



# PLECS DEMO MODEL

*Single-Phase PV Inverter with Partial Shading*

部分陰を考慮した単相PVインバータ

Last updated in PLECS 4.3.1

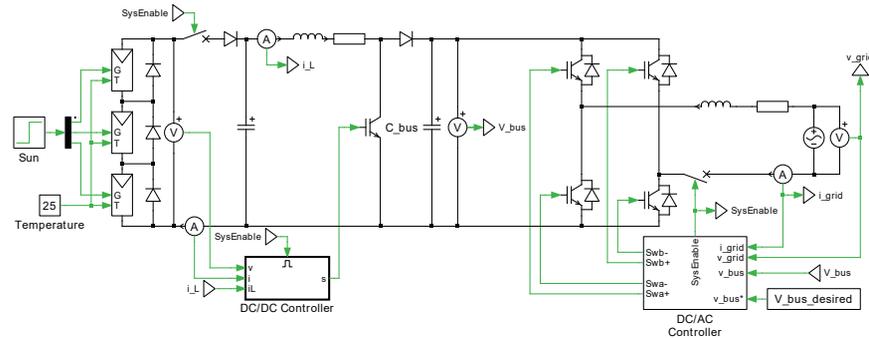
**KESCO** KEISOKU ENGINEERING SYSTEM

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、昇圧型フロントエンドと単相インバータのバックエンドを備えたグリッド接続ソーラーパネルシステムを紹介します。昇圧コンバータは、パネルを最大電力点(Maximum Power Point: MPP)で動作するように設計しています。最大電力点追従(Maximum Power Point Tracking: MPPT)アルゴリズムが実装されており、部分陰条件下でのソーラーパネルのパフォーマンスが向上します。さらに、インバータはDCリンク電圧を制御する外部電圧ループと、力率1を維持する同期レギュレータで動作します。

図1: 単相、2ステージのグリッド接続PVインバータ



**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\*

## 1.1 太陽光発電システムのモデル

[1]で提案されている単一ダイオードの等価モデルを使用して、PVサブストリングを実装します。ユニットによって生成される電流の支配方程式は次のように与えられます:

$$I_m = I_{PV} - I_0 \cdot [e^{(V + \frac{R_s I}{V_T a})} - 1]$$

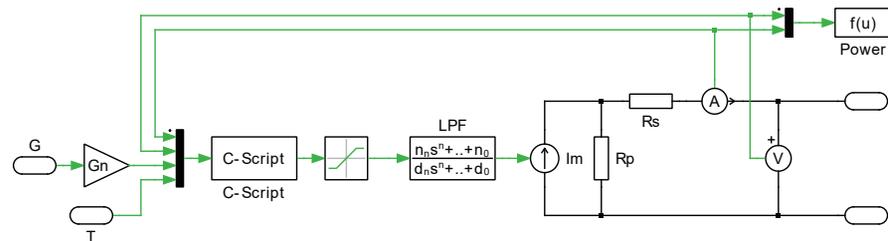
ここで、 $I_{pv}$ はユニットに入射する光によって生成される電流、 $I_0$ はダイオードの逆飽和または漏れ電流、 $V$ は端子電圧、 $R_s$ は等価直列抵抗、 $I$ は端子電流、 $V_T$ は熱電圧、 $a$ はダイオードの理想係数です。モデルの詳細な説明は[1]にあります。

[1]で提案されたPVモデルには、PVパネルによって生成される電流( $I_m$ )が端子電流( $I$ )の関数であるため、固有の代数ループを持っています。同時に、 $I$ は $I_m$ と直列抵抗および並列抵抗( $R_s$ および $R_p$ )の関数でもあります。PLECSモデルには、代数ループを遮断するローパスフィルタが含まれています。フィルタの時定数は1e-6秒に設定されています。

PVモジュールは、直列接続した3つのサブストリングで構成しています。各サブストリングにはバイパスダイオードを持っています。太陽放射照度(入力 $G$ )と温度(入力 $T$ )は、各サブストリング全体で均一であると仮定しています。部分陰の場合、各サブストリングの放射照度は不均一なため、日陰になったサブストリングで生成する電流は減少します。バイパスダイオードがないと、日陰のセルで逆電流と電力損失が発生する可能性があります。日陰のサブストリングと日向のサブストリングで生成した電流の差をバイパスダイオードに流すことにより、日陰のセルでの逆電流と電力損失が回避されます [2]。

このシミュレーションでモデリングしたPVユニットは、各モジュール54個を直列接続したセルを3つ並列接続した、KC200GT太陽電池モジュールアレイに対応しています。各ユニットのパラメータは、[1]の表1に従って選択しました。

図2: ソーラパネルのサブシステムモデル

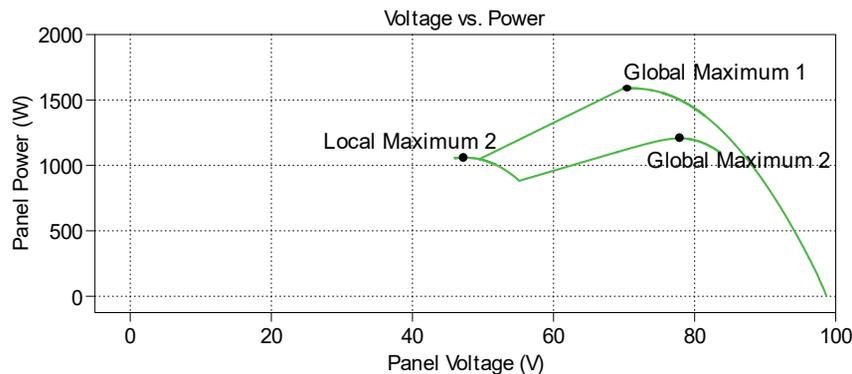


## 1.2 DC/DCコンバータ

昇圧コンバータはソーラーパネルをMPPで動作させるために制御します: [3]で提案されている摂動と観察(Perturb and Observe: P&O)と、[4]で提案されている増分コンダクタンス (Incremental Conductance: INC)の2つのMPPTアルゴリズムが実装されています。P&OまたはINCアルゴリズムは、"DC/DC Controller"サブシステムの"MPP controller"から選択できます。

これらのMPPTアルゴリズムはリファレンス電圧を変更することで、ソーラーパネルの出力電力を増加させます。アルゴリズムは、MPPTを超えたリファレンス電圧に変更すると、電力が減少します。この電力低下を検出し、リファレンス電圧を逆方向に変更します。

図3: MPPTを示す電力対電圧曲線



部分陰では、上のプロットに見られるように、複数の局所最大電力点(Local Maximum Power Point: LMPP)が発生します。これらのLMPPは、PVモジュールのバイパスダイオードによって発生します[2]。単ステージのMPPTアルゴリズムが採用されている場合、開始電圧のリファレンスによっては、コントローラがグローバル最大電力点(Global Maximum Power Point: GMPP)ではなくLMPPに巻き込まれる可能性があります。コンバータをGMPPTで動作させるには、第2ステージが必要です。電圧スキャンをPVシステムの電圧範囲全体で実行し、最大電力が生成される電圧を記録します。この電圧範囲のスキャンは、コントローラがコンバータをGMPPTで動作させるための第2ステージとして有効にすることができます。

DC/DC Controllerは3レベルのネストループ構造で構成されています。MPP controllerは外側のループを形成し、Voltage controllerの電圧設定値を生成します。電圧ループは、昇圧コンバータのキャパシタ電圧入力を制御するために使用します。電圧ループは、内側の電流ループの電流設定値を生成します。この電流レギュレータは、インダクタ電流を調整するために使用します。電流ループの出力は、昇圧コンバータのデューティ比を導出するために使用されます。

### 1.3 DC/ACコンバータ

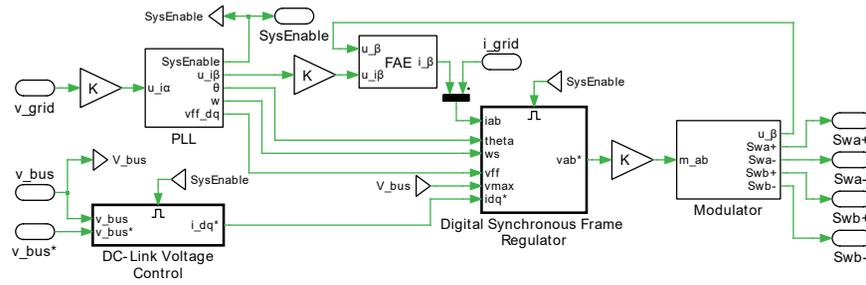
昇圧コンバータの出力は、DCリンクキャパシタを介して単相電圧形インバータ(Voltage Source Inverter: VSI)のDC側に接続されます。VSIは、外側の電圧ループと内側の電流ループを備えたネスト制御方式によって調整されます。

外側の電圧ループは、DCリンク電圧を制御し、電圧を目的のレベルに維持するために使用します。電圧ループは、グリッド電流の振幅設定値を生成します。コンバータは無効電力ゼロで動作するため、電圧コントローラからの生成電流設定値は、同期フレームレギュレータのq軸電流の設定値と等しくなります。

同期フレームレギュレータは、ACシステムを等価なDCシステムに変換し、d軸とq軸にそれぞれPIコントローラを実装することで複雑さを軽減します。単相システムは、三相システムと異なり、AC電流を同期フレームに直接変換するための情報が不足しています。このシミュレーションでは、[5]で提案されている仮想軸エミュレーション(Fictive Axis Emulation: FAE)手法を実装しています。グリッド電流は $\alpha$ 軸と一致していると仮定し、 $\beta$ 軸電流はFAEを使用してエミュレートします。測定した $\alpha$ 電流と導出した $\beta$ 電流はdq軸に変換され、同期フレームレギュレータに供給されます。変換に使用する角度は、[6]で提案されている二次一般化積分器モデルに従ってモデリングした位相同期ループ(Phase-Locked Loop: PLL)で生成します。

同期フレームレギュレータは、必要な $\alpha\beta$ 電圧ベクトル設定点を計算します。このベクトルは、変調器の変調指数を生成するために、ピークグリッド電圧振幅によってスケールされます。変調指数は、ユニポーラ変調器を使用してVSIのスイッチング信号を生成するために使用されます。DC/AC Controllerの制御構造を図4に示します。

図4: インバータコントローラ



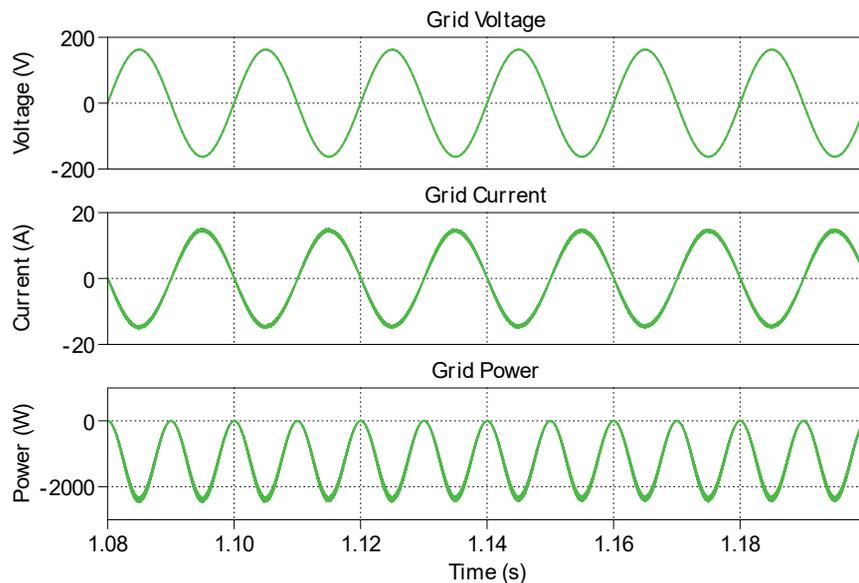
## 2 シミュレーション

このシミュレーションは、MPPで動作するグリッド接続太陽光インバータの動作を実証します。添付したモデルを使用してシミュレーションを実行し、"P vs V"というラベルの付いたPLECS スコープでパネル電圧の関数として生成される発電電力の軌跡を観察します。

制御システムは最初は無効になっており、ブレーカーは開いたままです。PLLがロックされると、すべての制御システムが有効になり、ブレーカーは閉じます。リファレンス電圧が変更され、MPPに達するまでソーラーパネルの発電電力が上昇します。パネルは最初は日向ですが、0.7秒後にSubstring 3に部分陰が発生します。放射照度は公称値( $1000 \frac{W}{m^2}$ )の100%から65%に減少します。GMPP検索が有効になり、コントローラはすぐにグローバル最大値に達します。グローバル検索を無効にしてシミュレーションを再実行し、部分陰条件下でのソーラーパネルの発電電力の違いを観察します。

グリッド側コントローラは、DCリンクキャパシタの電圧を目的の400VDCに維持します。また、力率を1に維持し("Grid Analyzer"サブシステムのマスクで確認できます)、ソーラーパネルで発電された電力をグリッドに供給します。図5は、システムが部分陰なしで動作しているときのグリッド側の電圧、電流、電力を示しています。

図5: グリッド信号のシミュレーション結果



"Grid Analyzer"サブシステムは、合計有効電力、皮相電力、および力率を計算するために使用します。計算時間を最小限に抑えるためにこれらはデフォルトで無効(Disabled)としていますが、サブシステムの構成で有効(Enabled)を選択することができます。

## 参考文献

- [1] M. Villalva; J. Gazoli; E. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- [2] Y. Tong; R. Ayyanar, "Maximum-voltage-unit-guided MPPT algorithm for improved performance under partial shading," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 2428-2434, 15-19 Sept. 2013.
- [3] H. Abu-Rub; M. Malinowski; K. Al-Haddad, "Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications", Wiley, 2014.
- [4] B. Liu; S. Duan; F. Liu; P. Xu, "Analysis and Improvement of Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on Incremental Conductance Method for Photovoltaic Array," 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2007. pp. 637-641, 27-30 Nov. 2007.
- [5] B. Bahrani; A. Rufer; S. Kenzelmann; L. Lopes, "Vector Control of Single-Phase Voltage-Source Converters Based on Fictive-Axis Emulation," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 2, pp. 831-840, March-April 2011.
- [6] M. Ciobotaru; R. Teodorescu; F. Blaabjerg, "A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator," 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), 2006. pp. 1-6, 18-22 June 2006.

改訂履歴:

PLECS 4.3.1 初版



**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。