電流が 1.05A に制限されることを示しています。図 5 に示すように、SOA グラフ上に電流制限をプロットすることによって、この電流制限が、ゼロから電源電圧までのどのような電圧に対しても安全であることが明らかになります。通常の電流制限の代わりにフォルトオーバーを使用することによって電力供給能力がほぼ 2 倍になっています。

エネルギーを蓄積する負荷の場合は、このフォルトオーバー回路の電流制限はゼロを横切り、25℃を超える全温度においてアンプのスイング能力の範囲で負側にも極性を変えることを、式 3 が示しています。これは、アンプのラッチアップの原因になることがあるので、避ける必要があります。低い電源電圧または大きなフォルトオーバー抵抗を使用すればこの問題を解決することができます。

電流制限が接地への短絡および最大 100V のストレス・レベルに対して安全であることはわかっていますが、25℃以下における許容電流が、これら 2 点間で SOA 直線の上を横切っていることを、図 5 は示しています。Rcl を増加させることによって、すべての出力電圧における電流制限を下げ、この問題を解決することができます。

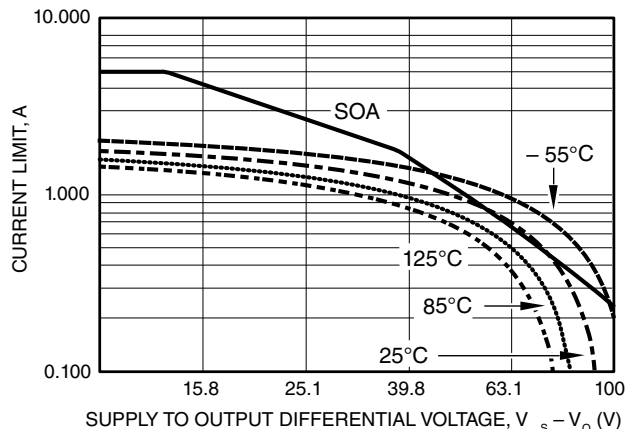


図5. フォルトオーバー電流制限対出力電圧

2種類のフォルトオーバー

PA10 および PA12 には、正側と負側の電流制限トランジスタの両方に対し、280 Ω の Rb と 20K Ω の Rfo を内蔵しています。2 つの 20K Ω 抵抗はピン 7 でお互いに接続されており、そのピンを接地することで最大のフォルトオーバー勾配を得ることもできれば、追加の抵抗をピン 7 から接地に対して直列に挿入し、より小さなフォルトオーバー効果を得ることもできます。280 Ω の抵抗は、元々両方とも Vo に接続されており、0.28K と 20K の 2 つの直列ネットワークは本質的に並列なので、PA10 および PA12 に特有の式は、前述の例に比べ、より複雑になります。

$$I_{CL} = \frac{0.65 + V_O \cdot \left(\frac{10.14}{10.14 + R_{FO}} \right) \cdot \left(\frac{.28}{20.28} \right)}{R_{CL}} \quad (5)$$

$$R_{CL} = \frac{0.65 + V_O \cdot \left(\frac{10.14}{10.14 + R_{FO}} \right) \cdot \left(\frac{.28}{20.28} \right)}{I_{CL}} \quad (6)$$

ここで、Icl の単位は A、Vo の単位は V、Rcl の単位は Ω で、Rfo は PA10 および PA12 の外部フォルトオーバー抵抗で、単位は K Ω です。

PA04 または PA05 用のフォルトオーバー接続を図 6 に示します。Rb には 270 Ω を使用し、式 3 および 4 を使用します。ピン 10 における直接の短絡は瞬間的であってもアンプを即座に損傷させる可能性があること、およびピン 10 は 270 Ω で出力から絶縁されていることに注意してください。

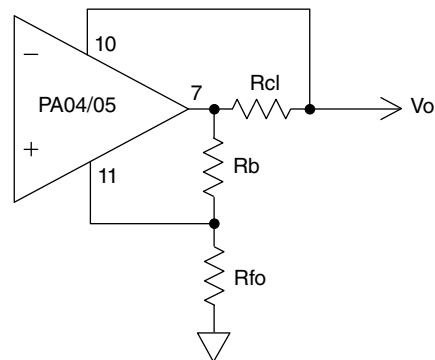


図6. PA04またはPA05用のフォルトオーバー回路

結論

動物に生存本能があるようにパワー・オペアンプには電流制限があり、備えておくべき優れた機能です。基本的な電流制限は簡単なものですが、温度変化やフォルトオーバーのような回路オプションが加わると、危険な可能性がある箇所をすべてチェックする作業が非常に煩雑になります。まずは計算を行い、次に、誰でも理解しやすい対数目盛の SOA グラフにデータをプロットします。