



## PLECS DEMO MODEL

*Buck Converter Operating in Boundary Conduction Mode*

境界伝導モードで動作する降圧コンバータ

BCMで動作するピーク電流予測モード制御用のオンラインパラメータ調整を備えた降圧コンバータ

Last updated in PLECS 4.6.1

# 1 概要

このデモでは、[1]で説明されているように、境界伝導モード(Boundary Conduction Mode: BCM)で動作するピーク電流予測モード制御のオンラインパラメータ調整を使用した降圧コンバータを紹介します。

**Note** このモデルには、次からアクセスできるモデル初期化コマンドが含まれています。

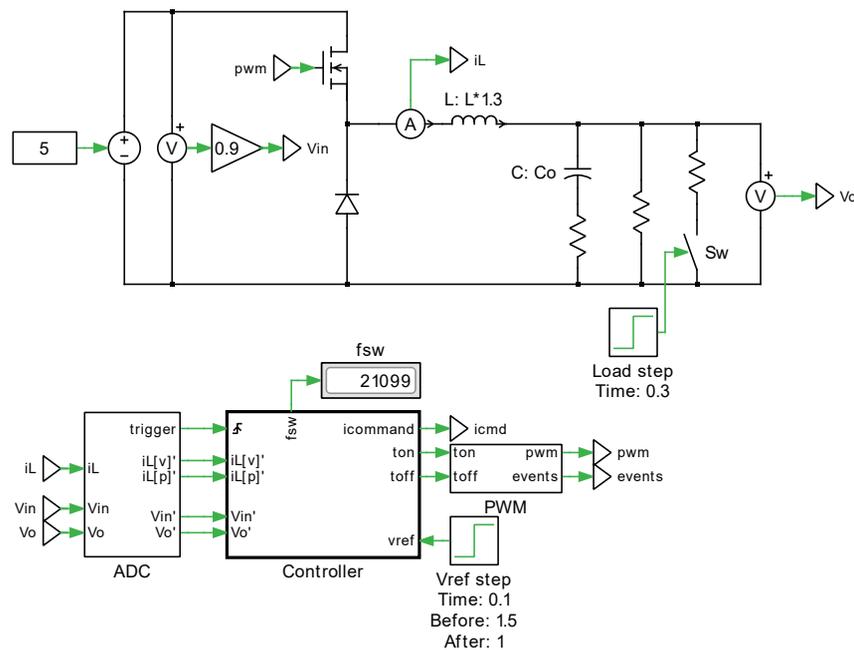
*PLECS Standalone*: シミュレーションメニュー + シミュレーション・パラメータ... → 初期化

*PLECS Blockset*: Simulinkモデルウィンドウで右クリック → モデル プロパティ → コールバック → InitFcn\*

## 2 モデル

最上位の回路図には、図1に示すように、電源回路とコントローラが含まれています。電源回路は、MOSFETと抵抗負荷を備えた単純な降圧コンバータです。コントローラは出力電圧を調整し、コンバータをBCMで動作するように調整します。電圧測定センサ誤差と推定インダクタンスのパラメータ偏差もモデリングされます。

図1: モデルのトップレベルの回路図



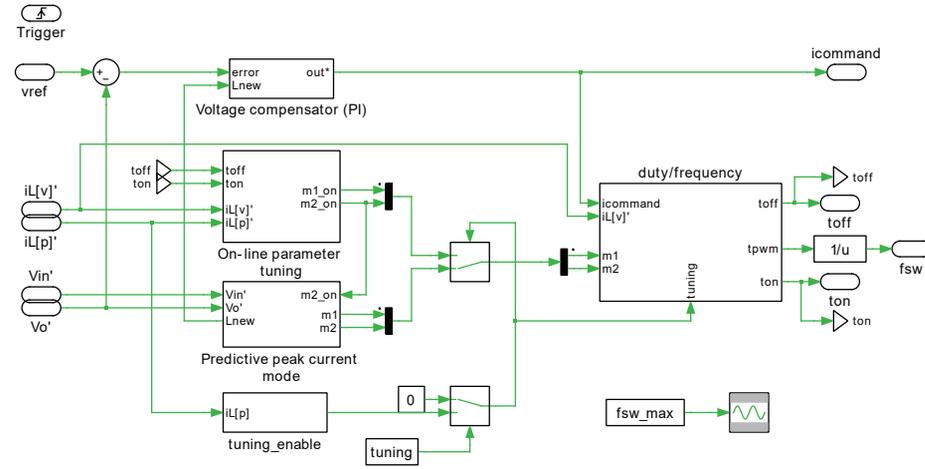
### 2.1 コントローラ

制御ロジックは、図1に示すように3つの主要なサブシステムで構成されます。"PWM"サブシステムは、メインコントローラからの変数onとoff時間に基づいてゲート信号を生成します。PWMキャリアが最小値または最大値に達すると、"PWM"サブシステムによってイベント信号を生成します。イベント信号は"ADC"サブシステムで使用し、インダクタの電流リップルの最小値と最大値でインダクタ電流をサンプリングします。

"Controller"サブシステムはTriggered Subsystemであり、メインの制御ロジックを実装します。Triggered Subsystem内のコンポーネントは、入力トリガ信号に基づいてグループとして実行します。トリガ入力、電流リップルのピークと一致します。

Controllerサブシステムを図2に示します。電圧補償器(Voltage compensator (PI))は、検出されたDC出力信号をリファレンスと比較して、DC出力電圧を調整します。電圧補償器の出力は、ピークインダクタ電流リファレンス $i_{command}$ です。次いで、このリファレンス信号は、オン時間とオフ時間の計算に使用されます。このリファレンス信号は、オンラインパラメータ調整技術(On-line parameter tuning)技術を使用した予測ピーク電流モード(Predictive peak current mode)制御で、オン時間とオフ時間 (それぞれ $t_{on}$ および $t_{off}$ )を指定します。

図2: BCMの降圧コンバータのコントローラ



電圧補償

**プラント伝達関数** PIコントローラのゲインパラメータを設定するには、プラント伝達関数がが必要です。外側の電圧ループの伝達関数は $V(s)$ です。電圧ループは、電流リファレンスを歪めないように、電流ループよりも遅くなるように設計されています。

$V(s)$ は、インダクタ(L)を流れる電流の変化 $I_L$ (入力変数)をコンデンサ電圧 $V_C$ (出力変数)の応答に関連付けます。

$$V(s) = \frac{V_C}{I_L} \approx \frac{1}{sC} = \frac{1}{sT_2}, \quad \text{where } T_2 := C$$

**等価遅延** 制御システムは多くの場合、いくつかの小さな遅延(センサ、アクチュエータ、サンプリング、計算遅延、PWM遅延など)が発生します。一般に、これらの遅延はプラントの時定数よりも小さいと想定されています。 $T_\Sigma$ が制御システムの等価遅延である場合、遅延の単純化された伝達関数は次のようになります:

$$D_\Sigma(s) = \frac{1}{1 + sT_\Sigma}$$

この特定の実装について、このモデルに存在する遅延は次のとおりです。

- 制御計算の小さな時定数 $T_{calc}$ は $\frac{1}{2}T_s$ です。
- PWM出力生成の小さな時定数 $t_{pwm}$ は $\frac{1}{2}T_s$ です。ここで、 $T_s$ はコントローラのサンプル時間です。

したがって、等価遅延 $T_\Sigma$ は次のようになります:

$$T_\Sigma = T_{calc} + t_{pwm} = T_s$$

**電圧ループの制御パラメータの計算** 電圧PIコントローラの制御パラメータ( $K_p$ および $K_i$ )は、プラントの外側の電圧ループが純粋な積分器を表すため、対称最適基準を使用して計算されます。システムの開ループ伝達関数 $V_{OL}(s)$ は、コントローラの伝達関数、等価時間遅延、およびプラントの積によって与えられます:

$$V_{OL}(s) = \frac{1 + sT_n}{sT_i} \cdot \frac{1}{1 + sT_\Sigma} \cdot \frac{1}{sT_2}, \quad \text{where } K_p = \frac{T_n}{T_i} \text{ and } K_i = \frac{1}{T_i}$$

対応する閉ループ伝達関数を解いた後、最終的な係数は次のようになります:

$$T_n = 4 \cdot T_\Sigma \text{ and } T_i = 8 \cdot \frac{T_\Sigma^2}{T_2}$$

コントローラパラメータの計算の詳細については、[2]を参照してください。

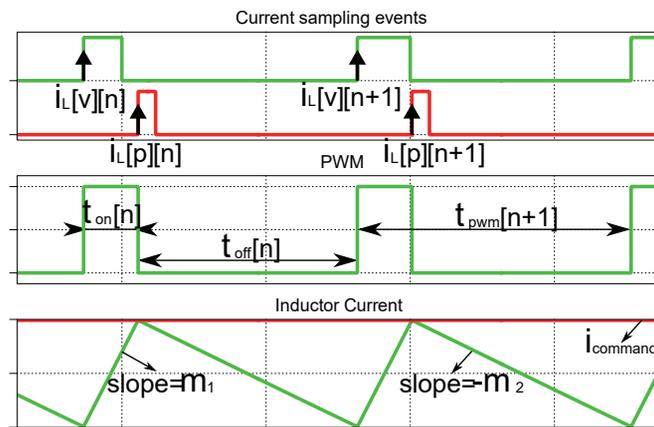
これらの連続パラメータは、モデル内で離散パラメータに変換されます。Controllerサブシステムのサンプル時間はスイッチング周期によって変化するため、離散コントローラのゲインはオンザフライで計算されます。境界モード降圧コンバータのスイッチング周期は、次のように計算されます:

$$t_{pwm} = \frac{2L}{(1-d)R_L}$$

ここで、 $L$ は出力インダクタンス、 $d$ はデューティ比、 $R_L$ は負荷抵抗です。

コントローラのゲインを導出するのに必要なサンプル時間を計算するためにすべてのパラメータをその場で変更すると、コントローラが不安定になります。したがって、 $d$ と $R_L$ は一定に保たれ、サンプル時間は後のセクションで導出されるインダクタンス  $L_{new}$  の予測値を使用して計算されます。

図3: BCMによる予測電流制御



### 予測ピーク電流モード制御

予測ピーク電流モード(Predictive peak current mode)コントローラは、ピークリップル電流を電流コマンド $i_{command}$ に調整します。スイッチング周期の開始時に、PWM信号のオン時間 $t_{on}$ が計算され、ピーク電流設定点に到達します。PWM信号のオフ時間 $t_{off}$ を制御することにより、電流は0に減少します。オン時間とオフ時間は、図3に示すように、インダクタ電流の立ち上がり勾配 $m_1$ と立ち下がり勾配 $m_2$ を予測することによって計算されます。降圧コンバータの場合、これらは次のように計算します。

$$m_1 = \frac{V_{in} - V_o}{L}$$

$$m_2 = \frac{V_o}{L}$$

n番目のスイッチング周期のオン時間とオフ時間は、次の式で計算されます:

$$t_{on}[n] = \frac{i_{command} - i_L[v][n]}{m_1}$$

$$t_{off}[n] = \frac{i_{command}}{m_2}$$

ここで、 $i_L[v][n]$ はn番目のスイッチング周期の開始時にサンプリングされたインダクタ電流です。n番目のスイッチング周期のスイッチング周期( $t_{pwm}$ )は、次のように計算されます:

$$t_{pwm}[n] = t_{on}[n] + t_{off}[n]$$

## オンラインパラメータ調整

インダクタの変動と入力電圧ドリフトに関連する感度に対処するために、オンラインパラメータ調整(On-line parameter tuning)が組み込まれています。この方法は、2つのPWM出力間のサンプル電流に基づいています。次の式を使用して、n番目のスイッチング周期の電流の立ち上がり勾配と立ち下がり勾配、 $m_{1\_on}$ と $m_{2\_on}$ を計算し、オンラインで更新します:

$$m_{1\_on}[n] = \frac{i_L[p][n-1] - i_L[v][n-1]}{t_{on}[n-1]}$$

$$m_{2\_on}[n] = \frac{i_L[p][n-1] - i_L[v][n]}{t_{off}[n-1]}$$

ここで、 $i_L[p]$ はインダクタ電流のピークでサンプリングされたインダクタ電流であり、 $i_L[v]$ はスイッチング周期の開始時またはインダクタ電流の谷でサンプリングされたインダクタ電流です。PLECSモデルでは、すべてのパラメータが1つの追加の時間ステップによって遅延されます。

オンライン調整がオンになると、計算されたオフ時間から小さな値 $1e-7$ が差し引かれ、小さな外乱が生成されます。これにより、インダクタ電流が連続伝導モード(Continuous Conduction Mode: CCM)にほぼ到達するまで押し上げられます。これにより、コントローラは次のステップの立ち上がり勾配と立ち下がり勾配を正確に計算できるようになり、インダクタ電流は常に定常状態でBCMに留まります。

オン時間とオフ時間はステートマシンブロックに送られ、PWM信号が生成されます。

オンライン調整ブロックは以前に計算された値に依存するため、最小ピーク電流とスイッチング周期に基づいてブロックを有効にするロジックが追加され、オンライン調整ブロックが最初の数回のトランジェントの後にのみ有効になるようにします。

予測ピーク電流モード ブロックで $m_1$ と $m_2$ の値が常に最新であることを保証するために、On-line parameter tuningブロックから計算された更新された $m_{2\_on}$ を使用して、インダクタンス値がオンラインで更新されます。

$$L_{new} = \frac{V_o}{m_{2\_on}}$$

信号スイッチは、インダクタンスの計算値を監視します。制限内にない場合は、以前に計算されたL値を使用するように切り替えます。

### 3 シミュレーション

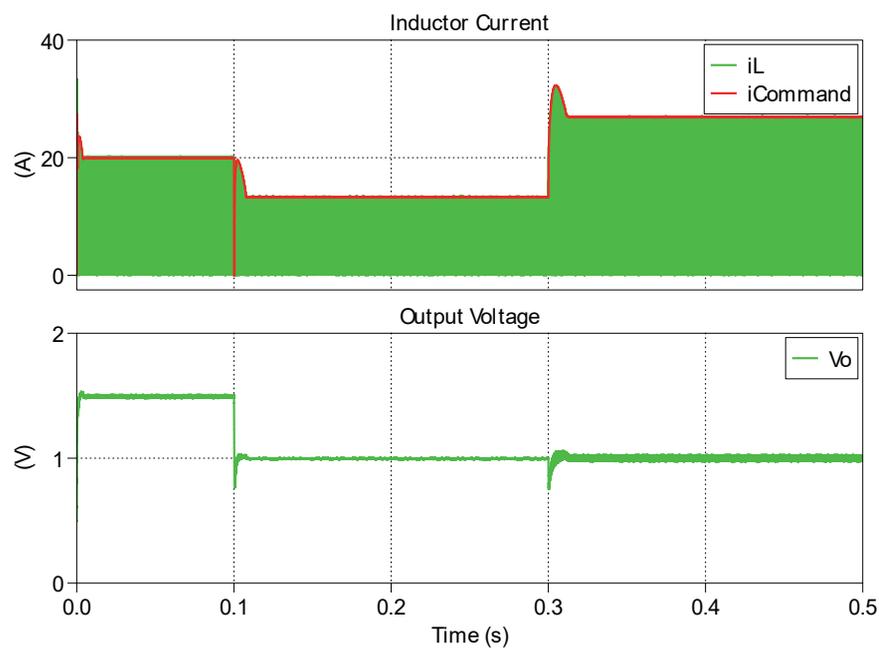
提供されたモデルを使用してシミュレーションを実行し、インダクタ電流コマンド、インダクタ電流、PWM信号、およびインダクタ電流がサンプリングされるトリガを観察します。

インダクタの変動と入力電圧ドリフトに関連する感度を示すために、回路のインダクタ値はデフォルトで公称値の1.3に設定され、入力電圧測定値は実際の値の0.9倍に変更されます。さらに、0.1秒で電圧リファレンスにステップ変化があり、0.3秒で負荷抵抗が半分になります。

モデルを実験し、オンラインパラメータ調整ブロックを検証するには、モデルをそのまま実行し、“現在のトレースを保持”ボタンを使用してトレースを保存します。次に、“Controller”サブシステムから**online tuning**パラメータをoffに設定し、モデルを再実行します。2つのトレースを比較します。オンライン調整を無効にすると、コンバータがBCMを達成しないことがわかります。インダクタの公称値を定格0.7に変更することもできます。

On-line parameter tuningを有効にしたシミュレーション結果を図4に示します。

図4: シミュレーション結果



### 参照

- [1] Y. Chang and Y. Lai, “Online Parameter Tuning Technique for Predictive Current-Mode Control Operating in Boundary Conduction Mode,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 3214-3221, Aug. 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2024651. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5071286>
- [2] Conception de systèmes automatiques, Hansruedi Bühler, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne 1988, ISBN 2-88074-149-1

改訂履歴:

PLECS 4.6.1 初版



**Pleximへの連絡方法:**

☎ +41 44 533 51 00	Phone
+41 44 533 51 01	Fax
✉ Plexim GmbH	Mail
Technoparkstrasse 1	
8005 Zurich	
Switzerland	
@ info@plexim.com	Email
http://www.plexim.com	Web



計測エンジニアリングシステム株式会社

<https://kesco.co.jp>

*PLECS Demo Model*

© 2002-2023 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。