

## RT Box *DEMO MODEL*

### Boost Converter

昇圧コンバータ

Last updated in RT Box Target Support Package 3.1.1

# 1 はじめに

このRT Boxのデモモデルは、抵抗負荷と閉ループ電流制御を備えた昇圧コンバータを特徴としています。公称動作条件は次のとおりです:

- 電力52kW
- 入力電圧480V
- インダクタ電流リファレンス108A

このドキュメントでは、PLECSでの電力ステージと制御の実装と、1台のRT Boxへのシステムのリアルタイムデプロイについて説明します。このような"仮想プロトタイピング"構成では、2本の37ピンD-Subケーブルによるフロントパネル接続で、PWM信号とアナログ測定をループバックできます。

昇圧コンバータモデルを実行する各コアに対して選択した離散化ステップサイズと平均実行時間を表1に示します。離散化ステップサイズパラメータは、生成されたコードの基本サンプリング時間を指定し、モデルの状態空間方程式を離散化するために使用します。実行時間は、RT Boxのプロセッサが対応するモデルを計算するのに実際にかかる時間を表します。

表1: 1台のRT Boxでのデモの離散化ステップサイズと平均実行時間

|               | Core 0: exec. time / step size | Core 1: exec. time / step size |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RT Box 2 or 3 | 1.6 $\mu$ s / 2 $\mu$ s        | 0.9 $\mu$ s / 50 $\mu$ s       |
| RT Box 1      | 1.7 $\mu$ s / 2 $\mu$ s        | N/A                            |

## 1.1 要求仕様

このデモモデルを実行するには、次の製品が必要です(www.plexim.comから入手可能):

- [PLECS RT Box](#) 1台と[PLECS](#)および[PLECS Coder](#)ライセンス1つつ
- [RT Box Target Support Package](#)
- [RT Box User Manual](#)のクイックスタートガイドに記載されている、PLECSとRT Boxの設定手順に従います
- フロントパネルのループバック設定でRT Boxを接続するための37ピンD-Subケーブル2本

このデモ モデルは主に、RT Box 1、2、または3で実行するマルチタスクモードを紹介していることに注意してください。

- ターゲットが RT Box 2または3の場合、メインCPUコア(コア0)は、サンプリング時間Tdisc.Plantでプラントを"Base task"として実行します。もう1つのコア(コア1)は、Tdisc.Controllerのサンプリング時間と並行して"Controller"タスクで閉ループ制御を実行します。これははるかに遅く、通常はコンバータのスイッチング周期に等しくなります。このように、RT Box 2または3のマルチコア機能は、計算処理を異なるコアに分割することで発揮されます。さらに、この設定は後でHILテストやRCPテストに簡単に移行できます。
- ただし、ユーザが利用できるRT Box 1が1台しかない場合、このモデルはRT Box 1のCPUコアのみでマルチタスク機能を使用して実行することもできますが、プリエンティブマルチタスクとなります。この場合、"Base task"は、サンプリング時間Tdisc.Plantでプラント計算を最高優先度で実行しています。"Controller"タスクは、Tdisc.Controllerのサンプリング時間に優先度の低いバックグラウンドタスクとして実行されます。

詳細な設定は[Coderオプション...](#)ウィンドウの[タスクタブ](#)を確認してください。

**注意** 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

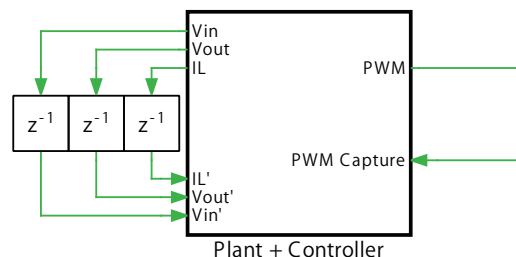
*PLECS Blockset*: Simulinkモデルウィンドウで右クリック -> モデル プロパティ -> コールバック -> InitFcn\*

## 2 モデル

最上位レベルの回路図を [図1](#) に示します。"Plant + Controller" という名前のサブシステムが1つ含まれています。サブシステム内ではプラントとコントローラの両方をモデル化しています。サブシステムにはアナログ測定信号とループバックで接続されたPWM信号があるため、オフラインシミュレーションも実行することができます。フィードバックパスにおける追加の遅延もモデル化されます。

サブシステムは、編集メニュー -> **サブシステム** -> **実行の設定...**からコード生成に対して有効になります。この手順は、RT Box のモデルコードを生成するために必要です。

図1: 昇圧コンバータモデルのトップレベルの回路図

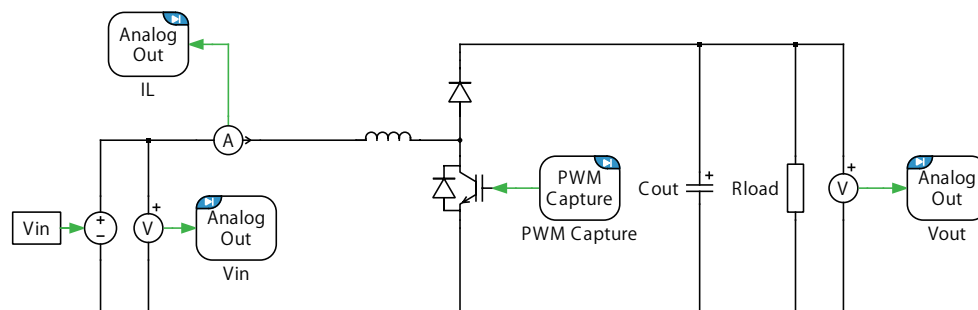


以下のサブセクションでは、コンバータステージとコントローラ部分について個別に説明します。

## 2.1 昇圧コンバータ

昇圧コンバータは、入力DC電圧を出力で、より高いDC電圧に変換するため"ステップアップ"コンバータとも呼ばれます。昇圧コンバータは、PLECSライブラリの電気回路ブロックのNanostepセクションで利用可能な昇圧コンバータコンポーネントを使用してモデル化します。RT Box の Nanostepソルバは、1桁のナノ秒範囲の時間ステップでコンバータをシミュレートします。インダクタは、寄生直列抵抗 $R_L$ を持つエネルギー貯蔵素子を表します。出力では、負荷電圧を安定させるためのフィルタコンポーネントとしてキャパシタを使用します。昇圧コンバータの概要を図2に示します。

図2: 昇圧コンバータのPlantモデル



Plantモデルは、RT Box 1 Target Support Libraryのさまざまなブロックを使用して、RT Box 1の物理的な入出力ポートにアクセスします:

- PWM Captureブロックは、入力されるスイッチング信号をサンプリングします。サンプリング間隔は、RT Box 1およびCEでは7.5ナノ秒、RT Box 2および3では4 ナノ秒で、これはNanostepソルバの実行間隔です。
- Analog Outブロックは、インダクタ電流、入力電圧、出力電圧など、Controllerに必要なアナログ信号を提供します。Analog Outコンポーネントには、RT Boxのアナログ出力の飽和を回避し、接続されたハードウェアやコントローラのI/O要件と一致するように設定できるScaleおよびOffsetパラメータが含まれています。適切なScale係数は、PLECSのオフラインシミュレーションで決定できます。インダクタ電流の場合、閉ループのオフラインシミュレーションでは最大電流値が110Aであることがわかります。ユーザが**Coder Options**ウィンドウの **ターゲット**タブで指定した±5VのAnalog outputvoltage range構成とともに、Analog OutのScale係数 $I_{L, \text{scale}}$ は次のように設定されています:

$$I_{L, \text{scale}} = 4V / I_{L, \text{max}} \approx 0.0364$$

他のアナログ入力および出力チャンネルのScale係数もそれに応じて計算されます。

この仮想プロトタイピングのセットアップでは、どのI/Oチャンネルを構成するかは重要ではありませんが、ループバックケーブルを使用するため、コントローラとプラント間でチャンネルIDを一致させる必要があることに注意してください。

## 設計

連続導通モード(Continuous Conduction Mode: CCM)の昇圧コンバータで、入力電圧 $V_{in}$ と出力電圧 $V_{out}$ が指定されている場合、必要なデューティ比 $D$ は次のように計算できます:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (1)$$

入力インダクタ $L$ と出力キャパシタ $C$ のサイズは、[表2](#)の電流リップルと電圧リップル( $\Delta I_{in, pp}$ と $\Delta V_{out, pp}$ )の仕様に基づいて決定されます。

表2: パラメータセットと設計要件

| $V_{in}$   | $V_{out, nom}$ | $\Delta V_{out, pp}$ | $\Delta I_{in, pp}$ | $P_{nom}$ | $R_L$ | $f_{sw}$ |
|------------|----------------|----------------------|---------------------|-----------|-------|----------|
| 480 – 800V | 950V           | 10V                  | 5A                  | 52kW      | 15mΩ  | 20 kHz   |

スイッチング周期の最初の部分 $t_0 \leq t \leq t_0 + DT$ で、 $V_{in}$ がインダクタンス $L$ に印加されると、電流が増加します。インダクタの状態方程式を使用し、インダクタの直列抵抗を無視すると、次のようになります:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_{in, pp}}{DT_{sw}} = \frac{V_{in}}{L} \Rightarrow L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{in, pp} \cdot f_{sw}}$$

必要なインダクタンス $L$ は、公称出力電圧と最小入力電圧で次のように求められます:

$$L = \frac{V_{in} \cdot (1 - \frac{V_{in}}{V_{out}})}{\Delta I_{in, pp} \cdot f_{sw}} = 2.375 \text{ mH}$$

公称電力では、負荷電流と抵抗値は次のとおりです:

$$I_{load} = \frac{P_{nom}}{V_{out}} = 54.7 \text{ A}$$

$$R_{load} = \frac{V_{out}}{I_{load}} = 17.4 \Omega$$

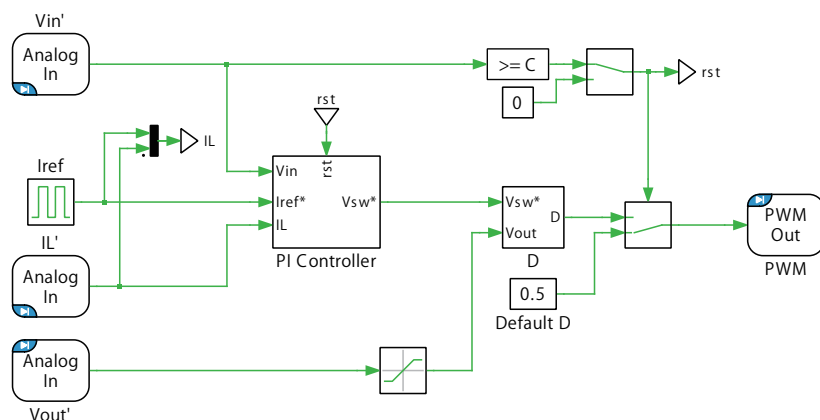
出力キャパシタ $C$ の値はインダクタ $L$ と同様の方法で計算されます:

$$P(s) = \frac{I_L}{V_{RL}} = \frac{1/R_L}{1 + sL/R_L} = \frac{K_1}{1 + sT_1}$$

## 2.2 電流コントローラ

昇圧コンバータのインダクタ電流は、図3に示すように、Controller部に実装された PI Controllerによって制御されます。電流リファレンスの設定値は、50Hzで最小と最大リファレンス値間で切り替わります。PI Controllerのパラメータは、以下で説明するように、Plant伝達関数 $P(s)$ とMOC(Magnitude Optimum Criterion)を使用して計算されます。

図3: 電流コントローラの回路図



"Controller"部には、RT Box 1 Target Support Libraryの次のコンポーネントが含まれています:

- Analog Inブロックは、Plantモデルからのアナログ信号を提供します。入力信号は、Analog Outブロックと同様に、ScaleおよびOffsetできます。このモデルでは、Analog InのScale係数はAnalog OutのScale係数の逆数に設定されます。Controller部の電流値と電圧値は、電力ステージのスケールされていない電圧および電流の測定値に対応します。
- PWM Outブロックは、Digital output channel 0でCarrier type Symmetrical(対称)のPWM 信号を生成するように構成されています。平均インダクタ電流をサンプリングするには、対称PWM方式の場合、ADCのサンプリング ポイントがスイッチング期間の中央にある必要があります。一貫したPoint-on-Waveサンプリングを確実に行うには、ADCとPWMの実行を同期する必要があります。RT Boxでは、ADCサンプリングとPWM更新の両方をモデルステップと同期させることでこれを実現します。このマルチタスクデモでは、より具体的には、PWM Outブロックが存在するタスクステップ、つまり"Controller"タスクのサンプリング時間と同期することを意味します。この動作は、PWM Outブロックの**Synchronization with model step**パラメータをEnabled(有効)にすることによって構成されます。Controllerは単一更新モードで実行され、比較値(CMP)は常に三角波キャリアの最小値で更新されます(PWM Outブロックの**Update**設定を参照)。初期化コマンドでは、PWMキャリア周波数は20kHzに設定されます。

### Plantの伝達関数

PI Controllerのゲインパラメータを設定するには、プラント伝達関数 $P(s)$ が必要です。 $P(s)$ は、 $RL$ 要素 $V_{RL}$ 間の電圧の変化(入力変数)とインダクタ電流 $I_L$ の応答(出力変数)を関連付けます:

$$P(s) = \frac{I_L}{V_{RL}} = \frac{1/R_L}{1 + sL/R_L} = \frac{K_1}{1 + sT_1}$$

ここで、 $K_1 := 1/R_L$ および $T_1 := L/R_L$

## 時間遅延

この昇圧コンバータのリアルタイムモデルの仮想プロトタイピングセットアップには、いくつかの時間遅延が存在します。

- アナログ入力サンプリング
- 制御計算タイムステップ
- PWM出力生成
- PWMキャプチャインタフェース
- プラント計算タイムステップ
- アナログ出力

Plantの計算時間ステップはControllerのステップ(50倍)よりもはるかに小さいため、オフラインモデルではControllerの時間遅延のみが考慮されます。これらは制御計算時間ステップ自体( $T_{sw}$ )と平均PWM出力遅延( $T_{sw}/2$ )であり、合計遅延は $3/2 \cdot T_{sw}$ になります。制御パラメータの計算では、遅延は次の形式の1次ローパスフィルタで近似されます:

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

ここで $T_{\Sigma} = 3/2 \cdot T_{disc, control} = 3/2 \cdot T_{sw}$

## 制御パラメータの計算

PI Controllerの制御パラメータ( $K_i$ および $K_p$ )は、MOCを使用して計算されます。システムの開ループ伝達関数 $H_{OL}(s)$ は、Controller、Plant、および時間遅延からの伝達関数の積によって与えられます:

$$H_{OL}(s) = \frac{1 + sT_n}{sT_i} \cdot \frac{K_i}{1 + sT_1} \cdot \frac{1}{1 + sT_{\Sigma}}$$

ここで、 $K_p = \frac{T_n}{T_i}$ 、 $K_i = \frac{1}{T_i}$ です。制御パラメータ $T_n$ は、プラント伝達関数の極がキャンセルされるように、すなわち $T_n = T_1$ となるように選択されます。残りのパラメータ $T_i$ は閉ループ伝達関数から計算され、低周波数では $H_{CL}(j\omega) \approx 1$ の条件で $T_i = 2K_iT_{\Sigma}$ となります。

## Anti-windupとControllerのリセット

ControllerにはAnti-Windup手法が装備されています。Anti-Windupフィードバックは、以下の補正ゲインを使用します:

$$K_{bc} = \frac{K_i}{K_p}$$

下限飽和レベルは0V(デューティ比1の場合)で、上限飽和レベルは $V_{out}$ (デューティ比0の場合)に設定されます。これは、出力キャパシタが少なくとも $V_{in}$ までプリチャージされていることを前提としていることに注意してください。出力キャパシタがプリチャージされていない起動時には、Controllerの飽和レベルを可変にして、実際の出力電圧に合わせて調整する必要があります。

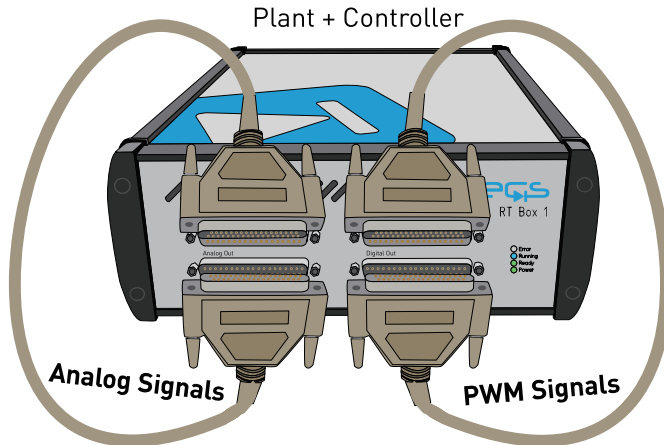
## 3 シミュレーション

このデモモデルは、コンピュータ上のオフラインモードでも、PLECS RT Box上のリアルタイムモードでも実行できます。リアルタイム操作を行うには、図4に示すようにRT Box("Plant + Controller"呼ばれる)をセットアップする必要があります。

1台のRT Boxでリアルタイムモデルを実行するには、以下の手順に従ってください:

- 1本のDB37ケーブルはAnalog OutインタフェースとAnalog Inインタフェースに接続し、もう1本のDB37ケーブルはDigital OutインタフェースとDigital Inインタフェースに接続します(図4を参照)。
- 2 Coderオプション...ウィンドウの**System**のリストから、"Plant + Controller"を選択し、"Plant" RT Boxに**ビルド**します。

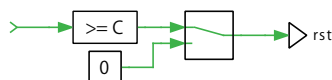
図4: 1台のRT Boxでリアルタイム操作を行うためのハードウェア構成



### 3.1 外部モード

ビルドプロセスが完了したら、"Plant + Controller"サブシステムの**外部モード**タブを開き、**接続**をクリックしてから**自動トリガを有効化**をクリックします。サブシステム内のPLECSスコープは、RT Boxからのリアルタイムデータで更新されるようになります。"Controller"タスクにはさまざまな調整可能なパラメーターがあります:

- 手動切替スイッチ
- "PI Controller"サブシステム内の" $K_p$ " ゲイン(利得)ブロック
- "PI Controller"サブシステム内の" $K_i$ " ゲイン(利得)ブロック
- "Iref" パルス発生器ブロック



**注意** Controllerにリセットオプションが追加されました。上記のように、"Controller"サブシステムの手動切替スイッチをデフォルトのOnの位置から変更すると、切り替えが有効になります。

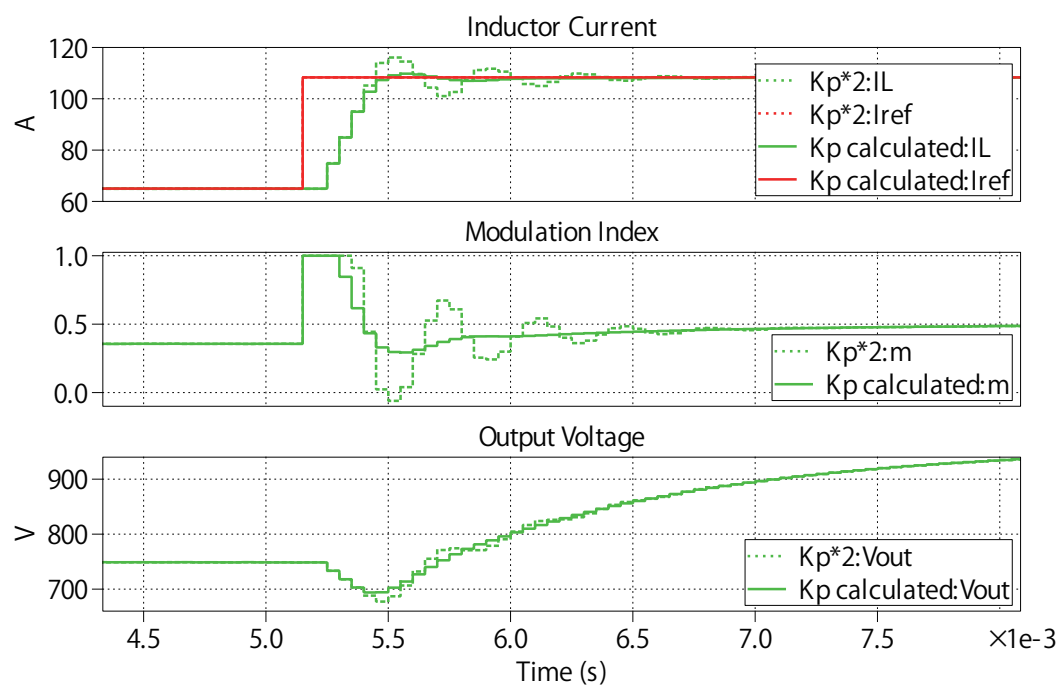
これをOffの位置に変更すると、PI Controllerの積分部分が初期状態にリセットされ、デフォルトのデューティー比0.5がPWMモジュールに適用されます。

"Controller"タスクでは、インダクタ電流リファレンスが最大値(108A)と最小値(65A)間で切り替わっていることに注意してください。電流制御ループのステップ応答を図5に示します。リファレンス電流の最大値と最小値は、制御パラメータ $K_i$ および $K_p$ と同様にオンラインで調整できます。

## 4 まとめ

このRT Boxデモモデルは、連続PI電流コントローラと抵抗負荷を使用した閉ループ制御の昇圧コンバータを示します。デモモデルは、1台のRT Boxでオフラインシミュレーションとリアルタイムの両方で実行できます。プラント部は、 $2\mu s$ の離散化ステップ サイズで実行します。Controllerタスクは、スイッチング周期の長さである $50\mu s$ の離散化ステップ サイズで実行します。

図5: 64Aから108Aまでの電流制御ステップ応答



## 5 参考文献

- [1] J. Allmeling, and N. Felderer, "Sub-cycle average models with integrated diodes for real-time simulation of power converters", *IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, 2017.



#### 改訂履歴:

|                                     |                                                    |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| RT Box Target Support Package 1.8.3 | 初版                                                 |
| RT Box Target Support Package 2.1.7 | ライブラリからPID制御器コンポーネントを使用                            |
| RT Box Target Support Package 3.0.1 | RT Box 1のマルチタスク機能を使用するためにシングルボックスモデルを更新            |
| RT Box Target Support Package 3.0.3 | 2つの別々のRT Boxを持つモデルを削除し、マルチタスク機能を使用して単一のRT Boxのみを保持 |
| RT Box Target Support Package 3.1.1 | Nanostep実装に変更                                      |



#### 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   |



#### アドバンオートメーションへの連絡方法:

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| ☎ +81 3 5282 7047           | Phone |
| +81 3 6285 0250             | Fax   |
| ✉ ADVAN AUTOMATION CO.,LTD  | Mail  |
| 1-9-5 Uchikanda, Chiyoda-ku |       |
| Tokyo, 101-0047             |       |
| Japan                       |       |
| @ info-advan@adv-auto.co.jp | Email |
| https://adv-auto.co.jp/     | Web   |

#### RT Box Demo Model

© 2002–2025 by Plexim GmbH

このマニュアルで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。