

# RT Box Tutorial

## From Offline to Real-Time

オフラインからリアルタイムへ

- PLECSモデルをリアルタイムでデプロイする手順 -

Tutorial Version 1.0

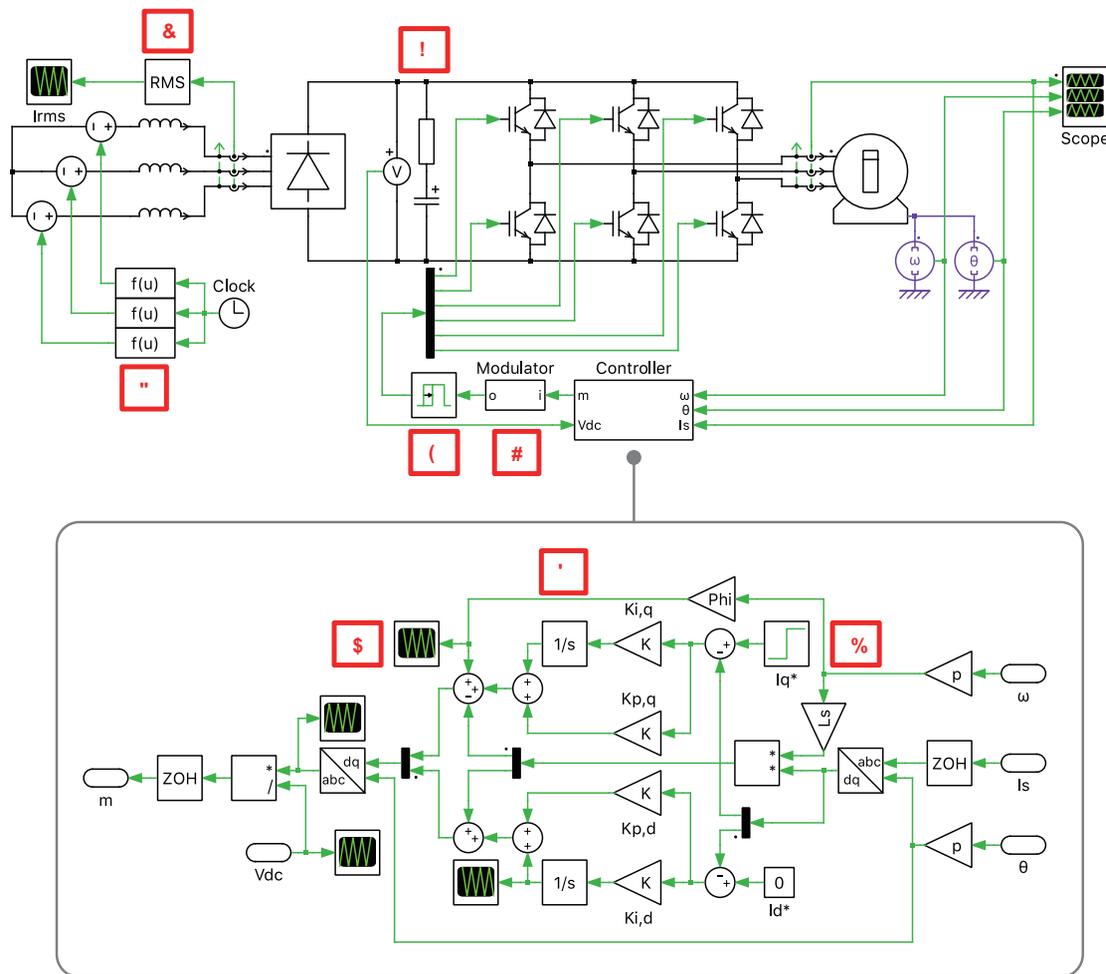
# 1 はじめに

ハードウェアインザループ(Hardware-in-the-loop: HIL)シミュレーションは、リアルタイムシミュレータで実行される仮想"プラント"モデルを使用して、実際のコントローラハードウェアの動作を検証するために使用します。通常、HILテストの前に、仮想環境でモデリングしたコントローラとプラントの両方でオフラインシミュレーションを実行します。PLECSのツール群とRT Boxリアルタイムシミュレータを組み合わせることで、ユーザは同じモデルファイルをオフラインシミュレーションとリアルタイムシミュレーションの両方で操作できるようになります。ただし、"オフライン"モデルを"リアルタイム"対応にするには、いくつかの変更を加える必要があります。このドキュメントでは、従来のオフラインモデルを例として取り上げ、リアルタイムでの使用に向けて準備するための手順と規則について説明します。

# 2 オリジナルモデル

図1に示すように、3相永久磁石同期機(Permanent Magnetic Synchronous Motor: PMSM)から始めます。電力回路はグリッド接続ダイオード整流器(3相)によって供給され、DCリンクキャパシタはさらに、PMSMを駆動するフルブリッジインバータに接続されます。dqフレームの従来型ベクトル制御では、ステップ関数として提供されるq軸電流リファレンスとともに使用します。PWMゲート信号のスイッチング周波数は10kHzです。

図1: オリジナルのオフラインシミュレーションモデルの回路図



オフラインシミュレーションの利点は、特定の側面を可能な限り詳細に調査できることです。ただし、リアルタイムシミュレーションでは、次の2つの主な制約により、ユーザは詳細を追加できません:

- ・ 計算能力: HILシミュレータでは、次のサンプルステップのモデルを更新する時間枠が限られています。
- ・ I/Oサンプリング: テスト対象コントローラの制御出力(通常はPWMのゲート信号)は、プラントモデルを作動させるために十分な精度でキャプチャする必要があります。

リアルタイムシミュレーションで問題になる可能性がある、オフラインシミュレーションでの一般的なモデリング手法と構成の一部を以下にまとめます(図1ではアルファベット順に番号が付けられています)。

- ・ **A:** 寄生コンポーネント
- ・ **B:** モデル内にキャリア比較ロジックを備えたPWMジェネレータ
- ・ **C:** 追加の小ステップを必要とするブロック(デッドタイムなど)
- ・ **D:** 絶対時間を使用するブロック
- ・ **E:** 数値オーバーフローにつながるコンポーネント
- ・ **F:** 局所観測機器(PLECSスコープなど)
- ・ **G:** 非線形関数呼び出し
- ・ **H:** 計算コストの高い後処理

これらのトピックについては、次の章で説明します。

## 3 変更点

### 3.1 簡略化

オフラインモデルは、HILシミュレータが妥当なモデルステップサイズ(予備的に $5\mu\text{s}$ と定義)内で各更新を実行できるように簡略化する必要があります。以下の変更を推奨しており、図2で強調表示しています:



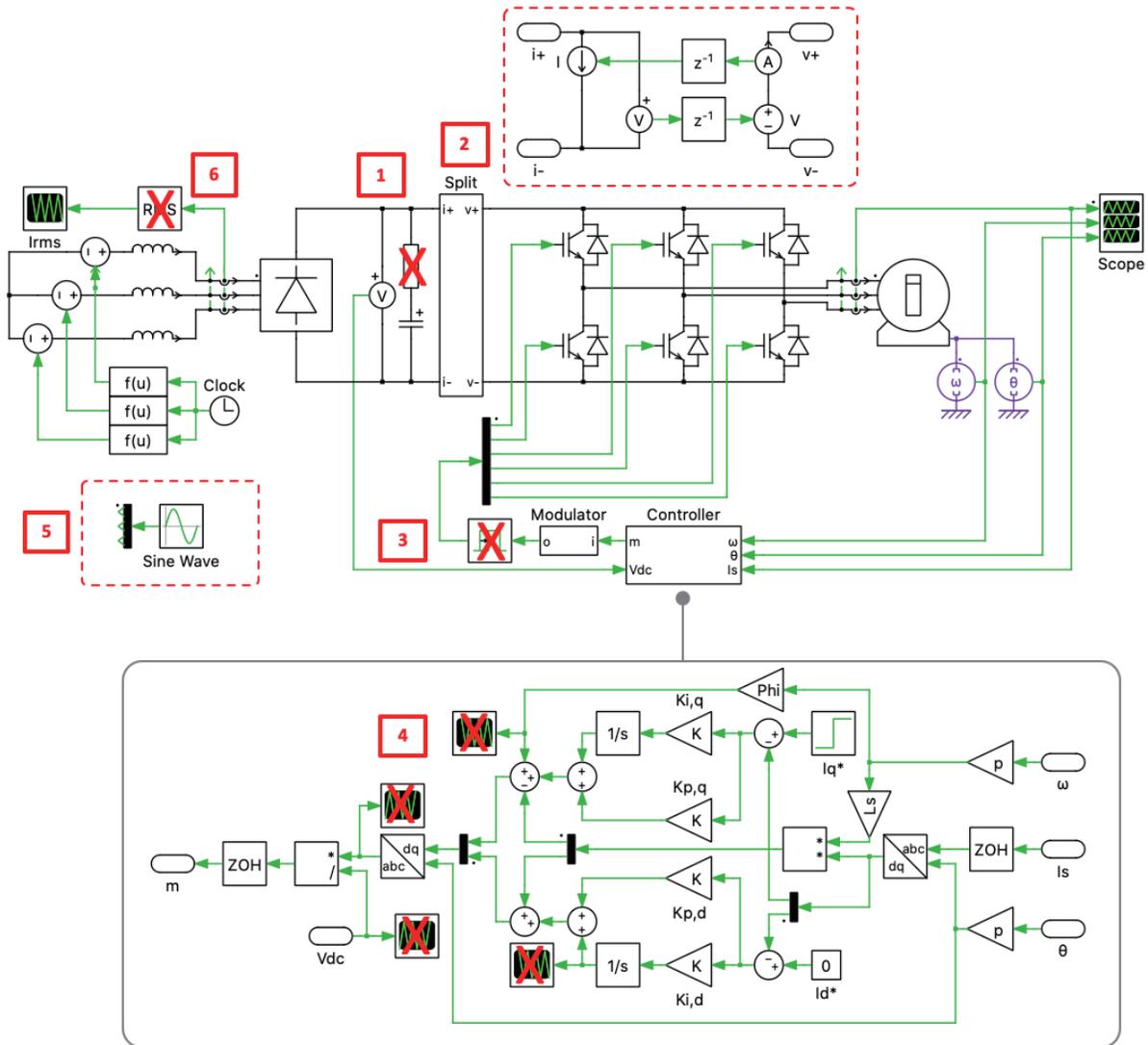
#### あなたのタスク:

- 1 結果として生じる時定数や共振周波数は含めるべきではないため、寄生コンポーネントを削除します。
- 2 クロスカップルされた制御電流源と制御電圧源のペアを導入して、DCリンクキャパシタでモデルを分割します。
- 3 RT Boxの最小ステップサイズでは解決できないため、 $0.5\mu\text{s}$ のターンオン遅延信号ブロックを削除します。
- 4 局所観測用のPLECSスコープを削除します。このPLECSスコープのデータ取得にたり、リアルタイムシミュレーションの速度が低下する可能性があります。
- 5 正弦波グリッド電圧リファレンスに使用する関数ブロックを正弦波信号ブロックに置き換えます。後者は、通常の正弦波関数呼び出しの計算作業を削減する特別なアルゴリズムを使用しているためです。
- 6 2乗平均平方根ブロックを削除します。PLECSスコープで同様の後処理が行えます。リアルタイムシミュレーション中にRT Box外部モードがアクティブ化されると、RMS計算はRT Boxではなくホストコンピュータで実行します。



from\_offline\_to\_realttime\_1.plecsに前述の変更を加えると、from\_offline\_to\_realttime\_2.plecsと同じになるはずですが。

図2: モデル簡略化の推奨事項



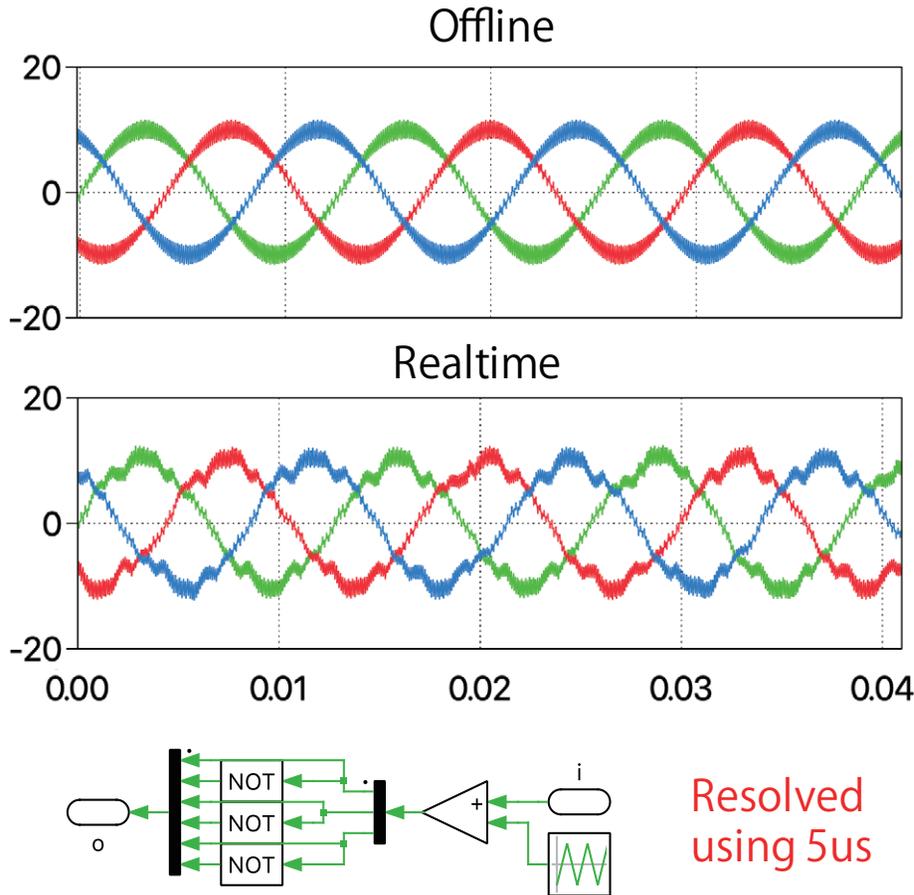
### 3.2 PWMサンプリング

モデルfrom\_offline\_to\_realtime\_2.plecsを使用してオフラインシミュレーションを開始し、PLECSスコープブロックに表示されるモーターの固定子電流を観察します。スイッチングリップルを伴う滑らかな正弦波形状を示します。モデルをRT Boxにアップロードし、外部モードを有効にして、電流の波形を再度観察します。オフラインモデルでは固定子電流を適切に制御できますが、RT Boxで実行するリアルタイムモデルでは、[図3](#)に示すように、固定子電流は大きく歪みます。理由は、"Modulator"サブシステムにはモデル内のキャリア比較ロジックは、モデルステップサイズ $5\mu s$ のウィンドウ内で解決されるため、スイッチング周波数を考慮すると短すぎます。

PWM ゲート信号を適切な精度で解決するには、PWM Outブロックを使用してRT Boxのデジタル出力ポートでPWM信号を物理的に生成し、D-Sub 37ピンのケーブルを使用してデジタル出力ポートとデジタル入力ポートを接続し、PWM Captureブロックを使用して物理的なPWM信号をRT Boxにキャプチャし送り返します。この手法では、ゲート信号は $7.5ns$ の解像度でサンプリングされ、 $5\mu s$ のモデルステップサイズにわたってサブサイクル平均化されます。

強化された PWMサンプリング精度を利用するには、PWM Captureブロックを電気回路ブロック -> パワー素子モジュールライブラリのハーフブリッジと組み合わせる必要があります(異なるトポロジでは他の電源モジュールの方が適している場合があります)。6個のダイオード内蔵IGBTを3個のハーフブリッジブロックに置き換え、モデルをRT Boxに再度アップロードします。これで、より安定した固定子電流を観測できます。

図3: 理想スイッチとモデルベースの変調ロジックを使用したリアルタイム動作での固定子電流の歪み



from\_offline\_to\_realtime\_2.plecsに前述の変更を加えると、from\_offline\_to\_realtime\_3.plecsと同じになるはずですが。

### 3.3 過渡現象

オフラインシミュレーションでは、q軸電流に対してステップ変化が設定されており、0.2秒で発生します。ただし、RT Boxで実行する場合、モデルはアップロード直後に起動するため、この過渡現象を観察することは現実的ではありません。パラメータのインライン化と外部モード機能を使用すると、ステップの変化をリアルタイムで観察できます。

図5に示すように、q軸電流リファレンスのステップ信号ブロックを定数ブロックに置き換え、その出力にPLECSスコープを接続します。"Coder Options"ウィンドウを開き、定数ブロックを"パラメータのインライン化"タブ内の例外領域にドラッグします。モデルをRT Boxに再度アップロードします。アップロード後、外部モードを有効にして、定数ブロック出力のスコープチャンネルにトリガチャンネルを設定します。トリガ遅延を時間軸のほぼ中央に設定し、レベルを0よりわずかに高く設定します。最後に、外部モードを有効にした状態でq軸電流リファレンスを10に変更し、図6に示すように、すべてのスコープでステップ変化の結果を観察します。

図4: より高い解像度を実現するためのPWMループバック

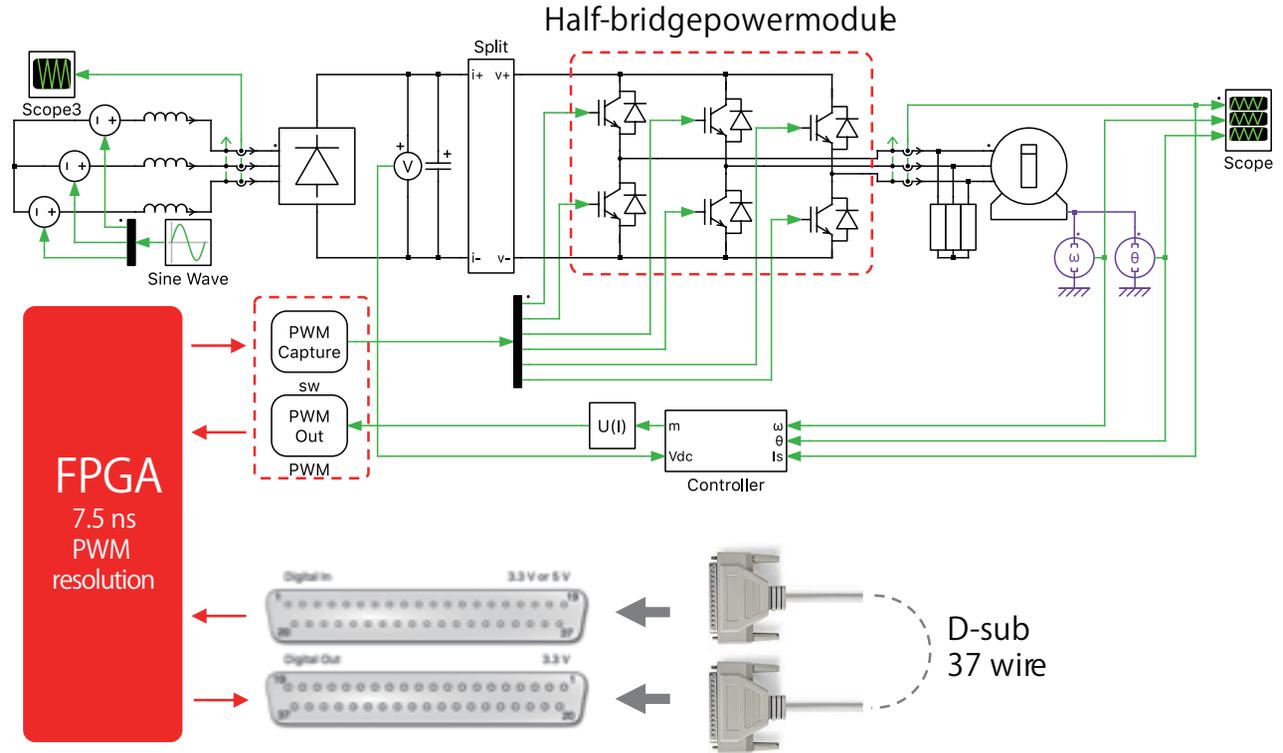


図5: q軸電流リファレンスのステップ信号ブロックを定数ブロックに置き換える

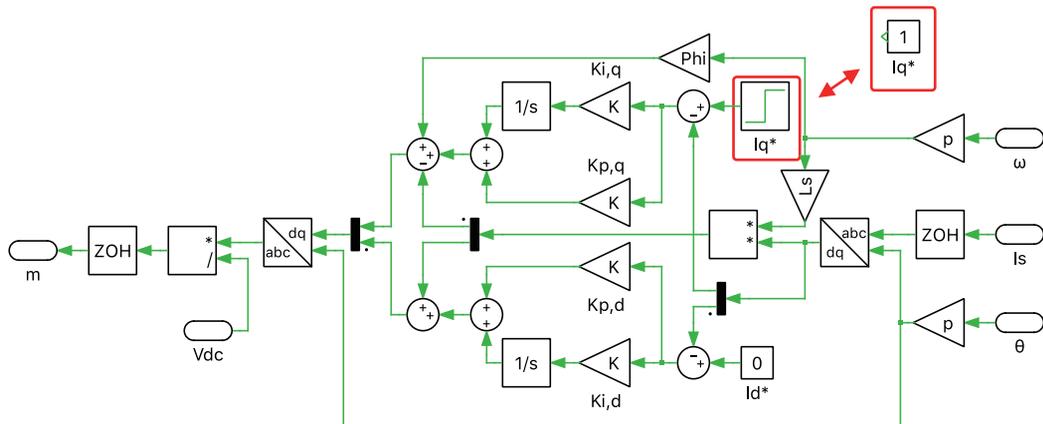
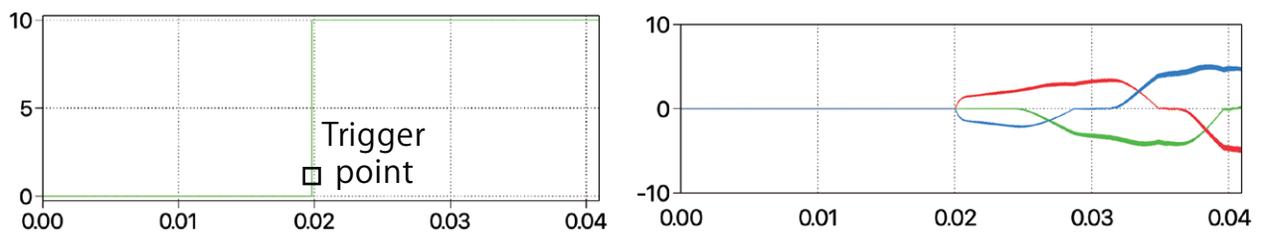


図6: ステップ変更後の固定子電流とq軸電流



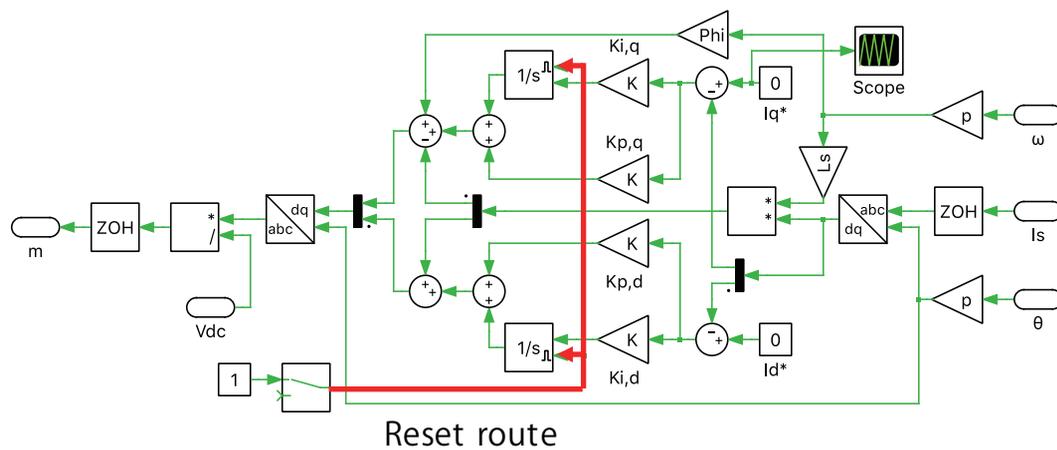
 この段階で、モデルはfrom\_offline\_to\_realtime\_4.plecsと同じになるはずですが。

### 3.4 オーバーフロー防止

シミュレーション時間はリアルタイムに制限されないため、特定の状況では一部の状態変数が無限大に蓄積される可能性があります。このモータ駆動モデルでは、数値オーバーフローの潜在的な原因として、PIレギュレータの積分器が挙げられます。したがって、このようなブロックにはリセットポートを作成することを強くお勧めします。

"Controller"サブシステム内の2つの積分器の"外部リセット"パラメータをレベルに設定して、トリガポートを有効にします。[図7](#)のように、手動切替スイッチを追加し、値が1の定数ブロックをその入力ポートの1つに接続します。モデルをRT Boxにアップロードする前に、手動切替スイッチを"パラメータのインライン化"タブにドラッグします。モデルをアップロードした後、外部モードを有効にして手動切替スイッチを切り替えることで、積分器を有効にできます。

図7: 積分器のリセットポートをアクティブにする



 この段階で、モデルはfrom\_offline\_to\_realtime\_5.plecsと同じになるはずですが。

## 4 まとめ

このチュートリアルでは、オフラインシミュレーションモデルをリアルタイム対応にするために必要な変更の一部について説明しました。リアルタイムシミュレーションに存在するタイミングの問題を常に念頭に置く必要があります。

改訂履歴:

Tutorial Version 1.0 初版

**plexim**

☎ +41 44 533 51 00

+41 44 533 51 01

✉ Plexim GmbH

Technoparkstrasse 1

8005 Zurich

Switzerland

@ info@plexim.com

<http://www.plexim.com>

**Pleximへの連絡方法:**

Phone

Fax

Mail

Email

Web

**KESCO** KEISOKU ENGINEERING SYSTEM

計測エンジニアリングシステム株式会社

<https://kesco.co.jp>

*RT Box Tutorial*

© 2002–2021 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。