

Study on Shape Change Detection Method of PV String I-V Characteristics

Tomonori YAMADA^{*1} Sanshiro YAMANAKA^{*2}
 Yasuhiro AOYAMA^{*3} Yuki NISHIDO^{*3} Hiroshi KOBAYASHI^{*3}

PV スtring I-V 特性の形状変化検出法に関する研究

山田 智徳¹ 山中 三四郎²
 青山 泰宏³ 西戸 雄輝³ 小林 浩³

Abstract

One method for the maintenance and inspection of photovoltaic power generation systems is to confirm the shape change of their I-V characteristics. In this study, we propose a method to represent the shape of the I-V characteristic by FF and determine the shape change based on the numerical value of FF. The determination condition of the shape change is derived based on the relationship between FF, irradiance, and module temperature, and the data outside this condition are eliminated. The determination condition is derived again from the remaining data, and the data outside this condition are eliminated. This is repeated until there are no data outside the determination condition. The eliminated data are considered to exhibit a shape change. By applying this method to mega photovoltaic systems, it is possible to determine the shape change of their I-V characteristics.

Keywords : PV System, Shape Change Detection Method, I-V Characteristic, Fill Factor(FF)

キーワード : PV システム, 形状変化検出法, I-V 特性, 曲線因子(FF)

1. はじめに

近年, 太陽光発電システム(以下, PVS)の普及が急速に進んだ一方で, モジュールの品質や施工の問題など様々な要因によってトラブルや不具合の事例が報告されるようになってきている^(1,2). PVSの安全性を確保する為には定期的な

保守点検を行い, 速やかに不具合の状況を把握する必要がある. そうした経緯を踏まえ, 複数の団体から, 適切な保守点検を促すことを目的として, 保守点検ガイドラインが提案されている^(3,4). ガイドラインには様々な保守点検項目や方法が示されており, そのうちのひとつに想定される正常な I-V 特性から形状変化を目視で確認して判定する診

^{*1} Graduate School of Science and Engineering, Meijo University,
 1-501 Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya 468-8502, Japan
 ‡ e-mail : 140442141@ccalumni.meijo-u.ac.jp

^{*2} Professor, Science and Engineering, Meijo University

^{*3} TOENEC CORPORATION

Received: 3rd February 2020, Accepted: 24th May 2020

^{*1} 名城大学大学院 理工学研究科 大学院生
 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

‡ e-mail : 140442141@ccalumni.meijo-u.ac.jp
 現在 株式会社トーエネック 勤務

^{*2} 名城大学理工学部 教授

^{*3} 株式会社トーエネック

(原稿受付 : 2020 年 2 月 3 日, 受理日 : 2020 年 5 月 24 日)

断方法がある。屋外で測定する I-V 特性はすでに JIS 規格に規定されており^(5,6), 不具合診断法の一つ⁽⁷⁻¹²⁾として一般的に広く推奨されている。この方法はメガソーラのようなストリング数の多い設備ではすべてのストリングを判定するのに時間がかかること、I-V 特性の形状変化が僅かである場合に誤判定の可能性があること等、改善の余地がある。

筆者らは I-V 特性の形状変化を数値によって判定することで効率的かつ正確な I-V 特性診断の普及を目指している。以前に筆者らの一部は、形状変化の適切な判定方法として、I-V 特性を曲線因子(FF)で数値化し、区間推定によって統計的に判定基準を設ける方法を提案した⁽¹³⁾。その結果、目視では判定の難しい僅かな形状変化を FF から判別可能であることが明らかとなった。しかしながら、この方法は統計的な判定基準を設けるために判定対象の PV アレイの正常時におけるデータ(FF , 日射強度, モジュール温度)を予め収集する必要がある。一般の PVS において判定の対象とする PV アレイの正常時のデータを予め用意することは難しく、運用を考えると実用的な診断方法とは言い難い。

本稿では、より実用的な診断手法とするために予め正常時のデータを収集する必要がない手法について提案する。また、実際に稼働している大規模なシステム(メガソーラ)に適用し、検討を行ったので、その結果を報告する。

2. I-V 特性を用いた判定

保守点検時の I-V 特性の形状変化の判定は計測した I-V 特性を目視で 1 つずつ判定する他なく、メガソーラのような大規模システムの場合、大量の I-V 特性についてその形状変化を判定するのに時間がかかる。また、I-V 特性の僅かな形状変化から異常を判別する必要があるので誤判定の可能性も高い。そこで本論文では、回帰式を用いて推定される FF 値と実測値の FF 値とを比較することで、形状が変化している I-V 特性を検出する方法を提案する。本論文における判定対象はそれぞれ異なるメガソーラ A (257 ストリング構成)、メガソーラ B (418 ストリング構成) の 2 サイトとする。

本論文で提案の手法はメガソーラの点検に利用されることを前提にしている。したがって、以下の条件を満たすものとする。①本論文の対象はメガソーラの保守点検作業に利用することを目的にしているため、ストリング単位で大量の I-V 特性を計測している。②本論文ではメガソーラの保守点検を想定しており、大量のモジュールが同時に不具合を起こすことはないと考えている。したがって、対象としたメガソーラの中で形状の変化した I-V 特性を示すストリングの数は少数である。③ストリングの I-V 特性はストリング内の一部のモジュールに不具合が発生していてもストリングの $I_{sc}(A)$ と $V_{oc}(V)$ は正常であることが多い。したがって、本論文では I-V 特性に形状変化の判定だけを取り扱う。 I_{sc} と V_{oc} の判定は別の機会に検討する。④日射強度が 0.3kW/m^2 以上ある⁽¹³⁾。

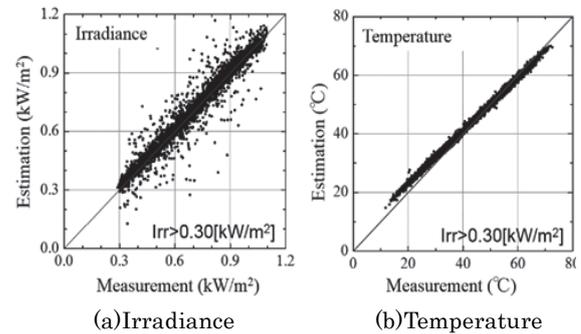


Fig.1 Estimation of irradiance and module temperature

図 1 日射強度とモジュール温度の推定

2.1 日射強度, モジュール温度の推定

本手法は必要となる測定対象(ストリング)の日射強度, モジュール温度をそれぞれ I-V 特性(短絡電流: $I_{sc}(A)$, 開放電圧: $V_{oc}(V)$)から推定して算出する⁽¹⁴⁾。これによって同時に日射強度とモジュール温度の計測の必要がなく、効率的かつ迅速なデータ収集が可能となる。

日射強度は I_{sc} に比例すると仮定し式(1)より推定する。

$$Irr = \frac{I_{sc}}{I_{scr}} \cdot Irr_0 \quad (\text{kW/m}^2) \quad (1)$$

Irr :推定日射強度(kW/m^2), Irr_0 :基準日射強度(1kW/m^2), I_{scr} :公称短絡電流(A), である。モジュール温度は JIS 8920 に基づき、式(2)より推定する。

$$Temp = \frac{A_1 + A_2 \times 273}{1 - A_2} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

ただし、

$$A_1 = 25 + \frac{V_{oc} - V_{ocr}}{\beta},$$

$$A_2 = \frac{\frac{n \times k}{q} \times n_s \times \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_{scr}}\right)}{\beta}$$

$Temp$:推定温度($^\circ\text{C}$), V_{ocr} :公称開放電圧(V), β :電圧の温度係数($V/^\circ\text{C}$), k :ボルツマン定数, q :素電荷(C), n :ダイオード特性因子, n_s :セルの直列数である。本論文では、ダイオード特性因子は理想ダイオードを仮定し $n=1$ とする。

評価対象のシステムはモジュールを 12 直列 4 並列に結線した 3kW の PV アレイを用いた。日射強度, モジュール温度, I-V 特性は 2009 年 1 年間の 11 時~13 時の時間帯に 5 分間隔で計測した。Fig. 1(a)に日射強度の推定結果, Fig. 1(b)にモジュール温度の推定結果を示す。ここで、横軸が実測値, 縦軸が推定値である。多少のばらつきは見られるものの、 $Irr > 0.30[\text{kW/m}^2]$ で日射の二乗平均平方根誤差($RMSE$)は $0.009[\text{kW/m}^2]$, 温度の $RMSE$ は $0.98[^\circ\text{C}]$ となっており、比較的高い推定精度が得られていることが分かる。

Table1 Coefficients at stage(c) in Fig. 2

表 1 図 2(c)における係数

	a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	c
(c)	-0.0119	-0.019	0.00462	-0.00006	0.679

2.2 判定条件

本手法は I-V 特性を FF によって数値化し、回帰式から推定した値と実測値を比較することで I-V 特性の形状変化を判定する手法である。I-V 特性に形状変化があると FF 値が低下するという特性を利用している^(11,12)。FF は I-V 特性の最大出力を開放電圧と短絡電流の積で除した値である。FF の算出式を (3) に示す。

$$FF = \frac{V_{pm} \cdot I_{pm}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \tag{3}$$

ここで、V_{oc} : 開放電圧(V), I_{sc} : 短絡電流(A), V_{pm} : 最大出力動作電圧(V), I_{pm} : 最大出力動作電流(A)である。

測定した全 I-V 特性データについて Irr, Temp を説明変数, FF を目的変数とする関数(FF_{est})を求める必要がある。一般に未知の関数に対してマクローリン展開可能であると仮定して多項式で近似することが多い。筆者らの一部は以前の論文⁽¹³⁾で Irr, Temp と FF の関係を 1 次と 2 次の重回帰式を使って精度を比較したところ 2 次の重回帰式の方が精度が良くなることを報告している。したがって、本論文では Irr, Temp と FF の関係を式(4)に示すように 2 次の項まで取り近似式とする。

$$FF_{est} = a_1 I_{rr} + a_2 I_{rr}^2 + b_1 T_{emp} + b_2 T_{emp}^2 + c \tag{4}$$

すなわち、Irr, Temp を説明変数, FF を目的変数とした重回帰式 FF_{est} を求めることになる。

式(3)の実測値から求めた FF と式(4)から推定した FF_{est} の関係から RMSE を求め、

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (FF_i - FF_{esti})^2} \tag{5}$$

式(6)を判定条件とする。

$$FF_{est} - 3 \cdot RMSE \leq FF \leq FF_{est} + 3 \cdot RMSE \tag{6}$$

ここで、式(6)の範囲から外れたデータを I-V 特性に形状変化があるとみなす。

回帰式 FF_{est} は形状変化が見られない正常な I-V 特性の FF から導く必要がある。現場で測定した I-V 特性には形状が変化し FF 値が低下しているデータが含まれているため正確な回帰式を算出できないという問題が起こる。そこで、形状変化を含んだ全データを用いて算出した FF の回帰式を修正する必要がある。最初に形状変化を含んだ全データの FF の回帰式から得られた FF_{est} と FF の関係を式(6)で判定し、式(6)の条件を満たさないデータを取り除き、残った

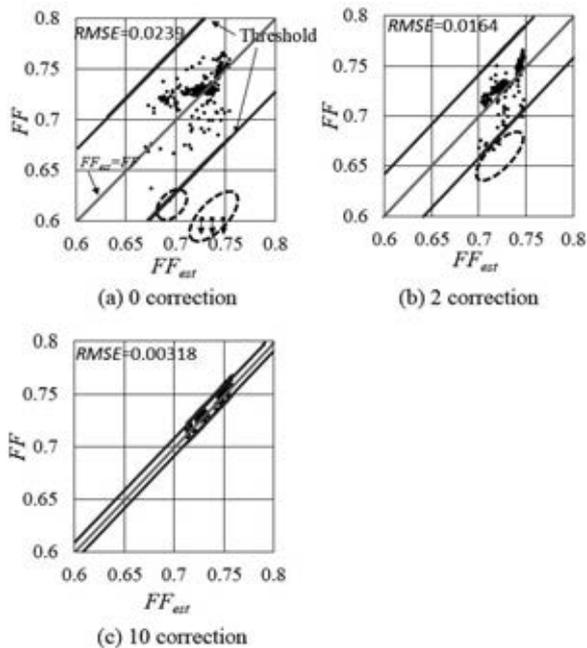


Fig.2 Process of correcting the threshold of FF values

図 2 FF 値の回帰式補正過程

データで回帰式を再算出する。この作業を収束するまで式(6)に基づいて除外されるデータがなくなるまで繰り返すことで正確な回帰式を算出することが可能になる。メガソーラ A について回帰式 FF_{est} を求める手順を Fig.2 に示す。また、最終的な回帰式(式(4))の係数を表 1 に示す。誤差がなければ収束した段階で FF_{est}=FF の関係が成立する。図中(a)は全データを使用した場合で不具合モジュールがあるストリングでは FF が低下し FF_{est}=FF の関係から大きく逸脱するデータが存在する(点線枠で示す。)ので RMSE は大きくなる。式(6)の範囲から逸脱したデータを取り除き、残ったデータを使って再度重回帰曲線を求める。この時、式(6)から逸脱したデータを取り除く。(b)はこの作業を 2 回繰り返した後、(c)は 10 回繰り返した結果である。2 回繰り返した Fig.2 (b)では、ばらつきが小さく、式(6)の範囲が小さくなっていることが分かる。しかし、まだ式(6)の範囲外のデータが数点存在している。Fig.2 (c)は、除外データがなくなるまで繰り返した結果である。(c)では除外データがないので RMSE が小さくなり、FF_{est}=FF の関係に近づく。したがって、表 1(c)に示した係数が正常な I-V 特性による重回帰曲線となる。最終的に算出した回帰式 FF_{est} と式(6)を用いてメガソーラ A にて計測した全データの形状変化を判定する。これをメガソーラ B でも行う。

Table2 Classification of I-V characteristics

表2 I-V 特性の分類

	The number of		Classification guidelines
	Site A	Site B	
○	225	381	No shape change
△	9	20	Unknown
×	23	17	Shape change

2.3 目視による I-V 特性の分類

現在、実運用されているメガソーラのサイトにおける点検作業ではストリング単位の I-V 特性を計測し、形状変化を目視で判定しモジュールの不具合を検知する手法が推奨されている。本論文では I-V 特性の形状変化を数値化し迅速かつ正確な判定方法を提案するものである。そこで、両者の判定結果を比較するために本節ではメガソーラサイトで計測した I-V 特性について目視で形状変化を判定した。

今回は筆者らが目視によって 3 段階に判定した。Fig.3 に判定の目安を示す。Table2 に判定後のデータ数を示す。表中「△」は目視では判定があいまいな I-V 特性である。ただし、「○」と分類された I-V 特性は、必ずしも正常動作

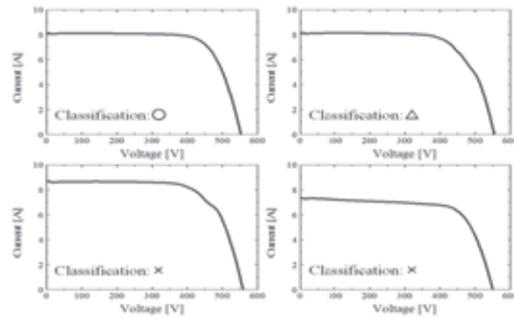


Fig.3 Examples of classification of I-V characteristics

図3 I-V 特性の分類例

しているとは限らず、目視で判定できない形状変化を含んでいる可能性がある。また、「△」や「×」に分類された I-V 特性についても、実際に形状変化が発生しているとは限らず、計測中の急激な日射変動などによって異常な計測が行われたデータを含んでいる可能性がある。

3. FF による I-V 特性の判定

Table3, Fig.4 にメガソーラ A, Table4, Fig.5 にメガソーラ B にて FF を用いたストリング I-V 特性の本提案手法による形状変化判定の結果を示す。Fig.4, 5 どちらのグラフも

Table3 Comparison result with visual evaluation (Mega SolarA)

表3 目視判定との比較結果 (メガソーラ A)

	All data	FF Normal	FF Abnormal
○	225	212	13
△	9	0	9
×	23	0	23

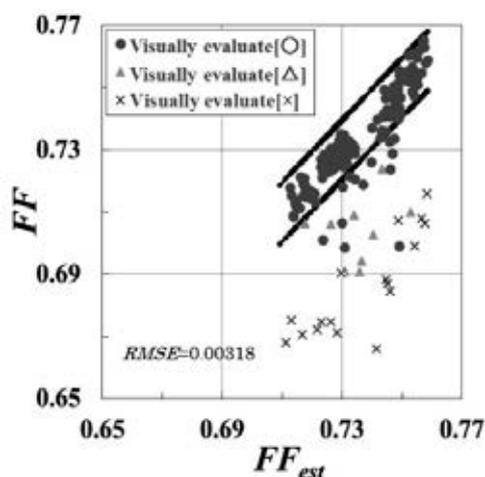


Fig.4 Stastical evaluation of FF values of I-V characteristics(Mega Solar A)

図4 I-V 特性による FF 値の統計的判定 (メガソーラ A)

Table4 Comparison result with visual evaluation (Mega SolarB)

表4 目視判定との比較結果 (メガソーラ B)

	All data	FF Normal	FF Abnormal
○	381	376	5
△	20	13	7
×	17	1	16

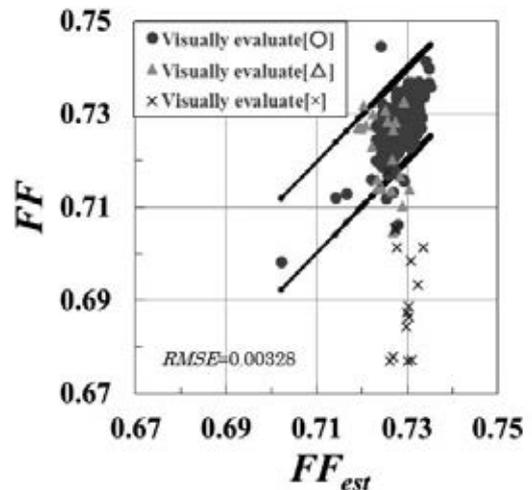
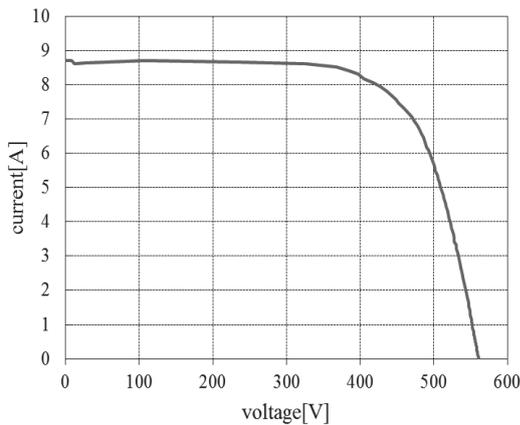


Fig.5 Stastical evaluation of FF values of I-V characteristics(Mega Solar B)

図5 I-V 特性による FF 値の統計的判定 (メガソーラ B)



(a) I-V characteristics



(b) Thermal image

Fig.6 Example of different results between visual and numerical evaluation

図6 目視と数値判定で結果の異なる例

横軸に FF_{est} (期待値), 縦軸に FF (実測値) をとっている. 図中の黒線は式(6)の範囲を示している. Table3 で全データ 257 個のうち判定があいまいなデータ「△」が 9 個 (3.50%)ある. また, Table4 では 418 個中判定があいまいなデータが 20 個 (4.78%)ある. Fig.4 の結果をみると, 目視で「△」「×」と判定されたデータの FF は式(6)の範囲を逸脱しており, 全てが範囲外, つまり I-V 特性の形状に変化ありとみなせた. 一方「○」のデータの殆どは式(6)の範囲内であり, 形状に変化なしとみなせた. 目視による形状変化の判定と本提案の判定方法がほぼ一致すること, 目視では判定があいまいだった「△」も本提案の判定方法では必ずどちらかに分類されることがわかる. ただし, この結果からは「△」の分類が正しく判定された結果なのかはわからない(これに関しては 4 章で検討する.). Fig.5 の結果からも多少の誤差はあるものの, 「△」「×」と判定した多くのデータの FF 値は低下しており, 式(6)の範囲外であることがわかる.

Table3 を見ると「○」のデータにおいて 225 個中 13 個が形状変化ありと判定された. その中のデータで, 実際のス

tring の状態 (I-V 特性, 熱画像) が分かる一例を Fig.6(a), Fig.6(b) に示す. 目視では正常に見える I-V 特性であり「○」と判定したが, 実際には目視では判定が困難な僅かな形状変化が存在し FF 値が低下していた. その FF 値が低下している string の熱画像を見てみると部分的な発熱が確認でき (図中破線枠内), ガラス割れモジュールを有する string であることが判明した. これらの結果から, FF を用いた統計手法による判定法は, 目視による判定法と同等もしくはそれ以上の精度で判定が可能であることがわかる.

4. 不具合を模擬した string の判定

前章で予め正常なデータが必要のない I-V 特性の形状変化検出手法について, 実際に稼働している二つの異なるメガソーラを対象に検討した. その結果, 提案の手法では目視で判断に困る「△」についても分類を行っているが, 正しく分類できているのか検証できていない.

そこで, 本章では前章とは異なる PVS でわずかの形状変化を模擬した string の I-V 特性について形状変化の判定の可能性を検証した.

4.1 判定対象及び測定条件

判定対象のシステムは, 多結晶モジュールで構成された長期稼働している 3kW の PV アレイ (12 直列 4 並列) である. 屋外で自動計測した 2009 年の 1 年間 (周囲の影の影響を受けない 11 時~13 時の時間帯に限定し, 5 分間隔で計測を行った. また, 2 章でも述べたように 0.3kW/m^2 以下の低日射領域を除外した.) の正常な I-V 特性のデータに遮光

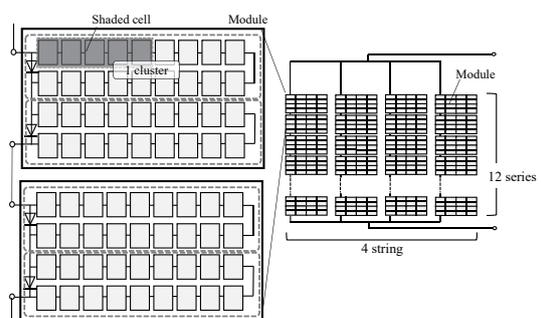


Fig. 7 Schematic diagram of shaded array (1 cluster).

図7 遮光されたアレイの模式図

(1 クラスタ遮光)

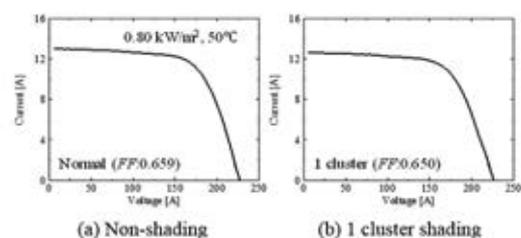


Fig. 8 I-V characteristics of shaded array.

図8 遮光されたアレイの I-V 特性

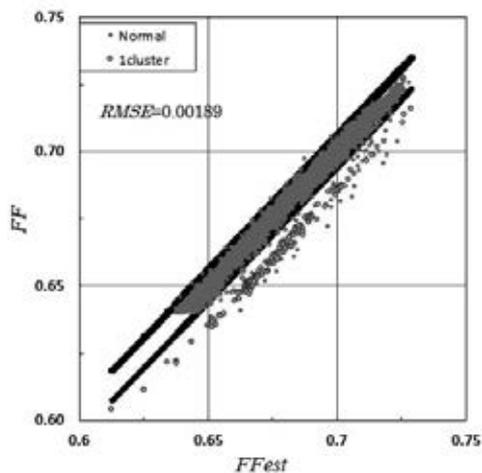


Fig. 9 Stastical evaluation of FF values of I-V characteristics (PV array)

図9 I-V特性による FF 値の統計的判定 (PV array)

Table5 FF value evaluation result of shielded array
表5 遮光したアレイの FF 値判定結果

	All data	FF Normal	FF Abnormal
Normal	5880	5745	135
1 cluster	166	1	165

率80%の遮光フィルムを貼り付け、形状の変化したI-V特性を混在させ、その中から形状の変化したI-V特性の検出を試みる。遮光フィルムは1クラスタに対して5枚貼り付けた。遮光した場合の模式図をFig.7に示す。また、遮光したアレイのI-V特性の一部をFig.8に示す。目視では遮光したアレイのI-V特性は正常状態と比べても変化は確認できない。つまり、1クラスタを遮光したI-V特性の形状変化は極めて小さく、目視で形状変化を判別することが難しい。

4.2 判定結果

Fig.9にPVアレイにて FF を用いたI-V特性の判定結果を示す。グラフの横軸を、 $FFest$ (期待値)、縦軸に FF をとっており、黒線で式(6)の範囲を示している。ここで、今回用いた回帰式、式(6)の範囲は初期状態からそれぞれ繰り返し工程を8回繰り返し収束したデータを用いている。また、判定結果を表にまとめたものをTable5に示す。1クラスタを遮光した場合の FF 値は低下が見られ、1つのデータを除いてすべてを形状の変化したI-V特性として検出できた。したがって、目視では確認が困難である1クラスタを遮光したI-V特性の検出は可能である。しかし、正常なPVSで計測したI-V特性においても多くが範囲内に収まり正常とみなせた一方、範囲外に少数のデータがあることが確認された。これは、I-V特性の計測中に急激な日射変動の影響から正確に測定ができていなかったため測定誤差が生じたと考えられる。

5. まとめ

太陽電池アレイの保守点検方法の一つにI-V特性の形状変化を判定する方法がある。この方法はI-V特性の形状変化を目視で判定する方法である。しかしながら、この方法はメガソーラのようなストリング数の多い設備では判定に時間がかかること、I-V特性の形状変化が僅かである場合に誤判定の可能性があること等、改善の余地がある。本論文では、I-V特性の FF に注目して統計的手法によってI-V特性の形状変化を判定する方法を提案した。また、この方法を使って形状変化したI-V特性を精度よく判定できた。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 太陽電池の日射強度とモジュール温度はI-V特性の短絡電流と開放電圧から推定した値とほぼ一致する。

(2) 正常な形状をしたI-V特性であれば計測から得られた FF と重回帰曲線から推定された $FFest$ の関係は式(6)を満たす。

(3) FF と日射強度・モジュール温度との関係から重回帰曲線を求め、式(6)により範囲外のデータを除去する。残ったデータについて再度重回帰曲線を求める。これを収束するまで繰り返すと $RMSE$ の小さい正常なデータによる重回帰曲線となる。

(4) FF と $FFest$ との誤差から式(6)により除外データを抽出する。抽出されたデータはI-V特性の形状が変化したデータとみなしてよい。

本論文で提案する手法はメガソーラサイトでの点検作業に活用することを想定している。メガソーラサイトにおいてストリング単位でI-V特性を計測し、パソコンに収集する。筆者らはパソコン内にあらかじめ本提案に基づいた判定プログラムを用意し、得られたI-V特性を測定現場で直ちに判定する流れを考えている。この方法は計測したI-V特性について直ちに判定結果が得られるので形状変形が認められたストリングについては直ちに詳細点検をすることが可能になる。ただし、本提案の手法のプログラム化はまだ行っていないので、今後の課題としたい。

6. 謝辞

終わりに、今回検討に用いたメガソーラの分析結果は名城大学卒業生である石戸谷有我氏の成果を一部活用しており、ここに謝意を表す。

7. 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, 8-14 (2010), 日刊工業新聞社, 東京.
- 2) 消費者安全調査委員会, 消費者安全法第23条第1項の規定に基づく事故等原因調査報告書, 10-12 (2019).
- 3) JEMA, JPEA, 太陽光発電システム保守点検ガイドライン, 45-65 (2016).

- 4) 日本太陽エネルギー学会, 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, (2016).
- 5) JIS C 8919, 結晶系太陽電池セル・モジュール屋外測定方法, (1995-1).
- 6) JIS C 8953, 太陽電池アレイ出力のオンサイト測定方法, (1993-7).
- 7) 大内雅之, 太陽電池モジュールの検査方法と不具合事例, 電気設備学会誌, **37** (6), 346-349 (2017).
- 8) U. Tsuno, Measurement of Current-Voltage Characteristics for Photovoltaic Strings and Modules -Overview and Current Issue, *Solar Energy*, **44**(3), 7-14, (2018).
- 9) T. Oheda, Meaning of Outdoor I-V curve Measurement from a Viewpoint of a PV Module Supplier, *Solar Energy*, **44**(3), 15-18, (2018).
- 10) M. Ohuchi, Actual Situation of Outdoor I-V Curve Measurement -A Report from a Field Engineer, *Solar Energy*, **44**(3), 25-30, (2018).
- 11) 太陽光発電技術研究組合, 太陽光発電システム保守点検のための屋外環境下における I-V 特性測定ガイドライン, 1-14 (2016).
- 12) Y. Ikeda, Introduction of Guideline of the Method of Outdoor I-V Curve Measurement for PV System Safety Maintenance, *Solar Energy*, **44** (3), 19-23, (2018).
- 13) Y. Ishitoya, S. Yamanaka, Y. Aoyama, Y. Nishido, H. Kobayashi, Failure Evaluation Method PV Array using I-V Characteristics - Evaluation Method using FF-, *Solar Energy*, **44** (1), 71-77, (2018).
- 14) Y. Ishitoya, N. Kamiya, S. Yamanaka, Y. Aoyama, Y. Nishido, H. Kobayashi, Study on the Failure Evaluation of PV System using I-V Characteristics -Diagnosis Method not to need Irradiance and Module Temperature-, JSES/JSWS Joint Conference (2016), 301-304, Ehime, Japan.