

# Embedded Code Generation *DEMO MODEL*

## Input-Series/Output-Parallel Dual Active Bridger

入力直列/出力並列構成のデュアルアクティブブリッジ

- TI C2000 MCU用の組み込みコード生成機能を備えた入力直列/出力並列構成のDABの閉ループ制御 -

Last updated in C2000 TSP 1.11.1

# 1 はじめに

このデモモデルは、[1]で説明されているように、入力直列出力並列(Input-Series/Output-Parallel: ISOP)デュアルアクティブブリッジ(Dual Active Bridge: DAB)構成のDC/DCコンバータシステムのシミュレーションを特徴としています。このコンバータはエネルギー貯蔵用途に特化しており、DC電圧ネットワークとバッテリーベースのエネルギー貯蔵システムを接続します。コンバータは閉ループ制御で動作します。デモモデルでは、Texas Instruments (TI) C2000 Microcontroller(MCU)を使用したPLECS 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、制御アルゴリズムのパフォーマンスをハードウェアインザループ(Hardware-in-the-loop: HIL)シミュレーションで検証できます。

モデルは"Plant"と"Controller"の2つのサブシステムに分かれています。Plantサブシステムには2つのDABステージが含まれており、入力側は直列に接続され、出力側は並列に接続されています。各DABステージには独自のネストされた制御ループがあります。グローバル制御戦略は、入力側の電圧を2つのキャパシタ間で均等に分散させることを目的としています。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。PLECS Coderを使用して、Controllerサブシステムの制御ロジックが構築され、TI C2000 MCUにフラッシュします。次に、PlantサブシステムをPLECS RT Boxにデプロイし、生成された組み込みコードのHILテストを実行します。次のセクションでは、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。

**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:

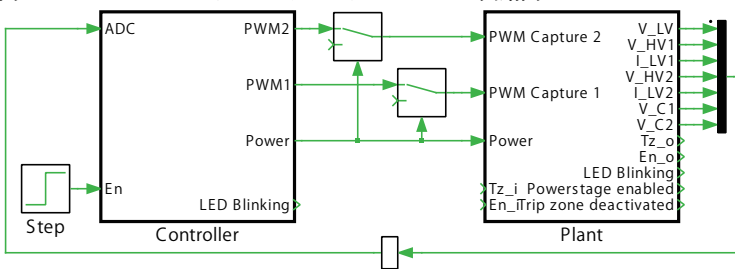
PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

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

デモモデルは2つのサブシステムで構成しています: "Plant"サブシステムには電力回路が含まれ、"Controller"サブシステムには制御ループが含まれています。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



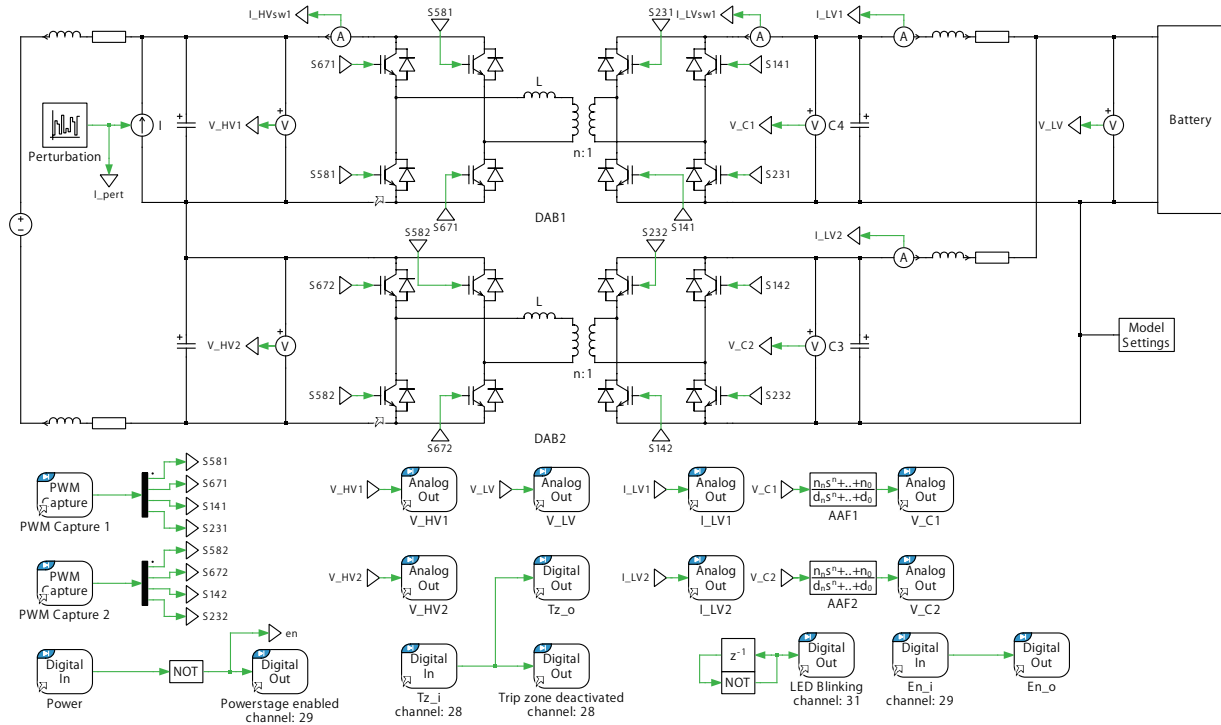
## 2.1 Plant

このデモでは、図2に示す電源回路に2つのDABが含まれており、入力側は直列に接続され、出力側は並列に接続されています。DABは、PLECSライブラリの電気回路ブロックのNanostepセクションにあるDABコンバータコンポーネントを使用して実装されます。RT BoxのNanostepソルバは、1桁台の範囲のナノ秒の時間ステップでコンバータをシミュレーションを実行します。小さなステップ サイズは、DABなどの誘導性ACリンクを備えた高周波DC/DCコンバータを正確にモデル化するために重要です。DABでは、電力転送が電流とPWM信号間の位相シフトに非常に敏感です。さらに出力側には、電気化学電池蓄電システムに供給される電流リップルを低減するためのフィルタ回路が含まれています。

各DABには入力側キャパシタがあり、これら2つのキャパシタにはバランスの取れた電圧が必要です。適切なバランス調整機構がないと、入力キャパシタの電圧がばらつき始め、最終的には2つのキャパシタのうちの1つが700Vの入力電圧全体を引き継ぐこととなります。不均衡な負荷シナリオを反映するために、疑似ランダム電流が直接、上部DABの入力キャパシタに引き込まれ(または供給され)ます。

8つのPWMスイッチング信号は、RT Boxコンポーネントライブラリの2つのPWM Captureブロックを使用してPlantサブシステムに取り込まれます。フィルタ処理された出力側電流、出力側電圧、入力側電圧、およびバッテリー端子電圧の測定値は、Analog Outポートを介してサブシステムからエクスポートされます。プラントの離散化ステップサイズは3.0 μsに設定されています。

図2: RT Box上で動作するISOP-DABモデルの電源回路



## 2.2 Controller

Controllerサブシステムを 図3 に示します。各DABの入力側から出力側への電力伝送は、一次と二次側のフルブリッジのPWM信号間の位相シフトφによって制御されます。各ステージはカスケード制御ループ方式によって制御されます。外側のコントローラは出力インダクタの電流を安定させ、内側の電圧コントローラにリファレンス値を提供します。この内側の電圧コントローラは、必要な位相シフトを計算するために使用されるリファレンス電流を提供します。

単一DABステージの二次側電流と位相シフト角φの関係は次のように表されます:

$$I_{LV} = \frac{nV_{HV}}{2\pi^2 f_{sw} L_{tot}} (\pi - |\varphi|)$$

次に、上記の式の直接逆変換を使用して、指令リファレンス電流*I<sub>LV</sub><sup>\*</sup>*を印加するために必要な位相シフトを計算します。この関係は次のように記述できます:

$$\phi^* = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{8f_{sw}L_{tot}}{nV_{HV}} |I_{LV}^*|} \right) \text{sign}(I_{LV}^*)$$

### ステージ制御

各ステージには個別の二次電流リファレンス $I_{ref1}$ と $I_{ref2}$ が含まれており、これらはグローバルリファレンス電流 $I_{ref}$ から取得されます。ここで

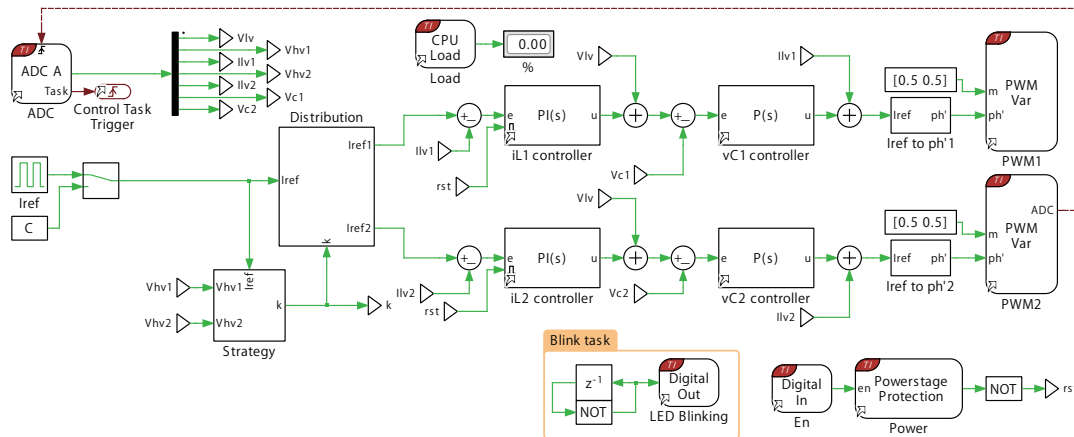
$$I_{ref} = k \cdot I_{ref1} + (1 - k) \cdot I_{ref2}$$

分布係数 $k$ は、2つの入力キャパシタの両端電圧が均等にバランスが保たれるように計算されます。この分布係数 $k$ は0から1までの任意の値を取ることができます。 $k$ の計算は、サブシステム"Strategy"で次の規則に従って行われます:

$$k = 0.5 + 5 \left( \frac{V_{HV1} - V_{HV2}}{V_{HV1} + V_{HV2}} \right)$$

これにより、制御ロジックに追加の自由度が導入され、2つの入力キャパシタ間の電圧のバランスをとるために使用できるようになります。

図3: ISOP-DABのコントローラの構成



### ターゲットブロック

RT Boxが提供するアナログ信号の測定値は、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Controllerサブシステムに導入されます。検出され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介して各チャンネル毎にスケール係数とオフセットが提供されます。

各フルブリッジは、0.5の定常デューティ比で動作します。TI C2000 TargetコンポーネントライブラリのPWM (variable)ブロックは、DSPの物理PWMジェネレータを構成します。このブロックにより、PWMキャリア間の位相シフトを動的に調整できます。

## 3 シミュレーション

すべての PLECS モデルと同様に、このデモモデルのオフラインシミュレーションは、シミュレーションメニューから**開始**を選択して実行できます。

### 3.1 Controllerのデプロイ

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 [2]、TI 28379D [3]、TI 28P550SJ9 [4]、TI 28P650DK9 [5] LaunchPad、およびTI 28388D [8] controlCARDをサポートします。

さらに、デモモデルではTI 280039C [6]およびTI 28379D [7]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、プラントモデルをPLECS RT Boxにデプロイして、生成されたコードのハードウェアインザループ(Hardware-In-the-Loop: HIL)テストを実行することもできます。

- 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。

---

**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ジャンプが開いていることを確認してください。

---

### 3.2 HILシミュレーション用にPlantをデプロイ

このデモモデルは、Controllerに加えて、"Plant"サブシステムの電力ステージも実装しており、PLECS RT BoxにデプロイしてHILテストを実行できます。一般的なハードウェア構成を図4に示します。ここでは、評価キットの TI C2000 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。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。RT Boxでビルドする前に、3.1で示すように、適切なTI MCU上で"Controller"サブシステムがビルド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、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-30"に対応するLEDが点滅します。

"Plant"サブシステムまたは RT Box上で実行する電源回路内では、シミュレートされた電圧と電流が比例してアナログ信号に変換され、RT Boxのフロント パネルにあるAnalog Outコネクタから出力されます。これらのアナログ信号は、RT Box LaunchPad Interfaceボードによってキャプチャされ、TI LaunchPadのADC入力ピンにルーティングされます。MCUはこれらのアナログ信号を処理してPWMスイッチング信号を生成し、Digital In ピンからRT Boxに供給します。

DABパワー ステージは、PLECSライブラリのNanostepセクションにあるDABコンバータコンポーネントを使用して実装されています。RT BoxのNanostepソルバは、1桁台の範囲のナノ秒の時間ステップでコンバータをシミュレートします。

図4: RT BoxによるHIL検証用のハードウェアセットアップ PLECS RT Box



- RT Box LaunchPad Interfaceボード上のスイッチ"DI-29"を"High"から"Low"に切り替えてから"High"に戻してMCUをリセットし、"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。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。
- RT Box LaunchPad Interfaceボード上のスイッチ"DI-28"を"Low"に切り替えると、すべてのPWMの出力を無効にするトリップゾーンイベントが有効になります。トリップゾーンイベントが有効になると、LaunchPad Interfaceボードの"DO-28"に対応するLEDがオフになります。
- システムを再開するには、"DI-28"を"High"に戻し、"DO-28"に対応するLEDをオンにしてから、スイッチ"DI-29"を"High"から"Low"に切り替え、その後"High"に戻してMCUをリセットします。"DO-29"に対応するLEDが点灯するはずですが、

この段階で、RT Box LaunchPad Interfaceボード上の"DO-28"と"DO-29"に対応するLEDが点灯していることを確認します。

MCU内の制御プログラムのパラメータを調整し、中間値を観察するには、以下の手順に従ってTI MCUの外部モードに接続します。

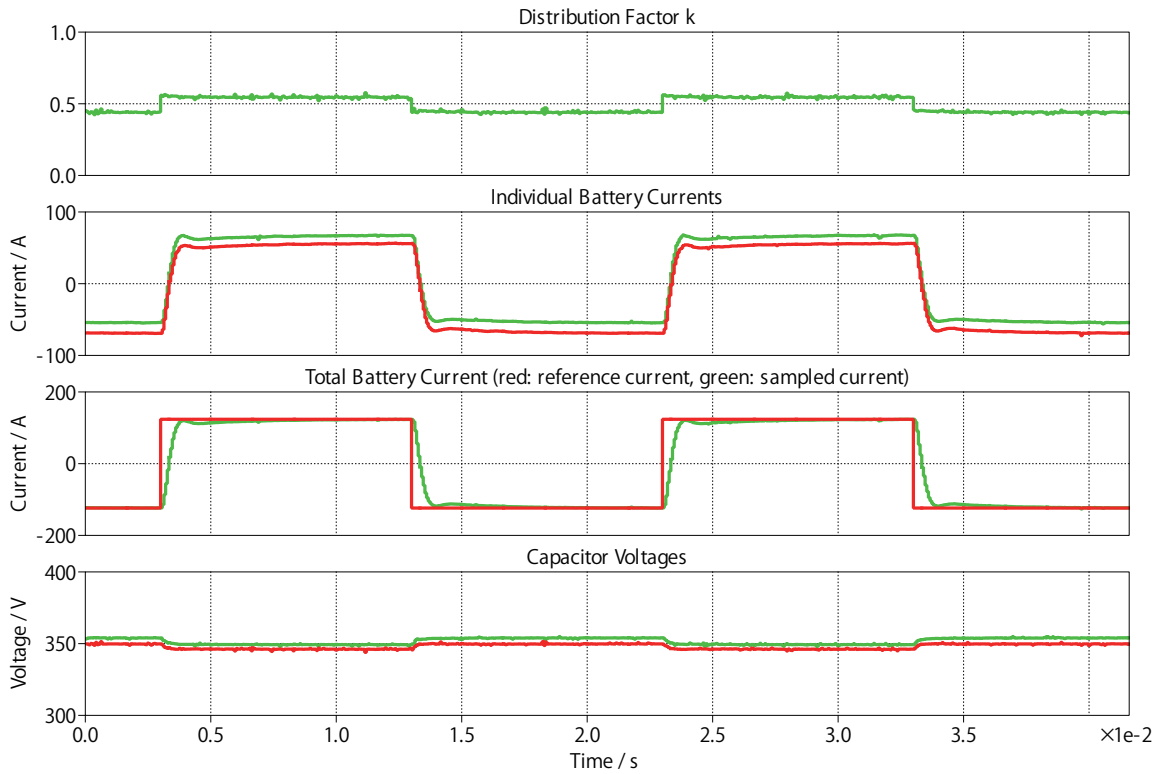
- **"Coder -> Coderオプション..."**ウィンドウの左側にある**システム**リストから、"Controller"を選択します。
- 次に、**外部モード**タブから適切な**ターゲットデバイス**を選択し、**接続**をクリックします。
- そして、**自動トリガを有効化**にチェックして、"Controller"サブシステム内のPLECSスコープでテスト結果を確認します。

このデモモデルでは、"Controller"サブシステムのパルス発生器コンポーネントを使用して、リファレンス電流値が $-1.5 \cdot I_{nom}$ と $1.5 \cdot I_{nom}$ 間で切り替えます。手動切替スイッチコンポーネントをダブルクリックして、リファレンス電流のソースを定数ブロックに変更することもできます。これらのリファレンス値はモデルを構築する前に、パルス発生器ブロックが**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(Iref)ため、リアルタイムで即座に変更できます。

### 3.3 結果

リアルタイムで実行するデモモデルの主な測定波形を図5に示します。HV側のキャパシタが不安定です。このためコントローラは0.5以外の分布係数 $k$ で対抗し、2つのキャパシタの電圧バランスをとります。ただし、指令リファレンス電流は厳密に従っています。

図5: PLECS RT Box 1とTI C2000 MCUを使用した分布係数、バッテリー側インダクタ電流、キャパシタ電圧のリアルタイム測定



## 4 まとめ

このデモモデルは、位相シフト変調に基づく閉ループ制御を備えたISOP DABコンバータを実証します。このモデルは、オフラインシミュレーションとして実行することも、HILテスト用にリアルタイムで実行することもできます。TI C2000 MCU上で実行する制御コードは、PLECSから自動的に生成します。RT BoxのNanostepソルバは、1桁台の範囲のナノ秒の時間ステップで"Plant"サブシステム内のDABをシミュレートします。DABなどの高周波DC/DCコンバータを正確にモデル化するには、小さなステップサイズが重要です。

## 5 参考文献

- [1] P. Barrade, E. Coulinge, A. Rufer, “Control of a Modular DC-DC Converter Dedicated to Energy Storage”, *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCEurope)*, Geneva, 2015, pp. 1-9.
- [2] TI C2000 F280039C LaunchPad development kit,  
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F280039C>.
- [3] TI C2000 Delfino MCU F28379D LaunchPad development kit,  
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>.
- [4] TI C2000 F28P550S9 LaunchPad development kit,  
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28P55X>.
- [5] TI C2000 F28P650DK9 LaunchPad development kit,  
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28P65X>.
- [6] TI C2000 F280039C controlCARD evaluation module,  
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD280039C>.
- [7] TI C2000 F28379D controlCARD development kit,  
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28379D>.
- [8] TI C2000 F28388D controlCARD evaluation module,  
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28388D>.
- [9] 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>

#### 改訂履歴:

- C2000 TSP 1.2.1 初版
- C2000 TSP 1.4.5 powerstage protectionパラメータを更新
- C2000 TSP 1.5.1 28379D LaunchPad、28388D、28379D controlCARD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え、PWM2の同期を"Self"に設定
- 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
- C2000 TSP 1.11.1 PlantをNanostepソルバにアップグレードし、スイッチング周波数を向上

#### 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

#### 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。