

Visualization and Diagnosis Method of Defective Photovoltaic String Based on the Temporal Variation Characteristics of String Currents in Generation Mode

Ryo TORIHARA^{*1*2‡} Takafumi KODAMA^{*2} Osamu TAKENOUCHI^{*3}
Tatsuya SAKODA^{*4} Noriyuki HAYASHI^{*4}

発電状態においてストリング電流の時間変動特性比較に基づいた不具合ストリングの可視化及び検出手法

鳥原 亮^{*1*2‡} 小玉 昂史^{*2} 竹之内 修^{*3} 迫田 達也^{*4} 林 則行^{*4}

Abstract

In this paper, we propose a new method to detect defective string(s) in a photovoltaic (PV) array, in which the temporal variation of string current is employed since it is easily measured in generation mode, independently of the scale of photovoltaic systems. Based on the results of experimental works using both a newly-installed and 20-years-old PV systems, it is demonstrated that the amplitude of string current variation corresponds to the voltage-current characteristics of the target string at the operation voltage of power conditioning system. Numerical results using a simple PV array model quantitatively confirm the experimental results. Two parameters are newly proposed to visualize the measured data. It is illustrated that those two parameters are useful to this end, and consequently, make it possible to easily evaluate the conditions of target string such as power loss and cluster loss.

Keywords: PV power plant, Variation of string current, Visualization, Deterioration diagnosis, Generation mode
キーワード：太陽光発電システム，ストリング電流の変動，可視化，劣化診断，発電状態

1. はじめに

太陽光発電システム(PVシステム)における太陽電池モジュール(PVモジュール)の電気的な健全性評価は、PVモジュールの電流電圧特性(I-V特性)測定、インピーダンス測定、絶縁抵抗測定などの結果から判定することが推奨されている¹⁻³⁾。これらの点検方法は発電停止状態で行うことに加えて、当日の気象変化により計画した点検や調査が行えず、作業コストが余計にかかってしまう可能性もある。このような現状に対し、我々は発電中の情報から異常の兆

候を把握することができれば、現場点検における調査範囲の絞り込みや調査時間の短縮が期待でき、効率の良いPVシステムの長期安定運用に貢献できると考えている。

発電状態での異常診断には発電中の様々なパラメータを取得し、解析する手法が想定される。近年では、発電状態を監視するモニタリングシステムを導入している発電所もあるが、大抵は出力規模の大きい高圧及び特別高圧の発電所であり低圧の発電所ではほとんど導入されていない傾向にあると報告されている⁴⁾。また、モニタリングシステムが導入されていても、そのほとんどは全体の発電量や、電圧、電流を監視する機能であり局所的な異常を診断する

*1 Interdisciplinary Graduate School of Agriculture and Engineering, University of Miyazaki, 11-1 Gakuenkibanadainishi, Miyazaki 889-2192, Japan

*2 Miyazaki Prefecture Industrial Technology Center
‡e-mail: torihara-ryo@pref.miyazaki.lg.jp

*3 Professor, Civil Aviation College

*4 Professor, Institute of Engineering Education and Research, University of Miyazaki

Received: February 5, 2021, Accepted: April 20, 2021

*1 宮崎大学大学院農学工学総合研究科 博士後期課程 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

*2 宮崎県工業技術センター
‡e-mail: torihara-ryo@pref.miyazaki.lg.jp

*3 航空大学校 教授

*4 宮崎大学工学教育研究部 教授

(原稿受付：2021年2月5日，受理日：2021年4月20日)

ような機能は見られない。

PV システムは PV モジュールを直列接続した PV ストリングと PV ストリングを並列に接続した PV アレイ構成による発電回路がパワーコンディショナシステム(PCS)の制御により、最大出力を得るような動作点を追従しながら発電するシステムである。PV モジュールは、主に直列に接続された太陽電池セル群と、一定数の太陽電池セル群毎に並列に接続されたバイパスダイオードで構成されている。バイパスダイオードは太陽電池セル群内で高抵抗化や断線が生じた際に PV モジュール内の発電電流を迂回させる役割を担う素子である。本論文ではバイパスダイオードと太陽電池セル群とを並列接続した回路構成をクラスタ (cluster)、クラスタ内の太陽電池セル群をセルストリング (cell-string) と呼ぶ。

PV システムにおける太陽電池側の出力低下には、PV モジュールのガラス割れ、封止材の剥離、ケーブルコネクタの接続不良、インターコネクタの外れ、太陽電池セルの割れなど様々な要因がある。これらの不良は直列抵抗成分の増加につながり、PV モジュールはもとより、PV ストリングの出力を低下させる。また、インターコネクタのはんだ不良や断線が含まれるクラスタでは、セルストリングが高抵抗化となるため、ストリング電流が当該クラスタのバイパスダイオードを通流する。本論文では、ストリング電流が当該クラスタのバイパスダイオードを通流する状態をクラスタ故障 (cluster loss) と呼ぶこととする。例えば、3クラスタ構成の PV モジュールにおいて、1つのクラスタがクラスタ故障状態となると、得られる最大出力が最大で 2/3 倍に低下し、開放電圧の 1/3 に相当する電圧消失となることが報告されている⁵⁾。さらに、この状態が長期に亘り継続するとバイパスダイオードで異常な発熱を生じ、発火・火災に至る可能性がある^{6,7)}。このような異常状態を察知するため、例えばアクティブセンシングモニタリングシステムの開発⁸⁾や、リアルタイムホットスポット検出システムの開発⁹⁾など、発電状態での異常診断に関する研究が行われている。

筆者らはこれまでに発電中に生じる PV ストリング電流の挙動に着目し、出力低下が見られる PV ストリング (出力低下ストリング) は出力低下の無いストリング (健全ストリング) よりも電流振動の振幅累積値が大きくなる傾向があることを報告している¹⁰⁾。

本論文では、発電停止等の切り替え作業が不要かつ、低圧の発電所にも適用できる発電異常診断技術として、発電中の PV ストリング電流の挙動から、出力低下ストリングと、その中でクラスタ故障による出力低下ストリング (クラスタ故障ストリング) の存在を視覚化する手法を提案する。さらに実験によりその手法の有効性を検証した結果について報告する。

2. PV システムにおける取得パラメータの選定

本研究では、低圧の発電所において、後から取り付け可能なセンサによるデータ取得を念頭に、取得すべきパラメータを検討した。発電状況を示す情報は主に動作電流、動作電圧、また、環境要素としての情報は日射強度、気温、PV モジュール温度などが挙げられる。近年、接続箱とパワーコンディショナ (PCS) が一体化され、太陽電池ストリングのケーブルコネクタを直結する新型の製品も多く導入されている。このような装置の場合、蓋を開けて測定機器を設置し、データ測定を行うことは困難である。このような状況を踏まえて、本研究では従来型及び新型の、両タイプの接続箱や PCS に対応できるように、クランプ型の電流センサによる測定が可能な「ストリング電流」を主たるパラメータとし、サブパラメータとして「日射強度」を採用した。PV モジュール温度については、本研究の提案手法では採用していない。この理由については後述する。

2.1 発電中のストリング電流測定

まず、実際の PV システムにおける最大出力点追従動作を把握するため、宮崎県工業技術センターにて運用中である PV システムの動作電圧及び動作電流を測定した。表 1 に PV モジュールの公称値及びアレイ構成を示す。

Table 1 Nominal value of PV module and configuration of PV array.

表 1 PV モジュールの公称値とアレイの構成

Specifications of PV module (polycrystal silicon)	
Maximum power (P_{max})	108.3 W
Open circuit voltage (V_{oc})	31.7 V
Short circuit current (I_{sc})	5.13 A
Maximum power voltage (V_{pm})	23.9 V
Maximum power current (I_{pm})	4.54 A
Configuration of PV string and PV array	
Number of series PV modules of string	12 modules
Number of strings in PV array	5 strings

図 1 に発電状態において実測したアレイの動作電圧 (V_{op}) 及びストリング電流 (I_{op}) の時間変化の一例を示す。この測定はオシロスコープ (Tektronix TDS2024C) を用いて、それぞれ接続箱内にある開閉器のストリング側端子部及びストリングケーブルにて実施した。

図 1 に示す 2 つの波形は、上段が V_{op} 、下段が I_{op} であり横軸は経過時間である。 V_{op} は 1 秒おきに約 5V 変動している。これに伴い I_{op} も V_{op} と逆位相のように振動している。この振動は、PV ストリングの電流電圧特性 (I-V カーブ) において、PCS 制御で増減する動作電圧に対応したストリング電流で生じる。この様子を図 2 で概念的に示す。このような制御動作は山登り法による最大電力点追従の挙動であり、多くの PCS で採用されている制御方式¹¹⁾である。

アレイを構成する複数並列に接続されたストリングにおいて、出力低下ストリングの I-V カーブは健全ストリング

と比較して形状が異なるため、ストリング電流にも変化が現れるはずである。そこで、次に同一アレイ内の各ストリングの電流変動を比較するため、クランプ型電流センサにより各ストリング電流の変動を測定した。測定は複数のストリングを同時に測定する必要があるため、図3のような複数の電流センサを備えた専用の測定装置を開発し、計測を行った¹²⁾。表2は装置の仕様であり、最大10回路のストリング電流を0.1 Aの精度で同時測定できるよう製作した。ストリングの電流計測は図4のように各開閉器のストリング側のP極側ケーブルに取り付けて実施した。日射計は結晶シリコン太陽電池に近い応答速度、分光感度を備えたシリコンフォトダイオード式日射計（英弘精機 ML-02）を搭載した。

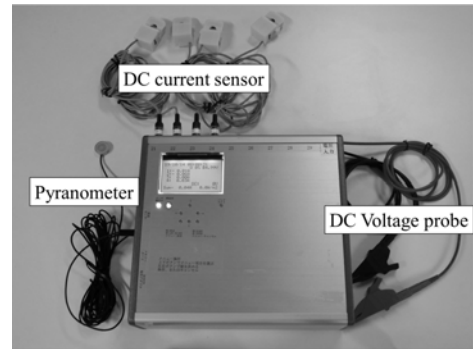


Fig.3 Developed instrument to measure multi-channel PV string currents.

図3 開発したストリング電流測定装置

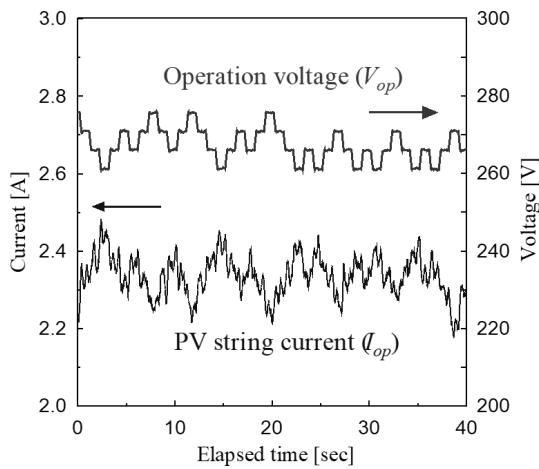


Fig.1 Typical waveforms of PV string current and operation voltage.

図1 ストリング電流と動作電圧の波形

Table 2 Specification of measurement instrument.

表2 測定装置の仕様

	DC current sensor	DC voltage probe	Pyranometer
Range	-10~10 A	-1000~1000 V	0~2000 W/m ²
Accuracy	±0.1 A	±2.0 V	2 %
Number of channel	10	1	1
Measurement interval	0.2 sec, 0.5 sec, 1 sec, 5 sec, 10 sec, 1 min, 10 min		

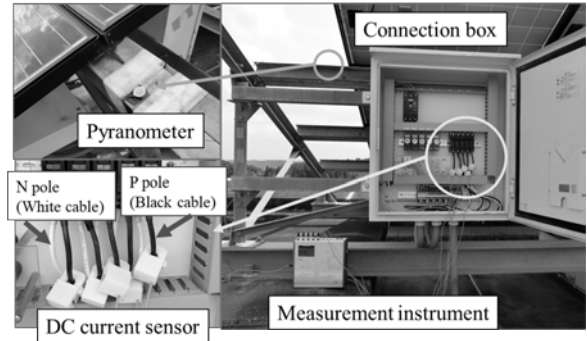


Fig.4 Measurement status with the developed string current measuring device.

図4 開発したストリング電流測定装置での測定状況

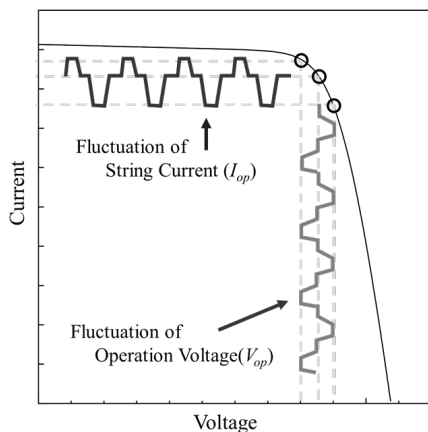


Fig.2 Schematic diagram of V_{op} fluctuation and resulting I_{op} fluctuation based on I-V curve of a PV string.

図2 PV ストリングの I-V カーブを用いた電圧変動及び電流振動の概念図

2.2 ストリング電流の測定結果

実測した各ストリング電流及び傾斜面日射強度の推移を図5及び図6に示す。図5は日射強度の変動が少ない快晴時、図6は日射強度の変動が激しい日の結果である。測定したストリングは5回路で、測定間隔は1秒とした。測定時、このPVシステムは運用開始から約20年経過しておりPVアレイの出力は運転開始時の出力に比べて半分以下に低下していた。図5及び図6から日射変動の有無に拘わらず各ストリング間でストリング電流値に差があることが確認できる。また、電流変化は図1に示すように電圧変動に伴う電流変動が生じており、小刻みに振動している。この振動の振幅について、各ストリングの1秒間における電流変化の平均値を表3に示す。ただし、発電停止中の時間帯は

除外している。同表から、電流振動の振幅に違いがあることが確認できる。具体的には、ストリング2, 5が他のストリングよりも小さいことが分かる。

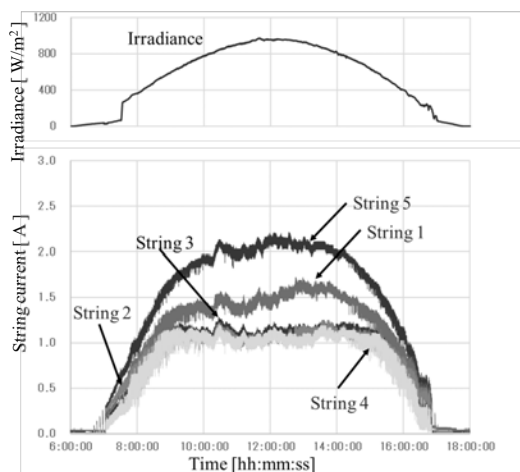


Fig.5 Fluctuation in string currents and solar irradiance (a sunny day).

図5 各ストリングの電流及び日射強度の変化 (快晴の日)

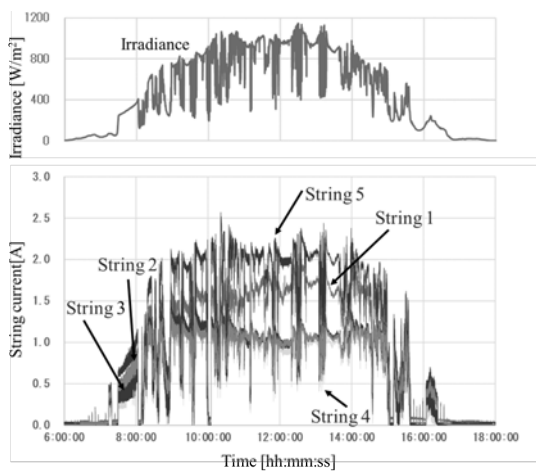


Fig.6 Fluctuation in string currents and solar irradiance (a day when the sunlight change is intense).

図6 各ストリングの電流及び日射強度の変化 (日射強度の変動が激しい日)

Table 3 Average of the current fluctuation of each string in Fig.5 and Fig.6

表3 図5及び図6におけるストリング電流振幅の平均値

	Fig.5	Fig.6
String 1	99.9 mA	63.5 mA
String 2	74.1 mA	50.9 mA
String 3	94.6 mA	70.8 mA
String 4	99.1 mA	76.6 mA
String 5	80.8 mA	56.3 mA

2.3 I-V カーブを用いた検討

測定した各ストリングは並列接続にてアレイを構成しており、各ストリングの動作電圧は様に制御されることから、このような電流振動の主な要因は動作電圧の変動によるものと考えられる。さらに電流振動の振幅の違いは、各ストリングの I-V カーブが互いに違うことに起因すると推測される。

この推論を確認するため、I-V 測定器(英弘精機 MP-170)を用いて各ストリングの I-V カーブを測定した。その結果を図7に示す。約20年間の運用により、全てのストリングにおいて I-V カーブに変形が見られることに加え、互いに異なっていることが分かる。特にストリング1, 3, 4では開放電圧(V_{oc})が低下しており、これらのストリングにはクラスタ故障があるモジュールが含まれている可能性が考えられる。クラスタ故障の有無の確認は専用の信号検出装置(戸上電機 SPLC-A)⁵⁾を使用して行った。その結果、ストリング1で1クラスタ、ストリング3で3クラスタ、ストリング4で5クラスタのクラスタ故障が存在することが分かった。ストリング2ではクラスタ故障は確認されなかったが、故障系統検出装置(アイテス SZ200)¹⁾により他のストリングに比べて直列抵抗値が大きいことを確認した。

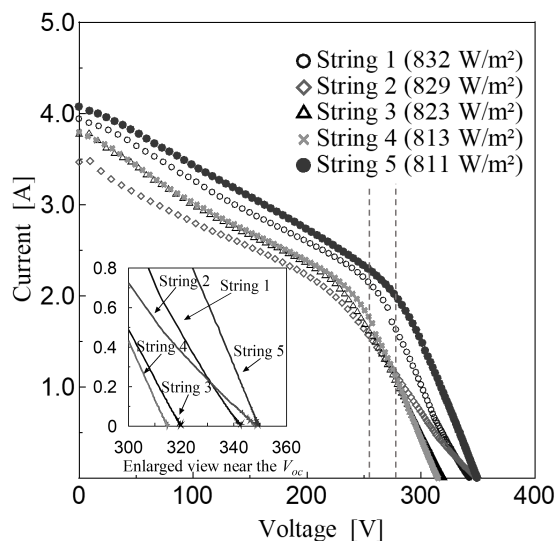


Fig.7 I-V curve of each string.

図7 各ストリングの I-V カーブ

また、この PV システムの V_{op} は実測で 253 V ~ 277 V の範囲であり、図7における破線で挟まれた電圧範囲に相当する。各ストリングの I-V カーブから読み取った、この電圧範囲における動作電流と、電流変動の振幅 (ΔI) を表4に示す。同表で動作電流 $I(V=265)$ は電圧範囲 253 V ~ 277 V の中央値である 265 V 時の電流値である。同表から、クラスタ故障のあるストリング1, 3, 4では ΔI が比較的大きいことが分かり、その中でクラスタ故障数の少ないストリング1では $I(V=265)$ が大きく、クラスタ故障数の多いストリング3, 4では $I(V=265)$ が小さいことが分かる。また、直列抵

抗値が大きいストリング2では、 $I_{(V=265)}$ は小さいが、ストリング1, 3, 4に比べて ΔI も小さいことが分かる. このような ΔI の傾向は, 表3で示したストリング電流の振幅の平均値の大小と同様の傾向を示していることから, 各ストリング電流の振幅の違いは I-V カーブの違いに起因すると考えられる.

Table 4 Value of $I_{(V=265)}$ and ΔI in each PV string.

表 4 各ストリングの $I_{(V=265)}$ と ΔI の値

	$I_{(V=265)}$ [A]	ΔI [A]
String 1	1.98	0.62
String 2	1.36	0.41
String 3	1.36	0.55
String 4	1.45	0.66
String 5	2.17	0.30

3 シミュレーションによる電圧と電流の挙動把握

3.1 シミュレーション回路

I-V カーブの変化の要因と PV システムの動作時に生じるストリング電流の振幅との関係性を調べるため, 太陽電池のアレイ等価回路を作成し, ストリングの出力低下を模擬したときの電流挙動の変化をシミュレーションした. 電子回路シミュレータは LTspice®を用いた. 等価回路は図8のようにクラスタ単位で作成し, アレイ等価回路は図9のように作成した. 図9のアレイは5ストリングの並列接続であり, 逆電流防止回路として各ストリングの端部にダイオードを接続した. 各ストリングは36クラスタ(1モジュール当たり3クラスタ)の直列接続である. シミュレーションではストリング1を出力低下ストリングとし, 2種類の故障条件を設定した. 1つはストリングの直列抵抗(R_{st1})が増加した場合(Case A)とし, もう一つはクラスタ故障が1つ以上ある場合(Case B)とした. R_{cs} はセルストリングの直列抵抗, R_{bpd} はバイパスルートの直列抵抗を模擬している. 回路の各パラメータは表5のとおりである.

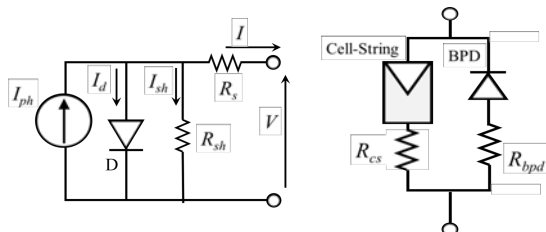


Fig.8 Equivalent circuit used for LTspice simulation.

(Left : cell-string model, Right : cluster model)

図8 シミュレーションに用いた等価回路

(左:セルストリング, 右:クラスタ)

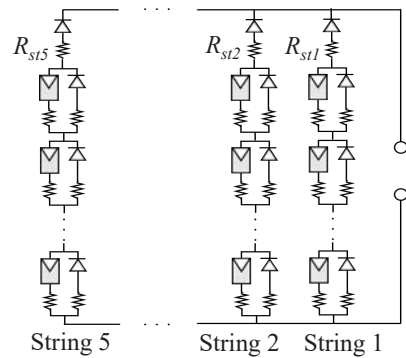


Fig.9 Equivalent circuit of PV array used for LTspice simulation.

図9 シミュレーションに用いた PV アレイ等価回路

Table 5 Values of parameters used for LTspice simulation.

表 5 LTspice シミュレーションに用いた回路の各パラメータ

PV Cell-string		Cluster, PV Array	
I_{ph} [A]	5.13	R_{cs}, R_{bpd}, R_{st} [Ω]	1 μ
R_s [Ω]	0.30	Number of PV string	5
R_{sh} [Ω]	60	Number of clusters in PV string	36

3.2 健全ストリングのシミュレーション

この回路シミュレーションによる健全状態におけるストリングの I-V カーブと, 5つのストリングから構成されるアレイの P-V カーブを図10に示す. また, 図10における最大動作電圧(V_{pm})付近の拡大図を図11に示す. このときの V_{pm} は284Vであり, 284Vを基準として1秒おきに $\Delta V = \pm 5V$ で山登り法と同様に電圧を変動させて最大出力点の追従を繰り返した場合, ストリングの動作点は図11の○で示す3点となり, V_{pm} における動作電流(I_{op})は4.61A, 最大電流と最小電流の差 ΔI は0.16Aとなる.

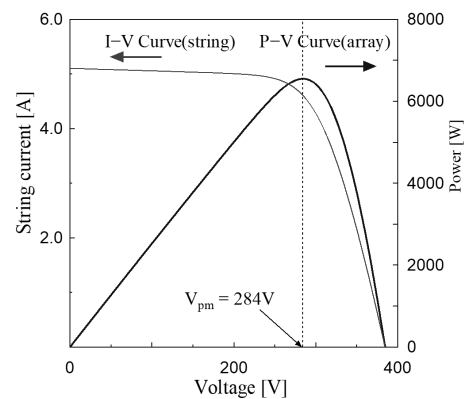


Fig.10 Simulated result of the I-V curve of a single string and P-V curve of PV array in a normal state.

図10 健全状態におけるストリングの I-V カーブとアレイの P-V カーブのシミュレーション結果

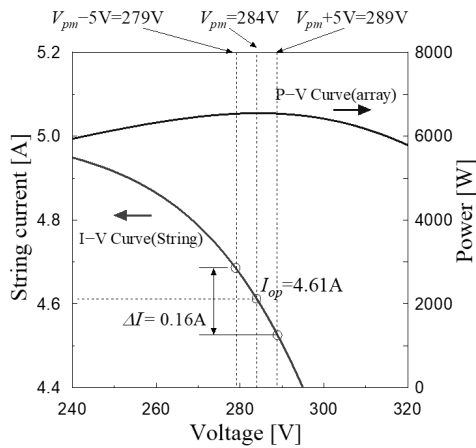


Fig.11 Enlarged view near maximum power point in Fig. 10.
 図 11 図 10 の最大動作点付近の拡大図

3.3 直列抵抗の影響のシミュレーション

Case A で出力低下ストリングの直列抵抗 R_{stl} を $5\ \Omega$ から $500\ \Omega$ まで増加させた場合のシミュレーションを行った。シミュレーションから得られた I-V カーブを図 12 に、各抵抗値における出力低下ストリングの動作電流 I_{op} 及び ΔI を図 13 に示す。図 12 における●はアレイの最大出力動作電圧 (V_{pm}) における各ストリングの動作点、○は $V_{pm} \pm 5\ V$ における各ストリングの動作点である。図 13 からは、 R_{stl} が増加するに伴い I_{op} は単調に低下するが、 ΔI は初期状態の 2 倍程度まで増加した後、減少することが分かる。このシミュレーションでは動作電圧の変動を $\pm 5\ V$ (V_{pm} の $\pm 2\%$) としたが、 $\pm 5\%$ とした場合でも同様の傾向を示した。

3.4 クラスタ故障の影響のシミュレーション

次に出力低下の原因としてクラスタ故障を模擬した場合 (Case B) のシミュレーションを行った。クラスタ故障の模擬はクラスタ内のセルストリングに接続された抵抗 (R_{cs}) を $1\ k\Omega$ とすることで、ストリング電流がバイパスダイオードを経由して流れる状態を模擬した。ここでバイパスダイオードは健全であること、つまり $R_{bpd} = 1\ \mu\Omega$ とおいた。

図 14 はクラスタ故障の数を 1 から 10 まで模擬した場合のストリング 1 の I-V カーブの変化を示している。図 14 の●はアレイの最大出力動作電圧 (V_{pm}) における各ストリングの動作点、○は $V_{pm} \pm 5\ V$ における動作点を示している。図 14 から読み取ったクラスタ故障数の違いによる I_{op} 及び ΔI の変化を図 15 に示す。図 15 からは、クラスタ故障数が増えるほど I_{op} は小さくなり、 ΔI は大きくなる傾向があることが分かる。Case B と Case A を比較すると、Case B の ΔI は増加し続けている点に特徴がある。しかしながら、さらにクラスタ故障数が増えるとアレイの最大動作電圧領域における出力低下ストリングの電流値は極端に小さくなり、 I_{op} と ΔI は大幅に低下することが分かる。クラスタ故障数が 11 以上になると、出力低下ストリングの I-V カーブはアレイの最大出力動作電圧から外れてしまい、発電に寄与しない状態となる。

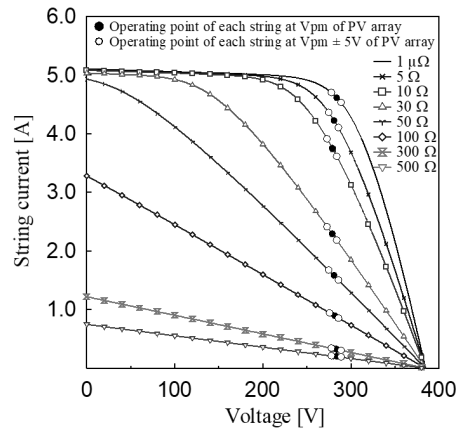


Fig.12 Changes in the I-V curves of String1 with increase of R_{stl} .
 図 12 R_{stl} をパラメータとしたストリング 1 の I-V カーブの変化

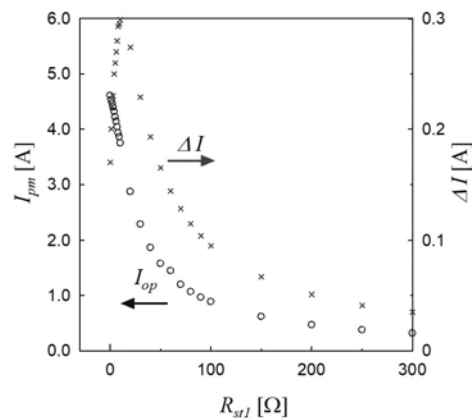


Fig.13 Changes in the I_{op} and ΔI of String 1 with increase of R_{stl} .
 図 13 ストリング 1 の I_{op} 及び ΔI と R_{stl} との関係

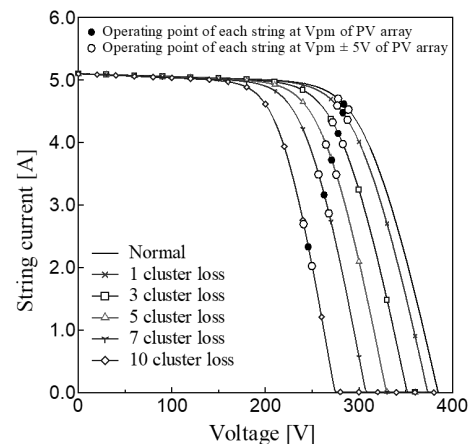


Fig.14 Changes in the I-V curves of String1 with increase of cluster loss.
 図 14 クラスタ故障数増加におけるストリング 1 の I-V カーブの変化

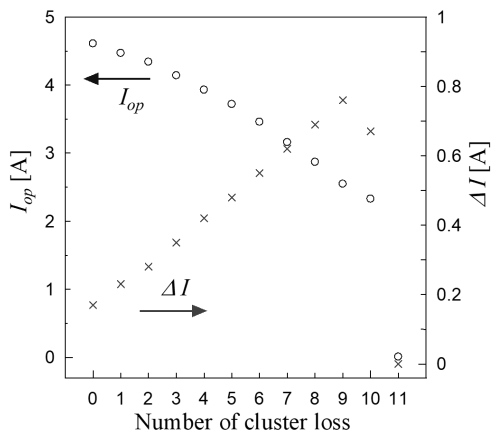


Fig.15 Changes in the I_{op} and ΔI of Strig 1 with increase of cluster loss.

図 15 クラスタ故障数増加におけるストリング 1 の I_{op} と ΔI の変化

3.5 シミュレーション結果のまとめ

2.3節で実環境にあるストリングのI-Vカーブの測定結果を示し、他のストリングに比べて直列抵抗値の大きいストリングは I_{op} と ΔI がともに小さい傾向にあることと、クラスタ故障を含むストリングでは、 ΔI が大きい傾向にあることが確認された。シミュレーションの結果はこの結果と概ね一致しており、Case A と Case B の両方で不具合ストリングの動作電流は低下することが確認され、さらに Case B では、クラスタ故障数が増えるほど電流変動幅が大きくなることが確認できた。また、上記の特徴は表3で示したストリング電流の振幅の大小と相関がある。以上から、発電状態における出力低下ストリングの検出手法として、各ストリング電流を同時測定し、電流及び電流振幅の違いに着目した解析手法を提案することは有効であると言える。

4. 不具合検出手法の提案

4.1 $D_{cc} - D_{cf}$ プロットの提案（データの可視化）

3.5 節にて、各ストリング電流を測定し比較することは出力低下ストリングを発電状態で検出するのに有効であることを示した。この結果を用いて、測定者が出力低下ストリングを判定しやすくするための可視化を検討する。出力低下ストリングの特徴である電流値と、測定間隔における電流の変動幅を不具合検出の指標とするため、新たに2つの式を導入し、出力低下ストリングを視覚化できる散布図を提案する。

まず一つ目として、各ストリングの電流値の違いを指標とする式を説明する。測定した時刻 t のストリング電流において、各ストリング電流の全ストリング電流に占める割合を示す式である。この指標を電流貢献度 (D_{cc} : degree of current contribution) とし、式(1)にて求める。 $I_{st-ave}(t)$ は、時刻 t において全ストリング電流をストリング数で除した平均電流であり、式(2)で求める。

$$D_{cc}(k, t) = \frac{I_{st}(k, t)}{I_{st-ave}(t)} - 1 \quad (1)$$

$$I_{st-ave}(t) = \frac{\sum_{k=1}^n I_{st}(k, t)}{n} = \frac{I_{st-all}(t)}{n} \quad (2)$$

k : ストリング番号

t : 時刻

$I_{st}(k, t)$: ストリング k の時刻 t の電流 [A]

$I_{st-ave}(t)$: 時刻 t における平均ストリング電流 [A]

$I_{st-all}(t)$: 時刻 t における全ストリング電流[A]

n : 測定ストリングの総数

式(2)において、測定する全てのストリングで出力に不具合が見られず均等な発電状態である場合、式(1)で求めた $I_{st-ave}(t)$ と各ストリング電流 $I_{st}(k, t)$ はおおそ等しくなり右辺第1項は全てのストリングで1に近づく。さらにデータ整理の都合により、右辺第2項にて1を引き、結果である $D_{cc}(k, t)$ が0付近に集約されるようにした。

これに対して、アレイ内に出力低下したストリングが存在した結果、各ストリング電流にバラツキが生じる場合、出力低下ストリングの電流は健全ストリングよりも小さくなる。このため、出力低下ストリングでは $I_{st-ave}(t) > I_{st}(k, t)$ となり、 $D_{cc}(k, t)$ は負に集中する。一方、健全ストリングでは $I_{st-ave}(t) < I_{st}(k, t)$ となり、 $D_{cc}(k, t)$ は正に集中することが想定され、出力低下ストリングの有無が視覚化できる。

もう一つの式は、各ストリングの電流が時刻 $t-1$ から時刻 t の間で何割変動したかという指標である。これを電流変動度 (D_{cf} : degree of current fluctuation) とし、式(3)で求める。

$$D_{cf}(k, t) = \left| \frac{I_{st}(k, t) - I_{st}(k, t-1)}{I_{st}(k, t-1)} \right| \quad (3)$$

時刻 $t-1$ から時刻 t にかけてストリング電流が変動する要因は日射強度の変動や PCS による最大出力追従制御が考えられる。日射強度の変動は、健全ストリングにも出力低下ストリングにも一定の電流変動を与える要因となるが、これに最大出力追従制御が加わると、健全ストリングと出力低下ストリングで電流変動の差が生じる。さらに出力低下ストリングにクラスタ故障が含まれる場合、図15で示したようにクラスタ故障が多いほど、 I_{op} が低下するとともに ΔI が大きくなる傾向がある。式(3)は時刻 t における電流 $I_{st}(k, t)$ と時刻 $t-1$ における電流 $I_{st}(k, t-1)$ の差分を $I_{st}(k, t-1)$ で除した絶対値を算出しており、図15の I_{op} が式(3)の分母、 ΔI が分子に相当する。クラスタ故障が多いストリングほど D_{cf} は大きくなる。仮に図15で示した結果から $\Delta I / I_{op}$ を求めると、0.04~0.30となる。発電所での実測値を用いて求める D_{cf} は、日射強度変動の影響が加わるためさらに大きい値となる可能性が考えられる。

4.2 可視化に用いる実測データの選別方法

式(1)から式(3)を適用するにあたって、日射強度は十分

あるにも拘わらず、何らかの原因でストリング電流が非常に小さい場合を除外するため、以下の条件を満足するデータのみ採用した。

- 条件① 日射強度 (G) が 250 W/m^2 以上
- 条件② 全ストリングの合計電流が 1 A 以上

さらに、電流が変動する要因は動作電圧変動、日射強度変化、温度変化が考えられる。特に大きく影響を与えるのは動作電圧変動である。しかし、前述のとおり電圧測定を容易に行うことができないシステムも導入されている。そこで、動作電圧が変動したタイミングのデータを抽出する条件を検討する。太陽電池の電流は日射強度の増減と相関があることはよく知られているが、さらに電圧変動の制御が加わったタイミングでは、ストリング電流が大きく増減すると考えられる。このような条件のデータに絞り込むため、下記の条件式(4)を満たすデータを抽出した。

$$\left| \frac{I_{st-all}(t) - I_{st-all}(t-1)}{I_{st-all}(t-1)} \right| > \left| \frac{G(t) - G(t-1)}{G(t-1)} \right| \quad (4)$$

また、モジュール温度の影響についても検証を行った。1秒間の最大変動を確認するため、モジュール裏面の温度を1秒間隔で1週間連続測定を行ったところ、最大で $0.2 \text{ }^\circ\text{C/sec}$ の変動であった。例えば宮崎県工業技術センターのPVシステムでは、 I_{sc} の温度係数は約 $0.002 \text{ A}/^\circ\text{C}$ (当初設計書から算出) であり、 I_{pm} が $8\sim 9 \text{ A}$ としても1秒間に $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 変化したモジュール温度による電流変化は $0.0032\sim 0.0036 \text{ A}$ である。本研究での電流測定には 0.1 A 精度の電流センサを用いており、1秒間の電流変化においてモジュール温度の影響は測定できないほど微小な変化であるため、電流測定間隔を1秒とすることでモジュール温度変化については考慮しないこととした。

4.3 1日間の実測データを用いた $D_{cc}-D_{cf}$ プロット

式(2)及び(3)を用いた $D_{cc}-D_{cf}$ プロットを、宮崎県工業技術センター屋上のPVシステム(サイトA)と、宮崎市内で運用開始から半年未満で、発電に異常の確認されていないPVシステム(サイトB)で測定した電流及び日射強度データに適用し、可視化を行った。サイトAでは多結晶シリコン太陽電池モジュールを使用し、1ストリングのモジュール直列接続数は12枚である。サイトBでは単結晶シリコン太陽電池モジュールを使用し、1ストリングのモジュール直列接続数は24枚である。電流測定は1つの接続箱に集約される全ストリングで行い、サイトAは5ストリング、サイトBは8ストリングを測定した。解析に使用したデータは1秒間隔で測定したものであり、4.2節で示した条件により抽出した。なお、サイトAでは各ストリングの電流測定と同時に動作電圧の測定も行った。式(4)により抽出されたデータのうち、図1に示すような5V間隔の電圧変動があったデータは95%以上であり、電圧変動があったタイミン

グのデータが十分に抽出できていることを確認した。

快晴の日におけるサイトA及びサイトBの $D_{cc}-D_{cf}$ プロットを図16及び図17に示す。サイトAのストリングは図7で示したものであり、ストリング番号も同じである。サイトAにおける D_{cc} は、ストリング5が大きく、次いでストリング1であり、正側に集中している。一方、ストリング2はやや負側、ストリング3,4は全ての点が負側にある。 D_{cf} においては、クラスタ故障が多く存在するストリング3及び4で、 $D_{cf} = 0.2 \sim 0.4$ の間にもデータが多数現れ、大きな広がりがある。また、クラスタ故障が1つ確認されているストリング1では、僅かに D_{cf} が大きい点群があることが確認できる。このことから、クラスタ故障を含むストリングではクラスタ故障の無いストリングよりも D_{cf} が大きく表れることが分かる。クラスタ故障は無いが直列抵抗が増加しているストリング2では D_{cc} が負側に現れかつ、 D_{cf} の増加傾向が見られないことが分かる。これに対しストリング5は D_{cc} が正にあり、 D_{cf} が小さいため、健全であるように見えるが、実際は出力低下がある。測定する全てのストリングで同様な出力低下が見られる場合では、本手法のみでは誤判定の可能性があり、定格電流とストリング電流の比較などのクロスチェックにより、検知精度を高める必要がある。また、サイトBでは全ストリングで D_{cc} が0付近に集中し、 D_{cf} も特徴的なバラつきは見られない。

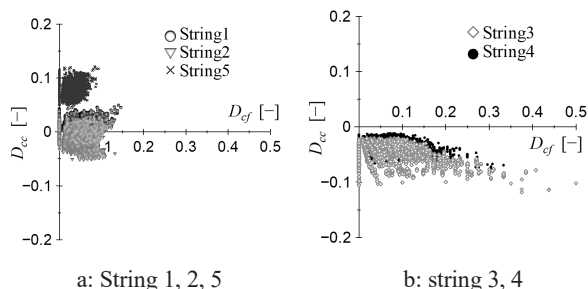


Fig.16 $D_{cc}-D_{cf}$ plot of Site A (sunny day).

図16 サイトAの $D_{cc}-D_{cf}$ プロット (快晴時)

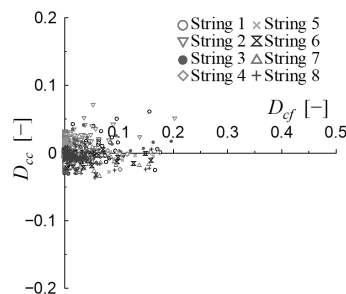


Fig.17 $D_{cc}-D_{cf}$ plot of site B (sunny day).

図17 サイトBの $D_{cc}-D_{cf}$ プロット (快晴時)

同様に、雲が頻繁に流れ、日射強度の変動が激しい日におけるサイトA及びサイトBの $D_{cc}-D_{cf}$ プロットを図18及び図19に示す。サイトA、サイトB共に快晴時と類似した傾向を示すことから、本解析手法は天候の影響を受けにくいことが分かる。

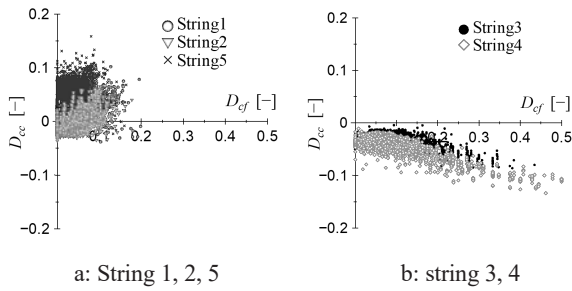


Fig.18 D_{cc} - D_{cf} plot of Site A (a day when the sunlight change is intense).

図 18 サイト A の D_{cc} - D_{cf} プロット (日射強度の変動激しい日)

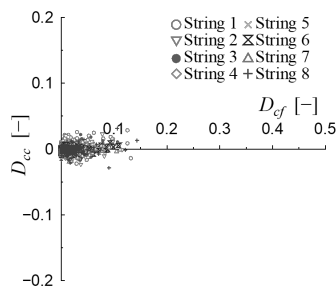


Fig.19 D_{cc} - D_{cf} plot of Site B (a day when the sunlight change is intense).

図 19 サイト B の D_{cc} - D_{cf} プロット (日射強度の変動が激しい日)

4.4 長期間にわたる D_{cc} - D_{cf} プロットの検証

次に、遠隔監視などの長期的なデータ取得におけるストリングの異常検知を想定した場合の D_{cc} - D_{cf} プロットの有効性を検証した。検証に使用したデータは、サイト B において 8 つのストリング電流及び日射強度を長期間取得したものである。ただし、一定期間のみストリング 3 で 1 枚の PV モジュールを黒色のビニールシートで遮光し、クラスタ故障を模擬した。測定は 2019 年 6 月 1 日から 2019 年 9 月 30 日までの 4 ヶ月間行い、遮光を施したのは最後の 3 日間である。このデータを解析することにより、意図的にクラスタ故障を発生させた際に D_{cc} - D_{cf} プロットに変化が認められるかを検証することとした。なお、この 3 日間は雨天から次第に回復し、晴れとなる天候であった。

図 20 の a に遮光を行う前日までのデータによる D_{cc} - D_{cf} プロット、図 20 の b に遮光を行った 3 日間のデータによる D_{cc} - D_{cf} プロットを示す。ページの都合で図は示さないが、この 4 か月間には日射強度の変動が少ない日、変動の激しい日のデータが含まれるが、4.3 節で得られた結論と同様に日射強度の変動に有無による傾向の違いは認められなかった。図 20 の a はデータ数が膨大であるため、総データ数から 1/200 に間引いて描画した。図 20 の a では各ストリング間で D_{cc} と D_{cf} に特徴ある差は見られないが、図 20 の b ではモジュール 24 枚中の 1 枚を遮光したストリング 3 において、図 16 の b のように D_{cc} が負に集中し、 D_{cf} が増加した点

群が現れていることが確認できる。

同様に、1 クラスタのみを遮光した場合の検証も行ったが、健全ストリングとクラスタ故障ストリングの D_{cc} 、 D_{cf} をそれぞれ比較した結果、特徴ある差は見られなかった。本手法のみでは一定割合に満たないクラスタ故障を見落とす可能性がある。

4.5 提案した可視法を用いた出力低下要因の判定

意図的にクラスタ故障を発生させた出力低下ストリングを含むデータでは、出力低下の傾向として D_{cc} が負に集中し、かつ D_{cf} が大きくなる傾向を視覚化することができた。

図 16 から図 20 で示した D_{cc} - D_{cf} プロットにおける点群の位置と各ストリングの出力異常状態を模式化すると図 21 及び図 22 のようになる。全てのストリングが健全である場合は図 21 に示すグラフの①の範囲に点群が集中する。出力低下のあるストリングが存在する場合は、図 22 に示すグラフのように出力低下のあるストリングの点群が縦軸の負側(③及び④)に集中し、さらにクラスタ故障のあるストリングの点群は D_{cf} が大きくなる傾向があるため、④に現れるようになる。これに対し、健全ストリングは D_{cc} が正になり、 D_{cf} のバラツキが少ないため、点群は②に集中する。

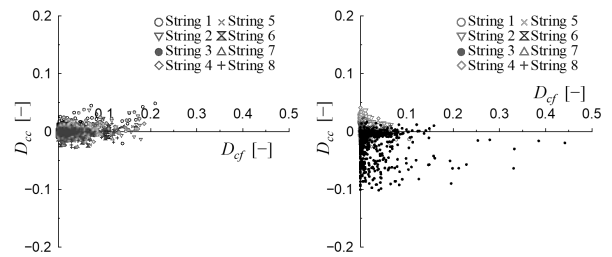


Fig.20 D_{cc} - D_{cf} plots using long time data in Site B.

図 20 長期データを用いたサイト B の D_{cc} - D_{cf} プロット

5. まとめ

本論文では、PCS の最大出力追従制御として動作電圧をステップ的に変動させることに着目し、発電状態にある複数ストリングの電流及び日射強度の変動を解析し、相対的に出力低下ストリングを検出する手法について検討を行った。本研究より得られた結論を以下に記す。

- (1) 山登り法のように人工的な電圧制御に伴う各ストリング電流の振幅データを解析し、直列抵抗増加ストリングとクラスタ故障を含むストリングを検出できる可能性を見出した。
- (2) 相対的に I-V カーブを比較し、出力低下ストリングを可視化する手法として、各ストリングの電流貢献度 (D_{cc}) 及び各ストリングの電流変動度 (D_{cf}) の 2 つの指標を提案し、グラフ化によりストリングの出力低下具合を可視化できることを示した。
- (3) 実測データの解析により、 D_{cc} が負に集中するストリングで出力低下が見られ、加えて D_{cf} 値が大きいストリングに

はバイパス回路が動作状態になるクラスタ故障が存在する可能性があることを示した。

(4) 日射強度の変動が異なる日のデータを用いた D_{cc} - D_{cf} プロットにおいて、いずれも (3) で示した結果が得られた。本解析手法は発電状態のデータであれば適用可能であり、天候を限定しない。

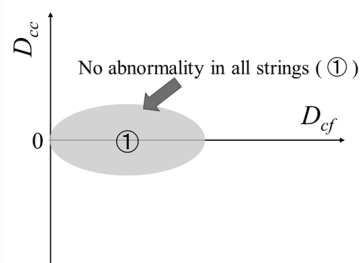


Fig.21 Conceptual image of defective PV string visualization using D_{cc} - D_{cf} plot (Normal condition).

図 21 D_{cc} - D_{cf} プロットによる異常ストリング可視化の概念図(正常時)

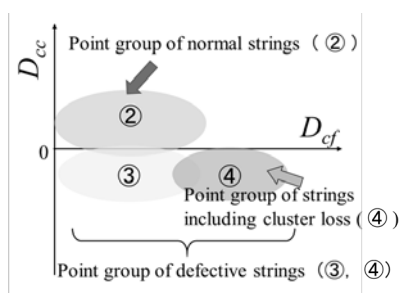


Fig.22 Conceptual image of defective PV string visualization using D_{cc} - D_{cf} plot (contain abnormal string).

図 22 D_{cc} - D_{cf} プロットによる異常ストリング可視化の概念図(出力低下ストリングが含まれる場合)

本手法は、診断対象のストリング同士を比較するため、全ストリングで一様に出力低下がある場合には誤判定の可能性もある。また、クラスタ故障が一定割合未満で存在するようなクラスタ故障ストリングは見落としの可能性もある。本手法に加え、定格電流と各ストリング電流を比較するなどのクロスチェックを行うことで不具合の検知精度を高めることが必要である。

最大出力追従制御の手法は PCS メーカーによって異なるが、追従制御の周波数に合わせた電流測定ができれば、本手法は汎用的に活用できると考えられる。また、今回は結晶シリコン系の PV モジュールを用いたシステムでの実験結果を示したが、化合物系の PV モジュールを使用したシステムでも適用できる。化合物系の場合、接続箱内の開閉器にはサブアレイ単位でケーブルが接続されている構成が多いため、サブアレイ内のストリング単位で電流を計測することで、同様のデータ取得及び視覚化が可能となる。

本手法により、主にクラスタ故障のある出力低下ストリングを視覚化できることを示したが、測定対象の状態によ

っては誤判定となる可能性があり、課題が残った。さらなる改良を加え、不具合の検知精度を高めていく。

謝辞

本研究の一部は宮崎県産業振興機構産学官共同研究開発支援事業及び宮崎県企業局試験研究機関連携推進事業の助成を受けて行われた。記して謝意を表す。また、実験フィールドを提供いただいた株式会社サンホーム並びに電気管理技術者に謝意を表す。

参考文献

- 1) T. Ikeda, Technical Guide of “Solamente”, Journal of Japan Solar Energy Society, **44**(3), 59-63(2018)
- 2) 日本電機工業会・太陽光発電協会, 「太陽光発電システム保守点検ガイドライン」, 日本電機工業会・太陽光発電協会技術資料, 23-24(2019).
- 3) (一社)日本電気協会, 自家用電気工作物保安管理規程, 96-97, (2018), 日本電気協会, 東京.
- 4) 資源エネルギー庁, 平成 29 年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査 (太陽光発電に係る保守点検の普及動向等に関する調査) 最終報告書, 17-23(2017), 経済産業省, 東京.
- 5) 加藤和彦, 太陽光発電システムの不具合事例ファイル, 15-40(2010), 日刊工業新聞社, 東京.
- 6) S. Oke, H. Sakai, I. Nanno, T. Hamada, M. Fujii, and N. Ishikura, Elucidation of overheating and firing process of PV module which was damaged by induced lightning, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2016) (Nov. 2016), 285-288, Matsuyama, Ehime, Japan.
- 7) Nay Zaw Latt et al, Effects of Conducting Bypass Diodes on Characteristics of String Current of Array Operated under MPPT Condition, Proceedings of the International Council on Electrical Engineering Conference 2019 (Jul. 2019), 19J-080, Hong Kong.
- 8) 佐藤誠, 野田悦夫, 若松建吾, 朴英, 太陽電池モジュールの異常監視・診断システム, 東芝レビュー, **67**(1), 18-21(2012)
- 9) N. Iiduka, K. Itako, T. Kudoh, and K. Koh, Study on Real Time Hot-Spot Detection System for a Single-Crystal Photovoltaic Module, Trans. Of IEIEJ, **38**(2), 9-16 (2018).
- 10) Ryo Torihara et al, Examination of Compact and Online Diagnosis Methods Based on Temporal Fluctuation of String Currents of a Photovoltaic Solar Plant, IEEE Region 10 conference (Oct. 2018), 1937-1941, Jeju, Korea.
- 11) 板子一隆, 太陽光発電システムのパワーコンディショナ入門, 28-31(2014), オーム社, 東京.
- 12) Ryo Torihara et al, Development of a Portable Online String-Current Measurement Device Applicable to Small and Middle Scale PV Power Plant, The 70th Joint Conference of Electrical, Electronics and Information Engineers in Kyusyu (2017) (Sep. 2017) 337-338, Okinawa, Japan.