

絶縁型の降圧コンバータで 使用するトランスの選択方法

著者: Yaxian Li、アプリケーション・エンジニア

概要

本稿では、まず絶縁型の降圧コンバータの動作について説明し ます。その上で、同コンバータを設計する際に極めて重要なス テップとなるトランスの選択方法について解説します。本稿に より、考慮すべきパラメータ、従うべき理論式、各パラメータ が回路全体に及ぼす影響についてご理解いただけるはずです。

絶縁型の降圧コンバータは どのように機能するのか?

図1は、絶縁型の降圧コンバータの概念図です。ご覧のように、 非絶縁型の一般的な降圧コンバータと似たような形で構成されて います。異なるのは、一般的な降圧コンバータのインダクタがト ランスに置き換えられていることです。それにより、絶縁型の降 圧コンバータを実現できます。なお、トランスの2次側ではグラ ウンドは独立した状態になります。



図1. 絶縁型の降圧コンバータ

まず、ハイサイドのスイッチQHSがオン、ローサイドのスイッチQLSがオフになっている状態について考えます(図2)。このオン期間 T_{ON} には、トランスの磁化インダクタンスL_{PRI}が充電されます。図2の矢印は、電流が流れる方向を表しています。このとき、トランスの1次側の電流量は直線的に増加します。その増加の傾きは、 $V_{IN} - V_{PRI}$ とL_{PRI}によって決まります。オン期間において、2次側のダイオードD1は逆バイアスされており、 C_{OUT} から負荷に対して負荷電流が流れます。



図2.オン期間の状態を表す等価回路

次に、QHSがオフ、QLSがオンになっている状態について考え ます。このオフ期間T_{OFF}には、1次側のインダクタが放電され、 QLSを介してグラウンドに電流が流れます。2次側ではD1が順 方向にバイアスされ、2次側のコイルからC_{OUT}と負荷に対して電 流が流れます。その電流により、C_{OUT}は充電されます(QHSを オフ、QLSをオンにしても、電流の向きは変わりません。電流量 の変化の傾きが変わるだけです。正の電流はOAまで減少し、そ の後、負の電流が増加します)。







トランスに関連する仕様

絶縁型の降圧コンバータを設計する際には、以下に示すようない くつかの仕様を明確にする必要があります。

- ▶ 入力電圧範囲
- ▶ 出力電圧
- ▶ 最大デューティ・サイクル
- ▶ スイッチング周波数
- 出力電圧リップル
- ▶ 出力電流
- ▶ 出力電力

これらの仕様が明確になれば、選択すべきコンポーネントが決ま ります。トランスについても同じことが言えます。以下、これら の仕様とトランスの関係について俯瞰しておきましょう。

通常、最大デューティ・サイクルDは0.4~0.6の範囲内の値に 設定します。最小入力電圧 V_{IN_MIN} と最大デューティ・サイクルに よって、1次側の出力電圧 V_{PRI} が決まります。この V_{PRI} と2次側 の出力電圧 V_{OUT} によって、トランスの巻数比が決まります。

出力電流I_{OUT}と出力電力P_{OUT}は、トランスの選択に影響を与える 重要なパラメータです。トランスの銅線の太さは、出力電流に応 じて決まります。また、トランスのボビンとしてどのようなもの を使用すべきなのかは出力電力によって決まります。ボビンの透 磁率は、どの程度のエネルギーを蓄積でき、どの程度の電力を出 力できるのかを表します。

一般に、インダクタ(トランス)のリップル電流はDCの出力電 流に係数を掛けた値として表現されます。T_{ON}時間は、デュー ティ・サイクルとスイッチング周波数によって算出されます。更 に、V_{IN}、V_{PRI}、リップル電流の値によって1次側のインダクタン スが決まります。DCの出力電流に乗じる係数については、値が 大きすぎても小さすぎても問題があります。係数の値が大きすぎ ると、おそらくはリップル電流が大きくなりすぎるでしょう。リッ プル電流が大きすぎてHブリッジの電流制限値の1/2に達する と、MOSFETに損傷が生じる可能性があります。また、等価直 列抵抗(ESR)と等価直列インダクタンス(ESL)によって、出 カコンデンサに大きなリップル電圧が印加されてしまうおそれも あります。リップル電流を極力小さく抑える必要がある場合には、 インダクタンスの値が大きいインダクタ(トランス)を使用しな ければなりません。コイルの巻数が多い場合、かさばるボビンが 必要になります。インダクタンスの値が大きいと、ループ帯域幅 が制限されて動的応答指数が低くなります。

トランスの選択方法

2次側のコイルにエネルギーが伝達されるのは、T_{OFF}の期間だけです。巻数比は、以下の式によって求めることができます。

$$\frac{V_{OUT} + V_D}{V_{PRI}} = \frac{N_{SEC}}{N_{PRI}} \tag{1}$$

ここで、V_Dは2次側のダイオードにかかる順方向のバイアス電圧 です。先述したように、最大デューティ・サイクルの値としては、 通常0.4~0.6の値を指定します。その値を用いると、V_{PRI}の値 は次式のようにして求まります。

$$V_{PRI} = D \times V_{IN MIN} \tag{2}$$

ここで、Dは最大デューティ・サイクル、V_{IN_MIN}は最小入力電圧 です。上の式を利用すれば、巻数比を計算することができます。 非絶縁型の降圧コンバータでは、リップル電流はインダクタの両 側で同じ値になります。以下の式を使えば、必要なインダクタン スの値を簡単に計算できます。

$$L = \frac{(V_{IN_MIN} - V_{OUT}) \times D}{f \times \Delta I}$$
(3)

ここで、fはスイッチング周波数、Δlはリップル電流です。先述 したように、リップル電流は、DC出力電流に係数を掛けた値と して扱われます(以下参照)。

$$\Delta I = I_{OUT} \times K \tag{4}$$

上式のKがその係数です。但し、絶縁型の降圧コンバータでは、 インダクタではなくトランスを使用します。トランスについては、 どのように考えればよいのでしょうか。ご存じのとおり、電流比 は巻数比の逆数に等しいので、次式が成り立ちます。

$$IPRI_{TOFF} = I_{SEC} \times \frac{N_{SEC}}{N_{PRI}}$$
(5)

ここで、IPRI_{TOFF}は、T_{OFF}の期間に1次側の電流に変換される2次 側の電流です。続いて、トランスの2つのコイルに流れる電流を 加算することにより、等価インダクタ電流を求めます(以下参照)。

$$ILeq = I_{PRI} + I_{SEC} \times \frac{N_{SEC}}{N_{PRI}}$$
(6)

上式のILeqが等価インダクタ電流です。トランスの巻線が3つある場合には、次式のような計算を行うことになるでしょう。

$$ILeq = I_{PRI} + I_{SEC} \times \frac{N_{SEC}}{N_{PRI}} + I_{THI} \times \frac{N_{THI}}{N_{PRI}} + \cdots$$
(7)

以上の内容が正しいのかどうかを確認するにはどうすればよ いのでしょうか。ここでは、絶縁型のDC/DCコンバータIC [MAX17682] を対象とし、シミュレーションを行ってみること にします。図4に示したのが、MAX17682を使用した代表的な 回路の例です。この図は、「SIMetrix/SIMPLIS」を備える電源回 路用のシミュレータ「EE-Sim[®] OASIS」を使って作成しました。 トランスの両側にI_{PRI}とI_{SEC1}というラベルを付けて電流プローブ を配置しています。



MAX17682の初期条件

初期条件を設定すればシミュレーションを高速化できる可能性があります。ただ、ほとんどのシミュレーションは、その設定を行わなければ実行できな いというわけではありません。

MAX17682のモデルには、調整が可能なパラメータが組み込まれています。IC_RESET、IC_SSDONE、IC_EN、IC_COMP、IC_FB、IC_V_{REF}、IC_CLKの7つです。それらにより、内部の初期条件を設定することができます。

これらのパラメータの値を編集するには、図中のMAX17682をダブルクリックします。するとGUI(Graphical User Interface)がポップアップするので、編集内容に応じた値をそのボックスに入力します。編集作業が完了したら「OK」をクリックします。

AC解析、POP (定常状態)解析、Load Step解析、Line Transient解析を行う場合、初期条件は次のように設定します。

1. C2の初期条件はV_{PRI}とします。 2. C3の初期条件はV_{SEC}とします。 3. C4の初期条件は5とします。 4. C5の初期条件は5とします。 5. C6の初期条件は5とします。 6. C7の初期条件はV_{COMP}とします。 7. C8の初期条件はV_{COMP}とします。 8. IC_RESET = IC_SDONE = IC_EN = 5 9. IC_COMP = V_{COMP} 10. IC_FB = IC_V_{REF} = 0.9 11. IC_CLK = 1.78 Start-up解析を行う場合は、以下のように設定します。 1. C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8の初期条件は0とします。 1. C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8の初期条件は0とします。 2. IC_RESET = IC_V_{REF} = IC_SSDONE = IC_EN = 0 3. IC_COMP = IC_FB = 0 4. IC_CLK = 0 dI = V_{PRI} × (1 - (V_{PRI}/V_{IN}))/(Lm × F_{SW} × 1000) L = I_{PRI} + (I_{SEC} × K) V_{COMP} = 0.875 + (0.25 × IL) + (0.125 × dI)

図4. MAX17682を使用した代表的な回路の例。 SIMetrix/SIMPLISを備えるEE-Sim OASISで作成しました。

MAX17682に関する注意事項

各種シミュレーション向けの回路のパラメータ

EE-Simのオンライン設計ツールからダウンロードする場合、このファイルはダウンロードした際に選択した種類のシミュレーション向けに構成されます。 ただ、他の種類向けに変更するのは難しいことではありません。

SIMPLISを含むシミュレーション全般を行った経験がなく、オンラインで実行された方法に従って別の種類のシミュレーション(Load Step、Line Transient、 AC、Steady State、Start Up)を実行したいというケースもあるでしょう。その場合、各種のシミュレーション用に用意された別の回路図を別のファイルとして いつでもダウンロードすることができます。そのようにすれば、各種のシミュレーションに対応する形で、初期条件だけでなく、あらゆるシミュレーション用のオ プションやパラメータ、ソース/負荷のパラメータが設定されます。

メニュー項目で「Simulator」→「Choose Analysis」を選択し、実行したいシミュレーションに適したパラメータを設定することも可能です。負荷とソー スのパラメータと初期条件は、回路図上のコンポーネントを編集することによって設定できます。回路図とシミュレータの設定を変更し、様々なシミュレーション を実行するために必要な手順などを以下に示します。

まず、「BODE」と「VAC」の各デバイスは、ACシミュレーションで制御ループに関する測定を行えるようにするためのものです。これらが存在しても、他のシ ミュレーションに悪影響が及ぶことはありません。実際の回路では、これらは短絡(ショート)に置き換えられます。

[LOAD1] と「LOAD2」にはいくつかのパラメータがあり、シミュレーションの種類に応じて変更することができます。Load Step解析のトランジェント・シミ ュレーションにおいて、負荷はパルス電流に並列に接続された抵抗として機能します。「Load Step/Pulse」を使用しない場合、負荷は抵抗として機能します。

負荷をダブルクリックすると、パルスのタイミングや振幅のパラメータを編集するためのポップアップ・ウィンドウが表示されます。

1~4. [Delay Time] 、 [Rise Time] 、 [Pulsewidth] 、 [Fall Time] を使えばパルス負荷のタイミングを設定することができます。 5. [Source Resistance] はパルス波形の電流の下限値の設定に使用します。電流の値は、V_{OUT}/ [Source Resistance] となります。 6. [Start Current] というパラメータは、シミュレータに対して、以前のステップごとの電流の下限値を通知します。

7. [Pulsed Current]を使えば、パルス波形のピーク電流(上限値)を設定できます。

「Source Resistance」で設定した電流は、シミュレーション全体を通じて存在することになります。「Load」というデバイスは、追加されたパルスの振幅を [Pulsed Current] - [Start Current] によって算出します。 [Pulsed Current] に入力した値と最大電流の値を同じにするには、 [Start Current] に入力 した値が「Source Resistance」で生成される電流(Vout/Rsource)と一致するようにします。

[Load] には他にも2つのパラメータがありますが、それらはポップアップするGUIには含まれていません。両パラメータを編集するには、負荷を選択して右クリ ックし、ポップアップ・リストから「Edit/Add Properties...」を選択します。それによって「Edit Properties」ウィンドウが開いたら、変更したいプロパティを ダブルクリックします。「Edit Property」ウィンドウで値を変更したら「OK」をクリックしてください。続いて「Edit Properties」ウィンドウで「OK」をクリ ックします。

1. 「ANALYSIS」は、パルス負荷と抵抗負荷のうちどちらを使用するのかを決めるパラメータです。

I.1. [Load Step (Pulse)]のシミュレーションでは、「ANALYSIS」を「TRAN」に設定すると、パルス電流が使用されます。
 1.2. すべてのACシミュレーションとLoad Step以外のトランジェント・シミュレーションでは、「ANALYSIS」を「AC」に設定します。
 IAC_RSRC」は、「ANALYSIS」が「AC」である場合(「TR_RSRC」が「TRAN」である場合)、使用する負荷の抵抗値を設定します。

電圧源であるV_Nデバイスは、Line Transient以外のすべてのシミュレーションでDC電圧に設定されます。これをダブルクリックするとポップアップするGUIを使うことで、パラメータの値を変更することができます。これをDC電源に設定するには、「Start Voltage」と「Pulse Voltage」に同じ値を設定します。

POPシミュレーションの設定には、「Simulator」メニューの「Choose Analysis」を使用します。

ACシミュレーション、Steady-stateシミュレーションをオンラインで実行する場合に必要な設定もあります。通常、それらはLoad StepシミュレーションとLine Transientシミュレーションにも使用されます。POPシミュレーションでは負荷が軽い場合に問題が生じることがあります。Load Stepシミュレーションでそれが 問題になる場合には、開始時の電流をより高い値に設定し、「Step/pulse」の電流をより低い値に設定するとよいでしょう。

Trigger Gate: X\$U1.X\$DRIVER.X\$UPOP.!DCOMP Max. Period: 10 µ Cycles before launching POP: 100 「Advanced」ボタンをクリックすると、次の3つのパラメータを設定することができます。 Convergence: 10 n POP iteration limit: 20 Enable automatic transient analysis after a failed POP: ボックスにチェックを入れます。

[V_{IN}] 、 [LOAD1] 、 [LOAD2] 、 [BODE] 、 [VAC] はテスト用のデバイスであり、実際の回路には含まれません。 [BODE] は実際の回路では短絡に置き換えられます。

オープン・サーキットは、1GΩの抵抗、1fFのコンデンサで表現されます。 ショート・サーキットは、1mΩの抵抗で表現されます。

> 図4(続き). MAX17682を使用した代表的な回路の例。 SIMetrix/SIMPLISを備える EE-Sim OASIS で作成しました。



図5に示したのは、2つのプローブによって取得したトランジェ ント・シミュレーションの結果です。2つの電流波形は、式(6) を使用して加算した結果に相当します。

電流を加算した結果(赤色)は三角波になっています。これは、 非絶縁型の降圧コンバータのインダクタに現れる挙動に相当しま す。そのため、トランスの1次側の∆1は、以下の式によって簡単 に計算することができます。

$$\Delta I = \left(I_{PRI} + I_{SEC} \times \frac{N_{SEC}}{N_{PRI}} \right) \times K$$
(8)

通常、負荷に対するリップル電流はDC出力電流の0.2倍に設定 します。つまり、KはN_{SEC}/N_{PRI}の0.2倍に設定すればよいという ことになります。一方、1次側のピーク電流は、スイッチング電 流の上限値未満に設定しなければなりません。ここで、I_{PK}は次式 で与えられます。

$$I_{PK} = ILeq_{DC} + \frac{\Delta I}{2} \tag{9}$$

したがって、トランスの1次側の△1は、次式によって簡単に計算 することができます。

$$L_{PRI} = \frac{(V_{IN_MIN} - V_{PRI}) \times D}{f \times \Delta I}$$
(10)

巻数比、1次側のインダクタンス、出力電力、出力電流、絶縁電 圧を考慮すれば、どのようなインダクタを使用すればよいか判断 できるはずです。

簡素化された式の使用方法

MAX17682のデータシートを見ると、図6のように記載されて います。この式についてより深く理解して活用するにはどうすれ ばよいのか、少し考えてみましょう。 先述した内容に従えば、T_{OFF}の期間については、式(10)を次式のように書き換えることができます。

$$L_{PRI} = \frac{V_{PRI} \times (1 - D)}{f \times \Delta I} \tag{11}$$

Primary Inductance Selection

Primary inductance value determines ripple current in the transformer. Calculate required primary inductance using the equation:

$$L_{PRI} = \frac{V_{PRI}}{f_{SW}}$$

where V_{PRI} and f_{SW} are nominal values.

ここではDの値が0.6であるとします。すると、ΔIが0.4Aであ る場合には、(1 - D)とΔIの項を削除できることになります。そ の結果、式(11)と図6に示した式は同じになります。つまり、 データシートに記載された式では、1次側のリップル電流の値を 事前に設定し、その値を前提にしているということです。Dが0.6 であるとすると、1次側のリップル電流の値は0.4Aだということ になります。T_{OFF}のデューティ・サイクルは、1次側のリップル 電流によって決まると考えればよいでしょう。

$$\Delta I = 1 - D \tag{12}$$

まとめ

最後に説明したように、図6に示した簡素化された式を使えば、 迅速に設計を行うことができます。つまり、1次側のリップル電 流とT_{OFF}のデューティ・サイクルが等価になるようにすればよい ということです。1次側のリップル電流として異なる値を設定し たい場合や、別のパラメータを使用したい場合には、本稿で説明 した内容に従って必要な計算を行ってください。

著者について

Yaxian Lilt、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。2020年にMaxim Integrated (現在はア ナログ・デバイセズの一部門) に入社しました。現在はト レーニング&テクニカル・サービス・グループに所属。主 にGMSLとRF技術を担当しています。2018年に杭州電子科 技大学で電気工学/オートメーションに関する学士号を取 得。特技はバドミントンと水泳です。

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。

■ ADI EngineerZone[™]

SUPPORT COMMUNITY

Visit 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

お住いの地域の本社、販売代理店などの情報は、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。

©2022 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。

TA24087-12/22

VISIT ANALOG.COM/JP