

# Embedded Code Generation *DEMO MODEL*

## DC Microgrid

DCマイクログリッド

- 2つの蓄電池システム、グリッド間の相互接続コンバータ、定電力負荷、およびPV発電を備えたマイクログリッド -

Last updated in C2000 TSP 1.6.1

# 1 はじめに

このデモモデルは、バイポーラ低電圧DCマイクログリッドのシミュレーションを示しています。マイクログリッドは、次の主要要素で構成しています:

- 2つの蓄電池システム(Battery Storage Systems: BSS): 2つのBSSはそれぞれ、入力が直列で出力が並列接続された2つのDAB (Dual Active Bridge)で構成しています。両方のBSSはバイポーラDC電源リンク電圧を制御します。各BSSは定格電力 20kW、スイッチング周波数15kHzを供給します。各BSSは、マイクログリッド上のグリッド支援コンバータとして機能します。つまり、DCバス電圧を安定に維持できるだけでなく、並列接続した2つのコンバータ間の電力フローを制御することもできます。
- グリッド間の相互接続コンバータ(Grid Interface Converter: GIC): 中性点クランプ(Neutral Point Clamped: NPC)電圧源インバータは、共通のDC電力リンクと低電圧商用ACグリッド間のインタフェースとして使用されます。インバータの定格出力は20kWです。スイッチング周波数は20kHzに選択されています。GICは電力制御式であるため、共通のDC電力リンクに対して定電力負荷として機能します。
- 定電力負荷(Constant power load: CPL): CPLを簡略化しモデルは、帯域幅が制限された電圧制御電流源によって実装しています。負荷が消費する電力は可変であり、シミュレーション中に変更することができます。
- 太陽光発電: 太陽光発電は電流源(可変)によってエミュレートします。シミュレーション中に設置したピーク電力は自由に調整できます。

このドキュメントでは、Texas Instruments (TI) C2000 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ています。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。DCマイクログリッドモデル全体は合計4台のRT Boxで稼働します。

---

**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

マイクログリッドは、明確に定義された電気境界内で負荷、蓄電、発電を相互接続し、商用ACグリッドに対して単一の制御可能なエンティティとして機能するローカル電力網です。このようなマイクログリッドは、グリッド接続モードまたは独立モードのいずれかで動作します。グリッド接続の運用では、マイクログリッドは制御された方法で商用ACグリッドと電力を交換できます。独立モードでは、マイクログリッドは商用グリッドから切り離され、すべての負荷を独立して供給する必要があります。マイクログリッドの共通の給電ラインは、ACまたはDCのいずれかになります。このデモモデルにはDC共通の給電ラインがあり、マイクログリッドはグリッド接続モードと独立モードで動作できます。共通のDCバスの電圧レベルは±375Vです。

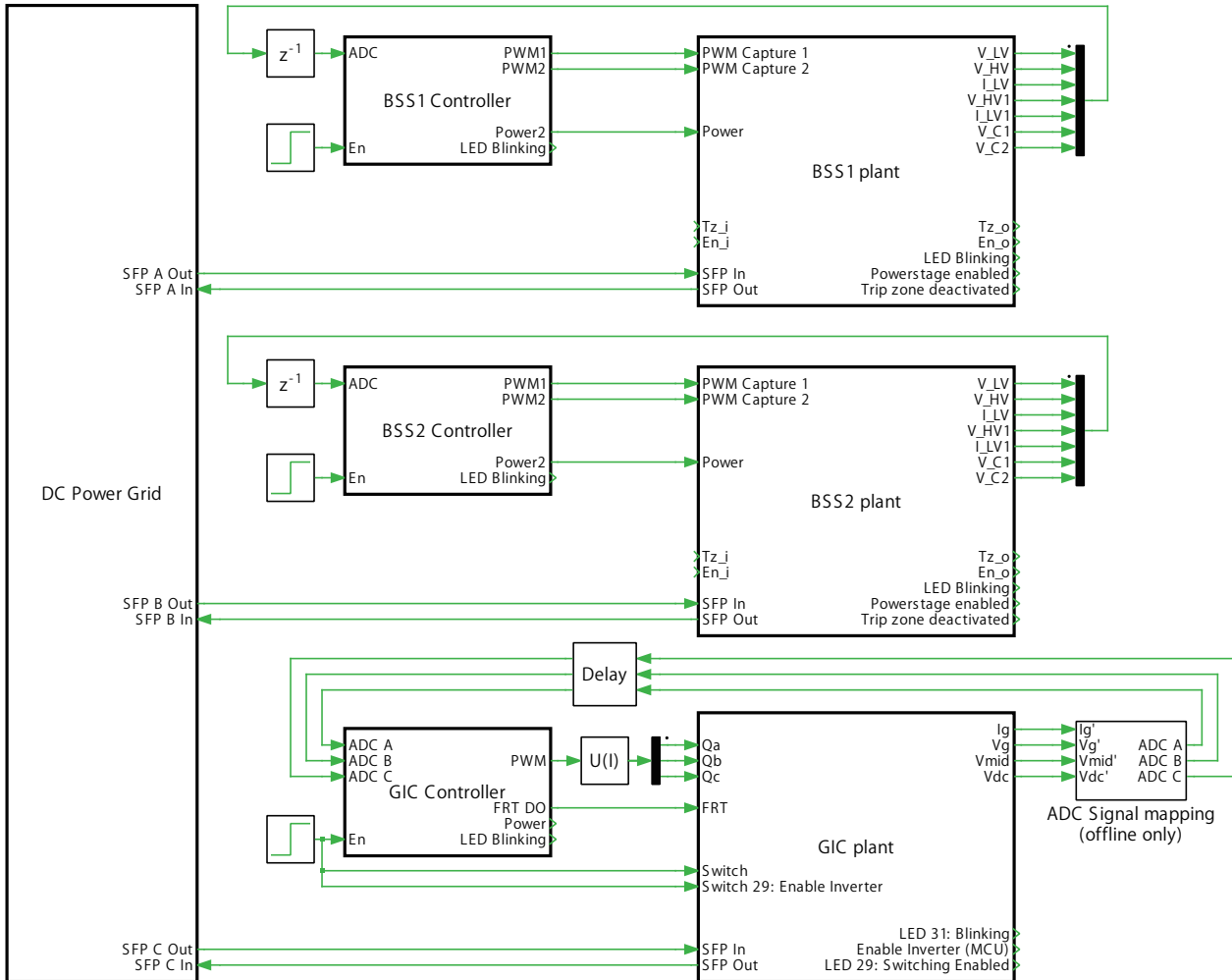
モデルはさまざまなサブシステムで構成しています。以下に、各サブシステムの簡単な概要を示します:

- DC Power Grid: このサブシステムには、DCマイクログリッドのパッシブ構造が含まれています。さまざまなパワーエレクトロニクスコンバータは、ラインインピーダンスによって相互接続されています。さらに、このサブシステムでは、PV Productionと定電力負荷(Constant Power Load: CPL)がエミュレートされます。
- BSS1 plant: このサブシステムには、蓄電池システム1の電源回路が含まれています。各BSSは、入力側が直列に、出力側が並列に接続された2つのDABで構成されます。サブシステム"BSS2 plant"についても同様です。
- BSS1 controller: このサブシステムには、蓄電池システム1の制御ループが含まれています。負荷分散を可能にするために、ローカルドループコントローラが実装されています。サブシステム"BSS2 controller"にも同様の方法で実装しています。

- GIC plant: このサブシステムには、グリッド連系コンバータの電源回路が含まれています。コンバータは、DCマイクログリッドと三相ACグリッドを接続します。
- GIC controller: このサブシステムには、AC/DCインバータの制御ループが含まれています。

次章では、各サブシステムについて詳しく説明します。必要に応じて、[第3章](#)に進み、リアルタイムシミュレーションの実行手順を確認します。

図1: "DC Power Grid", "BSS1", "BSS2", "GIC"を実装する4つのサブシステムと、それぞれのローカルコントローラを含むシステムの回路図



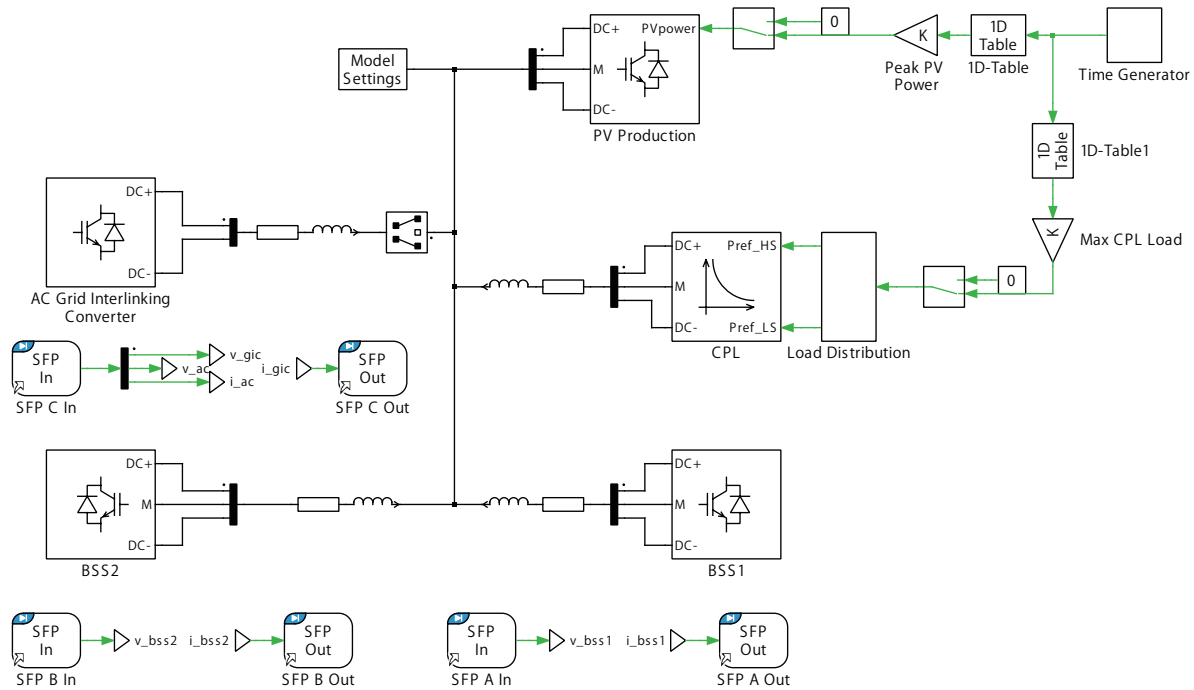
## 2.1 DC Power Grid

DCマイクログリッドのパスシブ構造は、独立したRT Box上で実行します。各独立したコンバータは、ラインインピーダンスを介して共通のDC電源リンクに接続されます。CPLとPV Productionは、マイクログリッドの動的な負荷と発電プロファイルを表します。オフラインシミュレーションでは、時間ベクトルは1秒に圧縮されます。変数DCgrid.plant.time\_scalingを使用して、時間ベクトルのスケールリングを変更できます。

### PV Production

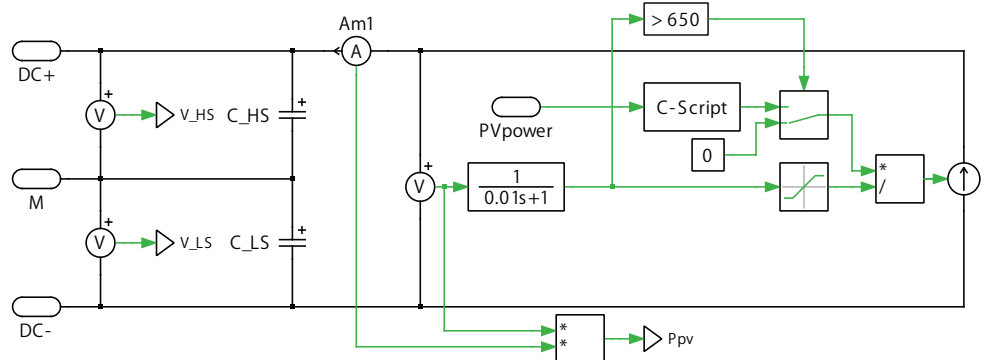
マスクたサブシステム"PV Production"には、[図3](#)に示すように、太陽光発電所の簡略化されたモデルが実装されています。初期化コマンドにおいて、変数DCgrid.plant.PVpeak\_powerを変更することでピーク電力レベルを調整できます。

図2: DC Power Gridの回路図



ピーク電力の初期値は10kWに設定されています。可変電流源の制御信号は、要求電力と測定したDCバス電圧の比によって算出します。代数ループの発生を回避するために、一次ローパスフィルタは電流の動的特性を制限します。DCバス電圧が650V未満の場合、電流源は常に0Aに設定されます。

図3: PV productionの回路図



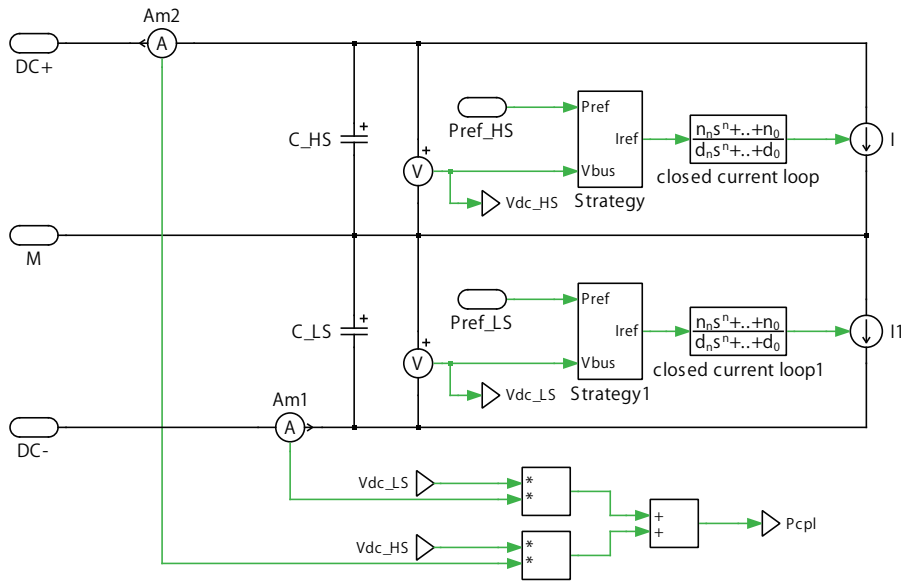
### CPL

図4は、CPLの実装を示しています。CPLはバイポーラDCバスに不均等な負荷を与える可能性があります。定電力負荷は、可変電流源によってエミュレートされます。印加電流信号は、次の関係式に従って計算されます：

$$I_{CPL} = \frac{P_{ref}}{V_{dc}} \frac{1}{\omega_c s + 1}$$

一次ローパスフィルタは、エミュレートされたパワーエレクトロニクスコンバータの電流ループコントローラの帯域幅を表します。カットオフ周波数 $\omega_c$ は、CPLサブシステムのマスクダイアログで調整できます。

図4: CPLの回路図



## 2.2 BSS1 plantおよびBSS2 plant

2つの蓄電池システムが共通のDC電源リンクに接続されています。各電源回路には、入力直列/出力並列のDAB構造に基づくDC-DCコンバータを備えています。入力側(直列接続)は共通のDC電源リンクに接続し、出力側(並列接続)はバッテリーと接続します。バッテリーに供給する電力を平滑化するため、追加のフィルタステージがバッテリーとDAB出力間に接続されています。BSSサブシステムの実装を図5に示します。

## 2.3 BSS1 ControllerおよびBSS2 Controller

サブシステム"BSS Controller"には、2つBSSの制御アルゴリズムが含まれています。

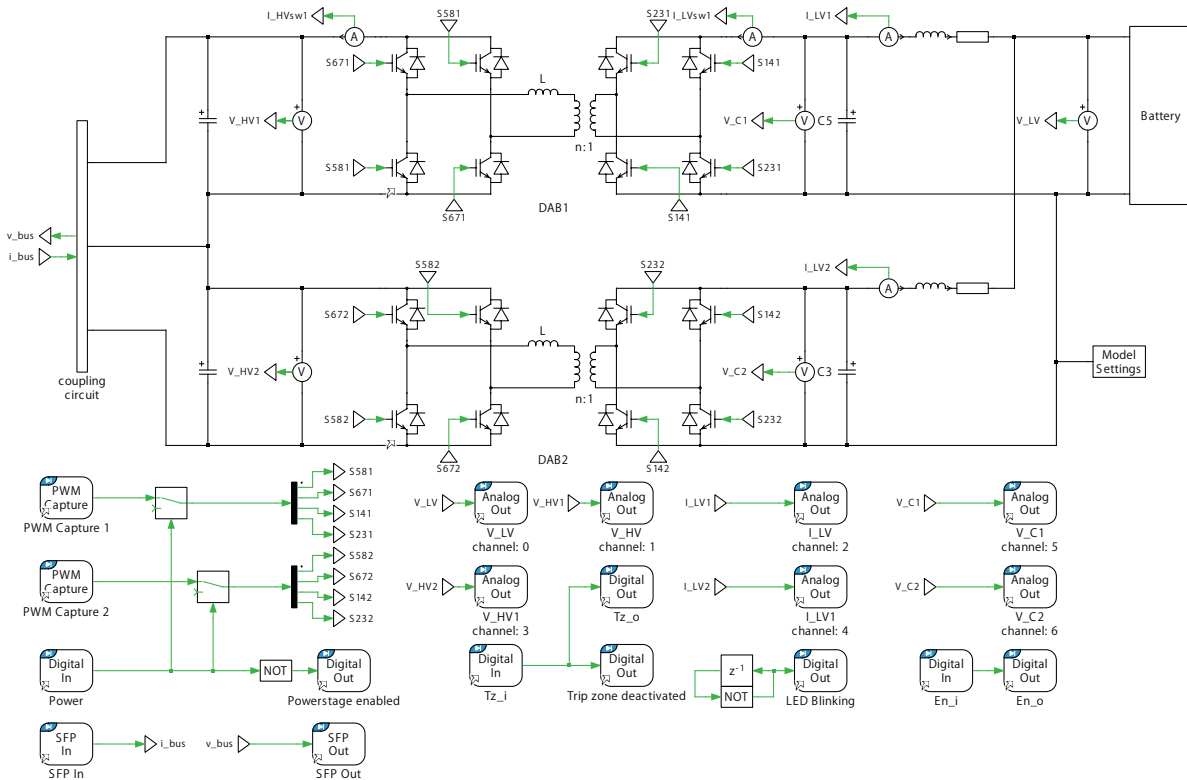
### ターゲットブロック

この実装には、TI C2000 TargetコンポーネントライブラリのADCブロックとPWMブロックが含まれています。TI C2000 TargetコンポーネントライブラリのADCブロックを使用してバイポーラDCリンク電圧、バッテリー側電圧、および個々のバッテリー側電流の測定値をモデル環境に取り込みます。検出したアナログ電圧を制御アルゴリズムで使用する物理単位の値に変換するため、ADCブロックのパラメータウィンドウを通じて各チャンネルごとにスケール係数とオフセットを提供します。ADCユニットとアナログ入力チャンネルのパラメータは、さまざまなMCUの利用可能なリソースに応じて変更できます。

### ドループコントローラ

2つの蓄電池システムは並列に接続されており、どちらもDCバス電圧を制御します。並列接続コンバータは、単一の高出力コンバータと比較して、信頼性の向上、動作中のメンテナンス性、電源コンポーネントへの負荷低減などの利点があります。並列接続コンバータの主な課題は、コンバータ間で負荷電流共有を実現し、電流共有の不一致を解消することです。並列接続コンバータ間で正確な負荷分散を実現するには、特別な制御技術を実装する必要があります。1つの簡単な方法は、制御ループに仮想直列抵抗を導入する、つまりドループ制御を行うことです。

図5: BSSサブシステムの回路図



ドループコントローラは、電圧リファレンスと出力キャパシタの測定電圧を比較します。この差はゲイン、いわゆるドループゲインによって増幅されます。適切なドループゲイン $K_{\text{droop}}$ の選択は、[1]に示されているように、電流共有精度と許容電圧偏差間の妥協点になります。ドループゲインが高いほど、電圧偏差は小さくなります。ドループゲインが低いほど、電流分配の精度は高くなります。

$$I_{\text{BSS}}^* = K_{\text{droop}}(V^* - V_{\text{meas}})$$

### カスケード電流および電圧制御

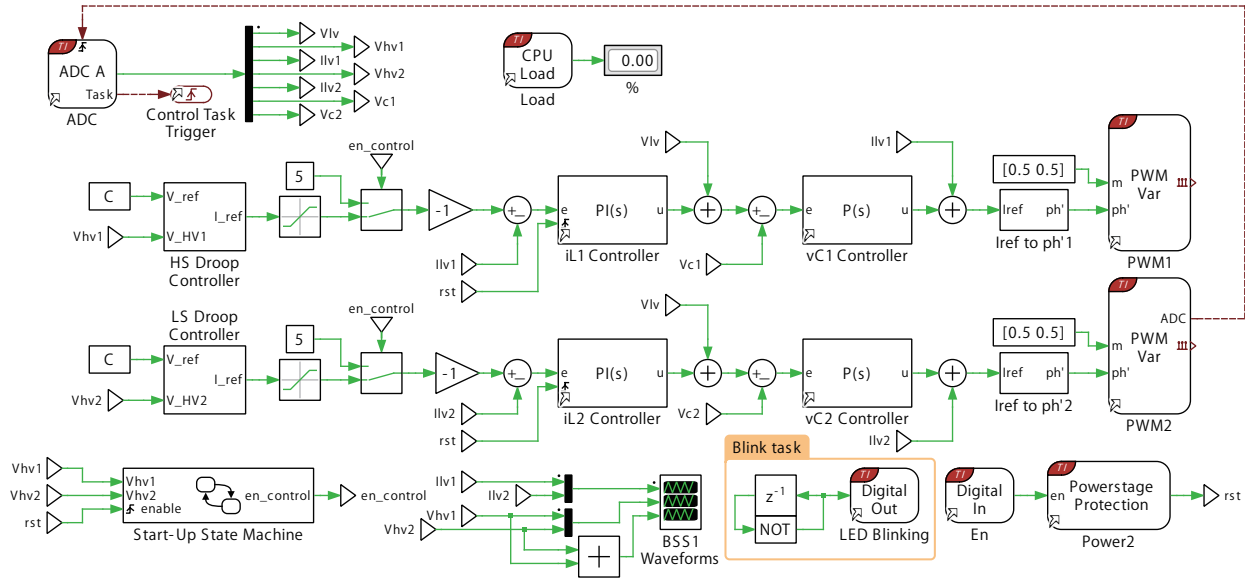
計算されたリファレンス電流 $I_{\text{BSS}}^*$ は、電流ループへの入力となります。外側の電流ループは、フィルタインダクタの電流を調整し、内側の電圧コントローラに電圧リファレンスを提供します。最後に、この内部電圧コントローラは、一次と二次のフルブリッジ間で必要な位相シフト $\phi$ を計算するために使用する電流リファレンスを提供します。

起動時にDCバス電圧の制御した傾斜で昇圧させるために、単純なステートマシンを実装しています。起動プロセス時にDCバス電圧の合計が750V未満の場合、ドループコントローラはバイパスされ、5Aの定電流リファレンスが外側の電流ループに適用されてDC電圧が生成されます。キャパシタに一定の電流を流すと、キャパシタ両端の電圧が上昇します。

## 2.4 GIC plant

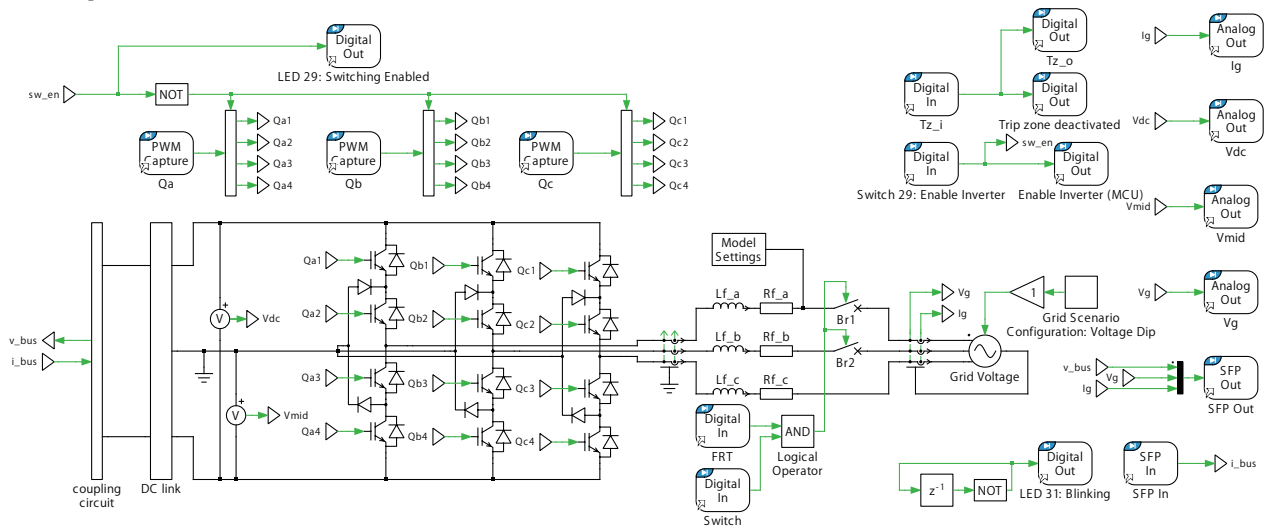
12個のPWMスイッチング信号は、RT Box Target Supportライブラリの3つのPWM Captureブロックによって検出されます。DC電圧、AC電流、AC電圧の測定値は、Analog Outポートを介して接続されたコントローラと連動します。"Enable Inverter (MCU)"というラベルのDigital Outブロックは、外部デジタル入力信号をRT Boxのデジタル出力ピンに転送します。このピンはMCUのGPIOに接続され、制御ソフトウェアに実装されたステートマシンを介してPWM出力を有効/無効にします。

図6: BSS Controllerサブシステムの回路図



MCUのPWM有効/無効化機能の仕組みについては、[第3章](#)で詳しく説明します。

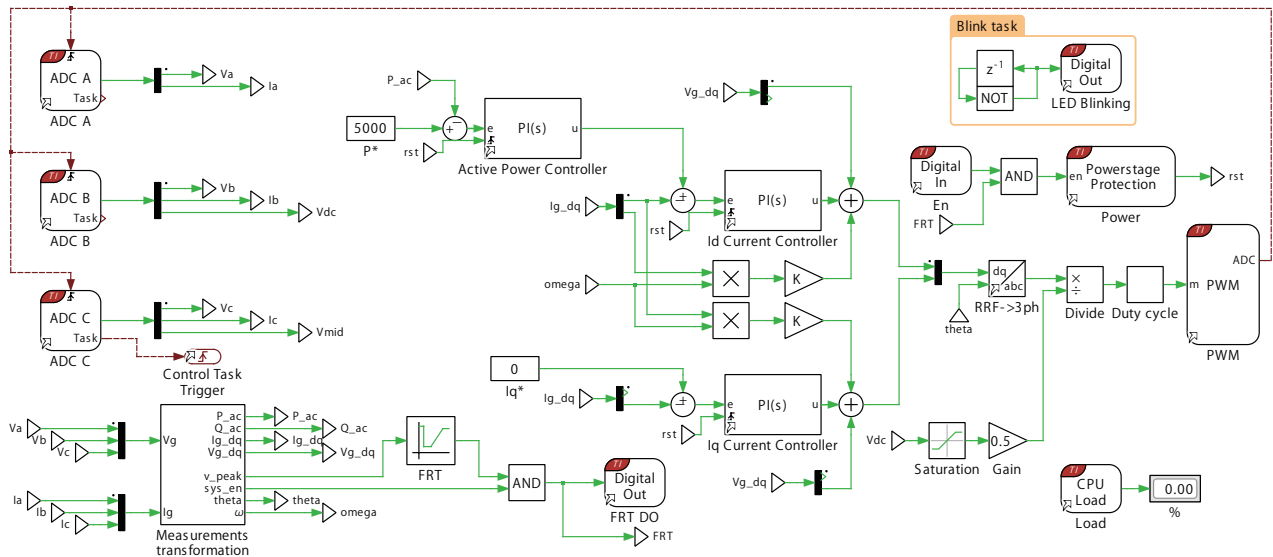
図7: GIC plantサブシステムの回路図



## 2.5 GIC controller

このサブシステムでは、閉ループ電流および電力コントローラが、角速度 $\omega$ で回転するdqフレームに実装されています。ここで、 $\omega = 2\pi f$ であり、 $f$ はグリッド周波数です。回転フレームにおける古典的制御の回路図を[図8](#)に示します。DCリンク電圧、AC電流、AC電圧の測定は、TI C2000 ComponentライブラリのADCブロックを使用してモデル環境に導入されます。有効電力は閉ループで制御されます。これにより、グリッド電圧の変化の結果として有効電力の動的特性が決定されます。実際の電力は、共通結合点(Point of Common Coupling: PCC)での測定値に基づいて計算され、それぞれの設定値と比較されます。PIベースのコントローラは、リファレンス電流のd成分を計算します。

図8: GIC Controllerの回路図



$i_d$ および $i_q$ 電流コントローラは、次のプラント伝達関数に基づいて設計されています:

$$G_{\text{plant}}(s) = \frac{1}{1 + Ts}$$

両方の電流コントローラは、同じ時定数 $T = L/R$ に基づいて設計できます。PIコントローラの時定数 $T_I$ は、プラントの時定数 $T$ を補正するために選択されます。最適に減衰されたシステム(つまり5%のオーバーシュート)を達成するには、

$$K_p = \frac{L}{3T_s},$$

$$K_i = \frac{K_p R}{L}$$

ここで、 $T_s$ はスイッチング周期です。

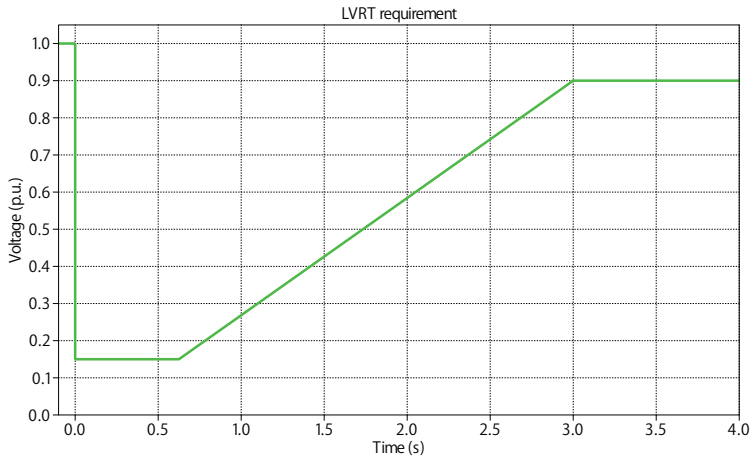
### PLLおよび事故時運転継続(Fault Ride-Through: FRT)要件

GICの位相ロックループ(Phase-Locked Loop: PLL)は、ACグリッド電圧の実際の位相角を出力します。さらに単純なアルゴリズムにより、PLLがグリッド電圧にロックされているかどうか判断されます。PLLがロックされると、ブール信号"SysEnable"がハイになります。また、グリッド電圧の大きさはPLLサブシステムで評価されます。サブシステム"FRT"には、電圧低下時の時間特性が実装されており、ACグリッド側の電圧低下時にインバータの接続を維持するために必要な最小要件を示します。電圧低下時のグリッド電圧の絶対値が図9に示す低電圧しきい値を上回っている場合、GICは動作を継続する必要があります。しきい値を下回る場合、GICはクリア時間の経過後にACグリッドから切り離され、スイッチングは無効になります。したがって、GICのスイッチングを有効にするには、PLLがロックされ、ACグリッド電圧が正常な状態である必要があります。さらに、MCUのデジタル入力に接続されたDIPスイッチを使用して、コントローラにグローバル有効化を行う必要があります。

## 2.6 結合回路

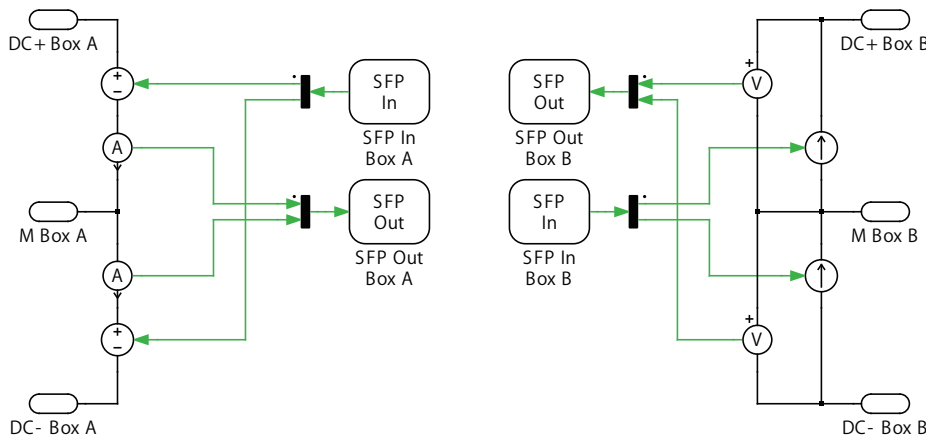
DCマイクログリッドモデル全体は、合計4台のRT Box上で動作します。したがって、個々のRT Boxでの実行時間を最適化するには、モデルをより小さな部分に分割する必要があります。図10に示すように、結合回路を使用して回路を分割します。このモデルの分割は、モデルの安定性のマージンを損なわないように、回路の戦略的なポイントで実行する必要があります。

図9: 低電圧運転継続要件。この制限値を超えると発電ユニットは接続したままで、制限値を下回るとACグリッドから切り離される場合があります。



たとえば、電圧変化率が制限されているキャパシタの近傍や、同様に電流変化率が制限されているインダクタの近傍などです。図10に示すように、“Box A”で測定された電流はSFPを介して“Box B”に転送され、2つの可変電流源に制御信号を送信します。“Box B”で測定された電圧信号においても同じプロセスが観察できます。この結合回路は、ユニティゲインの理想的なジャイレータとして見なすことができ、複素DCマイクログリッドモデルを小さな部分に分割して、個々のRT Boxでシミュレートすることができます。結合回路の左側の1台のRT Boxに実装され、右側は2台目のRT Boxに実装されます。各コンバータは、このような結合回路を使用して中央の“DC Power Grid”モデルに接続されます。

図10: 異なる RT Box間で回路を分割するために使用する結合回路



### 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、PLECS Coderを使用して各サブシステムを実際のターゲットにデプロイすることもできます。CPLとPV systemは、マイクログリッドの動的負荷と発電プロファイルを表します。2つのBSSが連携して、負荷と発電の正味電力バランスに応じて変化するDCリンク電圧を調整します。GICは、グリッド障害が検出されない限り、ACグリッドに5kWの定常電力を供給します。ACラインの障害が検出されると、GIC Controllerは障害状態が解消されるまでDCマイクログリッドをACシステムから電氣的に分離します。

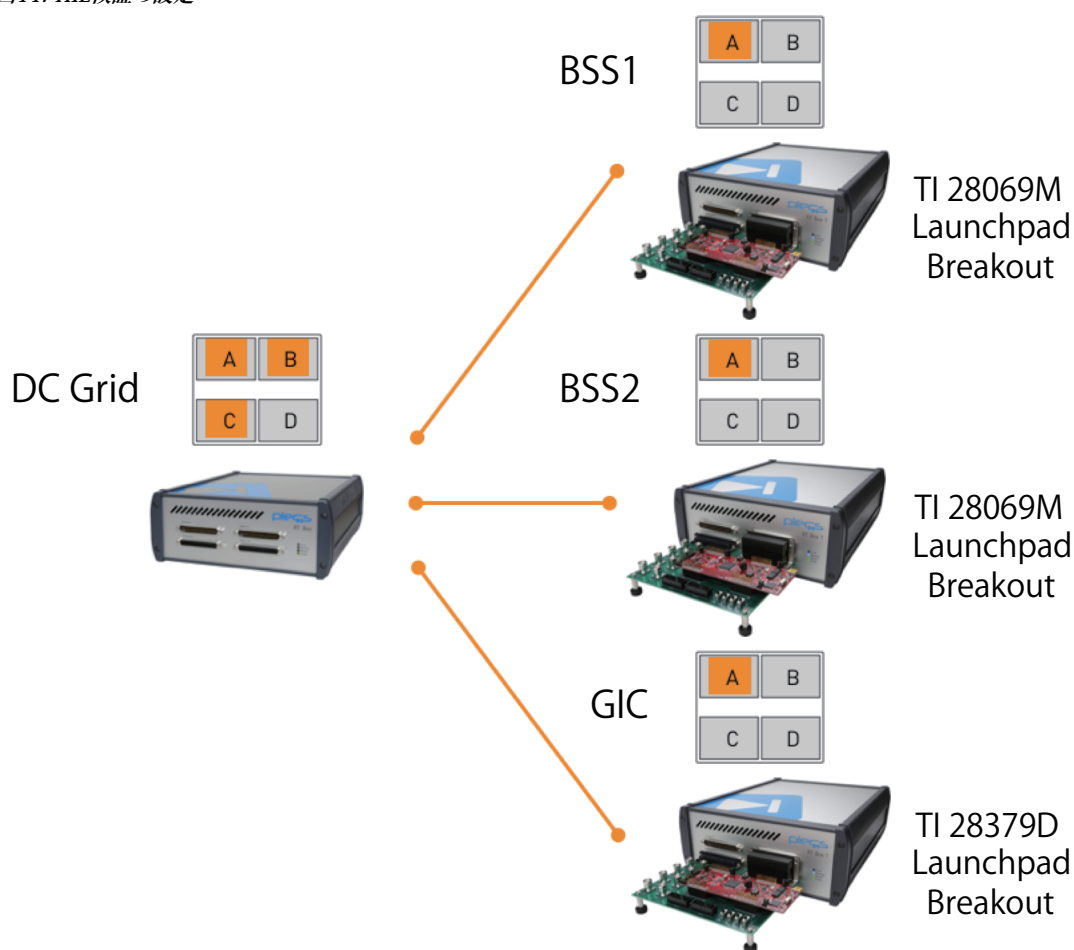
モデルが複雑なため、HIL検証には4台のPLECS RT Boxに分割する必要があります。各"plant"サブシステムは異なる RT Box上で実行しています。"DC Power Grid"サブシステムを実行するRT Boxは、起動時のマスタとして機能します。他のすべての RT Boxはスレーブとして機能し、SFP port Aで起動を同期します。ハードウェア構成の回路図を図11に示します。

### 3.1 ハードウェア構成

DCマイクログリッドモデルのHILシミュレーションを設定するには、次の物が必要です:

- PLECS RT Box 1 x 4
- SFPケーブル x 3
- RT Box LaunchPadインタフェース x 3
- TI 28069M LaunchPad x 2 (BSS controllers2台用)
- TI 28379D LaunchPad x 1 (GICcontrollers用)

図11: HIL検証の設定



HILシミュレーションを設定するには、次の手順を実行する必要があります:

- 1 4台のPLECS RT Boxを垂直に積み重ね、"DC Power Grid"、"BSS1 plant"、"BSS2 plant"、"GIC plant"とラベル付けします。
- 2 "DC Power Grid"Boxの A、B、CポートからのSFPケーブルを、それぞれ他の3台のBoxのAポートに接続します。

- 3 3枚のRT Box LaunchPadインタフェースボードを、"BSS1 plant"、"BSS2 plant"、"GIC plant"のBoxに接続します。3枚のインタフェースボード上のすべてのスイッチの位置を、RT Boxから離れた位置に変更します。
- 4 対応するLaunchPadを各インタフェースボードに接続します("BSS1 plant"および"BSS2 plant"の場合はTI 28069M LaunchPad [2]、"GIC plant"の場合はTI 28379D LaunchPad [3])。
- 5 4つのplantサブシステムをRT Boxにダウンロードし、3つのControllerサブシステムをLaunchPadにダウンロードします(順序は任意)。
- 6 システムの起動後(4台のBoxすべての青色LEDが点灯した状態)、「BSS1 plant」および/または「BSS2 plant」のRT Boxのインタフェースボードの"DI28"および"DI29"スイッチの位置を、RT Box側を指す位置に変更します。2つのBSSのうちの1つ(または両方)がDCバスの電圧を上昇させ始めます。
- 7 "GIC plant"インタフェースボードの"DI28"と"DI29"スイッチをRT Box側を指す位置に変更します。
- 8 現在、DCマイクログリッドは4台のRT Boxで稼働しています。3つのコンバータは、インタフェースボードに接続された3枚のLaunchPadによって制御されます。

4台のRT Boxを積み重ねてGIC、2つの蓄電池システム、PV発電、および定電力負荷を備えたDCマイクログリッドシステムをエミュレートします。このマイクログリッド設定では、さまざまなシナリオをシミュレートできます:

- ACグリッド障害のシナリオ: GICは、三相電圧源の特殊な実装に接続されています。この電圧源により、電圧変動、周波数変動、位相角の変化などの異常なグリッド条件に対するコントローラの応答をテストすることができます。このデモでは、低電圧イベントのみを考慮しています。ゲイン(利得)ブロックを0から1の値に設定すると、GICは図9に示すクリア時間に従って運転を継続します。
- 1つのBSS をオフにする: 通常運転時、DCバス電圧は2つのBSSが並列に動作することによって維持されます。ただし、1つのBSSの障害をシミュレートすることは可能です。これは、2枚のBSS LaunchPadインタフェースボードのいずれかの"DI29"スイッチをRT Boxから離れる方向に変更することによって実行できます。こうすることで、1つのBSSは動作を停止し、残りのBSSがDCマイクログリッドのバランスをとるために必要な電力全体を引き継ぐ必要があります。
- **モデル初期化コマンド**で変数`DCgrid.plant.time_scaling`を変更することにより、シミュレーション前にPV productionとCPLのダイナミクスを変更できます。

外部モードに接続している場合、PLECSスコープを使用してシミュレーションの過渡結果を観察および評価できます。

## 3.2 結果

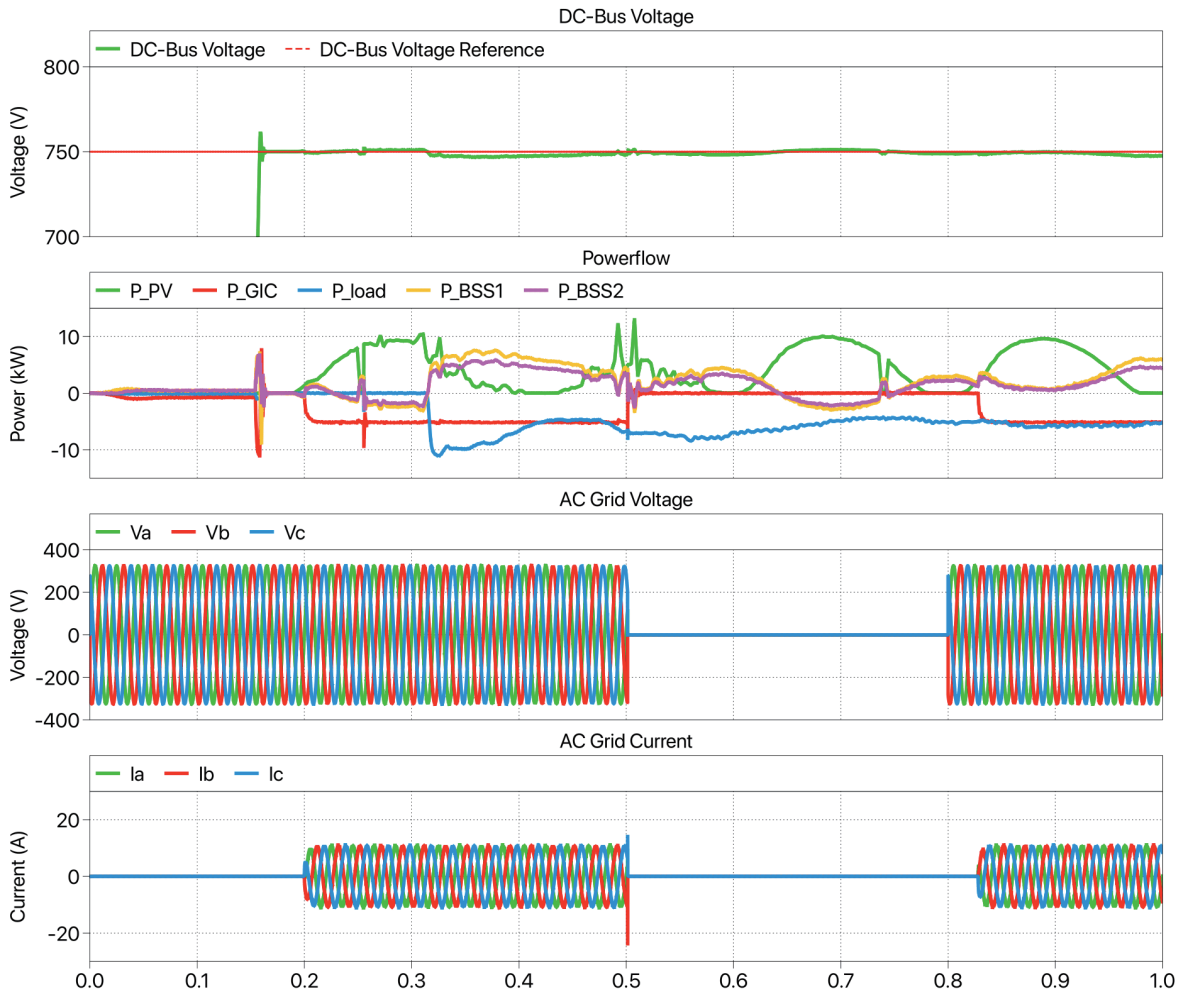
主なオフラインシミュレーション結果を図12に示します。DCバス電圧はシミュレーション開始時にゼロから立ち上がります。このため、両方の蓄電池システムはDCバスに定電流を供給します。DCバス電圧が750Vに達すると、コントローラはドループ制御に切り替わり、両方のBSSがバス電圧を750Vに向けて制御します。 $t = 0.2$ 秒付近で、GICは5kWの定常電力をACグリッドに注入し始めます。また、PV発電と定電力負荷は、可変電力レベルで共通のDCバスに電力を供給または負荷をかけます。DCバスの電圧制御を実現するには、2つのBSSがDC電源リンクの電力をバランスさせる必要があります。これは、DCバスの総発電量と総負荷の差としてまとめられます:

$$P_{BSS} = P_{PV} - P_{CPL} - P_{GIC}$$

両方のBSSが並行して動作するため、 $P_{BSS}$ の電力は両方のコンバータに分配されます。両方のBSSのドループゲインは同じですが、個々のBSSの電力レベルには違いがあります。これは図12でも確認できます。この違いは、コンバータとDCバス間の結合インピーダンスの抵抗成分の値が不均一であるために発生します。

$t = 0.5$ 秒で、ACグリッド電圧が0p.uまで低下します。これにより、GIC ControllerはAC/DCインバータのスイッチング動作を直ちに停止します。また、インバータとACグリッド間のサーキットブレーカも開きます。 $t = 0.8$ 秒で、ACグリッド電圧は1p.uに戻ります。これにより、インバータの再接続がトリガされます。PLLがグリッド電圧に再ロックされると、GICは再びACグリッドに電力を注入し始めます。

図12: シミュレーション結果



## 4 まとめ

このモデルは、TIC2000 MCUの組み込みコード生成をサポートするDCマイクログリッド全体のシミュレーションを示しています。テストシステムのハードウェアは、電力システム全体のさまざまな物理的構成要素をシミュレートする4台のRT Boxと、コンバータのローカル制御ユニットを実装する3枚のTI Launchpadで構成しています。オフラインおよびリアルタイムのデプロイ全体を1つのPLECSモデルから実行できるほか、シミュレーション結果とリアルタイム操作の監視も可能です。この包括的なマイクログリッドモデルのさらなる発展には、追加の電力負荷と電源、および各コンバータのローカル制御ユニットと通信する監視/集中制御装置が含まれる可能性があります。

## 5 参考文献

- [1] GAO, F., KANG, R., CAO, J. et al., *Primary and secondary control in DC microgrids: a review.*, J. Mod. Power Syst. Clean Energy 7, 2019, 227-242. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40565-018-0466-5>.

- [2] TI C2000 Piccolo MCU F28069M LaunchPad development kit,  
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28069M>.
- [3] TI C2000 Delfino MCU F28379D LaunchPad development kit,  
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>.

改訂履歴:

C2000 TSP 1.1.1	初版
C2000 TSP 1.4.5	Powerstage ProtectionパラメータとWebリンクを更新
C2000 TSP 1.5.1	コントローラでの倍精度演算の使用を最小限に抑え、PWM2の同期を"Self"に設定
C2000 TSP 1.6.1	自動ピン選択を追加

 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  
 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

*Embedded Code Generation Demo Model*

© 2002–2023 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。