

# 絶縁型のスイッチング電源、 フォワード型とフライバック型のうち どちらを選べばよいのか？

著者：Diarmuid Carey、アプリケーション・エンジニア

## 概要

医療用機器、通信機器、産業用システムなどでは、パワー・マネジメントの手法として絶縁型の電力変換がよく用いられます。絶縁を使用する目的は、エンド・ユーザを保護したり、電源の入力から出力への干渉（あるいはその逆）を防止したりすることです。本稿では、絶縁型のスイッチング電源（SMPS：Switch-mode Power Supplies）について詳しく解説します。また、絶縁型のトポロジとして一般的に使用されるフォワード・コンバータとフライバック・コンバータについて説明します。具体的には、それぞれの長所と短所を明らかにした上で、様々な電力レベルに対する適合性について解説を加えることにします。それらを通して、各種のアプリケーションに適した絶縁型のトポロジを適切に選択するためのヒントを提供します。

## はじめに

絶縁は、電気システムで使用される1つの機能だと見なすことができます。設計上、分離された2つのセクションの間で直流電流が流れることを防止するというものです。絶縁は様々なユース・ケースで必要になります。代表的な例としては、入力側と出力側の間を明確に分離しなければならないケースが挙げられます。例えば、入力と出力のグラウンドを分離することによって、ノイズの多い電源が出力側に干渉することを防止するといった具合です。このグラウンド・ループの切断は、機能的絶縁と呼ばれています。より基本的な絶縁の例としては次のようなものがあります。すなわち、レギュレータによって給電している下流の負荷を、入力側の高電圧から分離するといったケースです。場合によっては、絶縁のレベルを高めることで、システムの安全性と信頼性を向上させることもあります。

上記のようなアプリケーションでは、高いレベルの安全性が求められます。そのためには、絶縁が必須の要素になります。ただ、絶縁が求められる理由はそれだけではありません。例えば、昇圧比／降圧比の高いアプリケーションにも絶縁型のトポロジが必

要になります。なぜなら、標準的な降圧／昇圧コンバータでは、デューティ・サイクルや最小オン／オフ時間としてどのような値でも設定できるわけではないからです。また、反転アプリケーションでは、絶縁型のデバイスを使用することによって正から負への電圧変換を実現します。

複数の出力を備えるアプリケーションでも、絶縁型のトポロジが用いられます。例えば、複数の出力を備えるトランスを使用することで、単一のパワー・コンバータから複数の出力を供給するといったことが行われます。それ以外にも、絶縁型のトポロジは様々な目的で使用されています。

## フライバック・コンバータ

フライバック・コンバータは絶縁型SMPSの一種です。トランスを使用することによって、入力から出力に向かってエネルギーを伝達します。同コンバータは、降圧処理にも昇圧処理にも利用できます。エネルギーを伝達する際には、オン／オフを切り替えるためにスイッチ（通常はトランジスタ）を使用します。そのスイッチは、トランスの1次巻線と直列に接続されます。スイッチが閉じると、トランスの磁界にエネルギーが蓄積されます。スイッチが開くと、そのエネルギーが低損失のショットキー・ダイオードをベースとする整流回路を介して出力に伝達されます。より高い効率が必要な場合には、ショットキー・ダイオードの代わりにアクティブ・スイッチを使用します。「[How to Design a No-Opto Flyback Converter with Secondary-Side Synchronous Rectification \(オプト・カプラが不要なフライバック・コンバータ、2次側に同期整流を適用\)](#)」では、2次側でアクティブ・スイッチを使用するフライバック・コンバータの設計について説明しています。

上記のとおり、エネルギーはオンのサイクル期間にトランスに蓄積されます。そして、オフのサイクル期間に出力に放出されます。そのため、フライバック・コンバータで伝達できるエネルギーの量は限られます。物理的な面で、トランスのサイズには制約があるからです。トランスが小さい場合、電流能力が制限されます。そのため、エネルギーの量が多すぎると、トランスのコアが飽和してしまう可能性があります。



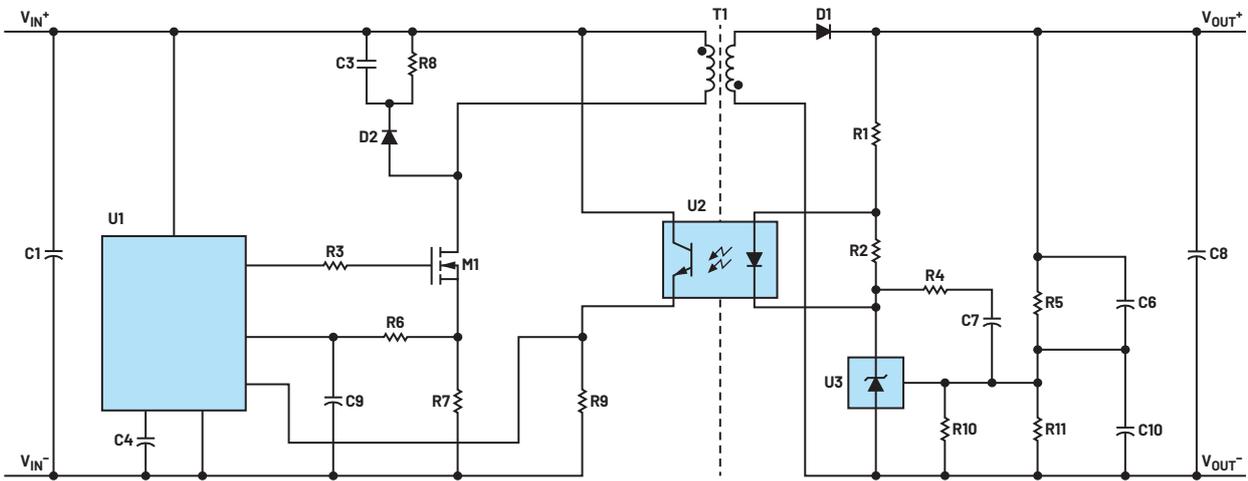


図1. フライバック・コンバータの従来の実装方法 (その1)

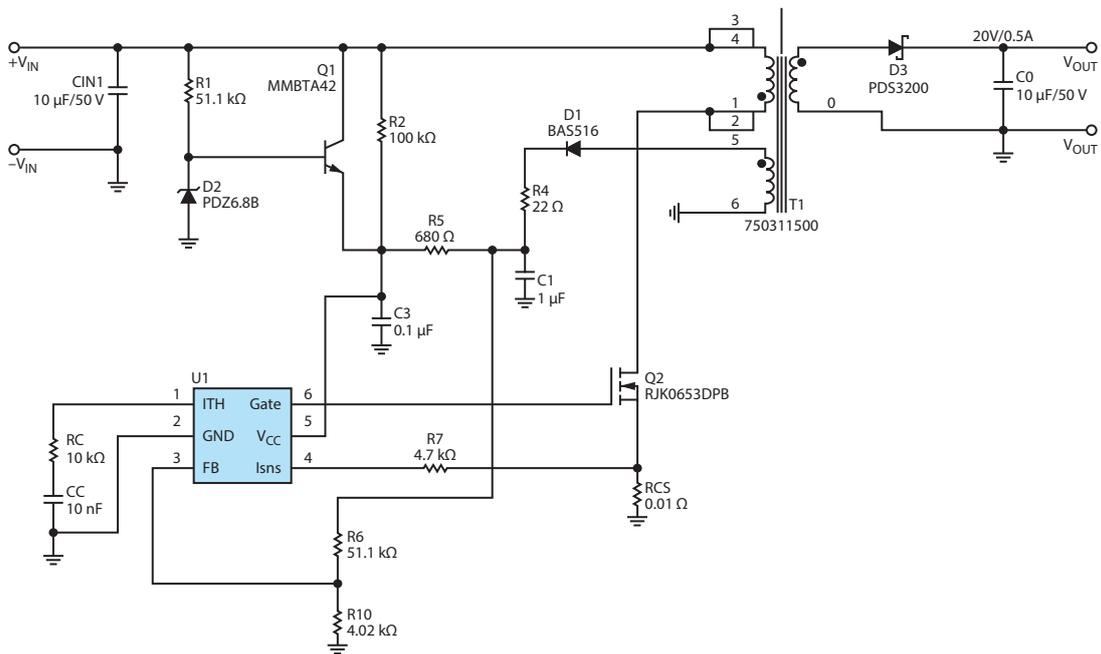


図2. フライバック・コンバータの従来の実装方法 (その2)

フライバック・トランスについては、極性の表示に注意する必要があります。各巻線の互いの極性は、単純なドットによって表されています。フライバック・トポロジの場合、1次巻線と2次巻線とは位相がずれています。また、トランスを見ると、1次側では1つのドットが上部にあり、2次側ではドットが下部に設けられています。これは、1次側と2次側の電流と電圧の位相が互いに180°ずれていることを表しています。

図1に示したのは、フライバック・コンバータの従来の実装例です。ご覧のように、オプト・カプラを使用してフィードバック・ループを構成することによりレギュレーションを実現します。但し、この手法にはいくつかの欠点があります。まず、オプト・カプラには、消費電力が多い、速度が遅い（ループ応答の最適化が難しい）、サイズが大きい、経時劣化が生じるといった短所があります。また、オプト・カプラを機能させるためにはバイアスをかけなければなりません。そのためには2次側に回路を追加することになり、基板面積が大きくなります。加えて、オプト・カ

プラはLEDを使用していることから、時間の経過に伴い性能が劣化していきます。しかも、その劣化は電流の増加や温度の上昇によって加速する可能性があります。この性能の劣化は、長期間にわたるオプト・カプラの電流伝達率（CTR：Current Transfer Ratio）を表すグラフで定義されます。更に、劣化の度合いは個々のデバイスごとに異なります。そのため、重要なアプリケーションにとって、オプト・カプラを採用した実装は信頼できるソリューションにはなりません。

図2に、フライバック・コンバータの別の実装例を示しました。この回路では、3次巻線を使用して制御回路に2次側の情報を提供します。それにより、レギュレーションが実現されます。この実装では、サイズの大きいオプト・カプラとそれに関連するバイアス回路は使用していません。しかし、3次巻線を使用することからトランスの物理的なサイズが大きくなります。また、出力の変化が遅くなります。つまり、過渡応答については高い性能が得られない可能性があります。

## No-Optoのフライバック・コンバータ

図3に、フライバック・コンバータのもう1つの実装例を示しました。本稿では、この種の実装を「No-Opto」のフライバック・コンバータと呼ぶことにします。No-Optoというのは、オプト・カプラを使用しないという意味です。オプト・カプラを使用することなく、絶縁側からコンバータに対してフィードバック情報を提供し、レギュレーションを実現するということです。No-Optoのフライバック・コンバータでは、フライバック・パルスの波形を監視することにより、絶縁された1次側の出力電圧をサンプリングします。

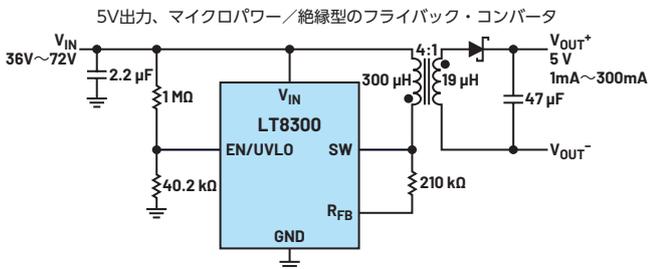


図3. No-Optoのフライバック・コンバータ。LT8300を使用して実現しています。VINは36V~72V、VOUTは5Vです。

このタイプの設計には、基板面積と信頼性に関する多くの長所があります。まず、オプト・カプラを使用しないので、そのための実装スペースと2次側のフィードバック用部品が不要になります。また、3次巻線を使用する設計と比べてトランスのサイズを抑えられます。基板面積の削減は、ポータブル機器や小型電子機器のようにスペースが重視されるアプリケーションでは特に重要です。

パワー・スイッチがオンになると、トランスの1次電流はピーク電流の上限値（ICごとに異なる）まで増加します。その時点でスイッチがオフになります。スイッチのノードの電圧は、出力電圧VOUTに1次側と2次側の巻線比Npsを乗じ、それに入力電圧VINを加えた値まで上昇します（以下参照）。

$$[\text{スイッチのノードの電圧}] = V_{OUT} \times N_{ps} + V_{IN} \quad (1)$$

スイッチの定格電圧は、非絶縁型のスイッチング・レギュレータの場合と同様に重要です。ただ、絶縁型のコンバータでは、より一層の注意が必要だと言えるでしょう。上述したとおり、スイッチのノードの電圧は、出力電圧にトランスの巻線比を乗じ、それに最大入力電圧を加えた値に達します。それに加え、漏れインダクタンスによるスパイクも生じます。すべての条件が重なった場合でも、スイッチの定格電圧を超えないように設計しなければなりません。

### 漏れインダクタンスとは何か？

漏れインダクタンスとは、トランスを使用するすべての回路に存在する寄生インダクタンスのことです。本稿で取り上げているフ

ライバック・コンバータやフォワード・コンバータにも、このインダクタンスが存在します。漏れインダクタンスは、設計した回路に直接接続されているわけではありません。しかし、トランスの磁界を介して結合しているインダクタンスだと見なされます。あくまでも寄生成分ですが、トランスの物理的な特性に依存して存在するということです。漏れインダクタンスは、トランスの1次巻線から2次巻線への（またはその逆）磁界の漏れだと考えることができます。

漏れインダクタンスは、どのようにエネルギーが伝達されるのかに応じ、フォワード・コンバータ/フライバック・コンバータに様々な形で影響を及ぼす可能性があります。フライバック・コンバータの場合、1次側のスイッチがオフになったとき、その両端に漏れインダクタンスに起因する電圧スパイクが発生します。このスパイクは、負荷電流が多いほど顕著なものになる可能性があります。フライバック・コンバータを設計する際には、最も厳しい条件におけるこの電圧スパイクを考慮して十分なマージンを確保しなければなりません。つまり、1次側に反映される出力電圧を、1次側のMOSFET（電力のレベルに応じ、フライバック・コンバータが内蔵するものか、ディスクリートのものを使用する）の最大スイッチ電圧（絶対最大定格）より低く抑える必要があります。

漏れインダクタンスについては、トランスの設計が非常に重要です。トランスのメーカーと協力し、漏れインダクタンスを最小限に抑えるか、漏れインダクタンスが最小のトランスを選択することが肝要だと言えます。それが不可能な場合には、トランスの1次側の両端にスナバ回路を追加するとよいでしょう。そうすれば、電圧スパイクを減衰させることができます。スナバ回路の設計については、フライバック・コンバータ製品のデータシートを参照してください。例えば、アナログ・デバイゼズのマイクロパワー/絶縁型のフライバック・コンバータ [LT8300] のデータシートを見ると、スナバ回路について詳しく説明されています。

### フォワード・コンバータ

フォワード・コンバータもトランスを使用して構成します。それにより、入力から出力へエネルギーを伝達します。またフライバック・コンバータと同様に、トランスの1次巻線に直列に接続されたスイッチを使用します。但し、エネルギーを蓄積するための素子としてトランスを使用するわけではありません。そうではなく、エネルギーは直ちに2次側に伝達されます。2次側では、そのエネルギーを整流/フィルタリングし、レギュレートされた絶縁出力を生成します。この出力は、入力電圧より高い場合も低い場合もあります（トランスの巻線比によって決まります）。フォワード・コンバータのトポロジは、トランスのドットの表示によって簡単に識別できます。具体的には、1次側と2次側の位相の表示が揃っています。それは、1次側と2次側の電流と電圧の位相のずれが0°であることを表します。

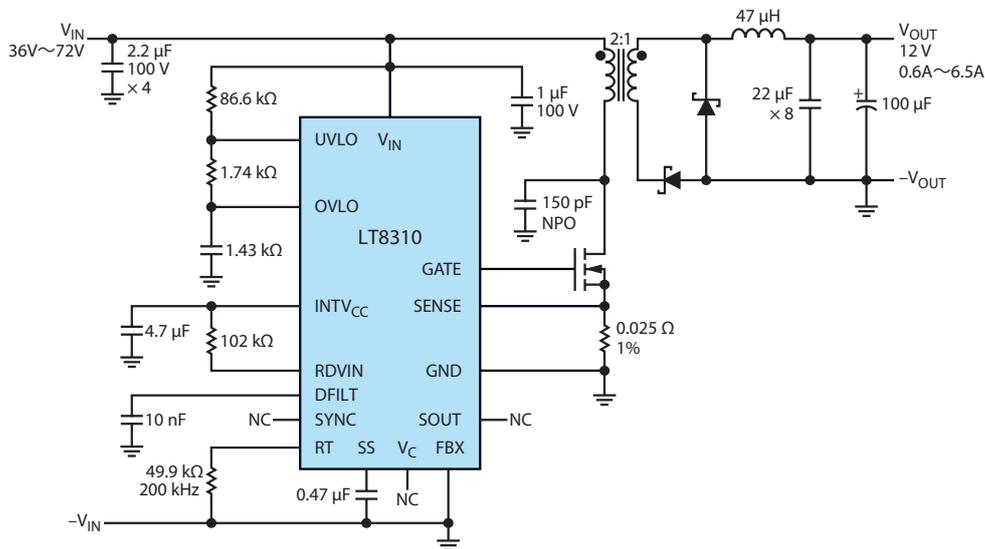


図4. フォワード・コンバータの構成例。  
LT8310を使用し、12V出力の回路を実現しています。

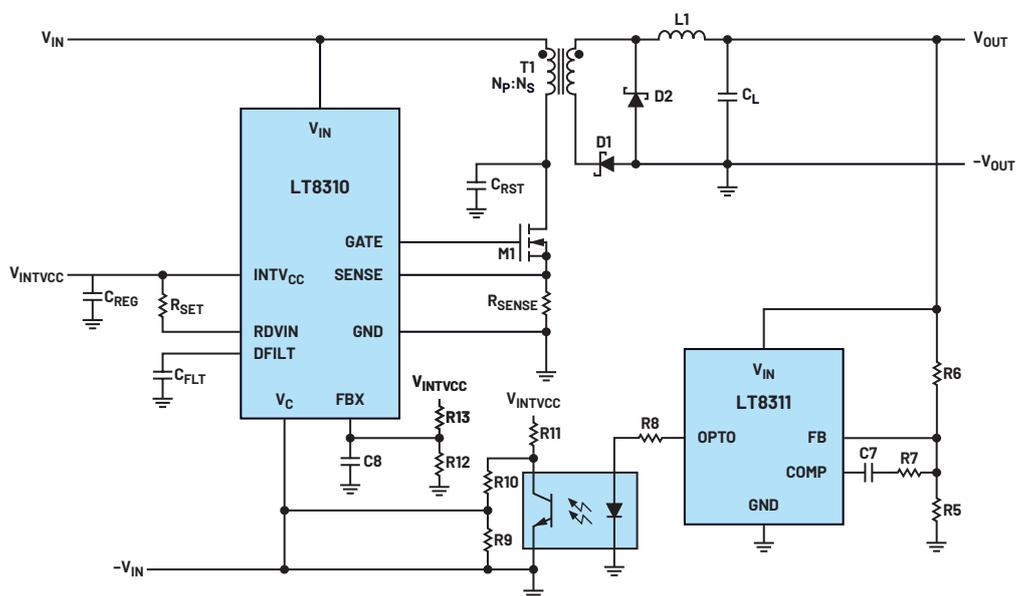


図5. オプト・カプラによるフィードバックを使用するフォワード・コンバータ。  
LT8310をベースとしています。

図4の回路を見ると、2次側では2つの整流ダイオードを使用していることがわかります。つまり、非同期式の回路が実装されています。また、インダクタとコンデンサを使用して出力フィルタを構成しています。これにより、出力リップルが低減されます。

[LT8310]は、No-Optoのフライバック・コンバータと同様に、オプト・カプラを使用することなく使用できます。ただ、必要に応じてオプト・カプラによるフィードバックを使用することも可能です(図5)。更に、SOUTピンを使用して2次側のMOSFETを駆動することで、同期整流方式のフォワード・コンバータを実装することもできます。そのようにすれば、効率を最適化することが可能になります。

## フライバック型とフォワード型の違い

ここでは、フライバック・コンバータとフォワード・コンバータを比較します。両者には、効率、負荷電流能力、サイズ、コストなど、いくつかの重要な点で違いがあります。

- ▶ **効率**：一般に、フォワード・コンバータでは、フライバック・コンバータよりも高い効率が得られる傾向があります。フォワード・コンバータでは、コアの飽和や漏れインダクタンスによる損失を少なく抑えられるからです。とはいえ、パワー・コンバータの効率は、回路の具体的な設計と使用する部品にも依存します。例えば、効率については電力のレベルが重要な要素になるので、常に同列に比較できるわけではありません。歴史的に見れば、以前は2つのトポロジの差はもっと大きかったと考えられます。現在では、より効率的なコンポーネントを使用できるようになったことから、達成できる効率の値は以前よりもはるかに近くなっています。

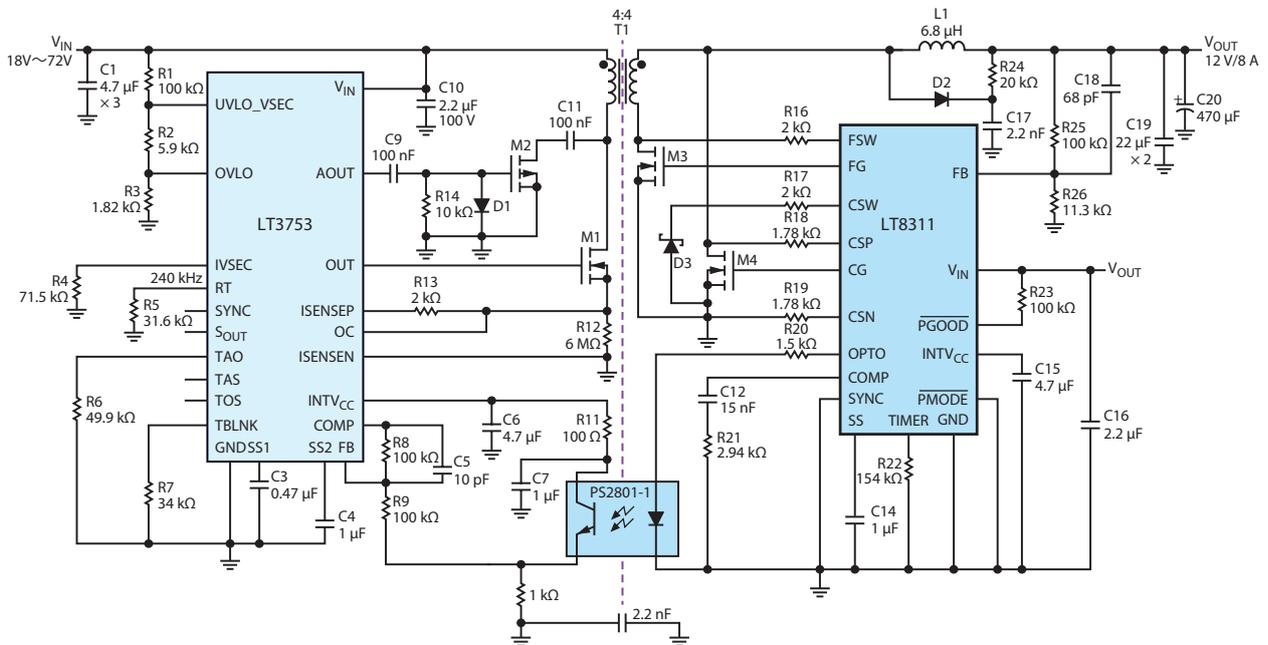


図6. 2次側のコントローラとしてLT8311を使用した  
フォワード・コンバータ

- ▶ **負荷電流能力**：フォワード・コンバータは、フライバック・コンバータよりも多くの負荷電流を出力できる傾向があります。なぜなら、トランスの設計によって1次巻線に対してより多くの電流を流すことができるからです。フォワード・コンバータでは、エネルギーは蓄積される（フライバック）のではなく、同じサイクルに伝達されます（フォワード）。そのため、負荷電流能力はトランスのサイズによって制限されます。一般に、フライバック・コンバータはトランスの制約によって60W～70Wの電力を扱うアプリケーションでよく使用されます。数百Wの電力を供給する場合には、フォワード・コンバータがより最適なソリューションになります。
- ▶ **サイズ**：フライバック・コンバータは、フォワード・コンバータよりも小型化できる傾向があります。フライバック・コンバータでは、トランスのサイズを抑えた設計を実現できるからです。また、変換トポロジを実現するために必要な部品点数も少なく抑えられます（FETの数が少なく、フィルタがシンプル）。ポータブル機器など、サイズが重要なアプリケーションでは、小型化が可能なフライバック・コンバータは魅力的な選択肢になり得ます。
- ▶ **コスト**：フライバック・コンバータでは、フォワード・コンバータと比べてコストを抑えられる傾向があります。フライバック・コンバータで使用するトランスは設計がシンプルであることに加え、回路を実現するための部品点数が少なく済むからです。

表1は、フライバック・コンバータとフォワード・コンバータについてまとめたものです。各トポロジの回路を実現するために必要な部品点数を比較しています。ご覧のように、フライバック・コンバータの方が実装は簡素なものになります。同期整流やフィードバック用のオプト・カプラが必要な場合にも、部品点数の観点からはフォワード・コンバータの方が設計が複雑になります。結果として、コストがかさむだけでなく、基板上の実装面積も大きくなります。

表1. フォワード型／フライバック型のコンバータで使用する部品の数

部品の種類	フォワード	フライバック
コントローラ	1	1
FET	2	1
トランス	1	1
インダクタ	1	0
整流ダイオード	2	1
出力コンデンサ	1	1
合計	8	5

### 2次側のコントローラとは何か、なぜ必要なのか？

フォワード・コンバータとフライバック・コンバータは、どちらも2次側（トランスの絶縁側）でダイオード（フォワード・コンバータでは2つ）を使用することによって構成できます。そのようにすれば、2次側のコントローラがなくても動作します。しかし、これは必ずしも高い効率が得られる実装方法ではありません。

フォワード・コンバータもフライバック・コンバータも、別の方法で実装できます。それは、ダイオードを低損失のMOSFETで置き換えるというものです。その場合、2次側にもコントローラが必要になります。つまり、絶縁バリアの2次側でMOSFETのオン/オフ制御を行うためにスイッチング・コントローラを使用するということです。例えば、2次側向けのコントローラ製品としては「LT8311」などを使用することになります。同製品の場合、出力電圧を監視し、その情報を絶縁バリアの1次側へ提供する回路を内蔵しています。この処理は、オプト・カプラの信号を介して実行されます。

図6に示したのは、フォワード・コンバータ用のコントローラ「LT3753」とLT8311を組み合わせたアプリケーション回路です。2次側でLT8311を使用することにより、オプト・カプラを利用したフィードバック制御を行います。

では、絶縁型のSMPSの設計において2次側のコントローラは必須の要素なのでしょうか。その答えは、「場合による」というものになります。電力に関する疑問に対しては、大体はこの答えになります。つまり、システムの要件、必要な精度、必要な効率、プロジェクトのスケジュール、コストなどを踏まえて総合的に判断する必要があるということです。2次側のコントローラを使用すると、以下に挙げるようないくつかのメリットが得られるので、それを判断の材料にすることになるでしょう。

- ▶ **効率の向上**：2次側のコントローラを使用すれば、ダイオードの代わりに  $R_{DS(ON)}$  の小さいMOSFETを制御することができます。そうすれば、2次側の電力損失を削減できるので、システムの効率が向上します。
- ▶ **レギュレーションの改善**：出力電圧と出力電流を監視し、それらの情報を1次側にフィードバックすれば、出力電圧を正確かつ安定した状態で維持することができます。つまり、出力電圧のより厳格なレギュレーションが可能になります。
- ▶ **柔軟性**：2次側用のコントローラ製品の中には、様々な追加機能を搭載しているものがあります。それらにより、パワー・コンバータの汎用性が高まります。つまり、多種多様なアプリケーションに対応できます。

## 絶縁型SMPSの用途

最後に、絶縁型のSMPSを活用すべきアプリケーションの例を挙げます。

- ▶ **医療用機器**：医療用の機器では、患者や医療従事者の感電を防ぐために絶縁型のSMPSが利用されます。また、絶縁は患者に関する電気信号と機器の間の干渉を防止することにも役立ちます。結果として、診断と治療をより正確に行えるようになります。
- ▶ **産業用制御**：通信インターフェースの電源や産業用オートメーション機器の電源など、多くのシステムでは絶縁型のSMPSが使用されます。実際、産業用の制御システムでは絶縁機能がよく使用されます。その目的の1つは、繊細な電子機器を高電圧のトランジエントや電気的なノイズから保護することです。
- ▶ **車載システム**：絶縁型のSMPSは車載システムでもよく使用されています。その目的は、様々なサブシステム間の電気的な干渉を防止し、電圧のスパイクやトランジエントから電子システムを保護することです。

- ▶ **通信システム**：電気通信やデータ通信に必要な電力密度の高い電源(PSU)として絶縁型のSMPSがよく使用されています。
- ▶ **再生可能エネルギー・システム**：再生可能エネルギー・システムの電力変換でも絶縁機能が使用されます。例えば、太陽光、風力、水力などを利用する発電所では、安全上の理由から絶縁機能が活用されます。また、システムの様々な部分で干渉が生じないようにすることも絶縁を利用する目的の1つです。
- ▶ **バッテリーをベースとするシステム**：バッテリーをベースとするシステムでも、絶縁型のSMPSは重要な役割を果たします。特に、バッテリーが充放電を行う際、繊細な電子コンポーネントを高電圧のトランジエントから保護し、安全性を確保するために使用されます。

## まとめ

絶縁型のSMPSは多様なアプリケーションで使用されています。その目的は、安全性、精度、信頼性を確保するためにパワー・コンバータの入力側と出力側を分離することです。フライバック・コンバータとフォワード・コンバータは、いずれもそうしたアプリケーションで使用できる絶縁型SMPSです。これら2つのトポロジのうちどちらを選択するのは、具体的なアプリケーションに依存します。様々な要件、効率、サイズ、負荷電流能力、コストといった観点からトレードオフを伴う判断を実施することになるでしょう。

## 参考資料

T.V. Saikumar, K.S. Bhanuprasad [How to Design a No-Opto Flyback Converter with Secondary-Side Synchronous Rectification (オプト・カプラが不要なフライバック・コンバータ、2次側に同期整流を適用)] Analog Devices、2014年

Frederick Dostal [フライバック・コンバータが抱える限界] Analog Devices、2020年11月

Nikolas Ledoux [機能的絶縁によるグラウンド・ループの解消でデータ伝送エラーを抑制] Analog Devices、2011年11月

## 著者について

Diarmuid Carey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。欧州の中央アプリケーション・センター（アイルランド リムリック）に所属しています。2008年からアプリケーション・エンジニアとしての業務に従事。2017年にアナログ・デバイセズに入社しました。欧州の広範な市場のお客様を対象として、電源や絶縁に関する設計支援を行っています。リムリック大学でコンピュータ工学の学士号を取得しました。

## EngineerZone®

### オンライン・サポート・コミュニティ

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。



Visit [ez.analog.com](https://ez.analog.com)

\*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

VISIT [ANALOG.COM/JP](https://analog.com/jp)

お住いの地域の本社、販売代理店などの情報は、[analog.com/jp/contact](https://analog.com/jp/contact) をご覧ください。

オンラインサポートコミュニティEngineerZoneでは、アナログ・デバイセズのエキスパートへの質問、FAQの閲覧ができます。

©2024 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。

TA24890-2/24

※初出典 2024年 TECH+（マイナビニュース）