

電圧計測による不具合モジュール 診断方法の検討

Study of voltage measurement on photovoltaic modules for fault detection

関口大介^{*1}
Daisuke SEKIGUCHI

岡島敬一^{*2}
Keiichi OKAJIMA

大関 崇^{*3}
Takashi OOZEKI

Abstract

PV systems have been installed in the world; however, some failures on PV systems and modules are reported recently. On the other hand, current fault detection methods on site measurement are not enough to identify failure modes and quantify degradation ratio of each module. Therefore, we have proposed the fault detection method for PV modules by measuring the operating voltage on site due to quantify the degradation ratio of PV modules. Operating voltages of failure PV modules in the string should be different because the operation point of PV modules are determined by the superposition technique of I-V curve calculation. In this study, the differential characteristics at module operating voltages were evaluated using simulation data. As the results, the operation voltage between normal state and failure PV module were intended to be different value clearly under the certain PV string voltages condition.

キーワード： 太陽光発電システム, PV モジュール, 動作電圧, 不具合診断

Key Words : PV system, PV module, operating voltage, failure detection technique

1. はじめに

太陽光発電(PV)システムは発電を行う際に機械的な動作を必要とせず、保守をほとんど必要としないとされておりメンテナンスフリーであると言われてきた。しかし、近年PV システムの普及に伴い運用時の不具合事例の報告が散見され始めており、不具合による出力低下により生涯発電電力量の低下を引き起こしている¹⁾。不具合による出力低下は発電電力量の減少や売電収入の減少につながるだけでなく、火災などの事故²⁾を引き起こす可能性もあることから、不具合を早期発見するための点検技術の必要性が高まっている。

PV システムの不具合事例については、利用者によるアンケート調査などが新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)で行われている³⁾。不具合事例の発生箇所でも多いものはパワーコンディショナであり、次点でモジュールに生じる不具合が挙げられている。パワーコンディショナに生じる不具合は、エラー表示などによる確認が可能であるため比較的検知が容易であるが、モジュールにはそのような機能が備わっていない。さらに、発電電力量が環

境要因に左右されるため、オンサイトにおいて、不具合を起こしているモジュールの検知（これを診断と呼ぶことにする）は容易ではない。従って、簡易な手法で診断技術を確立できれば、不具合モジュールの早期発見に役立つと考える。これまでの屋外設置後におけるオンサイトのモジュールの診断方法としては、赤外線カメラによる熱分布計測法やI-V カーブ計測法などが考案されている^{4,5,6)}。赤外線カメラ手法はモジュールの温度を赤外線により計測する方法であり、温度差から出力低下や抵抗の増加、断線の影響などが生じている箇所を推測することが可能である。しかし、電気的なシグナルを直接読み取ることは困難であり、温度から出力低下を推定する定量化手法は確立されていない。I-V カーブ測定は直接的に出力の取得が可能な検査方法であるが、オンサイトにおいてモジュール単位で測定することは困難であり、ストリング単位では個別のモジュールの出力低下まで推測することは容易ではない。このような背景から本研究では、オンサイトにおける検査手法のひとつとして、個々のモジュールの出力低下を直接的に定量化可能な手法の確立を目的としている。PV メーカーが掲げる保証値は、「モジュール最大出力の下限値の90%」（公称値 P_m の81%）としている場合が多いことから^{7,8)}、本研究ではモジュール最大出力80%程度の検出を目標としている。

発電特性を示す物理量として、出力（電力）、電流、電圧がある。電流についてストリングは基本的に直列接続のため、各モジュール単位で考えれば一定の値である。故に

*1 筑波大学システム情報工学研究科大学院生
(〒305-8573 つくば天王台 1-1-1)
e-mail:s1220600@u.tsukuba.ac.jp

*2 筑波大学システム情報系准教授

*3 (独)産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター主任
研究員

(原稿受付：2013年7月31日)

本研究では、同一ストリング内における各モジュールの出力差異の検出に対し電圧計測に着目した。各モジュールの電圧の計測により各モジュールの出力差を定量的に把握できる可能性がある。また、同一ストリング内におけるモジュールの電圧差はストリング I-V カーブ上の動作電圧に依存するため、ストリング動作電圧をスイープもしくは特定電圧に固定など行うことで、電圧差という特性値は単一の値でなく、ストリング電圧値という情報量との関係性を持たすことができ簡易的な不具合診断手法としての有効性が期待できる。

2. シミュレーション条件と対象システム

オンラインの検査手法を想定しているため、一定の制約条件を考える必要がある。ここでは、個別のモジュールの I-V カーブの測定は困難(切り離しが困難)であるが、モジュールごとの電圧は計測可能であることを想定する。本稿では、提案する手法の基礎検討としてストリング内に様々な不具合モジュールがあるケースを想定し、シミュレーションによりストリング全体の電圧と個々のモジュールの電圧の挙動を算出することで、不具合モジュールの検出が可能であるかの検討を行った。シミュレーションの条件として標準試験状態を想定している。対象として、モジュールの経年劣化によるばらつきを反映させるため、(独)産業技術総合研究所つくばセンターで稼働しているモジュールの I-V 特性を実測したデータを使用した。対象とするモジュール公称値は、最大出力 (P_m) 150 W, 開放電圧 (V_{oc}) 25.4 V, 最適動作電圧 (V_{pm}) 20.5 V である。尚、I-V 特性の測定はソーラーシミュレータ (Spire, SPI-SUN SIMULATOR™ 1116N, SPI-SS) を用いており、模擬 AM1.5 太陽光にてモジュールの試験を行なった。不具合モジュールは、測定された I-V 特性を式(1)で示すモジュール等価回路方程式に当てはめ^{9,10)}、各パラメータの算出を行った。また、これらパラメータを変動させることで、不具合モジュールの I-V カーブを数値的に求め、シミュレーションに使用した。

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{m \cdot n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right\} - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1)$$

ここで、各パラメータは以下を示す。 I_{ph} : 光起電流 [A], I_0 : ダイオード逆飽和電流 [A], R_s : 直列抵抗 [Ω], R_{sh} : ショット抵抗 [Ω], n : ダイオード因子, m : セル直列枚数, k : ボルツマン定数 [J/K], q : 電気素量 [C], T : モジュール温度 [K]

また、バイパスダイオードは各モジュールに 3 つ並列に接続されていると考え、式(2)のダイオード方程式を用いて式(1)に加えた⁹⁾。

$$I_{BD} = I_{0BD} \left\{ \exp \left(\frac{qV_i}{n_{BD} \cdot k \cdot T_{BD}} \right) - 1 \right\} \quad (2)$$

ここで、各パラメータは以下を示す。 I_{BD} : バイパスダイオードを流れる電流 [A], I_{0BD} : 逆飽和電流[A](1.6×10^{-9} A), n_{BD} : ダイオード因子(1.0), T_{BD} : 温度[K] (308.15 K)

3. 動作電圧シミュレーション

不具合診断の際にどの動作点を観測するのが有効か検討するため、同一ストリング内の各モジュールの動作電圧についてシミュレーションにより調べた。ストリングはモジュールを直列に接続しているため、ストリング電流は各モジュールに流れる電流と等しく、ストリング電圧は各モジュールにかかる電圧の合計値となる。異なる 9 枚のモジュールから得られた I-V カーブのデータを用いて、同一電流でのモジュール電圧をキルヒホッフの法則より足し合わせることでストリングの I-V カーブを求めた。ストリング I-V カーブの電圧に対応する電流を求めることで、同一電流に対応する各々のモジュール I-V 特性上の動作電圧を算出した。

3.1 正常時のシミュレーション

P_m が公称値の 90% 以上のものを正常モジュールとみなし、正常モジュールのみで構成されるストリング上のモジュール動作電圧の挙動を算出した。Fig. 1 に使用したモジュールの I-V カーブを示す。これらのモジュールは全て実測された I-V カーブにバイパスダイオードの挙動を加えたものである。ここで、モジュールにはそれぞれ a-i の番号を付けている。それぞれのモジュール I-V カーブに不自然な歪みなどは見られず、 P_m も公称値に近い値が出ていることから、これらのモジュールに不具合は生じていないと考えられる。

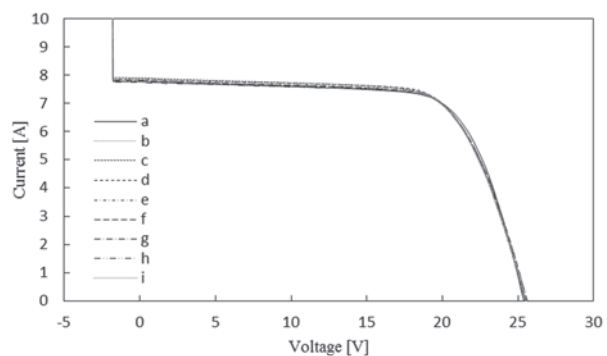


Fig. 1 I-V curve of normal modules

Fig. 2 に、シミュレーションにより算出した各モジュールの動作電圧の挙動を示す。ストリングの V_{oc} から V_{pm} においてモジュールごとの電圧差はほとんど見られず、 V_{pm} における各モジュールの標準偏差は 0.1 V である。一方、 V_{pm} 以下では電圧差は大きくなり、仮に V_{pm} の 80% まで低下させた場合の標準偏差は 1.4 V まで増加している。このように、Fig. 1 においてモジュール I-V カーブに大きな差異は見られなかったが、動作電圧ではストリング電圧が低い場合に大きな電圧差が確認できる。これは、各モジュールの持つばらつきが反映されたものであると考えられる。

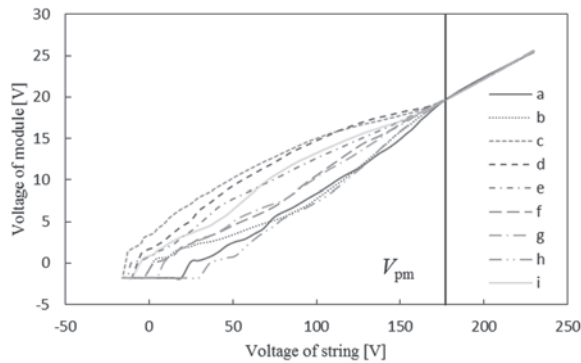
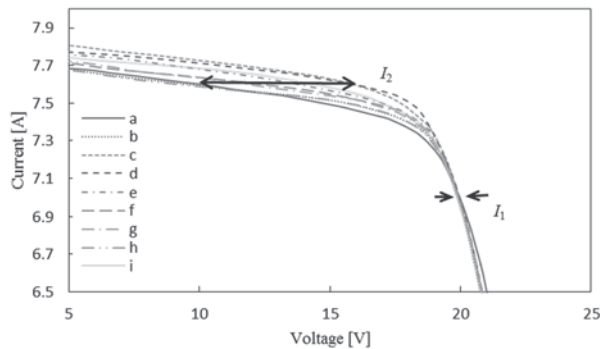


Fig. 2 Operating voltage of normal modules

スtringの動作電流に対して各モジュールが分担する電圧を理解するため、Fig. 3 に各モジュール V_{pm} 付近の I-V カーブを拡大したものを示す。モジュールは直列に接続されていることから、String電流と各モジュールを流れる電流は等しい。図には、Stringの動作電流が低い場合 (I_1) と、高い場合 (I_2) について、各モジュールが分担する電圧に幅があることを示している。つまり、動作電流が高いほどばらつきに応じて電圧差が生じやすくなる傾向にある。String動作電流が高い領域は動作電圧が低い領域であるため、動作電圧が低くなるほどばらつきの影響が強くなり、正常モジュール同士であっても電圧差が生じやすくなることがわかる。


 Fig. 3 Enlarged module I-V curves near P_m

3.2 不具合モードのシミュレーション

3.2.1 不具合モード設定

不具合によって I-V カーブの変化が異なることから、それらを数値的に扱うために、本稿では V_{oc} モード、 I_{sc} モード、 R_s モード、 R_{sh} モードの4つの不具合モードを想定した。これらのモードは、モジュールの I-V カーブから式(1)を用いて算出したパラメータより、それぞれ V_{oc} 、 I_{sc} 、 R_s 、 R_{sh} の値を変動させることによって一定の P_m になるように設定したものである。Fig. 4 に、各不具合モードにより P_m が公称値の 80%に低下したモジュールの I-V カーブを示す。

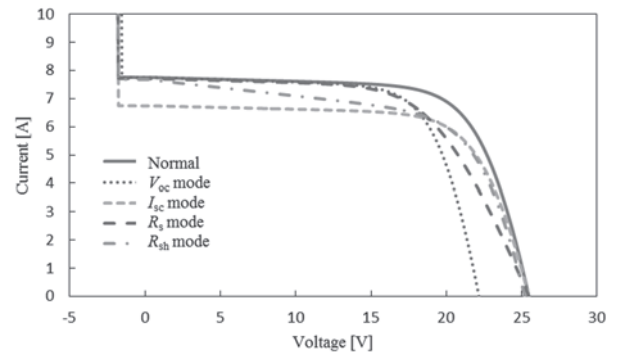


Fig. 4 I-V curve of failure modules

3.2.2 動作電圧シミュレーション結果

3.1 節と同様にモジュール 9 枚で構成されるStringを考え、不具合モジュールが 1 枚存在する場合を想定し、各モジュール動作電圧の挙動を算出した。ここで、不具合モジュールはモジュール a を対象とし、4 つの不具合モードにより P_m が 80%に低下した場合を模擬している。Fig. 5 にそれぞれの場合のString I-V カーブを示す。尚、図ではStringの差異を理解しやすいよう、高電圧側を拡大している。不具合モジュールのモードごとにString V_{pm} も異なり、比較的低い V_{oc} モード、 R_s モードでは 177.3 V、177.8 V となり、比較的高い I_{sc} モード、 R_{sh} モードでは 185.0 V、181.3 V となった。Fig. 6 に、それぞれのStringにおける各モジュール動作電圧の挙動を示す。これより、すべての不具合モードで正常時とは異なり、不具合モードごとに異なる挙動となることが確認できる。正常モジュールではString動作電圧が V_{pm} から V_{oc} にかけてモジュール間の電圧差が小さくなったが、逆に不具合モジュールでは顕著に電圧差が発生している。これより、String動作電圧が V_{pm} から V_{oc} にある場合に、一定の電圧値の乖離が現れているモジュールは何らかの不具合を有している可能性がある。従って、本提案手法により不具合診断を行う際は、String動作電圧 V_{pm} から V_{oc} の範囲において電圧差を測定することが望ましい。

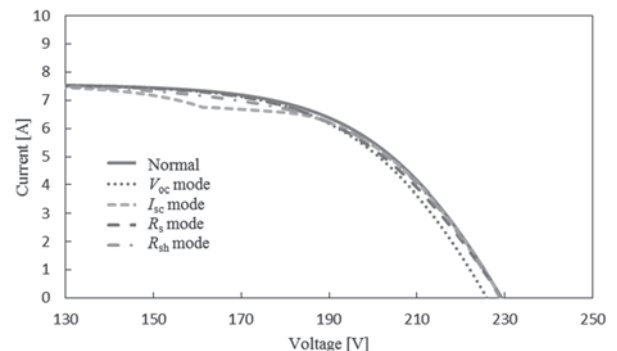


Fig. 5 I-V curve of string

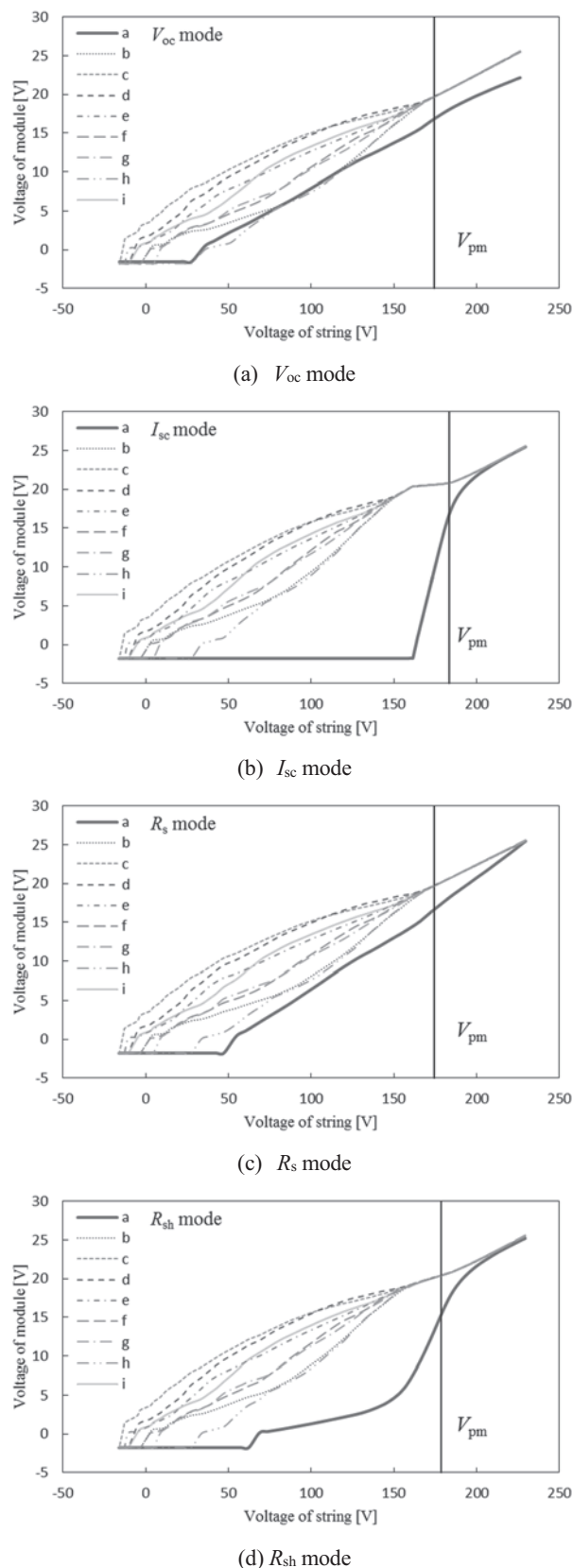


Fig. 6 Operating voltage of failure modules

3.3 シミュレーションの妥当性の確認

一定のシミュレーションの妥当性を確認するため、実際に屋外で稼働中である PV システムを利用してモジュール

動作電圧の実測を行った。

(独) 産業技術総合研究所つくばセンター、OSL 棟屋上に設置された PV システムを利用し、そのうち多結晶モジュール 9 枚で構成されている 1 つのストリングを対象として計測を行った。モジュール公称値は、 $P_m = 150 \text{ W}$, $V_{oc} = 25.4 \text{ V}$, $V_{pm} = 20.5 \text{ V}$ であり、シミュレーションで用いたモジュールと同種類のものである。モジュールの電圧測定は、各モジュール間に分岐ケーブルを挿入し、データロガー (KEYENCE, GR-3000) を利用して電圧の測定を行った。また、クランプメータを用いてストリングの電流計測も同時に行なっている。通常運転時の場合、ストリングの動作点はパワーコンディショナにより MPPT 制御されている。従って、MPPT 制御の ON, OFF の切り替えを行うことでストリングの動作点は V_{oc} から V_{pm} を変動することとなり、その間に各モジュールの動作電圧の測定を行った。すなわち、本実験で測定した動作電圧の範囲は、前節で不具合診断に効果的であると示したストリングの V_{pm} 付近から V_{oc} の間である。この際、影のかかった 1 枚のモジュール (モジュール A) を I_{sc} の低下の生じた I_{sc} モードの不具合として扱い、測定を行った。測定した各モジュールの動作電圧を Fig. 7 に示す。モジュール A において、動作電圧 0V でのストリング電流はモジュール I_{sc} 公称値の 5% 程度であった。測定した電圧値を用いて算出した P_m においても、5% まで低下している。そこで P_m が 5% まで低下した場合をシミュレーションし、その結果を Fig. 7 に破線で示す。その結果、実線で示した実測値と破線で示したシミュレーション値はよく一致した。 V_{oc} や電圧がマイナスになった際に実測値とシミュレーションで値が異なっているが、シミュレーションでは標準試験状態を想定していたため、温度に差異が生じたことが主な原因として考えられる。実験を行った範囲内ではあるが、実測値との比較により一定のシミュレーションの妥当性を確認した。

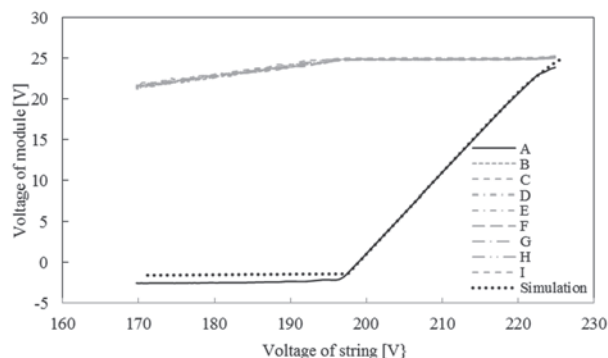


Fig. 7 Measurement module voltages

4. 微分値を用いた検出手法の検討

モジュール動作電圧の電圧差から一定の不具合検出の可能性を示した。しかし、電圧の値は不具合の種類や出力の低下状況に応じて変動するため、ストリングの電圧固定時では不具合モードの

種類やモジュール出力を定量的に判別することは困難である。そこで、より感度の良い検出方法として、ストリング動作電圧の変位量に対する、モジュール動作電圧の変位（微分値）について検討を行った。

4.1 不具合モジュールの微分特性

3節と同様のモジュールI-V特性のデータを用いて、正常モジュール8枚と不具合モジュール1枚（ P_m を公称値の80%）で構成されるストリングを想定し、不具合モジュールの微分値を算出した。微分値を算出する際のストリング動作電圧の変位量は10Vとし、Fig.8にはストリング動作電圧ごとに、10V高くした場合における微分値の算出結果を示す。正常モジュールのI-V特性は8枚全て等しいものを使用した。

Fig.8より、不具合モードごとに異なる特徴が確認できる。特に、ストリング動作電圧が高い場合に特徴（上に凸、右肩上がり等）が顕著になっていることから、微分特性により不具合モードを判別できる可能性がある。

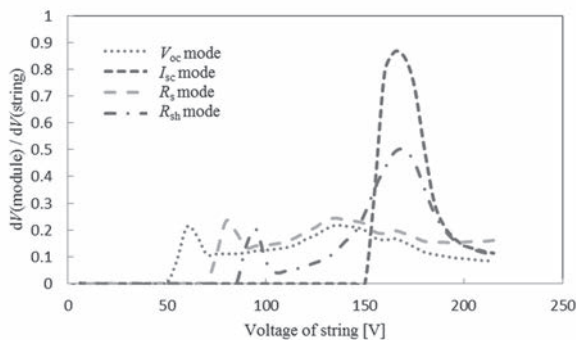


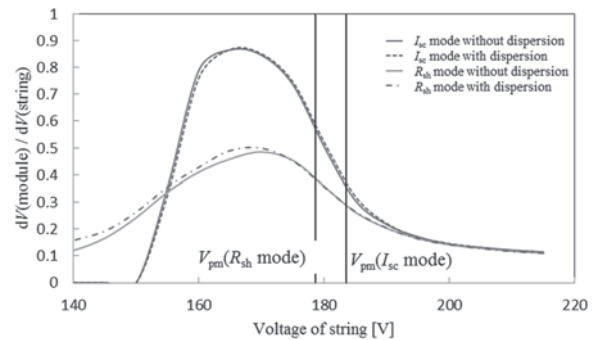
Fig.8 $dV(\text{module})/dV(\text{string})$ - V characteristic

次に、3節と同様に正常モジュールとしてモジュールbからモジュールiを選択し、モジュールごとのばらつきを持たせた場合の微分値の算出結果をFig.9に示す。

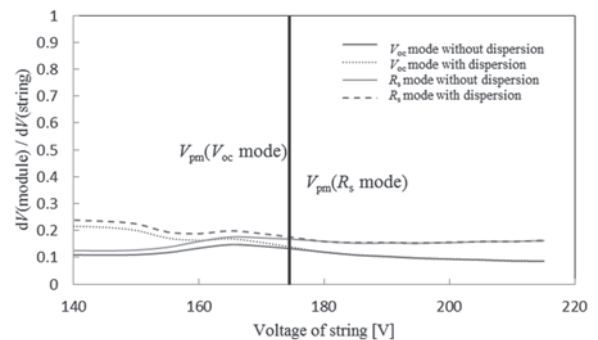
Fig.9(a)は I_{sc} モード、 R_{sh} モード（共に P_m を公称値の80%）の不具合モジュールを対象に、ストリング内の正常モジュールにばらつきを持たせた場合と、持たせない場合における微分値の算出結果である。それぞれのモードにおいて、ばらつきの有無によらずストリング V_{pm} 付近の微分値に大きな乖離は生じていない。Fig.9(b)は同様に V_{oc} モード、 R_s モードの微分値を算出した結果である。先ほどとは異なり、正常モジュールにばらつきがある場合とそうでない場合で、ストリング V_{pm} 以下において微分値に偏差が生じている。今回想定したモジュールの場合、ストリング動作電圧が V_{pm} より低い領域では、モジュールのばらつきによる微分値の偏差が大きくなることがわかる。

不具合モードごとにばらつきの影響が異なる原因として、最大出力動作点の違いが考えられる。 I_{sc} モード、 R_{sh} モードは、I-Vカーブ上で電圧の低い領域で歪みが発生するため、ストリングの I_{pm} は比較的低い値となる。一方、 R_s モード、 V_{oc} モードは、モジュールI-Vカーブ上で電圧の高い領域で歪みが発生する。そのためストリングの I_{pm} は比較的高い値となり、ばらつきによる影響を受け

やすい。従って、最適動作電流の高くなる R_s モード、 V_{oc} モードではばらつきの影響が強く出やすいと考えられるため、その影響を抑えるためにストリング V_{pm} 以下の微分値は利用しないほうが望ましいと考えられる。



(a) I_{sc} mode and R_{sh} mode



(b) V_{oc} mode and R_s mode

Fig.9 Differential value

4.2 2点の微分値による不具合モード判別法の検討

次に、微分値による不具合モード判別の検討を行った。ストリング V_{pm} を基準点と考え、 V_{pm} から10V増加した時の微分値を $d+$ とし、Fig.10(a)に各不具合モードの $d+$ を示す。この時、不具合は P_m の公称値を100%として5%ずつ70%まで低下したモジュールを想定した。ここで、 I_{sc} モードにおいて、 P_m が70%まで減少した場合はストリング V_{pm} の動作点でモジュールに逆バイアスが発生するため（バイパスダイオードに通電するため）、非常に小さい値となっている。想定した範囲内では、 R_s モードの $d+$ は最小でも0.15、 V_{oc} モードは最大でも0.14であることから、僅かの差ではあるものの $d+$ の範囲が異なっている。従って、微分値 $d+$ によりこれらのモード判別の可能性がある。しかし、 R_{sh} モード、 I_{sc} モードにおいては、 $d+$ のとりうる範囲が重なっており、ここからモードの判別は困難である。同様に、ストリング V_{pm} から10V減少させた場合の微分値を $d-$ とし、Fig.10(b)に各モジュールの微分値の値を示す。動作点を下げて微分値を算出しているため、 R_s モード、 V_{oc} モードの算出結果にばらつきによる影響が強く出てしまうものの、 $d-$ の指標では、 I_{sc} モード（ $P_m=90\%$ ）の場合を除いて I_{sc} モードと R_{sh} モードで $d-$ の範囲が異なる。これより、微分値 d によりこれらのモード判別の可能性がある。

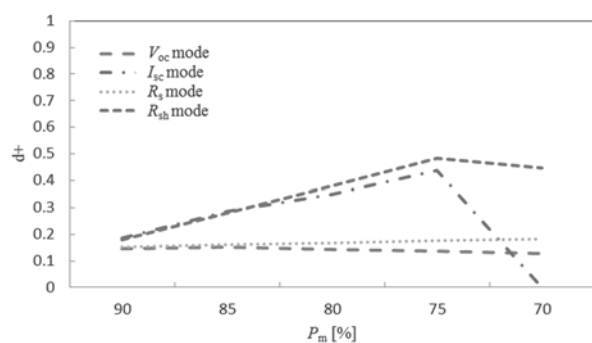
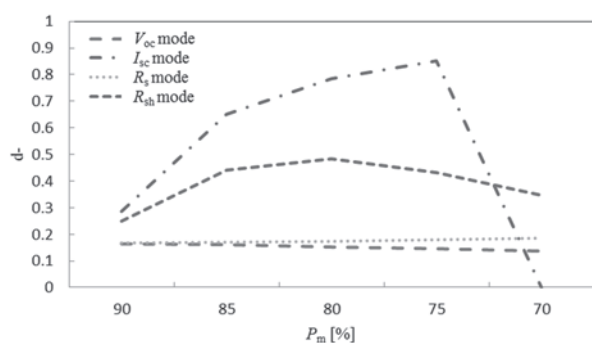

(a) Differential value from V_{pm} to $V_{pm} + 10$ V

(b) Differential value from V_{pm} to $V_{pm} - 10$ V

Fig. 10 Distinction of failure modes

以上の結果から、 d_+ 、 d_- の2点の微分値より4つの不具合モード半別を試みた。Fig. 11に、それぞれの不具合モード、出力ごとに d_+ 、 d_- をプロットした結果を示す。図から、不具合モードごとにプロットされる領域が異なり分布がわかる傾向が得られた。想定したケース内ではあるものの、一部を除き、ストリング V_{pm} を基準に前後10Vずつ動作点を変動させ微分値を2点取得することで、各不具合モードの半別が可能となると考えられる。

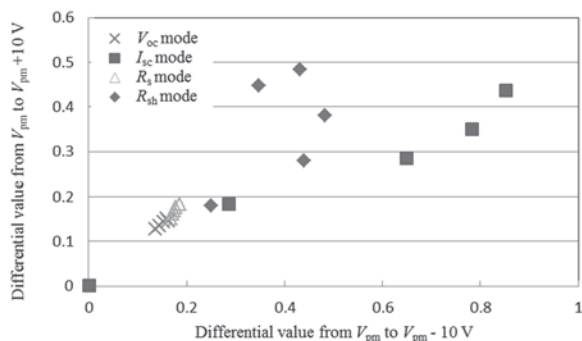


Fig. 11 Distinction of failure modes by two points

5. まとめ

本研究では、動作電圧計測による不具合モジュール検出方法を提案しその可能性を検討した。その結果、ストリン

グ動作電圧が V_{pm} から V_{oc} 付近においてモジュール動作電圧に乖離がある場合、不具合を有している可能性があることを示し、不具合モードごとに電圧差も異なることを明らかにした。また、ストリング動作電圧を変動させ、ストリング V_{pm} と ± 10 V間の2点の微分値を算出することで、不具合モードが推定できることを示した。同一の P_m を持つ不具合モジュールにおいても、不具合モードが異なれば動作電圧が異なる。従って不具合モジュールの出力推定へ展開できると考えられ、今後の課題である。また本研究では不具合モジュールはストリングに1枚のみを想定しており、複数枚の不具合モジュールが存在する場合の検討や、電圧の計測方法についても今後検討していく必要がある。

謝辞：本研究を遂行するに当たり御協力、御助言くださいました（独）産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センターシステムチーム池田一昭氏、加藤和彦氏に深く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1)加藤和彦, 「太陽光発電システムの不具合事例ファイル」, 日刊工業新聞社(2010)
- 2)消費者庁平成24年4月3日付けニュースリリース,
http://www.caa.go.jp/safety/pdf/120403kouhyou_1.pdf (2013年5月確認)
- 3)独立行政法人産業技術総合研究所,財団法人電気安全環境研究所,「太陽光発電システム評価技術の研究開発」,平成16年度～平成17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(2006)
- 4)D.L.King, J.A.Kratochvil, M.A.Quintana, “Applications for infrared imaging equipment in photovoltaic cell, module, and system testing”, 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp.1487-1490(2000)
- 5)加藤和彦, 吉富政宣, 吉富千代美, 北川孝太郎, 「PVResQ!における太陽電池モジュールの電気的不具合の調査方法とその実例」, 太陽エネルギー, Vol. 38, No. 3, pp. 7-13(2012)
- 6)篠田芳幸, 山中三四郎, 河村一, 大野英之, 河村英昭, 「PVアレイにおける(-dI/dV)-V特性による故障診断」, 太陽エネルギー, Vol.34, No.4, pp.49-55(2008)
- 7)Sharp 住宅用太陽光発電システム HP,
<http://www.sharp.co.jp/sunvista/select/15years/> (2013年5月確認)
- 8)三菱電機住宅用太陽光発電システム HP,
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/service/taiyo/jutaku/feature/support/> (2013年5月最終確認)
- 9)E.Karatepe, M.Boztepe, M.Colak, “Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells”, Solar Energy 81, pp. 977-992 (2007)
- 10)C.Carrero, D.Ramirez, J.Rondriguez, C.A. Platero, “Accurate and fast convergence method for parameter estimation of PV generators based on three main points of the I-V curve”, Renewable Energy 36, pp.2972-2977(2011)