

PVアレイにおける(-dI/dV)-V特性による故障診断

Diagnosis of Failure by using (-dI/dV) -V Characteristic in PV Array

篠田芳幸*1 山中三四郎*2 河村 一*3 大野英之*2 河村英昭*2
 Yoshiyuki Shinoda Sanshiro Yamanaka Hajime Kawamura Hideyuki Ohno Hideaki Kawamura

Abstract

The technology to diagnose electrical performance of photovoltaic array (PV array) becomes important with popularization of photovoltaic power generation system. In this study the authors found that the shape change of I-V characteristic of PV array was due to the abnormality arising in PV array. The abnormality caused by short circuit and disconnection in PV array appeared as the shape change near open circuit voltage of I-V characteristic. The abnormality caused by partial shadow on PV array appeared as the shape change near maximum power point. With the increase of capacity of PV array, it became difficult that the abnormality of PV array was found by the shape change of I-V characteristic. It was possible that the signal of peak which appeared in (-dI/dV)-V characteristic got by the differential of I-V characteristic detected the slight abnormality arising in PV array. From these results, it became clear that the shape change of I-V characteristic and peak of (-dI/dV)-V characteristic was effective to diagnose the slight abnormality in PV array.

キーワード：太陽光発電、I-V 特性、(-dI/dV)-V 特性、PV アレイ、診断

Key Words : photovoltaic power generation, I-V characteristic, (-dI/dV)-V characteristic, PV array, diagnosis

1. はじめに

CO₂削減を目指し、地球環境に少しでも優しい自然エネルギーを利用した技術の開発が世界各国で進んでいる。太陽光発電システム（以降、PVシステムと言う）の導入もその一翼を担っている。近年、PVシステム導入量世界一の座をドイツに譲った¹⁾とはいえ、2010年までに482万kWのPVシステム導入を目指し²⁾、我国の太陽光発電技術に関する研究は、今尚世界をリードしていると言える。

PVシステムの発電電力は、日中の気象条件に大きく左右される。また、PVシステムは屋根の上などの屋外に設置されているために、システムに不具合が生じたとしても、その原因に気付かないことが多い。

PVシステムの普及が進むにつれ、システムの性能低下を評価するための保守・点検技術の開発が必要となる。PVシステムの発電性能低下の要因は、周囲環境による影³⁾、長期使用による白濁劣化⁴⁾、ホットスポット⁵⁾など、多岐にわたっている。今後、PVシステムの普及が進むと、

故障などによる発電電力の低下原因を速やかに特定・修理し、システム本来の発電効率に回復させるための技術が必要になってくる。

本論文は、研究用に設置したPVシステムの試験中に、偶然発見したシステム故障の原因について検討・解析を行ったものである。更に、このシステムの故障解析を契機として、PVシステムの異常を検出する方法について検討している。すなわち、PVシステムの発電性能低下原因とI-V特性の形状変化との関連性を実験的に明らかにすると共に、この原因を容易に発見するための方法として、I-V特性を一階微分した(-dI/dV)-V特性を提案し、その評価を行っている。

2. 実験方法

2.1 1.5kW 研究用 PV アレイシステムとその特性測定

PVモジュール12枚を直列に接続した一ストリングを並列に二列接続し、1.5kW用PVアレイを構築した。このPVアレイは「方位」南、「傾斜角」30°の条件で、名城大学2号館屋上に設置されている。PVアレイを構成している各PVモジュール（公称最大出力64W、公称最大出力動作電圧17.5V、公称最大出力動作電流3.66A、公称開放電圧21.3V、公称短絡電流4.00A）は、18個のPVセルを直

*1 名城大学理工学研究科大学院生
 (〒468-8502 名古屋市中天白区塩釜口一丁目501番地)
 e-mail: m0733008@ccmailg.meijo-u.ac.jp

*2 名城大学理工学部 教授

*3 名城大学理工学部 准教授
 (原稿受付: 2008年3月7日)

列接続したサブモジュールに一個のバイパスダイオードが並列に接続され、これを二個直列に接続した 36 個の PV セル、2 個のバイパスダイオードで構成されている。この PV モジュール 12 枚が直列接続されたストリング毎に 1 個の逆流防止ダイオードを接続し、PV アレイを構成している。図 1 は 1.5kW PV アレイと簡易計測システムを示したものである。PV アレイを構成する各ストリングを a, b とし、さらに各ストリングを構成している 12 枚の PV モジュールには、それぞれ a-1~a-12、b-1~b-12 と番号を付けた。

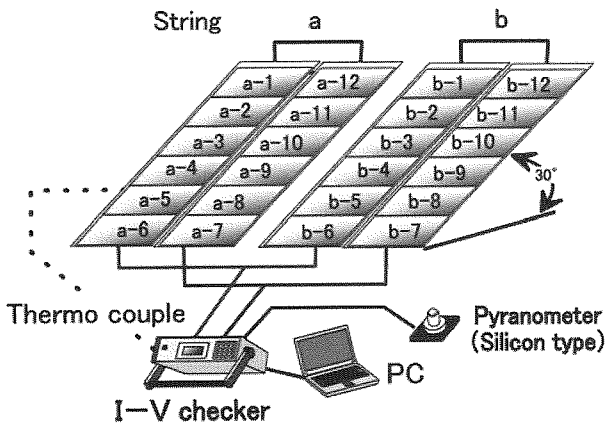


図 1 1.5kW の PV アレイと計測システム
Fig.1 1.5kW PV array and measuring system

PV アレイの I-V 特性は I-V チェッカー (英弘精機、MP-140、有効分解能 15 ビット) を使用し、日射強度は PV アレイと同条件で設置した全天日射計 (英弘精機、MS-601、ISO 9060/2nd class) を使用して計測している。また、アレイ温度は、PV アレイの裏面中央付近に貼り付けた熱電対を用いて、I-V 特性と同時に計測している。これらの計測には、実際に設置されている一般家庭などの PV システムの故障診断に使用することを意識して、持ち運びが可能な簡易型計測システムを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 研究用 1.5kW PV アレイの発電性能異常

3.1.1 I-V 特性の異常観測

図 2 は 1.5kW PV アレイの電气的特性測定中に偶然発見した I-V 特性の一例である。一見、正常な I-V 特性のようであるが、点線状円で囲まれた開放電圧付近に不自然な折れ曲がりが見られた。

この I-V 特性の折れ曲がりの原因を特定することにする。まず、PV アレイをブロック毎に分割し、各ブロックの I-V 特性を測定した。図 3 にストリング a, b の I-V 特性を示す。ただし、各ストリングの I-V 特性は、測定日が異なるため、アレイ温度と日射強度を JIS 規格 C8919⁶⁾ に準じて補正した後の特性である。

公称開放電圧が 21.3V の PV モジュールを 12 枚直列接

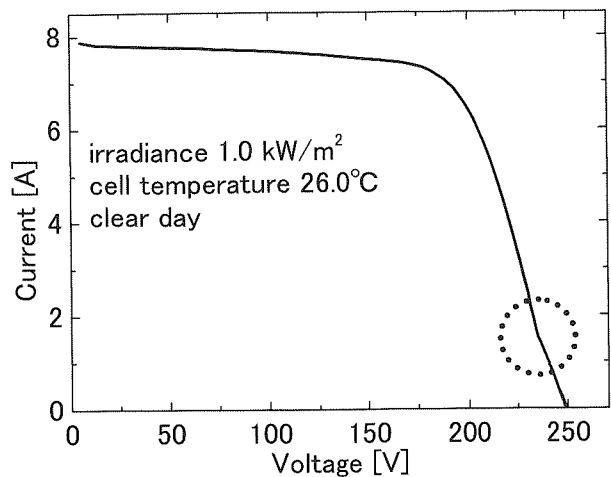


図 2 PV アレイの異常 I-V 特性
Fig.2 Abnormal I-V characteristic of PV array

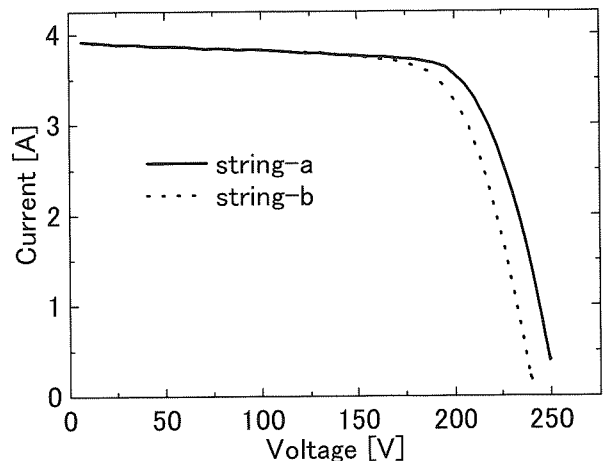


図 3 ストリング a と b の I-V 特性
Fig.3 I-V characteristics of string-a and string-b

続した各ストリングの公称開放電圧は 255.6V といえる。このことを考慮し、図 3 のストリング a, b の I-V 特性を比較するとき、ストリング a の開放電圧は、公称値にほぼ等しい。これに対して、ストリング b の開放電圧は前者のそれに比べて約 10V 低い。このことは、ストリング b 中に出力異常の原因が含まれていることを示唆している。

次に、ストリング b 内の出力低下原因を探ってみる。同様の方法でこのストリング b を構成している PV モジュールを 6 枚ずつの二つのブロックに分割し、ブロック毎の I-V 特性を測定した。この結果、先と同様に片方のブロックの開放電圧が、構成している PV モジュールのそれらを加え合わせて得られる公称開放電圧に比べ低下していることが分かった。この様にして開放電圧付近の異常が観測されたブロックについて、更に分割を繰り返し、ブロック毎の I-V 特性を測定した。

図 4 は、最終的に異常が観測されたブロックを構成する PV モジュール 3 枚の各 I-V 特性である。この結果、PV アレイを構成している 24 枚の PV モジュールの中で、モジュール「b-6 番」の開放電圧のみが、公称値の約半分の 10V に低下していることが明らかとなった。この異常が、PV

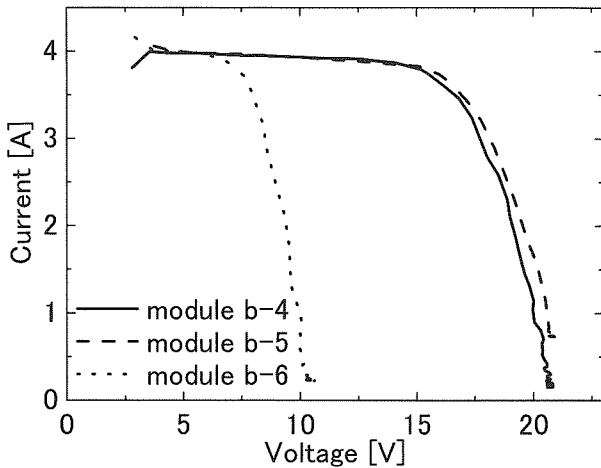


図4 各PVモジュールのI-V特性
Fig.4 I-V characteristics of each module

アレイの I-V 特性に開放電圧付近の折れ曲がりの原因と考えられる。

3.1.2 I-V 特性の異常のシミュレーションによる考察

1.5kW PVアレイのI-V特性の開放電圧付近に出現した折れ曲がり異常は、アレイを構成しているPVモジュールb-6の開放電圧が、公称値の約半分に低下していることに起因していることが示唆された。

いま、開放電圧の異なる二つのストリングで構成されるPVアレイのI-V特性をシミュレーションにより求めてみる。図5は、開放電圧の異なるI-V特性とこれらを合成して得られたI-V特性を示す。合成して得られたPVアレイのI-V特性には、開放電圧付近に折れ曲がりのあることが明らかとなった。

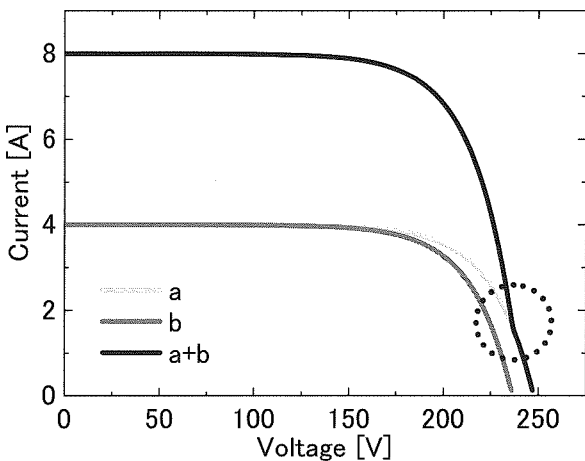


図5 開放電圧の異なるI-V特性のシミュレーション
Fig.5 Simulation of I-V characteristics having different open circuit voltage

以上のシミュレーション結果は、図2に示した1.5kW PVアレイのI-V特性の折れ曲がり異常が、PVアレイを構成しているPVモジュールb-6一枚の開放電圧低下に起因していることを確実なものとした。そこでPVモジュールb-6をシステムから切り離し、最初に接続箇所を点検した。その結果、パネル側の出力線と接続端子が剥離していること

を確認したため、半田付けをして修理を行った。修理後のI-V特性を図6に示す。

図6より、開放電圧付近に観測された折れ曲がりの異常は消失し、正常のI-V特性に回復したことが明らかとなった。

このときのPVモジュール一枚の故障によるPVアレイの発電電力損失はPVアレイの修理前後の最大電力差から評価すると、約29Wであることが明らかとなった。この値は正常に動作しているPVアレイの約2%の損失率に相当する。

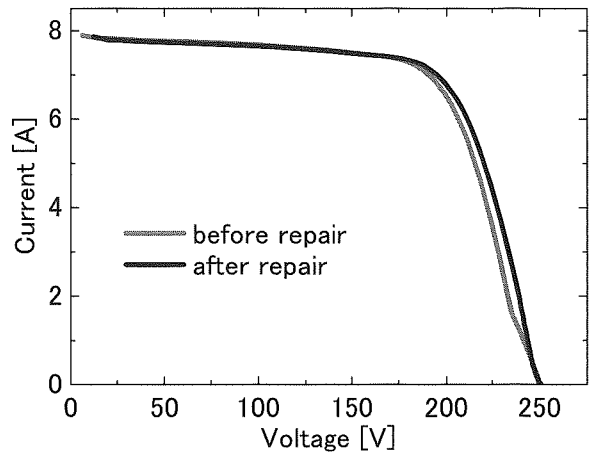


図6 修理前後におけるPVアレイのI-V特性の比較
Fig.6 Comparison of I-V characteristics of PV array before and after repair

3.1.3 出力低下原因とI-V特性の形状変化

PVアレイで観測されたI-V特性の開放電圧付近における不自然な折れ曲がりとは、アレイを構成しているPVモジュール一枚の開放電圧が公称値の約半分に低下したことに起因するサインであることを明らかにした。

PVアレイの発電電力低下原因として、一般によく起こりうる(1)「断線」「短絡」による回路的異常、(2)PVアレイの周囲環境・汚れなどに起因する部分的「影」による異常などが考えられる。本節ではこれらの要因をPVアレイ中に人為的に作り、それぞれのI-V特性を計測し、異常とI-V特性の形状変化との比較を行い、発電電力低下原因の特定の検討を行った。

図7は実験に用いたPVモジュール内の異常を示す等価

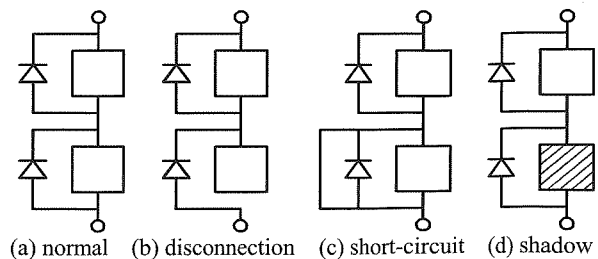


図7 PVアレイ内のPVモジュールの異常
Fig.7 Abnormal equivalent circuits of PV module in PV array used for experiment

回路である。ただし、図中の(a)は、正常な PV モジュール、(b)は PV モジュールを構成する一つのサブモジュールが「断線」状態を、(c)は一つのサブモジュールが「短絡」状態を、(d)はサブモジュールが「影」で覆われた状態を示す。この正常な場合と人為的に作った各異常状態の I-V 特性の計測を行った。

図 8 は一つのサブモジュールが断線した場合の I-V 特性を示す。図 9 は一つのサブモジュールが短絡された場合の I-V 特性を示す。この二つの I-V 特性は正常な場合の I-V 特性に比べて開放電圧付近で折れ曲がる現象が現れている。図 10 は一つのサブモジュールに影を模擬するために半透明のフィルムを張った場合の I-V 特性である。この I-V 特性は開放電圧付近での折れ曲がりはないが、最適動作点付近で歪んでいる。

図 8 で開放電圧付近に折れ曲がりが見られた理由は図 5 のシミュレーションで示したように、ストリングの開放電圧の違いによると考えられる。サブモジュールは約 10.7V の公称開放電圧に相当する。一枚のサブモジュールが断線すると、このサブモジュールに並列に接続されたバイパスダイオードを通して電流が流れることになる。したがって、一つのサブモジュール分の電圧が低下し、ストリングの開放電圧で約 10.7V 低下する。また図 9 の短絡された場合は、サブモジュールの端子間電圧は 0V になるため、断線した場合と同様にストリングの開放電圧が低下する。ただし、これらの場合、二つのストリングの短絡電流は同じになる。したがって、ストリング a とストリング b の開放電圧のみが異なり、図 5 のシミュレーションのように開放電圧付近で折れ曲がりが見れる。

図 10 で I-V 特性の最適動作点付近が歪む原因はストリング中に出力電流の小さいサブモジュールが存在するためと考えられる。すなわち、I-V 特性で考えると、電圧の低い範囲では、出力電流の小さいサブモジュールがストリング中に存在しても、このサブモジュールに並列に接続されたバイパスダイオードに迂回して電流が流れるので、出力電流に影響しない。しかし電圧が高くなると、電流はサブモジュールを通して流れるようになるので、ストリングの電流は出力電流の低いサブモジュールの電流に律則され、小さくなる。電圧の大きさによって流れる電流が異なるので、I-V 特性上ではこの転換点がひずみとして現れる。一枚のサブモジュールの電流低下が小さければ、この転換点が最適動作点付近に来る。ただし、この場合、各ストリングの開放電圧は同じになる。

I-V 特性の形状変化は PV アレイの発電電力低下を知る手がかりとなるだけでなく、その原因を特定するためのシグナルをも与えていると言える。I-V 特性の形状変化だけでは、1.5kW 研究用 PV アレイの I-V 特性 (図 2) で観測された開放電圧付近の折れ曲がりの異常が断線か短絡のどちらかを判断することはできないが、アレイに発生した異常を早期に発見するには十分である。

PV アレイに生じる異常現象は、アレイの発電容量が大

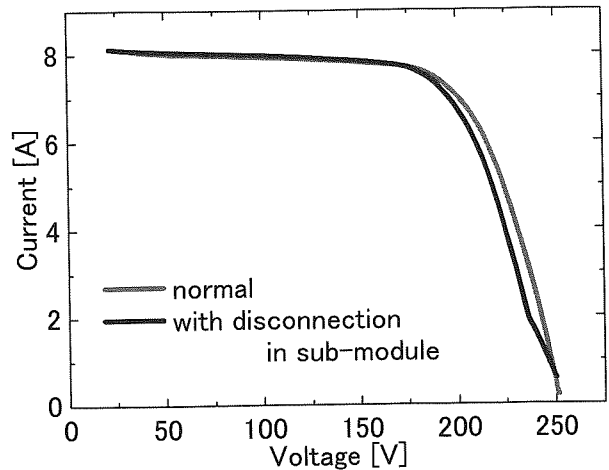


図 8 断線事故を含む PV アレイの I-V 特性
Fig.8 I-V characteristics of PV array with disconnection accident in sub-module

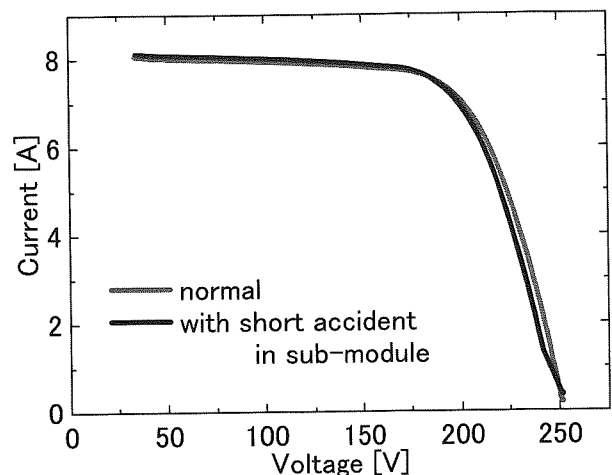


図 9 短絡事故を含む PV アレイの I-V 特性
Fig.9 I-V characteristics of PV array with short circuit accident in sub-module

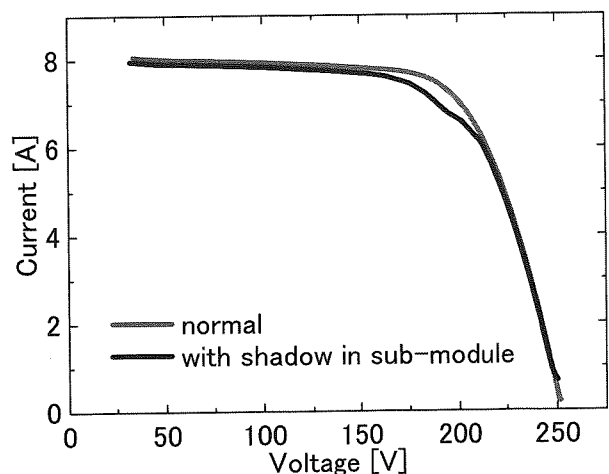


図 10 影を含む場合 PV アレイの I-V 特性
Fig.10 I-V characteristics of PV array with shadow on sub-module

きくなるほど、I-V 特性の形状変化として見つけにくくなるものと思われる。次節では一般家庭用 3kW PV アレイを

対象に、システムの異常検出と判定を試み、I-V 特性の形状変化では見落としがちな異常を見つけ出すための方法を提案する。

3.2 3kW PVアレイでの異常現象の検出と判定法

太陽光発電システムの普及、稼働時間の増大に伴い、今後 PV アレイの発電性能診断が重要になる。本節では、家庭用 PV システムの発電性能診断を意識して、3kW PV アレイ装置を構築した。図 1 と同じ種類の PV モジュールを用いて、12 直列 4 並列のシステムを別に用意し、「方位」南、「傾斜角」7.6° の条件で名城大学 2 号館屋上に設置した。4 並列の各 PV スtring を a、b、c、d とし、String を構成する各モジュールを、String 毎に a-1 ~ d-12 のように番号を付けた。計測には、図 1 と同様の簡易型計測システムを用いた。

3.2.1 正常な PV アレイの I-V 特性と (-dI/dV)-V 特性

図 11 は、一見、正常な 3kW PV アレイの I-V 特性とこの特性を一階微分して得た (-dI/dV)-V 特性である。一見したところ、I-V 特性の形状に変化は見られない。しかし、(-dI/dV)-V 特性には、ピーク P₁、P₂ の現れていることが確認できる。このことは、ピーク近傍の I-V 特性に微妙な変化のあることを示していることになる。以下にこれらピークの原因について検討する。

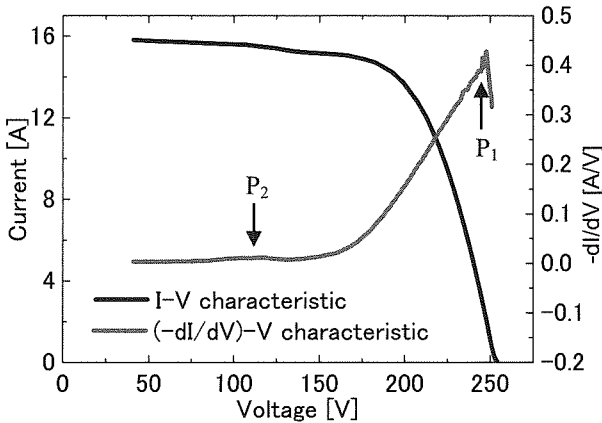


図 11 3kW PV アレイの I-V 特性と (-dI/dV)-V 特性
Fig.11 I-V characteristic and (-dI/dV)-V characteristic of 3kW PV array

図 12 は、図 11 の I-V 特性の開放電圧付近を拡大したものであり、I-V 特性の開放電圧付近の点線で囲まれた個所に不自然な折れ曲がりを確認した。この不自然な折れ曲がりの原因を調べるために PV アレイを構成する四つの各 String の I-V 特性を計測した。図 13 は各 String の開放電圧付近の I-V 特性を拡大したものである。各 String の開放電圧が異なっていることがわかる。PV アレイの I-V 特性は、これら各 PV モジュールの I-V 特性を合成したものである。従って、(-dI/dV)-V 特性のピーク P₁ は、PV アレイを構成する四つの String の開放電圧が異なることによって発生したものと思われる。

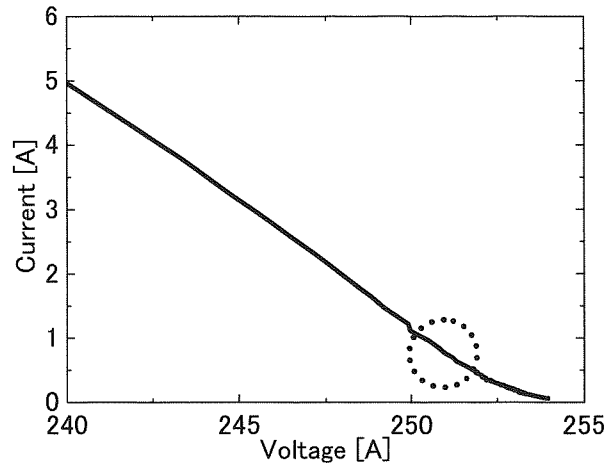


図 12 開放電圧付近を拡大した I-V 特性
Fig.12 Enlarged I-V characteristic near open circuit voltage

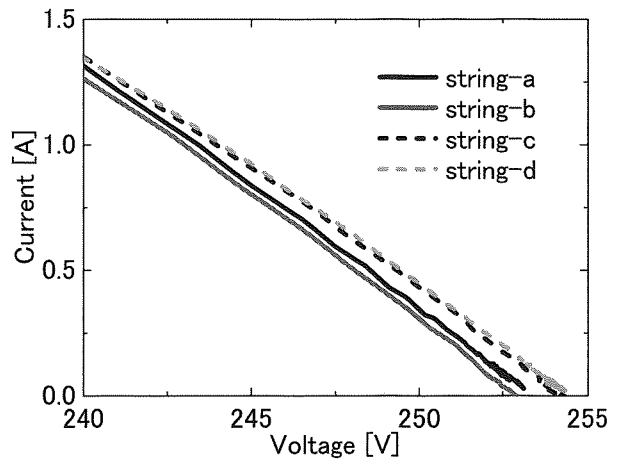


図 13 PV アレイを構成する各 String の開放電圧付近の I-V 特性
Fig.13 I-V characteristics of each string constituting PV array near open circuit voltage

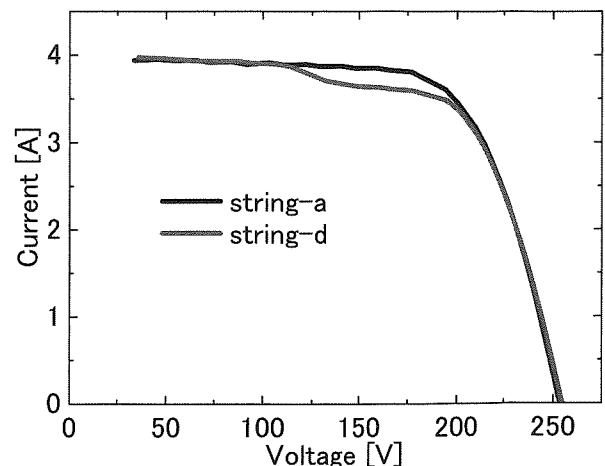


図 14 String a と d の I-V 特性
Fig.14 I-V characteristics of string-a and string-d

次に、(-dI/dV)-V 特性のピーク P₂ の原因について検討を行なってみる。図 14 は String a と String d の I-V 特性を示す。他の String b、c の I-V 特性は String

グ a のそれに等しく、ストリング d のそののみが大きく歪んでいることを確認した。次にストリング d を構成している各 PV モジュールの I-V 特性を詳細に調べてみた。このうち、d-1 と d-2 の二つの I-V 特性を図 15 に示す。この I-V 特性は JIS 規格に準じて補正してあるにもかかわらず短絡電流の値が異なっている。この短絡電流の違いについて検討するために、図 16 にストリング d を構成している 12 枚の PV モジュールの日射強度 - 短絡電流特性を示す。この図よりストリング d は、短絡電流が小さい PV モジュール 5 枚とそれが大きい PV モジュール 7 枚で構成されていることがわかる。従って、ストリング d の I-V 特性は、短絡電流の異なる PV モジュールのそれらの和⁷⁾であることから、これらの違いが原因となって(-dI/dV)-V 特性のピーク P₂ が発生したものと思われる。

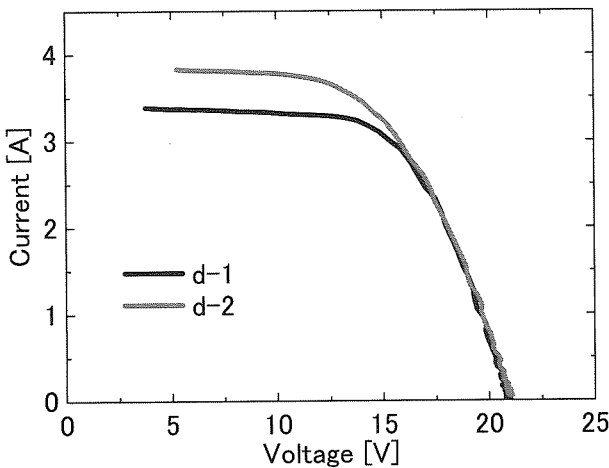


図 15 ストリング d を構成する d-1 と d-2 の I-V 特性
Fig.15 I-V characteristics of d-1 and d-2

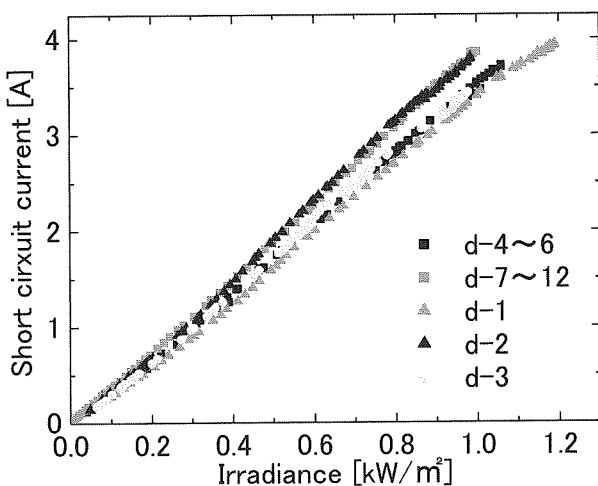


図 16 ストリング d を構成する各 PV モジュールの日射強度 - 短絡電流特性
Fig.16 Irradiance - Short circuit current characteristics of each module constituting string-d

PV モジュールは同一型番のモジュールでも個体差によって多少の電圧や電流等の特性が異なるため、複数枚を接

続した PV アレイではその個体差の影響によって、開放電圧の差や短絡電流の違いとなって表れたと考えられる。

3.2.2 断線、短絡事故を起こした PV モジュールを含む PV アレイの I-V 特性と(-dI/dV)-V 特性

図 17 は 3kW PV アレイを構成する一枚の PV モジュール内で断線事故が生じた場合の I-V 特性と(-dI/dV)-V 特性を示す。断線事故のある PV モジュールを含む PV アレイの I-V 特性にもかかわらず、図 2 で確認された開放電圧付近の折れ曲がり観測されなかった。このことは、PV アレイの発電容量が大きくなることによって、I-V 特性を用いて断線事故の異常が確認できにくくなることを示唆している。しかし、この I-V 特性を一階微分した(-dI/dV)-V 特性には、開放電圧付近にピーク P₁ とは異なる新たなピーク P₃ の出現を確認することができる。この P₃ の位置は、開放電圧付近にあるため、I-V 特性の開放電圧付近では確認できなかったごくわずかな I-V 特性の変化が表れたと考えられる。この P₃ によって断線事故の異常を確認する

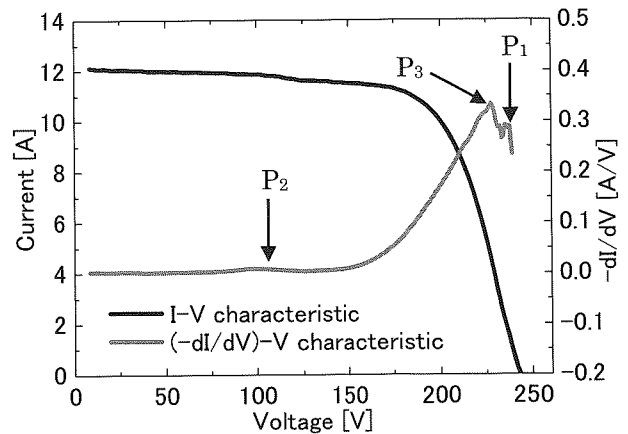


図 17 断線事故を含む PV アレイの I-V 特性と(-dI/dV)-V 特性

Fig.17 I-V characteristic and (-dI/dV)-V characteristic of PV array with disconnection accident

ことができた。また、短絡事故を起こした PV モジュールを含む PV アレイにおいても、(-dI/dV)-V 特性を用いることで同様のピーク P₃ の存在を確認できた。

この結果、I-V 特性では確認できなかった 3kW PV アレイ内のごくわずかな「断線・短絡」異常を、(-dI/dV)-V 特性を用いることによって確認可能であることが明らかになった。しかも、その異常シグナルは、開放電圧付近に発生することも明らかとなった。

3.2.3 部分的「影」のかかった PV モジュールを含む PV アレイの I-V 特性と(-dI/dV)-V 特性

PV モジュール中のセル 1 枚に透過率 20% のフィルムをはって部分「影」を模擬した。図 18 は、この部分「影」のかかった PV モジュール 3 枚を含む PV アレイの I-V 特性と(-dI/dV)-V 特性である。I-V 特性は、正常な場合のそれ(図 11)とほとんど大差なく、「影」の影響を識別でき

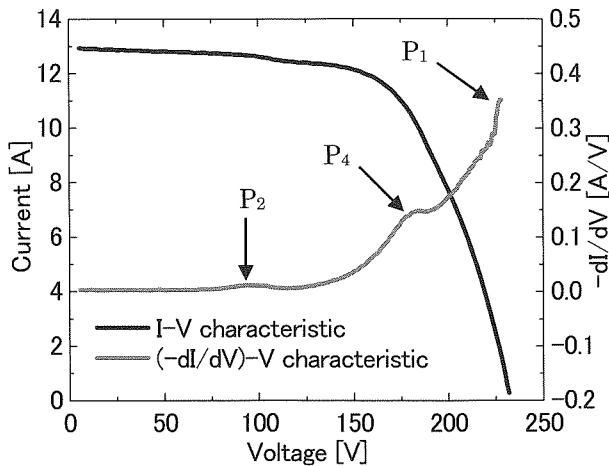


図 18 部分的に影で覆われている 3 枚の PV モジュールを含む PV アレイの I-V 特性と(-dI/dV)-V 特性

Fig.18 I-V characteristic and (-dI/dV)-V characteristic of PV array with partial shadow

ない。しかし、(-dI/dV)-V 特性では、「影」の影響と思われるピーク P_4 が現れている。この P_4 は、「断線・短絡」の回路的異常の(-dI/dV)-V 特性に現れた P_3 と異なり、そのシグナルが I-V 特性の最適電圧付近に現れている。これは、I-V 特性の最適動作点付近がごくわずかに歪んでいることを示している。

この結果、I-V 特性では確認できなかった 3kW PV アレイ内の「影」異常を、(-dI/dV)-V 特性を用いることによって確認可能であることが明らかになった。またその異常シグナルは、I-V 特性の最適電圧付近に現れることを確認した。

以上の結果、PV アレイ中の極わずかな異常でも、(-dI/dV)-V 特性のピークとして観測することができ、PV アレイの発電電力低下の異常を発見可能としている。

4. むすび

太陽光発電システムの普及に伴い、今後 PV アレイの電気的性能を診断・評価する方法が必要となる。本研究では、I-V 特性の形状変化とこれを利用した(-dI/dV)-V 特性により、PV アレイで発生する異常現象の特定とその原因評価を行った。その結果を要約すると以下の通りである。

1. PV アレイの「断線・短絡」などの回路的原因に起因する異常によって、PV アレイを構成する複数のストリングの開放電圧が異なり、I-V 特性の開放電圧付近の形状変化として現れる。

2. PV アレイの部分的「影」に起因する異常によってストリングを構成する一部のモジュールの出力電流が低下し、I-V 特性の最適動作点付近の形状変化として現れる。

3. 上記の異常現象は、PV アレイの発電容量の増大により、I-V 特性の形状変化として確認することは難しくなる。しかし、I-V 特性を一階微分した(-dI/dV)-V 特性を利

用することにより、PV アレイ中の極わずかの異常も、特性のピークシグナルの出現として確認が可能となる。

太陽光発電システムは、設置段階での発電電力低下要因を極力排除し、変換効率向上に努める必要がある。更に、長期間の使用により、部分的劣化・汚染などによる発電効率の低下は必定であり、これら要因による PV アレイの性能低下の評価も必要となる。(-dI/dV)-V 特性は、これらの異常現象を速やかに発見し、発電電力低下を診断するための有効な方法の一つ考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、「NEDO 海外レポート」、NO.1011 (2007-11-14)
- 2) 財団法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), <http://www.nedo.go.jp>
- 3) 河村、米倉、中、山中、大野、河村：「太陽電池モジュールの I-V 特性に及ぼす影の影響」太陽エネルギー、Vol.27、NO.6、pp.41-49 (2001)
- 4) A. Kitamura, H. Matsuda : "Long Term Degradation Phenomena of Crystalline Si Solar Modules" 12th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (Jeju, Korea), pp.757-758 (2001-6)
- 5) 加藤和彦, 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-, 太陽エネルギー, Vol.33, NO.4 (2007), pp. 69-74
- 6) JIS 規格 C8919:2005, 「結晶系太陽電池セル・モジュール屋外測定方法」, 日本工業規格
- 7) for example, Roger Messenger, Jerry Ventre, PHOTOVOLTAIC SYSTEMS ENGINEERING, (1999-12)