



RT Box
DEMO MODEL

Boost Converter

昇圧コンバータ

Last updated in RT Box Target Support Package 2.1.7

1 はじめに

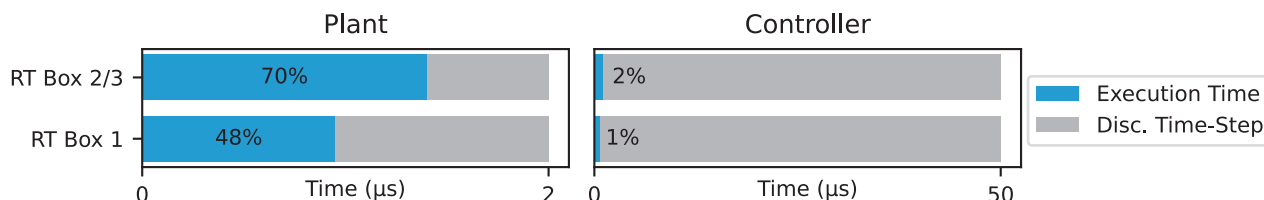
このRT Boxのデモモデルは、抵抗負荷と閉ループ電流制御を備えた昇圧コンバータを特徴としています。公称動作条件は次のとおりです:

- 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、2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台のRT Boxを2本の37ピンD-Subケーブルで、デジタルPWM信号とアナログ電流測定値用に接続します。

昇圧コンバータモデルの各サブシステムに対して選択された離散化ステップサイズと平均実行時間を図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、プラントと制御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PlantまたはControllerモデルを計算するのに実際にかかる時間を表します。

図1: 2台のRT Boxで実行した場合のパフォーマンス概要



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](#) 2台と[PLECS](#)および[PLECS Coder](#)ライセンス1つずつ
- [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
- RT Boxを前面から前面に接続するための37ピンD-Subケーブル2本

このデモモデルは2台のRT Boxアプリケーションを対象としており、1つはPlantを実行し、もう1つはControllerを実行していることに注意してください。このようにして、各リアルタイムターゲットの実行時間が最小限に抑えられます。さらに、セットアップは後でHILテストまたは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が1台しかない場合、1台のRT Boxアプリケーションに適用する対応モデルを確認してください。この場合、前面のAnalog OutインタフェースをAnalog Inインタフェースに接続し、Digital OutインタフェースをDigital Inインタフェースに接続するために、2本の37ピンD-Subケーブルが必要です。

- RT Box 2および3では、このデモではデフォルトでマルチタスク機能が有効になっています。"Controller"部分はタスクフレームブロックで囲まれており、1つのコアで実行されます。回路図上の回路の残りの部分は"Base task"に属し、別のコアで実行されます。このようにして、計算負荷は複数のコアに分割されます。**Coderオプション...**ウィンドウの**タスクタブ**でデフォルト設定をご確認ください。
- RT Box 1の場合、PlantとControllerの両方を同じRT Box 1の1コアで実行するシングルタスクを使用する必要があります。

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:

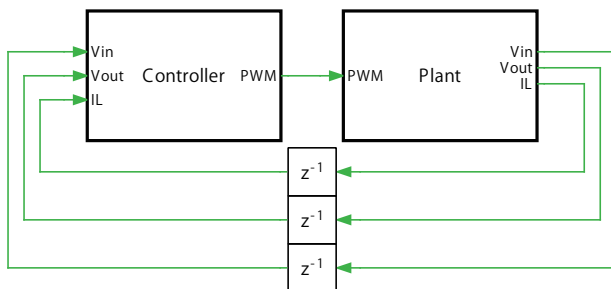
PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

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には、[図2](#)に示すように、ControllerとPlantモデルを表す2つのサブシステムが含まれています。両方のサブシステムは、**編集メニュー**から**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。このステップは、RT Boxのモデルコードを生成するために必要です。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。

図2: 昇圧コンバータモデルのトップレベルの回路図



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。少なくとも2つの半導体スイッチが必要です; このデモモデルではダイオードとIGBTを使用しています。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3](#)に示します。

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:

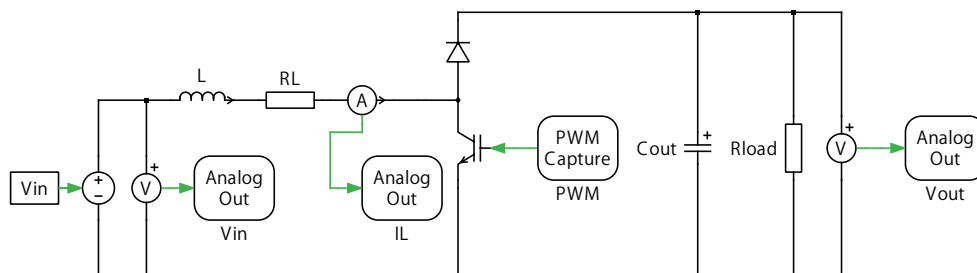
- PWM Captureブロックは、入力スイッチング信号を7.5nsごとにサンプリングします。サンプリングされたスイッチング信号は、PWM入力の高精度な解像度を実現するために、各モデルステップにわたって時間平均化されます。シミュレーションで時間平均PWM入力を利用するために、チョッパ(ローサイドスイッチ)パワー素子モジュールが"sub-cycle average"構成を選択して使用します[\[1\]](#)。
- Analog Outブロックは、インダクタ電流、入力電圧、出力電圧など、Controllerサブシステムに必要なアナログ信号を提供します。Analog Outコンポーネントには、RT 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 $\pm 5V$ のAnalog output voltage 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、"Controller"サブシステムと"Plant"サブシステム間でチャンネルIDを一致させる必要があることに注意してください。

図3: 昇圧コンバータのPlantモデル



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1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1: 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	15m Ω	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:

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

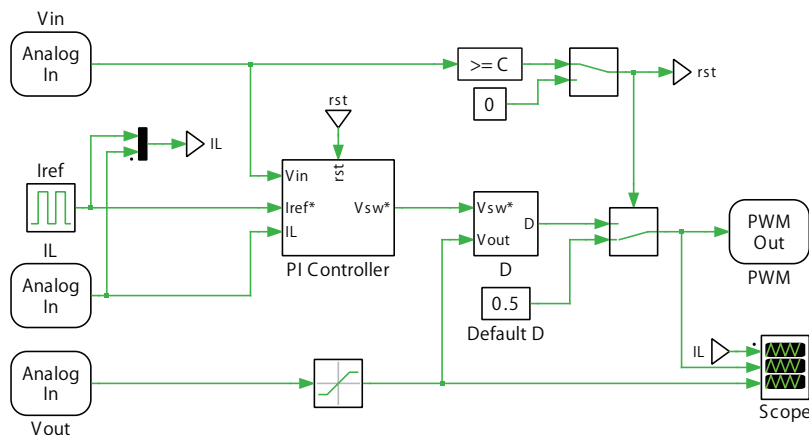
2.2 電流コントローラ

昇圧コンバータのインダクタ電流は、図4に示すように、"Controller"サブシステムに実装された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。

"Controller"サブシステムには、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"サブシステム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"サブシステム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と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周期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。この動作は、PWM Outブロックの**Synchronization with model step**パラメータ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)。PWM Outのキャリア波形は7.5nsごとに更新され、PWM周期の時間分解能が制限されます。この効果はオフラインシミュレーションでモデル化されます。初期化コマンドでは、20kHzに最も近い達成可能なPWMキャリア周波数が計算され、PWM Outのスイッチング周波数に使用されます。結果として得られるPWM周波数の誤差は0.005%未満になります。

図4: 電流コントローラの回路図



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プ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($1/T_{sw}$)と平均PWM出力遅延 $1/(2T_{sw})$ であり、合計遅延は $3/(2T_{sw})$ 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。制御器パラメータ 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 $T_i = 2K_i T_{\Sigma}$ となります。

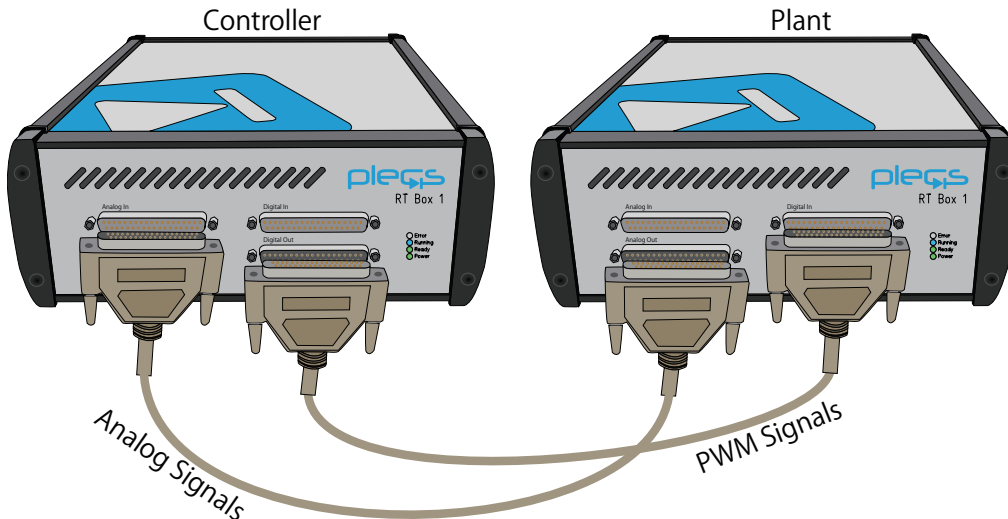
Anti-windupとControllerのリセット

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。

図5: PlantとControllerモデルを実行する2つのRT Boxの相互接続



3 シミュレーション

このデモモデルは、PC上でオフラインモードでも、PLECS RT Box上でリアルタイムでも実行できます。リアルタイム操作には、2本の37ピンD-Subケーブルを使用してデジタルPWM信号とアナログセンサ信号を交換する2台のRT Boxが必要です。2台のBoxの接続を図5に示します。

2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:

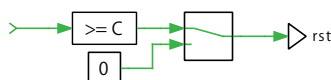
- "Plant" RT BoxのAnalog Outインタフェースを"Controller" RT BoxのAnalog Inインタフェースに接続し、"Plant" RT BoxのDigital Inインタフェースを"Controller" RT BoxのDigital Outインタフェースに接続します (図5のように2本のDB37ケーブルを使用します)。
- **Coderオプション...**ウィンドウの**System**のリストから、"Plant"を選択し、"Plant" RT Boxに**ビルド**します。次に、"Controller"を選択し、"Controller" RT Boxに**ビルド**します。

3.1 外部モード

"Controller"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。このサブシステム内の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サブシステムには、さまざまな調整可能なパラメータがあります:

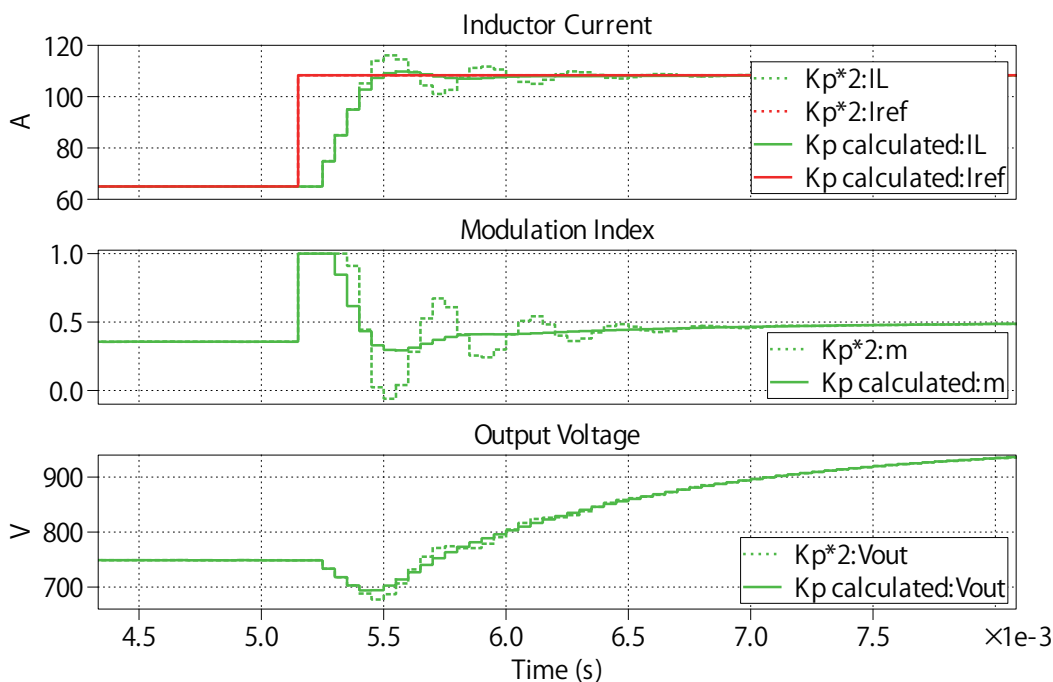
- "Reset Controller" 定数ブロック
- "PI Controller"サブシステム内の"Kp" ゲイン(利得)ブロック
- "PI Controller"サブシステム内の"Ki" ゲイン(利得)ブロック
- "Iref" パルス発生器ブロック

注意 Controllerにリセットオプションが追加されました。以下に示すように、"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"サブシステムでは、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6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。

図6: 64Aから108Aまでの電流制御ステップ応答



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、2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。Controllerサブシステムは、スイッチング周期のサイズである $50 \mu s$ の離散化ステップサイズで1台のRT Box上で実行し、Plantサブシステムは、2台目のRT Box上で $2 \mu s$ の離散化ステップサイズで実行します。

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

plexim

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

Advancing Automation
ADVANTION

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 5282 0808

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

© 2002–2022 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。