

ブラシレスDCモーター (永久磁石同期モーター) の ベクトル制御の設計

MathWorks Japan

アプリケーションエンジニアリング部 (制御)

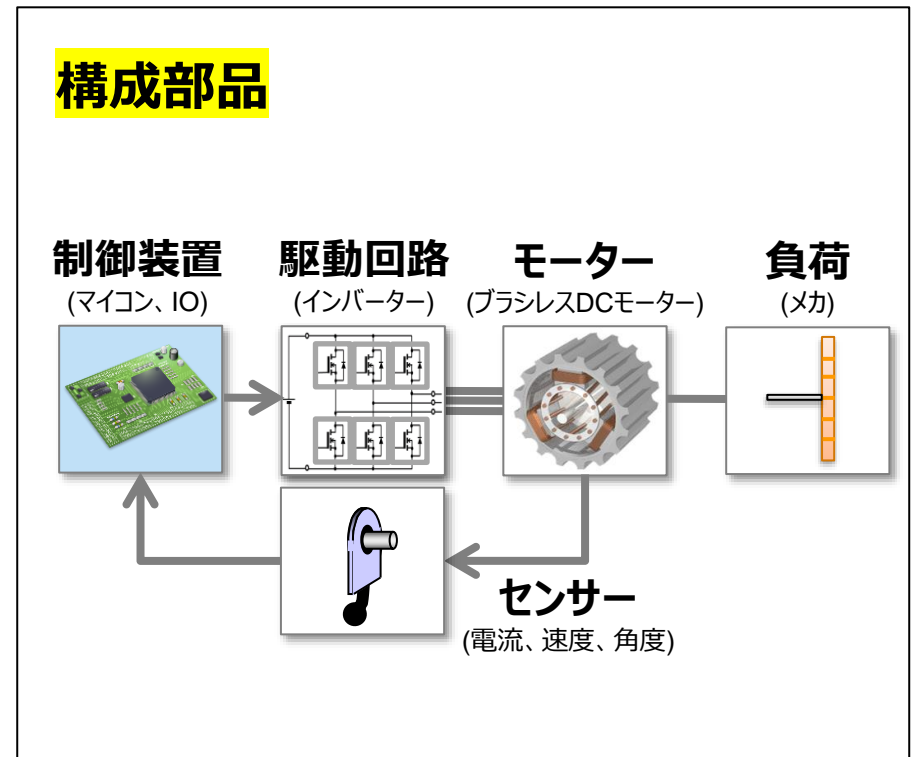
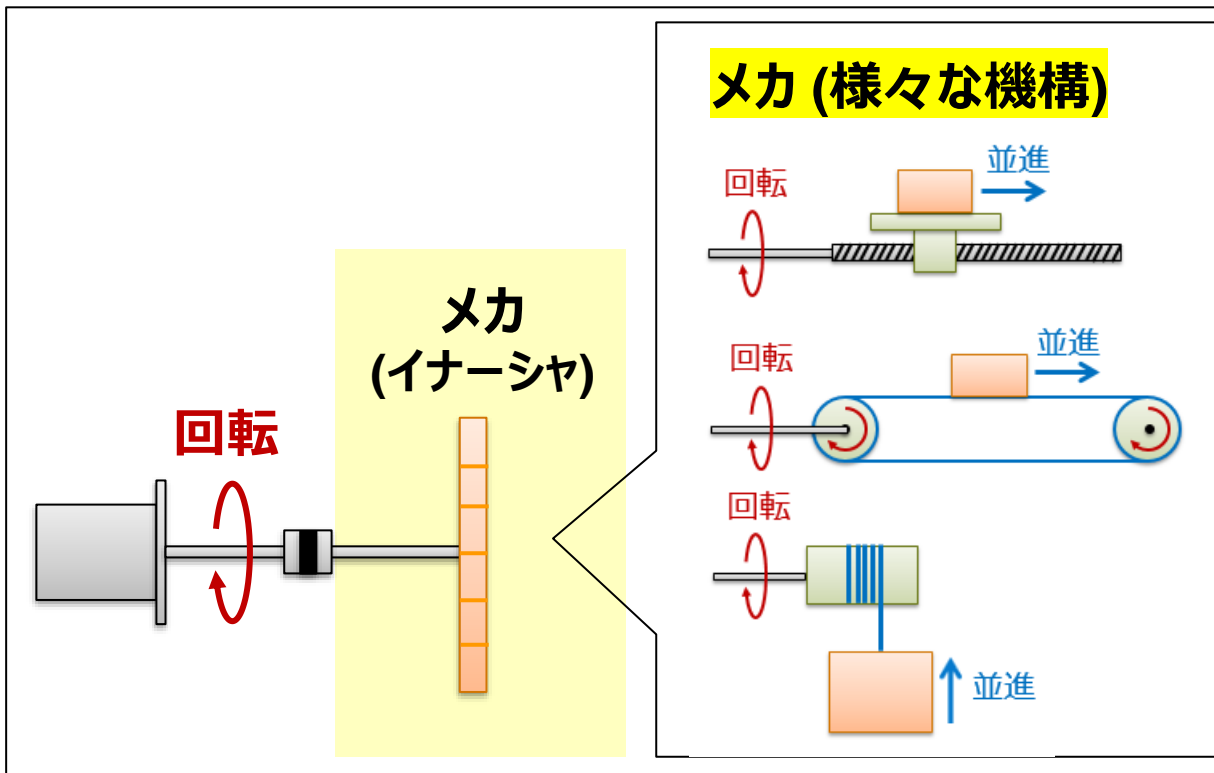
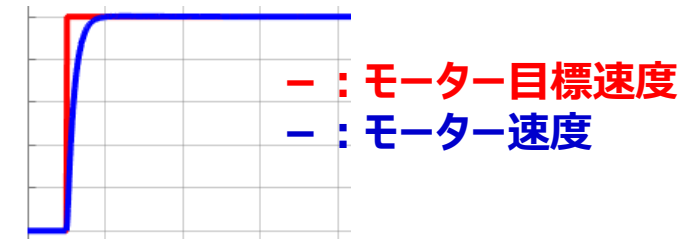
シニアアプリケーションエンジニア

福井 慶一

例題: ブラシレスDCモーター (永久磁石同期モーター) の速度制御システム

目的: 以下の制御仕様を満たすように、ベクトル制御ロジックの構築と速度制御パラメータの調整を行う。

制御仕様	目標速度1,000[rpm]のステップ信号に対する応答指標
立ち上がり時間	20[msec]
オーバーシュート	5[%] (=1,000 + 50[rpm])

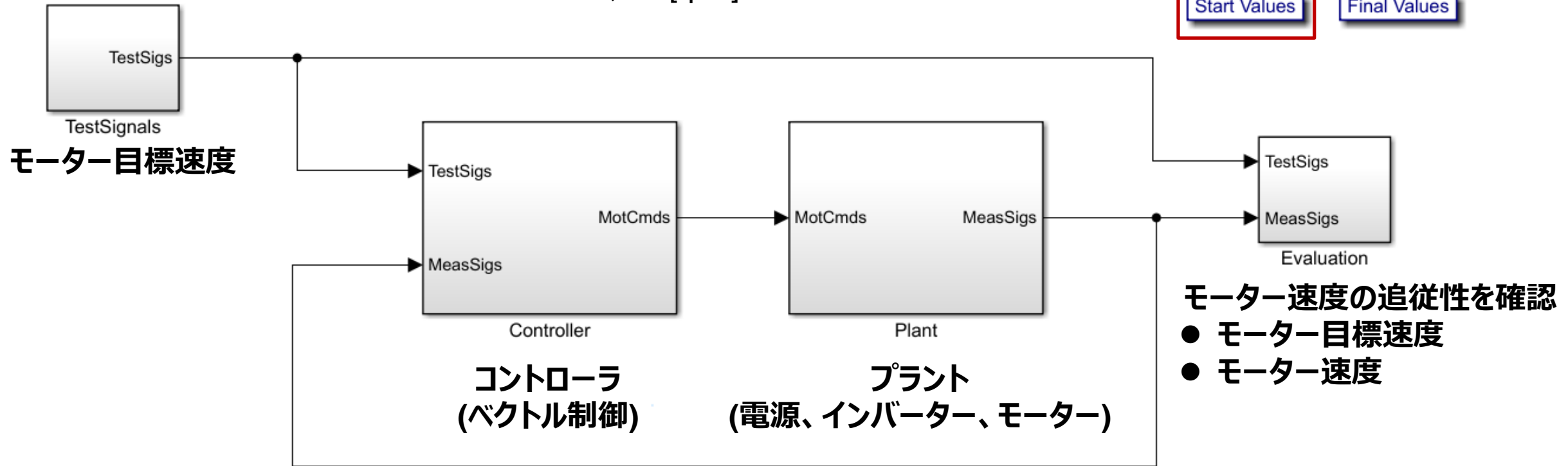


モデル①

電気系：簡易

テスト条件

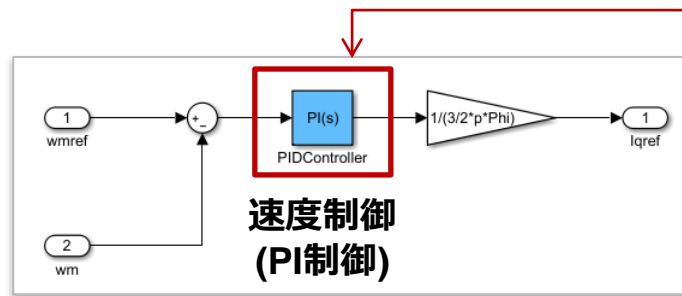
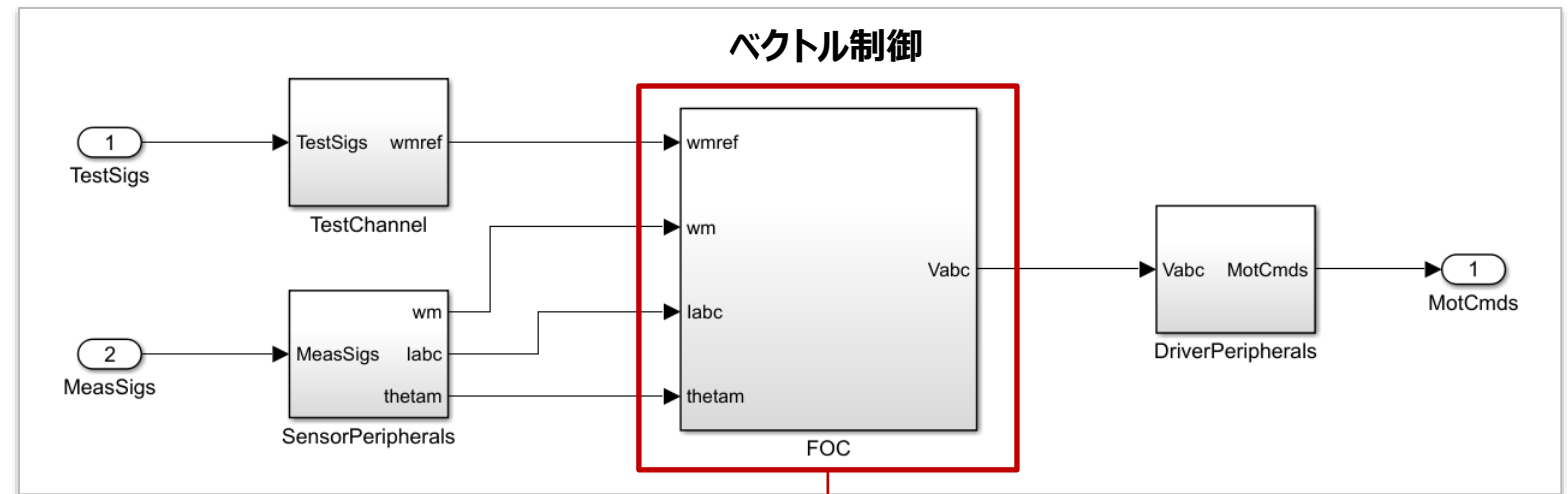
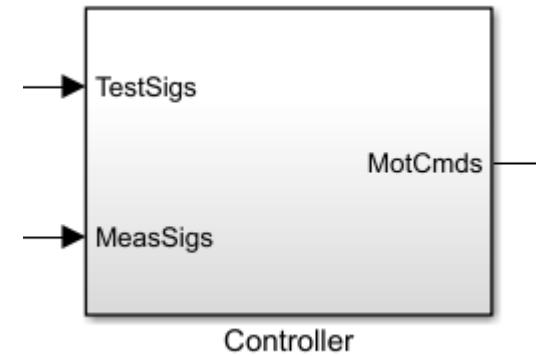
- 1[sec]の間の速度制御システムの挙動を確認する。
- $t=0.05[\text{sec}]$ で、目標速度1,000[rpm]のステップ信号を入力する。
- $t=0.5[\text{sec}]$ で、負荷トルク0.2[Nm]を入力する。
- モータ速度が1,000[rpm]に追従することを確認する。



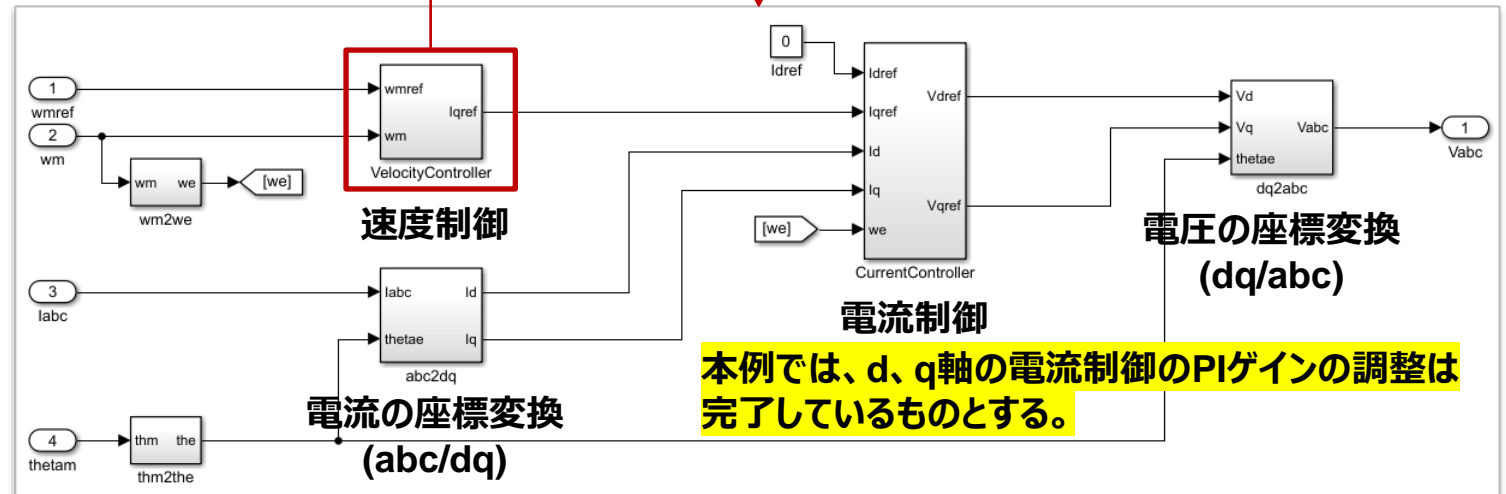
サンプルモデルの実行手順

- #1) ブラシレスDCモーターのベクトル制御の各種パラメータを設定した `foc_controlsystm_param.m` を実行する。
- #2) `foc_controlsystm_average.slx` を開いて、「Start Values」をクリックしてシミュレーションを実行する。その後、p.6の結果が得られることを確認する。

コントローラ

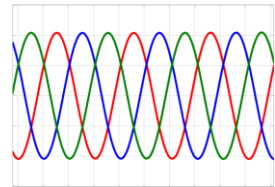
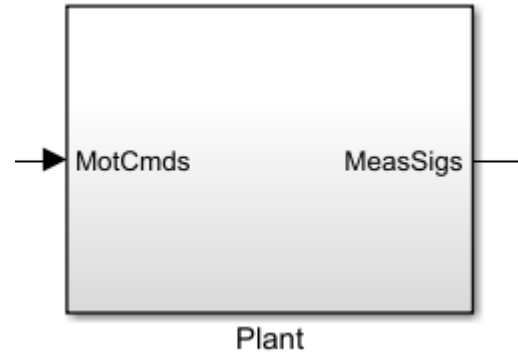


速度制御のPIゲインの調整を考える。
(→ p.7を参照。)

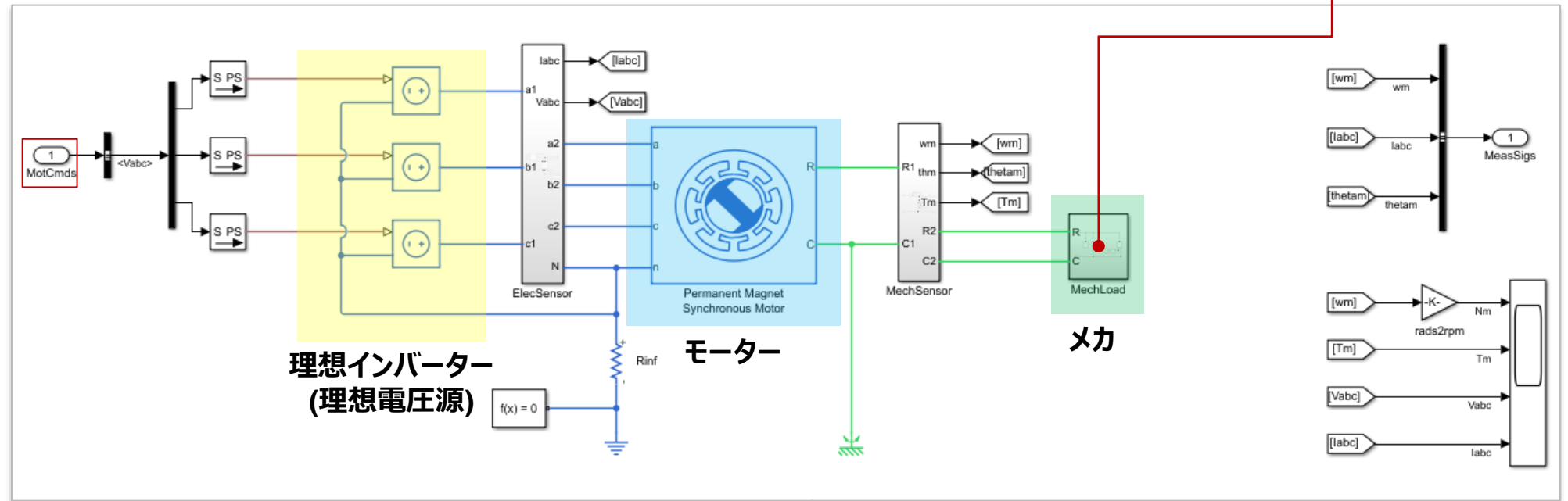


本例では、d、q軸の電流制御のPIゲインの調整は完了しているものとする。

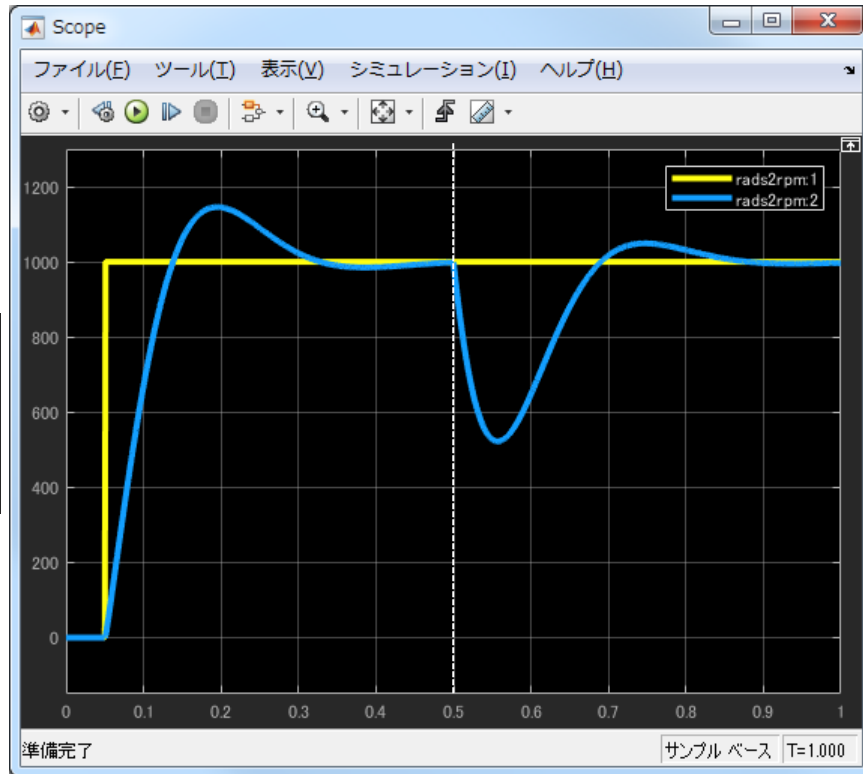
プラント



3相電圧



シミュレーション結果 (電気系 : 簡易、速度制御のPIゲインの調整前)



モーター目標速度
 N_{m_ref} [rpm]
 モーター速度
 N_m [rpm]

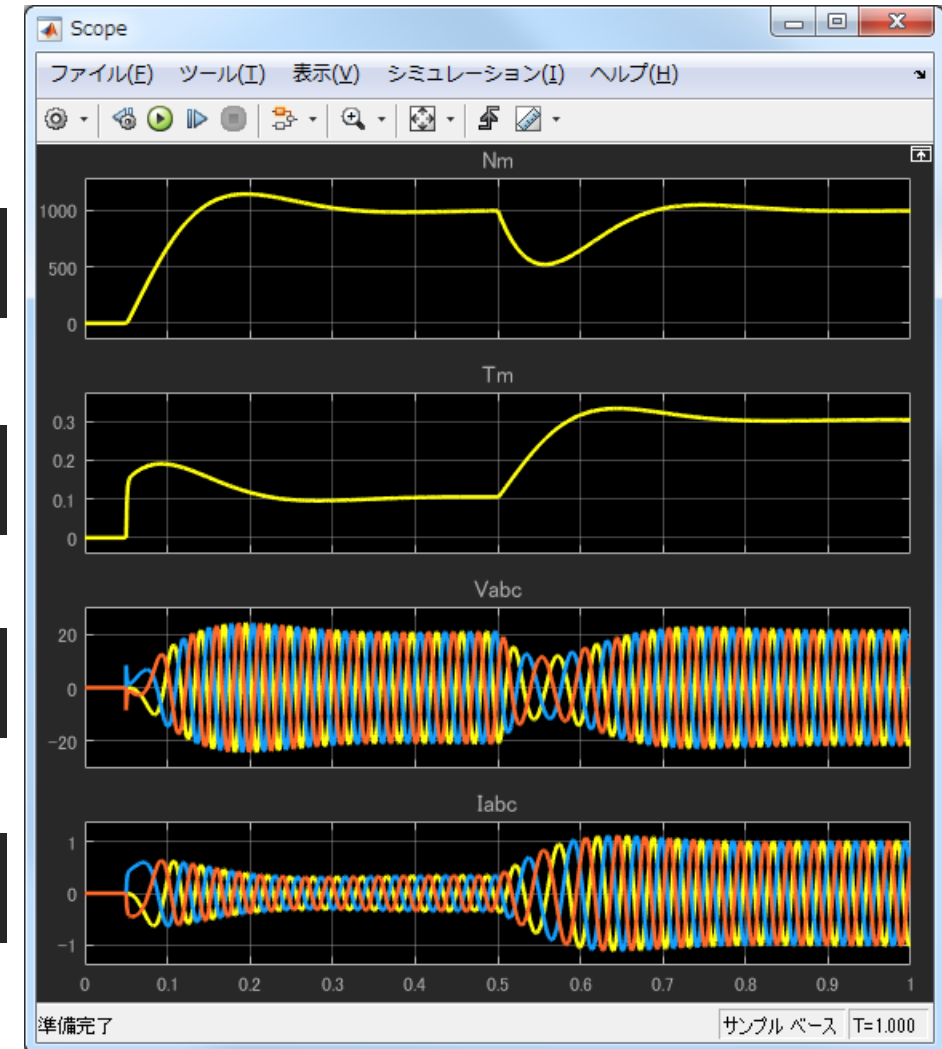
オーバーシュートが発生して、目標速度に追従する。・・・(*)
 $t=0.5[\text{sec}]$ で負荷トルクの外乱が発生したときも、
 上記(*)と同様な振舞いをする。

モーター速度
 N_m [rpm]

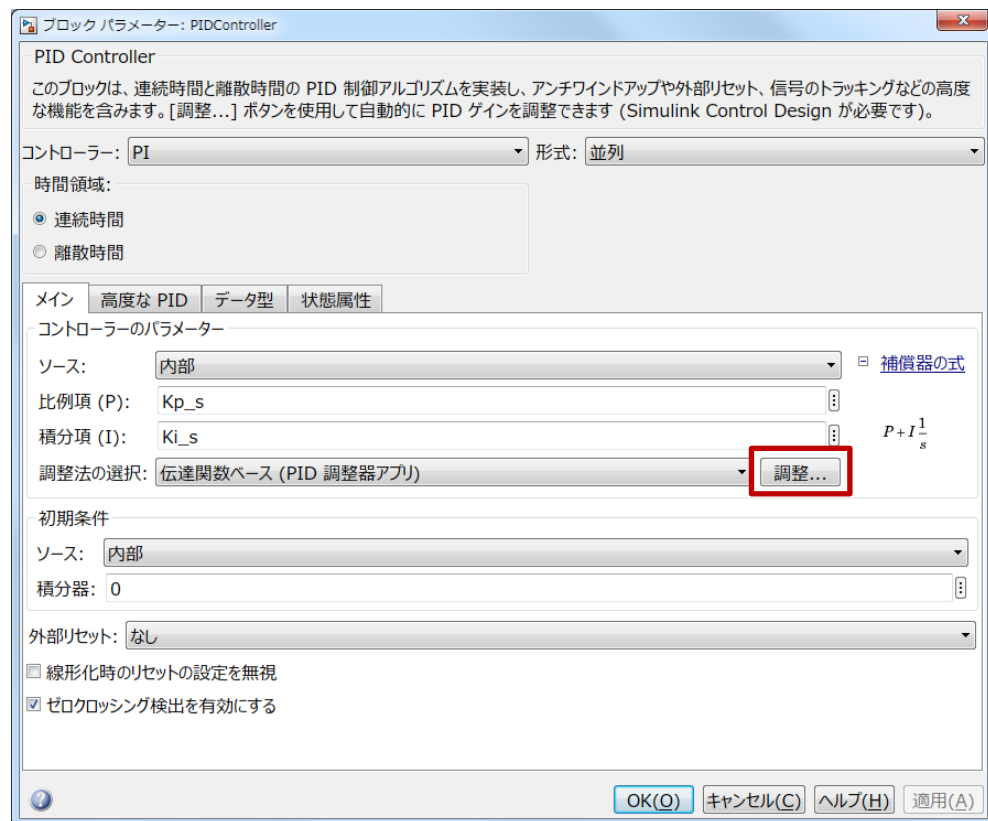
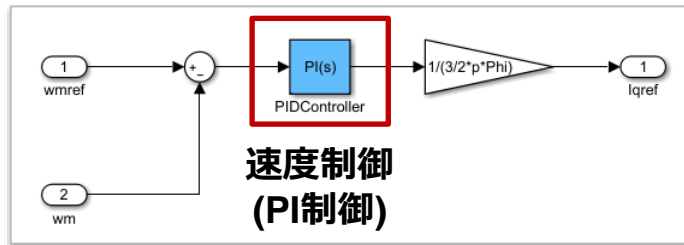
モータートルク
 T_m [Nm]

モーター相電圧
 V_a V_b V_c [V]

モーター相電流
 I_a I_b I_c [A]



速度制御のPIゲインの調整

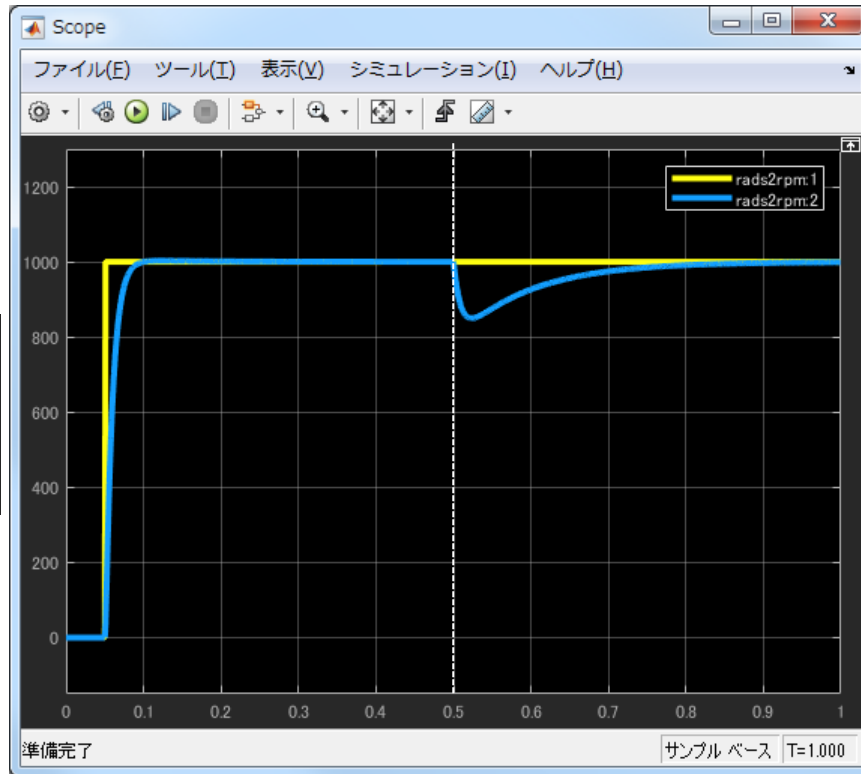


サンプルモデルの実行手順

- #1) PID Controllerブロックから、[調整]をクリックして、PID調整器の専用UIを立ち上げる。
- #2) [パラメータの表示]をクリックして、PIゲインや立ち上がり時間などの制御性能の指標を表示させる。
- #3) 領域: [周波数]を選択して、帯域幅や位相余裕のゲージをマウス操作で調整する。
- #4) PIゲインの調整が終われば、[ブロックの更新]をクリックする。



シミュレーション結果 (電気系：簡易、速度制御のPIゲインの調整後)



モーター目標速度
 N_{m_ref} [rpm]
 モーター速度
 N_m [rpm]

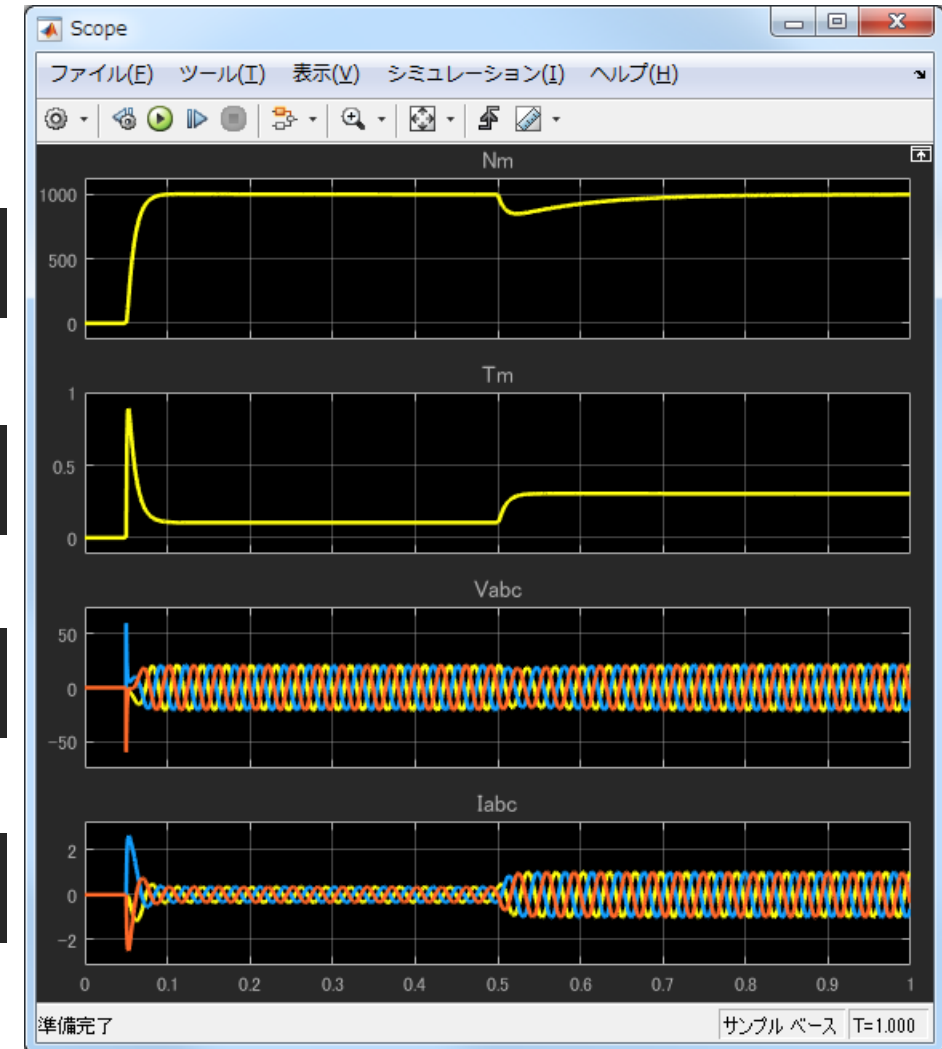
オーバーシュートせずに、目標速度に追従する。・・・(※)
 $t=0.5[\text{sec}]$ で負荷トルクの外乱が発生したときも、
 上記(※)と同様な振舞いをする。

モーター速度
 N_m [rpm]

モータートルク
 T_m [Nm]

モーター相電圧
 V_a V_b V_c [V]

モーター相電流
 I_a I_b I_c [A]

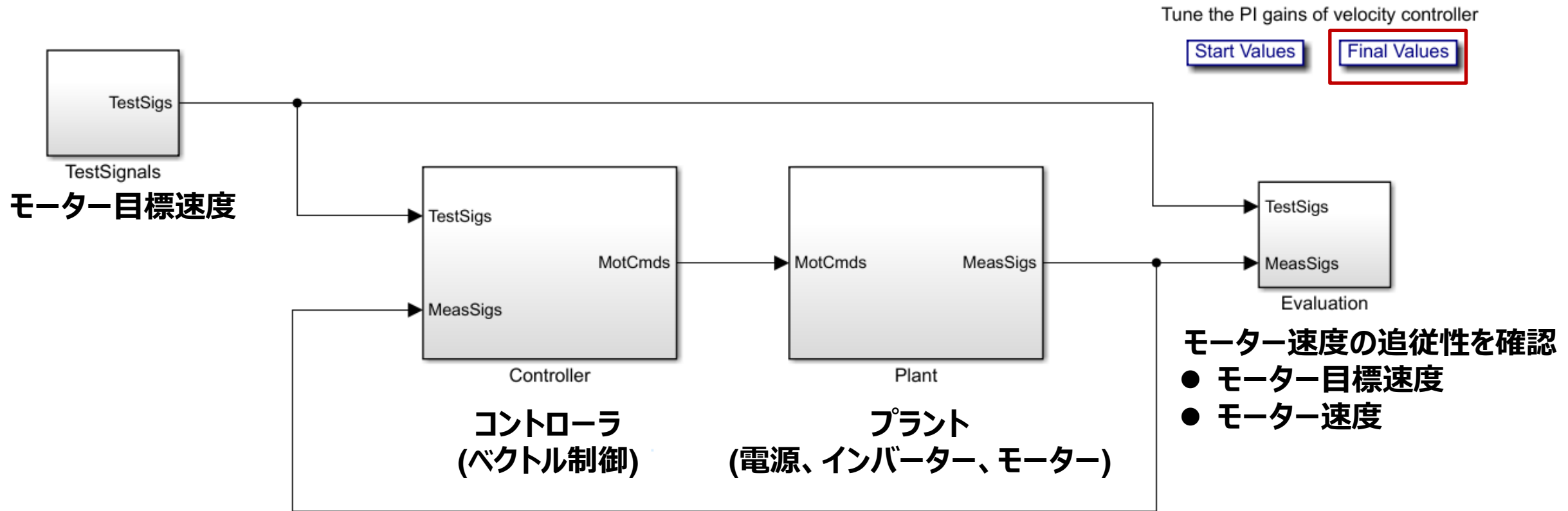


サンプルモデルの実行手順

#1) 速度制御のPIゲインの調整後に、p.3のモデルのシミュレーションを実行し、本ページの結果が得られることを確認する。

モデル②

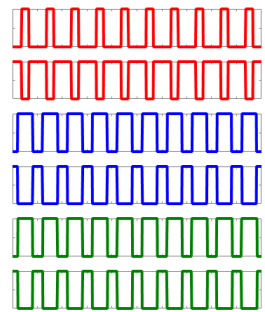
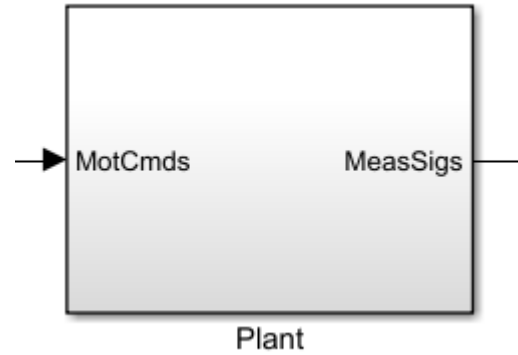
電気系：詳細



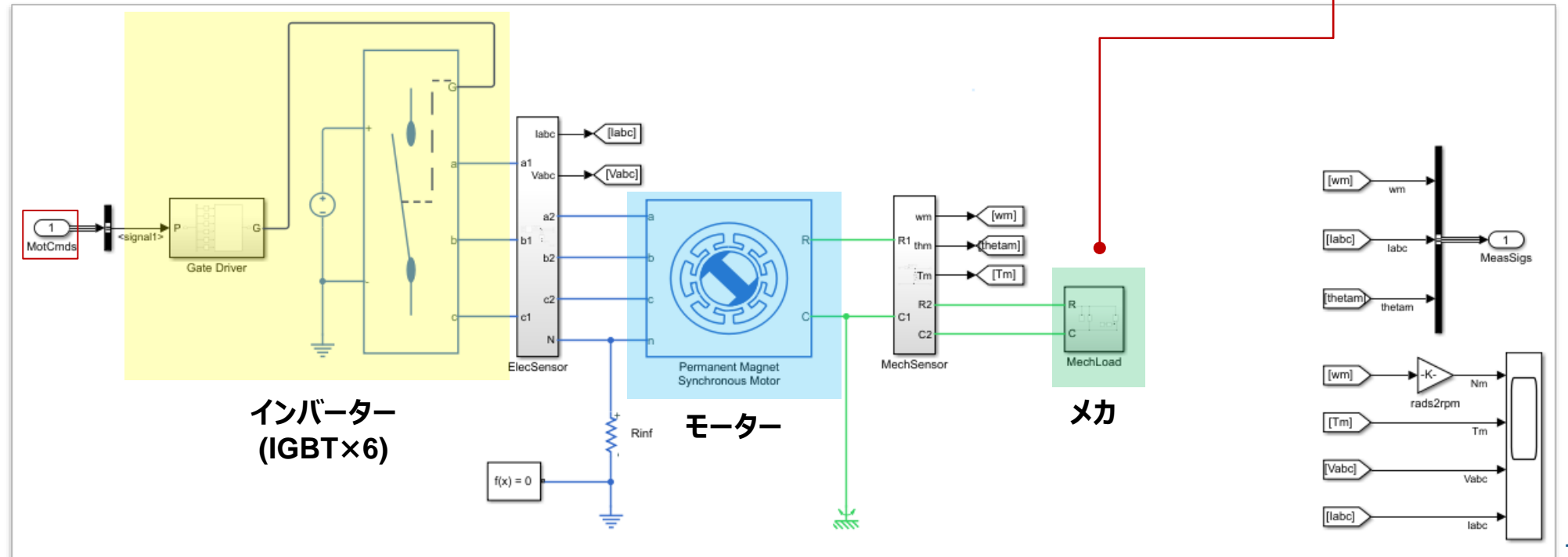
サンプルモデルの実行手順

- #1) `foc_controls_system_pwm.slx` を開いて、シミュレーションを実行する。(「Final Values」をクリックすると、p.7で調整が完了したPIゲインの値を設定できる。) シミュレーションの結果として、p.11の結果が得られることを確認する。

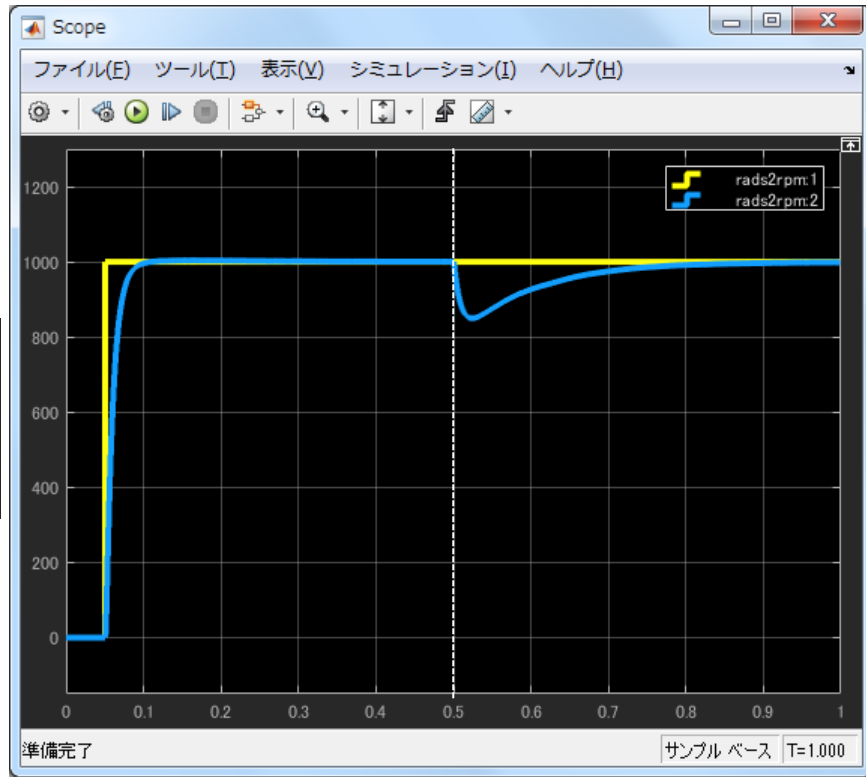
プラント



ゲート信号
(×6)



シミュレーション結果 (電気系 : 詳細、速度制御のPIゲインの調整後)



モーター目標速度
 N_{m_ref} [rpm]
 モーター速度
 N_m [rpm]

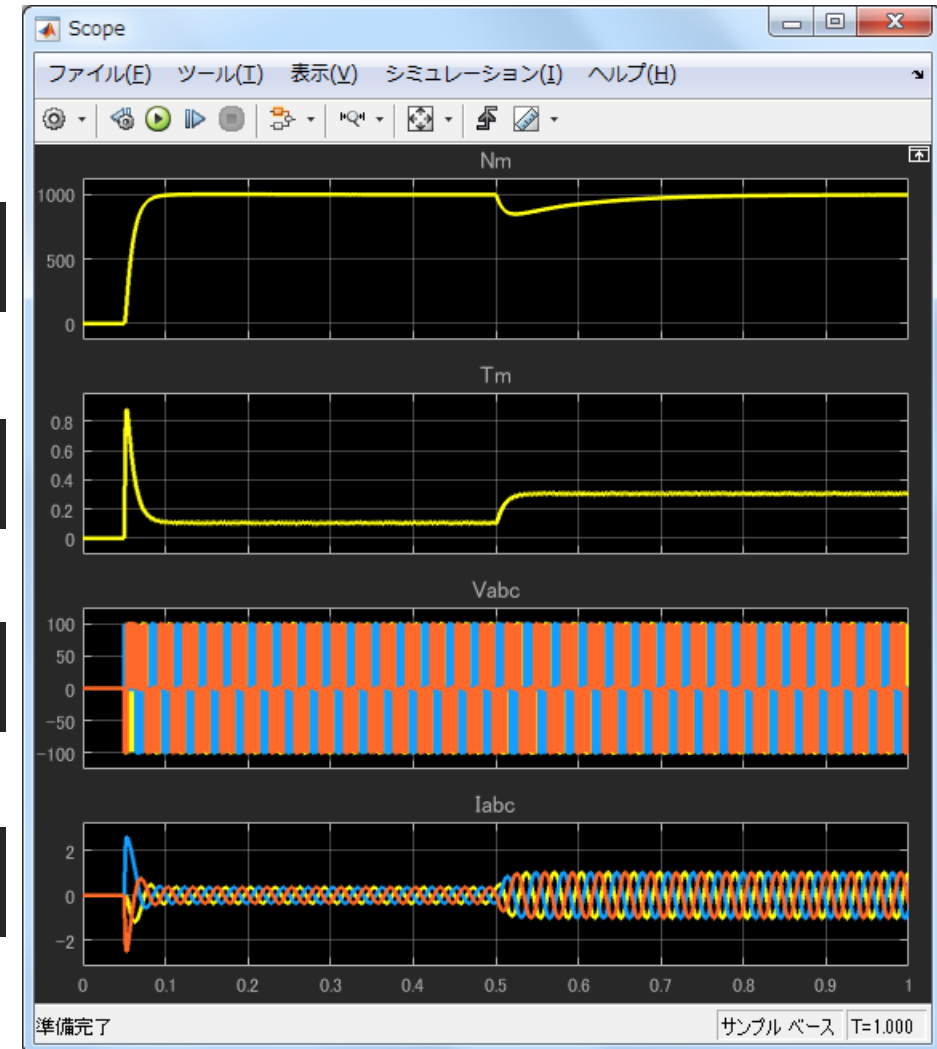
オーバーシュートせずに、目標速度に追従する。・・・(※)
 $t=0.5[\text{sec}]$ で負荷トルクの外乱が発生したときも、
 上記(※)と同様な振舞いをする。

モーター速度
 N_m [rpm]

モータートルク
 T_m [Nm]

モーター線間電圧
 V_{ab} V_{bc} V_{ca} [V]

モーター相電流
 I_a I_b I_c [A]



補足資料

- スイッチング制御 (例: PWM制御) を含むモデルにおける制御パラメータの自動調整
- **Simscape Power Systems™** の2種類のライブラリ
 - **Specialized Technology (Simulinkベースで構築されたライブラリ)**
 - **Simscape Components (Simscape Languageベースで構築されたライブラリ)**

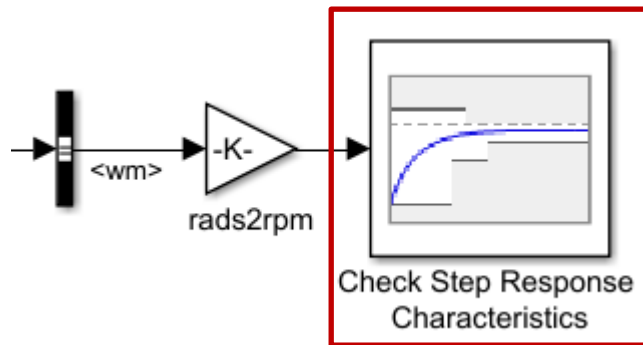
<注意事項>

R2018bから、**Simscape Power Systems™**と**Simscape Electronics™**が1つの電気系モデリングツールとして統合されました。新しいツールの名前は、**Simscape Electrical™**です。



- 13

時間応答 (モーター速度) に制約条件を与える



ブロック パラメーター: Check Step Response Characteristics

ステップ応答の特性をチェックする
入力信号が、ステップ応答の特性によって指定された範囲を満たすことをアサートする。

範囲 アサーション

☒ アサーションにステップ応答の範囲を含める

ステップ時間 (seconds):	0	:		
初期値:	0	:	最終値:	1000
立ち上がり時間 (seconds):	20e-3	:	% 立ち上がり:	90
整定時間 (seconds):	30e-3	:	% 整定:	1
% オーバーシュート:	5	:	% アンダーシュート:	1

☒ ゼロクロッシング検出を有効にする

プロットの表示 ☐ ブロックが開いたときにプロットを表示 応答の最適化...

? OK(O) キャンセル(C) ヘルプ(H) 適用(A)

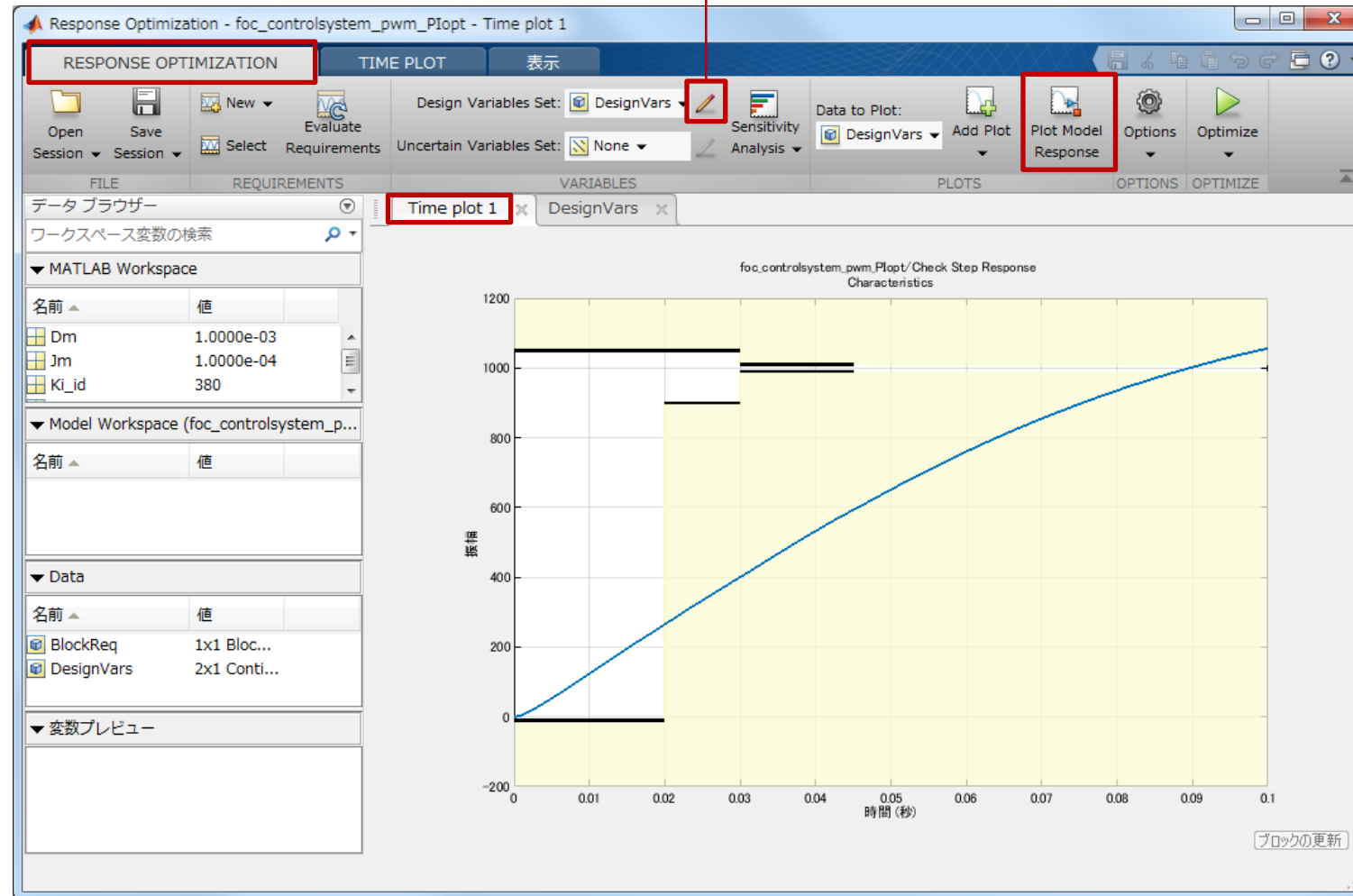
調整するパラメータの設定と確認をして、 調整前のモーター速度の時間応答を確認する

Edit: DesignVars

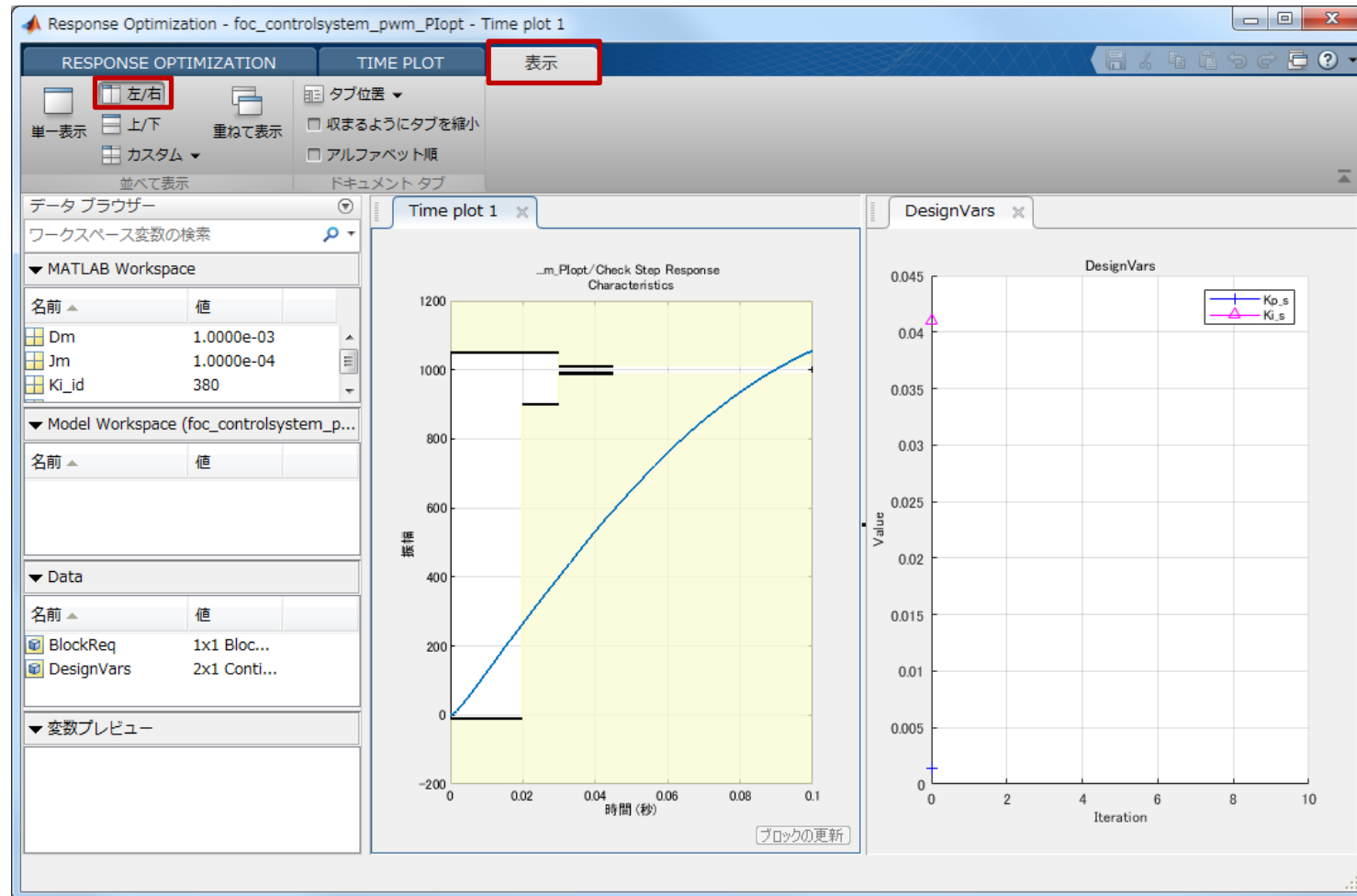
	Variable	Value	Minimum	Maximum	Scale
<input checked="" type="checkbox"/>	Kp_s	0.0014	0	Inf	0.00195...
<input checked="" type="checkbox"/>	Ki_s	0.041	0	Inf	0.0625

Update model variables

Variable Detail

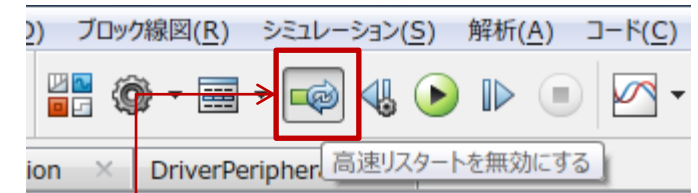


時間応答 (左側)、調整するパラメータ (右側) をグラフ表示する



制御パラメータの自動調整を実行する

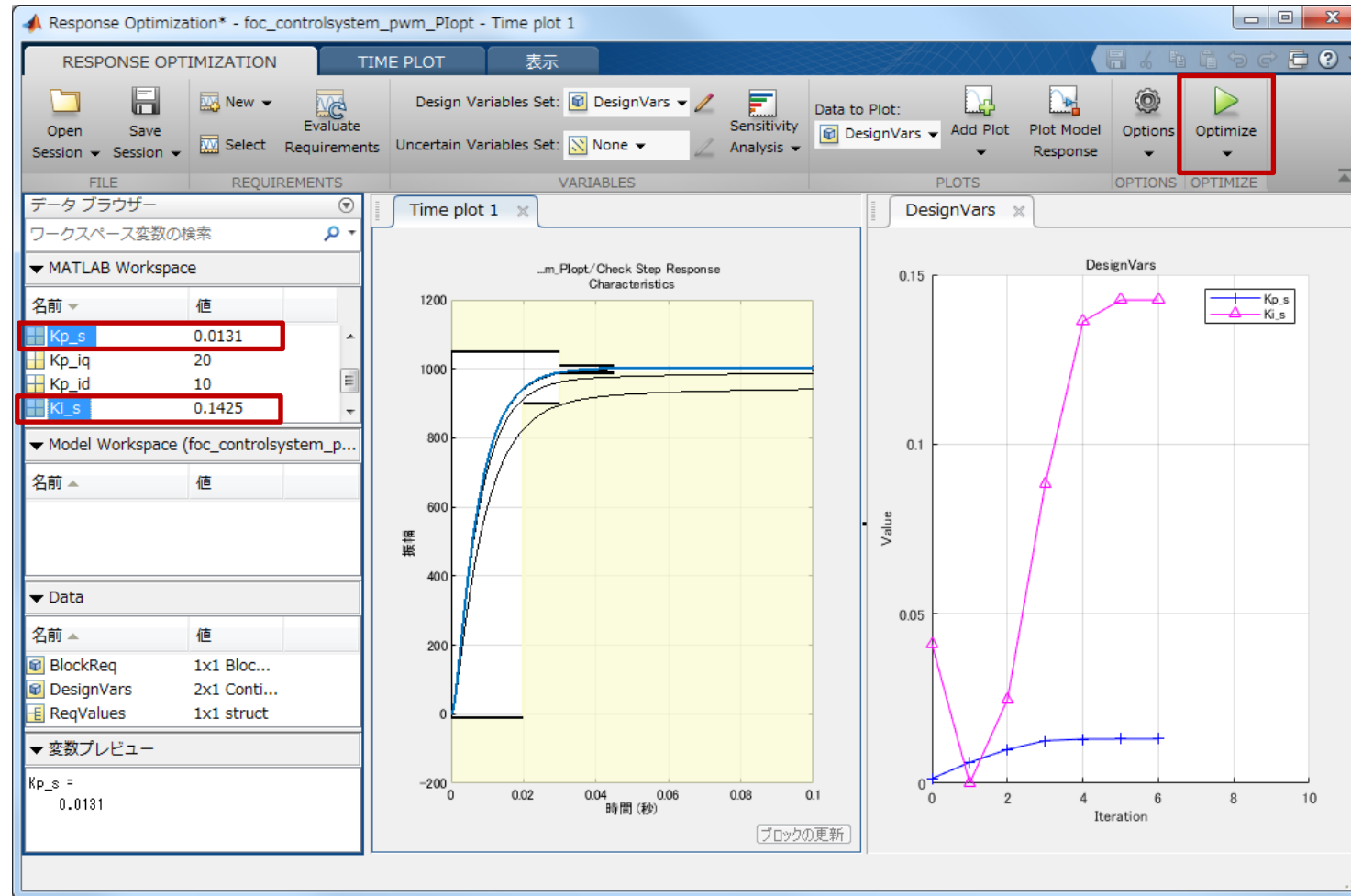
パラメータ推定作業を高速化させるために、「高速リスタートを有効」にする設定をしているので、もし本モデルを編集したい場合は、右図のボタンをクリックして、「高速リスタートを無効」にした状態で編集を行う。



コマンドウィンドウ

```
>> Kp_s
Kp_s =
    0.0131

>>
>> Ki_s
Ki_s =
    0.1425
```



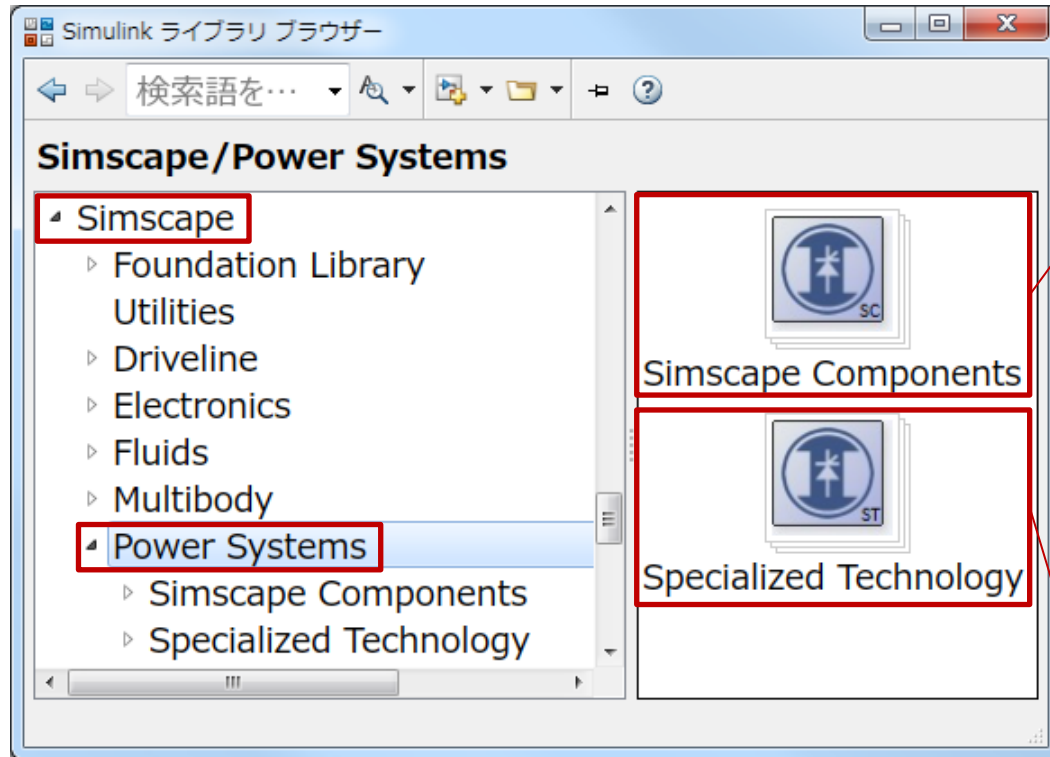
補足資料

- スイッチング制御 (例: PWM制御) を含むモデルにおける制御パラメータの自動調整
- **Simscape Power Systems™ の2種類のライブラリ**
 - **Specialized Technology (Simulinkベースで構築されたライブラリ)**
 - **Simscape Components (Simscape Languageベースで構築されたライブラリ)**

<注意事項>

R2018bから、**Simscape Power Systems™**と**Simscape Electronics™**が1つの電気系モデリングツールとして統合されました。新しいツールの名前は、**Simscape Electrical™**です。

Simscape Power Systems™ - 2種類のライブラリを提供



1 は、R2013bからリリースされたライブラリ

2 は、従来からあるライブラリ

1 Simscape Components

- 物理モデリング言語(Simscape Language)で構築された電気系コンポーネントを提供
- Simscape™、Simscape Electronics™に提供されている様々な種類・詳細度の電気系コンポーネントと組合せた解析用途で推奨 (電気・熱・機械などのマルチドメインの解析)

R2013b

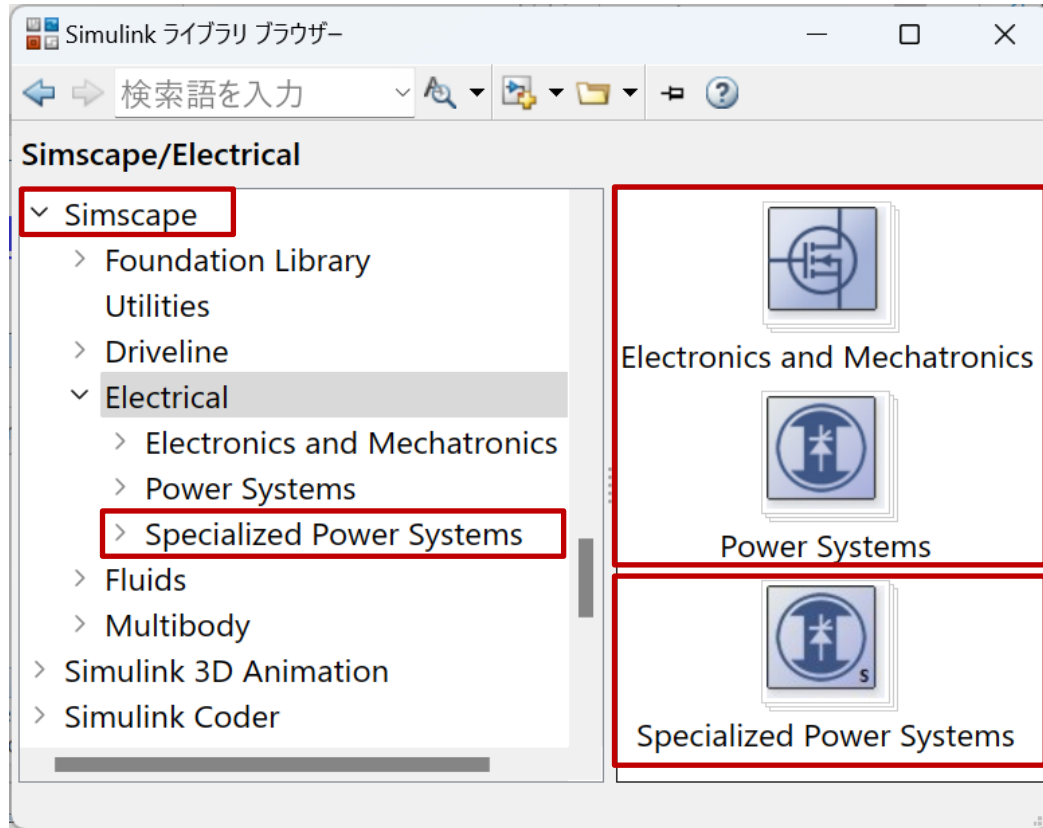
2 Specialized Technology

- Simulinkベースで構築された電気系コンポーネントを提供
- パワーエレクトロニクス、電力系統の高速な解析用途で推奨

#1) パワーエレクトロニクスの解析に有効な計算手法を提供
(理想スイッチングモード、連続時間モード、離散時間モード)

#2) 電力系統の解析に有効な計算手法、解析機能を提供
(フェーザー法による電力系統の初期値・潮流計算、長時間の解析)

Simscape Electrical™ - 2種類のライブラリを提供



1 は、R2013bからリリースされたライブラリ

2 は、従来からあるライブラリ

1 Simscape Components

- 物理モデリング言語(Simscape Language)で構築された電気系コンポーネントを提供
- 様々な種類・詳細度の電気系コンポーネントと組合せた解析用途で推奨 (電気・熱・機械などのマルチドメインの解析)

R2013b

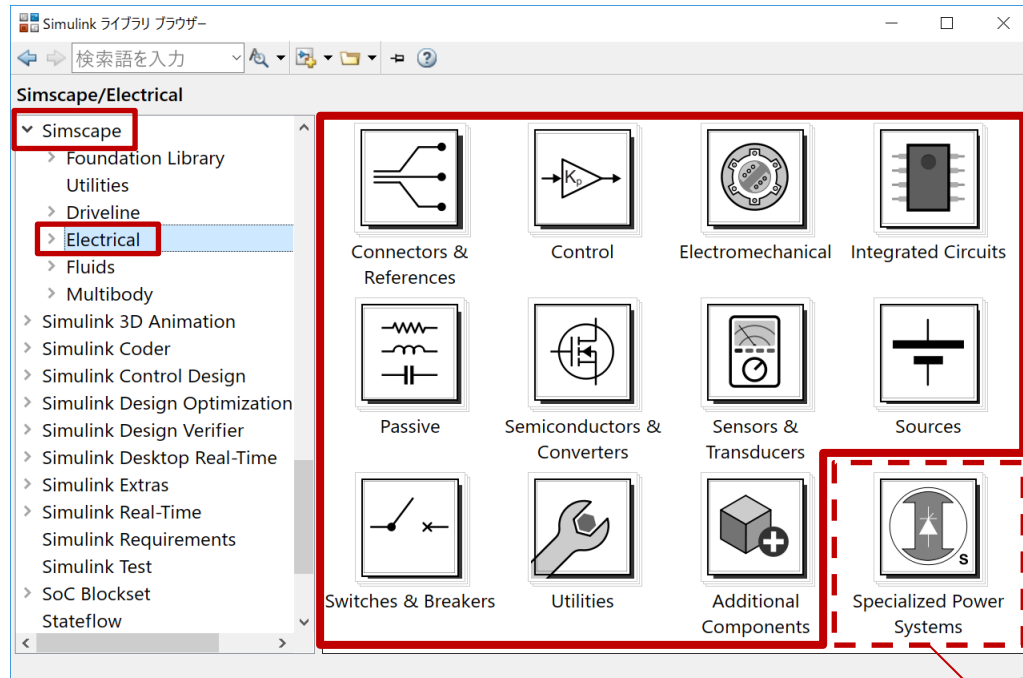
2 Specialized Power Systems

- Simulinkベースで構築された電気系コンポーネントを提供
- パワーエレクトロニクス、電力系統の高速な解析用途で推奨

#1) パワーエレクトロニクスの解析に有効な計算手法を提供
(理想スイッチングモード、連続時間モード、離散時間モード)

#2) 電力系統の解析に有効な計算手法、解析機能を提供
(フェーザー法による電力系統の初期値・潮流計算、長時間の解析)

Simscape Electrical™ - 2種類のライブラリを提供



1 Simscape Components

- 物理モデリング言語(Simulink Language)で構築された電気系コンポーネントを提供
- 様々な種類・詳細度の電気系コンポーネントと組合せた解析用途で推奨 (電気・熱・機械などのマルチドメインの解析)

R2013b

2 Specialized Power Systems

- Simulinkベースで構築された電気系コンポーネントを提供
- パワーエレクトロニクス、電力系統の高速な解析用途で推奨

#1) パワーエレクトロニクスの解析に有効な計算手法を提供
(理想スイッチングモード、連続時間モード、離散時間モード)

#2) 電力系統の解析に有効な計算手法、解析機能を提供
(フェーザー法による電力系統の初期値・潮流計算、長時間の解析)

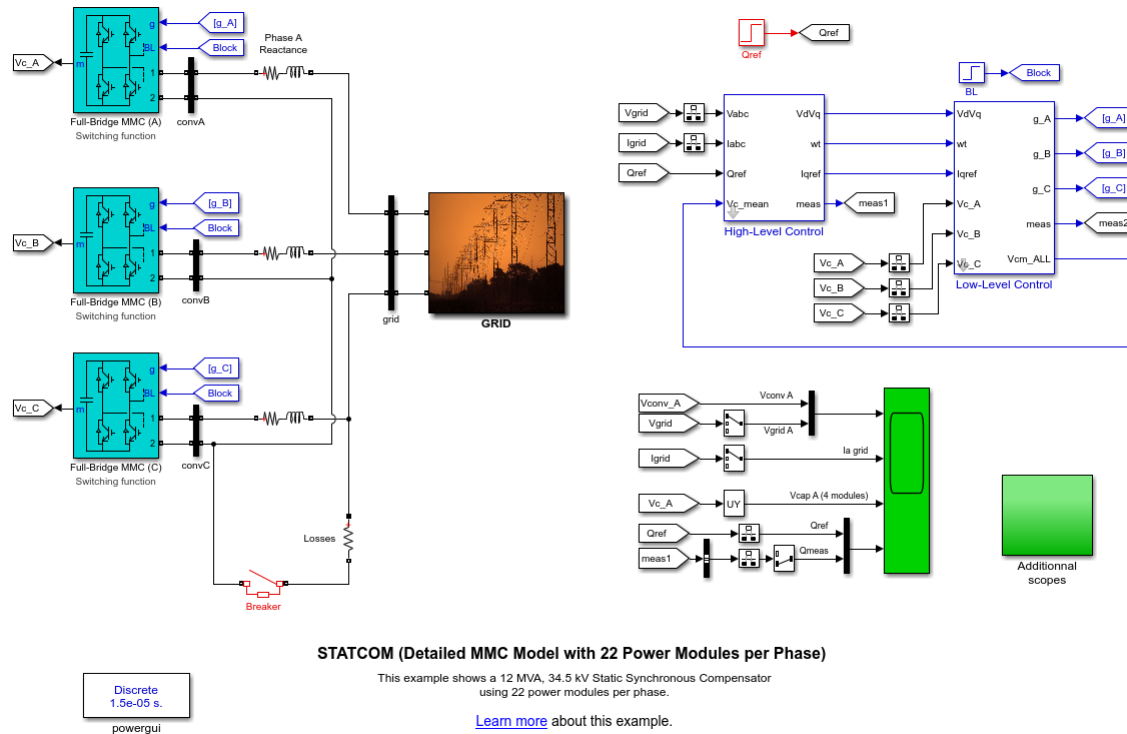
1 は、R2013bからリリースされたライブラリ

2 は、従来からあるライブラリ

Simscape Electrical™ - 2種類のライブラリの使い分けの指針

Specialized Technology (Specialized Power Systems)

- パワーエレクトロニクス、電力システムシステムの高速度解析
- 半導体デバイスの数が多い大規模なパワエシステム解析
- フェーザー法による電力システムの初期値・潮流計算、長時間の解析

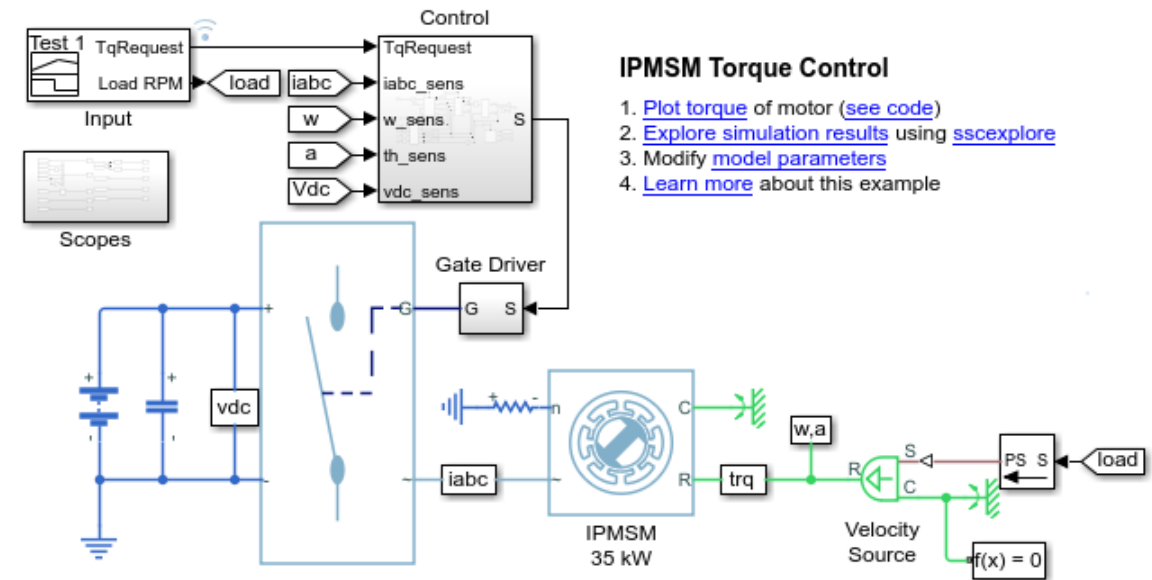


STATCOM (1相につき22個の電力モジュールを持つMMCの詳細モデル)

<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/statcom-detailed-mmc-model-with-22-power-modules-per-phase.html>

Simscape Components

- マルチドメインシステム (例: 電気、熱、機械) の解析
- 電気系コンポーネント (例: 半導体デバイス)の詳細度を変えた解析
- モーター、半導体デバイスの電力損失、熱の解析



Simscape Electrical は、
 ・詳細な半導体デバイスモデル
 ・詳細なPMSMモデル (FEMのテーブルデータを設定)
 などを提供。

IPMSM トルク制御

<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/ipmsm-torque-control.html>

foc_controlsystmフォルダ

次の2つのフォルダがある。「**English**」フォルダ、「**Japanese**」フォルダ。
オリジナルバージョンは日本語で作成したもので、「**Japanese**」フォルダに保存。
また、それを英語に翻訳したものを、「**English**」フォルダに保存。

1. **Simscape Components** を使って作成したサンプルモデル
「**sps_sc**」のファイル一式を参照。
P.2-17の内容のサンプルモデルを保存。
2. **Specialized Technology (Specialized Power Systems)** を
使って作成したサンプルモデル
「**sps_st**」のファイル一式を参照。
P.2-17と同じ内容のサンプルモデルを保存。

本資料でを使用したMATLAB製品

- 基本環境
 - MATLAB[®]、Simulink[®]
- 物理モデリング
 - Simscape[™]、Simscape Power Systems[™]
- 制御設計
 - Simulink Control Design[™]、Control System Toolbox[™]
- パラメータ最適化
 - Simulink Design Optimization[™]、Optimization Toolbox[™]

<注意事項>

R2018bから、**Simscape Power Systems[™]**と**Simscape Electronics[™]**が1つの電気系モデリングツールとして統合されました。新しいツールの名前は、**Simscape Electrical[™]**です。



Accelerating the pace of engineering and science

© 2018 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See www.mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.