

RT Box
DEMO MODEL

Single-Phase Inverter

単相インバータ

Last updated in RT Box TSP 3.1.1

1 はじめに

このデモモデルは、50kWで動作し力率1の単相グリッド接続インバータを特徴としています。このドキュメントでは、PLECSの電気回路ドメインと制御器ドメインを使用した電力ステージと制御の実装について説明します。

モデルは1つのサブシステムで構成しています。サブシステム内では、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。サブシステムは1台のRT Boxにデプロイします。このような"仮想プロトタイピング"構成において、RT Boxは2本の37ピンD-Subケーブルにより前面の接続部で同BoxのPWM信号とアナログ測定をループバックします。仮想プロトタイピングは、ハードウェアインザループ(Hardware-in-the-loop: HIL)またはラビッドコントロールプロトタイピング(Rapid Control Prototyping: RCP)アプリケーション用のリアルタイムモデルを開発する際の最初のステップです。

RT Box上の各コア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表1に示します。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、生成されたコードの基本サンプル時間を指定し、物理モデルと制御領域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つの離散ステップを実行するのにかかる実際の時間を表します。

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	2.1 μ s / 2.5 μ s	1 μ s / 62.5 μ s
RT Box 1	2.2 μ s / 2.5 μ s	N/A

1.1 必要なハードウェアおよびソフトウェア

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):

- 1台のRT Box、PLECSとPLECS Coderライセンスを1つずつ
- RT Box Target Support Package
- RT Box の初期セットアップについては、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 Box2または3の場合、メインCPUコア(Core 0)は、サンプル時間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のサンプル時間と並行して"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、計算処理を異なるコアに分割することで、RT Box 2または3のマルチコア機能が発揮されます。さらに、セットアップは後で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の唯一のCPUコア上でマルチタスク機能を実行することになりますが、プリエンプティブマルチタスク方式になります。この場合、"Base task"は、サンプル時間Ts_plantでプラント計算を最高優先度で実行します。"Controller"タスクは、Ts_controllerのサンプル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します。

Coderオプション...ウィンドウの**タスクタブ**の設定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:

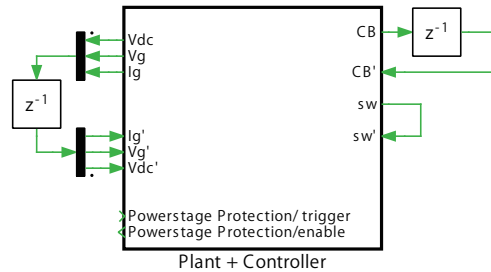
PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

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

最上位レベルの回路図には、[図1](#)に示すように、プラント部とコントローラ部の両方を含む1つのサブシステムで構成しています。サブシステムのコード生成を有効にするには、**編集メニュー -> サブシステム -> 実行の設定...**から**コード生成の有効化**にチェックします。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。フィードバックパス内に追加した遅延もモデル化します。

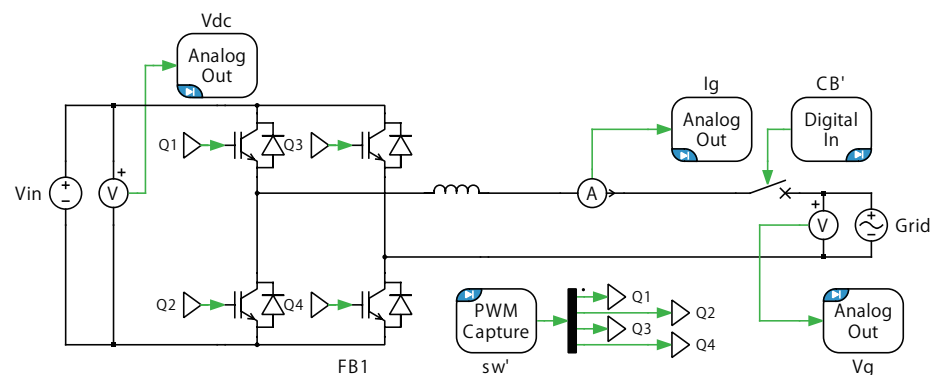
図1: 単相インバータモデルのトップレベル回路図



2.1 電源回路

電源回路には、 $V_{dc} = 750V$ のDC電圧源から電力が供給されます。Hブリッジは、PLECSライブラリのNanostepセクションから利用可能なフルブリッジインバータコンポーネントを使用して実装しています。RT BoxのNanostepソルバは、1桁ナノ秒単位の時間ステップでコンバータをシミュレートします。スイッチング信号 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 は、PLECS RT Box Target SupportライブラリのPWM Captureブロックでキャプチャします。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。Hブリッジの出力は、フィルタインダクタとサーキットブレーカを介して電源のGridに接続します。低電圧の電源Gridは、 $V_{rms}=220V$ 、 $f=50Hz$ の理想的なAC電圧源でモデル化しています。DC電圧、グリッド電圧、グリッド電流の測定値は、PLECS RT Box Target SupportライブラリのAnalog Outコンポーネントを介してサブシステムから出力されます。ScaleとOffsetパラメータは、アナログ出力電圧を $[-4V, +4 V]$ の範囲内に制限するように構成しています。

図2: グリッド接続インバータの電源回路

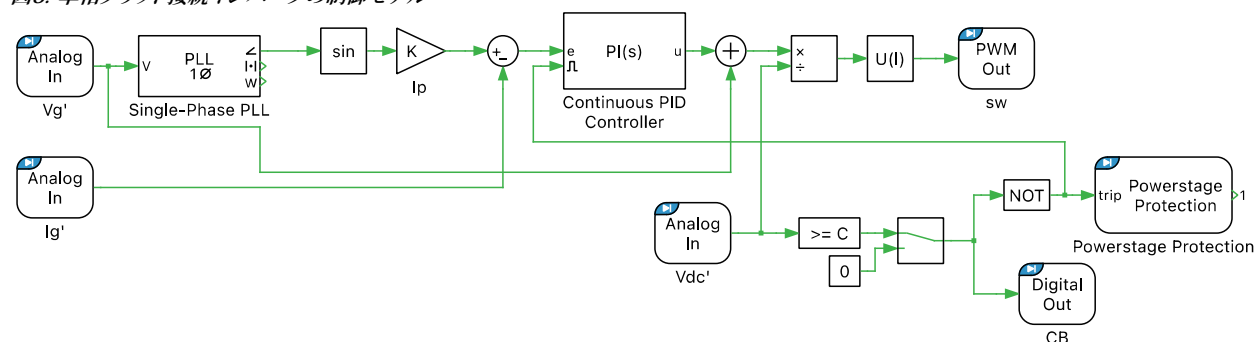


2.2 コントローラ

閉ループコントローラは、ライン電流がグリッド電圧と同位相になるように調整します。

パワーグリッドの電気角と周波数を検出するために、直交信号発生器に基づく位相ロック ループ(Phase-Locked Loop: PLL)が組み込まれています。このPLL構造の詳細については[1]で紹介しています。

図3: 単相グリッド接続インバータの制御モデル



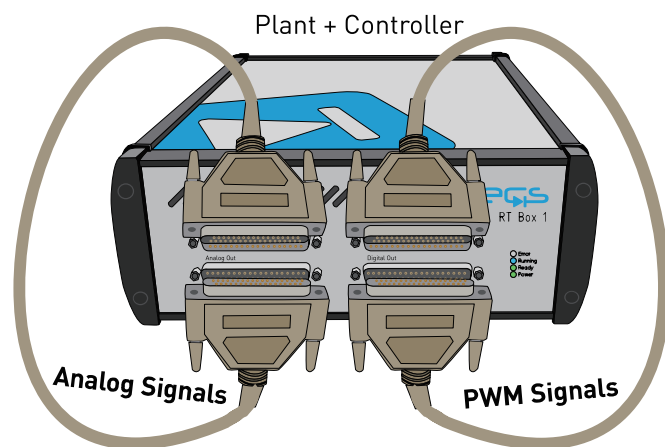
PLLの位相角出力は、1つの三角関数ブロックと比例ゲイン I_p を介してグリッド電流のリファレンス信号に変換されます。 I_p は、目的のグリッド電流の振幅を示します。電流コントローラの内部構造は、比例積分(PI)レギュレータによって実現します。PIレギュレータのパラメータ比例ゲイン K_p と積分ゲイン K_i は、MOC(Magnitude Optimum Criterion)を使用して設定します。パラメータ計算の詳細については、RT Box Target Support Packageの"Boost Converter(昇圧コンバータ)"デモモデルを参照してください。さらに、アンチwindアップ手法が組み込まれており、ゲイン K_{bc} は $K_{bc}=K_i/K_p$ によって決定されます。

レギュレータの出力では、過渡応答を改善するためにグリッド電圧のフィードフォワードを追加しています。その後、信号はDC電圧で除算され、変調指数としてPWM Outブロックに送られます。このモデルがリアルタイムターゲットにプログラムされている場合、PWM Outブロックはコントローラの実行ステップサイズと同期するように構成されます。

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4に示すように1台のRT Boxで"Plant + Controller"をセットアップする必要があります。

図4: 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ケーブルを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ケーブルを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)。

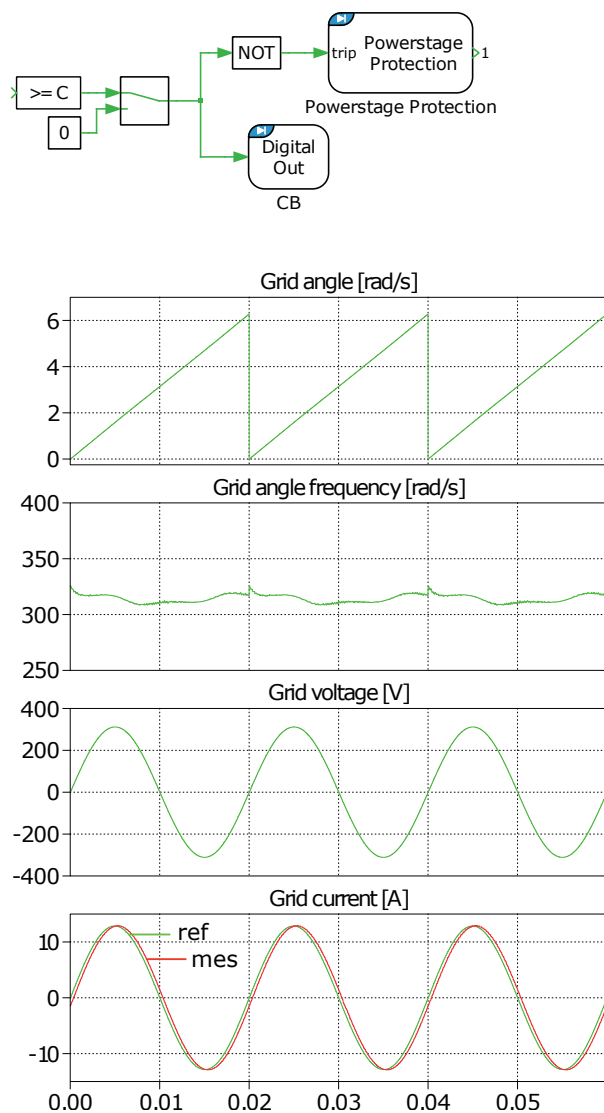
- 2 **Coderオプション...**ウィンドウの**システム**リストから、"Plant + Controller"サブシステムを選択し、RT Boxに**ビルド**します。
- 3 モデルをアップロードしたら、**Coder オプション...**ウィンドウの**外部モード**タブから、RT Boxに**接続**し、**自動トリガを有効化**にチェックします。

注意 以下に示すように、"Controller"タスクの手動切替スイッチは、デフォルトの"on"の位置にあり、モデルが起動して実行されると、切り替えが有効になり、グリッド側のサーキットブレーカに接続されます。

外部モードでは、"off"の位置に変更すると、すべてのPWMが安全状態になり、PIコントローラの積分部分が初期状態にリセットされ、グリッド側のサーキットブレーカも切断されます。

PWMの安全状態は、PWM OutブロックのProtectionタブで構成します。

図5: RT Boxの"Controller"タスクでPIレギュレータを使用して取得したリアルタイム測定と中間信号



外部モードでのリアルタイム操作中、PLECSスコープ "Elec"を使用して、Box上の測定値と中間信号を観察できます。グリッド位相角、PLLが検出した角周波数、および測定したグリッド電圧と電流を図5に示します。下部のグラフでは、リファレンス電流と測定電流を比較しています。グリッド電流の基準振幅は、"Controller"タスクのゲイン(利得)ブロック"Ip"を設定することで変更できます。

4 まとめ

このモデルは、HILテストとRCP向けにオフラインシミュレーションとリアルタイム動作の両方で実行できる単相グリッド接続インバータモデルを示しています。

5 参考文献

- [1] R. Teodorescu, M. Liserre and P. Rodriguez, “Grid converters for photovoltaic and wind power systems”, IEEE, Wiley, 2011
- [2] J. Allmeling and N. Felderer, “Sub-cycle average models with integrated diodes for real-time simulation of power converters,” 2017, 10.1109/SPEC.2017.8333566

改訂履歴:

RT Box TSP 1.8.3 初版

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

RT Box TSP 2.1.7 ライブラリから単相PLLおよびPID制御器コンポーネントを使用

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 3.0.1 RT Box 1のマルチタスク機能を使用するために1台のBoxモデルを更新

RT Box TSP 3.0.3 2台の別々のRT Boxを持つモデルを削除し、マルチタスク機能を使用した1台のRT Boxモデルのみを保持

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



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。