

太陽電池モジュールの異常監視・診断システム

Fault Monitoring and Diagnostic System for Photovoltaic Modules

佐藤 誠 野田 悦夫 若松 建吾 朴 英

■ SATO Makoto ■ NODA Etsuo ■ WAKAMATSU Kengo ■ PIAO Ying

近年、太陽光発電 (PV) では、発電効率を向上させるため、新しい太陽電池モジュール (以下、モジュールと呼ぶ) の開発だけでなく、PVシステムを効果的に運用するための技術も注目されるようになった。

東芝は、モジュールの性能や劣化度を高精度に収集することが可能なアクティブセンシング モニタシステム、収集された電流・電圧データから異常部位を検出するデータマイニングシステム、及び異常部位や異常原因を特定するための画像診断システムを開発した。これらのシステムによって、PVシステムの効率的な保守及び運用を包括的に支援することが可能である。

To improve the generating efficiency of photovoltaic (PV) power generation systems, demand has risen for technologies that can contribute to the effective operation of PV power plants as well as technologies that can realize high-efficiency PV modules.

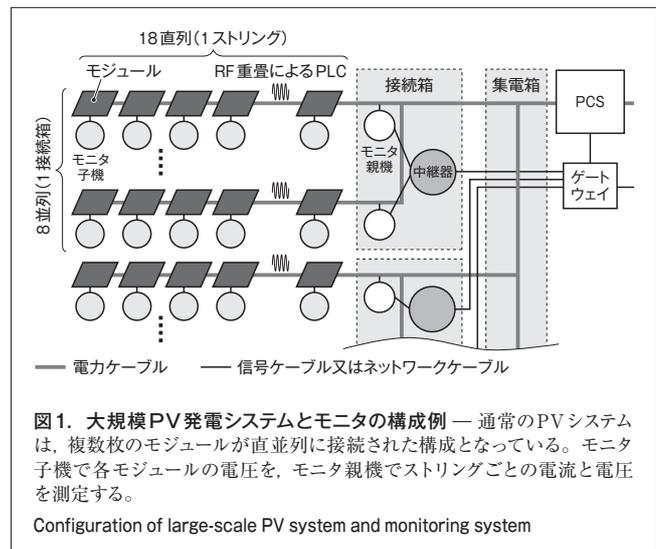
Toshiba has developed a fault monitoring and diagnostic system for PV modules incorporating the following technologies to provide comprehensive support for the operation and maintenance of PV systems: (1) an active sensing and monitoring system that can collect detailed data on the performance of PV modules, (2) a data-driven diagnostic system that can detect faults in a system using collected voltage and current data, and (3) an image-based diagnostic system that can identify cells in which a fault has occurred and the causes of failure.

1 まえがき

近年、太陽光発電 (PV) では、発電効率の向上のため、新しい材料や構造を持ったモジュールの開発とともに、PVシステムを長期間にわたって安定して効率的に運用するための技術も注目されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。PVシステムの異常は、様々なフィールド検証のデータが蓄積された結果、パワーコンディショナ (PCS) やコネクタ、ケーブルなどの構成要素だけでなく、モジュールの異常も無視できないことが明らかになってきた^{(1), (2)}。モジュールの劣化は、設置1年目は1~3%、2年目以降は1年当たり0.5~1%という報告がある⁽²⁾。モジュールの異常に対応するためには、発電量を監視して異常なモジュールを特定し、劣化の程度を推定して適切な保守を行うことが重要である⁽³⁾。

東芝は、PVシステムを効率的に運用するため、モジュールの異常を監視し診断するシステムとして、①モジュールの性能や劣化度を高精度に収集するアクティブセンシング モニタシステム、②収集した電流・電圧データから異常部位を検出するデータマイニングシステム、及び③異常モジュールの部位や異常原因を特定する画像診断システムを開発した。

遠隔監視によってモジュール性能を詳細に把握するためには①と②を、保守員のフィールド作業によって異常モジュールと劣化度を特定するためには②と③を、それぞれ組み合わせることでPVシステムの効率的な保守及び運用を包括的に支援できる。ここでは、これらのシステムの概要と、それらの効果を検証した結果について述べる。



2 アクティブセンシング モニタシステム

2.1 モジュールの異常

通常のPVシステムは、複数枚のモジュールが直並列に接続された構成となっている。もっとも普及している中央インバータ式と呼ばれるPVシステムの構成例を図1に示す。モジュールを直列に接続してストリングを形成し、複数のストリングを接続箱で、更に必要に応じて集電箱で並列に接続してアレイを形成する。このアレイ単位にPCSが設置される。例えば、接続箱一つ分に相当する直並列回路は、18直列×8並列でモ

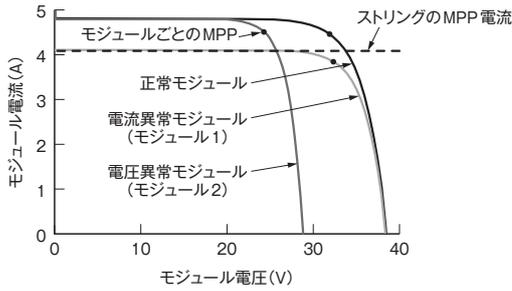


図2. 正常モジュールと異常モジュールの電圧-電流特性 — 異常モジュールには、電圧が劣化する電圧異常モジュールと、電流が劣化する電流異常モジュールがある。

I-V characteristics of normal and abnormal modules

表1. 動作電流を変化させたときの、ストリング出力と各モジュールの動作電圧

Relationships between operating voltages and currents under maximum power point tracking (MPPT) control

動作電流 (A)	ストリング出力 (kW)	モジュール動作電圧 (V)		
		正常モジュール	モジュール1	モジュール2
4.045	2,410.1	33.8	28.8	25.8
4.055	2,411.9	33.8	28.3	25.8
4.065	2,413.1	33.8	27.7	25.8
4.075	2,413.5	33.7	27.0	25.7
4.085	2,411.3	33.7	25.6	25.7
4.095	2,351.4	33.7	10.1	25.7
4.105	2,313.4	33.6	0.0	25.7

□ MPPTでの動作条件

ジュール数が144枚などという規模となる。

このような多数のモジュールの中で、1枚のモジュールに異常が発生したときに、システム全体の出力が受ける影響を考える。モジュールの出力を200Wとし、異常モジュールの出力低下は15%に相当する30Wであると仮定し、異常の状態として、電流異常と電圧異常の2種類について考える(図2)。

電流異常モジュールが1枚発生したときは、モジュール1枚の出力低下は30Wであるが、前記の構成で試算した結果、接続箱一つ分の出力低下は310Wとなり、モジュール1枚の低下分の10倍以上の低下になる。これは、ストリングの電流が電流異常モジュールに強い影響を受けることにより、正常モジュールの動作点がMPP (Maximum Power Point) から大きく外れるためである。一方、電圧異常モジュールが1枚発生したときは、接続箱一つ分の出力低下は32Wとなり、モジュール1枚の低下分とほぼ同じである。これは電圧異常モジュールと正常モジュールのMPP電流がほぼ同じため、正常モジュールの動作点が本来のMPPからほとんど外れないためである。

このことから、システム全体の出力を大きく低下させる可能性がある潜在的異常モジュールを正確に特定できる診断技術の開発が、システム全体の出力を維持するうえで非常に重要であることがわかる。今回開発したアクティブセンシング法(以下、アクティブ法と略記)は、このような潜在的異常モジュールを的確に見つけることができる。

2.2 アクティブ法の概要

モニタシステムは図1に示したように、子機で各モジュールの電圧を、親機でストリングごとの電流と電圧を測定する。

アクティブ法は、PCSのインピーダンスをソフトウェアで積極的に変化させ、潜在的異常モジュールを見つけ出す方法である。図2に示したモジュール1とモジュール2を1枚ずつ含む18直列のストリングで、電流を変化させたときの各モジュール電圧の変化を表1に示す。システムのMPP付近では電流を±0.7%変えただけで、モジュール1の電圧が大きく変化することがわかる。これにより、潜在的異常モジュールを容易に見つ

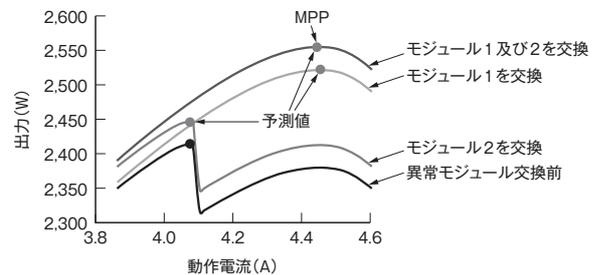


図3. 各異常モジュールを交換した場合の出力回復予測値 — 電流異常モジュールを交換したときの出力回復効果は、電圧異常モジュールを交換したときより大きい。

Estimation of output power recovery due to replacement of abnormal modules

けることができる。

電流を更に変化させると各モジュールのMPPをそれぞれ通過する。これにより、各異常モジュールを交換した場合にシステム全体の出力がどこまで回復するかを予測することができる。電圧を変化させて得られたモジュール単位のMPPから、異常モジュールを正常モジュールに交換した場合のシステムのMPPの予測値をグラフに表したものを図3に示す。この図から、モジュール1を交換したときの出力回復効果は、モジュール2を交換したときの回復効果よりも大きいことなどが確認でき、これらは保守計画に有用な情報となる。

2.3 モニタシステムの試作とPLC試験

2.1節で述べたように、アクティブ法のモニタシステムはモジュール電圧測定用の子機とストリングの電流・電圧測定用の親機から構成され、子機と親機間のコマンド及びデータの転送には、PLC(電力線通信)を採用している。更に、接続箱単位で親機からのデータをまとめる中継器を置き、中継器からゲートウェイにデータが送られる。

これまで、メガソーラーシステムでPLCを実現した例は知られていない。そのため、モジュール18枚が直列に接続された構成で、PCSのスイッチングノイズの影響を受けずにデータ転送が行える送受信回路を新たに開発し、これを組み込んだモ

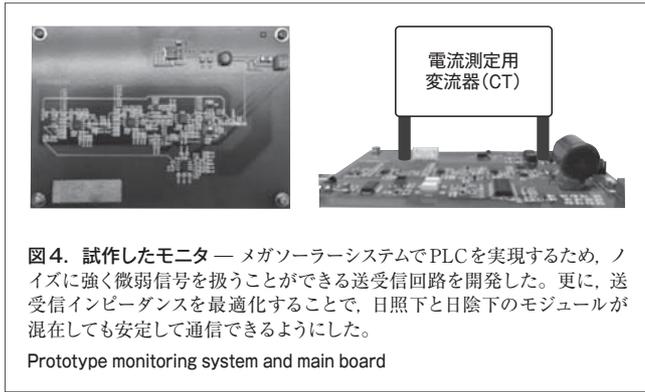


図4. 試作したモニター メガソーラーシステムでPLCを実現するため、ノイズに強く微弱信号を扱うことができる送受信回路を開発した。更に、送受信インピーダンスを最適化することで、日照下と日陰下のモジュールが混在しても安定して通信できるようにした。

Prototype monitoring system and main board

ニタを試作した(図4)。今回開発したPLCは、デジタルデータを、例えば“1”を40 kHz、“0”を30 kHzといったRF (Radio Frequency)に変換し、電源ラインに重畳するもので、狭帯域のフィルタと増幅器を用いることでノイズに強く微弱信号を扱うことができる。このRF周波数はPCSのスイッチング周波数の通倍波と重ならないように設定した。また、開発に先立ちモジュールのインピーダンスを測定した結果、日照時と日陰時で10倍以上変化することがわかったため、日照下と日陰下のモジュールが混在しても安定して通信できるよう、送受信インピーダンスの最適化を行った。

18枚直列の1ストリング相当の回路に、子機18台と親機1台を接続して伝送試験を行い、日照時と日陰時の両条件で親機と子機間で双方向の信号伝送を正しく行えることが確認できた。この結果、メガソーラーシステムでもPLCを実現できるめどをつけることができた。

3 データマイニングシステム

稼働中のPVシステムで、ストリングやストリングをいくつか区切ったサブストリングごとに収集した電流値と電圧値の時系列データから、異常部位と劣化度を推定することができる。発電性能を落とすことなく異常診断を行うことができる。しかし、一般的な中央インバータ式のPVシステムでは、PCSによって一つの動作点にMPPT (MPP Tracking) 制御されており、最大電力点周辺の電流・電圧データしか得ることができない。更に、異常部位も正常部位も同じ値を示すために異常の特定が困難であるという課題があった。

当社は、この課題を解決するため、稼働中のシステムの動作点の揺らぎを利用して、電流異常と電圧異常を検出するデータマイニングアルゴリズムを開発した。様々な日照条件、温度条件のもとで収集した電流・電圧データに、異常値の除去や移動平均処理、日照補正処理を行って、異常部位と正常部位の違いを検出できるようにした。

開発したアルゴリズムを用いた診断システムにより、稼働中のPVシステムを診断した。診断は、7直列×3並列に接続さ

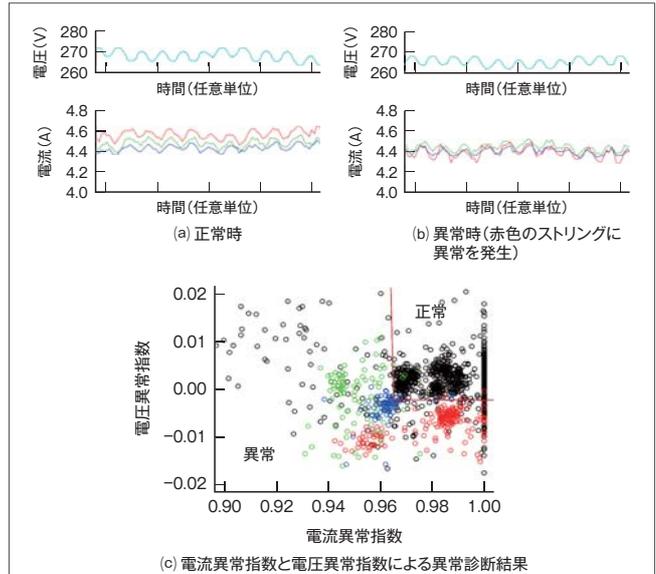


図5. 7直列×3並列の実稼働PVシステムでの実験結果 — 稼働中のシステムの動作点の揺らぎを利用して電流・電圧異常を検出するデータマイニングアルゴリズムを開発して異常診断に適用することにより、異常見逃し率を既存の手法に比べ35%少なくできることを確認した。

Results of experimental operation of PV system composed of three parallel strings with seven serially connected cells (7S-3P)

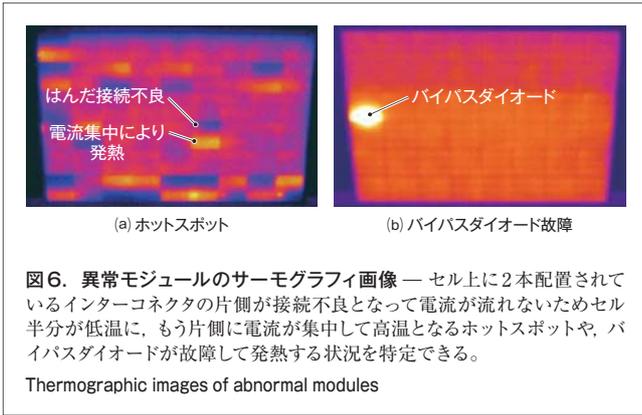
れたアレイを一つの中央インバータが制御するシステムに、ストリングごとに合計3個の電流センサと、動作電圧を計測する電圧センサを設置して、モジュールの一部に日照遮蔽物を貼り付けて人為的な日陰を作ることで異常を発生させ、データを収集した。

診断の結果を図5に示す。(a)は正常状態、(b)は(a)の赤色で示したストリング内のモジュールの1セルに異常を生じさせた異常状態のもとで収集したデータである。動作点は、ある幅で振動していることが確認できる。このようにして収集したデータから電流異常指数と電圧異常指数を算出し、しきい値によって異常診断を行うことができる(図5(c))。既存手法に比べて、見逃し率が35%少ない異常診断結果が得られることを確認できた。

4 画像診断システム

モジュールの異常には、モジュール表面のガラス割れやフレーム変形などのように外観検査ですぐにわかるものもあれば、モジュールの出力が低下するといった外観検査ではわからない異常もある。このような異常モジュールがストリングやシステム中に存在していると、2章で述べたようにシステム全体に悪影響を及ぼす。したがって、出力異常モジュールを特定し、交換の必要性を判断することが重要である。

モジュールの検査方法の一つに、モジュールに通電しサーモグラフィを用いて熱分布を観測する方法がある。この方法で、



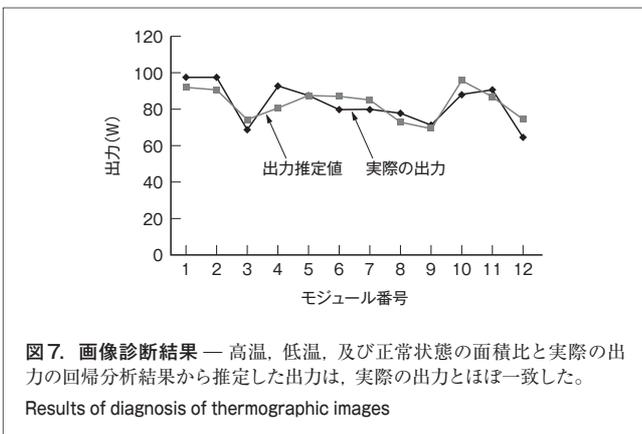
モジュール内の配線不良や断線、ホットスポットと呼ばれるセルの局所的な温度上昇部、バイパスダイオードの故障などを特定できる(図6)。ホットスポットは、接合部のクラック・剥離部分に現れるため、出力低下と密接な関係があると推定される。ここでは、モジュールのサーモグラフィ画像から出力を推定し、交換の必要性を判断することが可能な画像診断システムについて述べる。

このシステムは結晶シリコン系モジュールを対象とし、サーモグラフィ画像から高温及び低温の異常発熱領域と、正常領域の比率を求め、これらの比率を3変数の一次方程式に当てはめて出力推定を行う。数式の定数は、多数の結晶シリコン系モジュールから比率を求め、回帰分析により決定した。

画像診断には、モジュールに直流電源で通電したときに得られるサーモグラフィ画像を用いる。通電条件は、電流が短絡電流相当となるように電圧を調整する。通電して一定時間経過後に撮影し、画像診断を行う。

このシステムの画像診断は、次の四つのステップから成る。

- (1) 形状補正やコントラストを改善する画像前処理
- (2) 温度領域をクラス分けする処理最小単位の領域分割
- (3) 分割領域に対する高温、低温、及び正常の3クラス分類
- (4) 分類された3クラスの比率から異常レベルの判定を行い、回帰分析により決定したパラメータを用いた出力推定



画像診断システムを使用して出力推定を行った結果を図7に示す。診断したモジュールは、約12年使用された定格出力120 Wの国産モジュール12枚である。電流・電圧特性を測定した結果、最大出力は60～97 Wと定格の50～81%に低下していた。開発したシステムで診断した出力推定値は、各モジュールの出力測定値と大きなずれはなく、推定値の平均誤差は5%以下であった。複数メーカーのモジュールでも同様の診断結果が得られ、サーモグラフィ画像から出力異常モジュールを特定する診断方法の有効性が示されたと考える。

5 あとがき

PVシステムを効率的に保守し運用するための異常監視・診断システムを開発した。モジュールレベルの異常診断にはアクティブセンシングモニタリングシステムが、モジュール内の異常を診断するには画像診断システムが有効であることを確認できた。今後は実プラントへ適用して事例を蓄積し、更に改善していく。

文 献

- (1) Bazzi, A.M. et al. "Fault impacts on solar power unit reliability". Proceedings of IEEE APEC 2011. Fort Worth, TX, USA, 2011-03, IEEE, 2011, p.1223 - 1231.
- (2) Vázquez, M.; Rey-Stolle, I. Photovoltaic module reliability model based on field degradation studies. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 16, 5, 2008, p.419 - 433.
- (3) Houssein, A. et al. "Monitoring and fault diagnosis of photovoltaic panels". IEEE International Energy Conference 2010. Manama, Bahrain, 2010-12, IEEE, 2010, p.389 - 394.



佐藤 誠 SATO Makoto, D.Eng.

研究開発センター システム技術ラボラトリー研究主務、博士(工学)。データマイニング及び応用統計分野の研究・開発に従事。情報処理学会、米国統計学会会員。System Engineering Lab.



野田 悦夫 NODA Etsuo, D.Sci.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 環境・水システム開発部、理博。ガスレーザ、核融合機器、放電応用環境機器などの開発に従事。電気学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



若松 建吾 WAKAMATSU Kengo

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 高機能・絶縁材料開発部主務。電気・電子部品の信頼性及び故障解析の研究・開発に従事。日本金属学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



朴 英 PIAO Ying, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 制御システム開発部、博士(工学)。画像認識技術の研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center