降圧比が非常に高いDC/DC変換を高効率で実現するハイブリッド型のコントローラ

著者: Frederik Dostal
Analog Devices, Inc.

アプリケーションの中には、高い入力電圧から非常に低い出力電圧への変換を必要とするものがあります。例えば、48Vから3.3Vに降圧するといった具合です。このような仕様は、IT分野で使われるサーバー機器や通信分野の機器でよく見られます。そうしたケースでは、どのようなソリューションを採用すべきなのでしょうか。

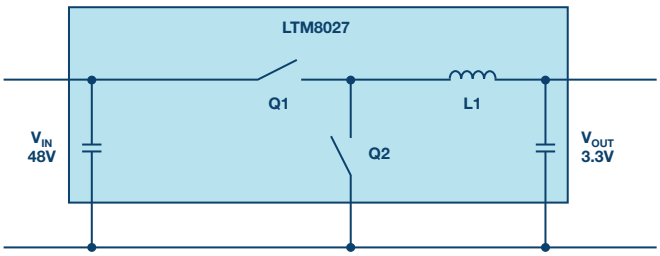

図1. 48Vから3.3Vへの変換方法。
1つのステップで直接降圧を行います。

図1は、1つの降圧コンバータにより、48Vから3.3Vへの変換を行う方法を示したものです。このように、1つのステップで必要な電圧を得ようとすると、デューティ・サイクルが小さくなりすぎるという問題が生じます。ここで言うデューティ・サイクルとは、オン時間（図1で言えば、メインのスイッチQ1がターンオンしている期間）とオフ時間（スイッチQ1がターンオフしている期間）の関係のことです。降圧コンバータのデューティ・サイクルは、次式によって定義されます。

$$[\text{デューティ・サイクル}] = \frac{[\text{出力電圧}]}{[\text{入力電圧}]}$$

したがって、入力電圧が 48V で出力電圧が 3.3V の場合、デューティ・サイクルは約 7% になります。これは、スイッチング周波数が 1MHz（スイッチング周期が 1000 ナノ秒）の場合、スイッチ Q1 は 1 周期の中で 70 ナノ秒間だけターンオンするということを意味します。その後、Q1 は 930 ナノ秒間ターンオフします。その間は、スイッチ Q2 がターンオンすることになります。

このような回路では、最小オン時間が 70 ナノ秒以下のスイッチング・レギュレータを選択する必要があります。ただ、そのような選択を行ったとしても、別の問題に直面することになります。現在、一般的に使用されている降圧レギュレータは、非常に高い電力変換効率を達成しています。ただ、そのような製品であっても、デューティ・サイクルがあまりにも小さすぎると、効率が低下してしまいます。なぜなら、インダクタにエネルギーを蓄積するために与えられる時間が短くなりすぎるからです。インダクタは長く続くオフの期間中も、電力を供給しなければなりません。このことから、レギュレータの回路内では、非常に大きなピーク電流が生じることになります。この電流の値を小さく抑えるために、図 1 の L1 のインダクタンスは比較的大きい値にします。Q1 がオンの期間中に、L1 の両端に大きな電位差が生じるからです。

この例では、Q1 がオンの期間におけるインダクタの両端の電位差は約 44.7V になります。スイッチ・ノード側が 48V、出力側が 3.3V です。インダクタに流れる電流は次式によって求められます。

$$i_L = \frac{1}{L}\int u_L dt$$

インダクタの両端の電位差が大きい場合、インダクタンスが一定であれば、電流は一定の期間、増加します。インダクタのピーク電流を削減するためには、より値の大きいインダクタを選択する必要があります。

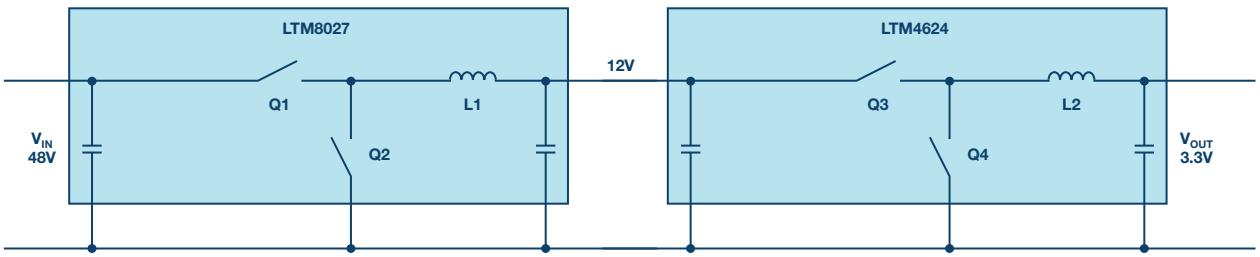

図2. 2つの降圧レギュレータをカスケード接続した回路。
12Vの中間電圧を生成し、2つのステップによって48Vから3.3Vまでの降圧を実現します。

しかし、インダクタの値を高くすると、電力の損失が増加します。この例のような電圧の条件下では、アナログ・デバイスが提供する高効率なμ Module® レギュレータ「LTM8027」を使用したとしても、効率は出力電流が 4A の場合でわずか 80% にしかなりません。

それでは、高い降圧比が必要なケースに、高い効率を得るにはどうすればよいのでしょうか。非常に一般的で、なおかつ効率的なソリューションは、2 つのステップによって必要な電圧を生成するというものです。具体的には、1 つ目のステップで、入力電圧を降圧して中間電圧を生成し、2 つ目のステップでその中間電圧を降圧して最終的に必要な電圧を生成します。図 2 に示したのが、その実装例です。ご覧のように、効率の高い 2 個の降圧レギュレータをカスケード接続します。この回路では、まず 1 つ目のレギュレータで 48V の電圧を 12V に変換します。続いて、2 つ目のレギュレータによって、12V の電圧を 3.3V に変換します。LTM8027 を使用して 48V から 12V まで降圧する場合、92% 以上の効率が得られます。続く 12V から 3.3V への変換に「LTM4624」を使用すると、効率は 90% となります。したがって、トータルの効率は 83% になります。図 1 のように直接変換する場合と比べて、効率が 3% 改善するということです。

しかし、3.3V の出力に伴うすべての電力が、2 つのスイッチング・レギュレータ回路を通過するようにしなければならないことには違和感を覚えます。一方で、図 1 の回路では、デューティ・サイクルが小さいことが原因で生じるインダクタの大きなピーク電流によって、高い効率が得られません。なお、図 1 の降圧アーキテクチャと図 2 の中間バス・アーキテクチャを比較する際には、効率以外にも考慮すべき事柄が数多く存在します。

では、48V から 3.3V を生成するという基本的な問題には、どのように対処するべきなのでしょうか。実は、アナログ・デバイセズは、この問題に対する別のソリューションを用意しています。それは、新たなハイブリッド型の降圧コントローラ「LTC7821」を使う方法です。このソリューションでは、チャージ・ポンプと降圧レギュレータを組み合わせて使用します。それにより、デューティ・サイクルを 2 × V_{IN}/V_{OUT} に高めることができます。その結果、非常に高い降圧比が求められる場合でも、非常に高い効率を得ることが可能になります。

図 3 に示したのは、LTC7821 を使用した回路の例です。LTC7821 の基本機能は同期整流方式の降圧コントローラですが、チャージ・ポンプを併用するハイブリッド型の機能を備えている点に特徴があります。図 3 の回路では、入力電圧を 1/2 にするためのチャージ・ポンプと、降圧トポロジを採用した同期整流方式の DC/DC コンバータを組み合わせています。それにより、スイッチング周波数が 500kHz という条件下で、48V から 12V への変換を 97% 以上の効率で実現できます。他のアーキテクチャでこのような高い効率を得るには、スイッチング周波数をかなり低く設定するしかありません。ただ、そうすると大きなインダクタが必要になります。

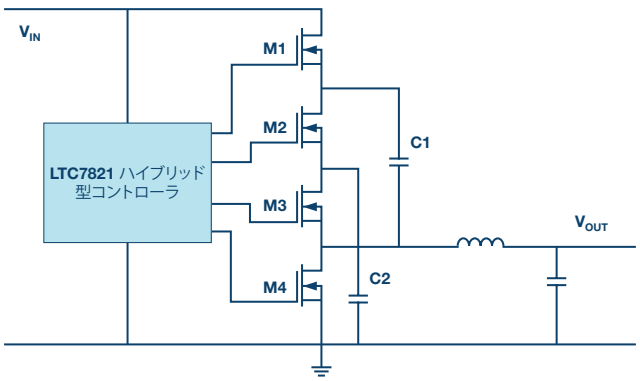

図3. ハイブリッド型降圧コンバータの構成例

この回路では、4 個の外付けトランジスタを使用します。それらがスイッチング動作を行っている際、コンデンサ C1 と C2 はチャージ・ポンプとして機能します。この方法によって生成した電圧は、同期整流方式の降圧機能を使うことで、精度が高く安定した出力電圧に変換されます。EMC（電磁両立性）性能を最適化するために、チャージ・ポンプはソフト・スイッチング動作で使用されます。

チャージ・ポンプと降圧トポロジを組み合わせることにより、次のようなメリットが得られます。まず、チャージ・ポンプと同期整流方式のスイッチング・レギュレータを最適に組み合わせることで、変換効率が非常に高くなります。制約事項としては、外付けの MOSFET である M2、M3、M4 を低い電圧で動作させなければならないことだけです。また、この回路は非常にコンパクトに実現できます。インダクタとしては、図 1 の方法と比較して、より小さく安価なものを使用することが可能です。このハイブリッド型の構成では、スイッチ M1 と M3 のデューティ・サイクル D は、2 × V_{OUT}/V_{IN} になります。スイッチ M2 と M4 のデューティ・サイクル D は、（V_{IN} - 2 × V_{OUT}）/V_{IN} で求められます。

チャージ・ポンプについては、出力電力が 100mW 程度に制限されるのではないかと思う方もいるでしょう。しかし、LTC7821 は、ハイブリッド型のコンバータを構成した場合に、最大 25A の出力電流に対応するスイッチを使用できるように設計されています。より高い性能を得たい場合には、複数の LTC7821 を並列に接続し、同期周波数を使って多相構成をとります。この方法を使えば、複数の LTC7821 で全負荷を共有することができます。

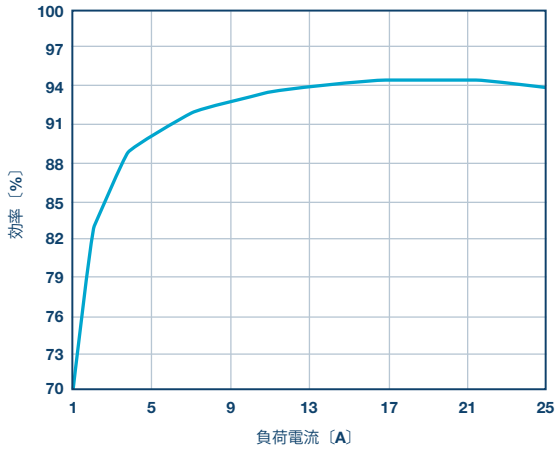

図4. 48Vから5Vに変換する場合の標準的な効率。
スイッチング周波数は500kHzです。

図 4 は、入力電圧が 48V、出力電圧が 5V という条件で、負荷に流れる電流を変化させた場合の標準的な効率を示したものです。負荷に流れる電流が約 6A の時、効率は 90% を超えています。13A ～ 24A では効率はさらに高くなり、94% 以上に達します。

ハイブリッド型の降圧コントローラは、非常にコンパクトな製品です。また、非常に高い効率を提供します。本稿の前半部では、1 つの降圧コントローラを非常に小さいデューティ・サイクルで動作させる方法と、2 つの降圧コントローラを使用し、中間バス電圧を生成して高い降圧比を実現する方法を紹介しました。ハイブリッド型の降圧コントローラを使用するソリューションは、それらの方法が抱える課題の解決を可能にするものです。ただ、カスケード型のアーキテクチャを好む設計者もいますし、ハイブリッド型のアーキテクチャを好む設計者もいます。いずれにせよ、これら 2 つの手法を選択肢として持っていれば、あらゆる設計に対応できるはずです。

著者について

Frederik Dostal（frederik.dostal@analog.com）は、ドイツのエアランゲン・ニュルンベルク大学でマイクロエレクトロニクスについて学びました。2001年にパワー・マネージメント事業の分野で働き始め、アリゾナ州フェニックスで4年間にわたってスイッチング電源を担当したほか、様々なアプリケーション分野の業務に携わってきました。2009年にアナログ・デバイセズに入社し、欧州を担当するパワー・マネージメントの専門技術者として業務に従事しています。

オンライン・サポート・コミュニティ

EngineerZone™ SUPPORT COMMUNITY

アナログ・デバイセズのオンライン・サポート・コミュニティに参加すれば、各種の分野を専門とする技術者との連携を図ることができます。難易度の高い設計上の問題について問い合わせを行ったり、FAQ を参照したり、ディスカッションに参加したりすることが可能です。

ez.analog.com にアクセス

＊英語版技術記事はこちらよりご覧いただけます。

アナログ・デバイセズ株式会社
本　　社 〒105-6891　東京都港区海岸1-16-1　ニューピア竹芝サウスタワービル10F
大阪営業所 〒532-0003　大阪府大阪市淀川区宮原3-5-36　新大阪トラストタワー10F
名古屋営業所 〒451-6040　愛知県名古屋市西区牛島町6-1　名古屋ルーセントタワー40F

©2018 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
本紙記載の商標および登録商標は、
各社の所有に属します。
Ahead of What's Possible は
アナログ・デバイセズの商標です。

TA20354-0-7/18

www.analog.com/jp

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™