

RT Box *DEMO MODEL*

Vector Control of an Induction Machine 誘導機のベクトル制御

Last updated in RT Box TSP 3.2.2

1 はじめに

このデモモデルは、ベクトル制御(Field-Oriented Control: FOC)を備えた誘導電動機の駆動システム特徴としています。駆動システムには400VのDC電圧が供給され、200Nmのトルクを生成します。モデルは、"Plant + Controller"というサブシステムで構成されます。このサブシステムには、ベクトル制御方式を採用した駆動システムとコントローラで構成しています。次章では、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。

RT Boxでリアルタイム実行するには、固定ステップソルバを使用してモデルを実行する必要があります。離散化ステップサイズパラメータは、生成されたコードの基本サンプル時間を指定し、物理モデルと制御ドメインの状態空間方程式を離散化するために使用します。実行時間は、RT Boxハードウェア上でPLECSモデルの1回の離散ステップを実行するのにかかる実際の時間を表します。このデモモデルで選択された離散化ステップサイズと各コアの平均実行時間を表1に示します。

表1: 1台のRT Boxでのデモの離散化ステップサイズと平均実行時間

	Core 0: exec. time / step size	Core 1: exec. time / step size
RT Box 2, 3 or 4	3.5 μ s / 5 μ s	2 μ s / 100 μ s
RT Box 1	5 μ s / 5 μ s	N/A

1.1 必要なハードウェアおよびソフトウェア

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.com¹から入手可能):

- 1台のRT Box²、PLECS³とPLECS Coder⁴ライセンスを1つずつ
- [RT Box Target Support Package](#)⁵
- [RT Box User Manual](#)⁶のクイックスタートガイドに記載されている手順に従って、PLECSとRT Boxを設定してください。
- フロントパネルのループバック設定でRT Boxを接続するための37ピンD-Subケーブル2本。

¹ <http://www.plexim.com>

² https://www.plexim.com/products/rt_box

³ https://www.plexim.com/products/plecs/plecs_standalone

⁴ https://www.plexim.com/products/plecs/plecs_coder

⁵ https://www.plexim.com/download/rt_box

⁶ <https://www.plexim.com/sites/default/files/rtboxmanual.pdf>

このデモモデルは主にマルチタスクモードを実演するものです。すべてのRT Boxはマルチタスクに対応していますが、実装方法はモデルによって異なります。

- ターゲットがRT Box2または3の場合、メインCPUコア(Core 0)は、サンプル時間Ts_plantでプラントを"Base task"として実行します。もう1つのコア(Core 1)は、Ts_controllerのサンプル時間と並行して"Controller"タスクで閉ループ制御を実行します。これははるかに遅く、通常はコンバータのスイッチング周期に等しくなります。に、計算処理を異なるコアに分割することで、RT Box 2または3のマルチコア機能が発揮されます。さらに、セットアップは後でHILテストやRCPテストに簡単に移行できます。
- ただし、ユーザが利用できるRT Box 1が1台しかない場合、このモデルは、RT Box 1の唯一のCPUコア上でマルチタスク機能を実行することになりますが、プリエンティブマルチタスク方式になります。この場合、"Base task"は、サンプル時間Ts_plantでプラント計算を最高優先度で実行します。"Controller"タスクは、Ts_controllerのサンプル時間に優先度の低いバックグラウンドタスクとして実行します。

Coderオプション...ウィンドウのタスクタブの設定を確認してください。

注意

このモデルには、次から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。

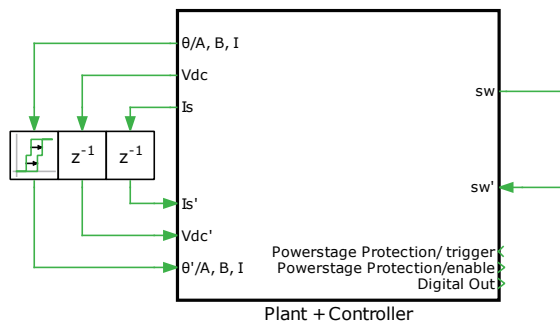
PLECS Standalone: シミュレーションメニュー + シミュレーション・パラメータ... → 初期化

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、プラントモデルとコントローラモデルの両方を含む1つのサブシステムが含まれています。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します。この手順は、RT Boxのモデルコードを生成するために必要です。

図1: 誘導機駆動システムモデルのトップレベル回路図



2.1 電源回路

電力回路には、誘導機(Induction Machine: IM)と3相フルブリッジ電圧源インバータ(Voltage Source Inverter: VSI)が含まれています。IMの機械的インタフェースは、ギアボックスを介して線形摩擦ブロックによって負荷がかかります。Vdc = 400VのDC電圧源Viは、3つのIGBTハーフブリッジパワー素子モジュールで構成するVSIに電力を供給します。

6つのスイッチング信号は、PLECS RT Box Component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るため、サブシステムの外部で測定できるようになります。

2.2 コントロール

コントローラ部では、DCリンク電圧とステータ電流の測定値がAnalog Inブロックによって取り込まれます。ロータの機械的な角速度は、直交デジタルパルスを変換するQuadrature Encoder Counterブロックから取得します。

駆動システムにはロータフィールド指向制御(Rotor-Field Oriented Control: RFOC)を適用し、その基本構造を[図3](#)に示します。ステータ電流はdqフレームで制御されます。

dqフレームで生成された電圧リファレンスは abcフレームに変換され、3相変調指数発生器ブロックを通して3相変調指数を生成します。3相変調指数発生器ブロックのマスクダイアログでは、単純な正弦波PWMまたは他の空間ベクトルPWM変調手法を選択できます。

[図4](#)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、モデル初期化コマンド

図2: 誘導機駆動システムの電源回路

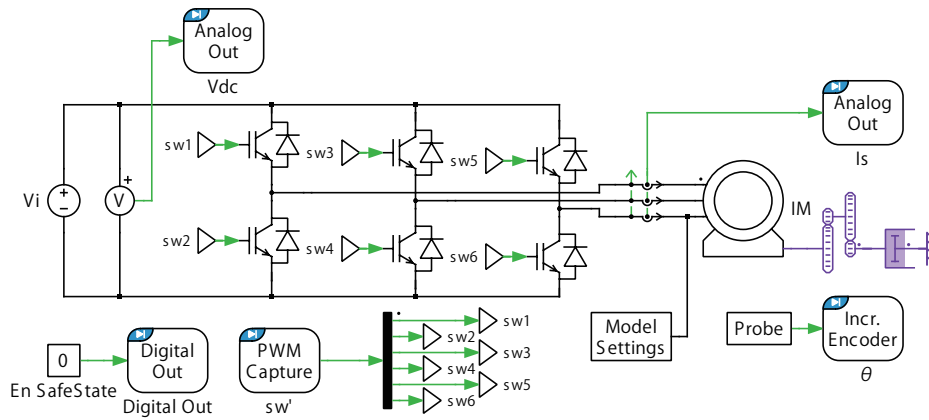
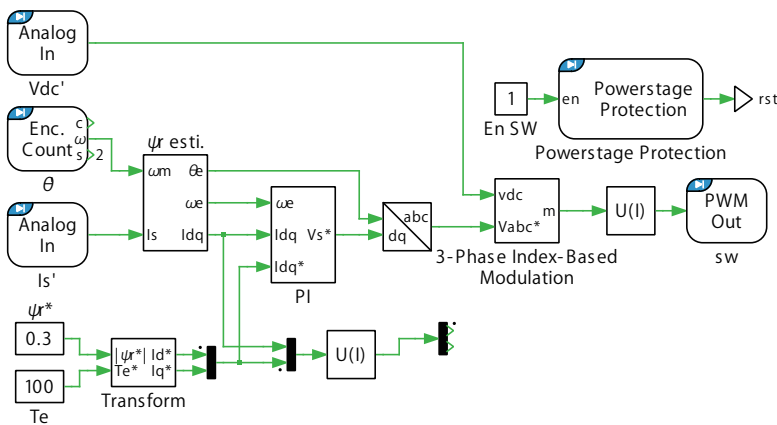


図3: 誘導機駆動システムのControllerモデル



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(第1章を参照)。

図5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、MOC (Magnitude Optimum Criterion)を使用して設計されます。詳細は、RT Box Target Support Packageの"昇圧コンバータ (Boost Converter)"デモモデルを参照してください。

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 esti."に採用されています。測定した機械角速度 ω_m を利用して、ステータ電流は $\vec{I}_{s,xy}$ 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 $d\vec{\Psi}_{r,xy}$ は以下の微分方程式で表されます:

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

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、回転磁束角位置 θ_e が得られます。 θ_e 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6に示します。

図4: dqフレームにおける誘導機の等価回路

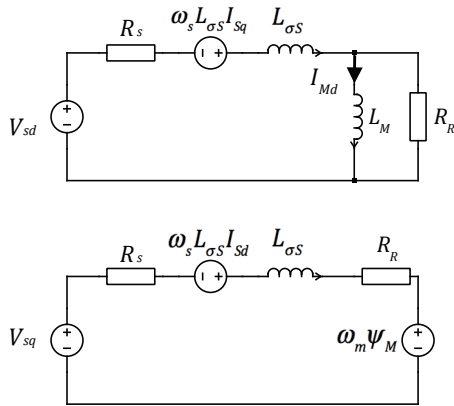
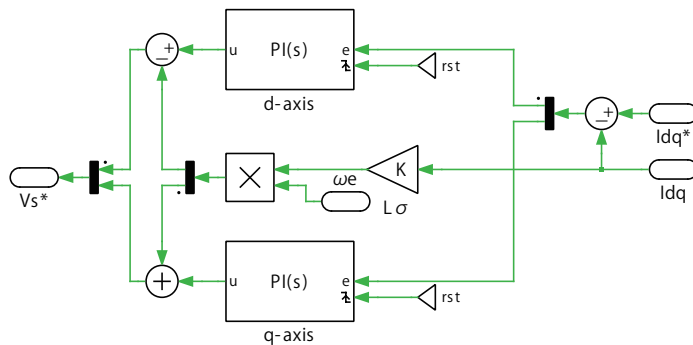


図5: dqフレームのPIコントローラ



dqフレームの電流リファレンスは、サブシステム"Transform"によってトルクと磁束のリファレンスから変換されます。

3 シミュレーション

このモデルは、コンピュータ上のオフラインモードでも、PLECS RT Box上のリアルタイムモードでも実行できます。リアルタイム操作を行うには、[図7](#)に示すように1台のRT Boxで"Plant + Controller"をセットアップする必要があります。

1台の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:

- 1 1本のDB37ケーブルをAnalog OutインターフェースとAnalog Inインターフェースに接続し、もう1本のDB37ケーブルをDigital OutインターフェースとDigital Inインターフェースに接続します([図7](#)を参照)。
- 2 **Coderオプション...**ウィンドウの**システム**リストから、"Plant + Controller"サブシステムを選択し、RT Boxに**ビルド**します。
- 3 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**にチェックします。

図6: ロータ磁束推定器の構造

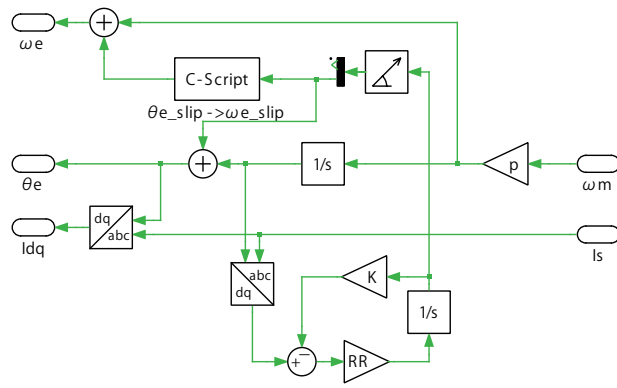
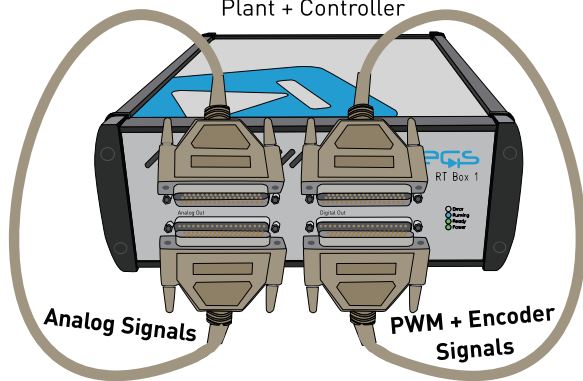


図7: 本デモモデルでリアルタイム動作を行うためのハードウェア構成
Plant + Controller



注意

プラント側では、"En SafeState"と"Rst SafeState"手動切替スイッチの両方がfalseに設定されています。これらの信号はそれぞれDO-9とDO-10を介して出力され、RT Boxのデジタル出力ポートとデジタル入力ポートの間にDB37ケーブルが接続されている場合に、Powerstage Protectionブロックの"Controller"タスク(DI-9)と"reset" Digital Inブロック(DI-10)によって受信されます。

シミュレーション開始時、Powerstage Protectionブロックは安全状態です。これにより、すべてのPWMがPWM OutブロックのProtectionタブで指定したとおり、安全状態になります。Powerstage Protectionブロックの"en"入力に立上がりエッジが入力されると、通常の動作を再開します。

オフラインシミュレーションモード(シミュレーションメニュー -> 開始)では、0.1秒後に"reset"のDigital Inブロックにステップ信号が印加され、立上がりエッジを生成します。外部モードに接続したRT Box上でモデルをリアルタイムで実行する場合、プラント内の"Rst SafeState"手動切替スイッチをfalseからtrueに切り替えることで通常動作を開始します。この動作により、"reset" Digital In(DI-10)に立上がりエッジが生成されます。

Powerstage Protectionを作動させるには、"En SafeState"手動切替スイッチをfalseからtrueに設定してください。安全状態を終了するには、まず"En SafeState"をfalseに戻し、次にRst SafeState"をfalseからtrueに切り替えて、通常の動作を再開してください。同時に、Powerstage Protectionブロックの'enable'出力は、PIコントローラの積分成分をリセットします。

詳しい説明については、Powerstage Protectionブロックのヘルプを参照してください。

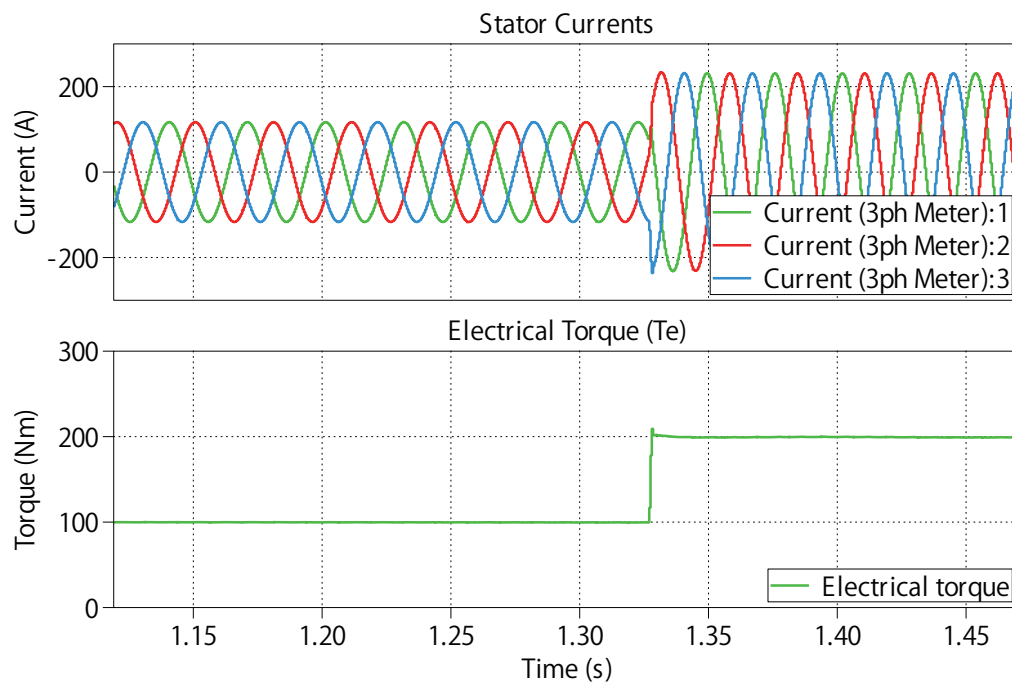
ステータ電流、回転速度、電気トルクはプラント側のPLECSスコープに表示されます。XYプロットのPsi_rにはロータ磁束を

表示し、定常動作では円になるはずですが。システムの過渡的な動作、たとえばトルクリファレンスが100Nmから200Nmへステップ変化する様子を観察するには、以下のシナリオに従います:

- RT Boxの外部モードで**自動トリガの有効化**にチェックされていることを確認してください。
- サブシステムの**Coder オプション...**ウィンドウの**外部モード**タブで、**ターゲットチャンネル**パラメータを[Electricaltorque]に切り替えます。
- **ターゲットレベル**パラメータを150に設定し、**ターゲット遅れ(steps)**を-50000に設定します。
- "Controller"タスクの定数ブロック" T_e "をデフォルト値の100から200に変更します。

図8に示すように、ステップの変化はプラントトポロジ上のスコープによってキャプチャされます。

図8: Controllerタスクにおけるトルクリファレンスのステップ変化に対する過渡応答



4 まとめ

このモデルは、HILテストとRCP向けにオフラインシミュレーションとリアルタイム動作の両方で実行できる誘導機駆動システムを示しています。

5 参考文献

- [1] R. De Doncker, D. Pule and A. Veltman, "Advanced electrical drives", Springer, 2011

改訂履歴:

RT Box TSP 1.8.5 初版

RT Box TSP 2.1.5 IGBTハーフブリッジでアサーションを有効にし、PWM出力ブロックにデッドタイムを追加

RT Box TSP 2.1.7 有効化/無効切り替え方式を追加し、ライブラリのPIコントローラコンポーネントを使用

RT Box TSP 2.2.1 Powerstage Protection ブロックを使用してスイッチングを有効/無効にする

RT Box TSP 3.0.1 3相変調指数発生器ブロックを使用して、より多くの3相インバータ変調戦略を提供し、またRT Box 1のマルチタスク機能を使用するために単一のボックスモデルを更新

RT Box TSP 3.0.3 2つの別々のRT Boxを持つモデルを削除し、マルチタスク機能を使用して単一のRT Boxのみを保持

RT Box TSP 3.2.2 一貫したオフラインおよびリアルタイムのパワーステージ保護動作を保証するためにモデルを調整

Pleximへの連絡方法:

☎ +41 44 533 51 00 Phone

✉ Plexim GmbH Mail

Technoparkstrasse 1

8005 Zurich

Switzerland

@ info@plexim.com Email

<https://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

✉ Keisoku Engineering System CO.,LTD. Mail

1-9-5 Uchikanda, Chiyoda-ku

Tokyo, 101-0047

Japan

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

RT Box Demo Model

© 2002–2026 by Plexim GmbH

このマニュアルで説明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の書面による事前の同意なしに、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。

本マニュアルは、Plexim社の英文マニュアルを日本語に翻訳したものです。本マニュアルと英文マニュアルとで差異がある場合、英文マニュアルを正とします。

本マニュアルの内容に基づいて発生した負傷や損害などに対して、Plexim GmbHおよび計測エンジニアリングシステム株式会社は一切責任を負いません。製品とアプリケーションに関連したリスクを最小限に抑えるため、ユーザが適切な設計および保護対策を用意する必要があります。