

Study on Detection Method of Open Failure BPDs
Using I-V CharacteristicsI-V 特性を利用した開放故障 BPD の
検出方法に関する研究Takatoshi SATO
佐藤 孝俊^{*1}Sanshiro YAMANAKA
山中 三四郎^{*2}

Abstract

In recent years, along with photovoltaics system spread, maintenance of the system has come to be recognized as necessary process. The item of inspection of open failure BPDs is not included in the past maintenance guidelines of photovoltaics system. The open failure BPDs are likely to cause the fire. Therefore, it should be added as the inspection item. The method for detection of open failure BPDs has already been proposed. However, these methods take a long time to detect the failure modules. So we have been studying on the methods for detection of open failure BPDs. In this paper, we tried to the methods for detection of open failure BPDs in a string. As a result, when the failure modules were a few, we were able to detect the failure modules.

Keywords: Photovoltaics system, Bypass diode, Open failure, I-V Characteristics

キーワード：太陽光発電システム，バイパスダイオード，開放故障，I-V 特性

1. はじめに

太陽光発電システム(PVS)が普及し始めた当初、PVS は可動部を持っていないなどの理由からメンテナンスフリーであると言われていた⁽¹⁾。しかしながら、PVS の普及とともに、様々な不具合事例が報告され始め、PVS の保守点検の重要性が認識されるようになってきた⁽²⁾。

これまでに制定された PVS の保守点検ガイドラインでは、

外観の目視点検や I-V 特性の測定が中心で、モジュールに関する不具合の一つである「バイパスダイオード(BPD)の開放故障」に関する点検は、あまり詳しく取り上げられていない⁽³⁾。

この不具合は、火災などの安全性に関わる事故に発展する可能性があるため、定期的な点検が必要である。

現在までに BPD の開放故障を点検する方法として I-V 特性、配線路探索器、IR 画像などを利用した方法が提案されている⁽⁴⁾。しかしながら、これらの方法はクラスタ単位で遮光し、点検する必要がある。したがって、アレイ中の全ての BPD の健全性を点検するには時間がかかる。

筆者らは、BPD の開放故障を点検する方法について検討している^(5,6)。本論文では、一部のモジュールに影をかけ、接続箱から I-V 特性を測定することにより、昼間でも PV アレイの配線を変更することなく、ストリング単位で開放故障した BPD を確実かつ効率よく特定する方法について、主にシミュ

*1 名城大学大学院 理工学研究科

現在 (株)トーエネック勤務

*2 名城大学理工学部 教授 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口

1-501) e-mail: yamanaka@meijo-u.ac.jp

(原稿受付：2017 年 2 月 3 日，受理日：2017 年 4 月 25 日)

レーションを使って検討した。また、その結果に基づいて、実際のPVアレイを使って提案する方法の有効性を確認した。その結果、開放故障したBPDの個数が少ない場合は、故障したBPDを確実に特定できることが確認できたので報告する。

2. 検討対象とするモジュール

本稿では、現在最も普及が進んでいる結晶系（単結晶，多結晶）シリコン太陽電池モジュールで構成されているPVアレイを対象にして、開放故障したBPDを確実に特定するための汎用性の高い方法について検討する。ただし、シミュレーションおよび実測による検討では、名城大学に設置している多結晶シリコン太陽電池モジュールで構成されたPVアレイを例にとって検討する。

Fig.1に、シミュレーションの基本となるセル1枚の等価回路を示す。同図では、光電流を I_{ph} 、ダイオードを D 、シャント抵抗を R_{sh} 、直列抵抗を R_s とする。また、セル1枚の短絡電流と開放電圧をそれぞれ約3.7A、約0.6Vとし、シャント抵抗 R_s と直列抵抗 R_{sh} をそれぞれ50 Ω 、0.001 Ω とする。本論文では、 R_{sh} が低下していないモジュールに限定して検討する。Fig.1の等価回路は、ダイオードの降伏現象を含め、式(1)で表わすことができる⁷⁾。

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + IR)}{n_0 k T} \right\} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} + a(V + IR_s) \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_{br}} \right)^{-m} \quad (1)$$

本稿のシミュレーションでは $n_0 = 1.05$ 、 $a = 1.0 \times 10^{-6}$ 、 $V_{br} = 30$ 、 $m = 20$ 、 $I_0 \approx 2.2 \times 10^{-9}$ とする。Fig.1は非線形回路となるので、ニュートン・ラプソン法を使った回路シミュレータ(PSpice)により、各電圧点に対する電流を評価することによってI-V特性を求めている。

Fig.2に示すモジュールのI-V特性は、PSpice上でFig.1に示すセルを18枚直列に接続し、それをBPDと並列に接続することでクラスタを構成し、さらに2クラスタを直列に接続してシミュレーションを行う。ストリングのI-V特性も同様な方法で求めることができる。

3. BPDの開放故障判定（ストリング単位）

PVアレイの配線を取り外し、モジュール1枚ずつのI-V特性を全て測定すれば、確実に開放故障したBPDを特定できる⁸⁾。例として、Fig.2のようにモジュールの下段クラスタに対し、セル面積の約50%をゴムシートで遮光する場合を考える。Fig.3に、シミュレーションで算出したモジュール1枚のI-V特性を示す。遮光したクラスタのBPDが正常な場合は、実線Aのように段差のあるI-V特性となる。一方、BPDが開放故障している場合は、破線Bのように段差のないI-V特性となる。本方法では、非遮光部のBPDが開放故障していてもI-V特性の形状には影響がないため、I-V特性の段差の有無だけで

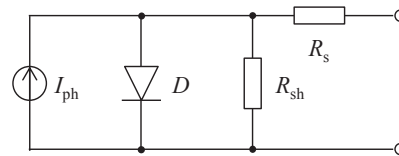


Fig.1 Equivalent circuit of a cell.

図1 セル1枚の等価回路

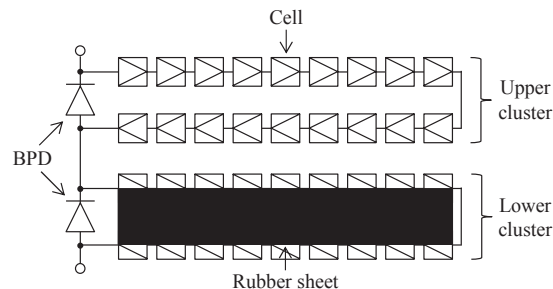


Fig.2 Schematic diagram of a module.

図2 モジュール1枚の構成

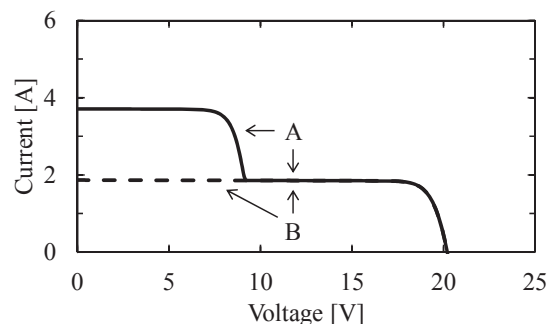


Fig.3 I-V curve of a module (Simulation).

図3 モジュール1枚のI-V特性

遮光部に開放故障したBPDが存在すると判定することができる。したがって、2クラスタで構成されたモジュールの場合、遮光シートを交換しながらI-V特性の測定を2回行ない、点検することになる。

しかしながら、多数のモジュールで構成されるPVアレイを点検する場合、この方法は作業効率が悪い。この課題を解決するため、筆者らは接続箱からストリング単位で開放故障したBPDを特定する方法を検討している^{5,6)}。接続箱からI-V特性を測定することで、PVアレイの配線を変更する必要がなくなり、遮光シートの交換だけで開放故障したBPDを効率よく特定することに繋がる。本章では、ストリング内で開放故障したBPDの存在の有無を確認する方法、さらに開放故障したBPDが存在することが判明した場合には、そのモジュールを特定する方法についてシミュレーションを使って検討する。

3.1 I-V特性の段差とセルの発熱

I-V特性の段差の有無だけで開放故障したBPDを特定できれば、確実な判定に繋がる。ここでは、一例としてモジュール24枚を1ストリングとして考え、シミュレーションを使って検討する。

シミュレーションで用いるモジュール1枚の構成は、Fig.2と同様である。Fig.4に、モジュール24枚を1ストリングと

した場合の構成を示す。最近のモジュールは、ジャンクションボックス内が樹脂材料で充填されているため、クラスタ単位で開放故障した BPD を特定できても、簡単に BPD を交換することはできない。開放故障した BPD を特定した際は、モジュール自体を交換することになるため、モジュール単位で遮光しながら I-V 特性を測定すれば十分である。

例として、Fig.4 のようにストリング中のモジュール 1 枚 (2 クラスタ) に対し、セル面積の約 50% をゴムシートで遮光する場合を考える。Fig.4 では、非遮光モジュールを白色、遮光モジュールを黒色で塗りつぶした。Fig.5 に、シミュレーションで算出したモジュール 24 枚中 1 枚を遮光した場合の I-V 特性を示す。全ての BPD が正常な場合を実線 C、遮光部の BPD が 1 個開放故障している場合を破線 D とした。実線 C と破線 D の両者とも段差のある I-V 特性となっている。実線 C は BPD、破線 D はクラスタの降伏現象によってできる段差である。実線 C の BPD が立ち上がり始める点から 1 クラスタ分の降伏電圧までを V_{br} 、実線 C の段差から推定した非遮光モジュールの開放電圧を V_{ns} 、遮光モジュールの開放電圧を V_s とする。

実線 C と破線 D の両者とも段差のある I-V 特性となっているため、I-V 特性の段差の有無だけで開放故障した BPD を特定することはできない。ストリング中の非遮光モジュールの枚数を増やした場合、 V_{ns} が V_{br} より大きくなり、I-V 特性の第一象限に降伏現象が現れることになる。I-V 特性の段差の有無だけで確実に開放故障した BPD を特定するためには、非遮光モジュールの枚数を減らし、 V_{ns} を V_{br} より小さくすればよい。

Fig.6 に、非遮光モジュールの枚数を減らし、 V_{ns} を V_{br} より小さくした場合の I-V 特性を示す。全ての BPD が正常な場合を実線 E、遮光部の BPD が 1 個開放故障した場合を破線 F とした。 V_{ns} を V_{br} より小さくしたことによって、I-V 特性の第一象限に現れていた降伏現象が第二象限へ移動していることが分かる。

また、 V_{ns} を V_{br} より小さくすれば、点検中にセルが発熱する (ホットスポットの発生に繋がる) 心配はない。セルの発熱に関しては、参考文献を参照されたい^(4,8)。

本節の冒頭でも説明したように、筆者らはモジュールを遮光しながら I-V 特性を測定することで、開放故障した BPD を特定しようとしている。そのため、開放故障した BPD を特定するために、 $V_{ns} < V_{br}$ を満たす非遮光モジュールの枚数を定めなければならない。

3.2 適切な非遮光モジュールの枚数

前節では、非遮光モジュールの枚数が適切であれば、I-V 特性の段差の有無だけで、遮光モジュール内の開放故障した BPD を判定できることが判明した。そこで本節では、適切な非遮光モジュールの枚数について検討する。

Fig.6 に示したように、降伏現象を第二象限に留めるためには、 V_{ns} を V_{br} より小さくする必要がある。これを実現するためには、 V_{br} の値が既知でなければならないが、 V_{br} は簡単に測定することができないため、非遮光モジュールの枚数を決めることが難しい。

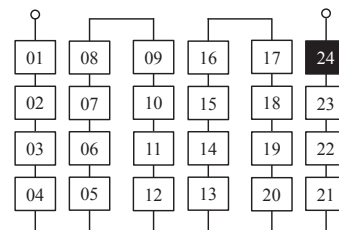


Fig.4 Schematic diagram of a string.

図 4 1 ストリングの構成

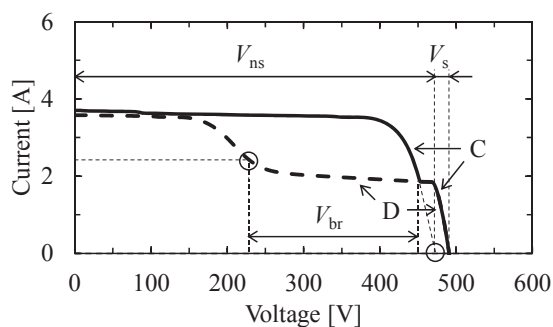


Fig.5 I-V curve of a string with a shaded module (Simulation).

図 5 モジュール 1 枚を遮光した I-V 特性

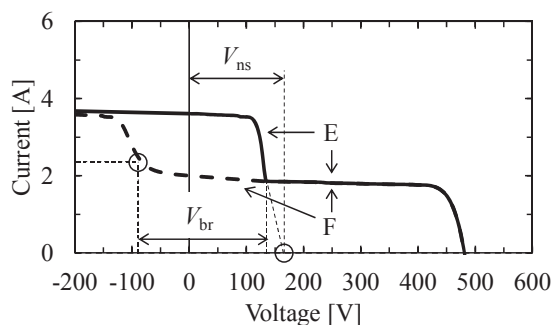


Fig.6 I-V curve of a string with 16 shaded modules (Simulation).

図 6 モジュール 16 枚を遮光した I-V 特性

そこで、1 クラスタの開放電圧を参考に、適切な非遮光モジュールの枚数を算出する方法を検討する。

製造メーカは、クラスタ内のセル 1 枚に影がかかったとき、影がかかったセルに降伏電圧以上の逆バイアス電圧が加わらないように (クラスタの開放電圧がセル 1 枚の降伏電圧より小さくなるように) クラスタを構成するセルの枚数を制限している。クラスタ内の全てのセルに影がかかった場合、影がかかったセル全体の降伏電圧は、セル 1 枚の降伏電圧と影がかかったセルの枚数の積となるので、これがクラスタの開放電圧と影がかかったセルの枚数の積よりも大きくなっていればよい。この条件が満たされていれば、I-V 特性の第一象限に降伏現象が現れることはない。この関係を式(2)に示す。

$$n \times V_{oc} = V_{ns} < \frac{V_{oc}}{n_{cl}} \times n_{ce} < V_{br} \times n_{ce} = V_{br}$$

従って、

$$n < \frac{n_{ce}}{n_{cl}} \quad (2)$$

n : 非遮光モジュールの枚数 [枚]

V_{oc} : モジュール 1 枚の開放電圧 [V]
 V_{ns} : 非遮光モジュールの開放電圧 [V]
 n_{cl} : モジュール 1 枚のクラスタ数 [クラスタ]
 n_{ce} : クラスタ内のセルの枚数 [枚]
 V_{br} : セル 1 枚の降伏電圧 [V]
 V_{br} : 1 クラスタの降伏電圧 [V]

モジュール 1 枚のクラスタ数が 2 クラスタ、クラスタ内のセルの枚数が 18 枚の場合を例にとる。これらの値を使って式(2)で計算した結果、非遮光モジュールの枚数 n は 8 枚以下になる。すなわち、非遮光モジュールを 8 枚以下にすれば、I-V 特性の段差の有無だけで開放故障した BPD の存在を判定できる。Fig.5 は、この条件を満たしていないため、開放故障した BPD の存在を I-V 特性の段差の有無だけでは判定できないことになる。

式(2)から分かるように、非遮光モジュールの決定は、1 スtring中のモジュールの枚数には関係しない。すなわち、1 スtring中のモジュールの枚数が比較的少ない住宅用 PVS でも、モジュールの枚数が多い産業用 PVS でも、この点検に必要な非遮光モジュールの枚数は同じである。

別の例として、モジュール 1 枚のクラスタ数が 3 クラスタ、クラスタ内のセルの枚数が 20 枚の場合について考える。これらの値を使って式(2)を使って計算した結果、非遮光モジュールの枚数 n は 6 枚以下になる。このように、式(2)はモジュールの枚数などの条件を選ばない普遍性の高い式である。

Fig.4 に示した String について、非遮光モジュールを 8 枚以下にすることで、I-V 特性の段差の有無だけで開放故障した BPD の存在を判定できるようになるのか確認しておく必要がある。前節で説明したように、Fig.6 はシミュレーションで算出したモジュール 24 枚中 16 枚を遮光した（非遮光モジュールを 8 枚にした）場合の I-V 特性を示している。Fig.5 と Fig.6 を比較すると、 V_{br} は同じである。一方、非遮光モジュールの枚数が減ることによって、 V_{ns} が小さくなっている（Fig.5 に示す V_{ns} に比べ、Fig.6 に示す V_{ns} の方が小さい）。 V_{ns} が V_{br} より小さくなることで、I-V 特性の第一象限に降伏現象が現れることはなくなる。

したがって、点検する PV アレイ毎に適切な非遮光モジュールの枚数を式(2)で計算することにより、どの結晶系太陽電池モジュールで構成された PV アレイでも I-V 特性の段差の有無だけで開放故障した BPD を特定できるため、この方法は普遍性が高いと言える。

3.3 開放故障した BPD の特定方法

前節では、Fig.4 の String の場合、非遮光モジュールの枚数が 8 枚以下であれば、I-V 特性の段差の有無だけで確実に開放故障した BPD の存在を判定できることが判明した。そこで、本節ではモジュール 8 枚を 1 つのグループ（モジュール 01 から 08 をグループ A、モジュール 09 から 16 をグループ B、モジュール 17 から 24 をグループ C）として考え、開放故障した BPD の存在の有無を判定する方法を検討する。さらに開放故障した BPD が存在する場合には、そのモジュールを特定

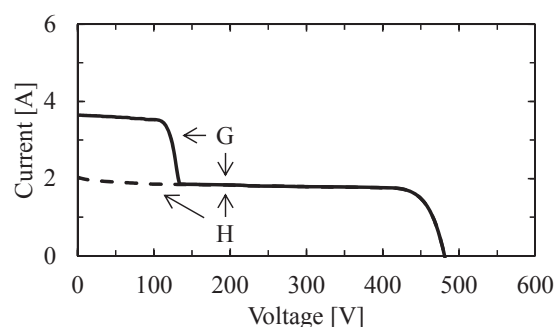


Fig.7 I-V curve of a string with 16 shaded modules (Simulation).

図7 モジュール 16 枚を遮光した I-V 特性

する方法も検討する。

本節では、1 String がモジュール 24 枚の場合を例にとって検討するため 3 つのグループに分けるが、1 String が 12 モジュールで構成される住宅用 PVS であれば 2 つのグループに分けることになる（1 つのグループのモジュール数は、8 枚以下であればよい。または、モジュールの重複を許して、各グループ 8 枚としてもよい）。1 String が 48 モジュールで構成されていれば、6 つのグループに分けることになる。

3.3.1 開放故障した BPD がいない場合 本項では、開放故障した BPD が存在しない場合を考える。Fig.7 に、シミュレーションで算出したモジュール 24 枚中 16 枚を遮光した場合の I-V 特性を示す。1 回目の測定では、グループ B と C を遮光して I-V 特性を測定する。この測定では Fig.7 に示す実線 G のように段差のある I-V 特性となる。この結果から、グループ B と C に含まれている BPD は全て正常であると判定できる。遮光シートを交換して 2 回目の測定を行う。2 回目の測定では、グループ A と C を遮光して I-V 特性を測定する。このとき、非遮光モジュールが 8 枚となるように、点検済みのグループ C も遮光する。この測定でも Fig.7 に示す実線 G のように段差のある I-V 特性となる。この結果から、グループ A に含まれている BPD も全て正常であると判定できる。すなわち、この String では全ての BPD が正常であると判定できる。

開放故障した BPD が存在しない場合、シートの交換作業を含め、接続箱から I-V 特性を 2 回測定するだけで、全ての BPD の健全性を確認できるため効率よく点検できる。

3.3.2 開放故障した BPD が集中している場合 本項では、開放故障した BPD が 1 個、または 1 つのグループ（例えば、グループ A）に複数個集中して存在している場合を考える。Fig.4 の String の内、モジュール 02 の下段クラスタの BPD が開放故障したことを想定する。1 回目の測定では、グループ B と C を遮光して I-V 特性を測定する。この測定では Fig.7 に示す実線 G のように段差のある I-V 特性となる。この結果から、グループ B と C に含まれている BPD は全て正常であると判定できる。2 回目の測定では、グループ A と C を遮光して I-V 特性を測定する。この測定では Fig.7 に示す破線 H

のように段差のない I-V 特性となる。この結果から、グループ A に含まれている BPD の中に開放故障している BPD が少なくとも 1 個以上含まれていると判定できる。ただし、遮光するグループの順番によっては、I-V 特性の測定を 2 回行なっても開放故障した BPD がグループ A のみに含まれていると特定できない場合もある。例えば、1 回目の測定でグループ A と B を遮光し (I-V 特性は Fig.7 の破線 H)、2 回目の測定でグループ A と C を遮光した (I-V 特性は Fig.7 の破線 H) 場合は、どのグループにも開放故障した BPD が含まれている可能性がある。3 回目の測定でグループ B と C を遮光して I-V 特性を測定すれば (I-V 特性は Fig.7 の実線 G)、グループ A に含まれている BPD の中に開放故障した BPD が少なくとも 1 個以上含まれていると判定できる。3 つのグループから 2 つのグループを遮光する組み合わせは、3 パターン ($C_2^3=3$) である。つまり、シートの交換作業を含め、接続箱から I-V 特性を最大 3 回測定するだけで、開放故障した BPD を含んでいるグループを特定できる。

次に、開放故障した BPD を含んでいることが判明したグループ A の中から、BPD が開放故障しているモジュールを特定する必要がある。現時点でグループ B と C は、開放故障した BPD を含んでいないことが判明しているため、遮光して I-V 特性を測定すると段差のある I-V 特性となる。そのため、グループ B と C を遮光した状態を基準として、グループ A の中にある BPD が開放故障しているモジュールを特定する。1 回目の測定では、グループ B と C の中のモジュール 1 枚 (例えば、モジュール 09) と、グループ A のモジュール 1 枚 (例えば、モジュール 01) のシートを交換して (遮光するモジュールを 1 枚交換して) I-V 特性を測定する。これによって、非遮光モジュールの枚数を 8 枚に保つことができる。この測定では Fig.7 に示す実線 G のように段差のある I-V 特性となる。この結果から、モジュール 01 の BPD は正常であると判定できる。2 回目の測定では、遮光するモジュールをモジュール 01 から 02 へ交換して I-V 特性を測定する。この測定では Fig.7 に示す破線 H のように段差のない I-V 特性となる。この結果から、モジュール 02 の BPD が開放故障していると判定できる。開放故障した BPD が同一グループに複数個存在する可能性があるので、3 回目以降の測定も遮光するモジュールを 1 枚ずつ交換しながら I-V 特性を測定し、グループ A のモジュールを全て点検する。このように、グループ B と C を遮光した状態を基準とし、グループ A のモジュールを 1 枚ずつ交換しながら遮光することで、開放故障した BPD がグループ A に複数個含まれていても I-V 特性の段差の有無だけで特定できる。

開放故障した BPD が 1 つのグループに集中している場合、シートの交換作業を含め、接続箱から I-V 特性を最大 3 回測定するだけで、開放故障した BPD を含んでいるグループを特定できる。その後、故障グループ以外を遮光した状態を基準とし、故障グループのモジュールを 1 枚ずつ交換しながら遮光することで、開放故障した BPD が 1 つのグループに複数個

含まれていても特定できる。この場合、シートの交換作業を含め、I-V 特性を 8 回測定することで故障グループ内の全てのモジュールを確認できる。

3.3.3 開放故障した BPD が分散している場合 本項では、開放故障した BPD がグループ A と B に分散して存在している場合を考える。Fig.4 のストリングの内、モジュール 02 と 10 の下段クラスタの BPD が開放故障したことを想定する。1 回目の測定作業では、グループ B と C を遮光して I-V 特性を測定する。この測定では Fig.7 に示す破線 H のように段差のない I-V 特性となる。この結果から、グループ B と C に含まれている BPD の中に開放故障した BPD が少なくとも 1 個以上含まれていると判定できる。2 回目の測定作業では、グループ A と C を遮光して I-V 特性を測定する。この測定でも Fig.7 に示す破線 H のように段差のない I-V 特性となる。この結果から、グループ A と C に含まれている BPD の中に開放故障した BPD が少なくとも 1 個以上含まれていると判定できる。3 回目の測定作業では、グループ A と B を遮光して I-V 特性を測定する。この測定でも Fig.7 に示す破線 H のように段差のない I-V 特性となる。この結果から、複数のグループにまたがって開放故障した BPD が含まれていると判定できる。このように、開放故障した BPD がグループ A と B に分散している場合、モジュール 8 枚を 1 つのグループとして考えると、開放故障した BPD を含んでいるグループを特定することができない。

本方法では、開放故障した BPD が非遮光モジュールのみに存在する状態をつくり、段差のある I-V 特性が現れるモジュールの組み合わせを見つけることが重要になる。開放故障した BPD がグループ A と B に分散して存在している場合は、モジュール 8 枚を 1 つのグループとして考えると、この条件を満たす遮光の組み合わせは存在しないため、開放故障した BPD を特定することができない。開放故障した BPD が非遮光モジュールのみに存在する状態をつくるには、次にモジュール 4 枚を 1 つのグループとして考え (1 ストリングがモジュール 24 枚の場合は 6 グループに分ける)、段差が現れる 2 グループ (モジュール 8 枚分) の組み合わせを探す必要がある。条件を満たすグループの組み合わせが判明したら、前項の方法で開放故障した BPD が存在するモジュールを特定す

Table 1 Number of measurement tasks.

表 1 故障グループを特定するまでの測定作業

故障グループ [個]	測定作業 [回]		
	12 modules	24 modules	48 modules
0	2 (8)	2 (8)	2 (8)
1	2 (8)	3 (8)	6 (8)
2	4 (4)	15 (4)	66 (4)
3	16 (2)	495 (2)	10,626 (2)
4	16 (2)	495 (2)	10,626 (2)
5	496 (1)	735,471 (1)	377,348,994 (1)

ればよい。

住宅用PVアレイと公共・産業用PVアレイの両者を考慮するため、1ストリングのモジュールの枚数を12枚、24枚、48枚とした場合を考える。Table 1に、開放故障したBPDが存在するグループの数と、そのグループを特定するまでの最大測定作業回数を示す。同表では、開放故障したBPDを特定する際に、1つのグループとするモジュールの枚数を括弧書きで示す。ただし、非遮光モジュールの枚数は8枚一定なので、1グループがモジュール4枚の場合は、I-V特性の段差が現れる2グループを探すことになる。開放故障したBPDが存在するグループの数が増えれば、そのグループを特定するまでの測定作業も増える。また、1ストリングのモジュールの枚数が増えれば、故障グループを特定するまでの測定作業も増える。

BPDの性能を評価する研究で、BPDを常時動作させたところ、BPDが開放故障するまでの期間は約5年という報告例がある⁹⁾。この結果から、BPDの開放故障は頻繁に発生するものではないと推測できる。したがって、PVアレイを設置した際にBPDの開放故障を点検し、その後も定期的に点検を行えば、多数のBPDが同時に開放故障する可能性は低いと考えられる。

開放故障したBPDが0個、1個、または1つのグループに複数個集中して存在している場合であれば、1ストリングのモジュール枚数に関わらず現実的な測定作業回数で点検できる。また、開放故障したモジュールが複数のグループに分散して存在している場合でも、Table 1は最大測定作業回数を示すものであり、反復測定中に段差のあるI-V特性が得られさえすれば、開放故障したBPDは非遮光モジュールに集中していることが分かるので、その時点で測定を終了し、開放故障したBPDが存在するモジュールの特定に移ればよい。したがって、本方法は充分に実用性があると考えている。

3.4 判定手順の一般化

前節では、モジュール1枚が2クラスタ、1ストリングがモジュール24枚の場合を例にとり、開放故障したBPDの存在の有無を判定する方法、ならびに開放故障したBPDが存在するモジュールを特定する方法について検討した。本論文で提案する方法は、汎用性が高い方法である。本節では、前節の方法を一般化する。

Fig 8に、判定手順を示したフローチャートを示す。このフローチャートでは、主な手順が四つに分割されている。この四分割された手順に従って説明する。

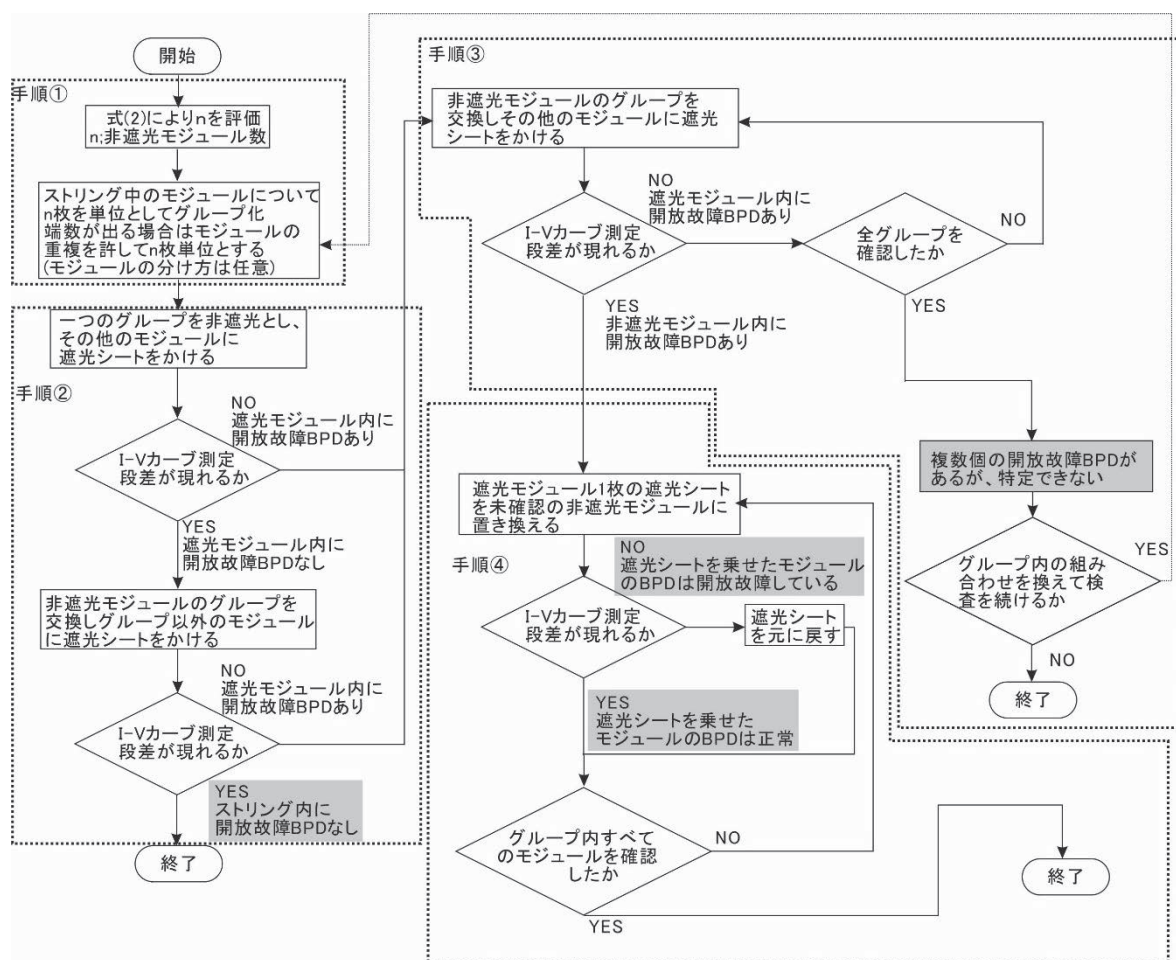


Fig.8 Flow chart indicating the detection procedure of open failure BPDs.

図8 開放故障BPDの検出手順を示したフローチャート

<手順 ①>

式(2)に従って、非遮光モジュールの枚数 n を決め、この枚数に応じてストリング中のモジュールをグループ分けする。モジュール数が n 枚に満たないグループができた場合は、モジュールの重複を許して各グループ n 枚に揃える。モジュールの分け方は任意でよい。

<手順 ②>

1 つのグループを非遮光、その他のグループを遮光した状態で I-V 特性を測定し、I-V 特性に現れる段差を確認する。I-V 特性に段差が現れれば、遮光モジュールの中に開放故障した BPD は存在しないことになる。一方、I-V 特性に段差が現れなければ、遮光モジュールの中に開放故障した BPD が存在することになる。I-V 特性に段差が現れた場合、非遮光グループを入れ換えて、同様の測定を行なう。このとき、I-V 特性に段差が現れれば、ストリング中の全てのモジュールに開放故障した BPD は存在していないことになる。

<手順 ③>

手順 ②で、ストリング内に開放故障した BPD が存在していることが明らかになった場合は、I-V 特性に段差が現れるグループを特定する。I-V 特性に段差が現れるグループでは、開放故障した BPD が非遮光モジュールのみに存在している。段差が現れるグループが特定できたときは手順 ④に移る。全てのグループについて I-V 特性の段差が現れない場合は、開放故障した BPD が複数のグループに分散しており、開放故障した BPD の場所は特定できない。この場合は、最初に行なったグループ分けをやり直すことで、I-V 特性に段差が現れることがある。

<手順 ④>

最後に、開放故障した BPD が存在するモジュールを特定する。手順 ③で特定された段差が現れる遮光状態を基準とし、遮光モジュールのシート 1 枚を非遮光モジュールに置き換える。この状態で I-V 特性を測定し、I-V 特性に段差が現れれば、新しくシートを乗せたモジュールの BPD は開放故障していないことになる。一方、段差が現れなければ、新しくシートを乗せたモジュールの BPD は開放故障していることが分かる。この場合は、シートを元に戻して未確認モジュールについて同じ作業を繰り返す。このように全ての非遮光モジュールを 1 枚ずつ確認すれば、このグループ内に存在する開放故障した BPD を全て特定することができる。

4. 実測による開放故障判定

前章では、ストリング単位で開放故障した BPD を特定する方法についてシミュレーションで検討した。その結果、Table 1 に示すように故障グループが 0 または 1 グループであれば、モジュールの枚数に関わらず現実的な測定作業回数で点検できることを示した。シミュレーションでは、実際に名城大学に設置している多結晶シリコン太陽電池モジュールで構成された PV アレイを模擬しているため、実測でも開放故障した

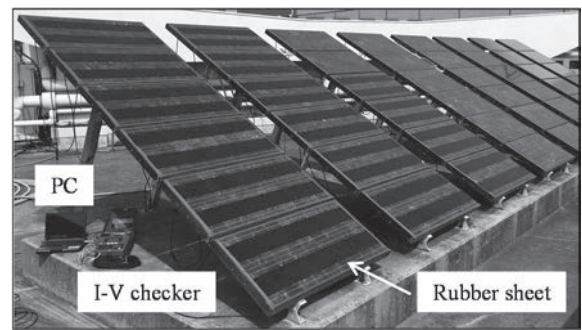


Fig.9 State of actual measurement.

図 9 実測の様子

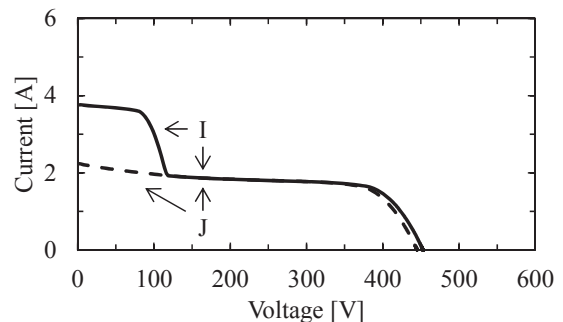


Fig.10 I-V curve of 16 shaded modules (Actual measurement).

図 10 モジュール 16 枚を遮光した I-V 特性

BPD を特定できるはずである。本章では、1 ストリングをモジュール 24 枚として考え、実際に名城大学に設置している PV アレイを用いて、日射強度が約 $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ 、太陽電池裏面温度が約 30°C の条件で、前章と同様の検討を実測で確認する。

Fig.9 に、実測の様子を示す。同図において、左から 4 列 (24 モジュール) で 1 ストリングを構成している。同図は、非遮光モジュール 8 枚の場合を示しており、ストリング内の 16 枚のモジュールにゴムシートを置き遮光している。このときの I-V 特性を I-V チェッカー (英弘精機製: MP-170) で測定する。

Fig.10 に、実測したモジュール 24 枚中 16 枚を遮光した場合の I-V 特性を示す。全ての BPD が正常な場合を実線 I、遮光部の BPD が 1 個開放故障した場合を破線 J とする。Fig.7 と Fig.10 を比較すると、両図とも全ての BPD が正常な場合は段差のある I-V 特性、遮光部の BPD が 1 個開放故障した場合は段差のない I-V 特性となったことから、シミュレーションと実測で同様の結果が得られたと言える。すなわち、前章で説明した手順を踏むことで開放故障した BPD を特定できることが明らかである。

5. まとめ

本論文では、接続箱から I-V 特性を測定する際にモジュールの遮光方法を工夫することで、昼間でも PV アレイの配線を変更することなく、ストリング単位で開放故障した BPD を

確実に特定する方法について検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) スtring中の一部のモジュールを遮光し、I-V 特性を測定すると I-V 特性に段差が現れる。本論文で提案した式(2)に従って非遮光モジュールの枚数を決定すれば、遮光したモジュール中に開放故障した BPD が存在する場合、この段差は現れない。この段差の有無によって、String中の BPD の開放故障を検査することができる。
- (2) String中に開放故障した BPD が存在しない場合、遮光シートの交換作業を含め、接続箱から I-V 特性を 2 回測定するだけで全ての BPD の健全性を検査できる。
- (3) Stringを構成するモジュールを式(2)で得られた枚数ごとにグループ分けした場合、開放故障した BPD が 1 グループに集中して存在していれば、I-V 特性の段差の有無により開放故障した BPD の存在するモジュールを確実に特定することができる。

参考文献

- (1) 黒川浩助, 若松清司, 太陽光発電システム設計ガイドブック, 1-6 (1995), オーム社, 東京.
- (2) 加藤和彦, 太陽光発電システムの不具合事例ファイル - PVResQ! からの現地調査報告 -, 35-141 (2010), 日刊工業新聞社, 東京.
- (3) 太陽光発電システム監視・点検技術に関する調査検討会, 太陽光発電システムの定期点検及び不具合調査に関するガイドラインについての報告書, 日本太陽エネルギー学会, 2 (2016).
- (4) 池田一昭, 太陽光発電システムの安全性に関する課題と取り組み - 3 太陽光発電システムの直流電気事故対策 - I (バイパス回路の点検), 電気学会誌, 134 (10), 683-687 (2014).
- (5) 佐藤孝俊, 羽田健太郎, 山中三四郎, 太陽光発電システムの診断法に関する研究 - I-V 特性によるバイパスダイオードの故障判定法 (その 6) -, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 (2016), 134, 福岡.
- (6) 佐藤孝俊, 羽田健太郎, 山中三四郎, 太陽光発電システムの診断法に関する研究 - I-V 特性によるバイパスダイオードの故障判定法 (その 7) -, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集 (2016), J2-2, 愛知.
- (7) J.W.Bishop, "Computer Simulation of the Effects of Electrical Mismatches in Photovoltaic Cell Interconnection Circuits", Solar Cells, 25, 73-89 (1988).
- (8) 松井隆晃, 山中三四郎, 大野英之, PV モジュールに発生するホットスポットの経時変化 (その 2), 太陽/風力エネルギー講演論文集 (2013), 319-322, 沖縄.
- (9) 加藤和彦, 産総研メガ・ソーラタウンにおける太陽電池モジュールバイパス回路の耐久性に関する事例, AIST 太陽光発電研究成果報告会 (2015), 51.