

# Embedded Code Generation *DEMO MODEL*

## Vector Control of an Induction Machine

誘導機のベクトル制御

- TI C2000 MCU用組み込みコード生成による誘導機の制御 -

Last updated in C2000 TSP 1.6.1

# 1 はじめに

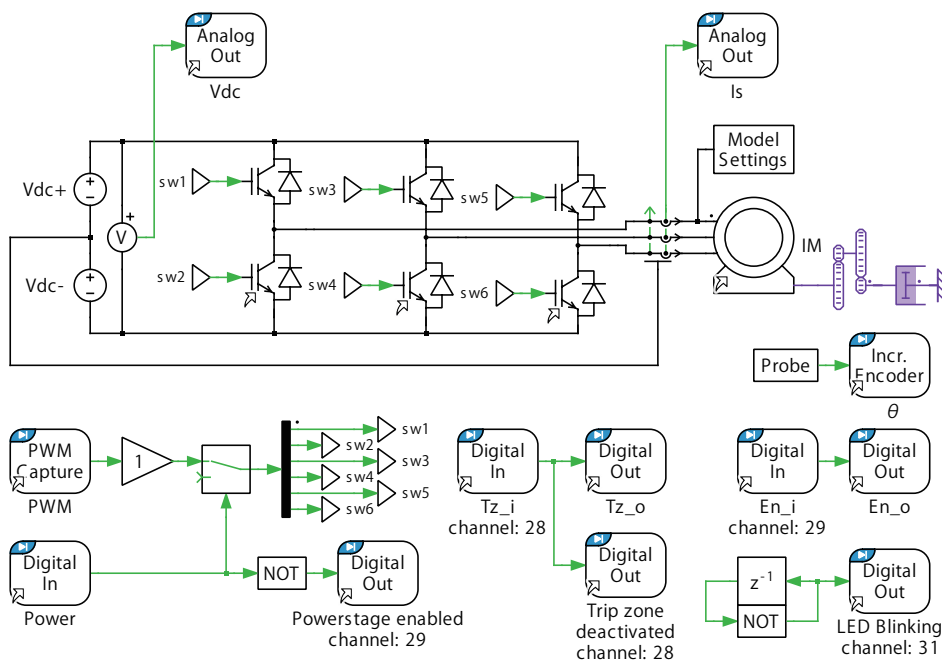
このデモモデルは、Texas Instruments社(TI) C2000 MCUを使用した誘導電動機システムのシミュレーションを示し、PLECS Embedded Coder の一般的なワークフローについて説明します。PLECS RT Boxと組み合わせることで、MCUの性能をリアルタイムに検証できます。

**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\*

図1: 誘導電動機システムの電源回路



## 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源回路が含まれ、"Controller"サブシステムには制御ループが含まれています。

### 2.1 電源回路

電源回路には、誘導機(Induction Machine: IM)と3相フルブリッジ電圧形インバータ(Voltage-Source Inverter: VSI)が含まれます。IMの機械的インタフェースには、ギアボックスを介して回転ダンパブロックの負荷がかかり、線形摩擦をエミュレートします。VSIは $V_{dc} = 400V$ のDC電圧源から供給され、3つのIGBTハーフブリッジパワー素子モジュールによって表されます。

6つのパルス幅変調(Pulse Width Modulation: PWM)スイッチング信号は、PLECS RT BoxコンポーネントライブラリのPWM Captureブロックによってサブシステムに取り込まれます。DC電圧とAC電流の測定値は、Analog Outputポートを介してサブシステムから出力されます。ロータの角度位置と回転速度は、Incremental Encoderブロックによってデジタル直交パルスに変換されます。エンコーダパルスには、"Plant"サブシステムマスクの対応するポートからアクセスできます。2つの

Digital Outputブロックは、外部デジタル入力信号をRT Boxの2つのデジタル出力ピンに転送します。ソフトウェアまたはトリップゾーンからPWM出力を有効/無効にするには、これらのピンをMCUのGPIOに接続する必要があります。MCUのPWM有効/無効機能のメカニズムについては、2.2で詳しく説明します。

## 2.2 Controller

"Controller"サブシステムでは、ロータベクトル制御が駆動システムに適用されます。基本構造を図2に示します。ここでは、ステータ電流がdqフレームで制御されます。

図2: 誘導電動機システムのControllerモデル

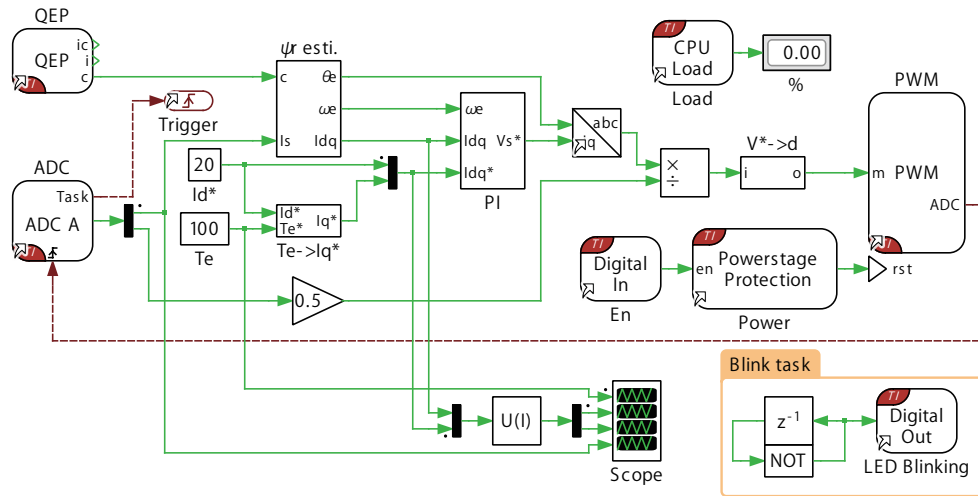


図3はロータ磁束と同期して回転するdqフレームの誘導機の等価回路を示しています。 $L_M$ 、 $L_{\sigma s}$ 、 $R_R$ の値は、モデルの初期化コマンドに記載されている元のマシンパラメータから計算します。

図3: dqフレームにおける誘導機の等価回路

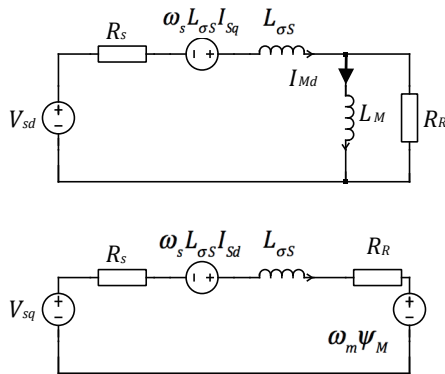
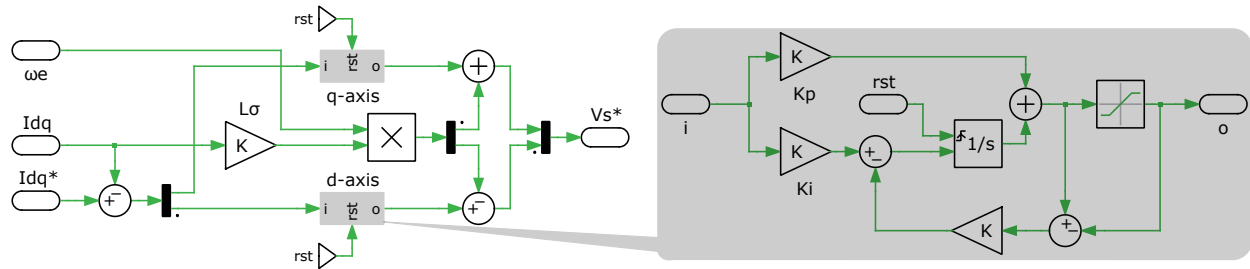


図4に示すように、d軸電流とq軸電流のPIコントローラはサブシステム"PI"に含まれています。比例ゲインと積分ゲインは、振幅最適(Magnitude Optimum: MO)法[2] [3]を使用して設計されます。

図4: dqフレームのPIコントローラ

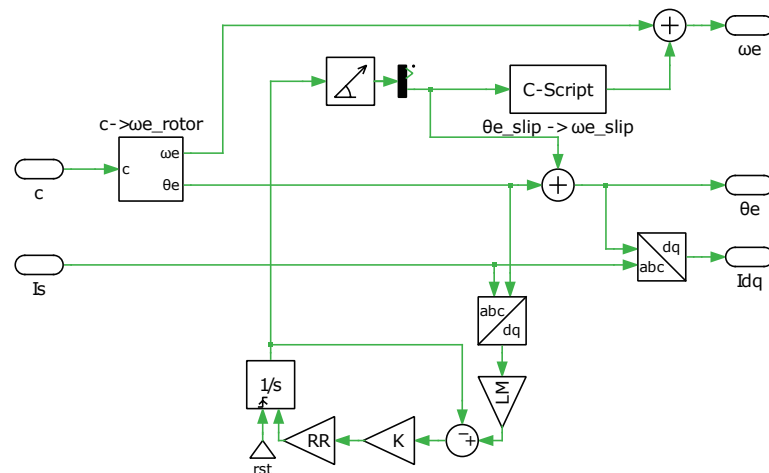


組み込みの磁束センサの使用を避けるため、[1]の322ページで紹介されている磁束推定器がサブシステム" $\Psi_r$  esti."に採用されています。測定した機械角速度 $\omega_m$ を利用して、ステータ電流はとしてロータ座標系(Rotor Reference Frame: RRF)に変換されます。RRFにおけるロータ磁束は以下の微分方程式で表されます:

$$\frac{d\vec{\Psi}_{r,xy}}{dt} = R_R \left( \frac{-d\vec{\Psi}_{r,xy}}{L_M} \right) + \vec{I}_{s,xy} \tag{1}$$

微分方程式に従って、 $\vec{I}_{s,xy}$  を入力として  $d\vec{\Psi}_{r,xy}$  を計算できます。RRF内のロータ磁束の"x"成分と"y"成分を直交座標->極座標変換ブロックで処理すると、スリップ角位置が得られます。スリップ角位置とロータの電気角位置を合計すると、回転磁束角 $\theta$ が得られます。 $\theta$ はさらに、ステータ電流をabcフレームからdqフレームに変換するために使用されます。ロータ磁束推定器の構造を図5に示します。

図5: ロータ磁束推定器の構造



### TI C2000 Targetライブラリコンポーネントの構成

DCリンク電圧とステータ電流の測定値は、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で使用でき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から各チャンネルにスケール係数とオフセット係数が提供されます。**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。

ロータの機械的な角速度は、直交デジタルパルス回転位置関連のカウント値に変換するQuadrature Encoder Counter (QEP)ブロックから取得します。

**Maximum counter value**は、**GPIO numbers**のインデックスとともに、実際のエンコーダハードウェアの構成に従って提供する必要があります。

ゲート信号はPWMブロックによって生成されます。**Carrier type**、**Carrier frequency**パラメータは、PWMブロックパラメータウィンドウの**全般**タブから、**Dead time**パラメータは**Output**タブから直感的に設定できます。PWMブロックへの入力は、[0,1]の範囲のデューティー比の形式でコントローラから取得します。各デューティー比信号はePWMモジュールのA出力とB出力の両方に供給されますが、極性は逆であることに注意してください。PWMブロックパラメータウィンドウの**Events**タブで、**ADC Trigger**パラメータをUnderflowとして設定しています。これにより、**全般**タブの**PWM generator**で構成した最初のePWMモジュールは、キャリア値が最小値に達するたびに、ADCの"start of conversion"インパルスを生成します。この構成では、PWMブロックのマスクに"ADC"という追加の出力ポートが表示されます。これは、赤色の破線の信号線により、ADCブロックの"Trigger"という入力ポートに接続されます。

制御タスクは、各ADC変換後に実行します。これは、**ADC**ブロックの"Task"という出力ポートをTI C2000 Targetコンポーネントライブラリの制御タスクトリガのポートに接続することによって構成します。

トリップゾーンサブモジュールは、トリップイベント後にパワーステージと関連するPWMブロックを無効にするために使用します。トリップイベントは、**Coder** -> **Coderオプション**ウィンドウの**ターゲット**タブの**Protections**サブタブで割り当てられたトリップゾーンGPIO入力にアクティブロー状態がある場合に検出されます。トリップイベントを検出すると、Powerstage Protectionモジュールは何もアクションを実行せず、one-shotトリップイベントをアクティブにするか、cycle-by-cycleトリップイベントを有効にすることができます。このモデルでは、Powerstage Protectionモジュールがone-shotトリップイベントを有効にします。これにより、PWM出力がPWMセーフ状態にラッチされ、Powerstage Protectionブロックを無効から有効に切り替えることによるのみクリアできます。

### 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は、コンピュータ上でオフラインモードで実行できるだけでなく、"Controller"サブシステムをTI C2000 MCU用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]、TI28P650DK9[9] LaunchPad、およびTI 28335[11]とTI 28388D [13] controlCARDをサポートしています。

さらに、デモモデルでは、TI 28377S [7] LaunchPad、TI 280039C [10]、TI 28379D [12] controlCARDのコード生成が可能です。これを設定するには、**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...** -> **初期化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、プラントのモデルを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)テストを行うこともできます。

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。
- **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。次に、**General**サブタブで、目的の**Build type**を選択します。
- 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を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、LaunchPadの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フォルダを見つけ(手順については[14]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。次に、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。

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 28069 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設定



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、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、ターゲットRT Boxに**ビルド**します。
- 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。

RT Box上で実行している"Plant"サブシステムまたは電源回路内では、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の前面パネルのAnalog Outコネクタを通じて送信されます。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。次に、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ピンを介して RT Boxに供給します。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、トリップゾーンイベントが有効になり、すべてのPWM出力が無効になります。トリップゾーンイベントが有効になると、LaunchPad Interfaceボード上の"DO-28"に対応するLEDはオフになります。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が点灯します。

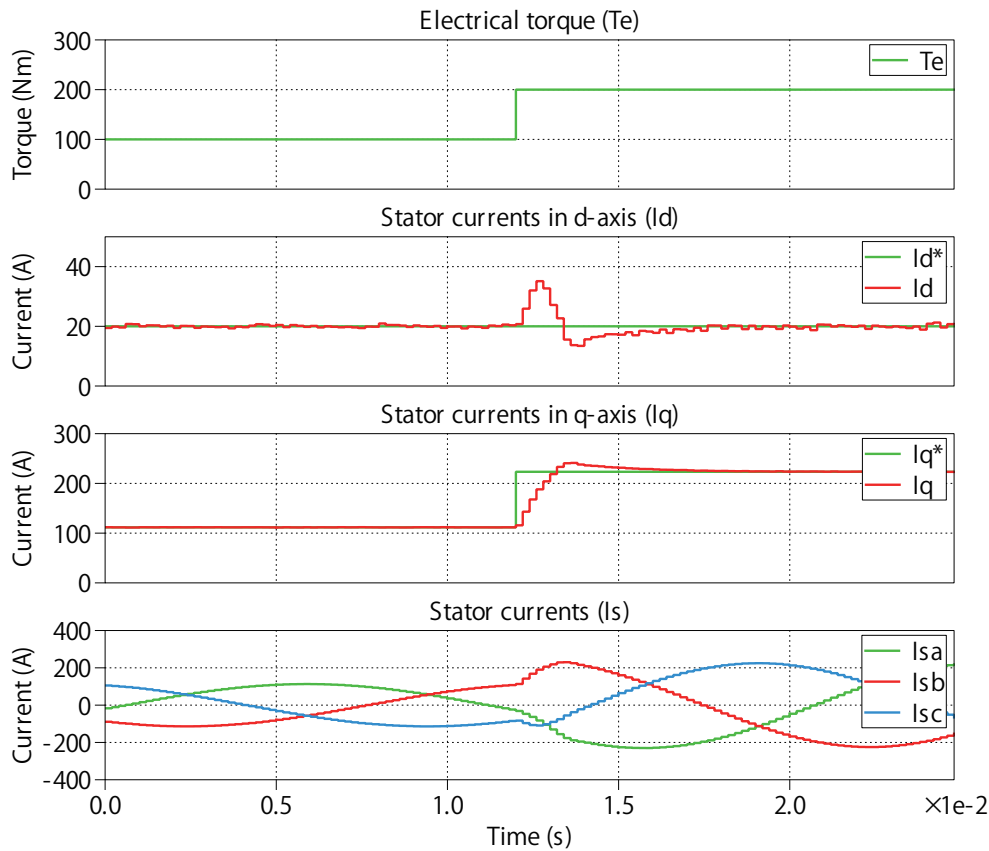
**注意** この段階で、RT Box LaunchPad Interfaceボード上の"DO-28"と"DO-29"に対応するLEDが点灯していることを確認します。

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。

- 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。

このデモ モデルでは、定数ブロック"Te"の値が**Coderオプション**ウィンドウの**パラメーターのインライン化**タブの**例外**リストに追加されているため、値をリアルタイムにオンザフライで変更することで、参照トルクのステップ変更を構成できます。[図7](#)に示すように、**外部モード**タブから適切な**トリガ制御**を設定することで、ステップ応答をリアルタイムで観察できます。

図7: Controller内のトルクリファレンスのステップ変化に対する過渡応答をリアルタイムで表示



## 4 まとめ

このモデルは、TI C2000 MCUの組み込みコード生成をサポートする誘導電動機システムを示しています。

## 5 参考文献

- [1] R. De Doncker, D. Pulle and A. Veltman, “Advanced Electrical Drives”, Springer, 2011.
- [2] Konstantinos G. Papadopoulos, “PID Controller Tuning Using the Magnitude Optimum Criterion”, Springer, 2015.
- [3] Damir Vrancic, “Magnitude Optimum Techniques for PID Controllers”, 2012.
- [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 F28P650DK9 LaunchPad development kit,  
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28P65X>.
- [10] TI C2000 F280039C controlCARD evaluation module,  
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD280039C>.
- [11] TI C2000 TMS320F28335 controlCARD,  
URL: <http://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28335>.
- [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>.
- [14] 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 1.0	初版
C2000 TSP 1.3.1	3つのIGBTハーフブリッジパワー素子モジュールのアサーションをオンに設定
C2000 TSP 1.4.1	フラックス推定ブロック、パワーステージ保護パラメータ、およびWebリンクを更新
C2000 TSP 1.5.1	28388Dおよび28379D controlCARDターゲットのサポートを追加
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

 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
<a href="http://www.plexim.com">http://www.plexim.com</a>	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	
<a href="https://kesco.co.jp">https://kesco.co.jp</a>	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。