

For Applying PVTEC-Guideline
for Outdoor I-V Characteristic Measurement to PV Modules

PVTEC 屋外 I-V 特性測定法を 太陽電池モジュールに適用することは妥当か

Kazuhiko KATO
加藤 和彦^{*1}

Abstract

In December, 2016, PVTEC has offered a guideline for outdoor I-V characteristic measurement of PV module strings. This guideline is based on following assumptions: (1) Pmax is a linear function of PV module temperature at constant irradiance, (2) its gradient does not depend on irradiance, and (3) Pmax is in proportion to irradiance at constant PV module temperature. In this paper, applicability of the guideline to PV module measurement was inspected with enormous outdoor measurement data on five PV modules. Data analysis of a relation between PV module temperature and Pmax at the same irradiance condition indicated the validity of assumption (1). On the other hand, the validity of both assumption (2) and (3) was rejected because this analysis suggested that the gradient depended on irradiance and Pmax of wear-out PV modules had no proportional relation to irradiance under the same PV module temperature condition. This paper also pointed out that techniques to judge drop in power output of PV modules or strings had to consider probabilities of false positive and false negative judgments.

Keywords: PV Module, I-V Characteristic Curve, Outdoor Measurement, Drop in Power Output

キーワード: 太陽電池モジュール, 電流-電圧特性曲線, 屋外測定, 出力低下

1. はじめに

2017年4月のいわゆる「再エネ特措法」の改正では、本法が対象とする発電設備の保守点検と維持管理に係る審査基準が厳格された。このことはそれら発電設備の事業期間（および事業終了後）の安全確保を要請するものと解すべきであるが、太陽光発電設備の所有者あるいは占有者の経営意識からは、設備の発電性能の維持に関心が向けられているように感じる。このような実情に応答してか、太陽光発電技術研究組合（PVTEC）は「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 特性測定方法ガイドライン」（以下「PVTEC-GL」）¹⁾を作成し、2016年12月15日に公表した。このガイドラインの解説によれば、PVTEC-GL は、屋外での I-V 特性測定に関する唯一の国内規格である JISC8953（結晶系太

陽電池アレイ出力のオンサイト測定方法）で得られる測定精度を犠牲にする代わりに、当該規格の二つの制約—①アレイ面日射強度 700W/m² 以上、②基準モジュールでの参照測定の必要—の緩和により、測定機会の大幅増と測定方法の簡便化を可能にするもの、とのことである。

この PVTEC-GL は、太陽電池モジュールストリングを対象としているが、太陽電池モジュール供給者が提供する「出力保証」が太陽電池モジュール（以下、単に「モジュール」）にとどまっていることを考えれば、PVTEC-GL が提示している出力低下の確認方法がモジュールに適用される可能性があり、かつ、実際に適用された例も耳にしている（私信）。

この技術論文の目的は、PVTEC-GL が提示している出力低下の確認方法をモジュールに適用することが妥当か否かを検証することを目的としている。

2. 「PVTEC-GL の出力低下の確認方法」について

PVTEC-GL が提示する出力低下の確認方法では、屋外で測定した I-V 特性から得られる最大出力（ P_{maxI} ）を、以

*1 国立研究開発法人産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター（〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2）

✉e-mail: kazuhiko.kato@aist.go.jp

（原稿受付：2018年4月11日，受理日：2018年5月29日）

表 1 検証に利用したモジュールの仕様および発電特性値
Table 1 Technical specification of PV modules used in this study

記号	製造者・型式		P_{max} [W]	V_{pm} [V]	I_{pm} [A]	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]	FF [-]	出力低下率*1 [%]	特記事項
M ₁	京セラ SPG1786T-02KDX	銘板値	179	23.8	7.51	29.4	8.15	0.747	0.00	未使用モジュール
		定格値*2	186	24.2	7.67	29.8	8.26	0.756		
M ₃	三菱電機 PV-MG126CF	銘板値	126	19.2	6.56	24.1	7.12	0.734	4.65	産総研で 11～12 年 運用したモジュール
		定格値*2	123	18.8	6.56	24.0	7.22	0.710		
M ₇	京セラ SPG167-04	銘板値	167	23.2	7.20	28.9	8.00	0.722	11.0	
		定格値*2	154	21.8	7.05	29.1	7.82	0.677		
M ₁₂	三菱電機 PV-MG126CF	銘板値	126	19.2	6.56	24.1	7.12	0.734	18.0	
		定格値*2	99.2	17.1	5.81	23.1	6.83	0.629		
M ₁₃	シャープ NT-132BJ	銘板値	132	26.8	4.93	33.5	5.53	0.713	31.1	
		定格値*2	92.3	23.1	4.00	33.3	5.12	0.541		

注) *1:本表には記載していない各モジュールの工場出荷時の P_{max} に対する定格値 P_{max} の比率

*2:屋外測定に供する前に、ソーラーシミュレータで測定した標準試験条件での測定値

下の手順と式によって標準試験条件（STC）における最大出力（ P_{max3} ）に換算し、これとモジュール供給事業者が提供する出力保証値を比較することを促している。なお、日射強度の適用可能条件は 300W/m^2 以上（ヘテロ接合形太陽電池モジュールは 400W/m^2 以上）であるが、モジュール温度の適用可能条件は定められていない。

[手順 1]照度の換算：日射強度 $G_A[\text{W/m}^2]$ かつモジュール温度 $T_{PA}[^\circ\text{C}]$ のもとでの I-V 特性から得た $P_{max1}(G_A, T_{PA})[\text{W}]$ を、 $1,000\text{W/m}^2$ の照度の値 ($P_{max2}(1,000, T_{PA})[\text{W}]$) に換算する。

$$P_{max2} = (1000/G_A) \times P_{max1} \quad \text{式(1)}$$

[手順 2]モジュール温度の補正： $1,000\text{W/m}^2$ 相当に換算した $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ に対して、 25°C のモジュール温度に補正する。モジュール供給事業者から開示される最大出力温度係数を $\alpha_{P_{max}}[\%/^\circ\text{C}]$ とし、温度補正した最大出力 P_{max3} を次式で算出する。

$$P_{max3} = \{1 + (\alpha_{P_{max}}/100)(T_{PA} - 25)\}^{-1} P_{max2} \quad \text{式(2)}$$

如上の手順から、PVTEC-GL は以下を前提としていることがわかる。

(前提イ) 適用可能なあらゆるモジュールは、日射強度 G_A が一定ならば、最大出力がモジュール温度 T_{PA} と線形の関係にある。（式(2)より）

(前提ロ) 前提イにおける一次線形関係の傾きは、日射強度によらず $\alpha_{P_{max}}$ を用いて一意に決定することができる。（式(2)より）

(前提ハ) 適用可能なあらゆるモジュールは、モジュール温度 T_{PA} が一定ならば、その最大出力が日射強度 G_A に比例する。（式(1)より）

3. 検証に用いた測定データ

PVTEC-GL の妥当性の検証には、筆者の既報²⁾に用いた

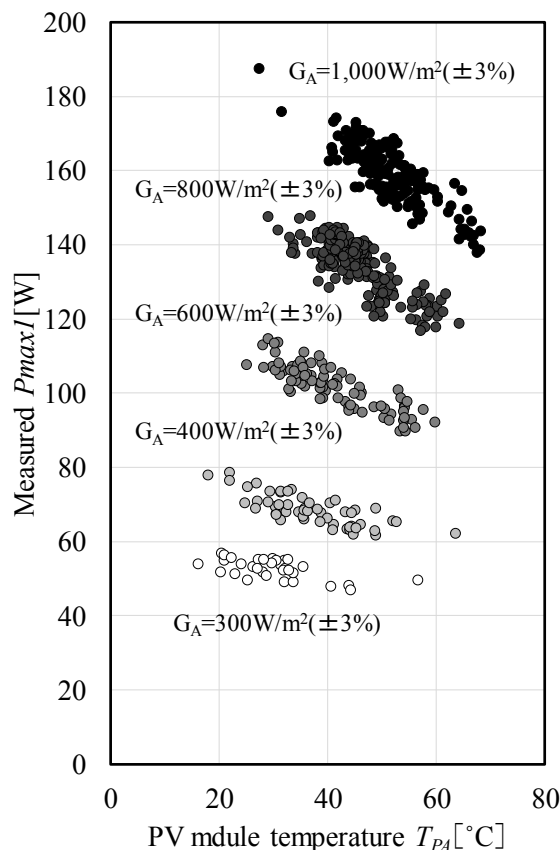


Fig.1 Relation between PV module temperature T_{PA} and $P_{max1}(G_A, T_{PA})$ for PV module M₁ under constant G_A

図 1 一様な日射強度 G_A の下でのモジュール温度 T_{PA} と最大出力 $P_{max1}(G_A, T_{PA})$ の関係 (モジュール M₁, 実測)

12 枚のモジュールのうちの 5 枚の屋外での I-V 特性測定データ群を用いた。これら 5 枚のモジュールの仕様と発電性能特性値を表 1 に示す。M₁ が未使用モジュールであるのに対し、他のモジュールは産総研太陽光発電設備 (AIST-MegaSolartown) の一部として 11~12 年間にわたって運用されたモジュールであり、屋外測定に供する際の定格最大出力は工場出荷時のそれに対して、約 5~30%低下している。なお、これらのモジュールは「モジュール供給事業者が開示する最大出力温度係数」をもたない（入っていない）。

4. 検証

4.1 (前提イ)の検証

まず、前提イを検証するため、表 1 の各モジュールの最大出力の屋外測定値とモジュール温度の関係を分析する。

図 1 は、モジュール M₁ の屋外測定データ群から G_A が「代表日射強度 (300W/m², 400W/m², 600W/m², 800W/m², 1,000W/m²) ± 3%」の範囲内にあるものを抽出し、それぞれについて、 T_{PA} を横軸にして屋外測定における最大出力 $P_{max1}(G_A, T_{PA})$ を縦軸に打点したものである。この図から、モジュール M₁ に関しては、どの G_A でも $P_{max1}(G_A, T_{PA})$ は T_{PA} に対して概ね線形の関係にあることがわかる。このことは定格最大出力が多様に低下している他のモジュールについても同様であった。

したがって、「前提イは妥当である」といえそうである。

4.2 (前提ロ)の検証

JISC8990 (地上設置の結晶シリコン太陽電池モジュール—設計適格性確認及び形式認証のための要求事項) の温度係数の算出方法にのっとり、図 1 の各 G_A での最小二乗直線の傾きとモジュール温度 25°C における推定最大出力から、モジュール M₁ の最大出力温度係数 $\alpha_{Pmax}(G_A)$ を求めた。たとえば、 $G_A=1,000$ の場合、最小二乗直線は $P_{max1}=-1.00T_{PA}+211$ 、 $T_{PA}=25$ での最大出力は 186W と推定されたことから、 $\alpha_{Pmax}(1,000)=-0.538\%/^{\circ}\text{C}$ と算出される。これと同様にして、各モジュールの各 G_A での $\alpha_{Pmax}(G_A)$ を算出した結果を表 2 に示す。

この表を俯瞰すると、どのモジュールでもその α_{Pmax} は G_A によって異なる値となっていることがわかる。したがって、ある G_A の α_{Pmax} を他の G_A で得られた $P_{max1}(G_A, T_{PA})$ の温度補正に用

表 2 各モジュールの推定 $\alpha_{Pmax}[\%/^{\circ}\text{C}]$ (日射強度別)

Table 2 Estimated $\alpha_{Pmax} [\%/^{\circ}\text{C}]$ of PV modules

モジュール	G_A [W/m ²]				
	300	400	600	800	1,000
M ₁	-0.371	-0.502	-0.538	-0.579	-0.538
M ₃	-0.377	-0.405	-0.454	-0.441	-0.401
M ₇	-0.528	-0.492	-0.524	-0.540	-0.565
M ₁₂	-0.476	-0.394	-0.412	-0.379	-0.371
M ₁₃	-0.473	-0.521	-0.571	-0.438	-0.399

いたならば補正誤差が生じることは自明である。実用上の問題はその誤差の程度であるが、たとえばモジュール M₁ について、 $\alpha_{Pmax}(1,000)=-0.538$ を $G_A=300$, $T_{PA}=70$ (夏季において測定の直前まで晴天であったものが、測定時には曇天となったような場合) の測定値の温度補正に適用してみる。正しく $\alpha_{Pmax}(300)$ を使うならば、式(1)および(2)を用いて

$$P_{max3}=(1-0.371/100(70-25))^{-1}(1000/300)P_{max1}=4.00P_{max1}$$

となるが、 $\alpha_{Pmax}(1,000)$ では同様に $P_{max3}=4.40P_{max1}$ となり、両者に 10% の差が生じ、これはそのまま誤差となる。

さらに前提ロについては、規約の点からの問題も指摘しておかなければならない。なぜなら α_{Pmax} の使用方法が規格を逸脱しているからである。具体的には次のとおりである。すなわち、JISC8990 にある「10.4 温度係数の測定」によれば、本測定で決定した温度係数 (電流の温度係数、電圧の温度係数及び最大出力の温度係数) は「測定したときの放射照度だけで正しい」と規定されている。他方、PVTEC-GL が指示する「モジュールの供給事業者から開示される最大出力温度係数」は、筆者の知る限りでは「公称最大出力の温度係数」、つまり、放射照度 1,000W/m² のもとで測定し決定した温度係数である場合がほとんどである。この値を 300W/m² 以上のあらゆる日射強度のもとで測定した最大出力の温度補正に適用できる規約としての根拠は見当たらない。

このことは、次の事態も引き起こす。すなわち、PVTEC-GL の指示にしたがうならば、同じ型式のモジュールに対しては、出力低下の如何によらず、太陽電池モジュール供給事業者から開示される「出力低下していない」モジュールの (公称) 最大出力温度係数を使うことになる、という事態である。たとえば、この検証に用いた 5 枚のモジュールのうちモジュール M₃ とモジュール M₁₂ は、出力低下率が異なり、それぞれ 4.65% と 18.0% であるが、PVTEC-GL の方法では、そのどちらにも出力低下していない場合の (公称) 最大出力温度係数を使うことになる。残念ながら筆者はこの型式のそれを持たないが、仮に出力低下

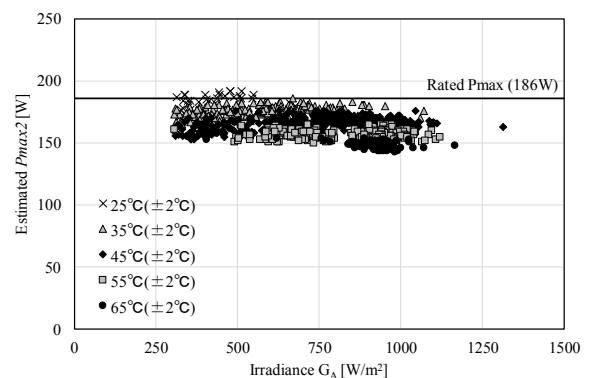


Fig.2 Relation between G_A and $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ of PV module M₁ under constant T_{PA}

図 2 一様なモジュール温度 T_{PA} の下での日射強度 G_A と $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ の関係 (モジュール M₁, 実測)

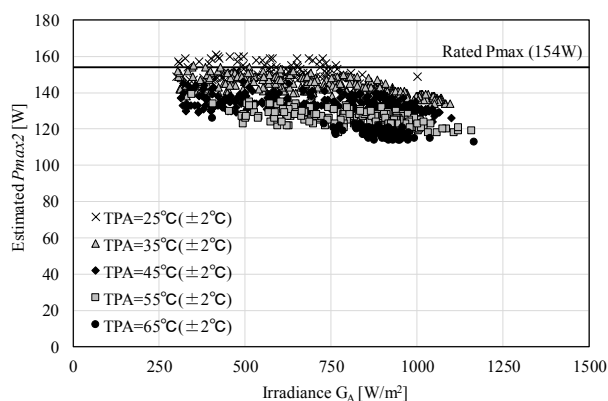


Fig.3 Relation between G_A and $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ of PV module M7 under constant T_{PA}

図3 一様なモジュール温度 T_{PA} の下での日射強度 G_A と $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ の関係 (モジュール M7, 実測)

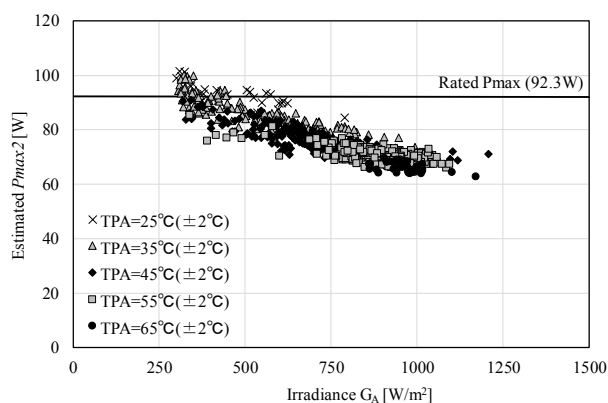


Fig.4 Relation between G_A and $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ of PV module M13 under constant T_{PA}

図4 一様なモジュール温度 T_{PA} の下での日射強度 G_A と $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ の関係 (モジュール M13, 実測)

率の小さいモジュール M3 の $\alpha_{P_{max}}(1,000) = -0.401$ が (公称) 最大出力温度係数であったとすると、この値をモジュール M12 の $G_A \geq 300$ のあらゆる $P_{max1}(G_A, T_{PA})$ の温度補正に用いることになる。PVTEC-GL は、この演算手続きの妥当について何ら言及していない。

これらのことから、筆者は「前提口は妥当である」とは考えない。

4.3 (前提ハ)の検証

前提ハが妥当であるとすれば、値の大小はともかく、式(2)で算出される $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ は、同じ T_{PA} のもとでは G_A によらず一定とならなければならない。

図2は、モジュール M1 の屋外測定データ群から T_{PA} が「代表モジュール温度 (25°C, 35°C, 45°C, 55°C, 65°C) $\pm 2^\circ\text{C}$ 」の範囲内にあるものを抽出し、それぞれについて、 G_A を横軸にして $P_{max1}(G_A, T_{PA})$ と式(2)から算出した $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ を縦軸に打点したものである。この図をみるかぎりでは、出力低下のないモジュール M1 の $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ は、同じ T_{PA} のもとでは G_A によらず一定とみなしてよいだろう。

他方、図3と図4は、図2と同様にして作図した、モジュール M7 および M13 に関する日射強度 G_A と $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ の関係である。出力低下率が11%のモジュール M7 の $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ の G_A に対する関係には変化の兆しがみえはじめています。すなわち、 G_A の大きい領域では、 G_A の増加につれて $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ が減少傾向をみせている。そして、その傾向は出力低下率が31%のモジュール M13 でいよいよ顕著である。このモジュールの $P_{max2}(1,000, T_{PA})$ は G_A の低い領域から G_A の増加につれて明確な減少傾向を示している。

以上のことから、「前提口は、出力低下がないかあるいは出力低下がわずかなモジュールには妥当するが、出力低下が大きいモジュールには妥当しない」といえそうである。

5. 「偽陰性」と「偽陽性」について

判定の対象が何であれ、判定の方法がどうであれ、ある事柄の数値による判定には不確実性がともなう。そして、その際には「偽陰性 (False Negative)」（本当は陽性であるにも関わらず、陰性と判定されること）と「偽陽性 (False Positive)」（本当は陰性であるにも関わらず、陽性と判定されること）とに留意する必要がある。

ここでは、PVTEC-GL の出力低下の確認方法における「偽陰性」と「偽陽性」のことを例示する。

(1) 判定が「偽陰性」となる場合

まず、モジュール M12 を題材に「偽陽性」と判定される場合を例示する。表1に示したように、このモジュールは126Wの銘板 (公称) 最大出力であるが、屋外測定を実施した時点での定格最大出力は99.2Wであった。つまり、公称値からの出力低下率は21.3%である。仮に判定基準を「このモジュール定格最大出力は公称値より20%を超えて低下している」とし、屋外測定データ群に PVTEC-GL の出力低下の確認方法をそのまま用いて判定する。この場合、判定結果が「20%を超えて低下している」であれば「真陽性」、そうでなければ「偽陰性」である。ただし、このモジュールの「モジュール供給事業者から開示さ

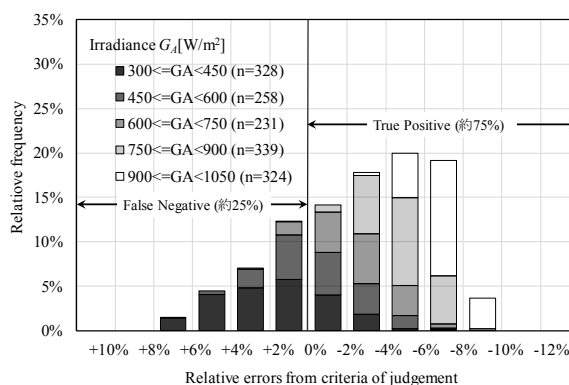


Fig.5 Judge for P_{max} of PV module M12 based on PVTEC-GL

図5 モジュール M12 の PVTEC-GL による判定結果

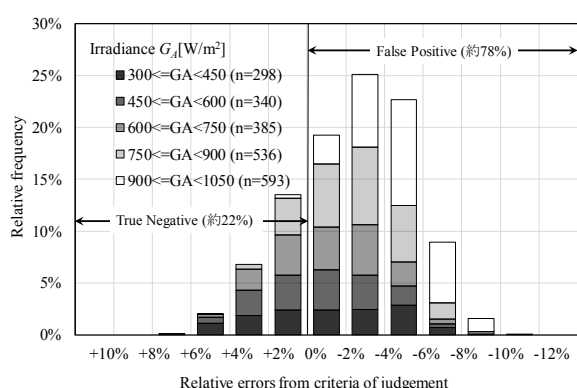


Fig.6 Judge for P_{max} of PV module M7 based on PVTEC-GL

図 6 モジュール M7 の PVTEC-GL による判定結果

れる最大出力温度係数 $\alpha_{P_{max}}[\%/^{\circ}\text{C}]$ は不明なので、ここでは実測値から推定した表 2 の $G_A=1,000$ における $\alpha_{P_{max}}=-0.371$ を用いる。

図 5 にその結果を示す。 $300 \leq G_A < 1,050$ のすべての屋外測定データ ($n=1,480$) からの推定最大出力のうち約 75% の判定は「真陽性」であった (出力低下率 20% 超のものが、正しく「出力低下率 20% 超」と判定された)。他方、残りの約 25% の判定は「偽陰性」であった (出力低下率 20% 超のものが、誤って「出力低下率 20% 以下」と判定された)。日射強度別にみると、日射強度が低い時ほど偽陰性となる比率が高いことがわかる。例えば $300 \leq G_A \leq 450$ だけをみてみると、偽陰性と判定された比率は 72% であった。

PVTEC-GL の出力低下の確認方法は、陽性と判定された対象に対して精密点検の実施を推奨しているの、判定が「偽陰性」であった場合には精密点検の実施が見送られることになる。

(2) 判定が「偽陽性」となる場合

次に、モジュール M7 を題材に「偽陽性」と判定される場合を例示する。このモジュールの銘板 (公称) 最大出力および定格最大出力はそれぞれ 167W と 154W であるから、公称値からの出力低下率は 7.78% である。仮に判定基準を「このモジュール定格最大出力は公称値より 10% を超えて低下している」とする。この場合は、判定結果が「10% を超えて低下している」であれば「偽陽性」、そうでなければ「真陰性」である。表 2 の $G_A=1,000$ における $\alpha_{P_{max}}=-0.565$ を用いて (1) と同様なことを行った結果を図 6 に示す。

この場合には、 $300 \leq G_A < 1,050$ のすべての屋外測定データ ($n=2,152$) からの推定最大出力のうち約 22% の判定が「真陰性」であり、残りの約 78% の判定は「偽陽性」であった。特に、 $900 \leq G_A \leq 1,050$ の範囲の判定はほとんどが「偽陽性」であった。

判定が「偽陽性」の場合には、本来精密点検を実施する必要のないモジュールに対して不必要に精密点検が実施されることになる。このことは (1) のような「真陽性を見逃す場合」よりは

まだ「まし」ではあるが、「偽陽性」の判定が頻出するような場合には、その判定方法に関する社会的信用が失われることにつながる。

6. まとめ

本技術論文では、出力低下の程度が異なる 5 枚のモジュールの屋外測定データ群を用いて、PVTEC-GL が提示する出力低下の確認方法をモジュールに適用することが妥当か否かを検証した。その結果、最大出力とモジュール温度の線形性に関する前提は妥当といえそうだが、その傾きである最大出力温度係数の用い方については、規約と実用の両面で問題があることが示唆された。また、最大出力と日射強度との比例関係に関する前提も、出力低下の大きいモジュールでは成り立たない場合があることを指摘した。筆者の見解は「PVTEC-GL の出力低下の確認方法をそのままモジュールに対して適用することはエンジニアリングとして妥当ではない」である。(ただし、当事者双方がこの方法による判定結果を是とする場合は、この限りではない。) なお、本研究の検討対象はモジュールであるから、PVTEC-GL の本来の対象であるストリングに対して同様なことがいえるのか否かについては、また別の検討が必要である。

PVTEC-GL は、その解説によれば「不具合の可能性有無を判断し精密点検実施の要否を協議するための参考データとして利用することにより、点検技術者は発電所の健全性 (安全性) を簡便に確認することが可能となる」ことを主眼としている。この場合には、定量的な判定は精密点検に譲るとしても、精密点検実施の要否判定の正確さが確保されなければならない。この観点から言えば、PVTEC-GL をモジュールの出力低下の判定に用いるためには判定方法に改良の余地がある。また、本方法によらない方法を考案する場合であっても、あるいは、その判定対象がストリングであってもモジュールであっても、判定における「偽陰性」と「偽陽性」の問題には注意を払う必要がある。

なお、PVTEC-GL は屋外での電流-電圧特性測定によって「発電所の健全性 (安全性) の確認が可能になる」としているが、これは誤りである。このガイドラインがいう「健全性」の定義が不明であるが、ストリングあるいはモジュールの電流-電圧特性の測定でわかるのは、発電所の安全性に係る一部の事柄であり全部の事柄ではない。

参考文献

- 1) 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 特性測定方法ガイドライン (第 1 版)、2016 年 12 月 15 日
- 2) 大藤和彦：ベイズ推測に依拠した屋外での電流-電圧特性測定による太陽電池モジュールの基準状態の最大出力を判定する方法 (着想)、太陽エネルギー、Vol.43, No.4, pp.39-61 (2017)