

## Application Examples

### Modeling a Current-Controlled Flyback Converter using PLECS®

PLECSを用いた電流制御フライバックコンバータのモデリング

Dr. John Schönberger

Version: 04-13

# 1 はじめに

絶縁型フライバックコンバータは、携帯機器のバッテリーや電子機器の補助電源などの小型電源によく使用されるコンバータです。このレポートでは、単相電源から3相DC出力電圧を供給するフライバックコンバータの制御設計について説明し、その回路図を図1に示します。フライバックトランスは、磁化インダクタンスを並列接続した理想トランスを使用してモデリングします。このモデルはコンポーネントの寄生効果をシミュレートするのではなく、コントローラ設計と回路レベルのシミュレーションを目的としているため、漏れインダクタンスは無視されます。フライバックトランスのパラメータを表1に示します。オープンループフライバックコンバータの出力電圧は、入力DC電圧リップルの影響を大きく受けます。出力電圧を調節するために、Type2電圧コントローラを使用してリファレンス電流を設定する電流モード制御方式が実装されています。

図1: フライバックコンバータの回路図

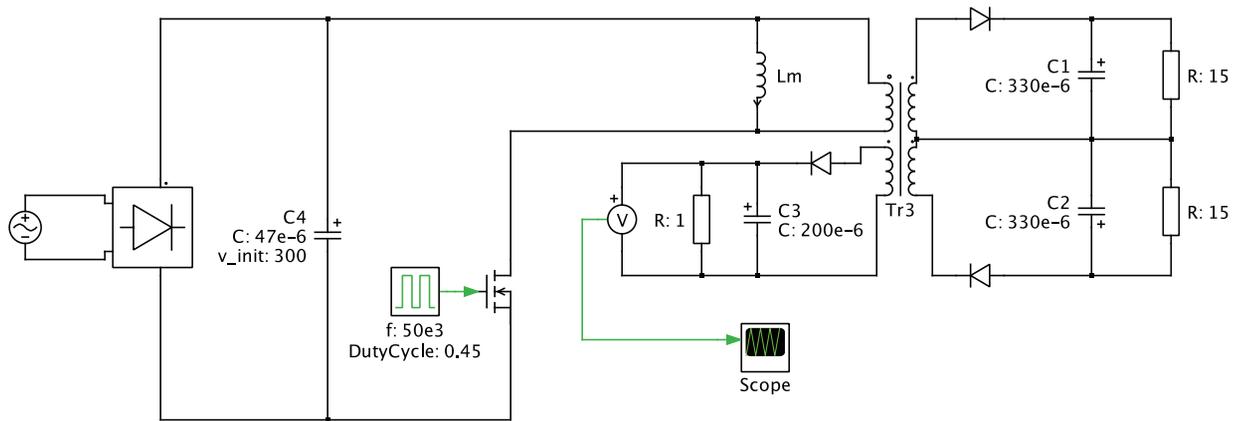


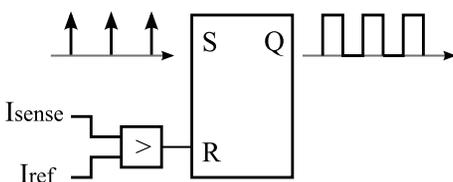
表1: フライバックトランスのパラメータ

パラメータ	値
磁化インダクタンス, $L_m$	9.4 mH
一次巻線数, $n_p$	80
5V巻線数, $n_{s1}$	2
±12V巻線数, $n_{s2,3}$	4.5
最大デューティサイクル, $d_{max}$	0.50

# 2 電流コントローラ

フライバックコンバータは2ループ制御方式を使用します。ピーク電流モードコントローラに基づく内側の電流ループは高速過渡応答を提供し、外側の電圧制御ループは内側のループにリファレンス電流を提供して5V巻線の出力電圧を調整します。PLECSの制御器ブロック/変調器のピーク電流制御器ブロックは、図2に示すようにSRラッチに基づいています。各スイッチングサイクルの開始時に、設定入力Sの周期信号がスイッチを制御する出力Qを設定します。リセット入力Rがトリガ信号を受信するまで、出力はオンのままになります。リセット信号は、MOSFETのソース端子の低抵抗の電流センス信号を使用して5V固定のリファレンス信号と比較することによって生成されます。

図2: SRラッチに基づく電流モード制御器

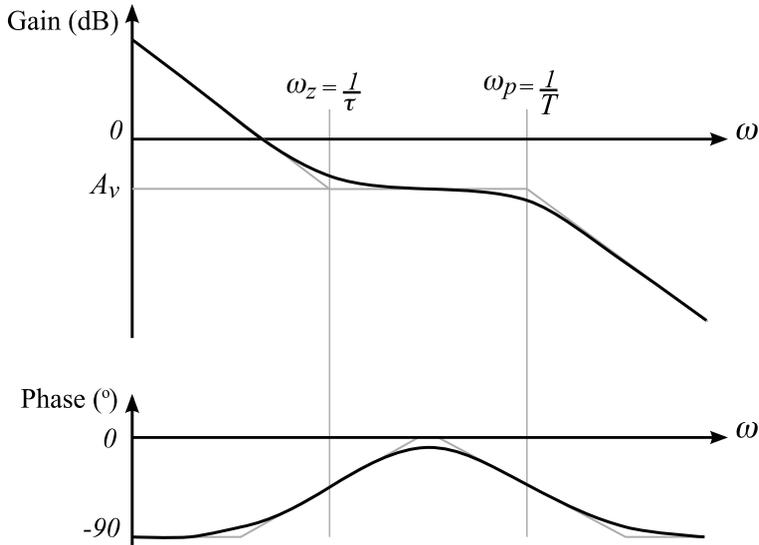


### 3 電圧コントローラ

#### 3.1 周波数応答

電圧ループは、反転オペアンプ回路を使用して実装するType2電圧コントローラに基づいています。Type2コントローラは、 $0^\circ$ に極があり、 $\omega_z$ に零点があるPIコントローラに似ています。スイッチングノイズを除去するために高周波極 $\omega_p$ を追加しています。Type2コントローラの周波数応答を図3のボード線図に示しています。

図3: Type2コントローラのボード線図



Type2コントローラの伝達関数は次のようになります:

$$G(s) = k_p \left( \frac{1 + s\tau}{s\tau} \right) \left( \frac{1}{1 + sT} \right) \quad (1)$$

ここで比例ゲイン $k_p = 10^{40}$ となります。これは、ユニティゲイン帯域幅を定義された値に設定するように計算され、 $\omega_z$ と $\omega_p$ はシステムの位相マージンとDCゲインを設定するように調整されます。

#### 3.2 電圧コントローラの設計

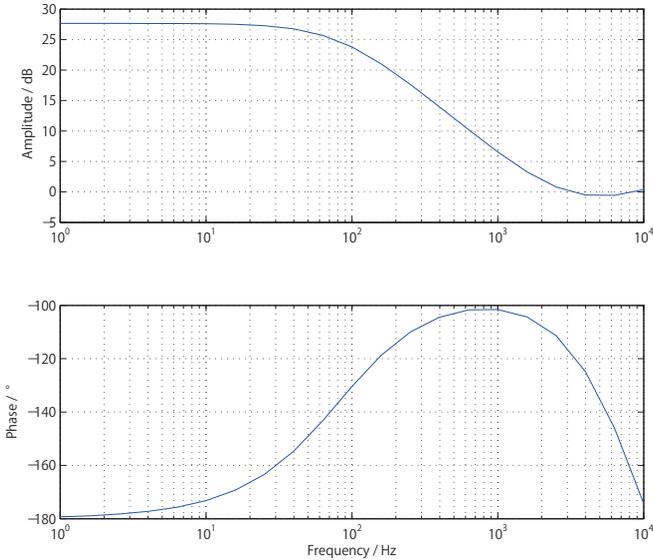
電圧コントローラを設計するには、電流制御コンバータの周波数応答が必要です。コンバータの小信号伝達関数をボード線図の形で得るには、インパルス応答解析ツールまたはAC周波数解析ツールを使用します。これらのツールは、PLECS BlocksetではPLECSライブラリブラウザのExtras -> Analysis Toolsから、PLECS Standaloneではシミュレーション -> 解析ツール...メニューから使用できます。この例題で選択された解析方法であるインパルス応答解析を実行するには、整流器の入力とキャパシタを300 VDCのDC電圧源に置き換えて入力外乱を除去します。入力整流器の動作はフライバックコンバータの動作よりもはるかに遅いため、無視できます。

インパルス応答解析ツールの構成は、次のパラメータを使用して行われます:

- システム周期: 2e-5秒(これは最も低い周期周波数を持つ信号、つまりスイッチング信号の周期です)
- 周波数帯域: [1 1e4] Hz
- 定常動作点: 21
- 初期定常周期: 10

インパルス応答解析を実行すると、[図4](#)に示すようなボード線図が生成されます。システムのユニティゲイン帯域幅は500Hzに選択されています。この周波数は、入力外乱があってもコントローラが出力を適切に調整できるように、100Hzの入力電圧リップルより5倍高く設定されています。[図4](#)から、500Hzでシステムのユニティゲイン0dBを達成するために、Type2コントローラの中帯域範囲 $\omega_z < \omega < \omega_p$ で必要なゲインは-11dBであることがわかります。

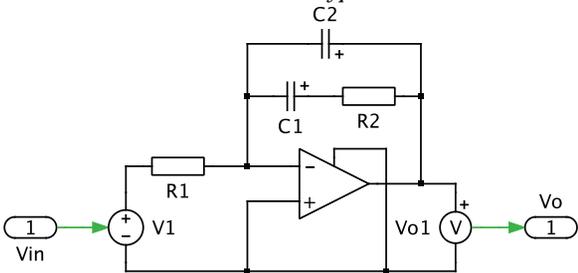
図4: 電流制御フライバックコンバータのボード線図



### 3.3 オペアンプの実装

Type2 コントローラは、[図5](#)に示すように反転オペアンプを使用して実装します。反転タイプのオペアンプであるため、出力信号を再反転するには追加の反転ステージが必要です。あるいは、5V巻線の出力電圧をリファレンス電圧信号から減算し、同様な反転を適用することもできます。実際には、反転オペアンプバッファまたはフォトカプラが制御信号を再反転します。

図5: 反転オペアンプをベースにしたType2コントローラ。



電圧コントローラのパラメータは、 $A_v = -11\text{dB}$ 、 $f_z = 100\text{Hz}$ 、 $f_p = 2\text{kHz}$ です。コントローラのゲイン、極、零点のコンポーネント値は、 $R_1$ の値が $1e4\text{Hz}$ であると仮定し、次の式を使用して計算されます:

$$k_p = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

$$\omega_z = \frac{1}{R_2 C_1} \quad (3)$$

$$\omega_p \approx \frac{1}{R_2 C_2} \quad (4)$$

Type 2コントローラのオペアンプ回路は、サブシステムとしてPLECSに実装されています。次に、システム周期パラメータを0秒に設定し、コンバータの伝達関数を取得する解析で使用したのと同じ設定で、AC周波数解析ツールを使用してコントローラの周波数応答を取得します。

## 4 付録

### A. シミュレーションファイル - PLECS Blockset

このアプリケーションノートには、PLECS Blocksetを使用してフライバックコンバータの電圧コントローラの実証するために使用するサンプルファイルが付属しています:

- *Flyback\_Iloop\_impulse.mdl*: インパルス応答解析ツールを使用して、電流制御コンバータのオープンループ周波数応答を取得するモデル。結果は構造体としてMATLABワークスペースに書き込まれます。
- *Flyback\_Vloop\_cct.mdl*: 内側の電流制御ループと設計された電圧コントローラの両方を備えたコンバータの完全なモデル。

### B. シミュレーションファイル - PLECS Standalone

このアプリケーションノートには、PLECS Standaloneを使用してフライバックコンバータの電圧コントローラの実証するために使用するサンプルファイルが付属しています:

- *Flyback\_Iloop\_impulse.plecs*: インパルス応答解析ツールを使用して、電流制御コンバータのオープンループ周波数応答を取得するモデル。
- *Flyback\_Vloop\_cct.plecs*: 内側の電流制御ループと設計された電圧コントローラの両方を備えたコンバータの完全なモデル。

改訂履歴:

04-13

初版

**plexim**

☎ +41 44 533 51 00

+41 44 533 51 01

✉ Plexim GmbH

Technoparkstrasse 1

8005 Zurich

Switzerland

@ info@plexim.com

<http://www.plexim.com>

**Pleximへの連絡方法:**

Phone

Fax

Mail

Email

Web

**KESCO** KEISOKU ENGINEERING SYSTEM

計測エンジニアリングシステム株式会社

<https://kesco.co.jp/>

*Application Examples*

© 2002–2013 by Plexim GmbH

このマニュアルに記載されているソフトウェアPLECSは、ライセンス契約に基づいて提供されています。ソフトウェアは、ライセンス契約の条件の下でのみ使用またはコピーできます。Plexim GmbHの事前の書面による同意なしに、このマニュアルのいかなる部分も、いかなる形式でもコピーまたは複製することはできません。

PLECSはPlexim GmbHの登録商標です。MATLAB、Simulink、およびSimulink Coderは、The MathWorks、Inc.の登録商標です。その他の製品名またはブランド名は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。