

Performance inspection and diagnosis of PV modules and strings by continuous monitoring of I_{mp} and V_{mp}

Yoshihiro HISHIKAWA^{*1,4‡}Masahiro YOSHITA^{*1}Yasuo CHIBA^{*1}Manit SEAPAN^{*2,3}Keiichi OKAJIMA^{*2}

I_{mp} , V_{mp} 常時監視による PV 性能評価・動作診断技術

菱川 善博^{*1,4‡}吉田 正裕^{*1}千葉 恭男^{*1}Manit Seapan^{*2,3}岡島 敬一^{*2}

Abstract

Precise performance characterization and diagnosis of photovoltaic (PV) modules and strings by using the maximum-power voltage V_{mp} and maximum-power current I_{mp} during MPPT operation are investigated and verified by simulation and experiments. They are analyzed by using new temperature correction formulas, which take into account the voltage-dependent temperature coefficient of the crystalline silicon PV devices. Slight change in the P_{max} under any specified conditions such as STC (1 kW/m², 25 °C) can be sensitively detected with precision better than about 1%. Experimental and simulation results indicate that variation of the V_{mp} and I_{mp} by partial shading caused by various factors such as weeds and nearby PV modules can be also sensitively detected, even when only one cell in the string is partially shaded.

Keywords: photovoltaics, outdoor measurement, diagnosis, temperature correction, I_{mp} , V_{mp}

キーワード: 太陽電池, 屋外測定, 性能診断, 温度補正, I_{mp} , V_{mp}

1. はじめに

太陽光発電 (PV) システムが増加すると共に, PV モジュール・システムの性能・動作状態や不具合を屋外の自然太陽光下で正確に評価する必要性が益々高まっている。屋外 I-V 測定による評価については, 太陽電池モジュール型照度センサ (PVMS) による照度測定, 高精度温度測定・補正技術や照度むらフィルタ等の技術がこれまでに開発され, 低コストな計測器を用いて 0.5% (1 σ) 程度以内の良好な再現性で屋外性能評価が可能であることが示されている^{1,2)}。しかし稼働中の PV モジュールの I-V 特性を測定するためには, システムの動作を停止する必要があるため, 追加の制御回路が必要となる上に, その間の電力が無駄になるという問題点があった。そのため従来の常時監視はパワーコンディショナー (PCS) 単位のシステム出力係数や, スtring 単位の発電量等を基にして行われることが多かった。常時監視技術についても様々な計測・統計・解析方法が開発され実施されている³⁻⁶⁾。最近筆者らは最大電力点追従制御 (MPPT) 稼働中でも計測可能な最大出力

動作電流 I_{mp} と最大出力動作電圧 V_{mp} を用いて, 太陽電池の STC 等任意の照度温度における性能や, その僅かな変化を正確に評価できる方法を開発した⁷⁻¹⁰⁾。本研究ではその手法を用いて参考文献^{7,8)}の内容を拡張し, MPPT 稼働する PV スtring の性能評価と部分影等の動作診断について, シミュレーションによる解析と複数種類の String での実証について議論する。

2. 実験

実験は産総研九州センター (佐賀県鳥栖市) の太陽電池モジュール屋外曝露サイトで稼働中の 4 つの String (E-1A, E-1B, W-1C, W-1D) を用いて行った。W-1D の外観を Fig. 1 に示す。いずれも結晶シリコン太陽電池モジュール (W-1C, D は PERC) を使用しており, 各 String の構成と直近のモジュール屋内 I-V 測定から推定した性能パラメータの平均値を Table 1 に示す。MPPT 動作中の I_{mp} と V_{mp} は電流センサ IsoBlock I-FG-1C と電圧センサ IsoBlock V-1C をモジュールと PCS 間のケーブルに設置し

*1 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki 305-8568

‡e-mail: y-hishikawa@aist.go.jp

*2 Department of Risk Engineering, University of Tsukuba

*3 present address: King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT)

*4 present address: Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

Received: January 27, 2022, Accepted: March 18, 2022

*1 国立研究開発法人産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2

‡e-mail: y-hishikawa@aist.go.jp

*2 筑波大学システム情報系

*3 現所属: モンクット王工科大学トンブリー校 (タイ王国)

*4 現所属: 立命館大学総合科学技術研究機構

(原稿受付: 2022 年 1 月 27 日, 受理日: 2022 年 3 月 18 日)

で計測した。日射照度 G は、E-1A および W-1D ストリングに隣接して設置した KIS 製 PVMS (Fig. 1 破線丸) を用いて計測した。モジュール温度は、ストリング中央付近のモジュール裏面に貼りつけた白金抵抗温度センサを用いて計測した¹⁰⁾。各データは 0.1 秒間隔で毎日午前 5 時～午後 7 時の間に E-1A, B は Hioki LR8402 ロガー、W-1C, D は LR8450 ロガーを用いて計測／記録した。これらのストリングは通常は PCS に接続されているが、10 分毎に数秒間切り替え機によって I-V テスタに接続されるので、その数秒間を除いた I_{mp} , V_{mp} を計測・解析した。なお後に議論するように、この手法は測定間隔の長短に関わらず適用可能である。本研究で用いた PVMS の時間応答は太陽電池モジュールと同様に、日射の時間変動より遥かに高速なので、日射の時間変動そのものによる測定誤差は無視できる。更に PVMS のスペクトル感度と角度特性は市販の太陽電池モジュールへの近似度が高いので、入射角が非常に大きい等の特別な場合を除いてこれらの補正の必要なく、1% 程度以内の再現性で屋外性能評価を行うことができる²⁾。一方で雲の影が地上を移動すると日射の空間むらも同時に発生するので¹¹⁾、PV モジュール・ストリング内の日射むらや、PV モジュール・ストリングと PVMS の日射の差がある場合には測定誤差が発生する。本研究ではこれらの影響を低減するために¹¹⁾、日射の時間変動が 5 秒間で 5 W/m^2 以内のデータを解析に用いた。

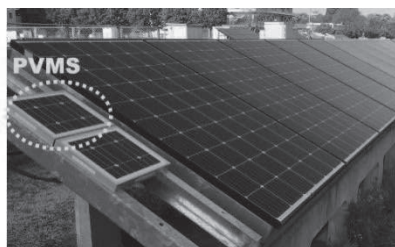


Fig. 1 Test site (W-1D) at AIST Kyushu Center.

Table 1 Summary of the PV strings in the present study.

String	No. of modules	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	P_{max} (W)	No. of cells in module	Start measurement
E-1A	7	7.49	23.98 (167.9)	179.5 (1257)	48	2019/12/22
E-1B	5	8.07	30.33 (151.6)	244.6 (1223)	60	2019/12/22
W-1C	5	8.64	31.61 (158.0)	273.2 (1366)	60	2020/12/11
W-1D	5	8.65	31.78 (158.9)	274.7 (1374)	60	2020/12/11

3. I_{mp} , V_{mp} 常時監視による PV 性能評価

3. 1 測定結果

E-1A ストリングの快晴日における照度 G 、モジュール裏面温度 T_1 及び I_{mp} , V_{mp} の測定結果例を Fig. 2(a)及び 2(b)に示す。参考文献^{7,8,10)}と同様に I_{mp} は概ね照度に比例している。 V_{mp} はモジュール温度の低い朝方に高く、モジュール

温度の高い昼間に低い。0.1 秒間隔で計測した I_{mp} と V_{mp} の生データには MPPT 制御による周波数数 Hz、振幅 $\pm 1\%$ ～数%の振動が見られる¹⁰⁾ので、Fig. 2 では 100 点 (10 秒間) の平均値を示す。以降の議論・解析でもすべて 100 点の平均値を用いた。0.1 秒以外の計測間隔でも本研究の手法は全く問題なく使用できる。その際に MPPT 制御のサイクル時間よりも十分長い時間データを平均化することによって、測定誤差を低減することができる。

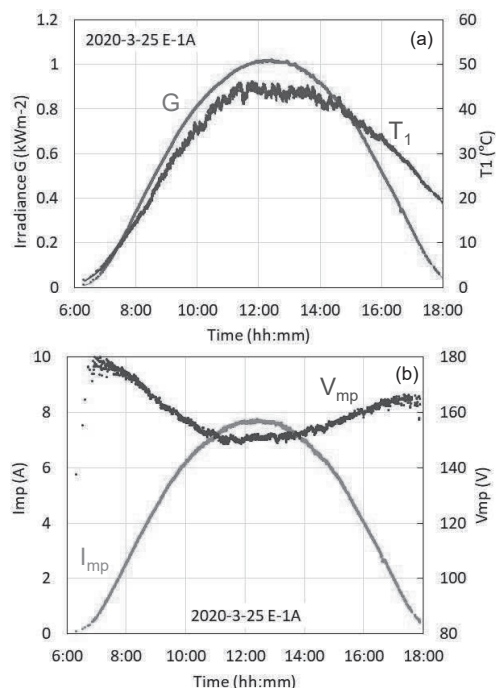


Fig. 2. Examples of the measured (a) irradiance and temperature, and (b) I_{mp} and V_{mp} for E-1A.

3. 2 I_{mp} , V_{mp} の温度補正

Fig. 2(b)のような屋外計測データは幅広い照度・温度に亘るので、 I_{mp} , V_{mp} の温度照度による変化とモジュール性能や不具合による変化を区別して生データから直読することは難しい。このため従来は一定期間のデータを用いた解析・統計や複数 PV ストリングの相対比較を用いて、性能や不具合診断が行われることが多かった^{3-6,12)}。最近筆者らは、結晶シリコン太陽電池のダイオード特性理論式に基づいた実験結果の解析から、(1)(2)式を用いて結晶シリコン太陽電池の I_{mp} , V_{mp} の温度補正を行うことができることを明らかにした。(1)(2)式はダイオード特性の理論式と、 I_{mp} の温度依存性が実験・シミュレーション結果共に非常に小さいことを考慮した近似式である。(1)式の 1 行目は I-V 特性の温度補正式と同じである²⁾。これだけでも V_{mp} の温度特性を概ね近似しているが、2 行目を考慮することでより精度が向上する⁹⁾。厳密には n , α の最適値は太陽電池の種類によって異なると予想されるが、ここでは様々な結晶シリコン太陽電池で良い近似となることが以前の研究^{2,7-10)}で確認されている $nE_g/q = 1.232 \text{ V}$, $\alpha = 0.05\%/K$ を使用し

た.これらの値を用いて各種結晶シリコン太陽電池モジュールやストリングの V_{mp} を $\pm 0.5\%$ (1σ) 程度の高精度で温度補正できる^{2,7-10)}.この方法は統計処理やモジュール個別の温度係数の情報等が不要で,各種結晶シリコン太陽電池モジュールやストリングに適用可能である.(1)(2)式を用いて Fig. 2(b)の V_{mp} , I_{mp} を 25°C に補正した V_{mp2} と, I_{mp2} ($=I_{mp}$) を照度 G で規格化した I_{mp2}/G を Fig. 3(a)に, それらの積から求めた P_{max2}/G を Fig. 3(b)に示す.今後 (1)(2)式に合わせて計測値を V_{mp1} , I_{mp1} , P_{max1} , 温度補正後の値を V_{mp2} , I_{mp2} , P_{max2} と記する.

$$V_{mp2} = \left\{ V_{mp1} + \frac{T_2 - T_1}{T_1} \left(V_{mp1} - \frac{N_c n E_g}{q} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\times \{1 + \alpha(T_2 - T_1)\} \quad (2)$$

$$I_{mp2} = I_{mp1}$$

V_{mp1} , V_{mp2} : 補正前後の V_{mp} ,

I_{mp1} , I_{mp2} : 補正前後の I_{mp} ,

T_1 , T_2 : 補正前後のモジュール絶対温度,

N_c : セル直列数,

n : 太陽電池セルのダイオード理想係数,

E_g : 結晶シリコンのバンドギャップ ($\approx 1.12 \text{ eV}$),

q : 電子の電荷,

α : I_{sc} の温度係数.

3.3 STC における I_{mp} , V_{mp} , P_{max} の評価と診断

温度補正した I_{mp2}/G , V_{mp2} や P_{max2}/G は照度だけに依存するので, Fig. 3(b)のように照度に対してプロットしたグラフの形は, PV ストリングの特性が不変なら, 測定日等の条件に依存せず一定である¹⁰⁾.例えば Fig. 3(b)とほぼ同時期の測定データを Fig. 3(c)に示す.快晴日ではないので, 雲による日射の場所むらによる誤差を避けるために, 前述の方法で一部のデータが削除されているが, P_{max2}/G の値はほぼほぼ全照度域にわたって快晴時の結果 (Fig. 3(b)) と $\pm 1\%$ 以内で一致している. Fig. 3(b)(c)の照度 1 kW/m^2 における値は, 25°C , 1 kW/m^2 , つまり STC での P_{max} に対応している.これらの値は Table 1 に示す直近のモジュール I-V 特性の屋内 STC 測定から求めた値 (図中白抜き丸印) とほぼ一致しており, 詳細は次項で議論する.

3.4 MPPT 稼働中の PV ストリングの常時監視

本研究の手法では計測値として V_{mp1} , I_{mp1} , G とモジュール温度 T_1 の瞬時データだけを用いるので, モジュールの温度係数や一定期間の統計データ等は不要であり, PV ストリングのリアルタイム診断と長期連続監視の両方を同時に行うことが可能である.更に $0.2 \sim 1 \text{ kW/m}^2$ 以上の幅広い照度で, また Fig. 3(b)(c)に例示するような快晴, 晴れ時々曇に加えて曇天, 一部雨天を含めて様々な天候でストリングの稼働状態を連続監視することができることも利点である^{7,9,10)}.ストリング性能連続監視の一例として, E-

1A ストリングの 2019 年 12 月～2021 年 11 月の約 2 年間における P_{max2}/G の日平均値を Fig. 4(a)に示す.灰色丸印は照度 $0.36 \sim 0.44 \text{ kW/m}^2$, 緑色は $0.66 \sim 0.74 \text{ kW/m}^2$, 赤色は $0.95 \sim 1.05 \text{ kW/m}^2$ での P_{max2}/G の日平均である.

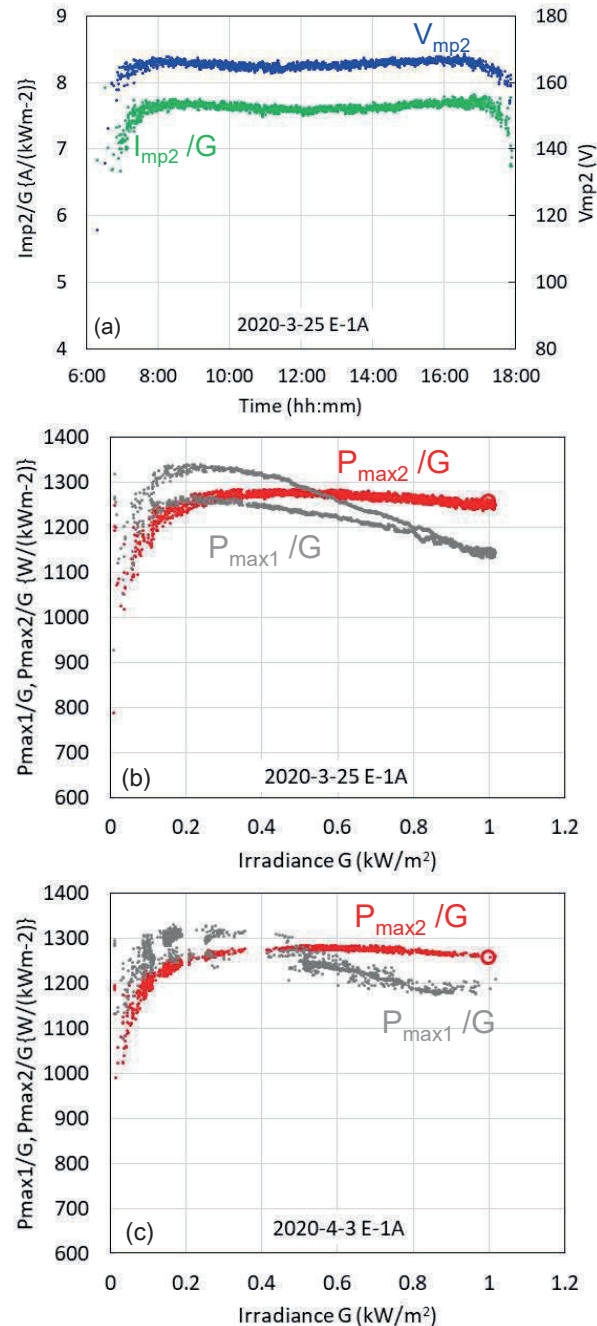


Fig. 3 (a) V_{mp2} and I_{mp2}/G of E-1A corrected to 25°C from the data of Figs. 2(b). (b) P_{max2}/G determined as the product of V_{mp2} and I_{mp2} of (a). (c) Similar results as (b) measured on a partially sunny day.

Fig. 4(a)の赤丸印 (25°C , 照度 $0.95 \sim 1.05 \text{ kW/m}^2$) は STC (25°C , 1 kW/m^2) 付近における P_{max2}/G の平均値であり, Fig. 3(b)(c)からわかるように照度 1 kW/m^2 付近で P_{max2}/G の変化は小さいので, 赤丸印の値は STC における P_{max} と

見做せる.約2年間で $P_{\max 2}/G$ の変化は $\pm 1\%$ 程度であり,期間内のE-1Aストリングの性能変動はその程度以内であったことがわかる.E-1Bストリングでも同様の結果が得られている¹⁰⁾.より低照度の緑色丸印,灰色丸印も同様の傾向であり,1kW/m²程度の照度が得られない曇天日等でも途切れ無く連続監視が行えることを示している.ここではデータは割愛するが,モジュールのカバーガラス洗浄によって I_{mp2} が一時的に0.5%程度増加して,その後10日間程度で元のレベルに戻って安定する小さな変化も検知できている¹⁰⁾.2020年12月~2021年11月のW-1Cストリングの結果を示したFig.4(b)でも, Fig.4(a)と同様に $P_{\max 2}$ の変動は1年間で $\pm 1\%$ 程度以内であり,冬季に高く夏季に低い傾向があるようにも見受けられる.この原因はまだ特定できていないが,参考文献¹³⁾でPERCモジュールにおける同様の変動がLETID回復の温度依存性として報告されており,原因特定には長期のデータ分析が必要である.

E-1A, W-1C ストリング中のモジュールについて屋内STCにおけるI-V測定を実施しており,その結果から推定される $P_{\max 2}$ をFig.4に黒三角で示す.黒三角は赤丸印と概ねよく一致しており,本研究の方法で算出した $P_{\max 2}/G$ によって,ストリング性能の僅かな変化を敏感に検出できることを示している.ただし I_{mp2} , V_{mp2} , $P_{\max 2}$ 算出の絶対精度には,照度・温度の測定誤差が大きく影響し,本研究では考慮しなかった電力ケーブルの電気抵抗やPCSによるMPPT制御の精度・安定性等も考慮が必要なので,これらを含めた詳細な精度は今後の検討課題である.

4. I_{mp} , V_{mp} 常時監視によるPV動作診断

4.1 V_{mp} , I_{mp} による部分影の検出 (シミュレーション)

上記の手法で温度補正した I_{mp2} , V_{mp2} を用いて, PVモジュール, ストリングの部分影の有無を検知できることが報告されている⁷⁻¹⁰⁾.Fig.5(a)(b)に,5モジュールからなるストリング中の1つのセルだけに部分影がある場合のI-V特性と V_{mp} , I_{mp} のシミュレーション結果の一例を示す.シミュレーションプログラムはMicrosoft® VBAを用いて自作し,各セルのI-V特性はダイオード特性の理論式¹⁴⁾を基に逆電圧降伏を考慮したBishopの式¹⁵⁾を用いた.セルの直列抵抗は参考文献⁹⁾の方法を用いてE-1Bストリングの屋内I-V特性を概ね再現する値に設定した.セルのシャント抵抗と逆降伏電圧は結晶シリコン太陽電池に想定される概略値としてそれぞれ100Ω及び-20Vとした.モジュール中のセル数・バイパスダイオード数はTable1のE-1Bストリングの値を用いた.

部分影によってFig.5(a)(b)のようにI-V特性に段差が生じてP-V特性も変化するため, V_{mp} と I_{mp} が変化する.部分影がセル面積の約5%までは I_{mp} , V_{mp} にほとんど変化が見られないが,約5%から17%まではFig.5(c)に示すように I_{mp} が減少して V_{mp} が増加した.18%以上では最適動作点が低電圧側のピークに移動して V_{mp} が低下し, I_{mp} は影無し

とほぼ同じ値まで回復した. $P_{\max}$ は部分影約5%から17%まで単調に減少し,約17%以上ではほぼ一定であった.これらの結果は,複数モジュールを含むストリングで, V_{mp} , I_{mp} の増減から,セル面積より小さな部分影の検出が可能であることを示している.なお同様のシミュレーションで,単一モジュール中の1セル部分影ではセル面積の約40%まで⁸⁾,18モジュール直列ストリング中の1セル部分影ではセル面積の約10%まで V_{mp} が増加した.Fig.5(c)の部分影17%~18%間で V_{mp} , I_{mp} が急激に変化するのはバイパスダイオードの動作によるものであり,このことを利用してバイパスダイオード動作の有無を推定できる可能性がある.

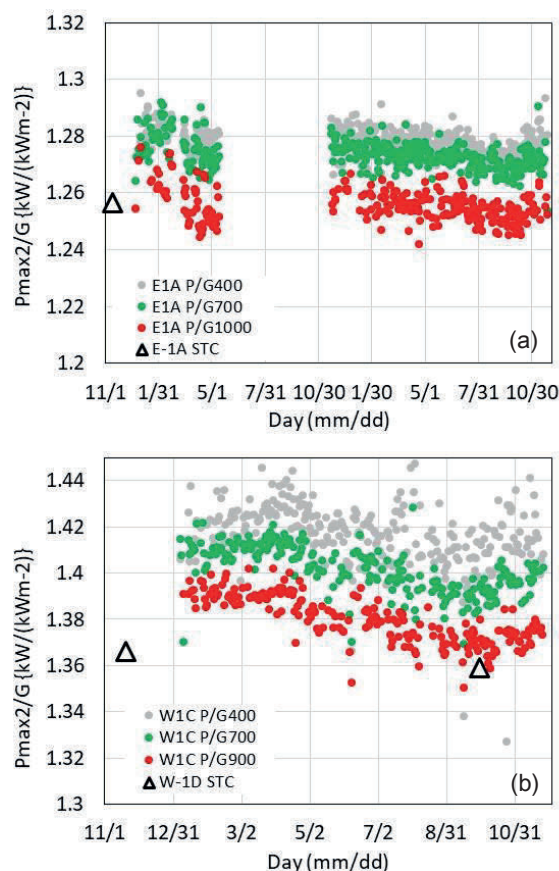


Fig. 4 Daily averages of $P_{\max 2}/G$ of the (a) E-1A string and (b) W-1C string at various levels of irradiance G .

4.2 V_{mp} , I_{mp} による部分影の検出 (実証)

(A) 日没前, 南側の太陽電池からの部分影

E-1B ストリングを用いて Fig.6(a)に示すような部分影検出の実証を行った.上述の方法で25℃に温度補正した V_{mp2} を横軸に, I_{mp2} を縦軸にプロットしたものをFig.6(b)に示す.E-1Bストリングには冬季の日没前, Fig.6(a)"A"に示すように,南側の太陽電池からの部分影が生じる.同じ時間帯にFig.6(b)の"A1"に示すように, V_{mp2} が約10V増加していることが観測された.時間が経過して部分影の面積が大きくなると,"A2"のように V_{mp2} が急激に低下した.影無し状態に比べて V_{mp2} が約20V低下しており,バイパスダイオード2個が動作した可能性がある.更に時間が経

過して日没前にストリングの大部分が影になると V_{mp2} が影無し値 "A3" に戻った。この部分影は Fig. 5(a) と照度と影になるセル数がやや異なるものの、 V_{mp2} の増減が Fig. 5(c) と定性的に一致しており、 V_{mp2} 、 I_{mp2} によって部分影の検出が可能であることを示している。

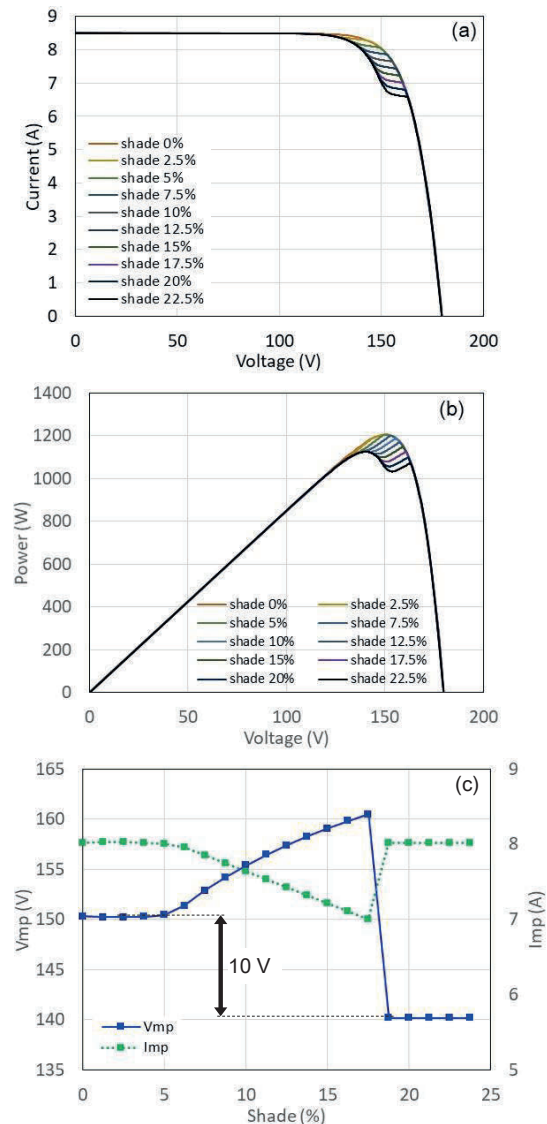


Fig. 5 Simulation results of (a) I-V curves, (b) P-V curves, and (c) V_{mp} and I_{mp} of a PV string, which is comprised of 5 serial modules. One of the modules has partial shading on one cell.

(B) 多数のセルに亘る部分影

Fig. 6(a)の"B"に示すような、モジュール中の多数のセルに人物等による大きな部分影が急に生じた場合には、Fig. 6(b)の"B"のように I_{mp2} はほぼ不変で V_{mp2} が約 30 V 減少した。3 個のバイパスダイオードが稼働したと推定される。この場合 V_{mp} の増加が実験で観測されなかったのは、本研究で用いたデータ平均時間 10 秒以内に大きな部分影が急に生じたためである。

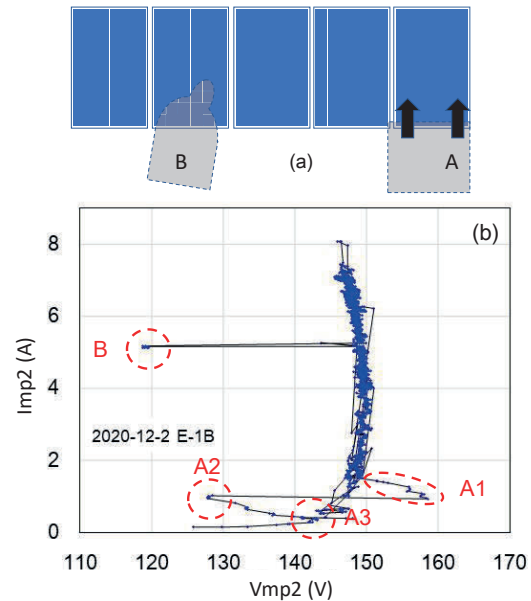


Fig. 6 (a) Experimental configuration and (b) results of the relation between the I_{mp2} and V_{mp2} when the E-1B string is partially shaded.

(C) 下草の成長による部分影

W-1D ストリングにおいて、下草の成長によってモジュールに部分影ができる前後の I_{mp} と V_{mp} の関係を Fig. 7(a)(b) に示す。図中黒印は温度補正前の生データ、赤印は 25°C に温度補正したデータ、青破線は部分影が無い日の温度補正データの典型値である。部分影が無い期間には Fig. 7(a) 赤印のように I_{mp} と V_{mp} の関係はほぼ一定だが、下草が成長してモジュール下端を超えるものが増えると、Fig. 7(b) のように、大部分のデータで V_{mp2} が青破線に比べて増加し、一部のデータでは減少した。これらも Fig. 5(c) や Fig. 6(b) と同様に、部分影による V_{mp2} の増加及び低下に起因するものと推定される。Fig. 7(b) では V_{mp2} のばらつきが Fig. 6(b) や Fig. 7(a) より大きい一因として、下草による部分影の形状が複雑なことから、風によって影が振動して本研究で用いた 10 秒間の平均時間内に変動していることが考えられる。

以上のように温度補正した V_{mp2} 、 I_{mp2} によって、複数モジュールが直列接続された PV ストリングの僅かな性能変化が検出でき、部分影の発生も敏感に検出することができることが明らかになった。更にモジュール上の汚れを模した小さな影や、部分的積雪による部分影等による V_{mp2} の増減も敏感に検出できる実験結果が得られている¹⁰⁾。影無し状態が基本で一部の時間に部分影が生じる場合には Fig. 6, 7 のような V_{mp2} 、 I_{mp2} の増減で部分影を診断できる。ほぼ常時部分影が生じて影無し状態の V_{mp2} 、 I_{mp2} が明確に実測できない場合には、モジュールの V_{mp} 、 I_{mp} 定格値との比較が必要になると思われるが、本研究では詳細は未検討である。

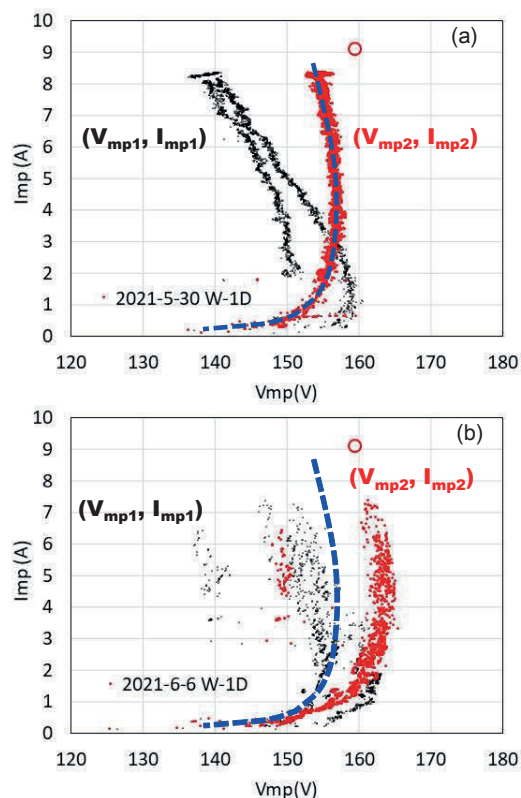


Fig. 7 Relation between the I_{mp1} and V_{mp1} (black symbols) and I_{mp2} and V_{mp2} (red symbols) of the W-1D string: (a) without shading and (b) with partial shading by weeds.

5. 結論

MPPT稼働中のPVストリングの最大出力動作電圧 V_{mp} 、動作電流 I_{mp} の計測値から、最近開発された温度補正式を用いて、ストリングのリアルタイム動作診断と長期連続監視の両方が可能な手法について、シミュレーションによる基礎検討と実験による実証を行った。長期連続監視については、約 $0.4 \text{ kW/m}^2 \sim 1 \text{ kW/m}^2$ (STC) の幅広い照度で、複数種類のストリングの 25°C における P_{max} を $\pm 1\%$ 程度の高い再現性で導出できることが実証できた。動作診断については、セル面積の 10% 程度と小さく一時的な部分影でも V_{mp2} 、 I_{mp2} の変化として敏感に検出できることが明らかになった。本研究の手法によって、常時監視データから性能や不具合の迅速的確な診断が可能となり、O&Mの高度化と低コスト化も図られることが期待できる。その他にも本研究の手法を応用して剥離、直列抵抗増加、バイパスダイオード故障、PID等様々な症状が診断できると期待され⁹⁾、今後の検討課題である。

謝辞

本研究の一部はNEDOからの委託研究の一環として実施されたものであり、関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) Y. Hishikawa, M. Higa, T. Takenouchi et al., "New STC Translation Method for Precise Outdoor Characterization of the I-V Curves of PV Modules", Proceedings of JSES Conference (2018) 31-34
- 2) Y. Hishikawa, M. Higa, T. Takenouchi et al., "Improved precision of the outdoor performance measurements of photovoltaic modules by using the photovoltaic irradiance sensor", Solar Energy 211 (2020) 82-89
- 3) IEC 61724-1:2017, Photovoltaic System Performance - Part 1: Monitoring.
- 4) E. Garoudja, F. Harrou, Y. Sun et al. "Statistical Fault Detection in Photovoltaic Systems. Solar Energy 150, 485–499.
- 5) 池上 洋行, 後藤 勲, 谷村 晃太郎, 新田 智子, 瀧川 隆介, 丸山 信一郎, 藤田 直希, 西川 省吾「太陽光発電所で発生する以上の網羅的解析とストリング監視による異常検出手法」電気学会研究会資料 FTE-18-001-010, (2018) 31-40
- 6) T. Oozeki, T. Izawa, K. Otani et al., "An evaluation method of PV systems", Solar Energy Materials & Solar Cells 75 (2003) 687–695.
- 7) Y. Hishikawa, M. Yoshita, Y. Chiba et al., "Real-time measurement and diagnosis of the photovoltaic performance during MPPT operation", Proceedings of JSES Conference (2020), Online
- 8) Y. Hishikawa, M. Yoshita, Y. Chiba et al., "Diagnosis of PV modules and systems by continuous monitoring of I_{mp} and V_{mp} ", Proceedings of JSES Conference (2021), Online
- 9) M. Seapan, Y. Hishikawa, M. Yoshita et al., "Detection of shading effect by using the current and voltage at maximum power point of crystalline silicon PV modules" Sol. Energy 211 (2020) 1365-1372
- 10) Y. Hishikawa, M. Yoshita, Y. Chiba et al., "Precise performance diagnosis of photovoltaic string by operation voltage and current: Experimental verification" Solar Energy 230 (2021) 704-713
- 11) J. Zhang, K. Watanabe, J. Yoshino et al., "Short-period fluctuation and spatial distribution of solar irradiance under clouds" Jpn. J. Appl. Phys. 57 (2018) (8S3), 08RG12.
<https://doi.org/10.7567/JJAP.57.08RG12>.
- 12) B. H. King, C.W.Hansen, D. Riley et al., "Procedure to Determine Coefficients for the Sandia Array Performance Model (SAPM)" Sandia report, (2016) SAND2016-5284.
- 13) E. Fokuhl, D. Philipp, G. Mülhölfer et al., "LID and LETID evolution of PV modules during outdoor operation and indoor tests" EPJ Photovoltaics 12, 9 (2021)
- 14) W. Shockley, "The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors," Bell Syst. Tech. J., vol. 28, no. 3, pp. 435–489, 1949
- 15) J. W. Bishop, "Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits" Sol. Cells 25 (1988) 73–89.