

Study on Simplified Output Lowering Diagnosis Technique of
Residential PV System
-Stability of %Electric Power-

住宅用 PV システムの簡易出力低下診断法に 関する研究 － %電力の安定性 －

Shota NAKAMURA Sanshiro YAMANAKA Yasuhiro AOYAMA

中村 匠汰^{*1}

山中三四郎^{*2}

青山 泰宏^{*3}

Yuki NISHIDO

Hiroshi KOBAYASHI

西戸 雄輝^{*3}

小林 浩^{*3}

Abstract

It was said that PV modules for residence were maintenance free. But in fact it is reported that output reduce due to malfunction of module. Therefore, periodic output diagnosis is necessary for residential PV system. However, it is difficult to diagnose the output of residential PV system because the weather data and output are not recorded, and the diagnostic method is not established.

In order to solve these problems, the authors have investigated the simplified diagnosis equipment using % electric power for an output lowering diagnosis. The simplified diagnosis equipment can collect the weather data required at the site to calculate % electric power. In this report, we were studying improvement of stability of % electric power. In the process, it was found that stability was deteriorated due to time delay of output and irradiance, so we tried to improve stability by removing this influence.

Keywords: residential PV system, output lowering diagnosis, simplified diagnosis equipment, %electric power, stability

キーワード：住宅用 PV システム，出力低下診断，簡易診断装置，%電力，安定性

1. はじめに

近年，住宅用の太陽光発電システム（以下，PVS）が大量に導入され，住宅用 PVS を取り扱うメーカー各社は販売競争が激しくなる中で，出力低下や故障への長期保証を充実させて

いる。しかし，実際には設置後数年で出力低下等の不具合が報告されている事例もある⁽¹⁾。今後，長期間運用した住宅用 PVS を効率よく運用していくためには，出力低下を診断することが重要であり，その初期診断法として簡易的な出力低下診断が有効である。

太陽電池の出力は設置場所の環境や天候によって変動するため，発電電力量だけでは出力低下の判定を行うことはできない。そのため，住宅用 PVS の所有者は保守点検業者に出力低下診断を依頼することになる。しかし，診断のためには現地で出力低下を簡易的に診断する技術が必要となる。

筆者らの一部はこれまでに太陽光発電システムの出力低下をモニタリングする目的でその判定方法を提案している⁽²⁾。この提案では%電力量を出力低下判定の指標としている。%

*1 名城大学大学院 理工学研究科

現在，日新電機株式会社勤務

*2 名城大学理工学部 教授

(〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口 1-501)

✉ e-mail: yamanaka@meijo-u.ac.jp

*3 株式会社トーエネック

(原稿受付：2017 年 4 月 6 日，受理日：2017 年 9 月 5 日)

電力量とは1日の発電電力量をその日の標準発電電力量で除した値のことである²⁾。判定の基準として不具合の発生していないPVSについて1年分の%電力量の平均値と標準偏差を利用している。すなわち、1年間の計測データから評価した%電力量の平均値から標準偏差を引いた値を閾値とし、評価対象となるシステムの%電力量がこの閾値を下回った場合を出力低下と判定するものである。したがって、判定精度を上げるためには標準偏差を小さく抑えることが重要となってくる。

本論文で検討する簡易出力低下診断法はPVシステムのモニタリングに準拠した判定方法を検討している。しかし、簡易出力診断では計測時間をなるべく短くすることも重要になってくる。そこで、判定指標として%電力⁹⁾を用いることを検討している。%電力とは発電電力を標準電力で除した値のことであり、瞬時値である。この場合、日射変動の影響を強く受けて標準偏差が大きくなることが予想される。したがって、精度よく判定するには標準偏差をなるべく小さく抑えることが重要となる。

本論文では、最初に簡易診断法確立のための基礎的検討として%電力の安定性を1年間の計測を通して得られた%電力の標準偏差を指標として評価し、当該診断法の課題の抽出及び改善方法について検討した。次に、簡易診断装置を使った出力低下診断法の実用性の検討を行った。

2. 簡易診断装置による出力低下診断法

2.1 %電力

本論文は出力低下を判定する指標として%電力を利用する⁹⁾。%電力は、式(1)に示すように実測の発電電力と式(2)で示される傾斜面日射強度とモジュール温度から推定する発電電力（以下、標準電力）の比から求められる。

$$\%電力 = \frac{P}{P_m} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

$$P_m = P_0 \times \frac{G}{G_0} [1 - \alpha(T_{PA} - 25)] \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

P : 発電電力[kW]
 P_m : 標準電力[kW] G : 傾斜面日射強度[kW/m²]
 P_0 : 公称電力(3.072[kW]) G_0 : 標準日射強度(1[kW/m²])
 T_{PA} : モジュール温度[°C] α : 温度補正係数(-0.43[°C⁻¹])

本研究で使用する発電電力は交流電力であり、PCS から目視で読み取る。傾斜面日射強度とモジュール温度は後述する簡易診断装置で計測可能な水平面日射強度、外気温、風速のデータから推定する。傾斜面日射強度とモジュール温度を以下の方法で推定する。

(1) 傾斜面日射強度の推定⁴⁾

傾斜面日射強度を推定するには、計測した水平面日射強度を、Skartveit モデル⁵⁾を利用して、水平面直達日射と水平面散乱日射に分離する。分離した水平面直達日射を角度換算することで傾斜面直達日射が得られる。一方、水平面散乱日射は Perez モデル⁶⁾を用いて傾斜面散乱日射に換算し、これらの値と均一反射モデルを用いて算出する傾斜面反射日射を合計することで傾斜面日射強度を求める。

(2) モジュール温度の推定

PV アレイのモジュール温度は JIS C 8907⁷⁾に基づき、(3)式を用いて推定する。

$$T_{PA} = T_A + \left(\frac{A}{B \times V^{0.8} + 1} + 2 \right) \times G \quad [^\circ\text{C}] \quad (3)$$

T_{PA} : モジュール温度[°C] V : 風速[m/s]
 T_A : 外気温[°C] G : 傾斜面日射強度[kW/m²]
 A, B : PV モジュールの設置方式による係数
 (架台設置形 : $A=46, B=0.41$)

2.2 簡易診断の概要

Fig.1 に簡易診断装置を示す。簡易診断装置は上部にある総合気象センサと中央部にある伸縮可能なポール、下部の三脚からなる。上部にある総合気象センサはモジュール温度及び傾斜面日射強度推定に必要なデータを計測するための日射計、風速計、温度計から構成されており、センサから得られたデータをデータロガーで記録する。日射計には分光感度が広い熱電式を用いている。

当該診断法は簡易診断装置による計測とPCSから目視による発電電力の計測を同時刻に行い、%電力を算出する。Fig.2 に当該診断手法の計測風景を示す。Fig.2(a)は測定対象のPVアレイ付近の気象データを簡易診断装置で計測している様子であり、(b)はPCSに表示される発電電力を目視で計測している様子である。

以上のように、当該診断法を用いることで、屋根に上る必要が無く、PCS等の電力機器の充電部に接近する作業が不要なため、地上から安全に出力低下診断を行うことができる。

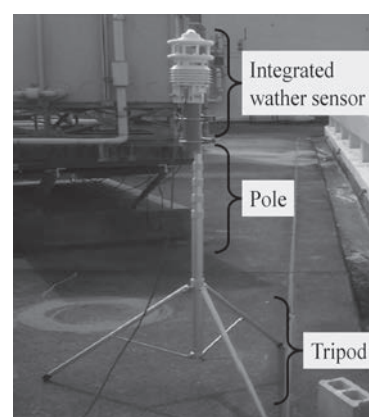


Fig.1 Simplified diagnosis equipment.

3. 簡易出力低下診断の安定性

簡易診断法に関する基礎的検討を行うためには、年間を通して気象データが必要となる。しかし、簡易診断装置により年間を通して継続的に多量のデータを収集するのは困難である。そのため、本論文では Fig.3 に示すように正常に動作している PV アレイとその近傍にある日射計、温度計、風速計から構成される既設 PVS で 2007 年の 11 時から 13 時の間に計測された日射強度、風速、外気温、発電電力のデータを用いて基礎的な検討を行う。気象データ及び発電電力のデータ間隔は目視で計測することを考慮して 1 分間隔とし、日射変動やそれ以外の原因で生じる誤差を平均化かつ、簡易的な診断にするため 5 分間の平均値を用いて %電力を算出する。

3.1 %電力の不安定性

1 年間の計測データを用いて算出した %電力を Fig.4 に示す。図中の縦軸は %電力であり、横軸は平均傾斜面日射強度である。Fig.4 から %電力のばらつきが大きく不安定であるため、たとえ出力の低下があっても正確に評価することができないことが分かる。この原因として太陽電池と日射計の応答速度の違いが挙げられる。Fig.5 に日射変動時に応答遅れが生じる一例を示す。日射計は太陽電池に比べて応答速度が遅いため、日射変動が生じた場合、太陽電池の発電電力よりも時間遅れが生じる。この時間遅れにより %電力は不安定になる。

また、筆者らのこれまでの研究で日射強度が 0.3kW/m^2 以下では曲線因子(FF)の特性が悪くなり %電力が低下することが判明している⁽⁸⁾。従って、本論文では平均日射強度 0.3kW/m^2 以上の場合のみ取り扱うことにする。

3.2 %電力の安定化

熱電式日射計を使用した場合、日射変動時に日射計と太陽電池の応答速度の違いが生じ、%電力が不安定になる原因となる。しかしながら、日射が安定していれば、応答速度の違いは生じないため安定した診断が可能であると考えられる。そこで、日射が安定した時間帯における %電力を評価し、出力低下診断の指標としての可能性について検討を行う。

3.2.1 日射安定時の %電力

日射が安定した時間を抽出するにあたり、式(4)で示される変動率という指標を用いる。

$$\text{変動率} = \frac{y_{(z+1)/2}}{\frac{1}{z} \sum_{n=1}^z y_n} \quad (4)$$

z : 計測時間[min] ($z=3,5,7,\dots$) $n=1,2,3,\dots$
 y_n : n 分時の瞬時データ

例えば、5 分間計測したとすると式(4)の変動率の分母は 1 分間隔で 5 分間計測したデータの平均値となり、分子は計測を始めてから 3 分後の瞬時データとなる。また、データ数が偶数の場合は中間にある 2 つのデータの平均値を用いて変動率



Fig.2 Measurement landscape.

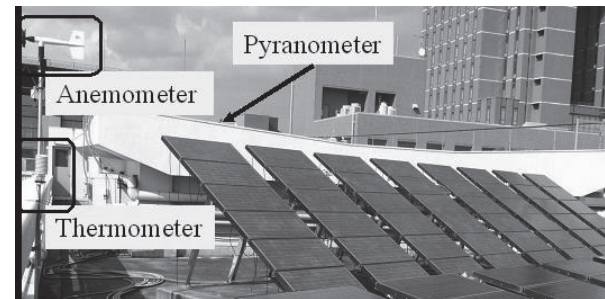


Fig.3 PV array and measurement system.

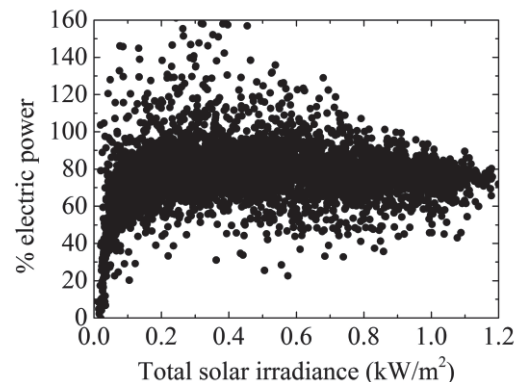


Fig.4 %electric power in 2007.

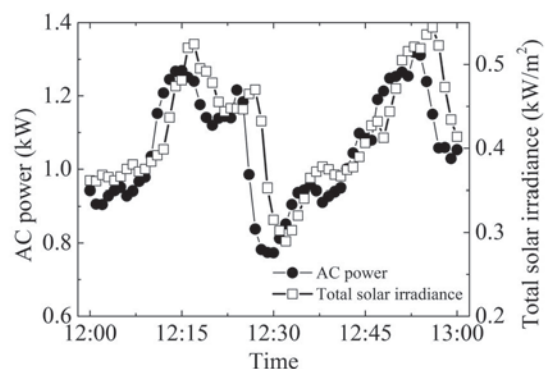


Fig.5 AC power and total solar irradiance evaluated from pyranometer.

Table 1 Evaluation result of %Electric power.

%Electric power	Average	Standard deviation
using all data	79.12	9.85
using variation rate	78.99	2.54

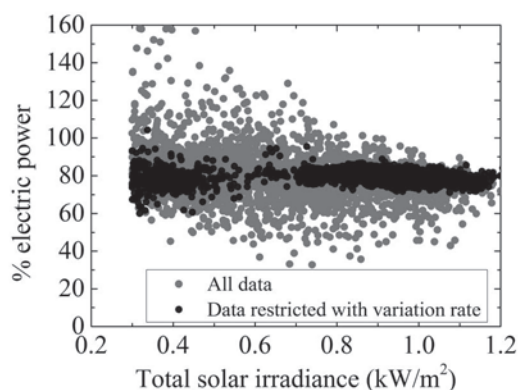


Fig.6 Comparison of %electric power.

を算出すればよい。

この変動率を利用し、日射が安定している条件として、以下の条件を満たしたデータのみを用いた場合の%電力と、1年間の計測データから算出した%電力との比較を行う。日射が安定している条件を満たしたデータにおいても日射変動以外が原因と考えられる誤差を平均化するために、変動率算出に利用した5分間の平均値を用いて%電力を算出する。

・日射が安定している条件

使用データ：既設 PVS の 2007 年の 11 時から 13 時のデータ

- (1) 水平面日射強度の 5 分間の変動率が 0.99 から 1.01
- (2) 発電電力の 5 分間の変動率が 0.99 から 1.01
- (3) 発電電力が 0.2 kW 以上

日射計と太陽電池の応答速度の違いにより、日射強度と発電電力のばらつき時間がずれるため、条件(1)、(2)のように水平面日射強度と発電電力に変動率を適用する。これまでの研究により、傾斜面日射強度が 0.3 kW/m² 以下では出力低下診断が困難であることが分かっている⁽⁸⁾。しかし、本論文で検討している簡易診断装置では水平面日射を計測している。将来、この簡易診断装置には計測の可否を素早く判断するために日射計の読み取り装置を取り付けることも検討している。そこで、今回は水平面日射強度が 0.3 kW/m² 以上を診断の対象とすることにした。また、日射強度が十分に高くてもまれに原因不明の計測ミスで突発的に出力がほぼ 0 になる場合がある。このようなデータは大きな誤差要因となるので、これを除去するために条件(3)を設ける。今回使用したデータでは閾値を 0.2kW とすることにより、計測ミスによって突発的に発生する異常データはすべて除去できる。しかしながら、この計測ミスは本計測システムの問題であり、本論文で提案している簡易診断装置ではこのような計測ミスは起こらない。

Fig.6 に日射安定時に評価した 5 分平均の変動率の小さい%

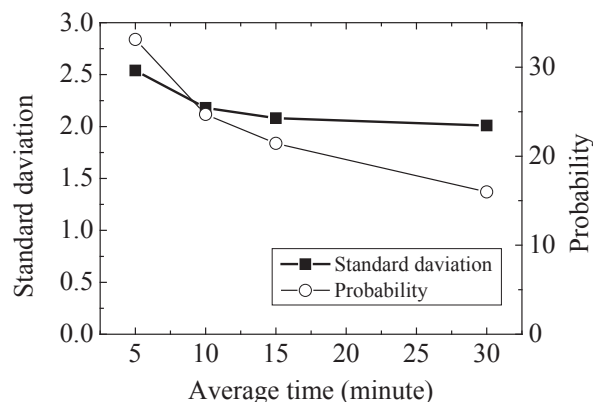


Fig.7 Standard deviation of %electric power and diagnosable rate.

電力（図中黒色）と 1 年間のすべての計測データから算出した%電力（図中灰色）を比較した結果を示す。日射安定時のみで診断を行うことで%電力のばらつきが抑制されることが確認できる。また、Table 1 は%電力の平均値と標準偏差を比較した結果であり、標準偏差を 3 分の 1 以下に抑えられることが分かる。従って、日射が安定すれば、標準偏差が小さくなり、より精度の高い出力低下診断が可能であると考えられる。

3.2.2 計測時間と%電力の安定性

前項で明らかのように日射が安定した時間を抽出したことで%電力の標準偏差は小さくなり、正確な診断が可能になる。一方で、日射が安定している時間帯でないと精度の高い計測ができないため診断が可能な機会は減少する。これらの関係は計測時間と密接に関係している。そこで、計測時間を変えることで、標準偏差並びに 1 年間に診断可能な機会がどの程度変化するかを検討する。診断機会の検討方法としては、3.2.1 項の日射が安定している条件である(1)~(3)を満たした%電力のデータ数を全データ数で除算することで評価する。

計測時間と標準偏差、診断可能な機会の関係を Fig.7 に示す。図で示した%電力の標準偏差（図中■印）と 1 年間に診断可能な機会の割合（図中○印）を見ると、平均時間を長くすることで標準偏差は小さくなり診断精度が向上するが、それに伴い診断可能な機会が減少している。本節では平均時間を 5 分として検討を進めている。図より明らかのように標準偏差は 10 分の平均値に比べれば 0.3%ほど大きくなり、それ以上長くしても標準偏差が低下することはない。しかしながら、平均時間を 10 分以上にすると診断可能な機会は減少を続ける。従って、5 分の平均時間はおおむね妥当であると思われる。しかしながら、平均時間を 5 分にしても 1 年間に診断可能な機会が約 33%しかないことが分かる。出力低下診断の機会が減少するということは、診断作業が長期化してしまう恐れがある。そのため、日射が不安定な時間帯でも精度の高い診断を行えるようにして、出力低下診断の機会を増やす必要がある。

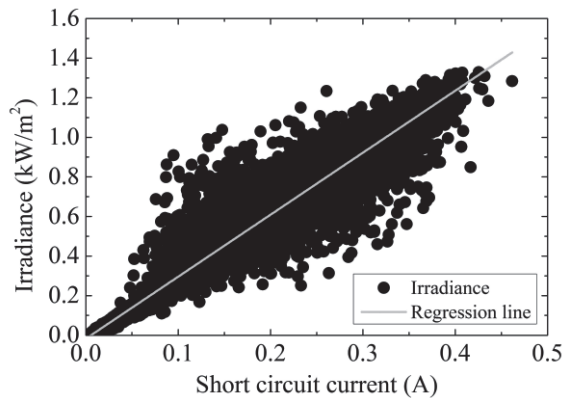


Fig.8 Relation of irradiance and short circuit current.



Fig.9 A small PV module.

3.3 短絡電流による安定性の改善

出力低下診断の精度を向上させるためには、太陽電池と熱電式日射計の応答速度の違いを解消する必要がある。そこで、熱電式日射計の代わりに日射強度と比例関係にある太陽電池の短絡電流を用いた%電力の評価法について検討を行う。

Fig.8 に示すように、太陽電池の短絡電流は基本的に日射強度に比例する。そのため、短絡電流と日射強度のデータから回帰直線を用いて短絡電流を日射強度に換算する。

既設の PVS の計測データから検討を行うにあたり、日射センサとして使用する太陽電池は、Fig.9 の丸枠で示すように測定対象の PV アレイとは別に設置してある小型の太陽電池である。この小型の太陽電池から計測される短絡電流と PV アレイの隣に設置してある日射計により計測された日射強度から回帰直線を算出し、短絡電流を日射強度に換算する。Fig.10 は、短絡電流から評価した日射強度と交流電力の時間経過を比較したものである。Fig.5 と違い両者の時間差は見られない。

次に、Fig.3 に示した既設の PVS の計測データを用いて、熱電式日射計を日射センサとしたときの%電力と小型の太陽電池を日射センサにしたときの%電力の比較を行う。

Fig.11 は%電力を比較した結果である。Fig.11 より、熱電式日射計を使用した%電力（図中灰色）は、太陽電池との応答速度の違いによりばらついているのに対し、小型の太陽電池の短絡電流を使用した%電力（図中黒色）は、応答速度の違いによるばらつきが抑制されていることが確認できる。Table 2 は熱電式日射計を使用した%電力と小型の太陽電池の短絡電流を使用した%電力の平均値と標準偏差を比較した結果であり、標準偏差は2分の1以下に抑制されている。この結果

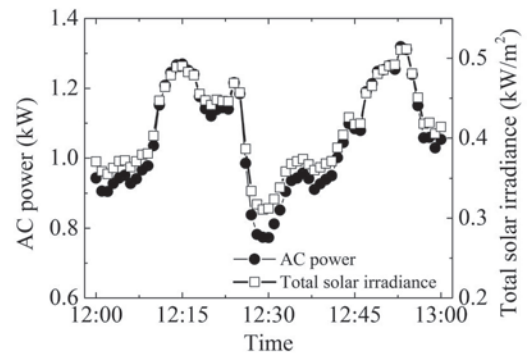


Fig.10 AC power and total solar irradiance evaluated from short circuit current.

Table 2 Evaluation result of %Electric power.

	Average	Standard deviation
Pyranometer	79.12	9.85
Small module	79.52	4.82

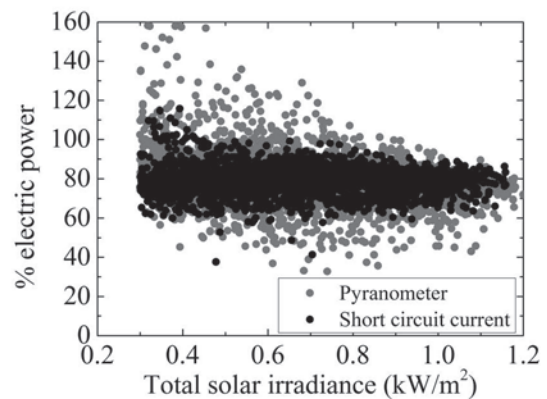


Fig.11 Comparison of %electric power.

から、小型の太陽電池の短絡電流から日射強度を推定して%電力を算出することで、精度の高い診断が可能になることが分かる。

4. 簡易診断装置

4.1 簡易診断装置における%電力の安定性

これまでの検討では、太陽電池を日射センサとして利用することで、日射変動がある時間帯でも出力低下診断が可能であることが分かった。そこで、簡易診断装置を使用した場合について検討を行う。

Fig.1 に示す簡易診断装置の上部にある気象センサは熱電式の日射計である。そこで、Fig.12 の丸枠に示すように新たに小型の太陽電池を水平に取り付けることで、短絡電流と日射強度を含めた気象データの同時計測を可能にした。

計測時間は熱電式日射計と同じ5分であれば、簡易診断装

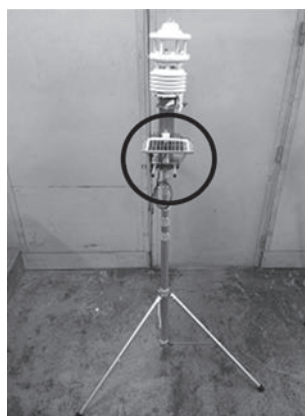


Fig.12 Simplified diagnosis equipment with a small PV module.

Table 3 Evaluation result of %Electric power using simplified diagnosis equipment.

	Average	Standard deviation
Pyranometer	79.02	7.33
Small module	81.15	3.42

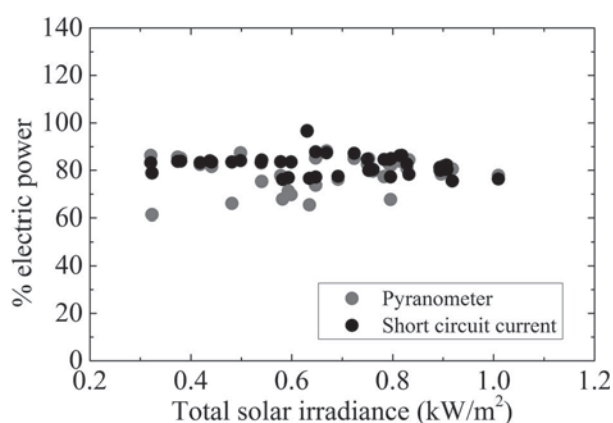


Fig.13 Comparison of %electric power using simplified diagnosis equipment.

置においても実用上支障がない(平均時間を変えても作業時間や標準偏差が大きく改善されるわけではない)と思われるため、本論文では熱電式日射計と同じ 5 分間の平均で評価を行う。従って、検討に使用したデータは、2016 年に 1 分間隔で計測したデータの 5 分間の平均値である。

Fig.13 は、日射計を使用した%電力(図中灰色)と小型の太陽電池を利用して算出した%電力(図中黒色)を比較した結果である。Fig.11 と同様に、小型の太陽電池を使用することで熱電式日射計を使用した%電力よりも安定する。Table 3 は%電力の平均値と標準偏差を比較した結果であり、小型太陽電池を使用することで熱電式日射計を使用した場合に比べ標準偏差が 1/2 以下になる。これらの結果から、簡易診断装置の日射センサを小型の太陽電池とすれば、日射変動があるときでも出力低下診断が可能であることが分かる。

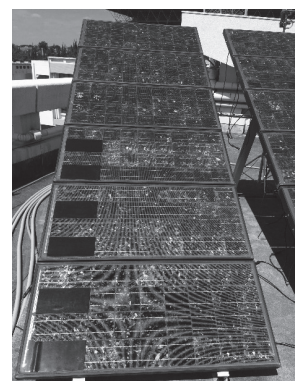


Fig.14 Decrease in output by the rubber sheet.

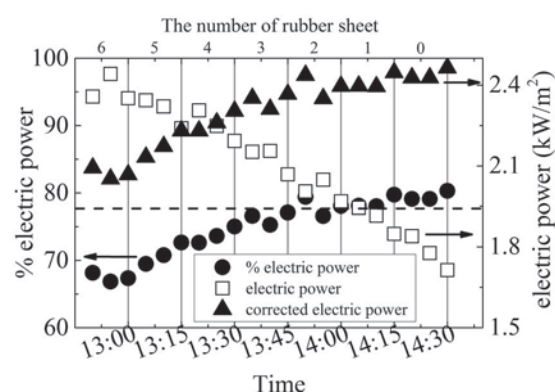


Fig.15 Relation of the number of clusters with rubber sheets and % electric power.

4.2 出力低下診断

前節では日射センサとして短絡電流を利用した簡易診断装置での%電力の安定性を確認した。本節では簡易診断装置で評価した%電力と出力低下の相関性を検討する。

Fig.14 に示すように、正常に動作しているアレイにおいて 1 クラスタ毎にセル 2 枚分のゴムシートを計 6 枚貼り、15 分経過するごとに 1 枚ずつ剥がしていく。この間に 1 分間隔、計測時間 5 分で 3 回ずつ%電力を評価する。また、%電力は簡易診断装置に取り付けた小型の太陽電池から評価した日射強度を用いて算出する。

Fig.15 に 15 分間隔でゴムシートを 1 枚ずつ剥がしたときの電力(□印)、標準状態(日射強度 1 kW/m^2 、モジュール温度 25°C)に補正された電力(▲印)、%電力(●印)の推移を示す。時間の経過に従いゴムシートを剥がしているにもかかわらず、電力は低下している。計測は 13:00~14:45 にかけて行われており、時間の経過と共に日射強度は低下している。したがって、日射強度の低下による電力の低下がゴムシートを剥がすことによる電力の回復を上回っていると考えられる。このように、計測される電力を比較しても出力の低下を判定することは不可能である。そこで、この電力を日射強度 1 kW/m^2 、 25°C の条件に補正して比較する(標準状態に補正された電力)。電力とは逆にゴムシートを剥がすことによって標

準状態に補正された電力が回復する様子が確認できる。ただし、ゴムシート 3 枚以下の時の標準状態に補正された電力はゴムシート 0 枚 (正常な状態) の電力とほとんど同じになる。同図中、%電力は標準状態に補正された電力と同じ傾向を示し、ゴムシートの枚数が減るに伴い増加し、3 枚以下では正常な状態の%電力とほとんど同じになる。つまり、電力は日射強度、モジュール温度によって変動するために出力低下を判断することができないが、%電力であれば判定が可能であることが分かる。

前述したように筆者らの一部は以前の論文でこれまでに太陽光発電システムの出力低下をモニタリングする目的でその判定方法を提案している²⁾。この提案では 1 年間計測した不具合の発生していない PVS の%電力量の平均値と標準偏差を利用している。本論文では瞬時値である%電力の平均値を指標にしている。しかし、判定基準の考え方は前回と同様、%電力の平均値と標準偏差の差を閾値とすればよい。そこで仮にこの判定方法を採用するとすれば、Table3 より%電力の平均値は 81.15%、その標準偏差は 3.42%であることが判明しているので、閾値は 77.73%とすればよいことになる。Fig.15 にこの閾値を破線で示す。本図からゴムシート 4 枚以上になると%電力は閾値を下回っていることが分かる。すなわち、4 クラスタ以上の出力低下であればこの閾値で出力低下の判定が可能である。

しかしながら、上記の平均値と標準偏差は名城大学 2 号館屋上で運転されている PV システムで計測したデータを使って評価したもので、閾値の決め方は問題ないが汎用性は十分ではない。今後、汎用性を高めるためには%電力の平均値、及び標準偏差の決定方法について検討していく必要がある。特に平均値はシステムによる個体差が出るので、慎重な検討が必要になる。また、今後、短絡電流による日射強度の計測を前提に計測装置及び計測条件の最適化を図っていくつもりである。

5. まとめ

本論文は、常時出力や気象データを計測していない住宅用 PVS のための出力低下診断法として、簡易診断装置から計測した気象データと目視で計測した発電電力から算出する%電力を診断指標とした診断法を提案し、精度向上に関する基礎的検討及び太陽電池を日射センサとした診断法の有用性について検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 診断法は、平均傾斜面日射強度が 0.3kW/m^2 以上であれば、診断が可能である。
- (2) 日射センサを小型太陽電池とし、その短絡電流から評価した日射強度を用いて%電力を算出することで、診断精度を向上させることができる。
- (3) 簡易診断装置により評価される%電力の低下は電力の低

下と一致しており、%電力の平均値－標準偏差を閾値とする出力低下の判定が可能である。

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) 真田英和, 山中三四郎, 西戸雄輝, 小林浩: 「%電力量を用いた太陽光発電システムの出力低下診断法の提案」, 電気設備学会誌, **35**, 204-211, (2015).
- (3) Y. Okuno, S. Yamanaka, H. Kawamura, H. Ohno and H. Kawamura, Diagnostic Method of Generation Performance of a PV Array by Using Threshold Based on Normalized Generation Power in Standard Test Condition, Journal of Japan Solar Energy Society, **35** (2), 45-52, (2009).
- (4) T. Otake, S. Yamanaka, H. Kawamura, H. Ohno and H. Kawamura, A Study on Estimation of Tilted Indirect Irradiance, JSES/JSWS Joint Conference (2008), 45-52, Tottori.
- (5) A. Skartveit, J. A. Olseth, A MODEL FOR THE DIFFUSE FRACTION OF HOURLY GLOBAL RADIATION, Solar Energy, **38** (5), 271-274 (1987).
- (6) R. Perez, R. Seals, A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces, Solar Energy, **39** (4), 221-231 (1987).
- (7) 日本規格協会, JIS ハンドブック 75 省・新エネルギー, 209-213 (2012), 日本規格協会, 東京.
- (8) S. Iwai, S. Yamanaka, Y. Inoue, Y. Nishido and H. Kobayashi, Study on accuracy improvement of the % electric energy in the output lowering diagnosis technique of the photovoltaic array, Journal of Japan Solar Energy Society, **41** (3), 95-100, (2015).