

## RT Box *DEMO MODEL*

### **Multistep Model Predictive Control for NPC Inverter Driving an Induction Machine**

誘導機を駆動するNPCインバータの多段階のモデル予測制御

- RT Boxを強力なRCPユニットとして使用 -

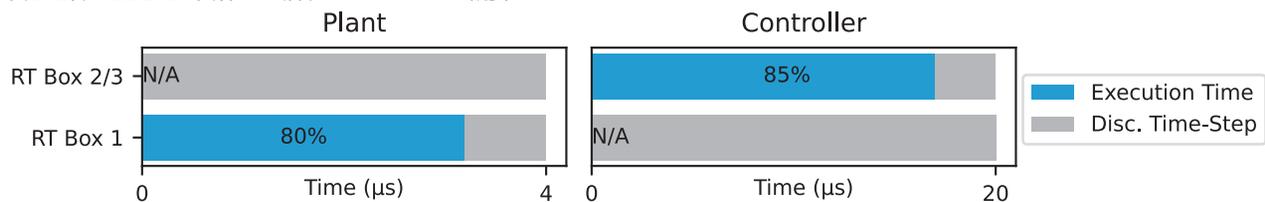
Last updated in RT Box TSP 3.1.2

# 1 はじめに

この RT Boxモデルは、誘導機を駆動する中電圧3レベル中性点クランプ電圧源インバータを備えています。かご形誘導機の定格電力は2MVAです。モデル予測電流制御器の目的は、スイッチング動作を最小限に抑えながら、スイッチ位置を操作することで、ステータ電流を時間制御リファレンスに沿って制御することです。予測コントローラは、 $N_p=5$ の予測期間を使用します。基礎となる最適化問題を解決するために、効率的な最適化アルゴリズムを使用します。

このモデルの離散化ステップサイズと平均実行時間を図1に示します。Controllerの実行時間は、RT Box 2または3で最適化を有効にしたモデル予測制御(Model Predictive Control: MPC)アルゴリズムを実行し、最も負荷の高いCPUコアを参照することに注意してください。

図1: 2台のRT Boxで実行した場合のパフォーマンス概要



## 1.1 要求仕様

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 2または3、1台のRT Box 1、[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3本。

このデモモデルは、Plantを実行するRT Box 1と、Controllerを実行するRT Box 2または3の2台のRT Boxが必要なことに注意してください。このようにして、各リアルタイムターゲットの実行時間を最小限に抑えます。さらに、セットアップは後でHIL (Hardware-in-the-Loop)テストやRCP(Rapid Control Prototyping)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 2/3が1台のみの場合、1台のRT Boxアプリケーションを対象とする対応モデルを確認してください。この場合、前面のAnalog OutインタフェースをAnalog Inインタフェースに接続し、Digital OutインタフェースをDigital Inインタフェースに接続するために、2本の37ピンD-Subケーブルが必要です。

**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:

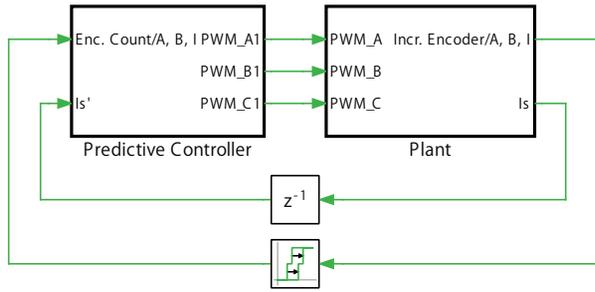
*PLECS Standalone*: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

*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2に示すように、コントローラとプラントモデルを表す2つのサブシステムが含まれています。両方のサブシステムで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**にチェックすると、コード生成が有効になります。この手順は、PLECS Coderを介してサブシステムのモデルコードを生成するために必要です。

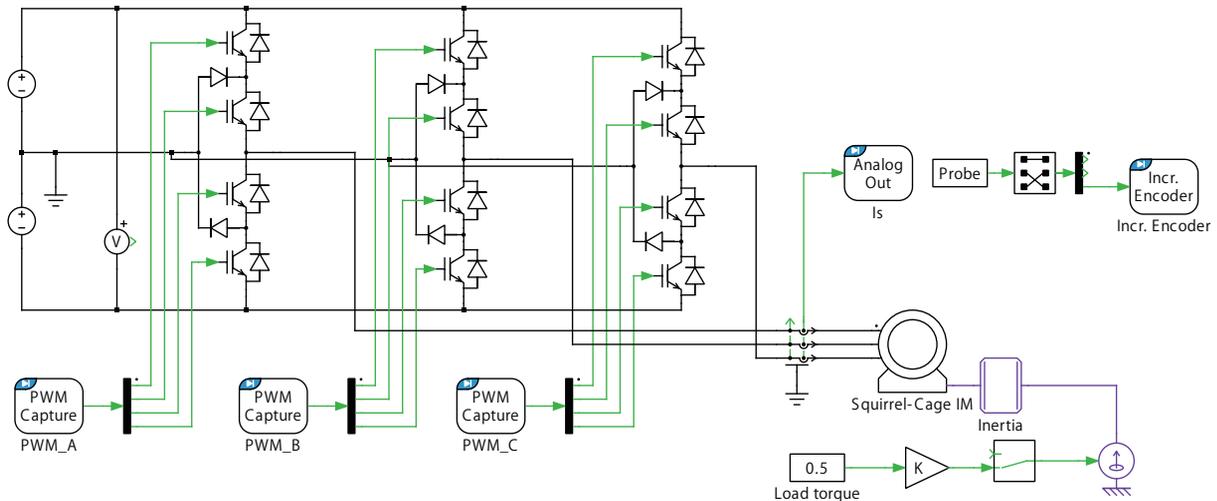
図2: デモモデルのトップレベルの回路図



## 2.1 Plant

図3に示す回路図は、かご形誘導機を駆動する中電圧(MV)、3レベル、3相、中性点クランプ(neutral-point-clamped: NPC)電圧源インバータを示しています。中性点電位はゼロに固定し、DCリンク電圧は一定であると想定します。

図3: ドライブシステムの電源回路



3レベルNPCは、3つの3-レベルハーフブリッジ(NPC)パワー素子モジュールで表します。パルス幅変調(PWM)スイッチング信号は、PLECS RT BoxライブラリのPWM Captureブロックから取得します。パワー素子モジュールのコンポーネントとPWM信号のサブサイクル平均化の詳細については、[1]で説明されています。AC出力電流の測定は、PLECS RT BoxライブラリのAnalog Outブロックに接続します。ロータの角度位置と回転速度は、PLECS RT BoxライブラリのIncremental Encoderブロックによってデジタル直交パルスに変換し、サブシステムの外部で測定できます。

### マシンパラメータ

このモデルのパラメータは[2]で定義されたケーススタディから借用したものです。このマシンは定格2MVAで3.3kV、50Hzのかご型誘導機です。マシンの定格と駆動パラメータは以下の表に示します:

Rated values of the induction machine		
Parameter	SI value	
Voltage	3300V	
Current	356A	
Real power	1.587MW	
Apparent power	2.035MVA	
Angular stator frequency	$2\pi 50$ rad/s	
Rotational speed	596rpm	
Air-gap torque	26.2kNm	
Drive parameters		
Parameter	SI value	pu value
Stator resistance	57.61m $\Omega$	0.0108
Rotor resistance	48.89m $\Omega$	0.0091
Stator leakage inductance	2.544mH	0.1493
Rotor leakage inductance	1.881mH	0.1104
Main inductance	40.01mH	2.349
Number of pole pairs	5	
dc-link voltage	5.2kV	1.930

## 2.2 Controller

コントローラの回路図を [図4](#) に示します。AC電流の測定値は、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。

このモデルはNPCインバータにMPC方式を採用しています。外側の磁束および速度制御ループは、MPCコントローラへ入力を提供します。

MPC Controllerは、起こりうるすべてのスイッチ位置について、次のタイムステップでのステータ電流を予測します。予測には、ロータ磁束ベクトルと、サンプリングされたステータ電流が必要です。ロータ磁束ベクトルを直接測定することはできません。したがって、このベクトルは、既知の量、つまりステータ電流、ステータ電圧、およびロータ速度に基づいて推定する必要があります。

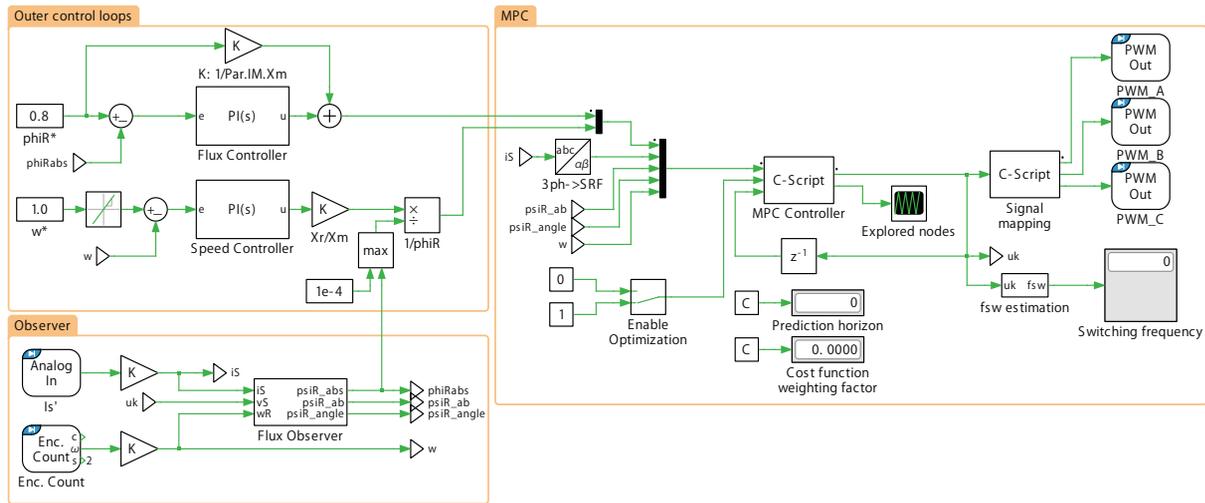
### Controllerの課題

外側の磁束および速度コントローラは、ステータ電流のリファレンスとなるdおよびq成分を予測電流コントローラに提供します。Flux Controllerは、マシンに適切な磁束を供給することを保証し、Speed Controllerは、マシンが目的の速度リファレンスに近づいていることを確認します。

Predictive controllerは、主に2つの部分に分けられます:

- ドライブシステムの内部ダイナミクスモデルに基づく将来の電流軌道の予測
- コスト関数を最小化する一意のスイッチングベクトルを見つける最適化問題を、修正球面復号アルゴリズムで解決

図4: ドライブシステムのPredictive controllerモデル



**Speed Controller** Incr. Encoderと速度リファレンスで測定した速度値は、速度コントローラへの入力として提供します。次に、速度コントローラは電磁トルク設定点を調整し、それに基づいてステータ電流リファレンスのq成分を計算し、予測電流コントローラに提供します。

**Flux Controller** 磁束コントローラは、誘導機に適切な磁束が供給されるようにし、磁束の大きさを高速に制御できるようにします。推定したロータ磁束とそのリファレンス間の誤差は、磁束コントローラへの入力として提供します。次に、磁束コントローラはステータ電流のd成分を操作します。

### ロータ磁束の推定

測定したステータ電流、ロータ速度、およびステータ電圧に基づいて、ロータ磁束ベクトルを推定します。ステータ電圧値は、上限および下限のDCリンク電圧と現在適用しているスイッチの位置から再構築します。このデモでは、ロータ磁束の推定は機械方程式の単なる実装にすぎません。推定量には修正フィードバックがないため、このロータ磁束推定方式ではパラメータの変動や不確実性を考慮しません。

### 直接モデル予測電流制御

MPCには、制御対象となるシステムのダイナミックモデルが組み込まれています。このモデルは、実際の状態と操作変数のシーケンスに基づいて、将来のシステムの状態と出力のシーケンスを予測するために必要です。コスト関数に基づいて、システムをリファレンス状態に導くための最適な将来の入力シーケンスを検索します。制御目標はコスト関数に変換され、将来の状態、出力、および入力のシーケンスをスカラ値にマッピングします。このスカラ値は、さまざまな将来の入力値を比較し、最適なもの、つまりコストが最も低いソリューションを選択するために使用します。

パワーエレクトロニクスで一般的に使用するMPC手法は、リファレンスをトラッキングするために半導体のスイッチ位置を直接操作することです。このデモでは、直接MPCにより、ステータ電流を外部の速度および磁束コントローラから提供されるリファレンス値に合わせて制御します。直接MPCでは、電流コントローラと変調器が1つの計算ステージにグループ化されます。したがって、直接MPCでは変調器は必要ありません。

直接MPCの主な欠点は、特に予測期間が長い場合に最適化の問題を解くための計算負荷が大きくなることです。これは可能なスイッチングシーケンスの数が指数関数的に増加するためです。

**Tuning Variables** 従来の制御方式とは異なり、直接MPCでは調整できるパラメータは2つだけです:

- サンプル間隔 $T_s$
- スイッチングペナルティ $\lambda_n$

スイッチングペナルティは、特定のサンプル間隔におけるトラッキング精度とスイッチング労力間のトレードオフです。この重み係数は、以下に示すようにコスト関数で直接使用します。サンプル間隔の下限は、主にコントローラの計算能力によって決まり、次に半導体の最小オン時間によって決まります。

### コスト関数と最適化問題

インバータによって生成されるすべてのスイッチング状態について、負荷電流の将来の値を予測します。このためには、現在の負荷電流を測定する必要があります。予測値の取得後、各スイッチング状態に対してコスト関数 $g$ を評価します。コスト関数を最小化するスイッチング状態を選択し、次のサンプル期間に適用します。

NPCインバータの制御要件は次のとおりです:

- 負荷電流リファレンスのトラッキング
- スイッチング損失を低減するためにスイッチング周波数を低減

これらの要件は、最小化されるコスト関数の形式で定式化できます。予測期間が1のNPCインバータのコスト関数は次のようになります:

$$g = |i_\alpha^* - i_\alpha^p| + |i_\beta^* - i_\beta^p| + \lambda_n n_c \quad (1)$$

ここで、最初の2つの項は直交座標における負荷電流誤差です。 $i_\alpha^*$ と $i_\beta^*$ はそれぞれ予測電流ベクトル $i^p$ の実数部と虚数部、 $i_\alpha^*$ と $i_\beta^*$ は基準電流ベクトル $i^*$ の実数部と虚数部です。

[式\(1\)](#)の最後の項は、現在のスイッチング状態から評価対象のスイッチング状態に切り替えるために必要な整流回数 $n_c$ です。パワー半導体の整流回数が少なくなるスイッチング状態が望ましいです。このように、この条件での使用はコンバータのスイッチング周波数に直接影響をおよぼします。重み係数 $\lambda_n$ はコスト関数 $g$ 内のスイッチング周波数の低減を処理します。重み付け係数の値が大きいほど、その目標の優先度が高くなります。

予測期間が長くなると、各ステップごとにコスト関数を計算し、最終的に合計する必要があります。

**計算負荷** 上記の最適化問題は、徹底的な探索に基づいて解決します。そうすることで、可能なスイッチングの組み合わせごとにコスト関数が評価されます。予測期間を拡大し、決定変数の数が増加すると、計算の複雑さは指数関数的に増大します。徹底的な検索は、非常に短い予測期間にのみ実現可能です。しかし、最適なスイッチングシーケンスを見つけるために、分岐限定法に基づく効率的な方法を用いることができます。2つ目の方法は、いわゆる球面復号アルゴリズムの適応バージョンです。

**修正球面復号アルゴリズム** 修正球面復号アルゴリズムは、分岐限定法に基づいています。このアルゴリズムは、予測期間が長い直接モデルの予測制御最適化問題において、探索木の一部のみを探索することで最適なスイッチングシーケンス $U_{opt}$ を見つけるための非常に効率的な手法であることが確認されています。計算するのは可能なノードのごく一部のみに過ぎませんが、アルゴリズムは各サンプル期間で最適解を返します。完全性を期すために、[\[2\]](#)で導入された修正球面復号アルゴリズムの疑似コードを[図5](#)に示します。

図5: 修正球面復号アルゴリズム

```

function  $U_{opt} = \text{mSDA}(U, d^2, i, \rho^2, \bar{U}_{unc})$ :
  for each  $u \in U$  do
     $u_i = u$ ;
     $d'^2 = \|\bar{u}_{unc,i} - v_{i,1:i} u_{1:i}\| + d^2$ ;
    if  $d'^2 \leq \rho^2$  then
      if  $i < 3N_p$  then
         $\text{mSDA}(U, d'^2, i + 1, \rho^2, \bar{U}_{unc})$ ;
      else
        if  $U_{meets}$  then
           $U_{opt} = U$ ;
           $\rho^2 = d'^2$ ;
        end
      end
    end
  end
end
end

```

探索アルゴリズムを呼び出すには、初期化する必要があります。このためには、まず制約のない最適解 $\bar{U}_{unc}$ を[2]に示されているように明示的に計算することができます。この制約のない解法では、有効なスイッチングベクトルには、 $U_{set}^1$ で示されているように離散値のみを含めることができるという事実を無視しています。

<sup>1</sup> 3レベルNPCトポロジの場合、有効な入力はこの通りです:  $U_{set} = \{-1, 0, 1\}$

$$U_{ini} = \text{round}(U_{unc}) \quad (2)$$

制約のない解を $U_{set}$ で指定した最も近い整数値に向けて直接成分ごとに丸めると、最適ではない解候補が得られる可能性があります。ただし、この次善の解は、最適化ルーチン呼び出すための初期推測として使用できます。 $\bar{U}_{unc}$ を中心とした球面が張られ、半径 $\rho_{ini}$ は初期解 $U_{ini}$ がちょうど球面内に収まるように設定されます。これにより、少なくとも1つの有効な解が見つかるようになります。修正球面復号アルゴリズムの疑似コードに示されているように、可能なスイッチングベクトル $U$ は、半径 $\rho$ によって記述される球面内にある限り、再帰的に成分ごとに構築されます。これは、制約のない解ベクトルと現在のスイッチングベクトル候補 $U_{i,i}$ 間の二乗距離が、現在の二乗距離 $\rho^2$ よりも小さい場合に当てはまります。候補ベクトルが現在の球面内でない場合、木構造の分岐における探索は、最適解に到達しないため直ちに中止されます。ベクトルが完全な長さになると、たとえば $i = 3N_p$ となり、よりよい解が見つかり、球の半径は制約のない解と新しい最適解の間の距離の2乗にまで縮小されます。これにより、より優れたスイッチングベクトルが見つかるたびに球の半径が狭められ、ルーチンの終了時にはコスト関数を最小化する単一のスイッチングベクトルだけが球内に残ることになります。制御問題の完全な数学的導出は[2]に示されています。

球面復号アルゴリズムは次のように呼び出されます:

$$U_{opt} = \text{mSDA}([ ], 0, 0, \rho_{ini}^2, \bar{U}_{unc}) \quad (3)$$

そしてゲートドライバに適用される最適なスイッチングベクトル $U_{opt}$ を返します。

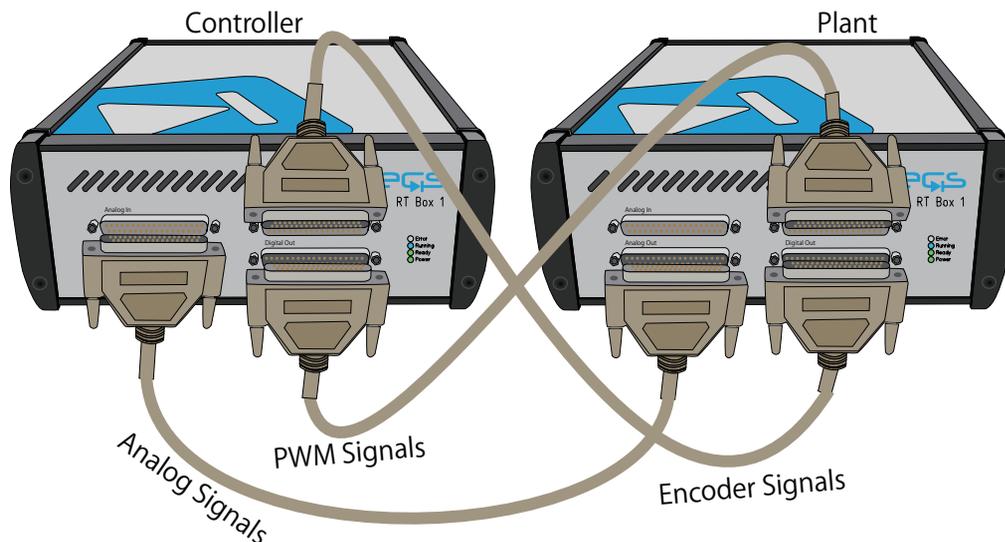
### 3 シミュレーション

このモデルは、コンピュータ上のオフラインモードと、PLECS RT Box上のリアルタイムモードのどちらでも実行できます。リアルタイム操作を行うには、図6に示すように3本のDB37ケーブルを使用して2台のRT Box("Plant"と"Controller")をセットアップする必要があります。

2台のRT Box("Plant"用にRT Box 1が1台と、"Controller"用にRT Box 2または3が1台)でリアルタイムシミュレーションを実行するには、以下の手順に従ってください:

- "Plant" RT Box 1のAnalog Outインタフェースを"Controller" RT Box 2/3のAnalog Inインタフェースに接続し、"Plant" RT Box 1のDigital Outインタフェースを"Controller" RT Box 2/3のDigital Inインタフェースに接続し、"Plant" RT BoxのDigital Inインタフェースを"Controller" RT BoxのDigital Outインタフェースに接続します。
- **Coderオプション...ウィンドウのシステム**のリストから、"Plant"を選択し、"Plant" RT Box 1に**ビルド**します。次に、"Controller"を選択し、"Controller" RT Box 2/3 に**ビルド**します。
- 両方の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、両方の 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: 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



主な波形は、"Plant"と"Controller"サブシステムに配置した各PLECSスコープで観察できます。予測電流コントローラの最適化は、Controllerサブシステム内の"Enable Optimization"手動切替スイッチを0から1に切り替えることで有効にできます。最適化が無効になっている場合、球面復号アルゴリズムは呼び出されず、最適ではない明示的なスイッチングベクトルがインバータに適用されます。

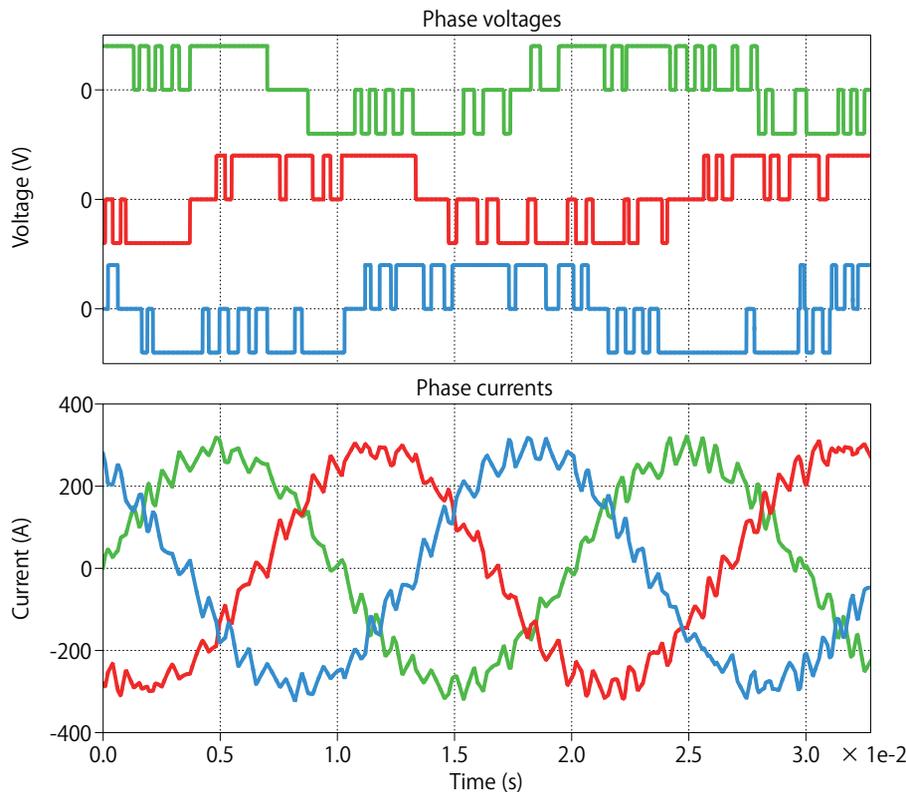
"Explored nodes"PLECSスコープには、最適な解が見つかるまでに最適化アルゴリズムが探索したスイッチングの組み合わせ数を表示します。このスコープは、上で説明したように最適化が有効になっている場合にのみ関連します。

Plantサブシステムで負荷トルクステップを有効にする手動切替スイッチはインライン化されているため、リアルタイムシミュレーション中に切り替えることができます。切り替えると、0.5p.uの負荷ステップがドライブシステムに適用されます。

主なシミュレーション結果を図7に示します。

さらに、オフラインおよびリアルタイムのシミュレーションの前に予測期間を変更することもできます。**シミュレーションメニューのシミュレーションパラメータ**から**初期化**タブの**モデル初期化コマンド**ウィンドウから、Par.Ctr.Npの値を1から5に変更して、目的の予測期間を選択します。また、Controllerサブシステムの"MPC Controller"のC言語入力で予測期間をそれに応じて構成する必要があります。C言語入力ダイアログを開き、**コード入力**タブの**宣言文**セクションに移動します。Npの値を**モデル初期化コマンド**と同じ値に変更します。"Explored nodes"PLECSスコープで、異なる予測期間の効果を確認できます。予測範囲が狭ければ狭いほど、球面復号アルゴリズムで探索する必要があるノードは少なくなります。予測期間を変更した後は、両方のRT Boxでモデルを再ロードする必要があることに注意してください。

図7:  $N_p=5$ の予測範囲と0.5p.u.の負荷トルクにおける定常電圧および電流波形。コスト関数の重み付け係数は、スイッチング周波数が約300Hzになるように選択しました。



- Coderオプションダイアログの**ターゲット**タブまたは**外部モード**タブの下にある  アイコンをクリックして、各RT BoxのWebインターフェースを開きます。
- Webインターフェースの**Application**タブの下部にある**Stop**ボタンをクリックして、リアルタイムシミュレーションの実行を停止します。
- [第3章](#)の説明に従って、それぞれのRT Boxで"Plant"と"Controller"サブシステムを再ビルドします。

## 4 まとめ

このモデルは、誘導機を駆動する中電圧3レベル中性点クランプ電圧源インバータを示しています。駆動システムは、外側の磁束および速度コントローラと内側の予測電流コントローラによって閉ループ制御しています。このモデルは、HILテストとRCPのために、オフラインとリアルタイムの両方の操作で実行できます。

## 5 参考文献

- [1] J. Allmeling, and N. Felderer, "Sub cycle average models with integrated diodes for real-time simulation of power converters," IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2017.
- [2] T. Geyer and D. E. Quevedo, "Multistep Finite Control Set Model Predictive Control for Power Electronics," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 12, pp. 6836-6846, Dec. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2014.2306939.
- [3] L. Capponi, "Direct Model Predictive Control Using Model Based Design," IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), 2021.

改訂履歴:

RT Box TSP 2.2.1 初版

RT Box TSP 3.1.2 PWM生成の更新



**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。