



PLECS DEMO MODEL

Windpower System with Permanent Magnet Synchronous Generator

永久磁石同期発電機を備えた風力発電システム

Last updated in PLECS 4.7.1

KESCO KEISOKU ENGINEERING SYSTEM

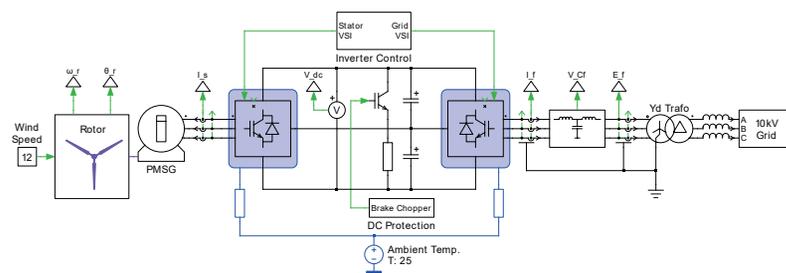
計測エンジニアリングシステム株式会社
<https://kesco.co.jp>

1 概要

このデモでは、永久磁石同期発電機(Permanent Magnet Synchronous Generator: PMSG)を備えた2MW風力発電システムを紹介します。PLECSの熱および機械の物理ドメインもモデルに統合されています。システムの概要図を図1に示します。モデルは初期化コマンドで選択できる2つのシナリオを調査できます。

- Switchedパワエレモデルを使用した短いシミュレーション。障害状態や熱挙動を含む、通常動作中の電気回路と機械的ドライブトレイン間の相互作用を観察します。
- 風速の変化における最大電力点追従(Maximum Power Point Tracking: MPPT)を観察するための、高速なAvaragedパワエレモデルを使用した長時間シミュレーション。

図1: システムの概要



Note このモデルには、次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

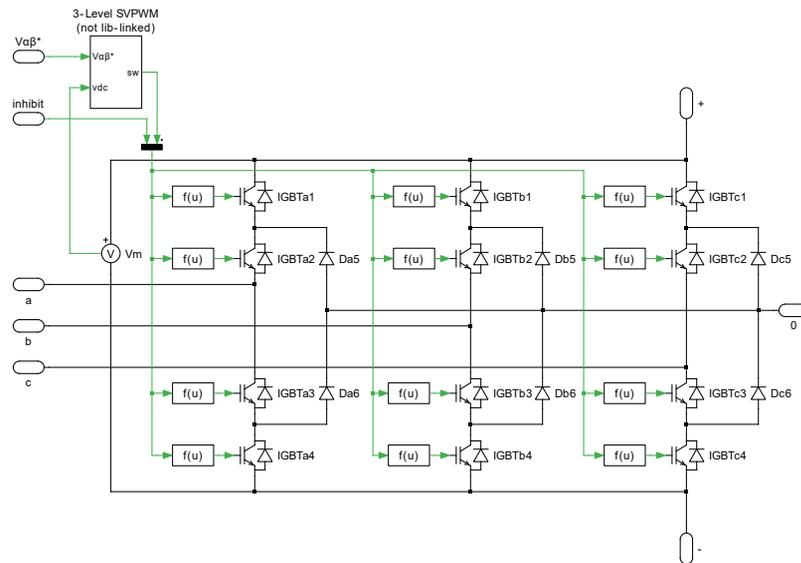
PLECS Blockset: Simulinkモデルウィンドウで右クリック → モデル プロパティ → コールバック → InitFcn*

2 モデル

2.1 電源回路

電力回路には、極対数30のPMSGが含まれています。固定子は、3レベル中性点クランプ(Neutral Point Clamped: NPC)のBTB(Back-to-Back)コンバータに直接接続されており、NPCコンバータの詳細モデルを図2に示します。コンバータのグリッド側は昇圧スターデルタ変圧器に接続されており、生成した電力を10kV中電圧ネットワークに供給します。

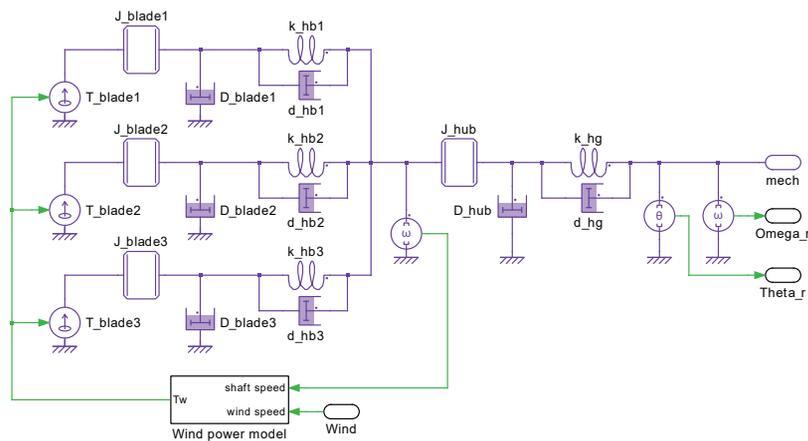
図2: 空間ベクトルPWMブロックを含む3レベルNPCコンバータの概要



2.2 機械的ドライブトレイン

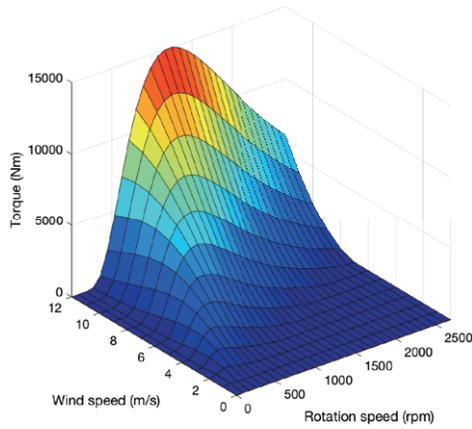
図3に示すように、機械のロータはギアボックスなしでプロペラのハブとブレードに直接接続しており、これらが一緒に風力タービンの機械部品を構成します。これらは互いに弾性的に結合しており、システムに共振振動を引き起こします。

図3: 風力/シャフト速度からトルクへの変換を含む風力タービンの機械シャフトモデル



タービンプレードに適用する風トルクの値はルックアップテーブルから取得し、値は風力とシャフトの回転速度によって変化します。

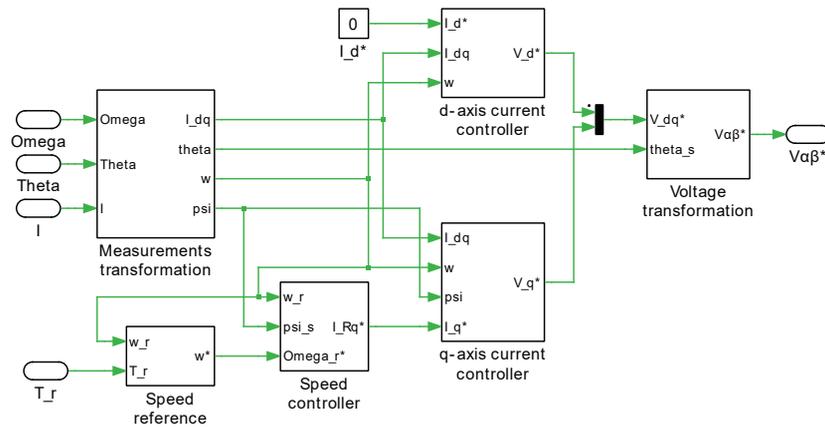
図4: トルク曲面としてモデリングした風力タービンのダイナミクス



2.3 制御

BTBコンバータは、マシン側とグリッド側の部分は分離しており、中間点に接続した2つのDCリンクキャパシタを介して相互に接続します。マシン側コンバータは、図5に示すように、二重ループ構造で、外側の速度ループが内側の電流ループのリファレンス信号を生成してPMSGのトルクと回転速度を制御します。電流制御は次のように実行されます。電流制御は、固定子磁束方向を伴う回転参照座標(dq)で実行します。グリッド側コンバータは、有効電力をマシン側コンバータからLCLフィルタを介してグリッドに転送し、DCリンク電圧を1500Vに維持します。PIコントローラには、アクティブダンピング、フィードフォワード、積分アンチwindアップ手法を採用しています。

図5: BTB NPCコンバータの1つに対するカスケード速度/電流制御

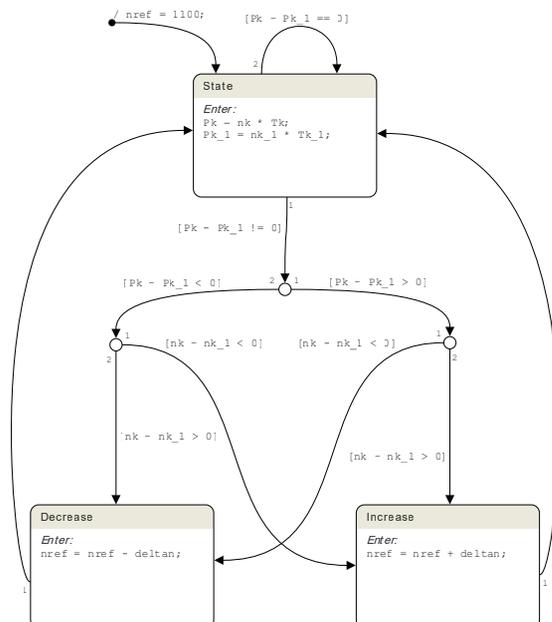


コンバータは、3レベルの空間ベクトルPWM(Space Vector Pulse Width Modulation: SVPWM)を使用して動作します。このデモで使用している3-Level SVPWMブロックは、ライブラリにリンクされていないコンポーネントであることに注意してください。Symmetricalオプションとは別に、Alternating Zero VectorのSVPWM modulation strategyを備えています。Alternating Zero Vectorでは、各スイッチングセクタでゼロベクトルが交互に適用され、スイッチング遷移の数が最小限に抑えられるため、スイッチング損失が低減しますが、変調電圧のTHD容量が高くなります。一方、Symmetricalの場合、単一のスイッチングシーケンス中にゼロベクトルが適用されます — つまり、一方はスイッチング周期の開始と終了の両方に分割され、もう一方はスイッチング周期の途中で適用されます。この方式では、スイッチング損失は高くなりますが、THDは低減します。

MPPTアルゴリズム

このデモモデルでは、基本的な摂動観測(Perturbation and Observation: P&O)を実装しています。P&O法では、ロータ速度を小さなステップで変動させ、出力を観察してロータ速度の変動を調整します。このアルゴリズムは、[図6](#)に示すように、PLECSのステートマシンブロックで実装しています。[図4](#)の風力タービンのダイナミクスと、そこから生成する電力に基づいて、アルゴリズムは指定したステップの風速での最大電力点を検出します。詳細は[シミュレーション](#)セクションを参照してください。P&O法は、通常の下でシステムの最大電力点を追跡します。ただし、追加機能のないこのMPPT法は、突風などの突然の風速変化などの大きな外乱には対応できませんが、より長い期間にわたる緩やかな変化には対応できます。[\[1\]](#)

図6: PLECSのステートマシンで実装したP&O MPPTアルゴリズム



2.4 熱

コンバータモデルは、Averaged modelまたはSwitched model with thermalのいずれかの構成でシミュレーションできます。Averagedコンバータモデルでは、スイッチング損失に関する情報が欠落しているため、損失解析は実装していません。Switchedモデルでは、IGBTの導通損失とスイッチング損失、および冷却システムの影響を調査できます。5SNA3600E170300および5SLA3600E170300 IGBTおよび逆並列ダイオードパッケージの熱モデルは、それぞれマシン側とグリッド側のコンバータに使用します。電力損失のルックアップテーブルには、デバイスのジャンクションからケースまでの熱インピーダンスチェーン情報が含まれており、これもデータシートに記載されています。これらの説明は、コンバータコンポーネントのシンボルをダブルクリックし、**Thermal description**パラメータのドロップダウンメニューから**編集...**を選択することで表示および編集できます。IGBTの熱設定は、このデモモデルにパッケージされているディレクトリWind_power_system_pmsg_plecsに保存されています。

"スイッチ損失算出"コンポーネントは、インバータモデルの"Switched model with thermal"サブシステム内に配置され、全損失を簡単に計算できます。詳細については、このブロックの**ヘルプ**セクションを参照してください。

熱のモデリングとデバイスの損失と効率の計算の詳細については、PLECSのdemosライブラリの"Buck Converter with Thermal Model"を参照してください。

熱シミュレーションの結果は、初期化コマンド内でswitched構成を使用している場合のみ、このデモモデルで利用できます。

3 シミュレーション

3.1 グリッド故障状態

このシミュレーションでは、グリッド故障発生時のシステム全体の動作を示しています。いくつかのイベントがあります：

- シミュレーションを開始すると、PMSGは同期速度で動作します。
- システムが新たに平衡状態に入った直後、[図7](#)に示すように、 $t=4$ 秒で10kVの電力グリッドに電圧降下が発生します。この障害は、2007年のドイツのグリッドコードで定義された最悪のシナリオに対応する $t=0.2$ 秒の電圧降下としてモデリングしています。
- 障害の結果、電気システムと機械システムの両方で高周波振動を伴う過渡現象が観測されます。
- グリッド電圧が回復すると、システムは定常状態に戻ります。これは[図8](#)に示されており、平均有効電力と無効電力がプロットされています。
- $t=6$ 秒で、速度リファレンス信号は 1.05rad/s から 0.004rad/s^2 の加速度で上昇します。

図7: 接続した10kVの電力グリッドにおける電圧低下時のシステム動作

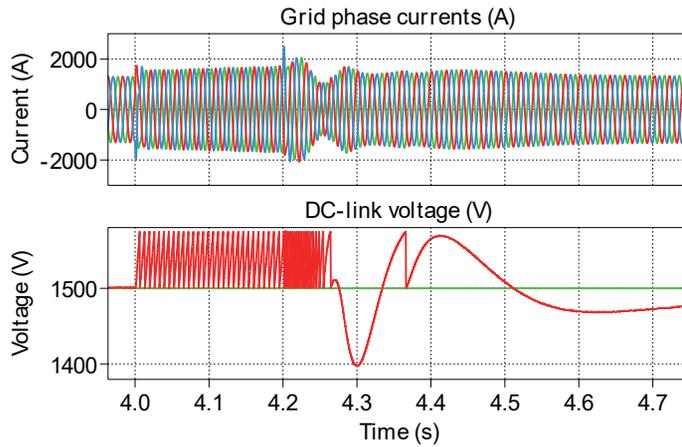
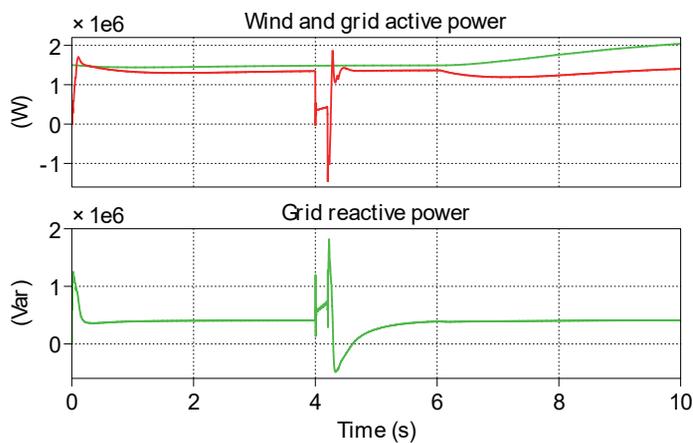


図8: 風力発電とグリッド有効電力とグリッド無効電力



3.2 風速変化時のMPPT

このシナリオでは、風速が6m/sから12m/sまで徐々に増加し、MPPTアルゴリズムは各風速ステップの最大電力点でロータ速度を追跡します。その後、同様に風速が減少し、各ポイントに再び近づきます。プロファイルは図9のXYプロットに1回表示し、動作点を示します。比較の時間プロファイルは図10に表示します。風速が段階的に変化するたびに速度とトルクの調整を行い、電力がわずかに増加します。

図9: 段階的な風速プロファイルでのMPPTアルゴリズムの動作点へのアプローチ

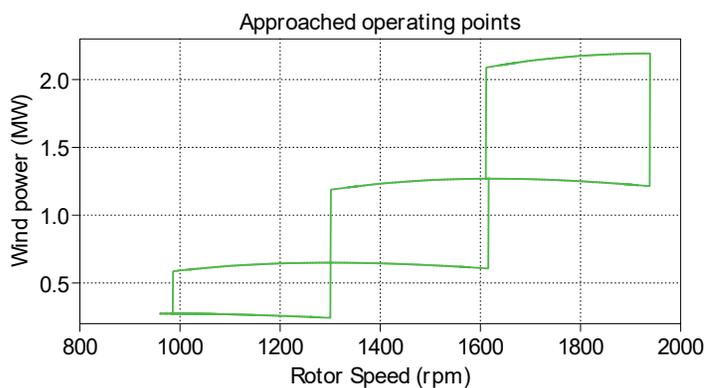
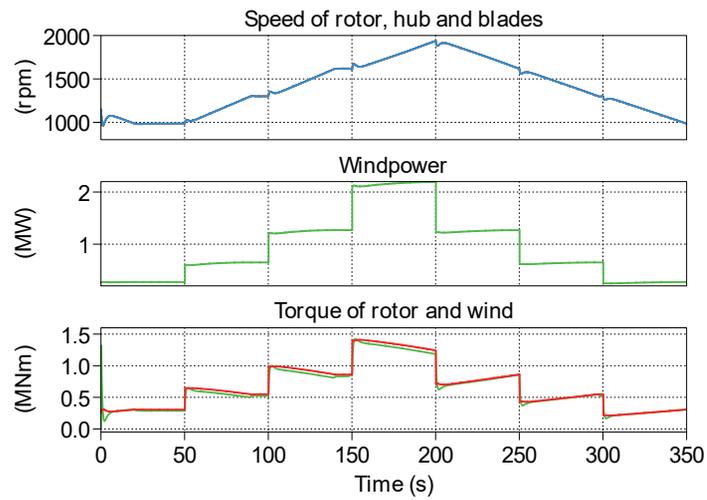


図10: 段階的な風速プロファイルでの時間の経過に伴うMPPTアルゴリズムの動作点へのアプローチ



参考文献

- [1] Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche, "MPPT control methods in wind energy conversion systems", Fundamental and advanced topics in wind power, vol. 1, no. 2011, pp. 339-360.

改訂履歴:

- PLECS 4.4.1 初版
- PLECS 4.5.5 MPPTアルゴリズムの更新
- PLECS 4.7.1 スイッチ損失算出ブロックを使用してモデルを更新

**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



計測エンジニアリングシステム株式会社

<https://kesco.co.jp>

PLECS Demo Model

© 2002-2023 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。