

RT Box *DEMO MODEL*

H-Bridge Converter

Hブリッジコンバータ

Last updated in RT Box TSP 3.1.1

1 はじめに

このRT Boxデモモデルは、誘導負荷に電力を供給する電流制御Hブリッジ回路を特徴としています。モデルはプラント部とコントローラ部に分かれています。このプラントには誘導負荷を備えたHブリッジコンバータが含まれており、コントローラは比例積分(PI)電流制御方式を採用しています。次章では、モデルの簡単な説明と、それをシミュレートする手順について説明します。

RT Boxでのリアルタイム実行には、固定ステップソルバを使用してモデルを実行する必要があります。離散化ステップサイズパラメータは、生成したコードの基本サンプル時間を指定し、物理モデルと制御ドメイン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ハードウェア上でPLECSモデルの1つの計算ステップを実行するのに実際にかかる時間を表します。Hブリッジ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。

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	1.9 μ s / 2 μ s	1 μ s / 100 μ s
RT Box 1	1.9 μ s / 2 μ 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
- 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(Core 0)は、サンプリング時間Ts_plantでプラントを"Base task"として実行します。もう1つのコア(Core 1)は、Ts_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、RTBox 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、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Ts_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、Ts_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、以下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:

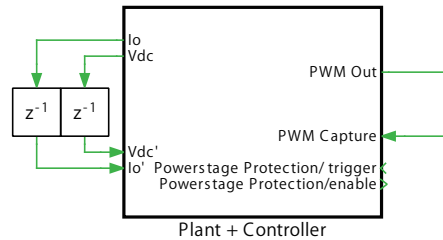
PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

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

デモモデルの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がモデル化されます。サブシステムは、編集ニューから**サブシステム -> 実行の設定...**から**コード生成機能の有効化**にチェックすると、コード生成が有効になります。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。

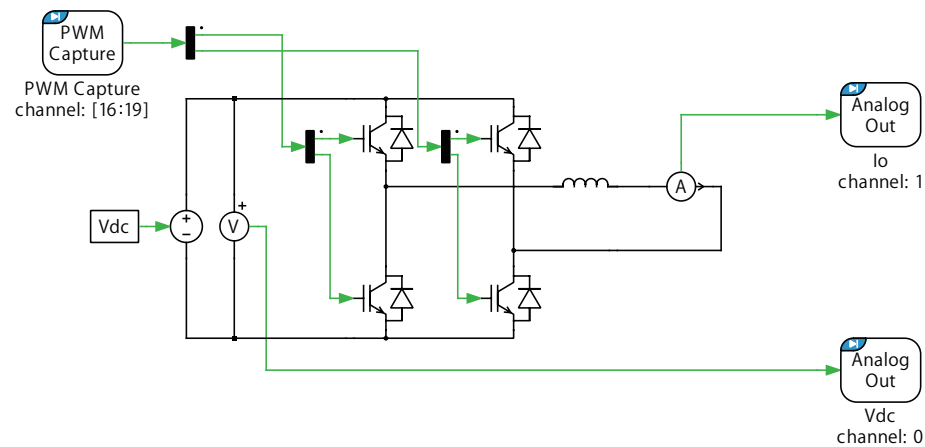
図1: Hブリッジコンバータモデルのトップレベルの回路図



2.1 電源回路

図2に示す電源回路には、 $V_{dc} = 24V$ のDC電源電圧が供給されます。Hブリッジは、PLECSライブラリのNanostepセクションにあるフルブリッジイ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桁ナノ秒レンジの時間ステップでコンバータをシミュレートします。Hブリッジは誘導負荷を供給しています。パルス幅変調(pulse-width modulation: PWM)スイッチング信号は、PLECS RT Boxライブラリの **PWM Capture**ブロックから取得します。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。DC入力電圧と出力インダクタ電流の測定値は、PLECS RT Boxライブラリの **Analog Out**ブロックを介してサブシステムから検出し、エクスポートします。プラントサブシステムの離散化ステップサイズは $2\mu s$ に設定しています。

図2: 誘導負荷を備えたHブリッジの電源回路



アナログ出力のスケーリング

PLECS RT Boxターゲットのアナログ入力および出力電圧の範囲の制限は、**Coderオプション...**ウィンドウの**ターゲットタブ** (Analog input voltage rangeおよびAnalog output voltage range)で -10Vから10Vで設定できます。

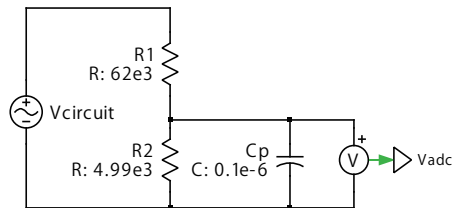
ただし、一般的な HILシミュレーションでは、RT Boxからエクスポートしたアナログ出力値を組み込みコントローラに供給するため、値は、MCUのアナログ/デジタルコンバータ(Analog-to-digital converter: ADC)の電圧要件を満たすように0V～3.3Vの範囲内にスケーリングおよびオフセットされます。

プラントモデルは、外部RL負荷に接続したBOOSTXL-DRV8305EVM BoosterPack [2]の2相で構成する電力回路のハードウェアプロトタイプに基づいています。したがって、入力電圧とシャント電流は、ブースタパックの電圧および電流検出回路に応じて調整されます。

電圧センシング

[2]で説明したものと同様の電圧センシング回路を図3に示します。

図3: 電圧センシングの回路図



以下の式は電圧センシング回路の応答を示しています。キャパシタ C_p を選択してセンシング回路に極を作成し、検出した電圧のスイッチング周波数リップルを減衰させることができます。極周波数は以下 f_p と表記します:

$$\frac{V_{adc}}{V_{circuit}} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2) + sR_1R_2C_p}, \quad C_p = \frac{R_1 + R_2}{2\pi f_p R_1 R_2}$$

電圧は、以下のゲインでスケーリングします:

$$V_m.K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4990}{62000 + 4990}$$

電流センシング

[2]で説明されているように、電流は $Im.K$ のスケーリング係数で検知および増幅し、電流シャントアンプを使用して $Im.O$ のオフセット係数でオフセットします:

$$Im.K = 0.007 * 10$$

$$Im.O = \frac{3.3}{2}$$

2.2 コントローラ

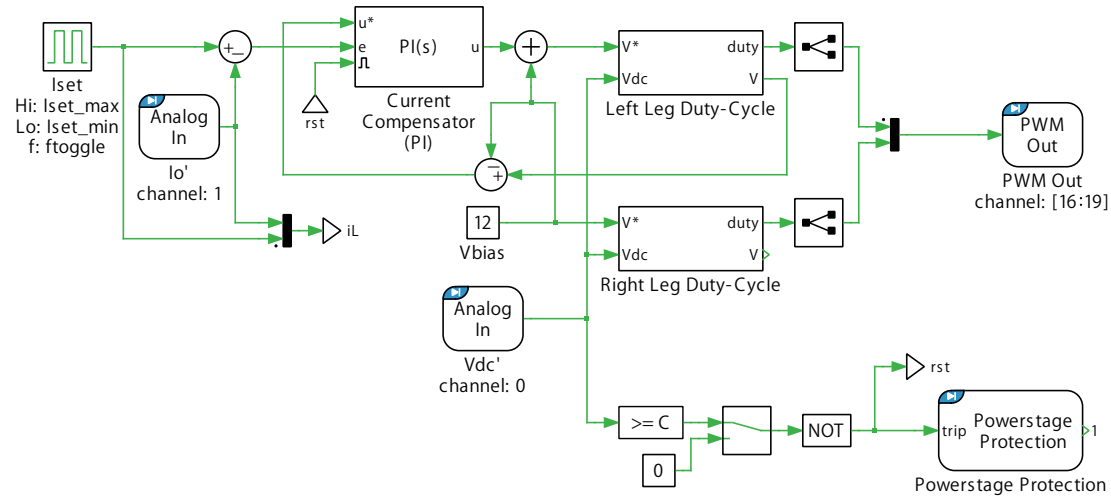
図4に示すコントローラ部分は、PLECS RT BoxコンポーネントライブラリのAnalog Inブロックで検出したインダクタ電流とDC入力電圧値を受信します。これらの値は逆スケーリングされ、プラント部分のAnalog Outブロックに適用するスケーリングは反転します。

"Right Leg Duty-Cycle"サブシステムは、感知した入力電圧 V_{dc} の変動を考慮しながら、右レッグのHブリッジ出力で平均12Vを維持するために必要なデューティ比を決定します。

"Left Leg Duty-Cycle"サブシステムは、比例積分(PI)コントローラに基づいてHブリッジの左レッグの変調指数を決定します。検出したインダクタ電流は、-3Aから3A間に切り替える設定点と比較します。この誤差は、アンチワインドアップロジックを備えたデジタルPIコントローラによる電流補償に使用します。

本章で説明しているコントローラ開発に関連する概念のいくつかは、参考文献[3]に基づいています。

図4: Hブリッジ回路のコントローラ



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 $P(s)$ が必要です。 $P(s)$ は、インダクタ(L)と抵抗器(R)の両端の電圧 V_{RL} (入力変数)の変化と、インダクタ電流 I_L (出力変数)の応答を関連付けます:

$$P(s) = \frac{I_L}{V_{RL}} = \frac{1/R}{1 + sL/R} = \frac{K_1}{1 + sT_1}, \text{ ここで } K_1 := 1/R \text{ and } T_1 := L/R$$

時間定数

複雑なシステムの次数を減らすには、主要時定数と小時間定数を区別すると役立つことがよくあります。通常、主要時定数はプラント伝達関数の一部ですが、制御システムはいくつかの小時間定数(センサ、アクチュエータ、サンプリング、計算遅延、高速内部制御ループなど)を導入します。

最大の小時間定数が最小の主要時定数の少なくとも4分の1である場合、すなわち、

$$\min(T_{\text{dominant}}) \geq 4 \cdot \max(T_{\text{small}})$$

それにより、システムのモデリングにおいて重要な簡略化が可能になり、システム内の全ての小時間定数の合計である一つの小さな等価時定数を定義することができます。

コントローラのサンプリング周波数($1/T_s$)がスイッチング周波数($1/T_{sw}$)と同じ場合、この特定の実装におけるHブリッジコンバータモデルに存在する小時間定数は次のようになります:

- 制御計算の小時間定数 T_{calc} は $1/2 T_{sw}$
- PWM出力生成の小時間定数 T_{pwm} は $1/2 T_{sw}$
- 連続パラメータを離散パラメータに変換する小時間定数 T_{sh} は $1/2 T_{sw}$ (以降で説明)

等価の小時間定数 T_Σ は:

$$T_\Sigma = T_{\text{calc}} + T_{\text{pwm}} + T_{sh}$$

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

制御パラメータの計算

PIコントローラの制御パラメータ(K_p および K_i)は、MOC(Magnitude Optimum Criterion)を使用して計算します。システムの開ループ伝達関数 $H_{OL}(s)$ は、コントローラ、プラント、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。

$$H_{OL}(s) = \frac{1 + sT_n}{sT_i} \cdot \frac{K_1}{1 + sT_1} \cdot \frac{1}{1 + sT_\Sigma}, \quad \text{where } K_p = \frac{T_n}{T_i} \text{ and } K_i = \frac{1}{T_i}$$

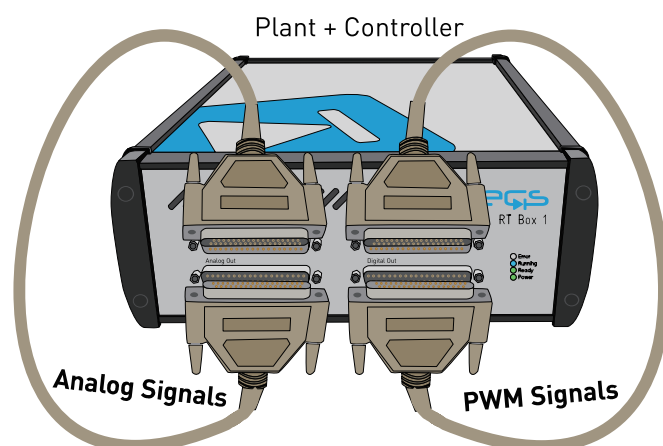
制御器パラメータ T_n は、プラント伝達関数の極がキャンセルされるように(すなわち、 $T_n=T_1$ になるよう)選択されます。極ゼロのキャンセルの後、開ループ伝達関数は2次システムを表します。残りのパラメータ T_1 は、2次システムの減衰係数(ζ)を $1/\sqrt{2}=\zeta$ に設定して計算し、 $T_1=2K_1T_\Sigma$ となります。

"Right Leg Duty-Cycle"サブシステムと"Left Leg Duty-Cycle"サブシステムからの出力は、PLECS RT BoxコンポーネントライブラリのPWM Outブロックに供給されます。

3 シミュレーション

このモデルは、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5](#)に示すように1台のRT Box("Plant"と"Controller"と呼ばれる)をセットアップする必要があります。

図5: 1台のRT Box上でリアルタイム操作を行うためのハードウェア構成



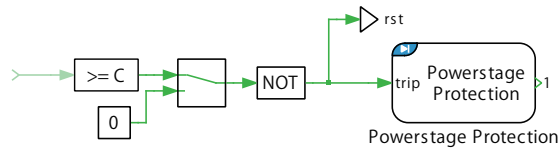
1台のRT Boxでリアルタイムモデルを実行するには、以下の手順に従ってください:

- 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5](#)を参照)。
- Coderオプション...**ウィンドウの**システム**リストから、"Plant+Controller"を選択し、RT Boxに**ビルド**します。
- モデルがアップロードされたら、**Coderオプション...**ウィンドウの**外部モード**タブから、RT Boxに接続し、**自動トリガを有効化**にします。

注意 以下に示すように、"Controller"サブシステムの手動切替スイッチがデフォルトの"on"の位置にある場合、モデルが起動して実行後に切り替えが有効になります。

外部モードでは、これを"off"の位置に変更すると、すべてのPWMが安全状態にトリップし、PIコントローラの積分部分が初期状態にリセットされます。

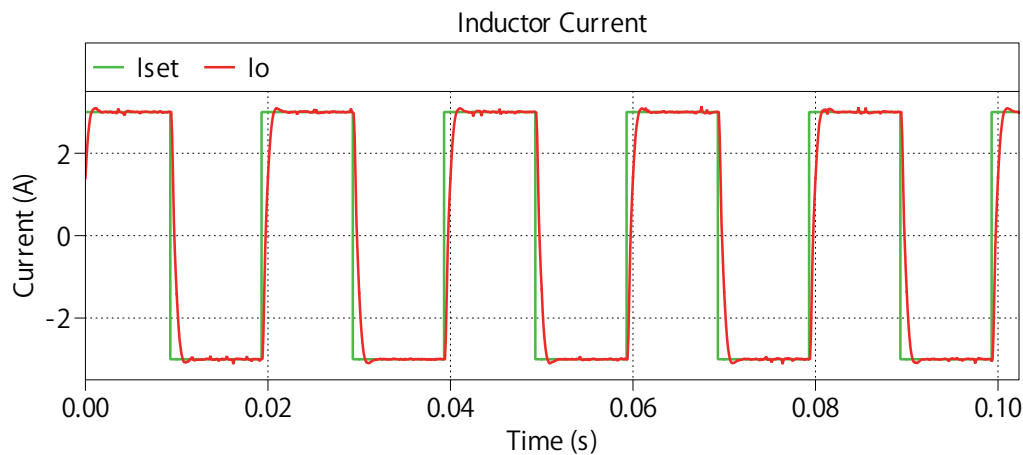
安全状態は、PWM OutブロックのProtectionタブのSafe stateで構成します。



インダクタ電流の測定値は、プラントに接続されたPLECSスコープ、および"Controller"タスク内のPLECSスコープを使用して表示できます。インダクタ電流のリファレンス値は、"Controller"タスクの"Iset" (パルス発生器) コンポーネントを使用して、-3Aと3A間で切り替えます。これらのリファレンス値は、モデルを構築する前に、**Coderオプション...**ウィンドウの**パラメータのインライン化**タブにある"例外"リストに"Iset"コンポーネントが追加されているため、リアルタイムで即座に変更できます。

インダクタ電流のリアルタイムステップ応答を図6に示します。

図6: インダクタ電流のステップ応答をリアルタイムで表示



外部モードタブから、目的の**Trigger channel**のトリガコントロールを設定できます。

4 まとめ

このモデルは、オフラインとリアルタイムの両方のモードで実行できる個別の電流コントローラを備えたHブリッジコンバータを示しています。このモデルは、リアルタイムで変更できる電流コントローラリファレンスを使用した**パラメーターのインライン化**機能も示しています。

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.
- [2] TI DRV8305N 3-Phase Motor Drive BoosterPack Evaluation Module
URL: <http://www.ti.com/tool/BOOSTXL-DRV8305EVM>.
- [3] Conception de systèmes automatiques, Hansruedi Bühler, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne 1988, ISBN 2-88074-149-1

改訂履歴:

RT Box TSP 1.8.3 初版

RT Box TSP 2.1.5 IGBTハーフブリッジのアサーションをオンにし、PWM出力ブロックにデッドタイムを追加

RT Box TSP 2.1.7 コントローラサブシステムを変更し、有効/無効切り替えスキームを追加

RT Box TSP 2.2.1 Powerstage Protectionブロックを使用してスイッチングを有効/無効に設定

RT Box TSP 2.3.4 2つのハーフブリッジパワー素子モジュールの代わりに1つのフルブリッジパワー素子モジュールを使用

RT Box TSP 3.0.1 アナログ出力/入力チャンネル番号を調整して、モデルを RT Box CEでも実行できるようにし、単一ボックスモデルを更新して、RT Box 1のマルチタスク機能を使用するよう更新

RT Box TSP 3.0.3 2台の個別のRT Box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モデルのみを保持

RT Box TSP 3.1.1 Nanostep実装に変更、ドキュメントを更新



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。