ソーラ・アレイ・シミュレータによる太陽光発電インバータのテスト

Application Note

概要

太陽光発電インバータのメーカは、ソーラ・モジュールから利用できる最大の電力を引き出し、供給できるようにすることが求められています。ソーラ・モジュールから得られる電力は、照度と温度に大きく左右されます。利用可能な最大電力は、最大電力ポイント(MPP)と呼ばれ、稼働状態により変化します。インバータの設計、開発、品質保証では、さまざまな MPP での試験が重要となります。インバータを試験するソーラ・モジュールから、フル・レンジの MPP とその他の動作ポイントを得るには、長期間にわたり、再現可能な幅広い照度と温度条件にモジュールを曝す必要があります。これをソーラ・モジュールを使用して、試験環境で行うのは現実的ではありません。Agilent E4360 ソーラ・アレイ・シミュレータは、制御可能で一貫性があり、安定した広範囲のソーラ・モジュールをシミュレートできます。

Agilent Technologies

問題

制御可能で一貫性があり、安定した広範囲のソーラ・モジュールは、以下が求められる場合は、容易に達成できず、場合によってはほぼ不可能です。

- インバータのピーク電力のトラッキング回路／アルゴリズムの開発および性能の検証
- インバータの効率の測定と検証
- 入力電圧の上限と下限でインバータが出力できる能力の検証
- 品質保証試験の実施：さまざまな環境条件でのインバータ性能の確認
- 数週間で数年分の稼働の影響を調べる加速試験の実施
- 認証試験の実施

解決策

Agilent E4360 モジューラ・ソーラ・アレイ・シミュレータを使用することにより、インバータを試験するための安定した I-V 曲線を再現することができます。E4360 では、以下の 3 種類の曲線生成方法から柔軟に選択できます。

- **SAS モード**
- **テーブル・モード**
- **内蔵オフセット機能**

3 種類の方法はすべてこのアプリケーション・ノートで説明しています。2 つのレベルの曲線解像度と、機能リストから選択できるため、プログラムの必要性が減少し、場合によっては不要になります。

SAS モード

E4360A にモジュールの開放電圧（V_{oc}）、短絡電流（I_{sc}）、および最大電力ポイントでのその電圧と電流（V_{mp}、I_{mp}）を与えると、シミュレータの内部ファームウェア・アルゴリズムが、**図 1** に示されている太陽電池モジュールの式を使用して、4096 個または 256 個の電流／電圧ペアで I-V 曲線を生成します。

$$V = \frac{\dfrac{V_{OC} * \ln\left[2 - \left(\dfrac{I}{I_{SC}}\right)^{N}\right]}{\ln(2)} - R_S * (I - I_{SC})}{1 + \dfrac{R_S * I_{SC}}{V_{OC}}}$$

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \qquad N = \frac{\ln(2 - 2^{a})}{\ln\left(\dfrac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)}$$

$$a = \frac{V_{mp} * \left(1 + \dfrac{R_s * I_{sc}}{V_{oc}}\right) + R_s * (I_{mp} - I_{sc})}{V_{oc}}$$

図 1：
I-V 曲線を生成するための式

指数モデルは、以下の論文で説明されています。Britton, Lunscher, and Tanju, "A 9-KW High-Performance Solar Array Simulator," Proceedings of the European Space Power Conference, August 1993 (ESA WPP-054, August 1993

テーブル・モード

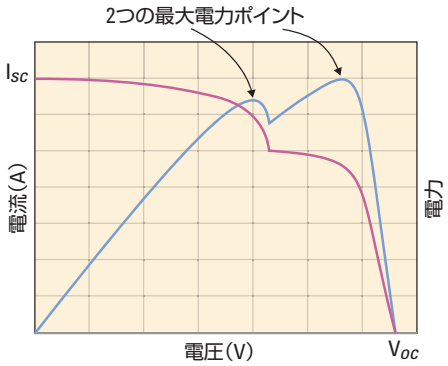

図 2：
並列接続された複数のソーラ・モジュールから得られた複雑な I-V 曲線

E4360 に最大 4000 個の電流／電圧のデータ・ペアを入力して、シミュレートする曲線を正確にモデル化できます。この方法は、シミュレータの内部アルゴリズムが、シミュレートするモジュールとの十分な相関を示さない場合や I-V 曲線が複雑な場合に役立ちます。例えば、並列接続された複数のソーラ・モジュールからは、内部アルゴリズムで再現できない、複数の最大ピーク電力ポイントを持つ曲線が生成される可能性があります。

図 2 の複雑な曲線は、ダイオードでアイソレートされ、1 つのモジュールの一部が陰に入っている並列接続されたモジュールの例です。

3 ～ 4000 個の電流／電圧(I-V)ペアをテーブル･モードで入力できます。入力するデータ・ペアの数と関係なく、E4360 は、選択した分解能に応じて、リニア補間により、256 または 4096 個のペアの表を生成します。すべての I-V ペアは、電流と電圧の値で構成する必要があります。**表 1** を参照してください。最大アナログ電流分解能は、ユーザが選択するソーラ・アレイ・シミュレータ・モジュールのフルスケール定格に基づいています。開放電圧（V_{oc}）および短絡電流（I_{sc}）の値が入力されていない場合は、E4360 は与えられたデータで補間して、V_{oc} および I_{sc} を生成します。

表 1： n 個の電流／電圧ペアの I-V テーブル

電流	0	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	.	.	.	I_{n-1}	I_{sc}
電圧	V_{oc}	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	.	.	.	I_{n-1}	0

テーブル・モード 続き

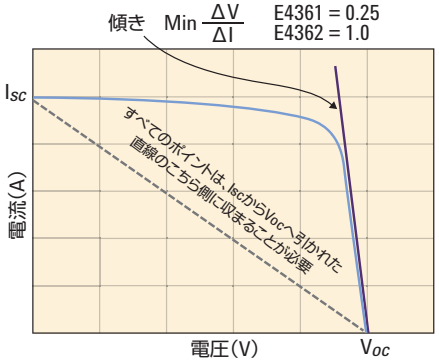

図３：
グラフは、I-V データをテーブル・モードで入力する際に適合する必要がある境界条件を示しています。

E4360 には、ユーザが入力するショート電流に等しい最大電力ポイント電流（I_{mp}）を入力できます。最大電力ポイント電圧（V_{mp}）に対する入力は、ユーザが入力する開放電圧（V_{oc}）未満であることが必要です。データは、単調で、I_{sc} から V_{oc} に引かれた直線の上に存在し、結果として得られる曲線のすべての場所で傾き（$\Delta V/\Delta I$ で表現される）が最小要件に適合する必要があります。**図３**を参照してください。E4360 は、曲線および V_{oc} を終点とする曲線と傾き全体で単調性をチェックします。

オフセット機能

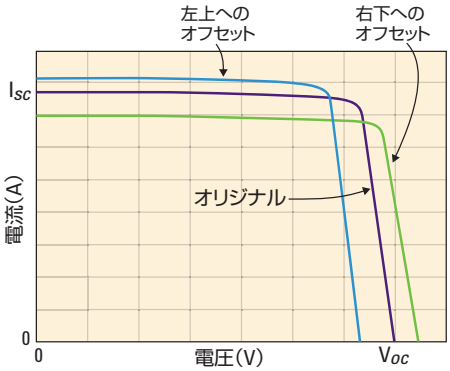

図４：
元の曲線を水平方向と垂直方向に同時に移動している例

E4360 が生成する I-V 曲線は電流／電圧ペア（テーブル・モード）の入力から生成され、基本形状を変更せずに調整できます。モジュールが、条件を変化させたときに基本形状をそのまま保持する I-V 曲線を生成する場合は、この形状をテンプレートとして使用できます。補間により内部でテーブルを生成する前に、入力した元の I-V データ・ペアそれぞれにオフセット値が適用されます。電圧／電流にプログラムでオフセット値を加算または減算することにより、別の曲線データを入力せずに変化する照度や温度レベルを効果的にシミュレートできます。**図４**を参照してください。

リスト機能

上記の３種類の曲線生成方法に加えて、E4360A のリスト機能では、個別の曲線をそれぞれ最大 512 ステップまで、キューに登録する機能が利用できます。各ステップに対して個別の持続時間を入力するか、ステップからステップに移動するトリガを入力できます。また、1 ～ 256 回までの繰り返しを設定することもできます。

インバータ性能の保証

上記の E4360 の機能を使用することにより、インバータの性能を保証するために、さまざまなテストを行うことができます。

インバータのピーク電力トラッキング回路／アルゴリズムの開発と性能の検証

あらゆる環境条件で利用可能なソーラ・モジュール電力を可能な限り引き出すインバータを開発することが目的である場合は、通常、最大ピーク電力トラッキング手法を使用します。回路の設計／開発では、**図 5** に示されているように、ピーク電力のトラッキング範囲、およびトラッキング頻度を考慮する必要があります。ピーク電力のトラッキング範囲とは、インバータのピーク電力トラッキング回路／アルゴリズムの動作により横切られる最大ピーク電力ポイントのいずれかの側にある I-V 曲線上の距離であり、トラッキング頻度とは、トラッキング範囲を横切る割合です。モジュールの I-V 曲線が変化するときに、インバータが常に最大ピーク電力ポイントを見つけられるように、十分に広いトラッキング範囲と十分に高いトラッキング頻度が必要です。設計の有効性を検証するために、インバータの性能を確認する試験は正確で再現可能な I-V 曲線に基づいて行われる必要があります。

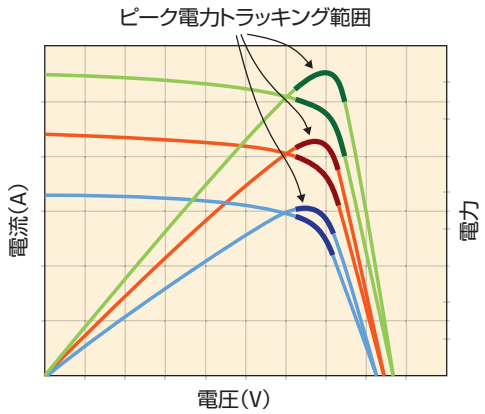

図 5：
照度範囲と電力トラッキング範囲でのピーク電力トラッキング

ソーラ・アレイ・シミュレータの性能の限界を考慮することが重要です。インバータの最大ピーク電力トラッキング回路／アルゴリズムが動作ポイントを変化させるのに合わせて、I-V 曲線を再現するソーラ・アレイ・シミュレータの機能は、部分的に電力トラッキング範囲とトラッキング頻度の関数です。電力トラッキング範囲が広くトラッキング頻度が高いと、範囲が狭く頻度が低い場合よりシミュレーション誤差が大きくなります。測定値が有効であることを確認するために、Agilent N3300 などの電子負荷を使用してベースラインを確立し、プログラムされた I-V 曲線の最大電力ポイントを検出して、インバータにより引き出される電力を比較できます。最大電力ポイント（P_{mp}）での電力の％としての電力誤差が、トラッキング頻度と電力トラッキング範囲を含めて、図 6 に示されています。図で示されている電力トラッキング範囲は、ピーク電力の％で表されていて、P_{mp} の両側を横切ります。この例では、シミュレータの負荷は、P_{mp} の片側で－ 5%、－ 10%、－ 15% から P_{mp} の反対側で－ 5%、－ 10%、－ 15% に正弦曲線的に変化しています。

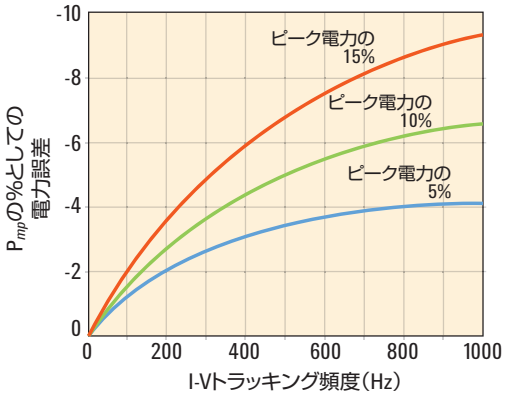

図 6：
トラッキング頻度と電力トラッキング範囲の関数として表された%誤差

インバータの効率の測定と検証

利用可能なモジュール電力を可能な限り引き出すことに加えて、インバータは入力された DC 電力を効率的に AC 電力に変換する必要があります。固定 DC 電圧の範囲をインバータに入力することにより有意義な結果が得られる場合もありますが、最大ピーク電力トラッキング（MPPT）回路と DC から AC への変換機能との相互作用が十分に検証できません。変換効率は、MPPT と DC から AC への変換回路の相互作用に依存し、電力経路での DC 動作電圧レベルによっても変化します。最大ピーク電力トラッキング機能の頻度と範囲が高いほど、固定 DC 動作ポイントの範囲ではなく、I-V 曲線の範囲から、正確なインバータ効率のデータが得られます。

入力電圧の上限と下限でインバータが出力を生成できる能力の検証

例えば、夜明けおよび正午に利用可能なソーラ・モジュール電力を利用するために、インバータが低電圧と高電圧、および入力の上下限値で出力を生成する必要がある場合は、そのような条件のモジュールにより生成されるI-V曲線から、インバータが正しく機能することを確認する必要があります。ソーラ・アレイ・シミュレータを使用することにより、両極端間で曲線を徐々にまたは急激に変化させることができ、変化速度や両極端での曲線がインバータの動作に重大な影響を与えているかどうかを判断できます。したがって、このような曲線または曲線の変化速度での動作が望ましくない結果を招く場合は、シミュレータは性能の問題を特定するための助けとなり、また逆に期待性能に対する動作の検証にも使用できます。E4360では、最小30msで曲線を変化させることができます。ほとんどの時間は、変化の準備に費やされます。曲線から曲線への実際の遷移は、15μs未満で実行されます。

品質保証試験の実施：さまざまな環境条件でのインバータ性能の確認

品質保証プロセスには通常、一連の環境条件下での仕様に対する性能の検証が含まれます。インバータは、衝撃、振動、輸送、温度、湿度、高度などに曝され、一連の電気試験が行われます。一部の試験は環境室で実施され、また一部の試験ではインバータが稼働状態になっています。入力および環境条件の全範囲にわたってインバータが仕様どおりに十分な機能を発揮できるように、通常I-V曲線の全範囲で試験を実施します。必要に応じて、I-V曲線の変化を実施している試験に同期させることができます。E4360Aソーラ・アレイ・シミュレータを使用すれば、試験の要件に適合するようにI-V曲線を調整でき、内蔵された同期電圧／電流測定機能とデータロガーにより、試験手順全体で電圧／電流を測定できます。多くの場合、電圧／電流の測定値から計算される電力（W）の精度で十分です。Agilent N3300などの電子負荷、電圧と周波数を調整可能な電力網シミュレータ、Agilent E4360ソーラ・アレイ・シミュレータがあれば、インバータの品質保証の試験設備は完璧です。さらに正確に電流、電圧、電力を測定する必要がある場合は、Agilent DMMと精密ワットメータを追加してください。

数週間で数年分の稼働の影響を調べる加速試験の実施

E4360Aを使用すれば、加速試験が容易に行えます。1日24時間、1年365日をシミュレートするために試験室ベースの環境条件でインバータを試験する場合は、温度や日射の変化による出力の変化をシミュレートすることが必要です。また、部分的な陰、経年劣化、ほこりや汚れの蓄積、風速などモジュール出力を変化させるその他の多くの条件をシミュレートすることも必要です。ライフサイクル試験を加速するには、数年分の結果を数週間で得られるように、環境条件やモジュール出力の変化速度を大幅に増加させる必要があります。E4360を使用すれば、インバータの環境条件に対応したI-V曲線を生成して同期できます。デジタルI/Oポートやプログラムにより、外部イベントによるI-V曲線の変化もトリガできます。

認証試験の実施

政府および民間団体が後援するさまざまな再生可能エネルギー・プログラムに参加するには、認証試験が求められる場合があります。例えば、カリフォルニア・エネルギー委員会（CEC）は、州が後援するプログラムへの参加資格があるインバータやその他の機器のリストを作成しています。インバータが適格リストに掲載されるには、特定の要件に適合し、一連の試験に合格する必要があります。インバータに対する要件と試験手順、およびソーラ・アレイ・シミュレータの基本要件は、CEC の Web サイトから入手できます。E4360 ソーラ・アレイ・シミュレータは、有効で再現可能な試験結果が確実に得られる、広範囲の出力、アナログ性能、安定性、確度を実現します。

まとめ

Agilent E4360 により得られる、I-V 曲線生成の柔軟性と範囲およびさまざまな機能は、インバータ・デザインの性能の開発／検証、品質保証、加速試験、認証試験を支援します。E4360 は、生産性を向上するための測定器です。

詳細については、以下の Web サイトにアクセスしてください。
www.agilent.co.jp/find/sas

アジレント・テクノロジー株式会社
本社〒192-8510 東京都八王子市高倉町 9-1

計測お客様窓口
受付時間 9:00-18:00（土・日・祭日を除く）

TEL ■■ 0120-421-345
(042-656-7832)
FAX■■ 0120-421-678
(042-656-7840)
Email contact_japan@agilent.com
電子計測ホームページ
www.agilent.co.jp

● 記載事項は変更になる場合があります。
ご発注の際はご確認ください。

© Agilent Technologies, Inc.2009

Published in Japan, July 24, 2009
5990-4132JAJP
0000-00DEP

Agilent Technologies