

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 3.0.3

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 or 3	3 μ s / 5 μ s	2 μ s / 100 μ s
RT Box 1	3.4 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.comから入手可能):

- 1台のRT Box、PLECSとPLECS Coderライセンスを1つずつ
- RT Box Target Support Package
- RT Box の初期セットアップについては、RT Box User Manualのクイックスタートガイドに記載されている、PLECSとRT Box の設定手順に従います。
- 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。

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あり、RT Box 1、2、または3で動作します。

- 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、プリエンプ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、以下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:

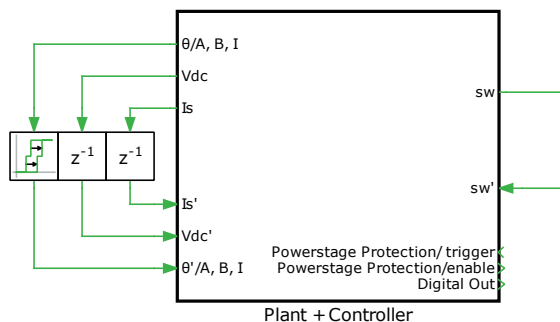
PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

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

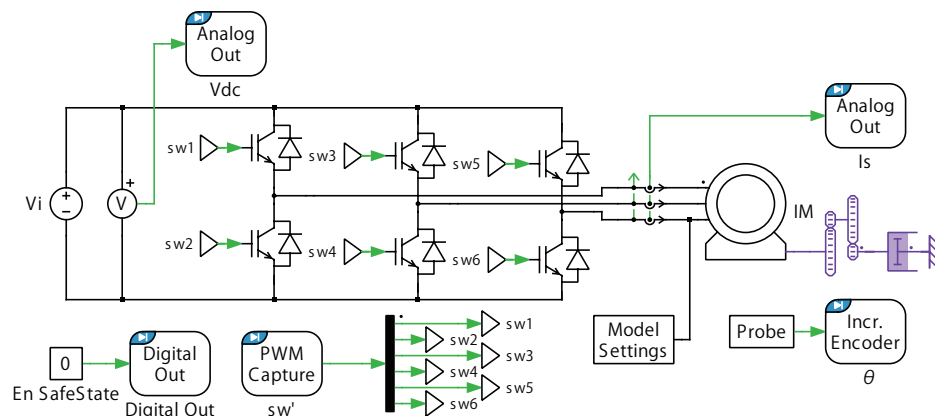


2.1 電源回路

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。

図2: 誘導機駆動システムの電源回路



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3: 誘導機駆動システムのControllerモデル

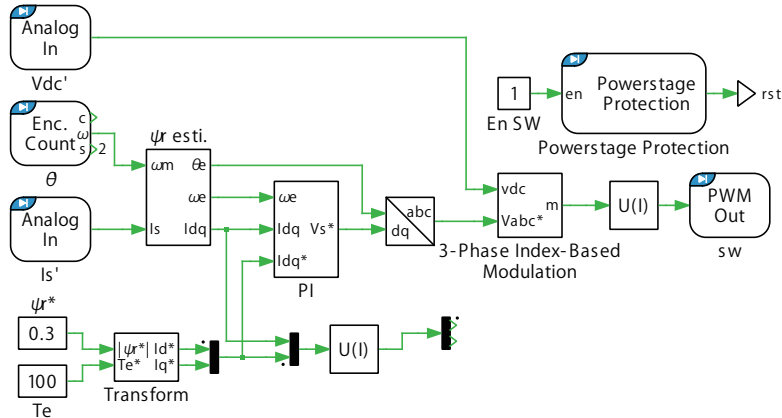


図4はロータ磁束と同期して回転するdqフレームの誘導機の等価回路を示しています。 L_M 、 $L_{\sigma s}$ 、 R_R の値は、モデル初期化コマンドに記載されている元のマシンパラメータから計算します(第1章を参照)。

図4: dqフレームにおける誘導機の等価回路

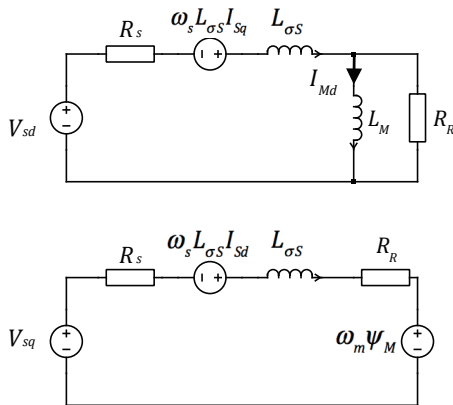
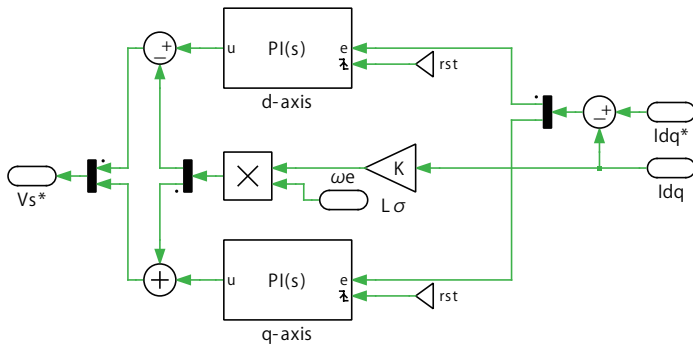


図5に示すように、d軸電流とq軸電流のPIコントローラはサブシステム"PI"に含まれています。比例ゲインと積分ゲインは、MOC (Magnitude Optimum Criterion)を使用して設計されます。詳細は、RT Box Target Support Packageの"昇圧コンバータ (Boost Converter)"デモモデルを参照してください。

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" Ψ_{resti} ."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 $\vec{I}_{s,xy}$ としてロータ基準フレーム(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:

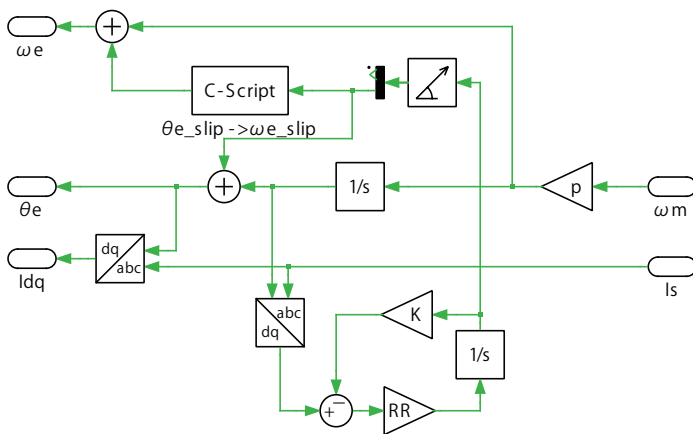
$$\frac{d\vec{\Psi}_{r,xy}}{dt} = R_R \left(\frac{-d\vec{\Psi}_{r,xy}}{L_M} \right) + \vec{I}_{r,xy} \quad (1)$$

図5: dqフレームのPIコントローラ



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6: ロータ磁束推定器の構造



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。

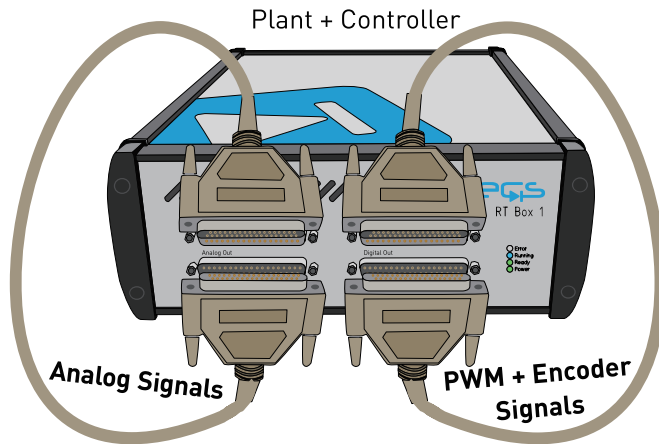
3 シミュレーション

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 本のDB37ケーブルをAnalog OutインタフェースとAnalog Inインタフェースに接続し、もう1本のDB37ケーブルをDigital OutインタフェースとDigital Inインタフェースに接続します (図7を参照)。
- 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。
- 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



注意 プラント側では、"En SafeState"定数値0がDO-9から出力され、DB37ケーブルを介して"Controller"タスクのPowerstage ProtectionブロックのDI-9で受信します。したがって、"Controller"タスク上のすべてのPWMは起動時に通常の動作モードになります。

RT Boxの外部モードでは、まず"En SafeState"定数値を0から1に変更してください。これにより、すべてのPWMが、PWM Outブロックの**Protection**タブで指定した通りの安全状態になります。

安全状態から抜け出すには、まず"En SafeState"定数値を1から0に戻します。次に、"Controller"タスクの"En SW"定数値を1から0に変更し、再び1に戻します。これにより、通常のスイッチング操作が再び有効になり、同時にPIコントローラの積分成分がリセットされます。

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 Ψ_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。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_r "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ポロジ上のスコープによってキャプチャされます。

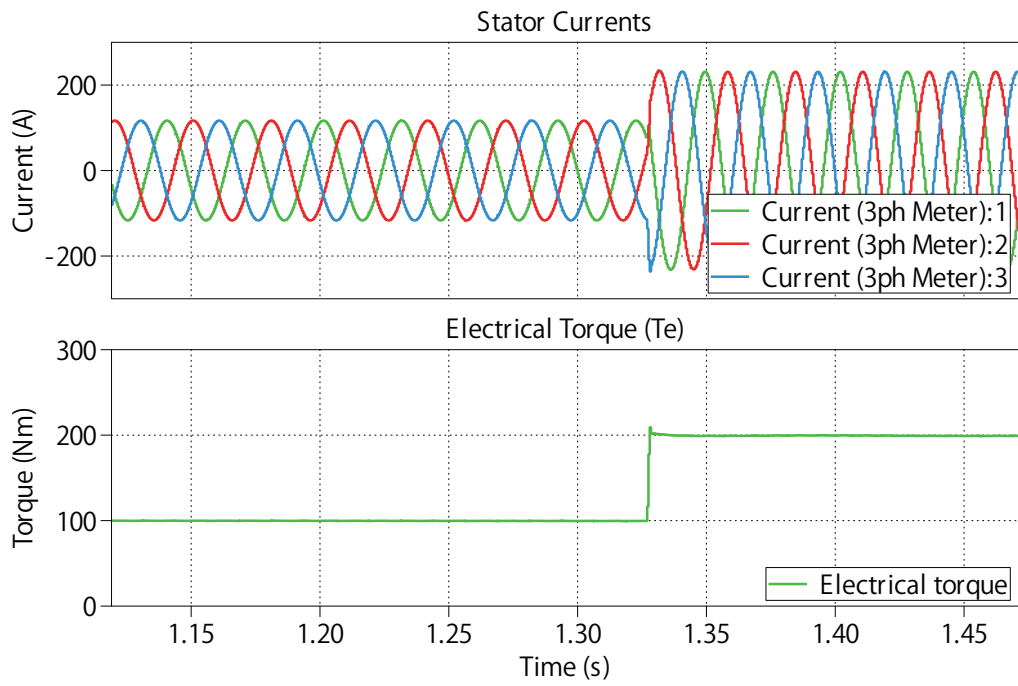
4 まとめ

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. Pulle and A. Veltman, "Advanced electrical drives", Springer, 2011

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



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



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



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

RT Box Demo Model

© 2002–2025 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。