

Study on power estimation of PV module with Potential-Induced Degradation using EL image

Satoshi SAWADA^{*1‡} Sanshiro YAMANAKA^{*2} Yasuhiro AOYAMA^{*3}
Yuki NISHIDO^{*3} Hiroshi KOBAYASHI^{*3}

EL 画像を用いた PID モジュールの出力推定に関する研究

澤田 賢^{*1‡} 山中 三四郎^{*2} 青山 泰宏^{*3}
西戸 雄輝^{*3} 小林 浩^{*3}

Abstract

Potential-Induced Degradation can be easily discovered by using EL images. Although it is possible to detect PID from EL images, it is necessary to perform IV measurement again to estimate how much the power of the mega solar is reduced by PID. The authors are investigating a method to quantitatively estimate the power from the EL image. In this study, we evaluated R_{sh} of the PID module on a cell-by-cell basis and verified that the power could be estimated only by adjusting R_{sh} . Next, the correlation between the light emission from the EL image and R_{sh} was examined, and the power was estimated using R_{sh} estimated from the EL image. As a result, we were able to estimate the power with an error rate of about 3%. In addition, we found that the power can be estimated more easily by binarizing the amount of light emitted from the EL image and estimating R_{sh} .

Keywords: Photovoltaic cell, Potential-Induced-Degradation, EL image, Shunt resistance (R_{sh}), power estimation,

キーワード: 太陽電池, PID 現象, EL 画像, ショント抵抗(R_{sh}), 出力推定

1. はじめに

太陽光発電システム(以下,PVS)は固定価格買取制度(Feed-in-Tariff, 以下 FIT)の導入により制度開始後3年間で大量導入されるに至った⁽¹⁾。太陽光発電は当初メンテナンスフリーと言われていた⁽²⁾。しかしながら,近年,出力低下⁽³⁾や火災⁽⁴⁾などの不具合が報告されるようになり,2017年4月に改正FIT

法の施行により,保守点検・維持管理が義務化された⁽⁵⁻⁶⁾。太陽電池の不具合の一例として電圧誘起出力低下(Potential Induced Degradation, 以下PID)現象が挙げられる⁽⁷⁻⁸⁾。PID現象は高温多湿の気候地域で設置されたPVSで観測されることが多い⁽⁹⁾。太陽電池モジュール(以下PVモジュール)のフレーム・ガラスと,セル間の電位差によるセル表面への電荷蓄積⁽¹⁰⁾や,ガラスに含まれる Na^+ がセルへ移動すること等が原因

*1 Graduate School of Science and Engineering, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya 468-8502, Japan
‡ e-mail: 140442063@ccalumni.meijo-u.ac.jp

*2 Professor, Science and Engineering, Meijo University

*3 TOENEC CORPORATION

Received: Nov. 26th 2019, Accepted: Apr. 8th 2020

*1 名城大学大学院 理工学研究科

(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

‡ e-mail: 140442063@ccalumni.meijo-u.ac.jp

現在 愛知時計電機株式会社 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: 2019年11月26日, 受理日: 2020年4月8日)

で発生する。この現象により出力が大幅に低下することが報告されている⁽⁸⁾。しかしPID現象の発生したPVモジュールは外観の変化が見られないことも多く、目視では発見することが困難である。

そこで現在ではPID現象を診断する有効な方法の一つとしてEL画像を用いた点検方法がある。EL画像ではPID現象が発生している場合、セル単位の暗部として検出することができる。そのため目視点検では発見が困難であったPID現象を、EL画像を用いて発見することが可能となった^(8,11,12)。

これまでEL画像を撮影するにはPVモジュールを架台から外し、暗室で1枚ずつ撮影を行う必要があった。しかしEL撮影用のドローンが開発され、上空から大量のPVモジュールを一度に撮影できるようになり、測定の効率化が可能となっている⁽¹³⁻¹⁵⁾。しかし、現場でのEL画像を用いた診断はPID現象の発見にとどまり、経済的な損失につながるPVSの出力低下を定量的に評価するにはI-V測定等により再検査する必要がある。Bedrichらは、EL画像を用いた出力推定方法を提案している⁽¹⁶⁾。この提案は精密に補正された2枚のEL画像が必要であり、現場で簡便に活用できるまでには至っていない。

著者らの研究室では、ドローンを用いて上空からEL画像の撮影を行い、PVモジュールのPID現象を発見するだけでなく、出力低下を定量且つ簡便に推定する方法を検討している。PID現象は短絡電流(I_{sc})等、他の電気パラメータと比べセルのシャント抵抗(以下 R_{sh})が先行して低下することが報告されている^(8,11)。また、筆者らのこれまでの研究より、EL画像のセル単位の輝度の低下とセルの R_{sh} は密接に関係していることが明らかとなっている⁽¹⁷⁾。そのため、EL画像のセル1枚毎の輝度の低下からセル毎の R_{sh} を推定し、PVモジュールのI-V特性をシミュレーションにより算出することで、PID現象による出力低下をEL画像1枚から推定できると考えている。

本論文では、最初にPID現象の発生したPVモジュールの R_{sh} をセル単位で評価し、 R_{sh} の調整のみで出力を推定可能であることを検証する。次にEL画像の輝度と R_{sh} の相関性を検討し、EL画像を用いた出力推定を試みる。最後にEL画像を2値化し、より簡便に出力を推定する方法について提案する。

2. I-V特性とセルの R_{sh}

本章ではPID現象によって R_{sh} のみが低下し I_{sc} 等の他の電気パラメータは正常と仮定して検討を進める。そのため最初に、PID現象の発生したPVモジュール2枚(Mo.A, Mo.B)に対してセル単位で R_{sh} の評価を行う。これまでに、RoyらはEL画像を用い R_{sh} を定量的に評価する研究⁽¹⁸⁾を行なっている。しかしこの研究ではPVモジュールの出力に影響を及ぼすほど R_{sh} が低下した場合の検討は行なわれていない。本論文では、 R_{sh} が大きい場合は実測のI-V特性より評価し、 R_{sh} が小さい場合はI-V特性のシミュレーションより推定することで全セルの R_{sh} を定量的に評価した。次に、得られた R_{sh} に基づいてI-V特性をシミュレーションにより推定し、実測値と比較した。

2.1. I-V特性から評価したセルの R_{sh} (R_{sh} が大きい場合)

本論文ではFig.1に示す多結晶シリコン型、3クラスタ、セル枚数60枚のPVモジュールを使用した。Table.1にPVモジュールの公称値を示す。

非破壊でセルの R_{sh} を測定する方法として、セル1枚を半透過フィルムで遮光した際のPVモジュールのI-V特性を利用する方法がある⁽¹⁹⁾。Fig.1に R_{sh} 測定時の実験回路図を示している。測定では対象セル1枚を遮光率50%のフィルムで遮光した状態でI-V特性の測定を行った。Fig.2に測定結果の例を示す。ただし日射条件の違いを考慮しグラフの形状を比較し易くするため、電流は I_{sc} で、電圧は開放電圧(V_{oc})で規格化している。正常な発電状態にあるセルは、セル1枚を遮光すると1クラスタ分の電流が制限されるためFig.2の①のように段差のあるI-V特性となる。この時、Fig.2に示す(a)-(b)の区間に遮光したセルの逆バイアス領域の特性が現れるため、(a)-(b)間の傾きの逆数の絶対値から R_{sh} を算出する。

Fig.3にI-V特性から評価したセルの R_{sh} を示す。Fig.3は全てのセルに対し1枚ずつ遮光した状態でI-V測定を行い、測定したI-V特性の(a)-(b)間の傾きを、最小二乗法を用いて R_{sh} を評価した。図中の空欄は R_{sh} が小さすぎて本手法では算出できなかったセルである。本検討では2枚のPVモジュールを用いて調査したが、Fig.3は例としてPID現象がより進行しているMo.Bの結果を示した。Fig.3の結果より本手法にて得られた R_{sh} の最低値は4Ωであった。PID現象により R_{sh} が4Ω以下まで低下した場合、Fig.2の②、③のようなI-V特性となる。これは R_{sh} の低下により(a)-(b)間の傾きが大きくなるためである。①のI-V特性では(a)-(b)間に直線性が得られるが、②、③のI-V特性では(a)-(b)間に直線性が見られず、 R_{sh} を算出できない。

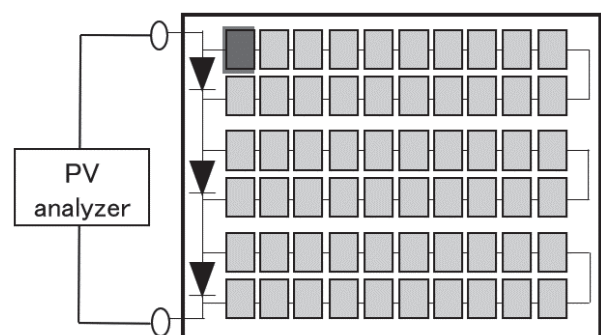


Fig.1 Circuit diagram of PV module.

図1 PVモジュールの回路図

Table 1 Nominal value of used module

表1. 使用したPVモジュールの公称値

I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	P_{max} [W]	FF
8.54	37.0	240	0.76

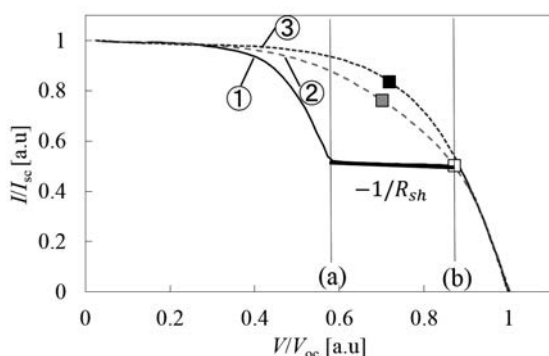


Fig.2 I-V characteristics of PV module with a shaded cell.

図2 セルの遮光した際の I-V 特性の例

16	25						14		7
	107		88	98	14	122	104	139	6
5		11		11	19	4	19		10
	225	4	110	77	67	62	85	29	7
6	4	5	7	8	106	59	55		
	8	41	165	143	104	50	4		7

Unit: [Ω]

Fig.3 R_{sh} of cell evaluated from I-V characteristics

図3 I-V 特性から評価したセルの R_{sh}

2.2. FF を利用した R_{sh} の評価 (R_{sh} が小さい場合)

Fig.2 の②, ③セルの R_{sh} はいずれも 4Ω 以下である。しかし②, ③の I-V 特性の形状には違いがあり、②のセルに対し(a)-(b)間の傾きがより急である③のセルは R_{sh} がより低下していると考えられる。また Fig.2 の■印は①~③の I-V 特性の最適動作点を(P_{max})の位置を示しているが、STC 条件では I_{sc}, V_{oc} が同じであるため R_{sh} の低下に伴い FF が増加することがわかる。そこで著者らは R_{sh} が 4Ω 以下のセルを対象に、FF から R_{sh} を推定する方法を検討した。本節では、最初に FF を規格化した FF_{norm} を導出した。その後、シミュレーションを用いて FF_{norm} と R_{sh} の関係を求めた。最後に、R_{sh} が 4Ω 以下のセルの R_{sh} を FF_{norm} と R_{sh} の関係から推定した。

セルの R_{sh} の低下が進むにつれて対象セルは短絡状態に近づく。そのため実測において遮光したセルの R_{sh} が低下している場合、FF はセルを遮光していない状態の FF の値に近づく。しかし、遮光していない状態の FF は PV モジュールの状態 (PID の有無等) によって異なる。本検討で用いた PID モジュールの FF は非遮光状態で 0.60 であった。そのため、セルの R_{sh} を低下させた時、正常な PV モジュールでは FF が 0.60 以上になる場合でも PID モジュールでは FF が 0.60 で頭打ちとなる。従って、FF から R_{sh} を推定すると、R_{sh} は本来推定すべき値よりも高く推定されてしまう可能性がある。そこで本検討では FF の値を直接用いず、FF を規格化した FF_{norm} を用いて R_{sh}

との関係を比較した。式(1)に FF_{norm} の算出式を示す。ただし FF_i は対象セルを 50% 遮光したときの FF, FF_{min} は対象セルを 50% 遮光した R_{sh} = 100Ω の時の FF, FF_{max} はセルを遮光していない状態の FF とする。FF_{norm} はセル遮光時の FF が、遮光していない時の FF にどれだけ近い値であるかを百分率で表している。

$$FF_{norm} = \frac{FF_i - FF_{min}}{FF_{max} - FF_{min}} \times 100 \quad \dots (1)$$

次に 2.1 節で用いた PID モジュールを想定してシミュレーションを行った⁽²⁰⁾。シミュレーションには回路シミュレーションソフトの P-spice を使用した。P-spice はソフト上で電気回路を組み、その回路の電気特性をシミュレーションするソフトである。PV モジュールの等価回路はセル枚数 60 枚、3 クラスタ構成の PV モジュールを想定し、Fig.1 に示すようにバイパスダイオードを含めた PV モジュール全体の等価回路を P-spice で作成した。また、セル 1 枚の等価回路を Fig.4 に示す。Table.2 に P-spice のシミュレーションで用いたセルの各パラメータを示す。出力推定では I-V 特性の第一象限を決定するパラメータを設定する必要がある。Table.2 に示したパラメータは PV モジュールの公称値を参考とした。しかし、太陽電池は公称出力の誤差 ±10% まで許容されており、実測値と公称値の I_{sc}, V_{oc} が異なる場合がある。従って I_{sc}, V_{oc} は、型番が同じで PID 現象の発生していない正常な PV モジュールから実測した I-V 特性をフィッティングし、設定値として用いた。ただし、R_s は十分に小さい値と仮定し 0.008Ω と設定した。またセルの R_{sh} は新品の PV モジュールの場合 20Ω 以上の値をとる⁽²¹⁾。そのため、R_{sh} は出力に影響を与えないほど十分に大きいと仮定し 100Ω と設定した。

シミュレーションではセル 1 枚を遮光率 50% で遮光した状態を再現するためセル 1 枚の I_{sc} を 50% 低下させた。その後 I_{sc} を 50% 低下させたセルの R_{sh} を 100Ω ~ 0.001Ω の範囲で調整し、I-V 特性を算出した。得られた I-V 特性から FF_{norm} を算出し、FF_{norm} と R_{sh} の関係を調べた。

Fig.5 は R_{sh} と FF_{norm} の関係をシミュレーションにより求めた結果である。Fig.6 は R_{sh} が 10Ω 以下のセルにおける FF_{norm} の計算結果を示している。R_{sh} が 0.01Ω よりも小さい場合、FF_{norm} はほぼ 100% の値をとる。R_{sh} が増加すると FF_{norm} は減少し、R_{sh} が 4.5Ω で FF_{norm} は 0.3% となる。R_{sh} が 4.5Ω 以上の場合、FF_{norm} は 0.3% 以下の値をとり、小さな値になった。以上より、R_{sh} が 0.01Ω ~ 4.5Ω の範囲で R_{sh} と FF_{norm} に相関性が得られることがわかった。そのため、R_{sh} が小さいセルは FF_{norm} から R_{sh} の値を推定することとした。式(2)に Fig.5 の FF_{norm} と R_{sh} の関係から R_{sh} が 0.01Ω ~ 4.5Ω の範囲で近似曲線を算出した結果を示す。ただし、x はセルの FF_{norm}, y は R_{sh} を示す。

$$y = -4.15x^3 + 9.77x^2 - 10.14x + 4.47 \quad \dots (2)$$

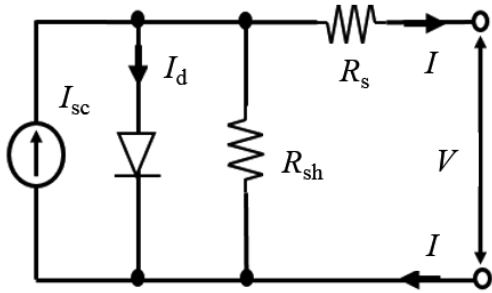


Fig.4 simulation model

図4 シミュレーションモデル

Table 2 Cell parameters used in P-spice simulation

表2 P-spice のシミュレーションで用いたセルの各パラメータ

I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	R_s [Ω]	R_{sh} [Ω]	n
8.24	0.605	0.008	100	1.05

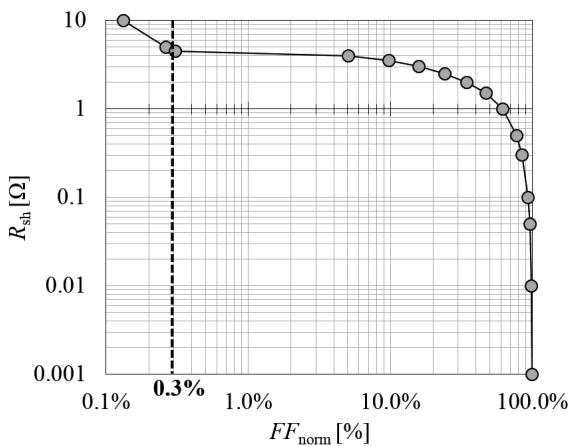


Fig.5 Correlation between R_{sh} and FF_{norm} .

図5 R_{sh} と FF_{norm} の関係

実測においてセルの R_{sh} が 4Ω 以下 (Fig.3 の空欄) の場合、セル 1 枚を 50% 遮光した実測の I-V 特性の FF から FF_{norm} を式(1)より算出し、その後、式(2)に FF_{norm} を代入することで R_{sh} を算出した。 FF_{norm} を算出する際に、 FF_{min} は PV モジュール内の全セルにおいて最も小さい FF を FF_{min} と設定した。また FF_{max} はセルを遮光していない状態の I-V 特性から得られた FF を FF_{max} と設定した。Fig.6 に例として PID 現象がより進行している Mo.B の FF_{norm} をセル毎に算出した結果を示す。Fig.3 の結果より R_{sh} が 4Ω 以上であり I-V 特性から R_{sh} を算出できる場合は FF_{norm} から推定する必要がないため「-」で示した。Fig.6 に示したように実測では測定時間の差異による日射強度や気温の変化により FF_{norm} が 100% をわずかに超える場合がある。シミュレーションでセルの R_{sh} をどれだけ低下させても FF_{norm} は 100% を超えることはない。従って FF_{norm} が一定以上の値となる場合、 R_{sh} の下限値を決定する必要がある。

そこで、Mo.B の結果を用い R_{sh} の下限値を、シミュレーシ

ョンを用いて検討した。シミュレーションは3クラスタ、セル枚数60枚を想定し、セル1枚の等価回路はFig.4に示したモデルを使用した。パラメータはTable 2で示した値を用い、 R_{sh} の値のみセル毎に算出した結果を代入した。 R_{sh} が 4Ω 以上のセルはFig.3の結果を用いた。また R_{sh} が 4Ω 以下の場合 FF_{norm} を式(2)に代入して得られた R_{sh} を使用し、設定した下限値を下回る場合のみ R_{sh} の下限値の値を代入した。 R_{sh} の下限値については $1\Omega, 0.1\Omega, 0.01\Omega, 0.001\Omega$ の4パターンとし、シミュレーションから算出した I-V 特性が、実測時の I-V 特性に最も近い値を下限値と設定した。

Fig.7 に R_{sh} の下限値を変化させた時の I-V 特性と実測時の I-V 特性を比較した結果を示す。Fig.7 より R_{sh} の下限値が 0.1Ω の時、実測値に最も近づくことがわかった。Fig.5 の関係より R_{sh} が 0.1Ω に対応する FF_{norm} は 93% である。従って本検討では FF_{norm} が 93% 以上の場合、 R_{sh} を 0.1Ω に統一し推定を行った。

Fig.8 に Mo.B において R_{sh} が 4Ω 以下のセルに対して FF_{norm} を用いて R_{sh} を算出した結果を示す。 FF_{norm} を用いて算出したセルは灰色で表している。白色のセルは Fig.3 で得られた結果を示している。以上より 2.1 節の手法と本節で提案した手法の結果を合わせることで全てのセルの R_{sh} を定量的に評価できることがわかった。また Fig.9 に Mo.B と同様の方法により推定した Mo.A の R_{sh} の結果を示す。

-	-	55%	75%	69%	78%	77%	-	98%	-
101%	-	68%	-	-	-	-	-	-	-
-	87%	-	79%	-	-	-	-	92%	-
97%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	89%	98%
101%	-	-	-	-	-	-	-	101%	-

Fig.6 Calculation results of FF_{norm}

図6 FF_{norm} の算出結果

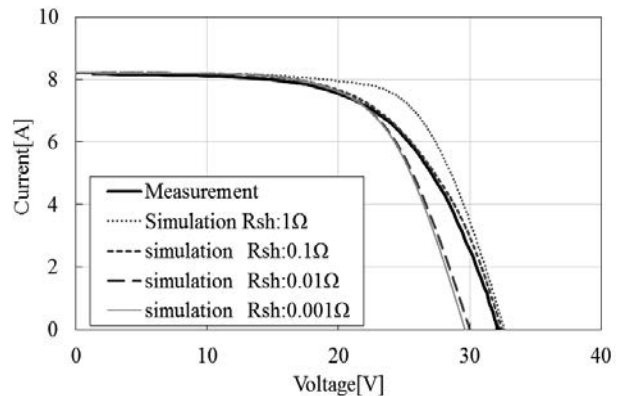


Fig.7 I-V curves of PV module with the low R_{sh} is changed

図7 R_{sh} の下限値を変化させた時の I-V 特性

16	25	1.15	0.6	0.76	0.54	0.56	14	0.1	7
0.1	107	0.77	88	98	14	122	104	139	6
5	0.30	11	0.49	11	19	4	19	0.18	10
0.1	225	4	110	77	67	62	85	29	7
6	4	5	7	8	106	59	55	0.26	0.1
0.1	8	41	165	143	104	50	4	0.1	7

Unit: [Ω]

Fig.8 Results of evaluating R_{sh} of Mo.B
 図8 Mo.Bの R_{sh} の評価結果

95	29	0.47	0.56	41	0.3	0.14	0.1	0.56	0.1
0.1	16	175	7	7	5	4	16	0.12	205
6	0.62	27	4	145	122	122	6	153	0.1
0.1	149	64	56	75	263	167	57	8	222
26	38	260	212	153	215	16	18	76	0.56
92	164	217	7	110	7	15	18	6	0.19

Unit: [Ω]

Fig.9 Results of evaluating R_{sh} of Mo.A
 図9 Mo.Aの R_{sh} の評価結果

2.3. R_{sh} を用いた出力推定

本節ではPIDモジュール(Mo.A, Mo.B)各セルの R_{sh} をパラメータにしたI-V特性のシミュレーション結果と実測で得られたI-V特性の比較を行なった。シミュレーションは3クラスタ、セル枚数60枚を想定し、Fig.1に示すようにバイパスダイオードを含めたPVモジュール全体の等価回路をP-spiceで作成した。またセル1枚の等価回路はFig.4に示すモデルを使用した。パラメータはTable 2で示した値を用い、 R_{sh} の値のみセル毎に算出した結果を代入し、I-V特性をシミュレーションした。

Fig. 10はMo.Aについて Fig.9で得られた R_{sh} に基づいて計算されたI-V特性のシミュレーション結果と実測したI-V特性を比較したものである。I-V特性を実測した時の日射強度は999[W/m²]であった。出力の絶対誤差率は2%、FFの絶対誤差率は2%であった。

Fig.11はMo.Bについて Fig.8で得られた R_{sh} に基づいて計算されたI-V特性のシミュレーション結果と実測したI-V特性を比較したものである。I-V特性を実測した時の日射強度は1090[W/m²]であった。出力の絶対誤差率は1%、FFの絶対誤差率は0%であった。

本検討においてMo.AのI-V特性の推定ではFig.7に示すように、Mo.BのI-V特性にフィッティングして設定した R_{sh} の下限値を用いた。だが、Mo.A, Mo.Bいずれの場合においても実測値に近いI-V特性を再現できることが分かった。またPIDモジュールのシミュレーションでは、 R_{sh} のみを低下させ、

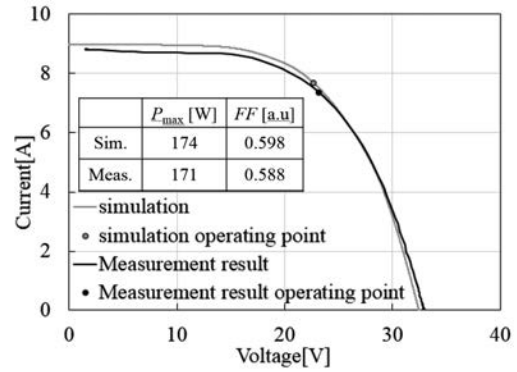


Fig.10 Comparison of the measured values of Mo.A and the I-V characteristics simulated using R_{sh}
 図10 Mo.Aの実測値と R_{sh} を用いてシミュレーションしたI-V特性の比較

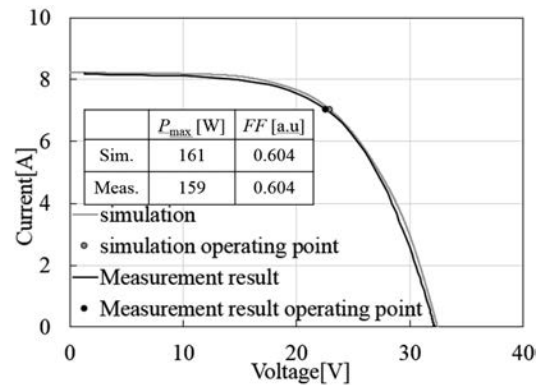


Fig.11 Comparison of the measured values of Mo.B and the I-V characteristics simulated using R_{sh}
 図11 Mo.Bの実測値と R_{sh} を用いてシミュレーションしたI-V特性の比較

他の電気パラメータは正常と仮定したが実測値に近い結果を得られることがわかった。以上よりPIDモジュールの出力を推定する方法としてセルの R_{sh} を調整してI-V特性を再現する手法は妥当であることがわかった。

3. EL輝度を用いた出力推定

2章ではセル毎に R_{sh} を測定し、 R_{sh} の調整のみでI-V特性を再現できることを確認した。本章では、EL画像の輝度と R_{sh} の相関関係について検討した。その後、EL画像を用いてI-V特性の推定を試みた。

EL画像の撮影の際にはPIDモジュールに電流源(Kikusui PAS 60-12)を接続し8Aの電流を印加することで、PIDモジュールから近赤外光を発生させた。このPIDモジュールの発光状態をEL画像撮影用のカメラで撮影を行った。撮影時のカメラの設定はF値を4.0、シャッタースピード5sec、ISO感度を800とし、撮影したEL画像がハレーションの起こらない条件に設定した。また撮影は外部からの光の影響を防ぐため

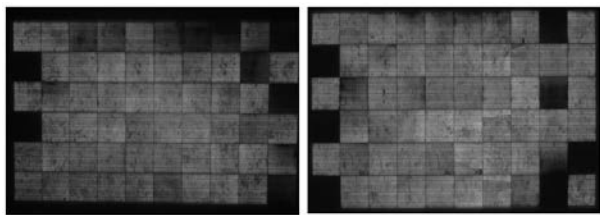
に暗室内で行った。

EL 画像のセル毎の輝度は画像処理ソフト (GIMP2.8.20) を用いて算出した。EL 画像に対しセル 1 枚毎に範囲指定し、セル内の輝度の平均値を求めることでセル毎の輝度を算出した。また測定環境の変化を考慮するため、本検討では PV モジュール内の最大輝度のセルを基準として、各々のセルの輝度を百分率で表した。

Fig.12 に撮影した EL 画像を示す。Fig.13 に輝度と R_{sh} の関係を示す。グラフの破線は輝度 50% を示している。輝度が 50% 以上の場合、ばらつきが大きく輝度と R_{sh} の相関性を得られないことがわかった。ばらつきの原因としては口径食やセルの量子効率の違い⁽¹⁰⁾等が考えられる。輝度が 50% を下回る場合、 R_{sh} は 1Ω 以下に低下していることが確認できる。また、輝度が 50% 以下の結果を用いて輝度と R_{sh} の相関係数を算出したところ 0.87 であった。以上より輝度と R_{sh} に強い相関があることが確認できた。

これより Fig.13 の輝度と R_{sh} の関係を元にセルの輝度から R_{sh} を推定する式を導出する。輝度が 50% 以上の場合、輝度と R_{sh} の相関性は得られない。そのため輝度が 50% 以上のセルは漏れ電流が流れないほど R_{sh} が大きいと考え、一律 100Ω とした。Fig.14 に Fig.13 の輝度と R_{sh} の関係について 50% 以下の部分を拡大した結果を示す。輝度が 50% 以下の時、輝度と R_{sh} の関係は直線であるとし、一次式で関係式を導出した。一次式の妥当性については後程改めて評価する。式(3)に輝度と R_{sh} の関係式を示す。ただし、 x は輝度、 y は R_{sh} を示す。

$$y = 0.791x + 0.003 \quad \dots (3)$$



(a)Mo.A (b)Mo.B

Fig.12 EL image of PID module

図 12. PID モジュールの EL 画像

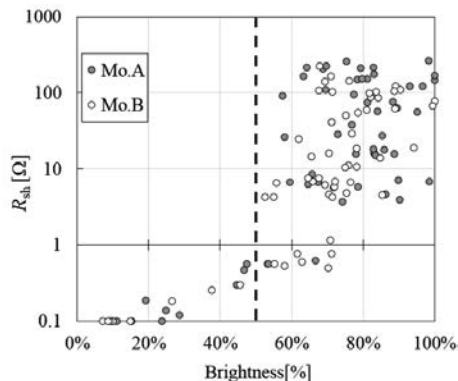


Fig.13 Correlation between brightness of EL image and R_{sh} .

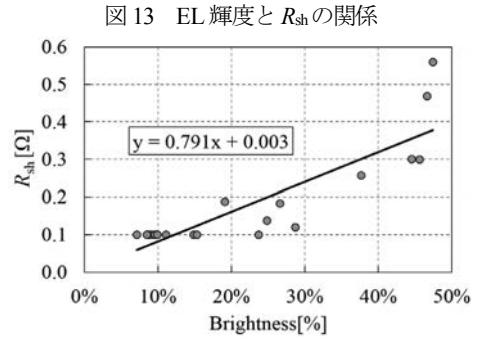


Fig.14 Correlation between brightness of EL image and R_{sh} with brightness below 50%

図 14 輝度が 50% 以下の EL 輝度と R_{sh} の関係

Fig.15 に Mo.A の EL 画像の輝度から推定した R_{sh} の結果を示す。輝度が 50% 以下であり式(3)から R_{sh} を推定したセルはグレーで示した。また Fig.16 に実測により得られた I-V 特性と Fig.15 で得られた R_{sh} に基づいて計算された I-V 特性のシミュレーション結果を示す。ただし、 R_{sh} の推定結果が 0.1Ω 以下のセルは 0.1Ω と推定した。実測の I-V 特性では日射強度 $1,090[W/m^2]$ の条件で測定した。Fig.16 の●印はそれぞれの最適動作点を示している。参考として FF の絶対誤差率を算出したところ 3% であった。また出力の絶対誤差率は 4% であった。

Fig.17 に Mo.B の EL 画像の輝度から推定した R_{sh} の結果を示す。輝度が 50% 以下であり式(3)から R_{sh} を推定したセルはグレーで示した。また Fig.18 に実測より算出した I-V 特性と Fig.17 に基づいたシミュレーションより算出した I-V 特性を示す。Fig.18 の●印はそれぞれの最適動作点を示している。実測の I-V 特性では日射強度 $998[W/m^2]$ の条件で測定した。参考として FF の絶対誤差率を算出したところ 2% であった。また出力の絶対誤差率は 3% であった。

EL 画像を用いた推定では、輝度 50% 以上のセルをすべて R_{sh} が 100Ω と推定した。しかし Fig.16, Fig.18 の結果より Mo.A, Mo.B 共に I-V 特性の形状をおおむね推定できた。以上の結果より R_{sh} が大きい場合、I-V 特性の形状は R_{sh} の値に依存せず、 R_{sh} が小さいセルのみ EL 画像から R_{sh} を推定することで I-V 特性を再現できることがわかった。また、Fig.14 において輝度と R_{sh} の関係を式(3)で近似している。式(3)を使った近似でも I-V 特性が精度よく推定できており、式(3)を使った近似は妥当であると考えてよい。

100	100	0.37	100	100	0.36	0.20	0.19	0.38	0.1
0.1	100	100	100	100	100	100	100	0.23	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.12
0.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.15

Unit: $[\Omega]$

Fig.15 R_{sh} estimated using Mo.A EL image

図15 Mo.A のEL 画像から推定した R_{sh}

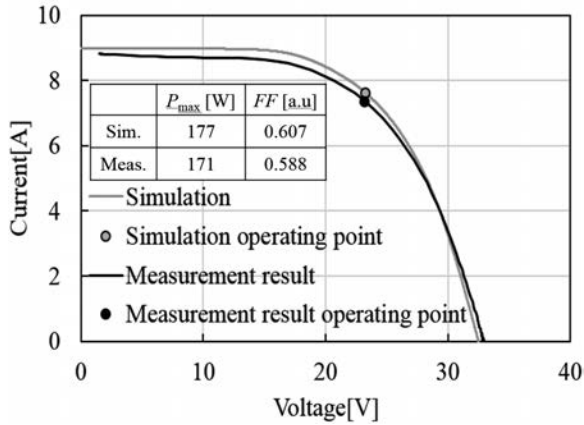


Fig.16 Comparison between actual measured value of Mo.A and I-V characteristics estimated using EL images

図16 Mo.A の実測値とEL 画像から推定した I-V 特性の比較

100	100	100	100	100	100	100	100	0.12	100
0.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	0.36	100	100	100	100	100	100	0.21	100
0.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	0.30	0.1
0.1	100	100	100	100	100	100	100	0.1	100

Unit: [Ω]

Fig.17 R_{sh} estimated using Mo.B EL image

図17 Mo.B のEL 画像から推定した R_{sh}

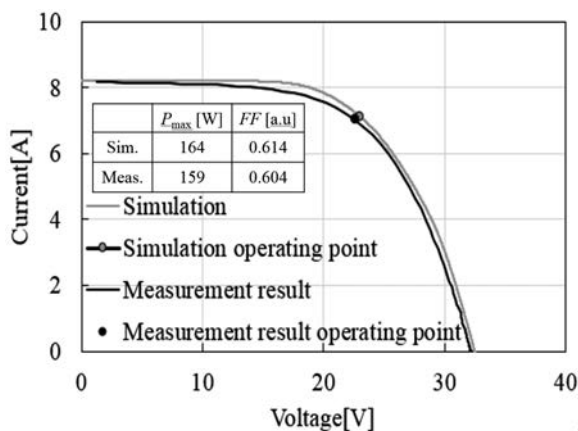


Fig.18 Comparison between actual measured value of Mo.B and I-V characteristics estimated using EL images

図18 Mo.B の実測値とEL 画像から推定した I-V 特性の比較

4. 簡易的な出力推定に関する検討

3章では輝度と R_{sh} の相関について検討し、輝度が50%以下のセルの R_{sh} をEL 画像から推定することで出力推定が可能であることが明らかとなった。しかし出力推定を行うには Fig.14 の関係から推定式を求める必要があり、実用的な方法とは言い難い。従って本章では現場で使用する実用的な方法として、輝度と R_{sh} の推定式を必要としない簡便な出力推定方法について提案する。

3章ではEL 画像の輝度が50%以上の時 100Ω とし輝度が50%以下のセルに対してのみ、 R_{sh} の推定を行った。Fig.15, Fig.17 の灰色で示したセルは輝度が50%以下のため R_{sh} を推定式より算出を行ったセルを示しているが、いずれのセルも $0.1\Omega \sim 0.4\Omega$ であることが分かった。そのため、本章ではEL 画像からより簡便に出力を推定する方法として、輝度が50%以上のセルを 100Ω 、輝度が50%以下のセルの R_{sh} を 0.1Ω と2値化し R_{sh} の推定を行った。その後得られた R_{sh} に基づいて I-V 特性のシミュレーションを行い、I-V 特性の形状および P_{max} について検討した。

Mo.A の R_{sh} を2値化した結果を Fig.19 に、Mo.B の R_{sh} を2値化した結果を Fig.20 に示す。I-V 特性は Mo.A, B いずれのシミュレーション結果においても実測値との差が大きくなっている。これは R_{sh} を 0.1Ω と低く見積もったことが原因と考えられる。しかし、Mo.A の出力の絶対誤差率は2%、FF の絶対誤差率は3%、Mo.B の出力の絶対誤差率は1%、FF の絶対誤差率は1%であり、 R_{sh} を精密に推定した時の絶対誤差率とあまり変わらない結果となった。

Table.3 は正常な PV モジュールの実測値に対する出力低下率を、I-V 特性の実測値及びEL 画像から簡易的に求めた結果を比較したものである。環境条件については、Mo.A は日射強度 $916[w/m^2]$ 、Mo.B は日射強度 $863[w/m^2]$ で測定を行った。また正常な PV モジュールは各 PID モジュールの測定直後に測定し、各 PID モジュールと同じ日射強度で I-V 特性を測定した。I-V 特性と、EL 画像から簡易的に推定した時の出力低下率の差は Mo.A, Mo.B、いずれの場合も3ポイント以下であり、十分小さいことが分かる。

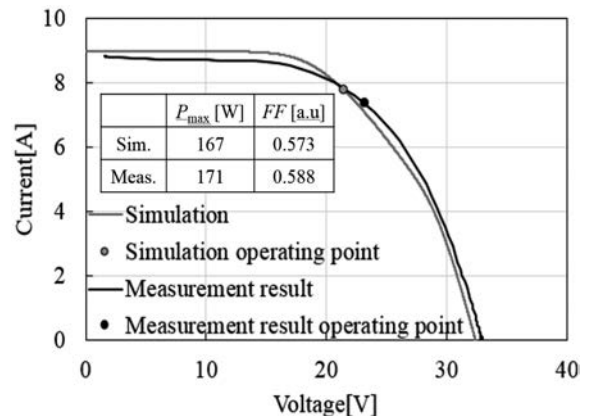


Fig.19 Simulation result of binarized Mo.A

図 19 Mo.A を 2 値化した時のシミュレーション結果

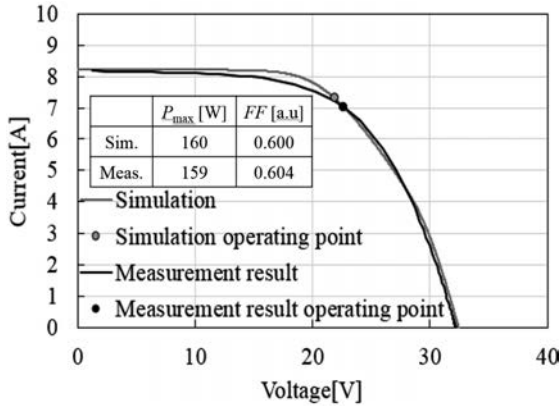


Fig.20 Simulation result of binarized Mo.B

図 20 Mo.B を 2 値化した時のシミュレーション結果

Table 3 Comparison of power reduction rate measured by each inspection method.

表 3 各検査方法から測定した出力低下率の比較

	I-V characteristics	EL image
Mo.A	80.2%	79.9%
Mo.B	79.4%	81.9%

5. まとめ

本報告ではPID現象が発生したPVモジュールの R_{sh} を評価し R_{sh} の調整のみで出力推定が可能か検討した。その後EL画像の輝度と R_{sh} の関係について相関性を調査し、EL画像から出力を簡便に推定する方法について検討した。

以下にその結果をまとめる。

- (1) PID現象によって R_{sh} が低下したセルはI-V特性から直接 R_{sh} を評価することができない。それらのセルはFFを用いて R_{sh} を推定することで定量的に評価することができる。上記の方法で得られた R_{sh} を用いてシミュレーションを行うことでPIDモジュールのI-V特性を再現可能である。
- (2) 輝度が50%以下の場合に限り、輝度と R_{sh} の相関が得られる。輝度が50%以上の場合、 R_{sh} は推定できないが十分に大きい値であるため R_{sh} を一律100Ωと推定してもI-V特性の形状にほぼ影響はない。従って輝度が50%以下に低下したセルのみEL画像から R_{sh} を推定することでPIDモジュールのI-V特性を再現可能である。
- (3) 50%以下のセルの R_{sh} をすべて0.1Ωと推定しシミュレーションを行うことで絶対誤差率3%以内で出力を推定することができる。すなわち、EL画像の輝度を2値化して R_{sh} を推定することでより簡便に出力を推定することができる。

現場での診断ではアレイ単位の出力推定を要求される。本報告にて提案した手法を用いてPIDモジュールのI-V特性をEL画像から推定し、正常なPVモジュールのI-V特性と合成することで、アレイ単位の出力推定が可能である。従って本報告よりPID現象によるPVSの出力低下をEL画像から推定可能になると考えている。

ただし、本論文では2枚の同種のPID発生モジュールを用いて出力推定方法を提案している。提案の手法で出力推定を実用化するためには異種モジュールにおいても本論文で提案した推定方法が適応可能か今後検討を進める必要がある。

また、本論文ではEL撮影についても撮影条件を限定している。特に、ドローンを用いたEL検査では本論文で使用したカメラの設定では撮影が難しい。そのため今後は、ドローンで撮影したEL画像を分析するために、カメラの撮影条件の検討や R_{sh} 、輝度をパラメータとした感度分析を行い、より汎用性の高い出力推定方法の検討を進める予定である。

6. 参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁, 再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック 2018年度版, 2-5 (2018), 経済産業省, 東京.
- 2) 浜川圭弘, 桑野幸徳共編, アドバンストエレクトロニクス 1-3 太陽エネルギー工学 太陽電池, 10-12 (1994), 培風館, 東京
- 3) 加藤和彦, 太陽光発電システムの不具合事例ファイル, 12-14 (2010), 日刊工業新聞社, 東京.
- 4) 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(住宅用太陽光発電システムから発生した火災事故等), 10-12 (2019), 消費者庁, 東京.
- 5) 経済産業省, 電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法, (2016).
- 6) 資源エネルギー庁, 事業計画策定ガイドライン(太陽光発電), 21-30 (2019). 経済産業省, 東京.
- 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) W. Luo et al., Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review, Energy Environ. Sci., 43 (10), 43-68 (2017)
- 9) Y. Chen et al., Investigation of Correlation between Field Performance and Indoor Acceleration Measurements of Potential Induced Degradation (PID) for c-Si PV Modules, 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2017), 1408-1413, Amsterdam, Netherlands
- 10) Naumann V., Geppert T., Großer S., Wichmann D., Krokoszinski H., Werner M., Hagendorf C. Potential-induced Degradation at Interdigitated Back Contact Solar Cells. Energy Procedia, 55, 498-503 (2014)
- 11) 土井卓也, 新規信頼性試験法の開発, 第II期高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム最終成果報告書, 227-255 (2013). (accessed:Nov.1st2019) https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/results/past_presentation/2013module_consortium/4_3.pdf
- 12) Xianfang Gou, Xiaoyan Li, Su Zhou, Shaoliang Wang, Weitao Fan, Qingsong Huang, PID Testing Method Suitable for Process Control of Solar

Cells Mass Production, International Journal of Photoenergy Volume 2015, (accessed:Nov.1st2019) <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2015/863248/>

13) 西戸雄輝, 青山泰宏, ドローンを活用した太陽電池のEL測定診断, 電気現場, **57** (668), 70-73 (2018).

14)西戸雄輝, 太陽光発電設備のオンサイト EL 測定, 電気設備学会誌 **39** (11), 708 (2019).

15)西戸雄輝, 青山泰宏, 太陽光発電設備のメンテナンス用ドローンの開発, ロングライフビル推進協会誌, **31**(168),35-38 (2019).

16) K. G. Bedrich et al. Quantitative Electroluminescence Imaging Analysis for Performance Estimation of PID-Influenced PV modules IEEE J. Photovolt, **16** (8), 669-77 (2018)

17) S. Sawada, Kentaro HADA, TAKESHITA Ryuichiro, Sanshiro YAMANAKA, Yasuhiro AOYAMA, Yuki NISHIDO, Hiroshi KOBAYASHI, Correlation between brightness of EL image and Rsh of PV module with hot spot, Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, (2017), C-20, Ehime, Japan

18) S. Roy and R. Gupta, Quantitative Estimation of Shunt Resistance in Crystalline Silicon Photovoltaic Modules by Electroluminescence Imaging, IEEE J. Photovolt, **9** (6), 1741-1747 (2019)

19) S. Yamanaka, T. Mishina, H. Kawamura, H. Kawamura, H. Ohno, K. Naito, Effect of the Reverse Bias Characteristics of a PV Cells on I-V Characteristics of PV Module with a Cell Lowered the Generating Power, JSES, **29** (2), 44-52 (2003).

20)Volker Quaschnig and Rolf Hanitsch, Solar Energy, **56** (6), 513-520 (1996).

21)Hiroki SATO, Sanshiro YAMANAKA, Yasuhiro AOYAMA, Yuki NISHIDO, Hiroshi KOBAYASHI, Study on Evaluation Method of Shunt Resistance Reduction of Photovoltaic Cell Using Thermal Images, Journal of Japan Energy Society, **44**(6), 73-79 (2018).