

Embedded Code Generation *DEMO MODEL*

Six-Phase PMSM

6相PMSM

- デュアルスター6相永久磁石同期機の制御 -

Last updated in C2000 TSP 1.6.1

1 はじめに

多相同期機は電気自動車(Electric Vehicle: EV)業界でますます注目を集めています。多相同期機は、三相同期機と比較すると、トルク脈動の低減、DCリンク電流の高調波成分の低減、固定子起磁力(Magnetomotive force: MMF)波形の改善、効率の向上、相当たりの電流定格の低減などの可能性があります[1]。さらに、1相(または場合によっては複数の相)が失われた場合でも同期機は動作を継続できるため、信頼性が大幅に向上します。

多相同期機は、独立したエネルギー源を持つ個別のインバータによって駆動します。例えば、バッテリーとウルトラキャパシタ(Ultracapacitor: UC)の両方を使用するハイブリッドエネルギー貯蔵システム(Hybrid Energy Storage Systems: HESS)は、近年人気のあるソリューションです[2]。

このデモモデルは、カスケード速度および電流制御ループを使用して2つの電圧源インバータ(Voltage Source Inverter: VSI)によって駆動する、デュアルスター接続の6相永久磁石同期機(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM)のシミュレーションを紹介します。[PLECS TI C2000 Target Support Package](#)を使用してPLECSモデルから直接生成された組み込みコードを使用したモデルベースの制御設計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。

1.1 要件

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):

- [PLECS RT Box](#) 1台(PLECSおよびPLECS Coderのライセンス付き)
- TI C2000 MCU LaunchPad 1枚および[RT Box LaunchPad-Nucleo Interface](#)ボード1枚
- [RT Box Target Support Package](#)
- [TI C2000 Target Support Package](#)
- (オプション)モデルの初期化コマンドには、Matlab SimulinkまたはOctaveのControls Toolboxを使用した速度コントローラ的设计が含まれます。PLECS Blocksetを使用しており、Controls Toolboxが利用可能な場合は、モデル初期化コマンド内のマークされた行のコメントを解除してください。

Plantモデルは、RT Boxのすべてのバージョンで実行できます。Controllerモデルは、[3.2](#)で説明する、複数のMCUターゲットへの直接書き込みをサポートしています。TI 280049C LaunchPadの場合、スイッチS6、S8、およびS4をドット側に押して1に設定されていることを確認します。さらに、スイッチS3.1をBP(bypass)側に押して1に設定します。

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*

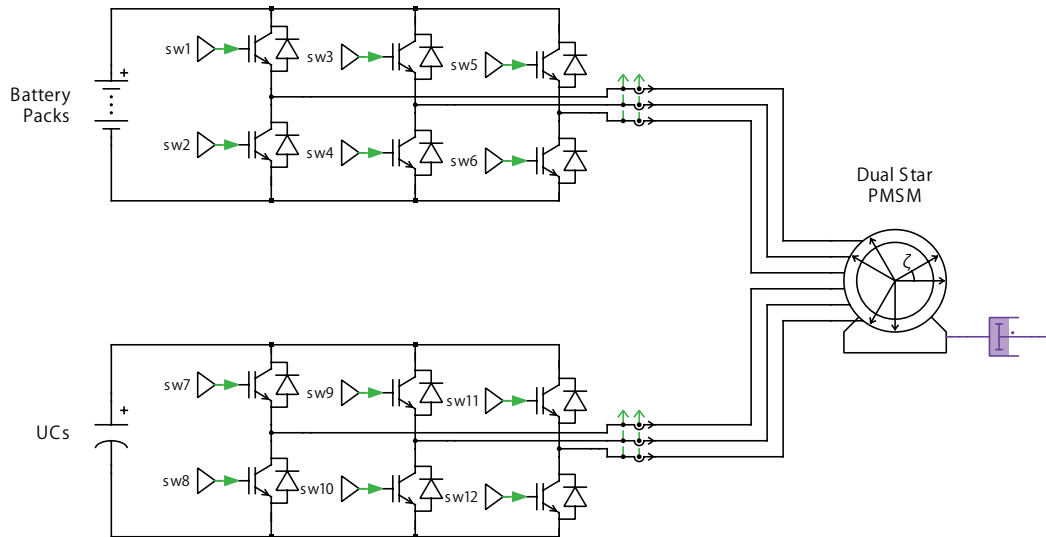
2 モデル

最上位レベルの回路図には、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。

2.1 Plant

このモデルの電力ステージを[図1](#)に示します。デュアルスター構成の6相PMSMで構成されています。2組のスター接続された3相スター巻線は、絶縁された中性点の空間内に30電気度ずれて配置されます。このデモでは、6相PMSMはライブラリにリンクされたコンポーネントではなくカスタマイズされたモデルであることに注意してください。

図1: 6相PMSM駆動システムの電源回路



2組の巻線は、個別のインバータから独立したエネルギー源、バッテリー、およびUCに接続されます。始動および加速プロセス中は、バッテリーとUCの両方が電力を供給します。UCは、短期的な電力需要を満たすために急速充電が必要な場合に最適です。一方、長期的なエネルギーを供給にはバッテリーが選択されます。これら2つをハイブリッドバッテリーに組み合わせることで、両方のニーズを満たすことができ、バッテリーのストレスが軽減され、寿命が長くなります[3]。

このデモでは、UCは大きなピーク電力を供給するために使用し、バッテリーパックは比較的一定の平均電力を供給します[4]。ハードウェアインザループ(Hardware-In-the-Loop: HIL)テストではDC電圧源を使用するだけでDC電力消費を計算できるため、バッテリーパックとUCは両方とも400VのDC電圧源としてモデル化します。

デュアルスター永久磁石同期機モデル

6相デュアルスター電動機は、2セットのdqロータの座標参照系でモデル化されます[5]。最初のセットdq1では、ロータのd軸が最小のエアギャップに位置合わせされ、ゼロ角度のロータ位置はd軸が最初の位相に位置合わせされるときになります。2番目のセットdq2は $\pi/6$ だけシフトされます。

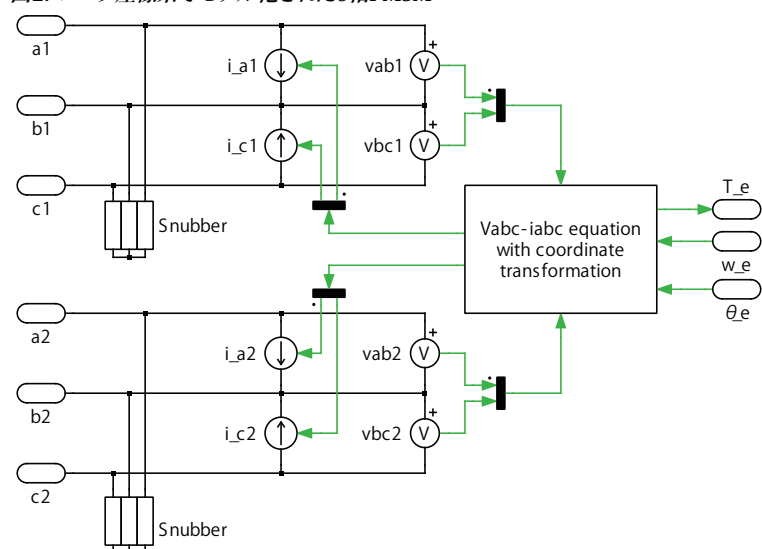
各巻線セットの相電圧は電動機モデルの入力であり、2つの座標変換ブロックを使用してdq12フレームに変換されます。ステータ電流 i_{d1} 、 i_{q1} 、 i_{d2} 、 i_{q2} は、電動機モデルの状態変数および出力です。このデモでは、高出力アプリケーションで通常使用されるロータのダンパパッケージは備えていません。図2は、従来のロータ座標系(Rotor Reference Frame: RRF)でモデル化されたPMSMを示しています。

モデルの状態方程式は次のとおりです:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i} = \mathbf{L}^{-1}(-R_s \mathbf{i} - \omega \mathbf{I} \mathbf{\Lambda} + \mathbf{v}_s)$$

ここで、 \mathbf{i} はステータおよびダンパ巻線の電流ベクトル、 \mathbf{L} はインダクタンス行列、 R_s はステータおよびダンパ巻線のスカラ抵抗、 ω は電気回転速度、 \mathbf{I} は固定子位相のスパース結合行列、 $\mathbf{\Lambda}$ は回転子磁束ベクトル、 \mathbf{v}_s はステータ電圧です。上記の式では、電流、電圧、磁束ベクトルは次の形式になります:

図2: ロータ座標系でモデル化された6相PMSM



$$i = \begin{pmatrix} i_{sd1} \\ i_{sq1} \\ i_{sd2} \\ i_{sq2} \end{pmatrix}, \quad v_s = \begin{pmatrix} v_{sd1} \\ v_{sq1} \\ v_{sd2} \\ v_{sq2} \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad \Lambda_s = \begin{pmatrix} \Lambda_{sd1} \\ \Lambda_{sq1} \\ \Lambda_{sd2} \\ \Lambda_{sq2} \end{pmatrix}$$

上記の式では、電流、電圧、磁束ベクトルは次の形式になります:

$$L = \begin{pmatrix} L_{md} + L_{\sigma} & 0 & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{mq} + L_{\sigma} & 0 & L_{mq} \\ L_{md} & 0 & L_{md} + L_{\sigma} & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & L_{mq} + L_{\sigma} \end{pmatrix}$$

磁化インダクタンス L_{md} と L_{mq} は、両方の巻線セットで等しいと想定します。ステータの漏れインダクタンスは L_{σ} 項で表されます。鎖交磁束は次の式で表します:

$$\Lambda_s = Li + \begin{pmatrix} \Psi \\ 0 \\ \Psi \\ 0 \end{pmatrix}$$

磁石によって誘導される磁束は、磁束鎖交の d 成分にのみ影響します。疎行列 L はステータ位相を結合し、次の非ゼロ要素のみを持ちます: $I_{1,2} = -1$, $I_{2,1} = 1$, $I_{3,4} = -1$ および $I = 1$ 。

注意 スナバ抵抗: 同期器モデルは、2つの電圧源インバータ(Voltage Source Inverter: VSI)に接続するステータ端子における電流源の実装に依存します。これは、VSI内部のダイオードの状態を判別できないため、同期器のオープン巻線構成では問題となります。VSIが接続されていないとき、またはハーフブリッジインバータのデッドタイム中に巻線間に定義された電位を設定するには、スナバ抵抗を追加する必要があります。このスナバ抵抗は、抵抗値が非常に高い場合、または機械の漏れインダクタンスが非常に小さい場合、システムがスティッフになる可能性があります(関連する時定数は $\tau = L_{\sigma}/R_{\text{snubber}}$ です)。スナバは $R=10\text{k}\Omega$ として選択し、これにより必要なシミュレーション精度を犠牲にすることなく、PLECS Standaloneのnon-stiff DOPRIソルバを使用してモデルをシミュレートできます。

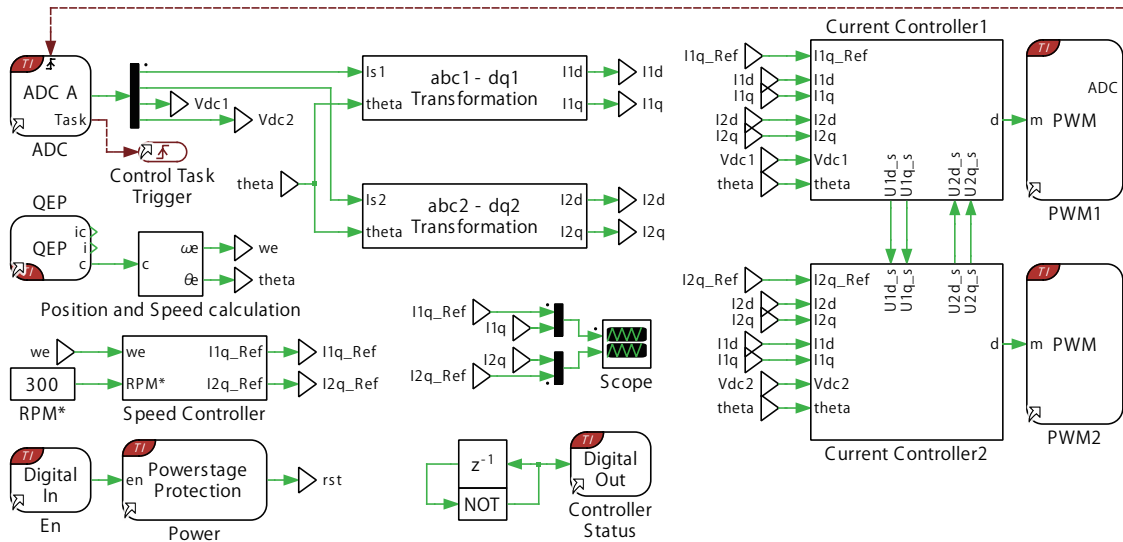
2.2 Controller

"Controller"サブシステムモデルを [図3](#)に示します。カスケード速度と電流の制御方式は [\[4\]](#)のFig. 8に示されている図に従います。

"Speed Controller"サブシステムには、まず速度PIレギュレータが含まれており、その後合計電流需要をインバータ1と2に個別に分割するローパスフィルタ(Low-Pass Filter: LPF)が含まれています。生成されたインバータ1および2のq軸電流リファレンス(タグ"I1q_Ref"および"I2q_Ref")は、それぞれサブシステム"Current Controller1"および"Current Controller2"に入力されます。

電流制御構造は、[図4](#)に示すd-q座標系の等価回路に従って導出されます。等価回路間には、逆起電力電圧源と相互インダクタによって表されるいくつかの結合が存在します。最初の巻線の電流コントローラを [図5](#)に示します。フィードフォワード項は分離の目的で追加されており、2つのPIコントローラの出力から見たプラントは、 $L_d = L_{md} + L_{\sigma}$ ($L_q = L_{mq} + L_{\sigma}$)と R_s の直列接続になります。したがって、PIコントローラは、最大ゲインアプローチを使用して、d軸とq軸間で独立してパラメータ化できます。q軸電流のリファレンスは速度コントローラによって提供され、d軸電流はゼロに設定されます。PIコントローラの出力はデューティー比に変換され、PWM出力ブロックに供給されます。

図3: 6相PMSM駆動システムのController回路



Controllerモデルをそれぞれの同じADC-Aユニットを使用する異なるマイクロコントローラプラットフォームに適用可能にするために、3番目の相電流が $i_c = -(i_a + i_b)$ を満たすと仮定して、各インバータの3つすべてではなく2つの相電流のみが測定されることに注意してください。

図4: 制御設計のためのd-q座標系における6相PMSMの等価回路

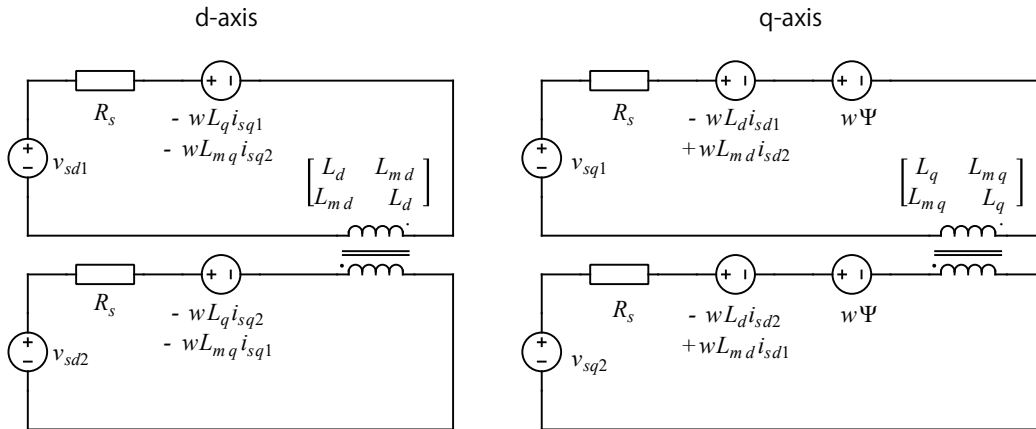
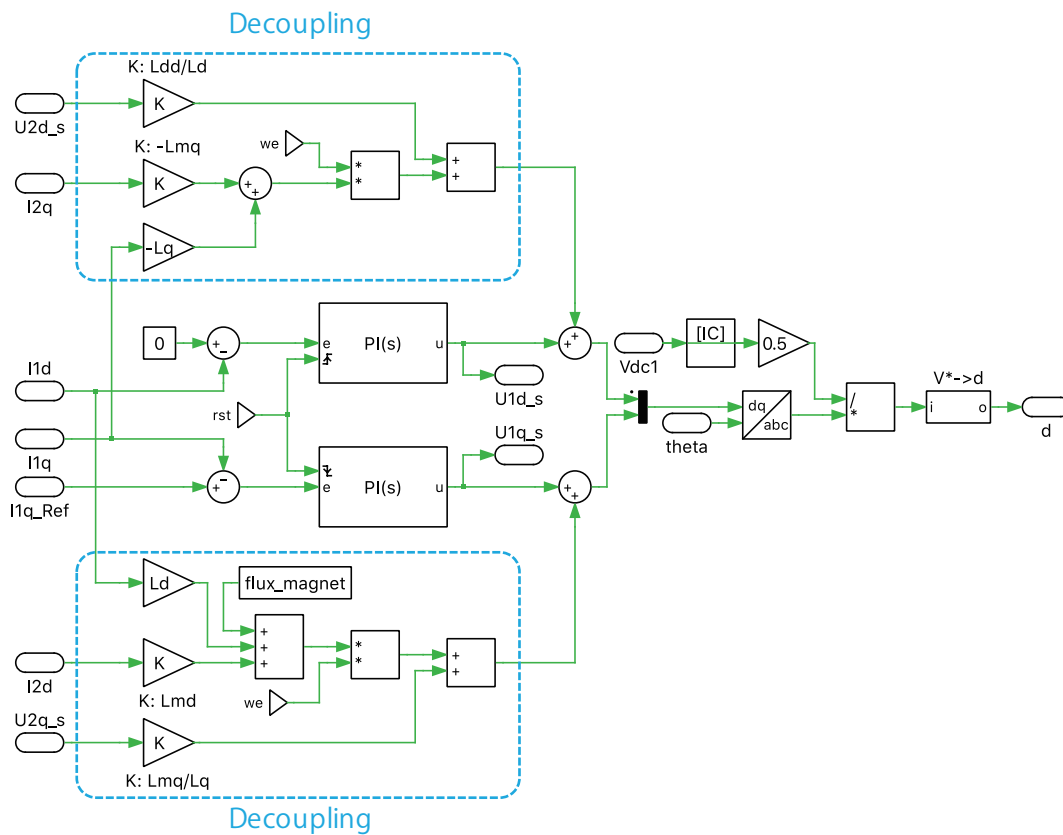


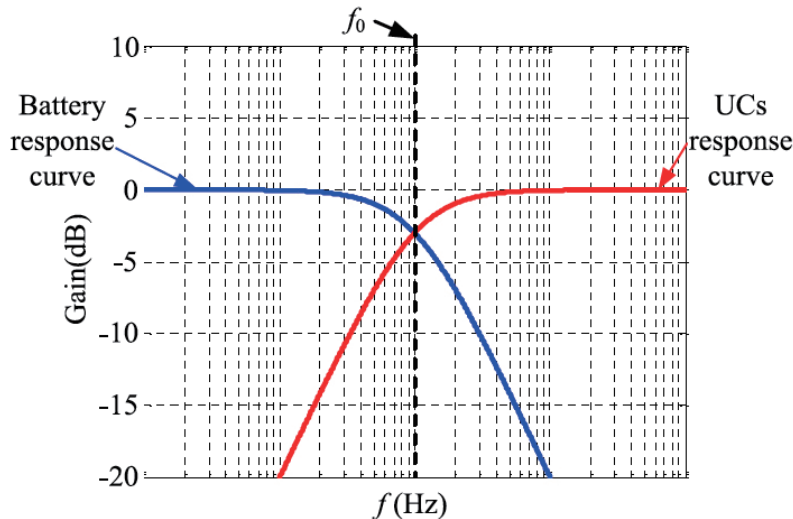
図5: 第1固定子巻線の電流制御構造



周波数分割協調制御

周波数の分割協調制御戦略により、UCは負荷電力変動の高周波成分に対応し、バッテリーパックは低周波応答を提供します。周波数分割ユニットに用いられるローパスフィルタ(Low-Pass Filter: LPF)の周波数応答を図6に示します[4]。

図6: LPFによる周波数の分割協調制御の応答



3 シミュレーション

3.1 PLECSオフラインシミュレーション結果

シミュレーションモデルは、シミュレーションメニュー -> スタートを選択すると、デスクトップコンピュータ上でオフラインで実行できます。図7は、「Plant」サブシステムのPMSMの結果を示しています。

同期機は0秒で300RPMの速度リファレンスで起動します。大きな過渡トルクは主に、UCにより供給されるインバータ2の電流によって提供されます。また、図6で説明したLPFの効果により、バッテリーパックから供給されるインバータ1の電流はゆっくりと増加します。

1.5秒後、同期機は速度は定常状態に近づき、インバータ2はほとんど電流を供給しなくなり、メインの機械トルクはインバータ1を介してバッテリーパックによって提供されます。この時点で、速度指令が300RPMから400RPMに上昇します。同期機は速度が再び400RPMの定常状態に達するまで、同様のダイナミクスを継続します。

3.2 TI C2000 Targetの構成

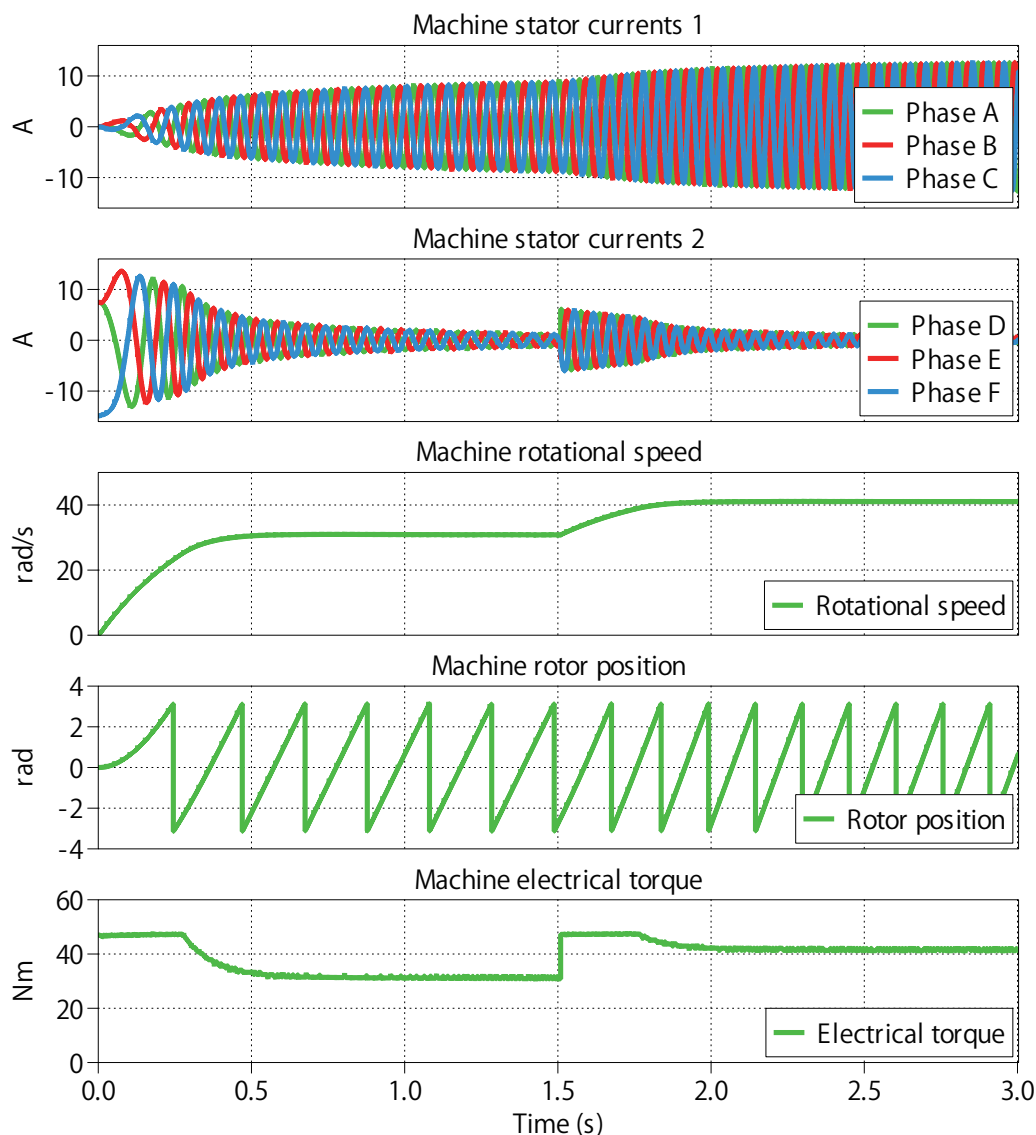
このデモモデルのシミュレーションをコンピュータ上でオフラインモードで実行するだけでなく、「Controller」サブシステムをTI C2000 MCUのターゲット固有のコードに直接変換することもできます。すべてのペリフェラルブロック(ADC、PWMなど)のデフォルト I/O 構成は、TI 280039C [6]、TI 280049C [7]、TI 28069 [8]、TI 28379D [10]、TI 28P650DK9 [11] LaunchPad、および TI 28388D [14] controlCARD をサポートします。

注意 TI 280049C LaunchPadの場合、スイッチS6、S8、S4をドット側に押しつけて1に設定してください。さらに、スイッチS3.1をBP(bypass)側に押しつけて1に設定してください。

さらに、デモモデルでは、TI 28377S [9] LaunchPad、TI 280039C [12]、TI 28379D [13] controlCARD用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。

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:

図7: 300RPMの速度リファレンスで起動し、1.5秒後に400RPMへ変更する6相PMSMのオフラインシミュレーション結果



- 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、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ジャンパが開いていることを確認してください。

3.3 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8に示します。ここでは、評価キットであるTI 28069M 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、以下の手順に従います。RT Boxにビルドする前に、3.2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。

3.4 閉ループHILテストの実行

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。

RT Box LaunchPad Interfaceボード上のスイッチ"DI-29"をLowからHighに切り替えて、MCUを有効にします。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。"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。

図8: RT Boxを使用したHIL検証のハードウェアセットアップ



注意 この段階で、RT Box LaunchPad Interfaceボード上の"DO-29"に対応するLEDが点灯し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。

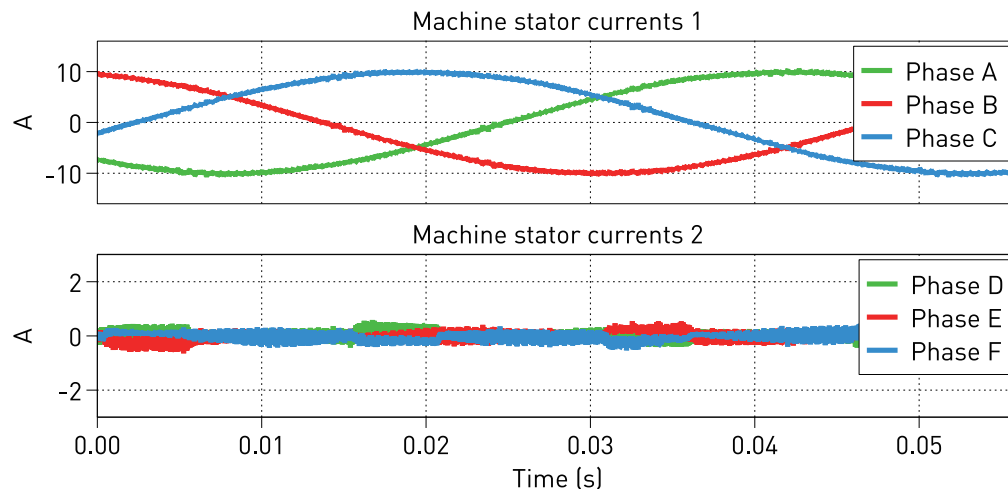
- まず、PLECS RT Boxの**外部モード**から"Plant"サブシステムを切断します(接続している場合)。
- そして、**Coder -> Coder オプション...**ウィンドウ左側の**システム**リストから、"Controller"を選択します。

- 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、3.3の手順に従ってRT Boxの外部モードに接続します。

図9のシミュレーション結果は、デフォルトの300RPM速度リファレンスでのマシンのリアルタイム結果です。図は、速度が300RPMで安定した実行時の波形を示しています。これらは、図7のオフラインシミュレーション結果とよく一致しています。

図9: PLECS RT Box 1を使用してリアルタイムで実行した6相PMSM波形



MCU上で実行される"Controller"サブシステム内の速度リファレンスは、モデルを構築する前に、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、オンザフライで変更できます。300RPMから400RPMまでの速度リファレンス信号のジャンプはリアルタイムで実行でき、定常状態での最終波形も図7のオフラインシミュレーション結果と良好な一致を示しています。

結論として、"Plant"モデルは固定ステップサイズ $T_{disc.plant} = 7\mu s$ で離散化しており、すべてのRT Boxプラットフォームで実行可能です。生成されたCコードはPLECS RT Box上にビルドされ、平均80%の実行時間を要します。"Controller"モデルは、スイッチング周期と同じ時間ステップでMCU上で実行します。つまり、 $T_{disc.ctrl} = T_{sw} = 1/10 \text{ kHz} = 100\mu s$ となります。

4 まとめ

このモデルは、EV業界で新たな話題となっているハイブリッドエネルギー貯蔵システムを備えた6相PMSMドライブを実証しています。制御システムは、TI C2000 MCUの組み込みコード生成をサポートしています。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。コントローラは、外側の速度ループと内側の電流ループで構成しています。電流ループは、各インバータに電流リファレンスを分配するための周波数の分割協調制御と、各インバータのd-q軸電流に対するPI補償を備えています。

5 参考文献

- [1] J. Karttunen, S. Kallio, P. Peltoniemi, P. Silventoinen and O. Pyrhönen, "Dual three-phase permanent magnet synchronous machine supplied by two independent voltage source inverters", *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Sorrento, Italy, 2012, pp. 741-747.
- [2] S. Hu, M. Xiong, Z. Liang and X. He, "Torque Distributed Control Strategy for the Dual Three- Phase PMSM in Hybrid Energy Storage System Application", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2544-2552, April 2020.

- [3] Cadex Electronics Inc., “How does a Supercapacitor Work?” [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor. [Accessed: Apr, 2021].
- [4] S. Hu, Z. Liang, W. Zhang and X. He, “Research on the Integration of Hybrid Energy Storage System and Dual Three-Phase PMSM Drive in EV”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6602-6611, Aug. 2018.
- [5] S. Ebrahimi, N. Amiri, L. Wang and J. Jatskevich, “Efficient Modeling of Six-Phase PM Synchronous Machine-Rectifier Systems in State-Variable-Based Simulation Programs”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 3, pp. 1557–1570, Sept. 2018, doi: 10.1109/TEC.2018.2829808.
- [6] TI C2000 F280039C LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F280039C>.
- [7] TI C2000 Piccolo MCU F280049C LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F280049C>.
- [8] TI C2000 Piccolo MCU F28069M LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28069M>.
- [9] TI C2000 Delfino MCU F28377S LaunchPad development kit,
URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/sprui25>.
- [10] TI C2000 Delfino MCU F28379D LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>.
- [11] TI C2000 F28P650DK9 LaunchPad development kit,
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28P65X>.
- [12] TI C2000 F280039C controlCARD evaluation module,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD280039C>.
- [13] TI C2000 F28379D controlCARD development kit,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28379D>.
- [14] TI C2000 F28388D controlCARD evaluation module,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28388D>.

改訂履歴:

- C2000 TSP 1.3.1 初版
- C2000 TSP 1.4.5 速度計算ブロックと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
- <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

© 2002–2023 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。