

RT Box *DEMO MODEL*

Sensorless Vector Control for Permanent Magnet Synchronous Machine

PMSMのセンサレスベクトル制御

- オブザーバに基づく位置と速度の推定によるカスケード速度と電流の制御 -

Last updated in RT Box TSP 3.0.3

1 はじめに

この RT Box のデモモデルは、永久磁石同期機 (Permanent Magnet Synchronous Machine: PMSM) を備えた駆動システムを特徴としています。以下のセクション以降、PLECS の電気回路ドメインと制御器ドメインを使用した電力ステージと制御の実装について詳しく説明します。このデモモデルには次の機能があります：

- ドライブは公称トルク 0.11 Nm を出力し、24VDC 電圧源から給電。
- PMSM のデータシートのパラメータを PLECS PMSM モデルで使用するために変換する方法を説明。
- センサレス フィールド指向制御戦略のためのロータ位置および速度オブザーバを実装。
- 内側の d 軸と q 軸の電流コントローラと外側の速度コントローラを備えた閉ループカスケードコントローラ。
- モデルには、プラント部とコントローラ部の両方が 1 つのサブシステム内に含まれています。これにより、同じモデルを PLECS のオフラインシミュレーションと PLECS RT Box のリアルタイムシミュレーション両方で使用できるようになります。

次のセクションでは、モデルの詳細な説明と、それをシミュレートする手順について説明します。

実行時間は、RT Box ハードウェア上で PLECS モデルの 1 計算ステップを実行するのに要する実際の時間を表します。このデモモデルで選択し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	3.5 μ s / 5 μ s	1.3 μ s / 50 μ s
RT Box 1	3.8 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、RT Box 1、2、または 3 で実行するマルチタスクモードを紹介していることに注意してください。

- ターゲットが RT Box 2 または 3 の場合、メイン CPU コア (Core 0) は、サンプル時間 T_{s_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、 $T_{s_controller}$ 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。このように、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。この場合、"Base task" は、サンプル時間 T_{s_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、 $T_{s_controller}$ 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

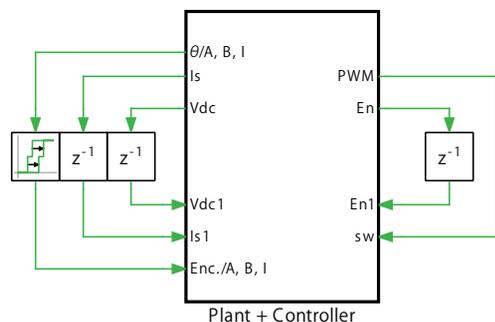
PLECS Blockset: Simulinkモデルウィンドウで右クリック -> モデルプロパティ -> コールバック -> InitFcn*

2 モデル

デモモデルの最上位レベルの回路図を図1に示します。モデルには、"Plant + Controller"というサブシステムが1つ含まれています。サブシステムのコード生成を有効にするには、コンポーネントを右クリックし、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。これにより、RT Boxターゲット上でリアルタイムシミュレーションの実行前に、PLECSでモデルをシミュレーションし、制御をオフラインで検証できるようになります。

閉ループ制御の固有の遅延は、サンプル時間 $T_{s_control}$ を持つ遅れ要素ブロック(z^{-1})を使用してオフラインシミュレーションで簡略化された方法でモデル化します。

図1: デモモデルのセンサレス速度制御PMSMのトップレベル回路図



2.1 プラント

電源回路には、PMSMと3相フルブリッジ電圧源インバータ(VSI)が含まれています。 $V_{dc}=24V$ のDC電圧源 V_{dc} は、3つのMOSFETのハーフブリッジパワー素子モジュールで表されるVSIに電力を供給します。

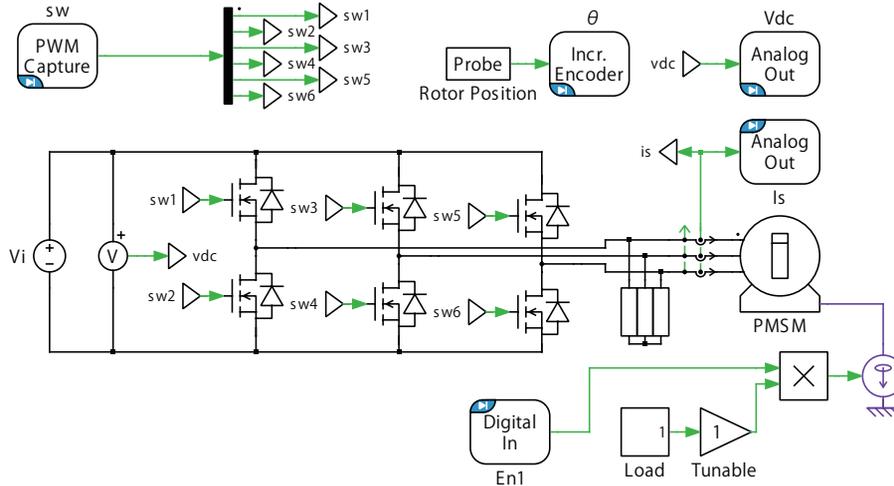
6つのスイッチング信号は、PLECS RT BoxコンポーネントライブラリのPWM Captureブロックによってサブシステムに送られます。DC電圧とAC電流の測定値は、Analog Outputブロックによって出力されます。ロータの角度位置はIncremental Encoderブロックによってデジタル直交パルスに変換され、このパルスは"Plant + Controller"サブシステムの外側で計測可能です。

モータが加速する際、ロータの慣性がエネルギーを吸収し、始動時や速度変更時に負荷がかかります。このために、PMSMブロックでは内部の機械的負荷として表2のデータシート値を使用しました。閉ループの起動時、負荷は40%を超えてはなりません。そうしないと、オブザーバが時間内に速度を追跡できなくなり、制御が不安定になります。負荷ステップを示すために、負荷プロファイルはモータトルクの定格20%と40%間を交互に繰り返します。負荷はコントローラの電源がオンになるまで適用されません。

マシンパラメータ

マシンパラメータはデータシートから抜粋した表2に示しています。以下のパラメータは、PLECSモデルで使用するために変換する必要があります:

図2: PMSM駆動システムの電源回路



- ・ 線間電圧は、ステータ抵抗 R やステータインダクタンス L_d および L_q などの線間電圧から中性点電圧に変換する必要があります。変換係数は $\sqrt{3}$ です。
- ・ 永久磁石の鎖交磁束 ψ は、線から中性線への逆起電力電圧 e_{in} から計算できます。これは、単位回転速度あたり各相の永久磁石によって誘導されるピーク電圧です。この関係は次のように表現できます：

$$e_{in} = p\psi\omega \quad (1)$$

表2では、逆起電力電圧 e_{in} が1000回転/分(rpm)の速度で測定されました。ただし、PLECSモデルのパラメータは、1秒あたりの放射量(rad/s)で表されているため、変換が必要です。

注意 PMSMは回転子座標参照モデルを選択します。この構成では、このモデルのコード生成は可能ですが、インバータハーフブリッジのデッドタイムを伴う発電機モードでのマシンのシミュレーションは実行できません。

表2: PMSM BLWS232D-36V-4000の仕様の抜粋

Number of pole pairs	2
Rated Power (W)	40
Rated Torque (Nm)	0.1
Rated Speed (rpm)	4000
Line to Line Resistance (Ω)	2.4
Line to Line Inductance (mH)	4.39
Rotor Inertia (Nms^2)	0.0000074852
Back EMF Voltage (V/krpm)	4.5

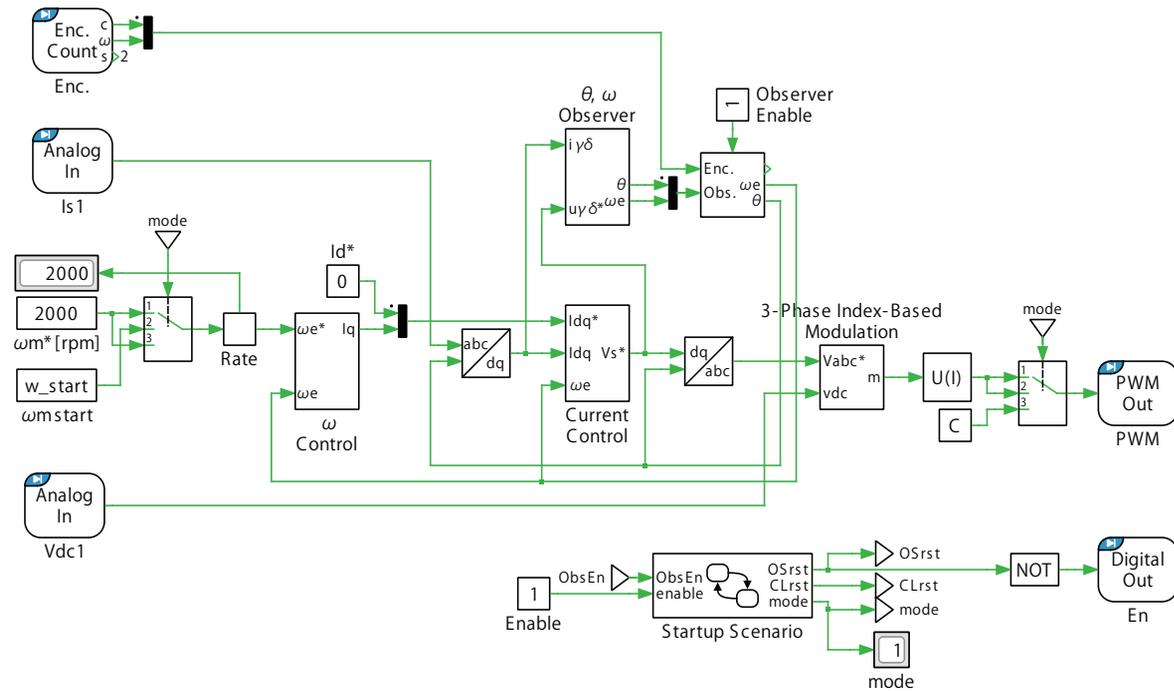
2.2 コントローラ

Controllerタスクでは、DCリンク電圧とステータ電流がAnalog Inブロックで測定します。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。

初期の機械速度リファレンス値は2000rpmに設定されています。オブザーバのロバストな起動プロセスを保証するために、常に2000rpmの速度で起動し、起動後に目的の速度に調整します。オブザーバの安定した動作を保証するため、取り付けられた負荷に関連して速度は500rpmを下回ってはいけません。そうしないと、オブザーバが時間内に速度を追跡できなくなり、制御が不安定になります。

起動シナリオでは、有限ステートマシンを使用します。システムはまず、機械の位置の調整のために、電流制御モードで電流ランプを使用します。電流の立ち上がって短いセトリング時間後、速度制御が開始されます。ドライブシステムがエンコーダで動作する場合、この起動シナリオは省略されます。起動時の過渡応答を改善するために、オブザーバは初期速度500rpmに設定されています。ロバストなシステム動作を実現するために、急激な速度変化は入力制限によって制限します。

図3: センサレスロータベクトル制御のControllerモデル



ドライブシステムにはロータベクトル制御を適用し、その基本構造は図3に示されており、ステータ電流はdq座標系で制御します。速度とロータの位置は、ObserverサブシステムやQuadrature Encoder Counterブロックを使用して計算します。この選択は"Selector"ブロックによって行われ、オブザーバを有効または無効にすることができます。速度制御用に上位コントローラが実装されており、これによりrpm単位の速度リファレンスを設定できます。"Enable"定数によりコントローラ全体を有効化またはリセットできます。この場合、モデルは固定変調指数の開ループ状態で実行し続けます。実際のハードウェアにプラント部を置き換えるさらなる調査では、有効化と無効化のためにDigital Outが必要になります。

電圧は制御変数であり、 $L_{sd} = L_{sq}$ の場合、式2から導き出されるdqフレームで表されます。

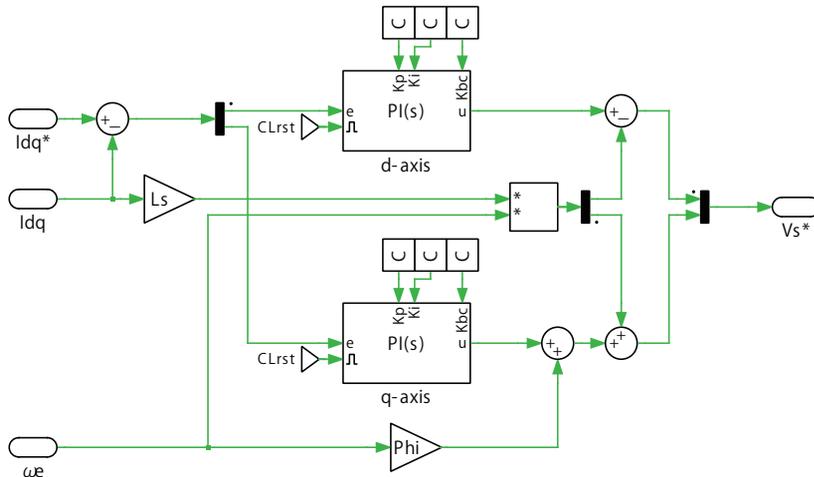
$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sq} \\ \omega L_{sd} & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sd} & 0 \\ 0 & L_{sq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_d \\ \frac{d}{dt} i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

dq座標系で生成された電圧リファレンスは abc座標系に変換され、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パラメータでは、単純な正弦波PWMや、他の空間ベクトルPWMなどを選択できます。

PI電流コントローラ

PIコントローラで制御するd軸とq軸の電流は、[図4](#)に示すサブシステム"Current Control"に含まれています。比例ゲインと積分ゲインは、MOC(Magnitude Optimum Criterion)方式に従って設計されます。この方式については、RT Box Target Support Packageの"昇圧コンバータ(Boost Converter)"デモモデルで説明しています。PIコントローラにはPLECSライブラリのブロックから使用しており、詳細な説明はヘルプボタンで確認できます。**パラメータ参照**が外部に設定されているため、RT Boxでのリアルタイムシミュレーション中に制御パラメータ K_p と K_i を操作できます。さらに、積分器は"CLrst"信号からリセットできます。

図4: dq座標系のPIコントローラ



ロータ位置と速度オブザーバ

[図5](#)に示す"Observer"サブシステムは[\[1\]](#)に従って開発しており、以下で概念的に説明します。オブザーバは、表面磁石型PMSM(非突極 $L_d = L_q$)、埋め込み磁石型PMSM(突極 $L_d < L_q$)、同期リアクタンスモータなど、あらゆるタイプの同期モーターで利用できます。

オブザーバモデルでは、位置誤差 θ_e のみd-q座標参照と異なる推定した回転 γ - δ 座標系を使用します。

位置誤差 θ_e は、オブザーバが推定する拡張誘起電圧(Extended Electromotive Force: EMF)から得ます。位置誤差 θ_e はロータの位置と速度を推定するために使用します。[図6](#)は e_γ を推定するための最小次数のオブザーバの概念ブロック図を示しています。ここで g はオブザーバのゲインであり、 $g=600$ に設定しています。 e_δ の δ 軸成分は e_γ と同じ方法で推定します。[図5](#)と[図6](#)を比較すると、青い点線の枠はオブザーバが全体的なモデルにどのように組み込まれているかを示しています。signブロックは基準速度を評価し、基準速度が負の場合、位置誤差 θ_e に負の"符号"を与えます。これは、ドライブの起動時にオブザーバの正確なトラッキングを確保するために必要です。オブザーバのすべての積分器は、"OSrst"信号からリセットできます。

図5: ロータ位置と速度オブザーバのサブシステム

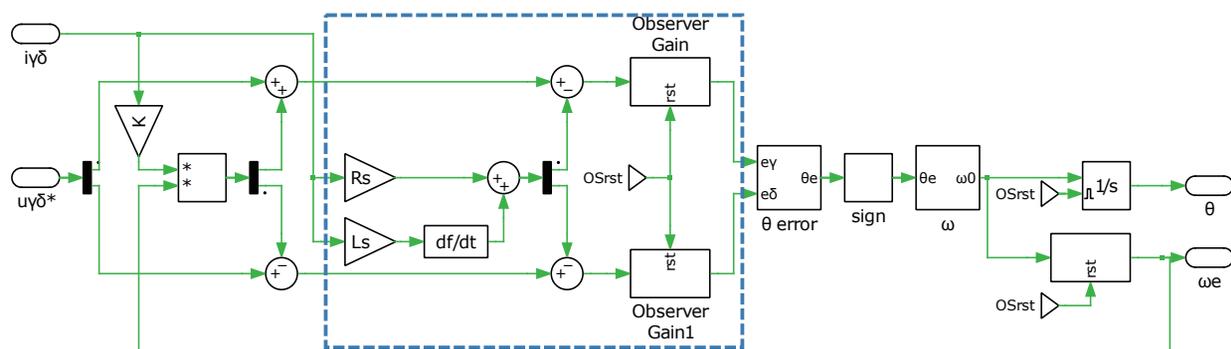
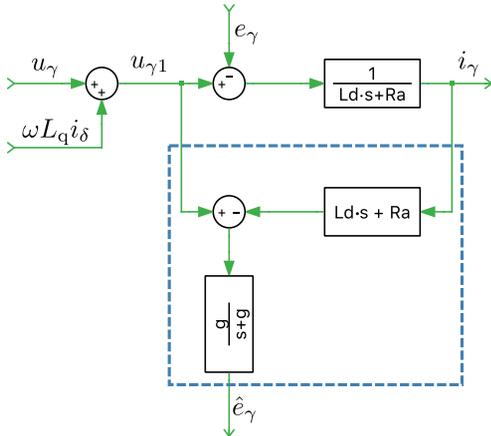


図6: 最小次数オブザーバの等価ブロック図



アルゴリズム

センサレス制御アルゴリズムに使用するマシンモデルは、拡張EMFを含む γ - δ 座標で与えられます[1]:

$$\begin{bmatrix} u_\gamma \\ u_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sq} \\ \omega L_{sd} & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sd} & 0 \\ 0 & L_{sq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_\gamma \\ \frac{d}{dt} i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\delta \\ e_\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで

$$\begin{bmatrix} e_\delta \\ e_\gamma \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} + (\hat{\omega} - \omega) L_s \begin{bmatrix} -i_\delta \\ i_\gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

推定速度 $\hat{\omega}$ と実際の速度 ω 間の誤差が十分に小さいと仮定すると、式4の2番目の項は削除され、式5のように簡略化されます。

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\delta \\ \hat{e}_\gamma \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \hat{\theta}_e \\ \cos \hat{\theta}_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

式5を変換することにより、位置誤差 $\hat{\theta}_e$ は2つの方法で推定することができ、両方の方式は構成可能なサブシステム"θ error"に実装されています:

Scheme A:

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \left(-\frac{\hat{e}_\gamma}{\hat{e}_\delta} \right) \quad (6)$$

Scheme B:

$$\hat{\theta}_e \approx \left(-\frac{\hat{e}_\gamma}{\hat{E}_{ex}} \right) \quad (7)$$

PI補償器 $G_e(s)$ を使用して推定速度 $\hat{\omega}$ と推定位置 $\hat{\theta}$ を補償し、位置誤差 θ_e がゼロになるようにします。加速中、2次補償器の代わりに3次補償器を用いることで推定位置誤差を低減することができます。どちらも構成可能なサブシステムに実装されています。

$$G_e(s) = K_1 - \frac{K_2}{s} + \frac{K_3}{s^2} \quad (8)$$

2次補償器の係数は、固有振動数 $\omega_n=70\text{rad/s}$ 、減衰率 $\zeta_n=1.5$ を満たすよう、次の規則に従って、設計されます： $K_1=2\zeta_n\omega_n$ 、 $K_2=\zeta_n\omega_n^2$ 。3次補償器は次の規則に従って設計されます： $s^3+K_1s^2+K_2s+K_3 = (s+\omega_n)(s^2+2\zeta_n\omega_n s+\omega_n^2)$ 。速度推定器のローパスフィルタのカットオフ周波数は 1000rad/s を選択しています。

速度コントローラ

ドライブ速度を制御するために、外部速度制御ループが設けられています。外側の制御ループの時定数は機械的な時定数によって決まり、内側の電流制御ループと比較すると大きくなります。比例積分速度制御器は次のように記述します：

$$\frac{T_e^*}{\Delta\omega_m} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (9)$$

T_e^* は基準トルクを定義し、 $\Delta\omega_m$ は $\Delta\omega_m = \omega_m^* - \omega_m$ として定義されます。コントローラは比例ゲイン K_p と積分時定数 τ_i で表されます。[\[2\]](#)の117ページ以降によると、速度制御器の閉ループ伝達関数の帯域幅は実質的に帯域幅周波数 ω_B^* によって定義され、比例ゲインは次のように与えられます：

$$K_p = \omega_B^* J \quad (10)$$

制御パラメータを設計するには、総機械的負荷の慣性 J も考慮する必要があります。この目的のために、合計慣性量を推定する必要があります。

[\[2\]](#)に準じると、 $\omega_B^*=100\text{rad/s}$ は高性能ドライブにおける有効速度制御帯域幅の典型的な値です。ただし、このデモモデルでは、オブザーバの追加遅延により、 $\omega_B^*=70\text{rad/s}$ というより低い値を想定しました。 ω_B^* の値は、慣性 J とともに、コントローラの比例ゲインを完全に定義します。

減衰係数 $\zeta=1$ および既に定義されている K_p の場合、積分時定数 τ_i は次のように決定されます：

$$\tau_i = \frac{4}{\omega_B^*} \quad (11)$$

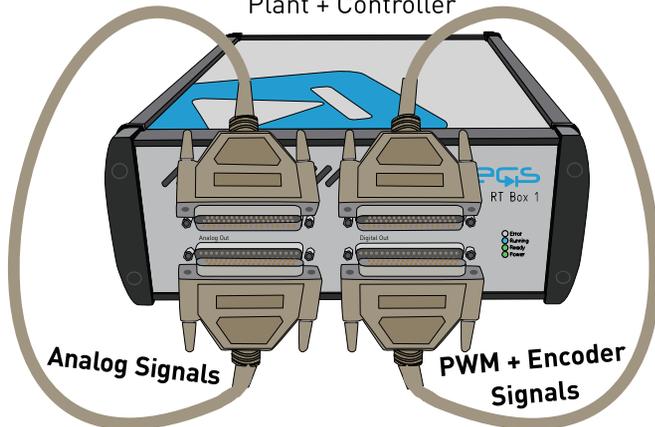
速度コントローラの操作変数は基準トルク T_e^* であり、これは内部電流コントローラループの設定値です。したがって、[式12](#)に基づいて機械的トルク T_e から i_q 電流への変換を行う必要があります。さらに、永久磁石の磁束鎖交数 Ψ_m とロータ永久磁石の極対数 p の値も必要です。

$$T_e = \frac{3}{2} \Psi_m i_q p \quad (12)$$

この変換を実行するには、係数 K を持つゲインブロックを使用します。

$$i_q^* = \frac{T_e^*}{K} \quad (13)$$

図7: デモモデルのリアルタイム動作のためのハードウェア構成
Plant + Controller



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。

3.1 過渡的なシナリオ

負荷プロファイルは、[図8](#)に示しているように定格トルク0.1Nmを基準に0.04Nmから0.06Nm間で交互に変化します。必要なトルクは、電流コントローラにより約0.05秒で補正されます。

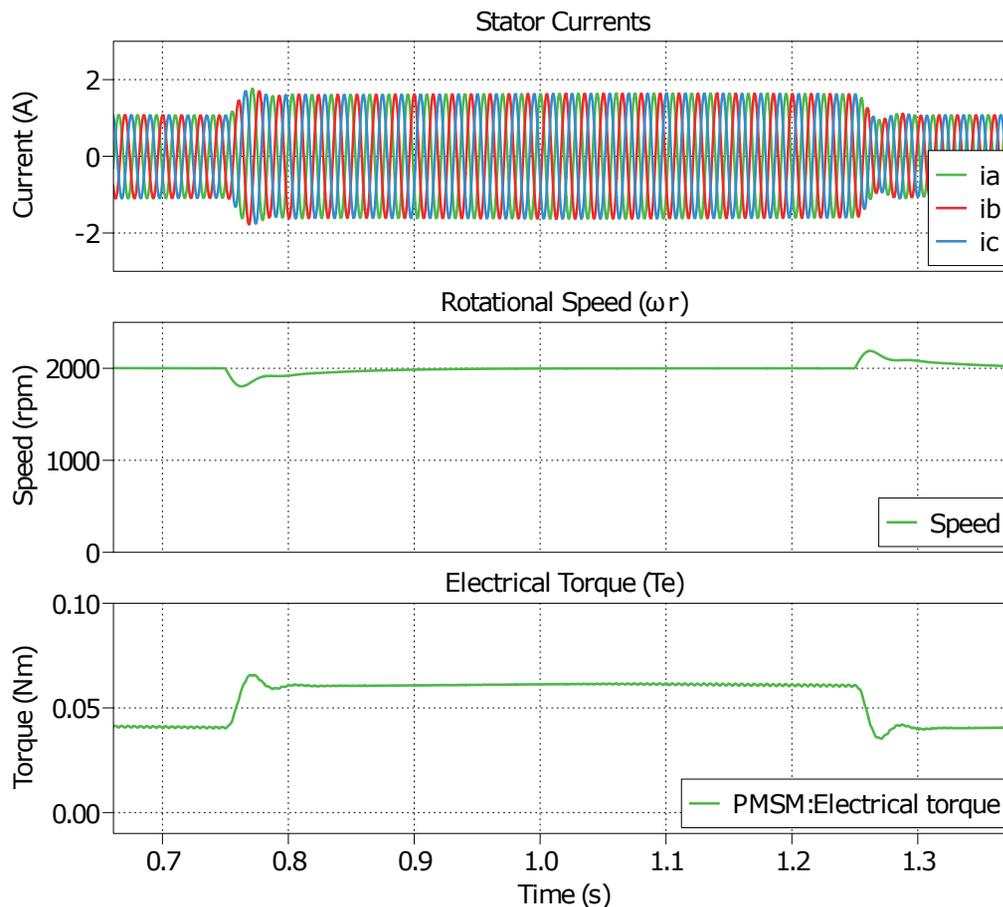
速度基準のステップ変更

ステータ電流、回転角度、速度は、"Controller"タスクのPLECSスコープ内に表示されます。システムの過渡的な動作、たとえば速度リファレンスが1000rpmから2000rpmに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**と**自動トリガの有効化**が有効になっていることを確認します。
- 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[Observer]に切り替えます。
- ターゲットレベル**パラメータを1500に設定し、**ターゲット遅れ(steps)**を-4000に設定します。
- 定数ブロック" ω_m^* "をデフォルト値の1000から2000に変更します。

[図9](#)に示すように、ステップの変化は"Controller"タスクのPLECSスコープによってキャプチャできます。エンコーダからの測定角度と速度、オブザーバからの推定角度と速度の比較を表示します。やはり、測定した速度と推定した速度は非常によく一致しています。速度リファレンスが急激に変化すると位置推定誤差および速度推定誤差が発生します。ただし、この誤差は非常に小さく、モータ制御に影響はほとんどありません。1000rpm未満の速度では、より大きな速度リップルを確認できます。

図8: 負荷トルクが0.01Nmから0.02Nmに変化した際の速度コントローラの過渡応答(オフラインシミュレーションの結果)



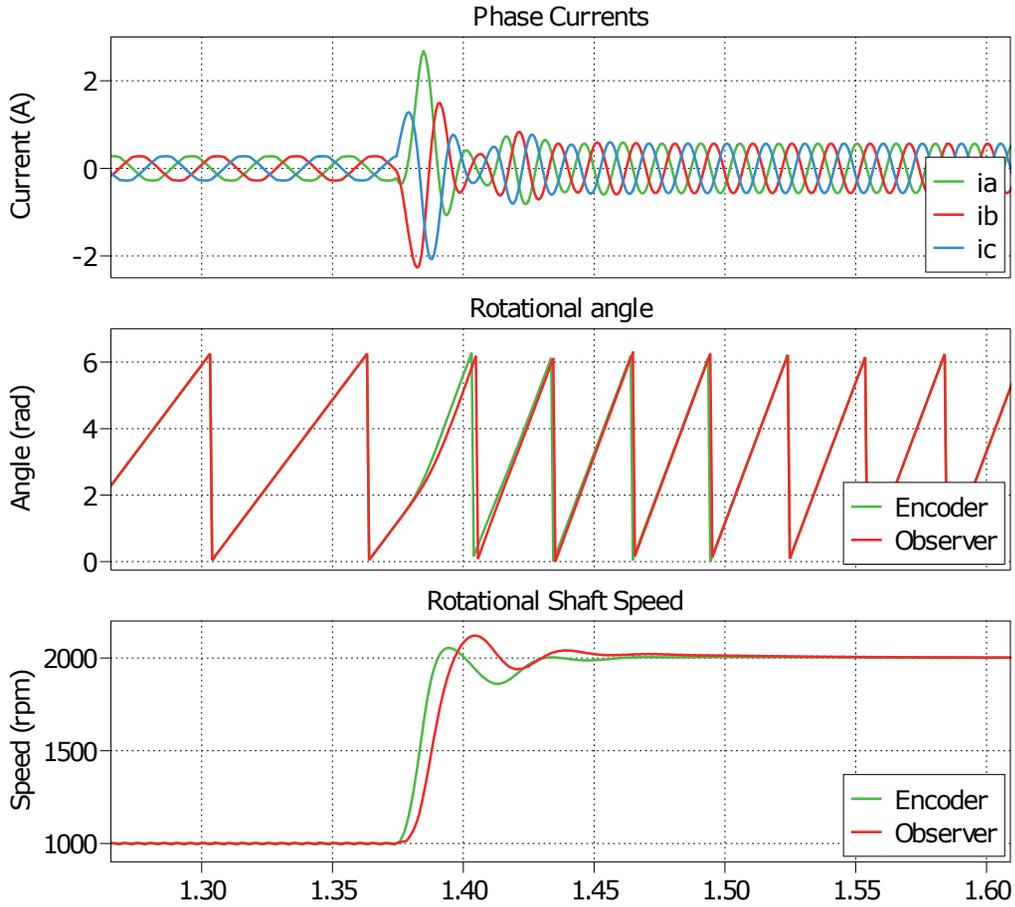
一般に、オブザーバは高速域で効果的に機能しますが、この効果はブランキング時間によって低速域でさらに増幅されます。

注意 参考文献[1]には、このセンサレス制御アルゴリズムの具体的な起動手順については記載されていません。ただし、センサレス制御方式を使用する場合、システムの起動手順は特に繊細です。このデモモデルでは、制御とシステム操作を段階的に開始するための単純な開ループ起動手順を使用していますが、詳細については説明しません。つまり、リアルタイムシミュレーションにおけるイベントの正確なタイミングによっては、コントロールが適切に起動しない可能性があることを意味します。

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PMSMドライブシステムを示しています。ロータのフィールド指向制御は、ステータ電流をdq座標系で調整する駆動システムに適用されます。速度制御のために上位レベルのコントローラを実装し、オブザーバを使用して電気角速度とロータ位置を追跡します。

図9: 速度リファレンスが1000RPMから2000RPMに変化した場合の速度コントローラの過渡応答(オフラインシミュレーションの結果)。



5 参考文献

- [1] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada and Y. Takeda, "Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 4, pp. 1054-1061, Jul./Aug. 2002.
- [2] R. De Doncker, D. Pule and A. Veltman, "Advanced electrical drives", Springer, 2011.

改訂履歴:

RT Box TSP 2.1.5 初版

RT Box TSP 3.0.1 3-Phase Index-Based Modulation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でマルチタスク機能を使用できるよう単一のBoxモデルを更新

RT Box TSP 3.0.3 2台の別々のRT Boxモデルを削除し、マルチタスク機能を使用した1台のRT Boxモデルのみを保持



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

KESCO 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

RT Box Demo Model

© 2002–2025 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。