

降圧レギュレータにより、 調光機能を備える スマートLEDドライバを実現する

著者：Jon Kraft

LEDは、従来の電球などと比べて、寿命が長く消費電力が少ないという特徴を持ちます。そのため、照明業界を変革するものとして期待されています。しかし、実際にはLED照明の普及を妨げている要因が存在します。それはLED自体のコストです。LED照明器具全体のレベルで見ればコストは様々です。ただ、一般的には照明器具の総コストのうち約25%~40%はLEDが占めています。図1に示すように、このような状態は今後何年にもわたって続くと言われています。

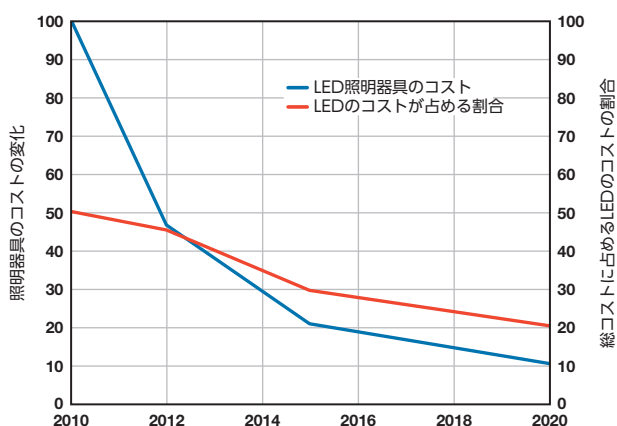


図1. LED照明器具のコスト。照明器具のコストが今後どのように変わっていくのかを示すために、2010年時点のコストに対する比率をプロットしています。併せて、総コストに対してLEDが占める割合がどのように変化するかも示してあります¹。

照明器具の総コストを削減する方法の1つは、データシートで許容されている最大限のDC電流でLEDを駆動することです。その値は、LEDのビニング電流の値よりもかなり大きい可能性があります。ただ、その電流で適切に駆動することができれば、コストあたりの光量（ルーメン）を高めることができます。

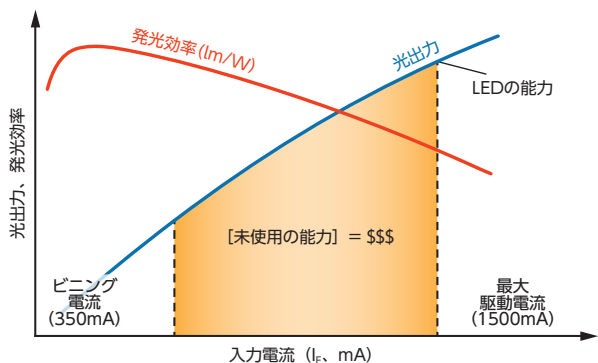


図2. LEDの駆動電流に対する光出力と発光効率²

しかし、そのような条件でLEDを駆動するには、大電流を供給できるドライバが必要です。500mA未満といったレベルの電流でLEDを駆動するのであれば、多くのソリューションを利用できます。それに対し、700mA~4Aといった多くの電流を供給するための選択肢は限られています。このことは、意外に感じられるかもしれま

せん。なぜなら、半導体の市場には、最大4Aの駆動能力を備えるDC/DCソリューションが豊富に提供されているからです。ただ、それらのソリューションの多くは、電圧の制御を目的として設計されています。つまり、電流を制御するためのものではありません。そのため、LEDの駆動に使用できるとは限らないということです。そこで、本稿では、容易に入手できる降圧型のDC/DCコンバータを利用してスマートなLEDドライバを実現する方法を紹介することにします。

図3は、一般的な降圧型DC/DCコンバータの動作についてまとめたものです。この回路では、入力電圧をチョッピングし、その結果をLCフィルタに受け渡します。その出力が安定した電圧として負荷に供給されます。この機能を実現するためには、2つの能動素子と2つの受動素子が使われます。2つの能動素子とは、入力とインダクタの間に配置されたスイッチAと、グラウンドとインダクタの間に配置されたスイッチB（ダイオードが使われることもあります）のことです。一方、2つの受動素子とはインダクタLと出力コンデンサC_{OUT}のことです。これらによって構成されるLCフィルタは、能動素子の動作に伴って発生するリップルを低減する役割を果たします。

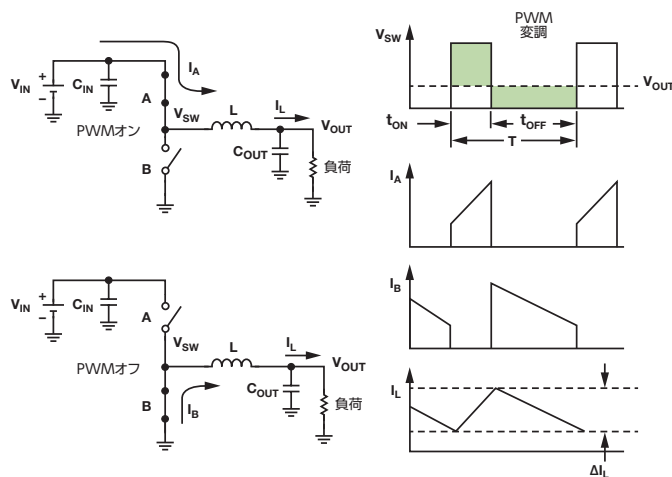


図3. 降圧型のDC/DCコンバータ³

降圧処理に必要な制御処理を担うICは大きく2つに分けられます。1つは、スイッチを内蔵しているタイプのものです。この種の製品は、レギュレータIC（あるいはコンバータIC）と呼ばれます。一方、外付けのスイッチと共に使用するタイプの製品は、コントローラICと呼ばれます。2つのスイッチとしてトランジスタ（MOSFETまたはBJT）を使用するものは、同期型と呼ばれます。一方、下側のスイッチとしてダイオードを使用するものは、非同期型と呼ばれます。このように、降圧コンバータにはいくつかの種類があり、それぞれに長所と短所があります。とはいえ、通常は同期型の降圧レギュレータが最も有力な選択肢になるでしょう。なぜなら、効率、部品点数、ソリューションのコスト、基板面積といった面で優位性を備えているからです。残念ながら、LEDを大電流（最大4A）で駆動するための同期型の降圧レギュレータはあまり製品化されていません。製品化されているものも、比較的高価だという欠点があります。そこで、本稿では、標準的な同期型降圧レギュレータ「ADP2384」を活用する方法を紹介します。一般的な電源を構成する場合とは異なる接続方法を採用することにより、LEDの駆動電流をレギュレートできるようにします。

ADP2384は、同期型の降圧レギュレータであり、高い効率を実現します。入力電圧は最大20Vであり、出力電流は最大4Aです。図4に、出力電圧をレギュレートするための一般的な接続方法を示しました。この回路の通常の動作は次のようなものになります。まず、出力電圧 V_{OUT} は分圧され、得られた電圧がFBピンに入力されます。この電圧は、ADP2384の内部で生成される600mVのリファレンス電圧と比較されます。その比較結果は、スイッチを制御するための適切なデューティ・サイクルを生成するために使用されます。このような仕組みにより、定常状態において、FBピンの電圧は正確に600mVに保持されることになります。つまり、出力電圧 V_{OUT} は600mVを分圧比で割った値でレギュレートされるということです。

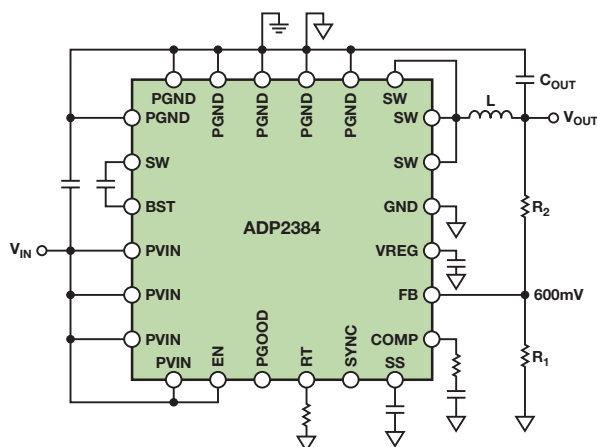


図4. ADP2384の一般的な使い方。
出力電圧をレギュレートするための接続方法を示しています。

図5に示したのは、上側の抵抗 R_2 をLEDに置き換えたものです。この場合も、 V_{OUT} はFBピンで600mVを維持するために必要な電圧（定格内）になるはずですが、LEDを流れる駆動電流 I_{LED} は、 $600mV / R_{SENSE}$ になるよう制御されることになります。

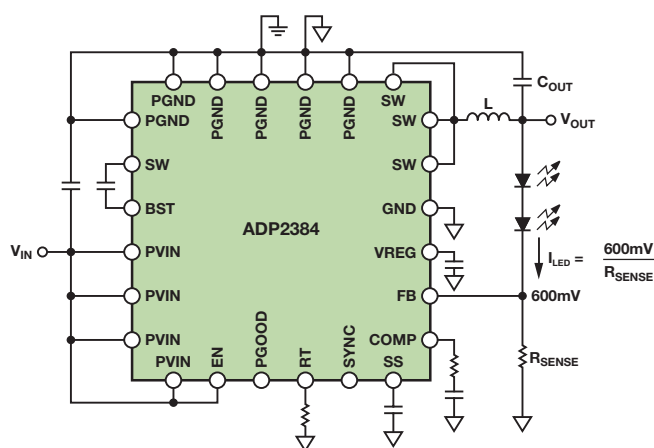


図5. 基本的なLEDドライバ。
優れた効率は得られません。

図5の回路においては、 I_{LED} を設定するためにFBピンとグラウンドの間に配置する抵抗として高精度のものを選択すれば、期待通りの結果が得られます。但し、その抵抗によって、 $P = 600mV \times I_{LED}$ で決まる多くの電力が消費されてしまいます。このことは、 I_{LED} の値が小さければ大きな問題にはなりません。しかし、本稿で想定しているような大きな駆動電流が必要なケースでは、効率が大きく低下してしまいます。なぜなら、抵抗によって $600mV \times 4A = 2.4W$ もの電力が消費されるからです。加えて、照明器具からは大量の熱が生じることになります。FBリファレンス電圧（FBピンに現れるリファレンス電圧。通常は、ADP2384の内部で生成されるリファレンス電圧に等しい）を下げれば、それに比例して消費電力は削減されます。しかし、ほとんどの降圧レギュレータは、FBリファレンス電圧を調整する方法を提供していません。ただ、実はほとんどの降圧レギュレータでは、少し工夫を施すことによって、FBリファレンス電圧を下げることはできます。1つは、SS/TRKピンを使用する方法です。もう1つは、 R_{SENSE} の電圧にオフセットを加える方法です。

多くの汎用降圧レギュレータICには、SS（ソフトスタート）ピンまたはTRK（トラッキング）ピンを備えています。SSピンは、起動時にスイッチング・パルスのデューティ・サイクルをゆっくり増加させることにより、起動時のトランジェントを最小限に抑えるためのものです。一方のTRKピンは、独立した電圧に追従させて降圧レギュレータを起動するために使用されます。多くの場合、これらの機能は単一のSS/TRKピンとしてまとめられています。ほとんどの降圧レギュレータICでは、誤差アンプによって、SSピン、TRKピン、FBピンのうち最小の電圧とリファレンス電圧の比較を行います（図6）。

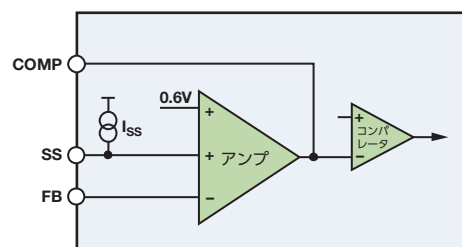


図6. ADP2384における
SSピンの使われ方

SS/TRKピンを照明器具のアプリケーションで利用する場合、次のようなことを行います。まず、SS/TRKピンには固定電圧を設定します。そして、それを新たなFBリファレンス電圧として使用します。分圧器を定電圧に接続すれば、適切なリファレンス源として使用できます。多くの降圧レギュレータICは、制御された低い電圧を出力するピンを備えています。ADP2384で言えば、VREGピンがそれに相当します。そうした出力を定電圧として使用すればよいということです。より高い精度を得たい場合には、[ADR5040]のような高精度の電圧リファレンスを使用するとよいでしょう。ADR5040は、単純な2端子の製品です。いずれの場合も、供給される電圧とSS/TRKピンの間に配置した抵抗分圧器によって、新たなリファレンス電圧を生成します。

この電圧を 100mV～200mV に設定すれば、消費電力と LED の駆動電流の精度のトレードオフとして最適な結果が得られます。ユーザがリファレンス電圧を選択できる場合、もう 1 つのメリットが得られます。それは、 R_{SENSE} として都合の良い標準値を選択できるようになることです。同抵抗によって LED の駆動電流を設定することから、現実の実装には適していない高精度の抵抗値を指定しなければならなかったり、標準的な抵抗を組み合わせる必要のある値を実現したりする費用や不正確さを回避することが可能になります。

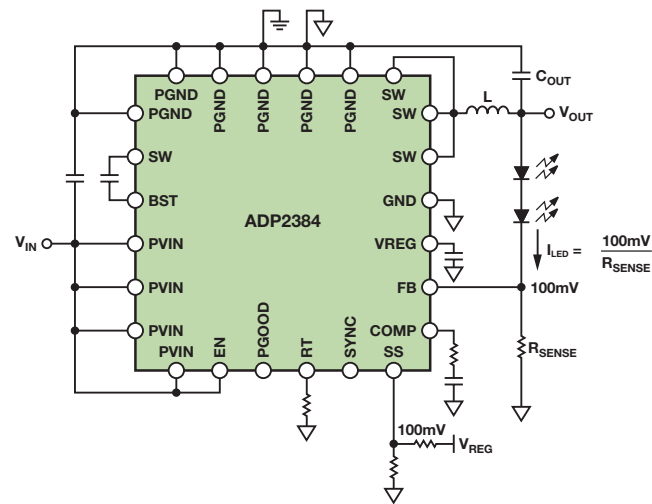


図 7. SS/TRK ピンを使用して FB リファレンス電圧を下げる方法

SS ピン / TRK ピンによる手法は、すべての降圧レギュレータで利用できるわけではありません。これらのピンを備えていない IC も存在するからです。また、製品によっては、SS ピンによって、FB リファレンス電圧ではなく、インダクタのピーク電流が変化するものもあります。したがって、データシートをきちんと確認しなければなりません。

もう 1 つの方法は、 R_{SENSE} の電圧にオフセットを加えるというものです。例えば、正確な電圧源と R_{SENSE} の間に抵抗分圧器を適用すれば、 R_{SENSE} から FB ピンに対して、ほぼ一定のオフセット電圧を加えることができます (図 8)。

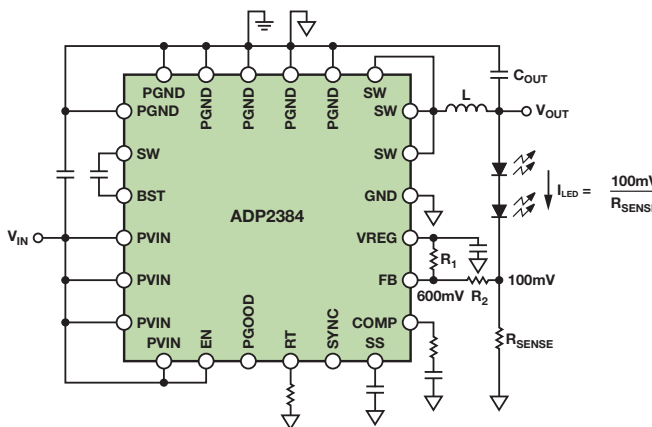


図 8. R_{SENSE} の電圧にオフセットを加える方法

抵抗分圧器で使用する抵抗の値は、以下の式で表されます。

$$R1 = R2 \times \frac{V_{SUP} - FB_{REF}}{FB_{REF} - FB_{REF(NEW)}}$$

ここで、 V_{SUP} はレギュレートされた補助電圧、 $FB_{REF(NEW)}$ は設定したい R_{SENSE} の両端の電圧です。

フィードバックに使用する実際のリファレンス電圧を 150mV にするためには、 $R2$ が 1k Ω 、 V_{SUP} が 5V の場合、次式のようにになります。

$$R1 = 1 \text{ k}\Omega \times \frac{5.0 \text{ V} - 0.6 \text{ V}}{0.6 \text{ V} - 0.15 \text{ V}} = 9.78 \text{ k}\Omega$$

一方、LED の駆動電流は、次式で求められます。

$$I_{LED} = \frac{FB_{REF(NEW)}}{R_{SENSE}}$$

この方法であれば、SS ピンや TRK ピンは必要ありません。 R_{SENSE} の電圧は $FB_{REF(NEW)}$ にレギュレートされますが、FB ピンは変わらず 600mV にレギュレートされます。したがって、ADP2384 の他の機能 (ソフトスタート、トラッキング、パワーグッドなど) は、引き続き通常どおりに利用できます。

この方法の欠点は、 R_{SENSE} と FB ピンの間のオフセットが、電源の精度から大きな影響を受けることです。ADR5040 などの高精度のリファレンスを使用するのが理想ですが、リファレンス (VREG) の許容誤差はあまり小さくない ($\pm 5\%$) ので、LED の駆動電流には $\pm 12\%$ のばらつきが生じます。

表 1 は、ここまで説明した 2 つの方法を比較したものです。

表 1. 2 つの方法の比較

方法 1: SS/TRK ピンを使用して FB リファレンス電圧を下げる	方法 2: R_{SENSE} の電圧にオフセットを加える
例えば、供給電圧に $\pm 5\%$ のばらつきがあると、 I_{LED} には $\pm 5\%$ の誤差が生じます。これは V_{SENSE} の電圧の影響を受けません。そのため、この方法では、 R_{SENSE} における消費電力が最も少なくなります。	例えば、供給電圧に $\pm 5\%$ のばらつきがあると、 I_{LED} には $\pm 12\%$ の誤差が生じます。これは、 V_{SENSE} の電圧を高くすれば改善することができます。
LED のオープン / ショートについて、非常に優れた保護が実現されます。FB_OVP は断続的なオープンに対する保護には関与しません。LED の駆動電流は、インダクタと制御ループの速度によって制限されます。	LED のオープン / ショートについて、非常に優れた保護が実現されます。もう 1 つの FB リファレンス電圧 (FB_OVP) を備えている IC も存在し、FB の電圧が通常よりも 50mV～100mV 高くなると、即座にスイッチング動作がデイスエーブルになります。それにより、断続的な障害が発生した場合に LED に流れる過電流の最大値が保証されます。
PGOOD は常にローのままです。	FB ピンは通常どおり 600mV にレギュレートされます。そのため、PGOOD ピンは正常に機能します。
SS/TRK ピンの電圧を通常よりも低い値に保持すると、障害に対応するための一部のモードが適切に動作しない可能性があります。	障害に対応するためのあらゆるモードが正常に動作します。

電圧の正確なレギュレーションを実現するためには、もう1つ重要なことがあります。それは、検出抵抗までの配線を適切に行わなければならないというものです。検出抵抗としては4端子のものを使用できれば理想的ですが、コストが高くなる可能性があります。図9に示すような優れたレイアウト手法を適用すれば、2端子の抵抗を使用した場合でも高い精度を得ることができます⁴。

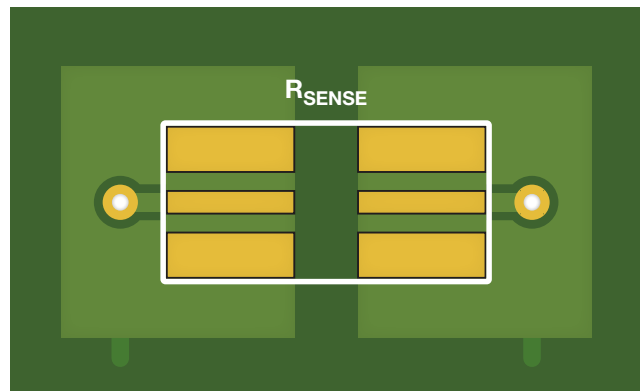


図9. R_{SENSE} 用の推奨配線パターン

レギュレーション以外の機能

ここまでで説明したとおり、市販の降圧レギュレータを使用してLEDの駆動電流をレギュレートするのは、それほど難しいことはありません。本稿では、ADP2384を使用する例を示しました。アナログ・デバイスでは、「ADP2441」を使用する例を紹介したより詳細なドキュメントも公開しています。ADP2441は、ADP2384と比べるとかなりピン数が少ない製品ですが、入力電圧範囲は36Vまで対応しています。上記のドキュメントでは、LED専用の降圧レギュレータで提供されている多くのスマートな機能を実装する方法も説明しています。LEDのショート／オープンに対する保護、 R_{SENSE} のショート／オープンに対する保護、PWM調光、アナログ調光、過熱に対応するための電流フォールドバックといった機能です。以下では、ADP2384を使用し、PWM調光、アナログ調光、電流フォールドバックの各機能を実現する方法を紹介することにします。

PWM調光とアナログ調光

スマートなLEDドライバは、LEDの明るさを調整するための調光制御という重要な機能を提供します。調光制御の方法としては、PWM調光またはアナログ調光が使われます。PWM調光では、パルスのデューティ・サイクルを調整することによってLEDの駆動電流を制御します。人の目は、周波数が約120Hz以上のパルス光は、平均化された明るさとして知覚します。一方、アナログ調光では、必要な明るさに応じてLEDの駆動電流を増減させ、一定（DC）の値を供給します。

PWM調光の機能は、 R_{SENSE} に直列にNMOSスイッチを接続し、それを開閉することで実現できます。ただ、このような電流レベルのアプリケーションにはパワー・デバイスが必要になります。パワー・デバイスを追加すると、パワー・スイッチを内蔵する降圧レギュレータを使用することで得られるサイズとコストのメリットが損なわれてしまいます。別の方法として、レギュレータを高速にオン／

オフすることでPWM調光を実現することもできます。PWMの周波数が低い場合（1kHz未満）、この方法でも優れた精度が得られます（図10）。

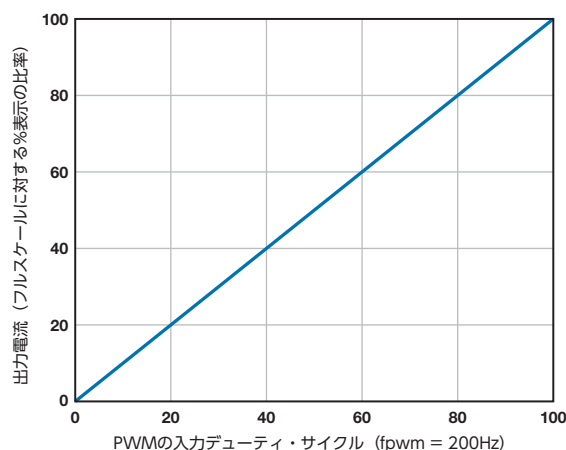


図10. ADP2384におけるPWM調光の直線性。200Hzを使用した場合のデューティ・サイクルと出力電流の関係を表しています。

あらゆる汎用降圧レギュレータと同様に、ADP2384にはPWM調光用の入力ピンは存在しません。しかし、FBピンを利用することにより、イネーブルの状態とディスエーブルの状態の間をスイッチングすることができます。FBピンの電圧がハイになると、誤差アンプの出力がローになり、降圧用のスイッチング動作が停止します。FBピンに R_{SENSE} を再接続すれば、通常のレギュレーション動作が再開されます。この切り替え用のスイッチとしては、NMOSの小電流トランジスタまたは汎用ダイオードを使用できます。図11の回路の場合、PWM信号がハイになると、NMOSトランジスタがオンになり、 R_{SENSE} がFBピンに接続されます。それにより、LEDのレギュレーションがイネーブルになります。一方、PWM信号がローになると、NMOSトランジスタがオフになり、プルアップ抵抗によってFBピンの入力がハイに引き上げられます。

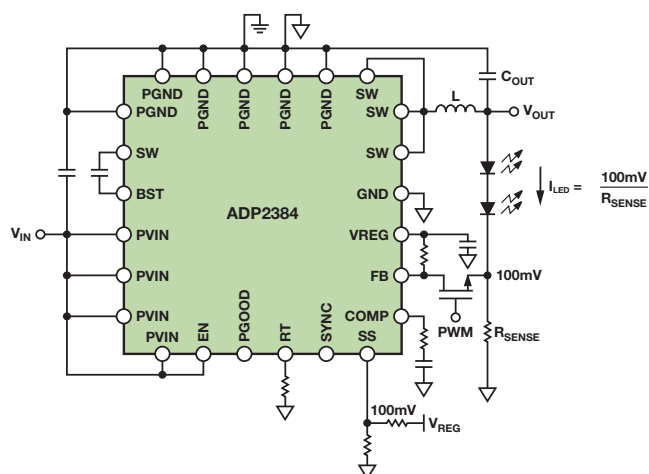


図11. ADP2384でPWM調光を実現する方法

PWM調光は非常によく使用される機能ですが、ノイズを避けるためにアナログ調光が求められるケースもあります。アナログ調光では、単純にLEDの駆動電流の量を増減させます。PWM調光ではLEDの駆動電流をチョッピングするので、その点に差があります。調光を行うにあたり2つの入力を使う場合には、アナログ調光を選択する必要があります。複数のPWM調光信号を使用すると、ビート周波数が発生し、フリッカ・ノイズや可聴ノイズが生じる可能性があるからです。一方ではPWM調光を実行し、他方ではアナログ調光を実行するのであれば問題はありません。汎用の降圧レギュレータを利用する場合、アナログ調光を実装する最も簡単な方法は、FBリファレンス電圧の生成回路からの供給電圧を調整し、FBリファレンス電圧の値を操作することです（図12）。

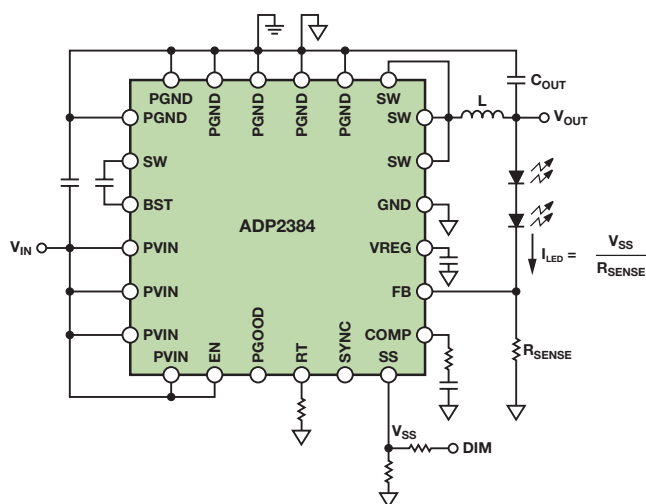


図12. ADP2384でアナログ調光を実現する方法

サーマル・フォールドバック

LEDの寿命は、その接合部の温度に大きく左右されます。そのため、LEDを監視し、その温度が高すぎる場合には何らかの対処が必要になる可能性があります。温度が異常なレベルまで高まっている場合、ヒート・シンクの接続が不十分であったり、動作環境の温度が高すぎたり、その他の過酷な条件が生じていたりするのかもしれませんが、この問題に対する一般的な解決策は、温度が閾値を超えたら、LEDの駆動電流を減少させることです（図13）。これをLEDのサーマル・フォールドバックと呼びます。

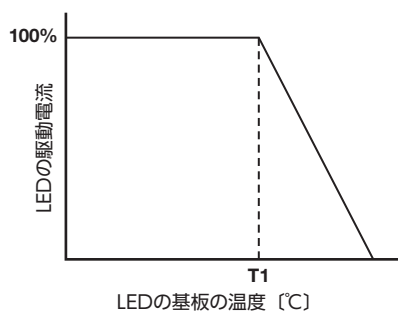


図13. LEDのサーマル・フォールドバック。望ましいカーブの例を示しました。

サーマル・フォールドバックでは、次のような調光を行います。まず、温度の閾値T1に到達するまでは、LEDの駆動電流は最大値に保持されます。温度がT1を超えたら、その上昇の度合いに応じて駆動電流を減らします。それにより、LEDの接合部の温度を制限します。結果として、LEDの寿命を維持することが可能になります。一般に、LED用のヒート・シンクの温度を測定する際には、低コストのNTC（Negative Temperature Coefficient）抵抗が使用されます。ここで、アナログ調光の方法を少し変更すれば、NTC抵抗の温度に応じてLEDの駆動電流を簡単に制御することができます。SS/TRKピンをFBリファレンス電圧の制御に使用する場合、電圧リファレンスと並列にNTC抵抗を配置するという簡単な方法を利用できます（図14）。

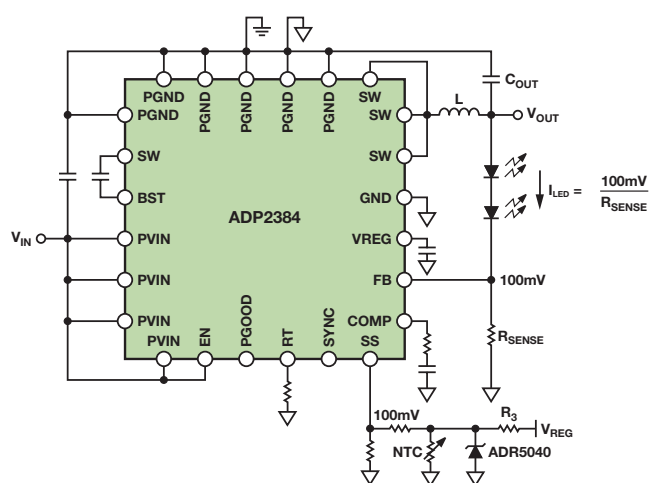


図14. SS/TRKピンを使用する場合のサーマル・フォールドバック機能の実装方法

ヒート・シンクの温度が上昇すると、NTC抵抗の値は低下します。ここで、同抵抗は抵抗R₃と共に抵抗分圧器を構成しています。この分圧器の電圧がリファレンス電圧よりも高い場合、最大電流が供給されます。一方、分圧器の電圧がリファレンス電圧を下回ると、FBリファレンス電圧が低下し始め、LEDの駆動電流も減少します。

まとめ

本稿では、標準的な降圧レギュレータを使用して、LEDドライバ向けの多様な機能を実現する方法を紹介しました。それぞれの方法は、一般的なガイドラインとして捉えることができるでしょう。但し、いずれの方法も、降圧レギュレータ製品が本来対象としている用途からは少し外れています。したがって、選択肢として考えているレギュレータICが、こうした動作モードに対応可能であることを保証できるか否かを半導体メーカーに問い合わせることをお勧めします。ADP2384やADP2441をはじめとする降圧レギュレータの詳細や、LEDドライバ向けのソリューションとなるデモ用ボードについては、[照明技術ソリューション](#)のページをご覧ください。

参考資料

- ¹ DOE SSL 2011 Manufacturing Roadmap (米国エネルギー省 SSL製造ロードマップ 2011年)、<http://ssl.energy.gov>
- ² David Cox, Don Hirsh, Michael McClintic 「[Are you using all of the lumens that you paid for?](#) (その光量は、費やしたお金に見合っていますか?)」 LED Magazine、2012年2月
- ³ Ken Marasco 「[DC/DCステップダウン \(降圧\) レギュレータを活用する方法](#)」 Analog Dialogue、Vol. 45、No. 2 (2011年)
- ⁴ Marcus O'Sullivan 「[低抵抗値シャント抵抗のレイアウトパッドの改善による高電流検出精度の最適化](#)」 Analog Dialogue、Vol. 46、No. 2 (2012年)

著者について

Jon Kraft (jon.kraft@analog.com) は、アナログ・デバイセズのアプリケーション・エンジニアです。入社は2007年で、パワー・マネージメント設計センター (コロラド州ロングモント) に所属しています。4件の特許を保有。ローズ・ハルマン工科大学で電気工学の学士号、アリゾナ州立大学で電気工学の修士号を取得しました。

