



インピーダンス整合

タイゴエナジー・モジュールマキシマイザーMM-ESシリーズ：技術解説

タイゴエナジー社は、太陽光発電システムから最大電力を取り出すための革新的技術を開発しました。市販されている他の類似製品と同じように、タイゴエナジーマキシマイザーシステムは、出力の弱い太陽電池が他の正常な太陽電池モジュールに及ぼす悪影響を事実以上排除し、各々の太陽電池モジュールから最大電力を取出します。しかしながら、他社製品とは異なりタイゴエナジー社製品は、最小限の追加電子部品構成で高信頼性と低コストを達成しました。このホワイトペーパーは、タイゴエナジーシステムの最新特許である「インピーダンスマッチング」の原理と動作について説明します。

モジュールミスマッチの解決案

通常のPVシステムは、システム最大電圧（アメリカ600V、ヨーロッパ1kV、日本450V）に合わせて、太陽電池モジュールを直列に接続します。例えばVocが35Vの多結晶モジュールであれば、直列に10枚または11枚接続されます。大規模設備ではこの直列が複数の並列に組み合わせられて全体アレイを構成します。この直列接続のために、アレイの総発電出力量は出力の一番弱いモジュールに影響されてしまいます。（図1）

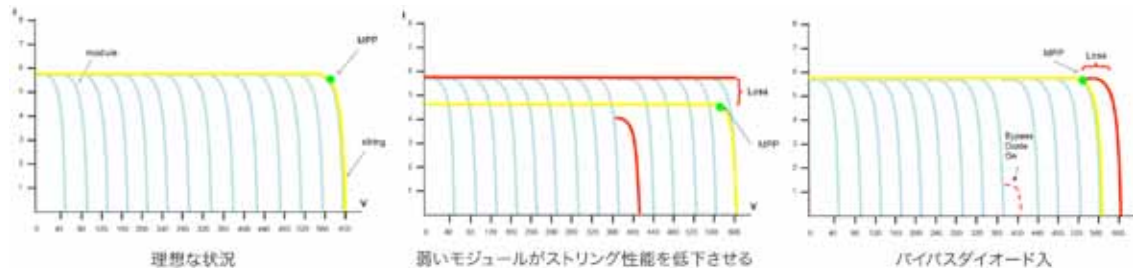


図1

この問題を防ぐためには、システムを設置する際に太陽電池モジュールメーカーとその出力性能を揃えることが必要です。多くの太陽電池メーカーは、全てのモジュールのIVデータを提供し、施工業者にできるだけ出力差の少ないモジュールを供給しようとしています。しかしこの方法のみでその差が無くなるのでしょうか？いくつかの最適に設計された大型のPV発電システムの運転状況を測定した結果、最初の数週間に限って問題はありませんでした。数週間経過後に、不均一な土台、温度変化、方向性の微妙な違いやシリコンの劣化等によるミスマッチの影響で、影が無くても発電量を低下させることがわかりました。下図は、北カリフォルニアに設置されているシステムの2008年6月の真昼の晴天日（1）の測定データです。グラフはストリング内の各モジュール電圧を示しています。

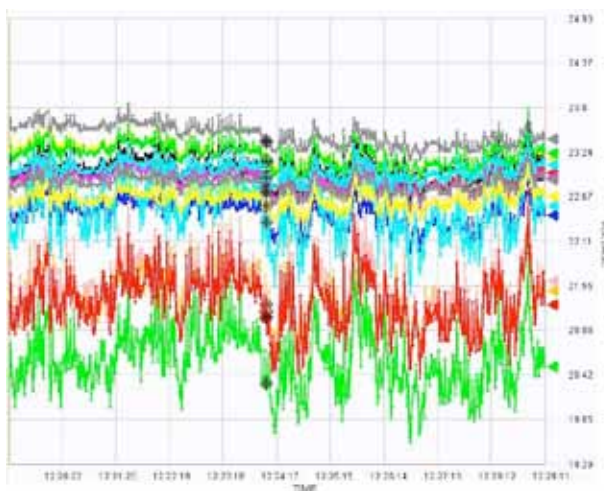


図2—結晶系PVストリングの各太陽電池モジュールの電圧グラフ
(2008年カリフォルニア州パークレー)

もしシステムが最適動作点で動作するのであれば、各170W結晶系モジュールは、最適動作電圧である24.6V (Vmp) 付近で

動作するはずですが。そうであれば24V以上のところで太線を見ることができるとは思いますが、しかしながら本グラフを見ればそうではないのは明らかです。最低電圧と最高電圧の差（約15%）は発電量の出力損失を意味しています。この現象は各モジュールが通常、最高の状態では稼働していないことを示します。Vmp以下で稼働しているものはインバータが調整を行っている間は激しい変動を見せます。それ以上で稼働しているものへの影響は比較的緩和されています。（1）記事の全文は英文のhttp://www.tigoenergy.com/brochures/PVI_article.pdfをご覧ください。

山登り法によるMPPT

最近のほとんどのシステムにおいて、コストと信頼性の観点から広く受け入れられているアプローチは、複数のアレイからの直流入力回路と中央インバータを有することです。中央インバータはDCからACへの電力変換を行い系統電源網に電力を送ります。大手のインバータメーカー（絶縁用DC/DCステップアップ及びDC/AC）によるこれらの変換技術は50年以上かけて改善され、政府機関や電力会社に受け入れられています。

インバータ搭載の最大電力追尾回路（MPPT）は、アレイ又はストリングの発電出力をできるだけ最大にしようと動作します。システムの最大電力出力点を決定するために、トライアンドエラー（山登り法）アルゴリズムを適用します。MPPT回路は、DC入力電力を測定することによって、同じ方向に進むかあるいは反対の方向に進むかを決定します。この処理が常に最大電力点を追いますがこのシステムの最大出力点はめったに（瞬間的な移り変わり以外に）達成されません。このアルゴリズムには多数のバージョンがありますが、入力データであるDC電圧と電流は限定的であり正確さは低くなっています。この処理は日照の変化（例えば瞬間的な雲の流れや影）で各モジュールの最大出力点が激しく変化するため更に複雑になります。システムの安定が戻るのは雲が去った数分後になります。

各モジュールにはバイパス・ダイオードが搭載されている為、インバータへの入力電流値が出力が低下したモジュールの能力値（電流）を超えた場合、そのモジュールはバイパスダイオードによって一部または全てが切断されてしまいます。

この図はカリフォルニア州サンタクルスの中央インバータ使用の産業設備です。2008年6月の晴天日の雲の多い日に測定されたものです。雲による激しい電圧の変動、回復までの数分間が明確に表示されています。

さて、設置されている125W多結晶モジュールのIVデータを分析すると日照の変化とVmpはほとんど差がありません。従って、雲の流れがあった場合でも、電流の減少と比較すると電圧の

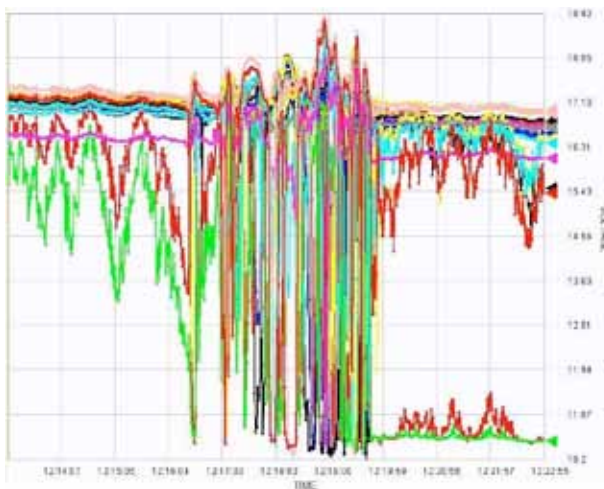


図3—システムへの雲の影響—カリフォルニア州サンタクルス

変化はほとんど無視できると考えることができます。図3のはげしい動作電圧の低下はそれらのモジュールが最適動作電圧 V_m で動作していないことを意味します。

モジュール間のミスマッチを悪化させる激しい動作電圧変動はモジュールのバイパスダイオードを動作させて、アレイの効率は50%以上も低下する場合があります。雲等の激しい天候変化の地域（例：米国東部、ドイツ、日本）では V_{mp} やシステムの安定保持が困難であり、発電量の損失が大きくなります。

インピーダンス整合(インピーダンス・マッチング)

影等の少ない最適に設計された大規模発電システムの多くのデータを分析した結果、自然環境によるミスマッチが多く発生していることがわかりました。タイゴエナジー社製品を使用することによって、各モジュールの動作点を最大出力点で動作させ、年間を通して約8%発電電力量の増加が期待できます。また陰の多い住宅システム等の場合、約20%の発電電力量の増加が期待できます。これを実現するための鍵は、費用を最小に抑えながら信頼性と効率を高くする（消費電力を最小にすること）ための解決方法を開発することでした。タイゴエナジー社の特許取得済み技術によって、優れたシステム管理コンソールを供給すると同時に、上記の目的を全て達成することができました。タイゴエナジー・マキシマイザーESタイプ（直列接続型）とタイゴエナジー・マネージメントユニット（MMU）に搭載されているソフトウェアが、特許取得済みのインピーダンスマッチング（インピーダンス整合）手法を実行して、各モジュールから最高の発電量を取り出します。本システムは、後取り付けが可能であり既存のPVシステムに追加取り付けができます。

インピーダンス整合以外の手法とは…？

タイゴエナジーのインピーダンスマッチング技術を理解する為に、そうでないものを理解することから始めます。太陽光発電業界はミスマッチ問題を過去から認識しています。太陽電池アレイ毎にMPPT手法を適用することでこの問題を解決しようとしていましたが、このような高価な手法は経済的に解決策とはなりません。このような方法は引き続き使用されていますが結果的には期待はずれな結果になっています。

「MPPT」法ではない — すべてのMPPT回路のアルゴリズムは山登り法でインピーダンスを調整し、最大出力を探し出します。これは通常、中央のインバータからアレイを制御します。大手インバータメーカーはこのアルゴリズムを改善し、限られた入力情報を基にして良い結果を得ています。しかし、システム全体のDC入力電圧と電力入力だけでは、モジュールミスマッチや雲などの迅速な日照の変化に対しては基本的な問題を抱えたままです。最近のDC/DC技術は、アルゴリズムへの入力速度を速めるためのブースタートランスやデジタル技術を利用して、ストリングや個別のモジュールに対して山登り型のMPPT手法を可能にしまし

た。この手法では正確さが多少改善されています。しかしタイゴエナジー社はこのような山登り法を使用せずにモジュールの最大電力を見つけ出す方法を開発しました。タイゴエナジー社のインピーダンスマッチング（インピーダンス整合）法によって、迅速かつ正確に最適動作点を見つけ出すことができます。またこのインピーダンスマッチング法では消費電力の大きな高価な電子部品は不要です。

「マイクロインバータ」ではない — 一般的に、インバータには200Wから2MWまでのものがあります。これらのインバータ内部にはMPPT回路、（大部分は）DC/DC昇圧部分とDC/AC変換機能を含みます。最大容量(2MW)に近づけば、コスト（/W）を低下させながらAC変換効率を高めることができます。（図4）

AC太陽電池モジュールのコンセプトは古くから存在し、その目的は、各モジュールに小型インバータを取り付けることです。この小型インバータは小規模システムでは影の問題を解決してはいますが、変換効率と経済性（コスト/W）では中央インバータ方式には劣ります。タイゴエナジー社の技術はマイクロインバータではありません。タイゴエナジー社は、その先進的な技術によって通常の200W小型インバータより更に高い効率（約99.5%）、高い信頼性とコスト低減を実現しました。加えて、タイゴエナジー社のインピーダンスマッチング法ではDC部分と中央AC変換を分離しているため、PVシステムはDC負荷（例えばデータセンター、製造装置、電気自動車）やエネルギー貯蔵のニーズに対応可能です。

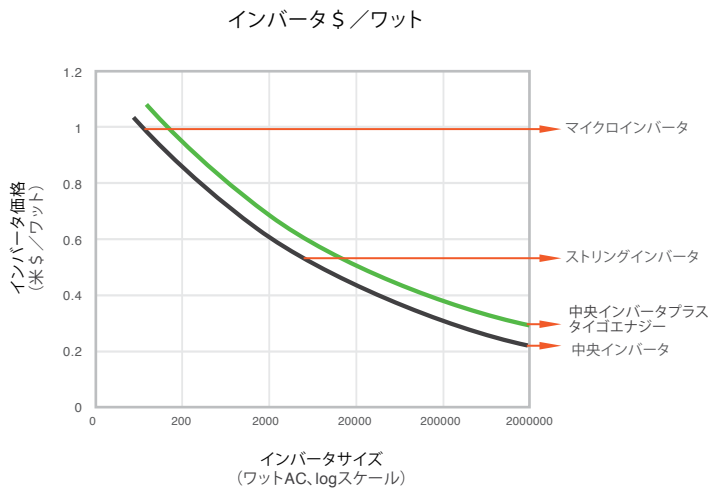


図4—各種インバータのワットあたりコスト

「DC/DC法」にあらす — 地域によっては、ストリングの電圧制限は比較的low（600V以下）、システムの絶縁を要求されます。そのため、多くの単相や三相インバータはDC/DC絶縁回路を含み、効率を最大にするために入力電圧を昇圧してACブリッジに渡します。最近のいくつかの製品では、このDC/DC機能を単体の太陽電池モジュールに移しています。モジュール毎に昇圧及びMPPTアルゴリズムを実施し、定電圧（直列及び並列）を中央インバータに供給します。絶縁トランスの必要がある市場において（例：米国）、この方法は、トランスなし、MPPTなし、定電圧インバータを用いれば、通常システムと同様の変換効率が達成可能です。しかし、大規模システムやヨーロッパの実際のシステムでは、高効率なトランス無しインバータが普及しておりそのようなインバータや絶縁型インバータに、追加でDC/DC変換を実施すると2%-3%の効率低下を引き起こします。悪いことに、その損失によって発生するエネルギーが熱として太陽電池パネルに伝わり、さらに発電量の低下の原

因になります。タイゴエナジー社は、DC/DC法の代わりにインピーダンスマッチング法を用いて2-3%の効率増加を実現しました。更にタイゴ社は既存のインバータとの互換性を保ちながら損失を避けることに努めました。タイゴエナジー社の製品は、特別インバータや他の変更を加えずに使用可能です。

インピーダンスマッチング(インピーダンス整合)とは….

インピーダンスマッチングはRF(無線周波数)関係に使用され、最高パワー効率で混信を最少に抑えるときに使用されます。送信機の最高出力を達成するためには送信機に反映されたインピーダンスはその内部インピーダンスと同じでなければなりません。アンテナには抵抗があり、RF最高パワーを達成する為には同じ抵抗が必要となります。例：パワーアンプの内部抵抗が 50Ω であり、外部アンテナの抵抗は 100Ω (両測定は回路の稼働周波数)とします。この構造ではパワーアンプの出力は最悪です(図5a)。最高出力を達成するにはパワーアンプ出力側に 50Ω が必要です。抵抗 100Ω がアンテナに並列に足せたとすればアンプは最高出力を達成しますが、その大部分は 100Ω 抵抗器で吸収されてしまい送信はされません(図5b)。抵抗器での無駄を防ぐにはコンデンサとコイルを使って合成 50Ω 抵抗を回路周波数に反映する事ができます。(図5c)

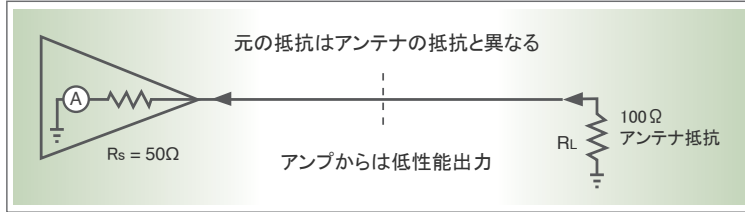


図5a

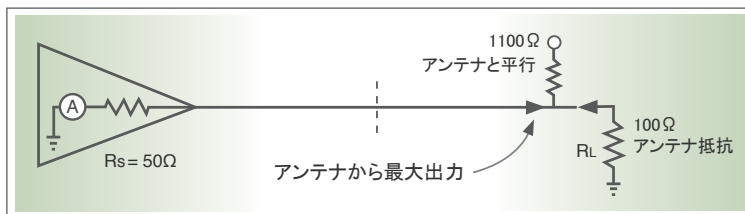


図5b-ラジオ電波の抵抗整合

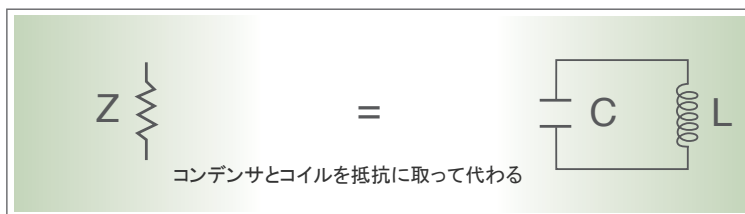


図5c

勿論この方法をそのままPVのパワーエレクトロニクスに取り入れることはできません。しかしタイゴエナジーはこの原理を斬新独特な方法で各モジュールから最高電流を収穫することを実現し特許を取得しました。タイゴエナジーの手法は非効率な通常のDC/DCやマイクロインバータ(DC/AC)変換技術を使用しない為、電流出力の低下を防いでいます。

タイゴエナジー・モジュールマキシマイザーの回路は3つの主な役割を持ちます。第一はアナログセンサーで正しくモジュールの電圧、電流、温度を測定します。MM-ESは搭載された通信モジュール(無線又はPLC)で入力パラメータをMMUに送信し、MMUから最適動作電圧 V_m 値の情報を受信します。そしてマキシマイザーに内蔵されたインピーダンス整合回路が各モジュールの出力を制御し、最大電力を得ることができます。



図6-タイゴエナジー・システム構造

このプロセスは、各太陽電池モジュールに取り付けられたマキシマイザーが入力をセンサーで認識する事から始まります。この情報(電圧、電流、温度、ストリング構成)はシステムの各マキシマイザーからMMUに送信されます。MMUのCPUが正確に電流と電圧カーブ特性 (V_{mp} 含む)を計算し各マキシマイザーにそのデータを返信します。すべてのデータは変動しており、太陽電池モジュールとストリングの最大出力点の計算方法は複数の技術者によって導き出されています。タイゴエナジー社は、その計算を更に改善してマキシマイザーに適用しています。一般公開されている簡易的な方程式を(2)に示します。

用語の説明

M	モジュール内におけるセルの行位置
N	モジュール内におけるセルの列位置
W	最大出力 (W)
W(1)	影の無い場合のモジュールの最大出力 (W)
W(2)	部分的に影がある場合のモジュールの最大出力 (W)
A. W	影の影響によるモジュールの出力損失 (W)
P _{m, n}	接合部の電圧 (m, n) (V)
J _{m, n}	接合部の電流 (m, n) (A)
v	モジュールの電圧 (V)
V _{m, n}	m行n列のセル電圧 (m, n) (V)
I _{m, n}	m行n列のセル電流 (m, n) (A)
(Voc) _{m, n}	m行n列のセル開放電圧 (m, n) (V)
(I _{ph}) _{m, n}	m行n列のセル短絡電流 (m, n) (A)
(I _s) _{m, n}	m行n列のダイオード飽和電流 (m, n) (A)
(R _{sh}) _{m, n}	m行n列の並列抵抗 (m, n) = 1000 オーム
(R _s) _{m, n}	m行n列の直列抵抗 (m, n) (fl)
n	常数
T _{m, n}	m行n列のセル動作温度 = 300 ° K
e	電荷= 1.6022x10 ⁻¹⁹ Coulomb
k	ボルツマン定数= 1.3806x10 ⁻²³ Joule/° K

モジュール内の単ダイオードのセルの電流／電圧の関係は下記の計算になります：

$$f(V_{m,n}, I_{m,n}) = 0$$

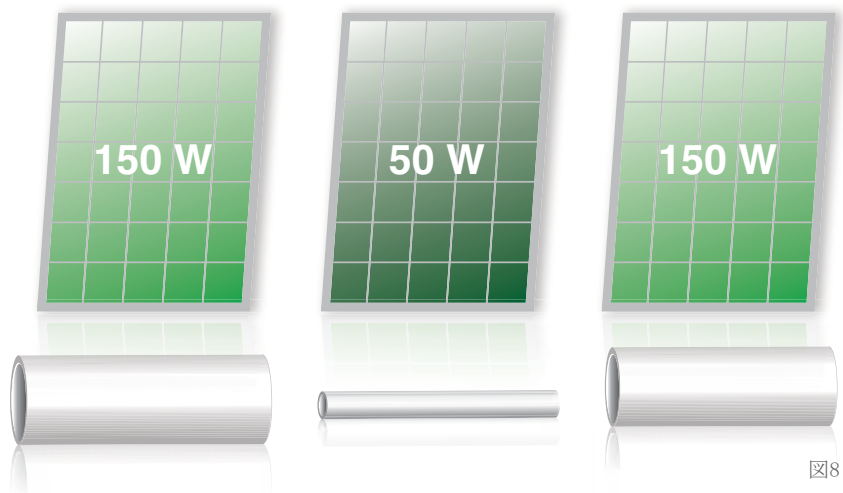
or

$$I_{m,n} - (I_{ph})_{m,n} + (I_s)_{m,n} \left\{ \exp \left[\left(\frac{e}{nkT} \right) (V_{m,n} + I_{m,n}(R_s)_{m,n}) \right] - 1 \right\} + \left(\frac{V_{m,n} + I_{m,n}(R_s)_{m,n}}{(R_{sh})_{m,n}} \right) = 0$$

図7-V_{mp}を計算する方程式例

計算された各モジュールのV_{mp}ポイントは、MMUから各マキシマイザーに送信され、マキシマイザー内のインピーダンス整合回路が各太陽電池モジュールに最適なインピーダンス提供して最大の電力を取り出します。単純な抵抗であれば抵抗損失が発生しますが本インピーダンス整合回路は単純な抵抗ではない回路を使用します。FETと小型コンデンサの組み合わせでマキシマイザーは電流トンネルを形成し、各モジュールは最適電圧と電流で動作しながらストリングの最大出力を維持します。： I_{in} + I_{tunnel} = I_{mp} (string) = I_{out}。従って各モジュールは他のモジュールに影響することなく最大出力点で動作します。ストリングの電流は最大発電量を出力している各モジュールに支えられて全体として最大出力を達成します。中央インバータは、ストリングの安定したIVカーブを受けて正確(ピーク誤差なし)なMPPTを実現できます。

インピーダンス整合のしくみ



このように同じ太陽電池であっても、影の影響、や汚れの影響、温度差の影響、シリコンの劣化の影響などにより出力が異なってきます。

図-10が示すように、アレイ電流が増大化方向へ移動すると、低出力太陽電池モジュールの電圧は低下します。アレイ電流は低出力モジュールの最適電流値より高いため、低出力モジュールの最適電圧 V_m は低い方へ移動します。低出力モジュールの最適出力点は図10の（B）点です。しかし実際には低出力モジュールの出力点は更に出力の低い（A）点に移動させられてしまい、そのモジュールだけでなくアレイ全体の出力が更に低下してしまいます（水漏れのように）。下図11は、直列接続システムの秒毎の測定データです。これは2008年夏カリフォルニア州バークレーのデータです。最大電圧と最低電圧の大きな差がわかります。

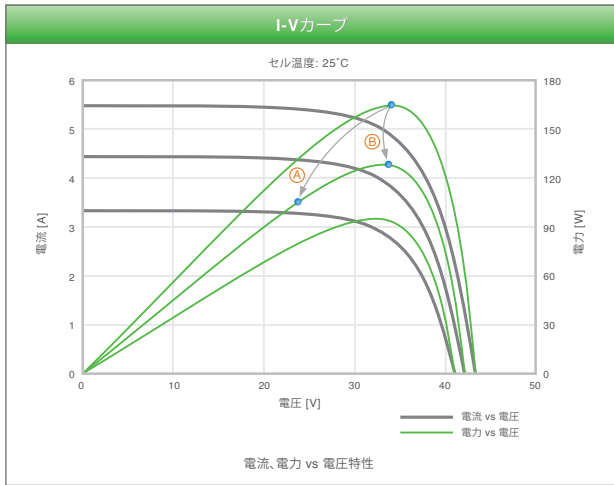


図10-IV電力特性

不安定状態AがBを増長し、それが結果的に更にAを増大させていることがわかります。また、発電電力量の損失によりセル面に発熱が生じます。その熱は更に発電電力量を減少させます。この悪循環は全体の発電電力量をさらに減少させます。

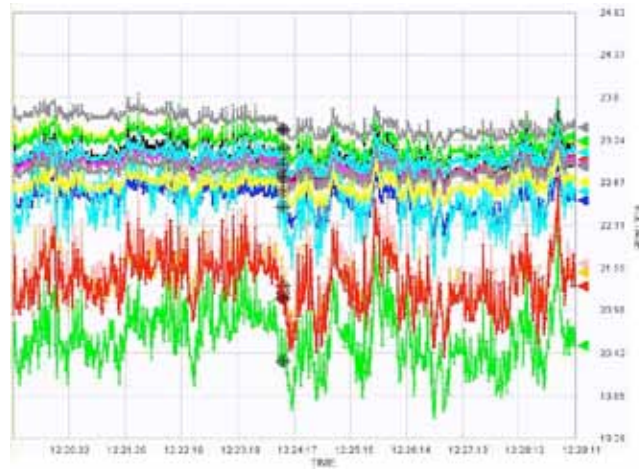


図11

この手法は、低出力太陽電池モジュールだけでなくほぼ全太陽電池モジュールに適用されます。アレイの各パネルには独立したインピーダンス整合回路が設置され、その回路を設定することにより、各モジュールが発電できる最高量の電流を、他のモジュールに影響を及ぼさずに引きだすことが可能となる。パネル毎の必要電流は、MMUがこのパネルの電圧、電流、温度のデータを基に測定し、決定する。各太陽電池の電流の変化によってその電圧 (V_{mp}) を調整し、最適点で動作させるようにします。



並列の多数ストリングを持つ大規模システムの場合、各ストリング間のミスマッチも解決します。通常すべてのストリングの平均温度はあまり変わらず、若干変動はしますがほぼ電圧は同じです。タイゴエネルギー搭載システムでは各モジュールが最大電力点で動作している為、各ストリングの V_{mp} もほぼ同になります。ストリング間の電圧差が非常に狭いため、あるストリングが低い電圧であっても全体の電圧には影響を及ぼしません。異常な状況として、一部のストリングのモジュールのひとつに濃い影がかかれば、インピーダンスマッチング回路がストリング全体にわたるトンネルを作ることによって全体システムの損失を防ぎます。

まとめ

他の方式 (DC/DC 昇圧、分散型MPPT又はマイクロインバータ類)
と比較してのメリット

- ・ 各太陽光発電モジュールに取り付けるために電子部品数を最小とした：
 - ・ 高信頼性
 - ・ 低コスト
 - ・ 最小型
- ・ 高効率 (損失が最小) 約99.5%：
 - ・ 発熱が小さい (一般的に使用されているバイパスダイオードより小さい)
発熱が小さいので熱による出力低下がない。
 - ・ 樹脂製のため追加アース不要
 - ・ 通常のジャンクションボックスの内部に取り付け可能
- ・ 既存のシステムに後付可能
 - ・ インバータ電圧の変更不要
 - ・ インバータMPPTを止める必要なし
 - ・ 多数のインバータとの互換性確認済
- ・ ソフトウェアによる運転
 - ・ 最低コスト、最高発電量
 - ・ バージョンアップ可能
 - ・ 単純な動作
- ・ モジュール段階では山登り法アルゴリズムなし
 - ・ 特許取得済の高度な技術による正確なVmp計算

要約：タイゴエナジーのインピーダンス整合方式は、モジュールとストリングのリアルタイムデータを使用して各モジュールの最大出力点を計算します。これを繰り返して実施します。タイゴエナジー社の手法によって、迅速かつダイナミックに各太陽電池モジュールの最大出力点を計算し、雲や影が発生してもシステムの安定を保ちます。約99.5%変換効率を持つ本システムによって、長期間において収益率を最大にします。

参考文献：

- [1] Ardit S, Krisa J. Maximizing PV solar project production over system lifetime lifetime. Photovoltaics International, Second edition; November 2008.
- [2] Gautam NK, Kaushika ND. An efficient algorithm to simulate the electrical performance of solar photovoltaic arrays. Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi, India; 2002.
- [3] Revolutionizing Large-scale PV Projects. InterPV; November 2009, p. 51-55.
- [4] From Passive Monitoring to Active Management. InterPV; February 2010, p. 82-87.ww

Tigo Energy, Inc.
P: +1.408.402.0802
F: +1.408.358.6279
www.tigoenergy.com

本社
420 Blossom Hill Road,
Los Gatos, California,
U.S.A.

本社：
日本 東京
ドイツ フランクフルト
フランス パリ
イタリー モンザ
イスラエル テルアビブ