

太陽光発電システムの不具合事例の分析・評価(1)

－故障診断手法の確率に向けて－

A Case Study on Faults/Failures in PV systems (1)
－Toward Establishment of Diagnostic Techniques for PV Systems－

加藤 和彦 *1

Kazuhiko KATO

Abstract

This paper discusses a case study on faults/failures in one of commercial grid-connected residential PV systems installed in my institute. Both measurements of I-V characteristic curves for PV module strings and individual PV modules and temperature observation of in-operation PV module surface by infrared camera indicated existence of bad soldering of cell wiring in one PV module. It is expected to be difficult to find this kind of PV module fault with present periodic check provided by many PV system installers. The PV system discussed in the paper has been operated with insignificant performance drop so far, but further degradation caused by the PV module fault may bring about serious decrease in power output of the PV system.

キーワード : 太陽光発電システム, 不具合, I-V 特性曲線, モジュール温度, 故障診断

Key Words : PV system, Fault and Failure, I-V characteristic curve, PV module temperature, diagnostics

1. 緒言

筆者が冒頭に改めて述べるまでもなく、クリーンな発電技術である太陽光発電システム(以下、PV システム)は、長期にわたる技術開発と導入環境の整備、時宜を得た普及支援政策、地球環境問題の顕在化などにより、住宅分野を中心としてその導入が進展している。

市場の拡大にともない、往時にくらべ PV システムの価格は大幅に低下しているものの、依然としてその期待発電コストは系統電力料金の二倍前後と高価である。それにもかかわらずこのように導入が進展しているのは、PV システムに可動部がなく静かな発電設備であることや保守がほとんど不要であることなどの基本的長が、直接あるいは間接的に消費者の導入意欲発揚に寄与し、また、彼らの多くが、過酷な屋外環境で長期間使用される PV システムの機能的構成機器である太陽電池モジュールやパワーコンディショナ(以下、PC)などがそのような使用環境にみあった耐久性を有していると考えているからであろう。

一方、実際の PV システムは、これと同様に住宅で使用される一般の家電製品とは異なり、利用者が使用する度に操作するのではなく、一度運転を始めると、その後は PV システムに触れることがないという「使っているようで、使っていない」という奇妙な製品であり、可動部がなく静かな発電設備であること、中心機

能である太陽電池モジュールが多くの場合利用者の視野外にあること、そしてその「プロダクト」である発電電力が日射条件などによって常時変動していることなどから、導入した PV システムが正常に動作しているか否かの判断が非常に困難であるという側面ももちあわせている。

PV システムの不具合事例については、利用者へのアンケートなどによる調査が新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)で実施されているが⁽¹⁾⁽²⁾、収集事例の多くはエラー表示などによる確認が容易な PC に関するものであり、太陽電池モジュールの不具合事例は極めて少ない。このような結果をもって「太陽電池モジュールは故障しにくい」と結論づけるのは簡単ではあるが、実際には前述のような理由から太陽電池モジュールの健全性を確認する機会と手段が与えられていないために真の情報が欠落している可能性を否定できない。

このような背景に鑑み、筆者は PV システムの不具合事例の収集・分析と、それにもとづく実用的な不具合の診断技術の研究を進めているが、本稿では、当所が所有・運用している住宅用 PV システムで実際に確認された不具合について検討・考察した結果を報告する。なお、特に断らない限り、本稿に示す各種データは屋外自然光の下で計測したものである。

2. 対象システムとその不具合症状

2.1 対象とした PV システム

本稿で対象とした PV システムは、2004 年 4 月に当所に導入された住宅用 PV システム 211 台から構成される「つくばセンター

*1 独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員
(〒305-8568 つくば市梅園1-1-1中央第2)
e-mail : kazuhiko.kato@aist.go.jp
(原稿受付 : 2007年3月26日)

Table 1 Configuration of the PV System discussed in this paper

Items	Description
Operation Start	April 2004
PV Module	Sharp ND-150AM (poly-Si)
P_M	150W
V_{PM}	20.5V
I_{PM}	7.32A
V_{OC}	25.4V
I_{SC}	8.09A
PV Array	
Strings	9 series $\times$ 3 parallel (=27modules)
Orientation	25° west from the south
Inclination	15° from the level facing the south
Rated power output	4.05kW
Power Conditioner	Sharp JH-M303 (string PC)
P_{OUT}	4.0kW
V_{IN}	DC200V
V_{OUT}	AC202V

Fig.1 The PV system discussed in this paper
(indicated by broken-line circle)

太陽光発電設備(通称:メガ・ソーラ・タウン, 総定格出力: 869kW_{DC}, 844kW_{AC})」の中の一システムである。本システムの概要, 外観および配線はそれぞれ表 1, 図 1 および図 2 に示すとおりである。

2.2 対象システムのストリング I-V 特性曲線

図 3 は, 快晴日における被陰のない状態での各ストリング(図 2 中の Str-#1, Str-#2, Str-#3)の I-V 特性曲線の計測結果を示したものである(使用計器:EKO MP-140)。 V_{OC} を指標としてみた場合, どのストリングもモジュール 9 枚分に相当する 220V 程度であり異常はないようであるが, Str-#1 については取得した I-V 特性曲線の V_{OC} 付近に不連続な電圧変化がみられた。また, 図 4 は同一計器で異なる測定日に計測した Str-#1 の I-V 特性曲線の V_{OC} 付近を拡大して示したものであるが, V_{OC} 付近の不連続な電圧変化(ΔV)は 8.5V 前後であった。異なる I-V 特

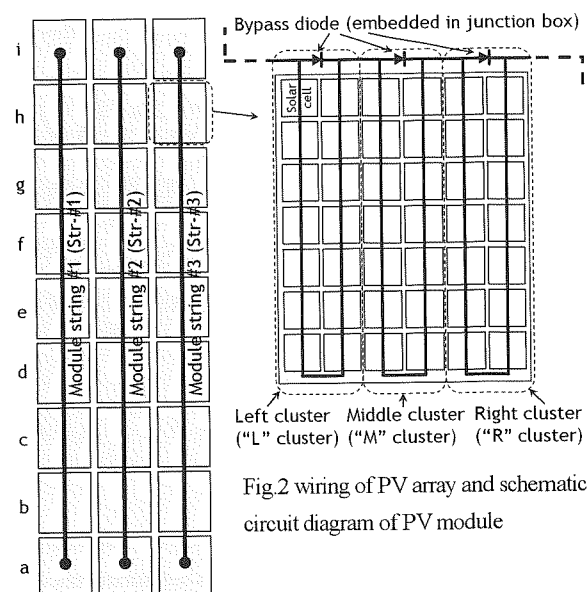


Fig.2 wiring of PV array and schematic circuit diagram of PV module

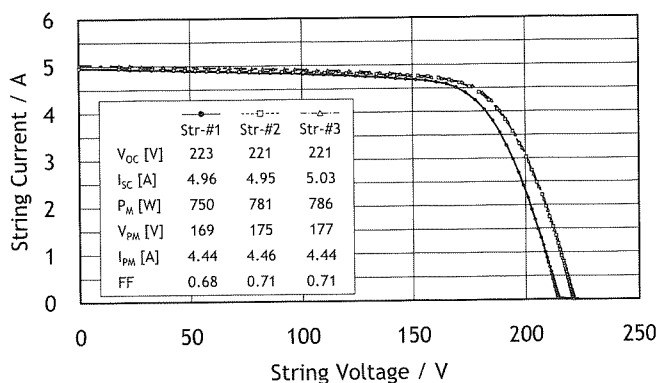
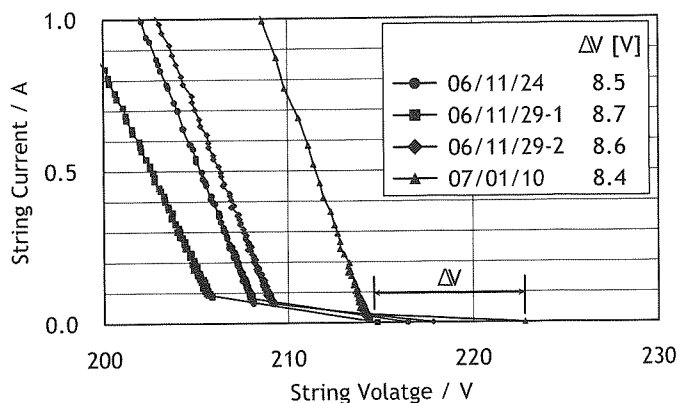


Fig.3 Measured I-V characteristic curves of each module string

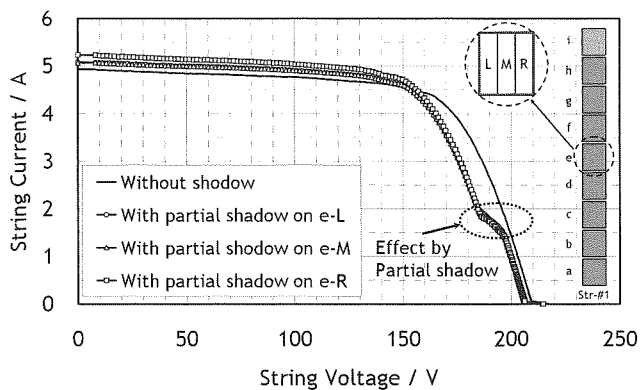
Fig.4 Measured I-V characteristic curves of the Str-#1 around V_{OC}

性曲線計測装置でも同様な結果であったことから, Str-#1 に何らかの不具合が生じている可能性があると考えた。

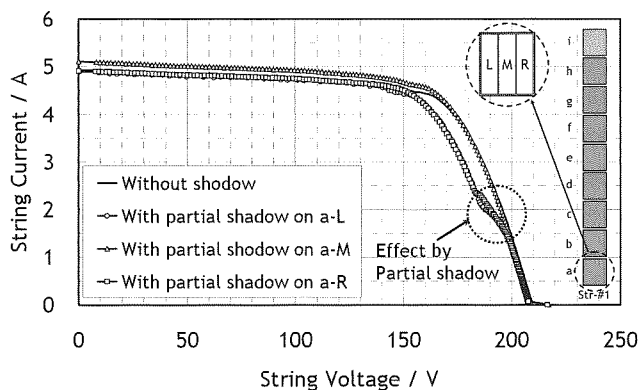
3. 詳細計測およびその分析

そこで, 不具合の有無を探るため, Str-#1 の詳細計測とその分析を実施した。

なお, 本システムでは太陽電池モジュールを架台から取り外し, その個々についての計測を実施することは比較的容易であるが,



(a) with or without partial shadow on PV clusters of 'e'-module



(b) with or without partial shadow on PV clusters of 'a'-module

 Fig.5 Measured I-V characteristic curves of the Str-#1
with or without partial shadow on PV clusters
(L: Left PV cluster, M: Middle PV cluster, R: Right PV cluster)

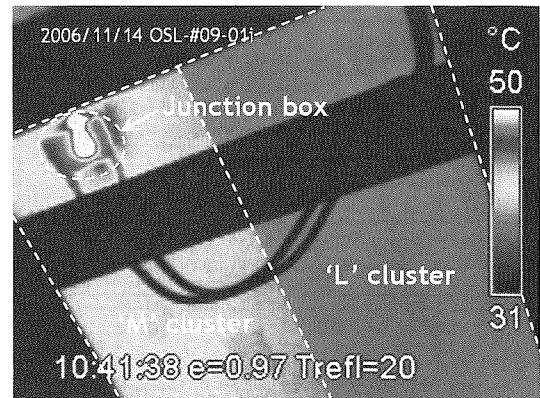
実際の住宅用 PV システムでは、太陽電池モジュールの配線に関する情報が必ずしも既知ではなく、また、多数のモジュールの取り外しも容易ではない。そこで、本稿においてもまずは太陽電池モジュールを架台から外さずに、ストリングが構成されている状態で計測を実施し、その結果を踏まえて、太陽電池モジュールの計測を行った。

3.1 スtringの詳細計測

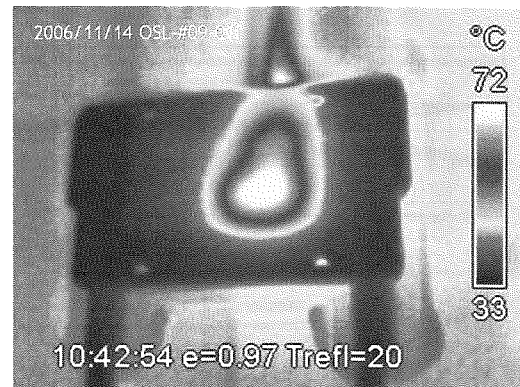
(1) 意図的な被陰によるString I-V 特性曲線の計測

Str-#1 を構成する各太陽電池モジュールについて、バイパスダイオード(BD)で区切られた三つの部分(筆者らはこの部分を、システム動作を左右する最小単位と考え、「PV クラスタ」と呼んでいる。詳細は参考文献⁽²⁾を参照されたい)の個々を、順次 BD が機能するに十分な程度(セル2~3枚)の面積の陰で意図的に覆った状態で、このStringの I-V 特性曲線を計測した。

図 5(a)は、その一例として同図中に図示した'e'-モジュールの左側(L: Left)・中央(M: Middle)・右側(R: Right)の各 PV クラスタを部分的に被陰した場合の I-V 特性曲線を、被陰させない場合の I-V 特性曲線とともに示したものである(使用計器:EKO MP-140)。この太陽電池モジュールでは、どの PV クラスタを被陰してもその影響が I-V 特性曲線の変化として現れている。この



(a) Rear surface of 'a'-module



(b) Junction box

Fig.6 Thermographic images of 'a'-module

変化は健全な PV クラスタが被陰に対して示す反応であり、'a'-モジュールを除く8枚の太陽電池モジュールのすべての PV クラスタで得られたことから、本観点からは、'a'-モジュール以外の太陽電池モジュールには不具合はないと考えられる。

一方、'a'-モジュールに対して同様な計測を実施した結果が図 5(b)である。左側および右側の PV クラスタの被陰の影響は I-V 特性曲線上に現れているが、中央 PV クラスタは被陰に反応していないことが I-V 特性曲線に示されている。なお、本モジュールの受光面側には外観上の顕著な変化は観察されず、裏側端子箱付近の2セル部分の裏面シートに黄変がみられた。

(2) システム運転時のモジュール表面温度観察

さらに、対象 PV システム運転時における Str-#1 内の各太陽電池モジュールの表面温度を赤外線カメラで観察した(使用機器: CHINO CPA-1000)。その結果、'b'~'f'の各太陽電池モジュールには特に異常は観察されなかったが、'a'-モジュールについては、図 6 に示したように、中央 PV クラスタが周囲に比べ発熱しており、さらに、端子箱内が局部的に高温になっていた。

上記(1)(2)で得られた情報から、本 PV システムでは Str-#1 の 'a'-モジュールが明らかに他の太陽電池モジュールとは異なる状態にあり、かつ、その要因はこの太陽電池モジュールの中央 PV クラスタにあるのではないかと考えた。

3.2 対象太陽電池モジュールについての検討

そこで、この段階でこの太陽電池モジュールを架台から取り外し、さらにモジュール単体について検討を進めた。

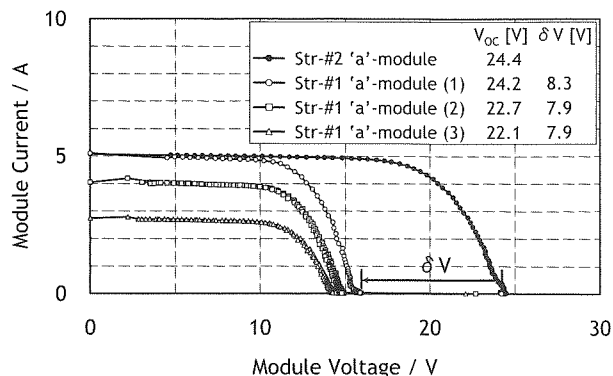


Fig. 7 Measured I-V characteristic curves of 'a'-module of the Str-#1 and 'a'-module of the Str-#2 as reference

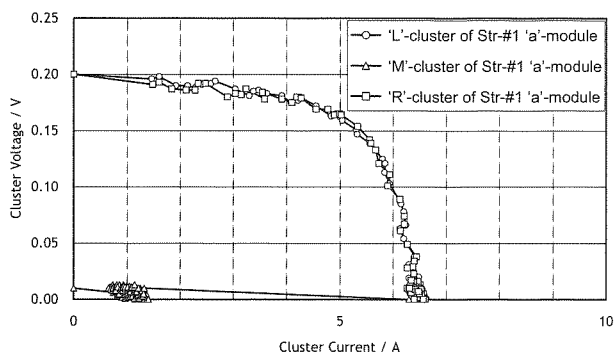


Fig. 8 Measured I-V characteristic curves of each PV cluster consisting of 'a'-module of Str-#1

(1) 太陽電池モジュール単体の I-V 特性曲線

図7は、異なる日射強度のもとでの'a'モジュールのI-V特性曲線を示したものである(使用計器:EKO MP-140)。また、比較のため、同図には健全と思われるStr-#2の'a'モジュールのI-V特性曲線も示している。この図から、 V_{OC} に顕著な差は見られないものの、Str-#1の'a'モジュールのI-V特性曲線は、Str-#2の'a'モジュールのそれに比べて電圧が低く、また、2.2節で言及したのと同様な V_{OC} 付近の不連続な電圧変化(δV)が観察された。本太陽電池モジュールでの変化幅は8.0V前後であり、図4のStr-#1での変化幅(ΔV)にはほぼ等しいことから、この ΔV は本太陽電池モジュールのI-V特性曲線に由来すると考えられる。また、 ΔV および δV は本太陽電池モジュールの V_{OC} のPVクラスターごとにほぼ等しいことから、3.1節で述べた中央PVクラスタがこの変化に関与しているのではないかと考えた。

(2) 各PVクラスターのI-V特性曲線

そこで、さらに本太陽電池モジュールの端子箱からPVクラスター間の

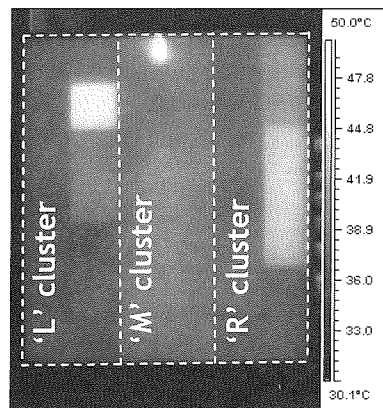


Fig. 9 A thermographic image of 'a'-module at short current condition

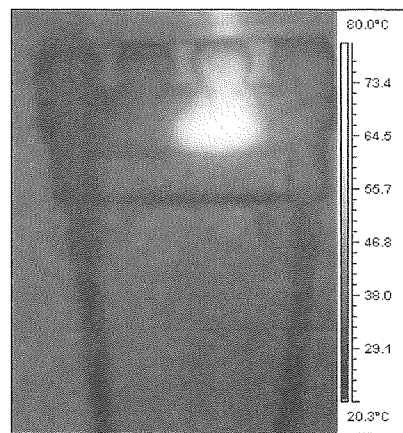


Fig. 10 Thermographic image of 'junction box of a'-module at short current condition

接点を丁寧に取り出し、PVクラスター毎のI-V特性曲線を測定した。その結果を図8に示す(使用計器:EKO MP-140)。この図から明らかなように、中央PVクラスターのみが電流値がほとんど得られない異常なI-V特性曲線となった。

また、図9は本太陽電池モジュールを短絡させた状態での赤外線カメラによるモジュール表面の温度画像である

(使用計器:アイ・アール・システム MobIR M4)。左右のPVクラスターには短絡電流の通電を示すセルの温度変化がみられるが、中央PVクラスターにはそれがみられず、受光面全体が暖められているようであり、また図3と同様に裏面端子箱が高温になっている。図10は太陽電池モジュール裏面から観察した接続箱の赤外線カメラ画像(使用計器:同上)であるが、中央やや右側が局所的に発熱しており、接触式温度計で計測した最高温度は短絡電流7.7Aの際に86°Cであった。

これから推測されることは、何らかの要因で中央PVクラスターが極めて通電しにくい状態にあり、陰のない受光状態でも電流がBDに迂回しているのではないかとということである。つまり、PVクラスター内のセルが発電に寄与しないことによる受光日射の熱への変換、およびBDへの通電にともなう発熱が図9や図10に観察されたものと思われる。また、図4や図7で得られた ΔV や δV は、このPVクラスターのI-V特性曲線によるものと考えられる。

3.3 不具合箇所の特定

さらにこのPVクラスター内のどこに不具合があるのかを検討するため、本PVクラスター内の部分的なセルストリングのI-V特性曲線の計測を試みた。図11は同図中に示した'a'モジュール内中央クラスターの①および②のセルストリング(どちらもセル13枚)

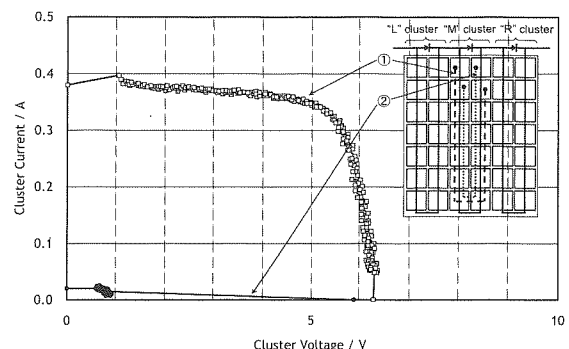


Fig. 11 Measured I-V characteristic curves of partial cell strings in 'a'-module of Str-#1

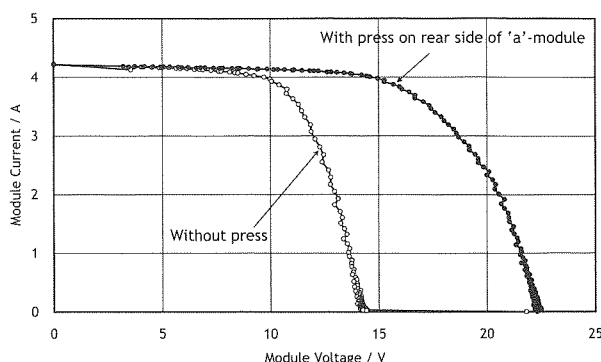


Fig. 12 Measured I-V characteristic curves of 'a'-module of Str-#1 with or without press on its rear side

の I-V 特性曲線を計測したものである(使用計器: EIKO MP-140)。本 PV クラスタの右上端セルのみを除いた①のセルストリングでは I-V 特性曲線が取得できたが、左上端のみを除いた②のセルストリングの I-V 特性曲線は取得できなかった。

したがって、本太陽電池モジュールの不具合は、中央 PV クラスタ右上端セルにあると考えられる。なお、当該セルの位置に相当する裏面部分を観察すると、一方のタブに沿って裏面シートに膨らみがあった。そこで、この部分を圧迫して再度モジュール全体の I-V 特性曲線を計測したところ、図 12 に示したように、I-V 特性曲線がほぼ回復した(使用計器: 同上)。このことから、本太陽電池モジュールの不具合は当該セル裏面のタブの接触不良によるものではないかと推測される。

4. 考察

3 章で示したように、本稿で対象とした PV システムの不具合は、本 PV システムを構成する 27 枚の太陽電池モジュールの中の 1 枚を構成する三つの PV クラスタのうちのひとつの不具合であると考えられる。これは太陽電池アレイの定格容量としては 4050W のうちの 50W、つまり、たかだか 1.2% の減少であるが、発電技術としてより重要であるのは 1.2% 分の定格容量の減少(「W 損失」)を引き起こしている不具合がシステム発電量にどの程度の影響(「Wh 損失」)を及ぼしているかという点にある。

図 13 は、2007 年 1 月 19 日に計測した 'a' モジュールを含む Str-#1 の I-V 特性曲線(図中の実線)を、それをもとに推定した 'a' モジュールに不具合がない場合の Str-#1 の I-V 特性曲線(図中の破線)とともに示したものである(使用計器: Kernel PV-Analyzer)。この図から、計測時の時間断面における両者のストリング最大出力の差は約 40W となり、不具合がない場合に比べて 2.3% の減少と試算された。

また、図 14 は、このようにして試算した 'a' モジュールの不具合の有無それぞれの Str-#1 のストリング最大出力を、同日の被陰のない良好な日射強度が得られた時間帯(9:14~13:28)について 1 分間隔で計測および推定したものである(使用計器: 同上)。いずれの時間断面においても、実際に計測した不具合ありの場合のストリング最大出力は不具合なしの場合に比べて小さくなったが、この時間帯におけるその割合は平均で 98.5%、つまり、Wh 損失にして平均 1.5% と W 損失より若干の増加にとどまっていた。

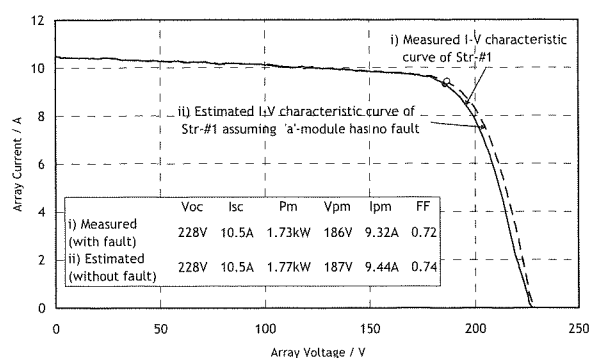


Fig. 13 Measured I-V characteristic curve and estimated I-V curve characteristic curve assuming 'a'-module has no fault of Str-#1

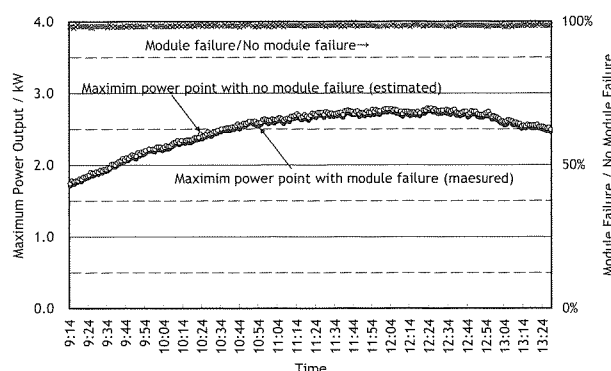


Fig. 14 Time trends in maximum power point of the discussed PV system

いた。

したがって、現状では Str-#1 内の 'a' モジュールの不具合による発電量の損失は、ほぼモジュールの定格容量の減少分相当にとどまっていると考えてよい。ただし、万が一 PV システムで BD が破壊に至った場合には、当該ストリングの発生電流は通電障害をもつ中央クラスタを通らざるを得ないため、このストリングではほとんど電流が流れなくなり、その結果、他の二つのストリングからしか電力を取り出せない、つまり、27 枚×3 PV クラスタ=81 PV クラスタのうちのたかだか 1 PV クラスタ(システム容量の 1.2%)の不具合のために、システム出力が一気に 2/3 にまで激減するという場合が懸念される。

5. 結言

本稿では、当所が所有・運用している住宅用 PV システムの一つについて、その不具合箇所を段階的に特定していく過程を報告した。

本稿で実施した一連の計測から得られた知見は以下のように整理される。

- (i) 本稿で特定した不具合は、太陽電池モジュールを構成する三つの PV クラスタのうちのひとつの発電障害にあり、定格出力が 2/3 程度に低下していると考えられる。低下した出力は現在市場に普及している住宅用太陽電池モジュールの多くが保証している最低出力以下である可能性が大きい。

(ii)ストリング毎に計測した V_{oc} にはこの不具合を想像させる情報は含んでいなかった。現在、住宅用 PV システムの定期点検では、太陽電池アレイの点検項目として各ストリングの V_{oc} 測定があるが、本稿で示したような不具合は発見できない可能性が大きい。

iii)システムとしての発電量の損失もわずかであるため、積算発電量などから不具合を発見することも困難である。

iv)本システムの場合には架台に設置された状態で太陽電池モジュール裏面の黄変を目視で確認することができたが、表面は外観上の変化は見られなかった。したがって、屋根設置方式の住宅用 PV システムで同様な不具合が発生している場合、たとえ、太陽電池モジュール近傍に接近できたとしても、裏面を見ない限りこのような不具合を目視で発見することはできない。

このように、特別な計測装置を用いず、かつ、モジュールに近接できないような状況下では、ここで述べたような不具合を発見するのは容易ではない。むしろ、本事例で紹介した I-V 特性曲線計測装置や赤外線カメラなどを利用すれば、相応の有用な情報を得ることは可能であるが、これらの計測機器は決して安価ではなく、また、本事例以外の不具合が潜在する可能性もあることなどを考えると、本事例で用いた手段や過程がそのまま実用的な故障診断手法となるとは云いがたい。今後さらなる不具合事例の調査・分析を実施しつつ、それに並行して実用的手段(ハードウェア)および社会制度(ソフトウェア)を検討していく必要を痛感している。

なお、本稿で扱った太陽電池モジュールの不具合が対象 PV システムの設置環境に由来するものであるのか、あるいは初期不良が顕在化したものであるのかは特定できていないが、興味深い事実として、当所で運用している同一構成の PV システム(全40台、太陽電池モジュール1,080枚)に、同一箇所が黄変した太陽電池モジュールが多数存在し、さらに、その一部に同一箇所のセルの発熱(ホットスポットセル)が確認されていることから、今後もこれらのシステムを注意深く評価していく予定である。

また、今回対象とした PV システムについても、運転下での不具合太陽電池モジュールの今後の変化を追跡していく。前述したように、本太陽電池モジュールは、現在までのところ BD が機能しているため、PV クラスターの一つが発電しないだけの状態にとどまっているが、この BD がいつまで機能しつづけるのか、また、安全性は維持されつづけるのかが今後の焦点の一つである。本稿の事例については、筆者ははんだ不良による BD への電流回避と推測しているが、それ以外にも陰や汚れなど多様な環境条件下で BD が機能する可能性がある。当然、製造側は実環境での諸条件を考慮して BD の仕様が選択されていると拝察しているが、一般の住宅用 PV システムで太陽電池内モジュール内の BD 破壊の事例も報告されている⁹⁾ことから、注意が必要である。

最後に、本調査の実施と分析に際しては、当所太陽光発電研究センター 評価・システムチームのスタッフに多大な協力と助

言をいただいた。本稿を借りて深くお礼を申し上げたい。

参考文献

- (1)産業技術総合研究所・電気安全環境研究所:太陽光発電システム共通基盤技術研究開発「太陽光発電システム評価技術の研究開発」,平成14年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書,2003年3月
- (2)産業技術総合研究所・電気安全環境研究所:太陽光発電システム共通基盤技術研究開発「太陽光発電システム評価技術の研究開発」,平成15年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書,2004年3月
- (3)PV-Net 神奈川フォーラムでの不具合事例報告,2007年2月