

Embedded Code Generation *DEMO MODEL*

Single-Phase PV Inverter

単相PVインバータ

- TI C2000 MCU用の組み込みコード生成による共振コンバータの制御 -

Last updated in C2000 TSP 1.9.1

1 はじめに

単相PVインバータは、一般的に住宅の屋上太陽光発電システム使用されます。このデモでは、単相、単ステージ、グリッド接続PVインバータをモデル化します。PVシステムには、[2.1](#)で説明しているように、ピーク出力電力が3kWの高精度PVistringモデルが含まれています。

制御システムは、最大電力点(Maximum Power Point: MPP)コントローラ、電圧コントローラ、および電流コントローラの3つの制御ループで構成されます。外側の制御ループはMPPコントローラで、与えられた日射レベルに対してPVstringから最大電力が抽出されることを保証するMPPコントローラです。このモデルは、[2.2](#)で説明しているように、マルチタスク機能を使用します。

さらに、このデモモデルでは、Texas Instruments (TI) C2000マイクロコントローラ(Microcontrollers: MCU)を使用したPLECS Embedded Coderの一般的なワークフローについて説明します。PLECS RT Boxと組み合わせることで、MCUの性能を直接検証できます。[第3章](#)では、リアルタイムシミュレーションの実行方法について説明します。

モデルは"Plant"と"Controller"と呼ばれる2つの異なるサブシステムに分かれています。各サブシステムは個別のリアルタイムターゲットにデプロイされます。Controllerサブシステムの制御ロジックを構築し、TI C2000 MCUに書き込みます。Plantサブシステムは、生成された組み込みコードのハードウェアインザループ(Hardware-In-the-Loop: HIL)テスト用にPLECS RT Boxにデプロイします。次章以降では、モデルの簡単な説明と、それをシミュレートする方法について説明します。

注意 このモデルには、以下の方法で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:

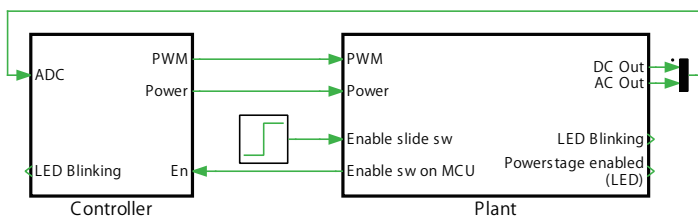
PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

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、ControllerとPlantモデルを表す2つのサブシステムで構成しています。両方のサブシステムは、**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、PLECS Coderからサブシステムのモデルコードを生成するために必要です。

図1: PlantとControllerサブシステムのトップレベルの回路図



2.1 電源回路

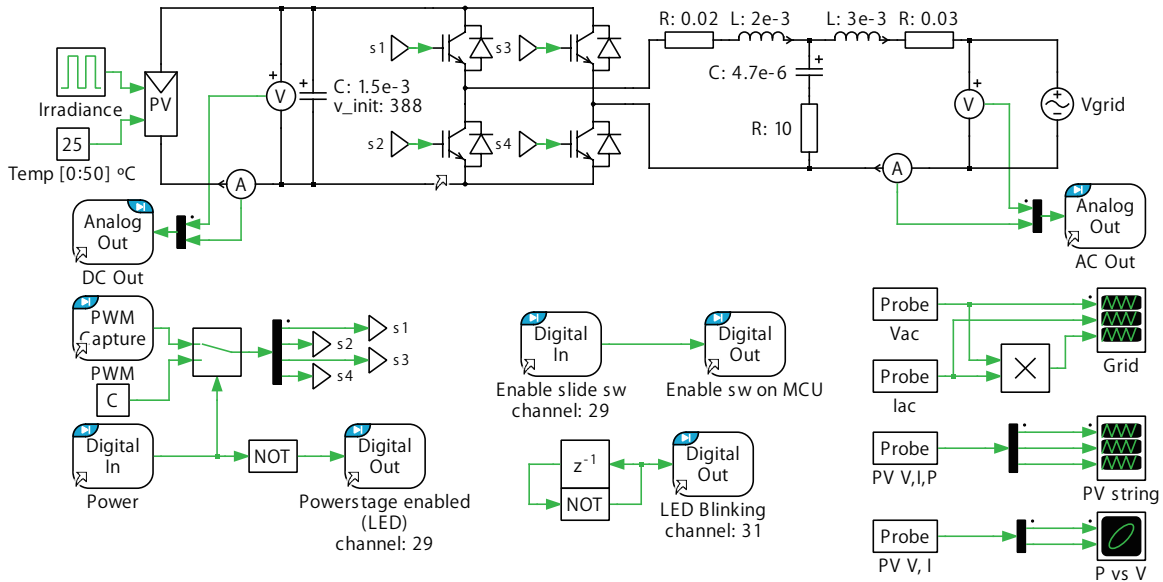
[図2](#)に示す発電システムは、約380VDCの定常出力を提供する太陽電池アレイ、IGBTベースのフルブリッジインバータ、および230Vrms、50Hzの単相電源に接続されたLCL出力フィルタで構成されています。PVアレイの日射量は、2秒ごとに公称値の1kWhr/m²と低減された放射レベル0.7kWhr/m²間で切り替わります。

フルブリッジは、フルブリッジ(直列接続)パワー素子モジュールコンポーネントを使用して実装します。パルス幅変調 (Pulse Width Modulation: PWM) スwitching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。パワー

Single-Phase PV Inverter

素子モジュールのコンポーネントとPWM信号のサブサイクル平均化の詳細については、[\[1\]](#)で説明しています。DC入力、AC出力電圧および電流測定は、PLECS RT BoxライブラリのAnalog Outブロックに接続されます。RT BoxのAnalog Outピンは組み込みコントローラに接続されています。したがって、電圧と電流の測定値は、MCUのアナログ/デジタルコンバータ(Analog-to-Digital Converter: ADC)の電圧制限を満たすように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。Plantサブシステムの離散化ステップサイズは2.5 μ sに設定されています。

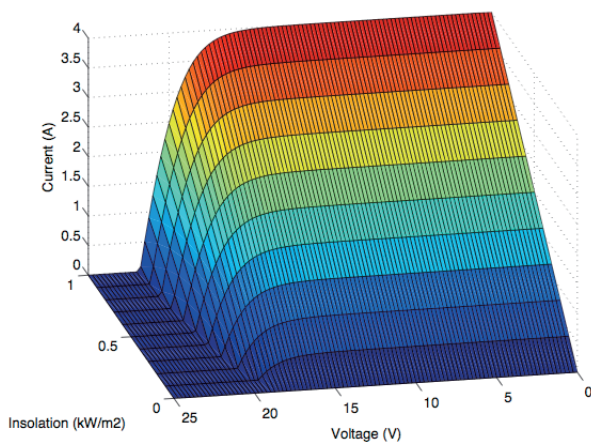
図2: 単相PVインバータの電源回路



PVストリングモデル

PVストリングコンポーネントは、日射量(太陽光の強さ)、出力電圧、温度などの可変入力を使用してIV特性を正確にモデル化する非線形電流源に基づいています。さらに、さまざまな直列および並列構成で接続でき、オフラインおよびグリッド接続システムの両方のDC電源として使用できます。このモデルは精度を高めるためにショックレーダイオード方程式に基づいており、PVインバータと電源モジュール間の相互作用を調べるために使用できます。PVモデルの標準的な出力電流特性を[図3](#)に示します。

図3: 25°CにおけるBP365 PVモジュールモデルの標準的な出力電流特性



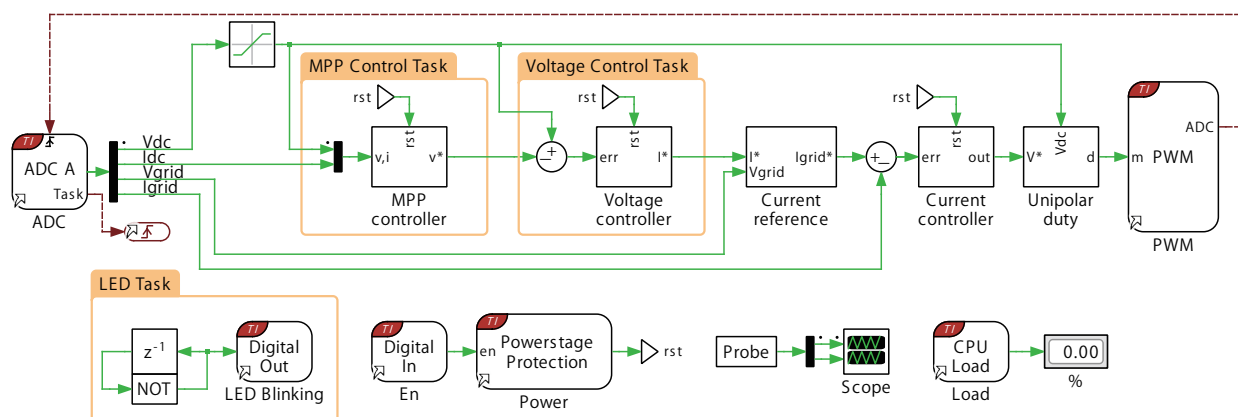
この例では、日射量と温度に依存するデータがBP365 65Wソーラーモジュールにマッピングされており、アレイは各ストリング

に接続された22個のモジュールで構成され、2つのストリングが並列に接続されています。電流の表面データは.matファイルに保存され、0~1kWhr/m²の日射量範囲、0~25Vの電圧値、および 0、25、50°Cの3つの温度における特性のIV曲線の情報が含まれています。

2.2 Controller

Controllerサブシステムを図4に示します。制御システムは、MPP、電圧、および電流コントローラの3つの制御ループで構成されます。外側の制御ループはMPPコントローラで、与えられた日射レベルに対してPVストリングから最大電力が抽出されることを保証します。これを行うために、C言語入力ブロックを使用して実装されたdP/dV(増分コンダクタンス)制御と呼ばれるMPPアルゴリズムを使用して、最適なPV端子電圧を計算します。電圧制御ループは、Type-2コントローラに基づくグリッドに注入される電流の量を制御することで、PV電圧をこの最適レベルに調整します。最も内側の制御ループである電流コントローラは、必要な電流がグリッドに注入されるようにインバータの変調指数を設定します。電流コントローラは、トラッキングエラーが存在しないことを保証するために、共振周波数が50HzのPRコントローラに基づいています。最後に、互いに180度位相シフトされた2つの12.5kHz PWM発生器を使用して、ユニポーラ変調方式がデプロイされます。これにより、コンバータ出力のスイッチング周波数における高調波成分がキャンセルされます。図2に示すように、LCL出力フィルタには、電流コントローラの安定した動作を確保するためのダンピング抵抗が含まれています。

図4: 単相PVインバータのControllerサブシステムの回路図



マルチタスクコード

PLECS CoderとTI C2000 Target Support Packageを使用すると、ユーザはTI C2000ファミリのMCU用のマルチタスクコードを生成できます。マルチタスクコードは、さまざまな時間スケールでダイナミクスを使用して複数のシステム出力を制御するための処理能力を解放します。このモデルには、高速の内側電流制御ループ、それに続くPVストリングDC電圧制御ループ、およびより低速の外側MPPループを備えたカスケード制御方式を採用しています。マルチタスクコードは、この種の制御方式に適しています。

マルチタスクコードの生成は、**Coder -> Coderオプション...**ダイアログの**タスクタブ**から構成します。**タスクモード**をマルチタスクに変更すると、各タスクのサンプリング時間を構成できます。基本サンプリング時間は常に、定義された最小の**サンプリング時間**と等しくなります。優先度の低いタスクの**サンプリング時間**設定は、基本サンプリング時間の整数倍である必要があります。異なる速度で実行する、低速で優先度の低いタスクを最大15個指定できるため、アプリケーション内で最も高速で優先度の高いタスクのプロセッサ時間を確保できます。詳細については、PLECS User Manual [2]の"コード生成"セクションを参照してください。

PLECS回路図内のブロックは、**タスクライブラリコンポーネント**を使用して、優先度の低いタスクに割り当てられます。このモデルでは、図4に示すように、基本タスクに加えて3つの低優先度タスクが定義されています。以下の表は、Base Taskに対する

優先度の低いタスクのサンプリング時間を示しています。この場合、Base Task (fc)の実行速度は25kHz、つまりスイッチング周波数(fs) 12.5kHzの2倍になります。

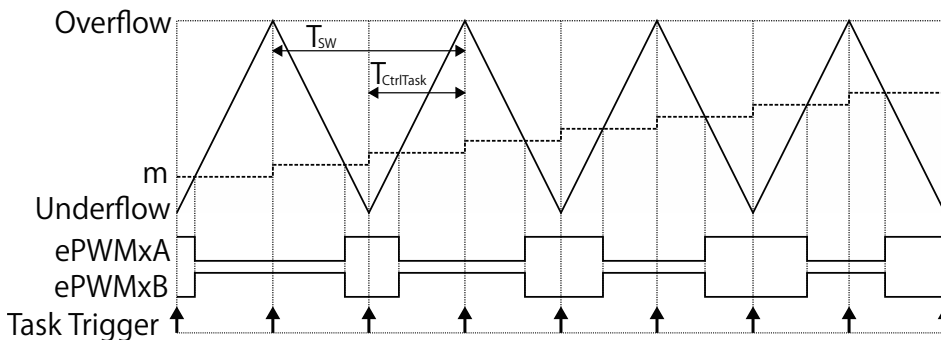
Task name	Sample time
Base Task	1/fc
Voltage Control Task	10/fc
MPP Control Task	55/fc
LED task	2500/fc

TI C2000 Targetライブラリコンポーネントの構成

図4の回路図には、TI C2000 Targetライブラリのいくつかのコンポーネントが含まれています。

- PWM** ゲート信号はPWMコンポーネントによって生成されます。ゲート信号を生成するためのデューティ比は[0, 1]の範囲です。**Carrier type**、**Carrier frequency**、**Dead time**パラメータは、PWMのブロックパラメータウィンドウの**全般**タブから設定できます。ePWMモジュールへの入力に補完的なPWMペアを生成することに注意してください。つまり、デッドタイムを除いて、ePWMxAとePWMxBは反対の極性になります。
- ADC** DC入力およびAC出力電圧と電流の測定は、TI C2000 TargetコンポーネントライブラリのADCブロックからモデル環境に導入します。検出したアナログ電圧を制御アルゴリズムに使用する物理単位の値に変換するために、スケーリング係数とオフセット係数がADCブロックのパラメータウィンドウから各チャンネルに提供されます。**ADC unit**と**Analog input channel**パラメータは、さまざまなMCUの使用可能なリソースに応じて変更できます。
- 制御タスクトリガ** このモデルでは、PWM発生器、ADC、および制御タスクトリガ間のトリガー信号を接続することによって、組み込みアプリケーションの割り込みシーケンスが明示的に定義されます。トリガ信号は、図4のように赤い破線で表示されます。PWMブロックのパラメータウィンドウの**Events**タブで、**ADC Trigger**パラメータをUnderflow and Overflowに設定します。これは、制御タスクがPWM周期ごとに2回トリガされることを意味します。図5は、対応するPWMキャリア、タスクトリガ、およびPWM出力を示しています。

図5: PWM周波数のPWMキャリアとタスク割り込みを制御タスク周波数の半分に設定



- Powerstage Protection** 実行中にPWM信号を有効または無効にするには、RT Box LaunchPad Interfaceボード上の DIP スイッチ"DI-29"を使用します。この入力信号"DI-29"は、"Plant"サブシステムの"Enable slide sw"というラベルのDigital inブロックに接続され、その後、RT Box LaunchPad Interfaceボードを介して"Controller"サブシステムのPowerstage Protectionブロックの入力としてルーティングされます。Powerstage Protectionブロックは、ターゲットMCU上のすべてのPWM出力を有効または無効にする安全メカニズムであるインターロックを実装します。ロジックがLowからHighに遷移

するとPWM出力が有効になり、HighからLowに遷移すると無効化します。詳細については、このブロックのヘルプを参照してください。

パワー ステージが有効になると、Powerstage Protectionブロックの**Powerstage enable GPIO number**で構成されたデジタル出力が切り替わります。この信号は、Plant"サブシステムの"Power"というラベルのDigital Inブロックに接続されます。これにより、キャプチャされたPWM信号が、ゲートドライバインネーブル回路をモデル化するインバータブリッジのゲートに渡されるようになります。LaunchPad Interfaceボード上の赤色LED "DO-29"が点灯し、スイッチング信号がゲートドライバに接続されていることが視覚的に示されます。

3 シミュレーション

このデモモデルのシミュレーションをコンピュータ上でオフラインモードで実行するだけでなく、"Controller"サブシステムをTI C2000 MCUのターゲット固有のコードに直接変換することもできます。すべてのペリフェラルブロック(ADC、PWMなど)のデフォルトのI/O構成は、TI 280039C[4]、TI280049C[5]、TI28069[6]、TI28379D[8]、TI28P550SJ9[9]、TI28P650DK9[10] LaunchPads 28388D [13] controlCARDをサポートしています。

注意 TI 28P550SJ9 LaunchPadの場合、スイッチS6を"BP"に設定する必要があります。

さらに、デモモデルでは、TI 28377S [7] LaunchPad、TI 280039C [11]、TI 28379D [12] controlCARDのコード生成が可能です。この設定を行うには、**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ー...** -> **初期化タブ**から**モデル初期化コマンド** ウィンドウに移動し、board_typeの値を変更して、目的のボードを選択します。また、**Coderオプションウィンドウ**で対応する**ターゲット**と**Board**タイプを適切に構成する必要があります。さらに、PlantのモデルをPLECS RT Boxにデプロイして、生成されたコードのHILテストを行うこともできます。

3.1 TI C2000 Targetの構成

以下の手順に従って、"Controller"サブシステムをTI MCUにアップロードします:

- USBケーブルでMCUをホストコンピュータに接続します。
- **Coder** -> **Coderオプション...** ウィンドウの**システム**リストから、"Controller"を選択します。
- 次に、**ターゲット**タブで、ドロップダウンメニューから適切なターゲットを選択します。そして、**General**サブタブで、目的の**Build type**を選択します。
- そして、PLECSからMCUを直接Build and programするには、**Build configuration**でFlash or Run from RAMを選択して、MCUフラッシュメモリまたはRAMにプログラムします。そして**Board type**でLaunchPadを選択して、**ビルド**をクリックします。

正しくプログラムされていれば、LED "D9"(またはモデル初期化コマンドにリストされているGPIO "DO_DSP_LED"に対応するLED)が点滅します。

Code Composer Studio(CCS)に精通している上級ユーザ向けには、Generate code into CCS projectオプションがあります。CCSプロジェクトから適切なcgフォルダを探し(手順については[3]を参照)、そのパスを**CCS project directory**フィールドに入力して、**ビルド**をクリックします。"Controller"サブシステムのコードが自動的に生成されます。通常のCCSプロジェクトとしてプロジェクトのビルドとデバッグに進みます。

注意 RT Box LaunchPad Interfaceボードを使用する場合は、シミュレーション中はRSTジャンパが開いていることを確認してください。

3.2 PLECS RT Boxの構成

プログラムしたMCUで実際のパワーステージを制御する前に、PLECS RT Boxでコントローラの動作を確認し、HILテストを実行することを強くお勧めします。一般的なハードウェア構成を図6に示します。ここでは、評価キットであるTI 28379D LaunchPad(赤色のボード)が、RT Box LaunchPad Interface(緑色のボード)を介して RT Box に接続されています。

図6: HIL検証のハードウェアセットアップ



RT Box でリアルタイム モデルを実行するには、以下の手順に従います。RT Boxにビルドする前に、3.1に示すように、適切なTI MCU上に"Controller"サブシステムが構築済みであることを確認してください。

- **Coder -> Coderオプション...**ウィンドウの**システム**リストから、"Plant"を選択します。**ターゲット**タブをクリックし、ターゲットデバイスを選択します。**ビルド**をクリックして、モデルをターゲットのRT Boxにデプロイします。
- モデルが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**にチェックして、テスト結果をリアルタイムで観察します。

正しくプログラムされていれば、RT Box LaunchPad Interfaceボードの"DO-31"に対応するLEDが点滅します。

3.3 Controllerの起動と外部モードによる接続

TI C2000 MCUとPLECS RT Boxの両方をプログラムすると、RT Box LaunchPad Interfaceボード上のスイッチを使用してControllerとPWM信号を有効にし、MCUとRT Boxに接続してリアルタイム波形を観察できるようになります。

MCU を有効にするには、2.2の最後で説明しているように、RT Box LaunchPad Interfaceボード上のスイッチ"DI-29"をLowからHighに切り替えます。パワーステージが有効になると、LaunchPad Interfaceボードの"DO-29"に対応するLEDが点灯します。"Plant"サブシステムのPLECSスコープ内のリアルタイム波形を観察します。

注意 この段階で、RT Box LaunchPad Interfaceボード上の"DO-29"に対応するLEDがオンになっていることを確認します。

RT Box LaunchPad Interfaceボード上のスイッチ"DI-29"をHighからLowに切り替えると、すべてのゲート信号が無効になります。LaunchPad Interfaceボード上の"DO-29" LEDはオフになります。"DI-29"をHighに戻すと、PWM出力が再び有効になり、"DO-29" LEDが点灯します。

MCU の制御信号を観察するには、以下の手順に従ってTI MCUの外部モードに接続します。

- まず、PLECS RT Boxの**外部モード**から"Plant"サブシステムを切断します(接続している場合)。
- そして、**Coder** -> **Coder オプション...**ウィンドウ左側の**システム**リストから、"Controller"を選択します。
- 次に、**外部モード**タブから適切な**ターゲットデバイス**を選択し、**接続**をクリックします。
- そして、**自動トリガを有効化**にチェックして、"Controller"サブシステムのPLECSスコープでテスト結果を確認します。

同様に、[3.2](#)の手順に従ってRT Boxの外部モードに接続します。[図7](#)のシミュレーション結果は、2秒間で日射量が $1\text{kWhr}/\text{m}^2$ から $0.7\text{kWhr}/\text{m}^2$ に段階的に変化したときのグリッドのオフラインとリアルタイム結果を比較したものです。この図は、主電源電圧の正弦波、注入された正弦波グリッド電流、および結果としてグリッドに供給する電力を示します。[図8](#)は、4秒間にPVアレイから発生した電圧、電流、電力を示しています。オフラインモデルの起動時における初期の過渡状態の後、オフラインとリアルタイムの結果はほぼ一致します。XYプロットは、電力対電圧特性と、アレイからの出力電力に対するMPPコントローラの影響を示します。

日射量とPVパネル温度の値は、モデルを構築する前に、これらのコンポーネントが **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。

図7: PLECS RT Box 1を使用したリアルタイムグリッド測定

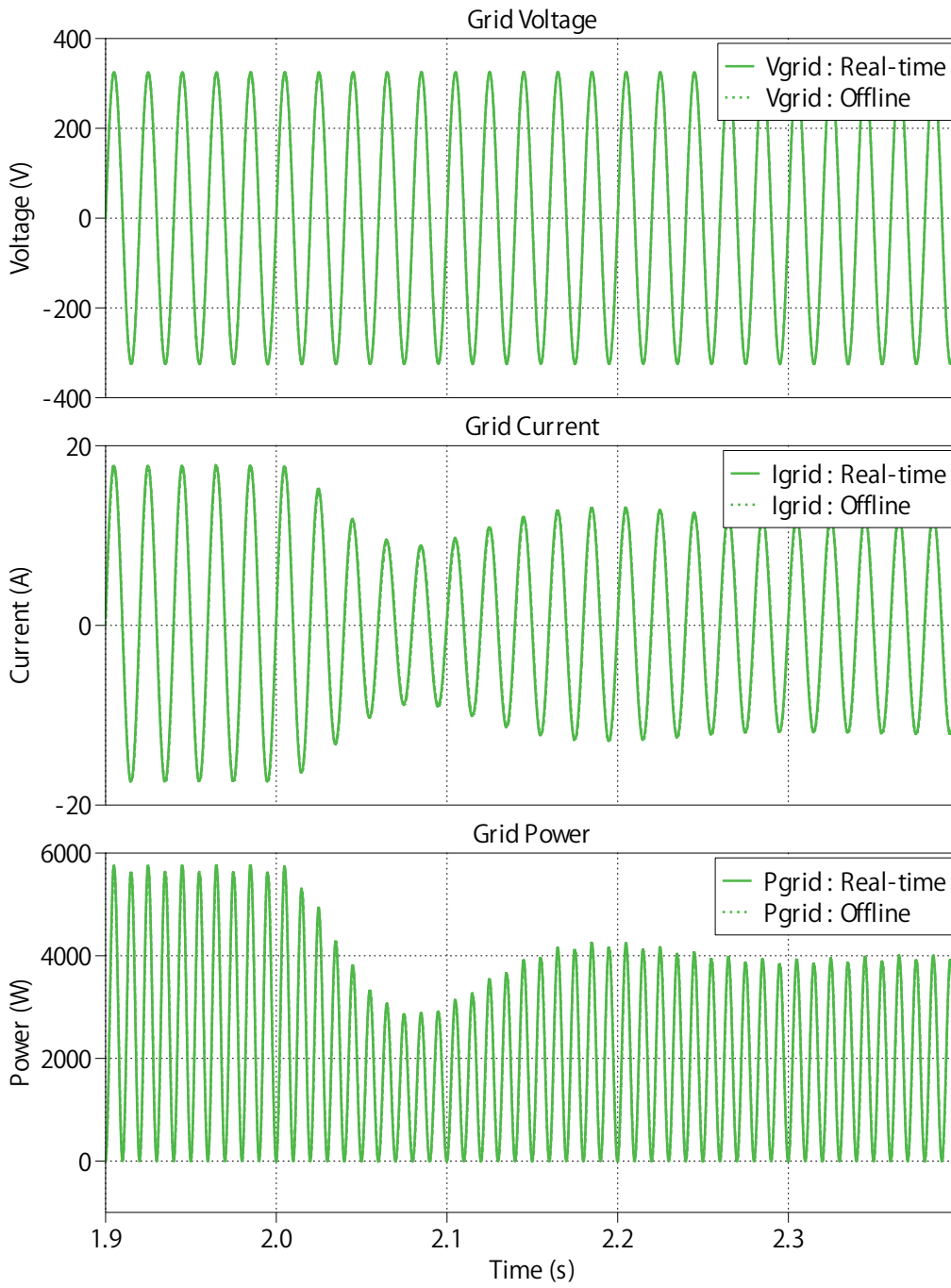
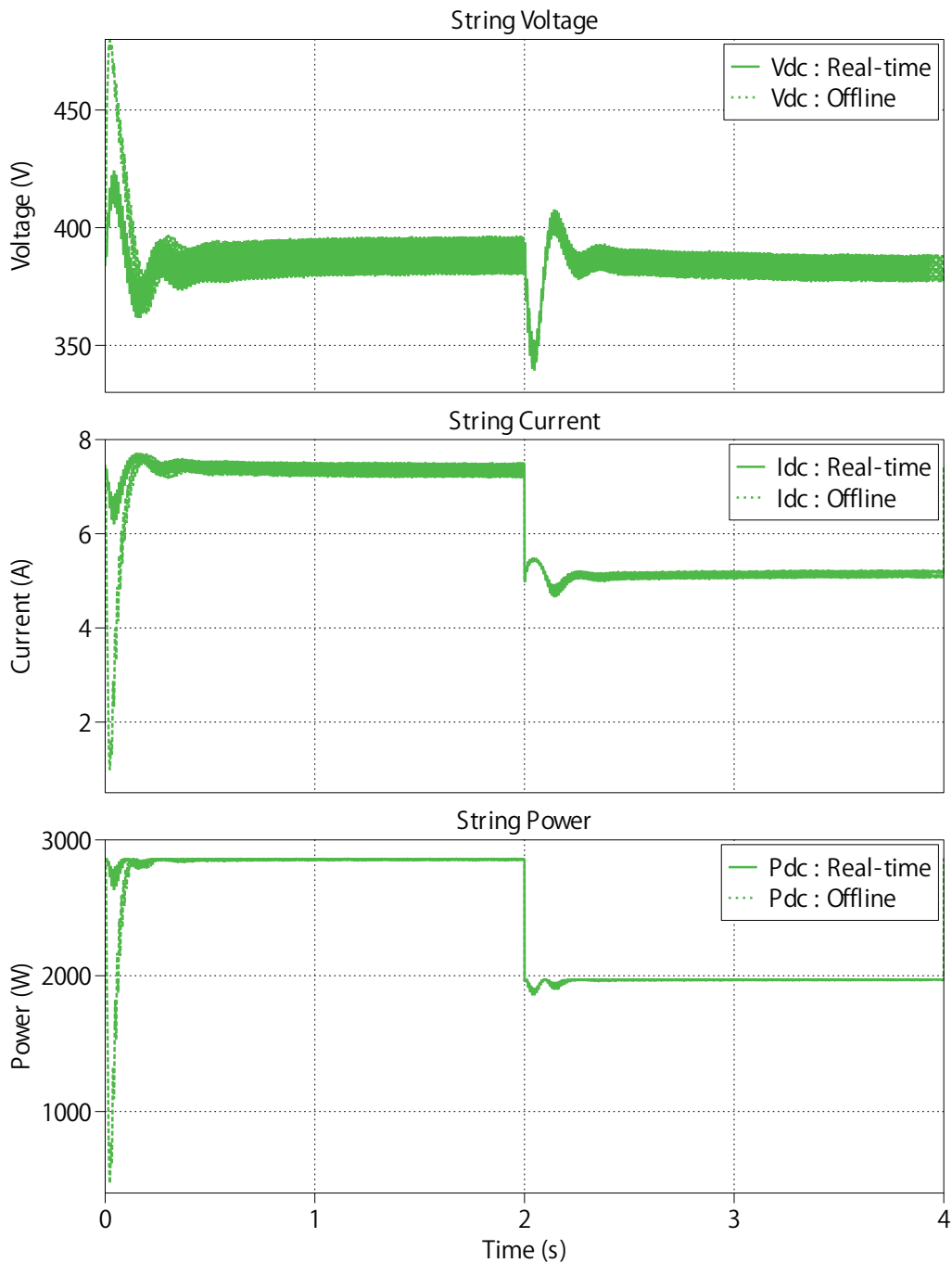


図8: PLECS RT Box 1を使用したPVストリングインバータのリアルタイム測定



4 まとめ

このモデルは、住宅の屋上PVシステムで一般的に使用されている単相PVインバータと、TI C2000 MCUの組み込みコード生成をサポートする制御システムを示しています。オフラインモードでもリアルタイムモードでも実行できます。このモデルは、マルチタスクコードを生成できる**タスク機能**も示しています。マルチタスクコードは、さまざまな時間スケールでダイナミクスで複数のシステム出力を調整する制御システムの処理能力を解放します。タスクライブラリコンポーネントを使用すると、異なる速度で15個の追加タスクを実行できるため、最速かつ最も優先度の高い制御タスク(Base task)のプロセッサ時間が節約されます。

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] PLECS User Manual,
URL: <https://www.plexim.com/sites/default/files/plecsmanual.pdf>.
日本語版: <https://adv-auto.co.jp/products/plexim/manual.html>
- [3] PLECS TI C2000 Target Support User Manual,
URL: <https://www.plexim.com/download/documentation>.
日本語版: <https://adv-auto.co.jp/products/plexim/manual.html>
- [4] TI C2000 F280039C LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F280039C>.
- [5] TI C2000 Piccolo MCU F280049C LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F280049C>.
- [6] TI C2000 Piccolo MCU F28069M LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28069M>.
- [7] TI C2000 Delfino MCU F28377S LaunchPad development kit,
URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/sprui25>.
- [8] TI C2000 Delfino MCU F28379D LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>.
- [9] TI C2000 F28P550DK9 LaunchPad development kit,
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28P55X>.
- [10] TI C2000 F28P650DK9 LaunchPad development kit,
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28P65X>.
- [11] TI C2000 F280039C controlCARD evaluation module,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD280039C>.
- [12] TI C2000 F28379D controlCARD development kit,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28379D>.
- [13] TI C2000 F28388D controlCARD evaluation module,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28388D>.

改訂履歴:

C2000 TSP 1.2	初版
C2000 TSP 1.4.5	Webリンクを更新
C2000 TSP 1.5.1	28388Dおよび28379Dコントロールカードターゲットのサポートを追加し、コントローラでの倍精度演算の使用を最小限に抑制
C2000 TSP 1.6.1	280039C LaunchPadおよびcontrolCARDターゲットのサポートと自動ピン選択を追加
C2000 TSP 1.9.1	28P550SJ9 LaunchPadターゲットのサポートを追加

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

KESCO 計測エンジニアリングシステムへの連絡方法:

☎ +81 3 6273 7505 Phone

+81 3 6285 0250 Fax

✉ Keisoku Engineering System CO.,LTD. Mail

1-9-5 Uchikanda, Chiyoda-ku
Tokyo, 101-0047
Japan

<https://kesco.co.jp> Web

Embedded Code Generation Demo Model

© 2002–2024 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。