

太陽電池の出力低下診断手法における %電力量の精度向上に関する研究

Study on accuracy improvement of the % electric energy
in the output lowering diagnosis technique of the photovoltaic array

岩井士郎^{*1}

Shiro IWAI

西戸 雄輝^{*3}

Yuki NISHIDO

山中三四郎^{*2}

Sanshiro YAMANAKA

井上 泰宏^{*3}

Yasuhiro INOUE

小林 浩^{*3}

Hiroshi KOBAYASHI

Abstract

With the spread of the photovoltaic (PV) system, output warranty of PV modules is performed in many makers. But the method to judge degree of the output lowering is not established.

The authors have proposed output lowering diagnostic method using the % electric energy. In this paper, we aim to improve the accuracy of it. At first in, we examined variation factor of % electric energy. As a result, we found reduction of the maximum power voltage due to the movement of maximum power point regardless of cell temperature and change in maximum power current due to change in distribution of spectral irradiance. By performing a correction about those causes, we found that % electric energy was improved.

キーワード : PV システム, 出力低下診断, 分光放射照度分布

Key Words : PV systems, output lowering diagnosis, spectral irradiance distribution

1. はじめに

近年、太陽光発電(以下 PV とする)システムの導入が拡大する中、太陽電池の出力が低下する不具合が発生しており、発電事業者の出力低下への意識が高まっている。しかし、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、簡単に出力の低下を判定することは困難である。これまで、筆者らは「%電力量」を用いた出力低下診断手法の提案を行ってきた¹⁻³⁾。しかし、筆者らがこれまでに提案した手法の診断精度向上を図るためには、日射強度とモジュール温度以外の因子を考慮する必要があると考えている。

そこで本論文では、%電力量の精度向上を図るため、本学

のデータを用いて日射強度及びモジュール温度以外の因子による PV システムの出力への影響について検討を行った。その結果、新たに分光放射照度分布及び FF(曲線因子)特性を取り上げ、それらの影響を補正することで%電力量の精度向上を試みたので報告する。

2. %電力量

本章では、%電力量の説明、本大学のデータを用いて実際に%電力量を求め、%電力量の課題について述べる。

2.1 %電力量とは

%電力量は日射強度及びモジュール温度を用いて、各々の天候における PV システムの発電電力量を推定し(以下、標準電力量とする)、実稼働の発電電力量と比較することで出力低下診断を行うものである。つまり%電力量とは式(1)で示すように標準電力量と発電電力量の比で算出することが出来る⁴⁾。

*1 名城大学理工学研究科大学院生
(現在東海旅客鉄道株式会社勤務)
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口一丁目 501 番地)
e-mail : yamanaka@meijo-u.ac.jp

*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 : 2015 年 1 月 13 日)

$$\% \text{電力量} = \frac{\int P(t)dt}{\int P_G(t)dt} \times 100[\%] \quad (1)$$

ただし、 $P(t)$ ：発電電力[kW]、 P_G ：標準電力[kW]である。

また、標準電力は以下の式で求まる。

$$P_G(t) = \frac{G(t)}{G_0} \times P_R \{1 - \alpha_t (T(t) - 25)\} \quad (2)$$

ただし、 $G(t)$ [kW/m²]：日射強度、 G_0 [kW/m²]：標準日射強度、 P_R [kW]：公称最大出力、 α_t [1/°C]：温度係数、 $T(t)$ [°C]：モジュール温度である。

2.2 %電力量の課題

名城大学 2 号館屋上に設置しており、正常に稼働している PV アレイの 2007 年のデータを使用する。使用するデータの時間帯は周囲の建物による影及びエアマスによる影響を受けにくく、太陽高度が比較的高い 11 時~13 時のものを使用し、積分は一日毎に行うこととした。

Fig.1 は横軸に日付、縦軸に一日毎の%電力量を採ったものである。また、図中の実線は平均値を、破線は標準偏差の幅を表している。%電力量は標準発電量と発電電力量の比であることから、正常に稼働している PV アレイであれば、常に 100%になることが望ましい。しかし、実際には平均値が 90.99%、標準偏差が 3.66%となる。%電力量は日射強度とモジュール温度を用いて算出しており、これらの要素については補正を行っている。よって、%電力量を用いた出力低下診断の精度向上を行うためには、日射強度とモジュール温度以

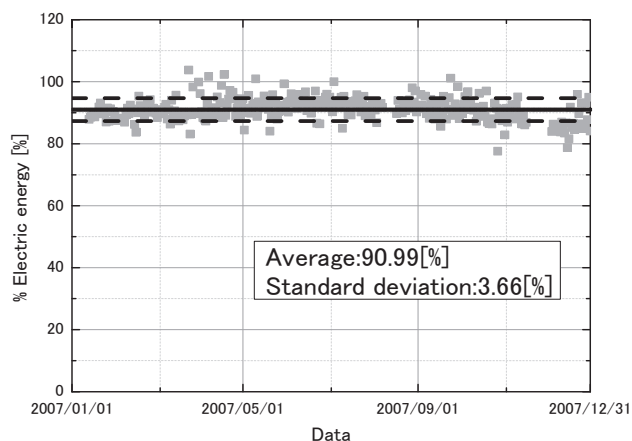


Fig.1 Relation between average・standard deviation and % electric energy in Meijo Unvi

図1 %電力量と平均値・標準偏差の関係(名城大学)

外の因子を考慮して、%電力量の標準偏差を改善することが必要であると言える。

3. %電力量の変動要因の検討

3.1 積算傾斜面晴天指数の導入

Fig.1 は%電力量を日付の順に並べたものである。本図では一見%電力量が規則性なく平均値の周りにばらついているだけで、ばらつきの原因を検討することはできない。そこで、天候の状態を定量化した晴天指数⁵⁾を用いて、再度%電力量の傾向を検討する。しかし、晴天指数を算出するには水平面日射強度のデータが必要となるが、一般に設置されている PV システムにおいては太陽電池と同じ傾斜角の傾斜面日射強度を計測している場合が多い。そこで、筆者らは水平面日射強度ではなく、傾斜面日射強度を用いて算出する、積算傾斜面晴天指数を提案する。積算傾斜面晴天指数とは、計測された傾斜面日射量を大気外水平面日射強度から同じ傾斜角に換算し、積分した大気外傾斜面日射量で除算したものである。ここで積分を行う理由としては、日射計の応答遅れ等による誤差を軽減するためである。積算傾斜面晴天指数の算出式を以下に示す。

$$\text{積算傾斜面晴天指数} = \frac{\int G(t)dt}{\int H_0(t) \times \cos \beta dt} \quad (3)$$

ただし、 $G(t)$ [kW/m²]：傾斜面日射強度、 H_0 [kW/m²]：大気外法線面日射強度、 β [°]：入射角である。

Fig.1 の横軸を積算傾斜面晴天指数で整理し直すと Fig.2 の

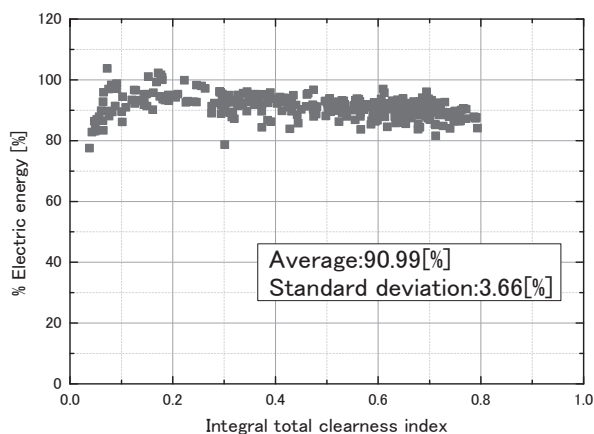


Fig.2 Relation between integral total clearness index and % electric energy in Meijo Unvi

図2 積算傾斜面晴天指数と%電力量の相関性(名城大学)

ようになる。Fig.2 より%電力量は積算傾斜面晴天指数が0~0.2においては増加し、0.2を境に積算傾斜面晴天指数の増加に伴って徐々に低下することが分かる。

3.2 評価指標の定義

%電力量の精度向上を図るため、%電力量の変動要因について検討を行う。PV アレイの出力は動作電圧及び動作電流の積で決まることから、規格化した動作電圧及び動作電流について積算傾斜面晴天指数との相関性について検討する。規格化の方法として、最初に動作電圧 V_m を式(4)によって25℃に補正する。

$$V_{m25} = \frac{V_m}{1 - \alpha(T_m - 25)} \quad (4)$$

ここで、 T_m (℃) : モジュール温度、 α (1/℃) : モジュールの温度係数である。

温度補正を行った動作電圧の平均値を公称動作電圧で除算し、%平均電圧と定義した。%平均電圧は(5)式によって求める。本論文では、計測器の応答誤差等によるデータのばらつきを軽減させるために平均値を用いることとした。

$$\% \text{ 平均電圧} = \frac{\sum V_{m25}}{n} \frac{1}{V_{pm}} \times 100[\%] \quad (5)$$

ただし、 n :データ数、 V_{pm} [V]:公称動作電圧である。

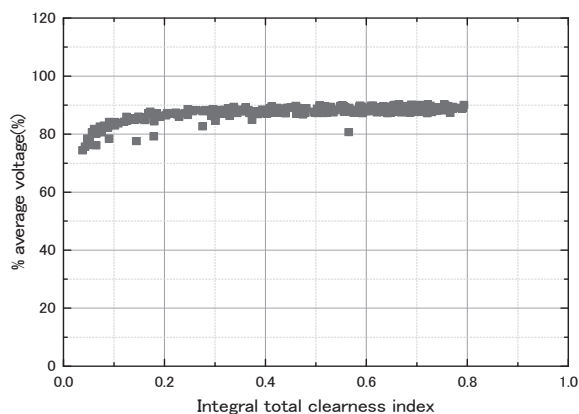


Fig.3 Relation between integral total clearness index and % average voltage in Meijo Unvi.

図3 積算傾斜面晴天指数と%平均電圧の相関性(名城大学)

一方、動作電流はデータのばらつきを軽減させるために電流の積分値である電流量で比較した。規格化に必要な標準電流量は公称動作電流に日射強度を掛け、それを積分して求めた。また、両者の比を%電流量と定義し、式(6)によって求める。

$$\% \text{ 電流量} = \frac{\int I_m(t)dt}{\int I_{pm} \times G(t)dt} \times 100[\%] \quad (6)$$

ただし、 $I_m(t)$ [A]:動作電流、 I_{pm} [A]:公称動作電流、 $G(t)$ [kW/m²] : 日射強度である。

3.3 積算傾斜面晴天指数と%平均電圧の関係について

Fig.3 に積算傾斜面晴天指数と%平均電圧の関係を示す。Fig.3 より%平均電圧は積算傾斜面晴天指数が増加するにつれて増加し、積算傾斜面晴天指数が約 0.4 以上では飽和することが分かる。

次に、%平均電圧が上記の傾向になる要因について I-V カーブを用いて検討を行う。Fig.4 に 11 時~13 時における、モジュール温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ の I-V カーブの日射強度に対する変化を示す。Fig.4 より日射強度が低下するにつれて動作点が移動し、動作電圧が低下することが分かる。つまり、積算傾斜面晴天指数が低いときにおける%平均電圧の低下傾向は、太陽電池の日射強度の変動に伴う動作点の移動による電圧の変化と考えられる。

3.4 %電流量について

Fig.5 に積算傾斜面晴天指数と%電流量の関係を示す。Fig.5 より%電流量は積算傾斜面晴天指数が増加するにつれて低下

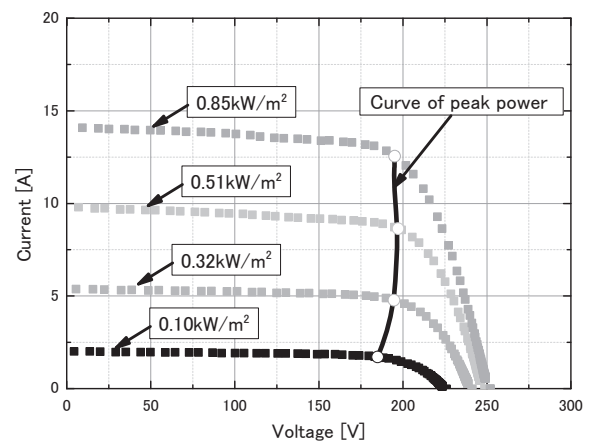


Fig.4 I-V curve changes due to change in solar irradiance

図4 日射変動による I-V カーブの変化

することが分かる。

%電流量が上記の傾向になる要因として分光放射照度分布が考えられる。筆者らは以前に分光放射照度分布が PV システムの出力に与える影響を検討し、晴天指数に伴う分光放射照度分布の変化が短絡電流に影響を及ぼすことを報告した^{6,7)}。

Fig.6は筆者らがこれまでに報告した分光放射照度分布が短絡電流量に及ぼす影響のシミュレーション結果⁷⁾を積算傾斜面晴天指数で整理し直したものである。本図の縦軸は規格化短絡電流量である。これは、測定した分光放射照度分布から算出した短絡電流量を基準太陽光の分光放射照度分布⁸⁾から算出した短絡電流量で規格化した値である。ただし、Fig.6の横軸に用いている積算水平面晴天指数は、これまでに用いてきた積算傾斜面晴天指数の傾斜角が 0° 、つまり水平面日射強度のデータを使用して算出したものである。Fig.6より積算水平面晴天指数が増加するにつれて規格化短絡電流量は低下し、その後飽和することが分かる。この低下は積算水平面晴天指数が大きいくほど相対的に可視領域の放射照度の割合が小さく、赤外領域の割合が大きくなることが原因である⁷⁾。Fig.6の特徴はFig.5と同じである。

次に、シミュレーションで得られた結果が、実稼働している PV アレイで起こりえるか検討する。Fig.7に測定で得られた PV アレイの短絡電流値を用いた、積算傾斜面晴天指数と規格化短絡電流量の関係を示す。Fig.7より、Fig.6と同様に規格化短絡電流量は積算傾斜面晴天指数が増加するにつれて低下することが分かる。つまり、分光放射照度分布の変化に伴う短絡電流の傾向は、実稼働の PV アレイから得られた短絡電流においても現れる傾向であることが分かる。

さらに、短絡電流に影響を与えているということは動作電流にも影響を与えていると考えられる。実際に、Fig.5とFig.7を比較すると、短絡電流と動作電流は共に積算傾斜面晴天指数に対して同じ傾向を示していることが分かる。つまり、積算傾斜面晴天指数に伴う動作電流の低下は晴天指数に伴う分光放射照度分布の分布変化に起因するものと考えられる。

4. %電流量の補正方法の検討

%電流量の変動要因について詳細な検討を行った結果、電圧及び電流のそれぞれに%電流量の変動要因があることから、精度の良い診断を行うには電圧及び電流毎に補正を行う必要があることが判明した。そこでまず、電圧及び電流毎に近似曲線を用いた%電流量の補正係数を算出する。

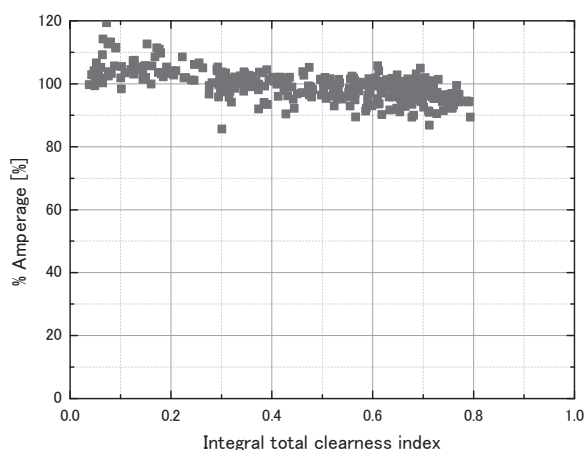


Fig.5 Relation between integral total clearness index and % amperage in Meijo Unvi

図5 積算傾斜面晴天指数と%電流量の相関性(名城大学)

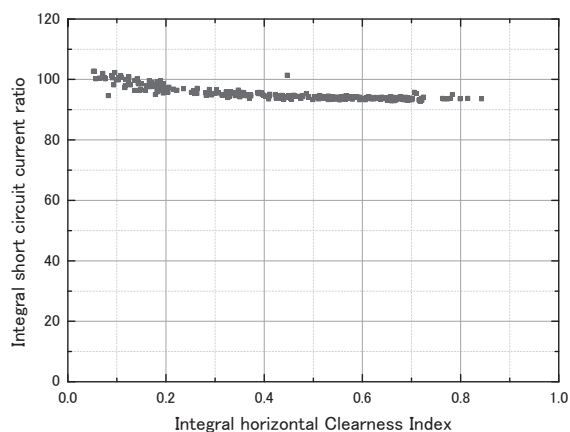


Fig.6 Relation between integral horizontal clearness index and normalized integral short-circuit current

図6 積算水平面晴天指数と規格化短絡電流量

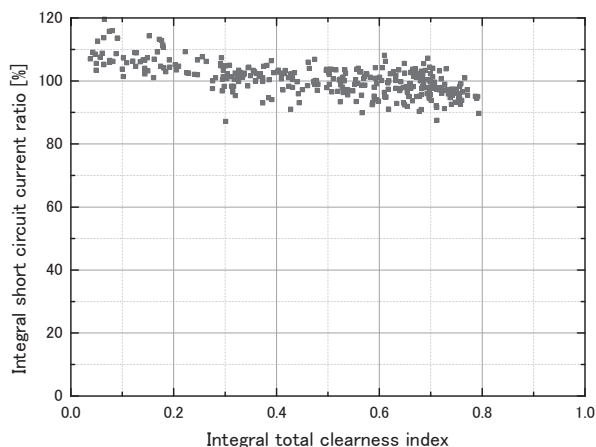


Fig.7 Relation between integral total clearness index and normalized integral short-circuit current

図7 積算傾斜面晴天指数と規格化短絡電流量の相関性

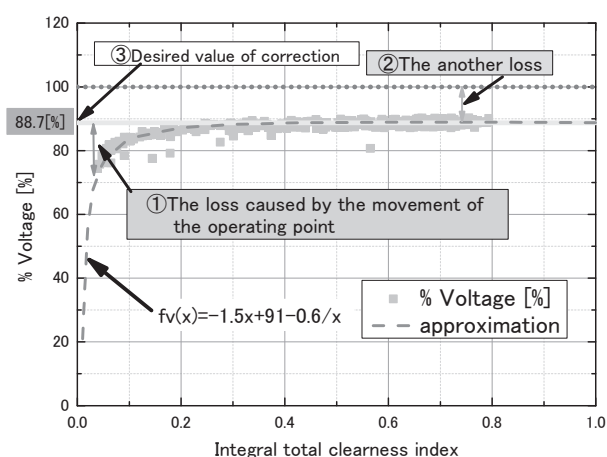


Fig.8 Relation between integral total clearness index and % average voltage and its approximate curve

図8 積算傾斜面晴天指数と%平均電圧の相関性及びその近似曲線

そして、それらの補正係数を用いて、%電力量の補正方法について検討を行う。

4.1 電圧による%電力量の補正係数

Fig.8 は Fig.3 と同様に積算傾斜面晴天指数と%平均電圧の関係を示したものであり、図中の破線はフィッティングにより得られた近似曲線 $f_v(x)$ を表している。ただし、 x は積算傾斜面晴天指数である。また、図中の①は今回の検討で判明した日射変動に伴う電圧の低下、図中の②はその他の要因による低下を表している。その他の要因としては回路抵抗、汚れによる透過率等⁹⁾様々な要因が考えられるが、現段階ではこれらの要因の分離ができていないので、本報告では詳細な検討を行わないことにする。この近似曲線 $f_v(x)$ を用いて動作点の移動による%平均電圧の低下を補正する。ただし、本論文では図中の①で示す、動作点の移動による動作電圧変動のみ

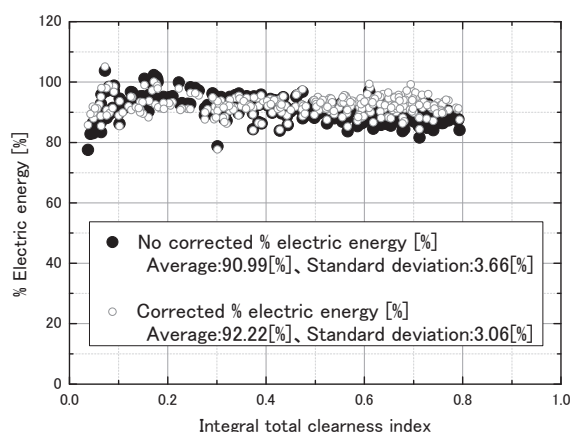


Fig.10 Compensation effect of % electric energy in Meijo Univ

図10 補正前及び補正後の%電力量の比較(名城大学)

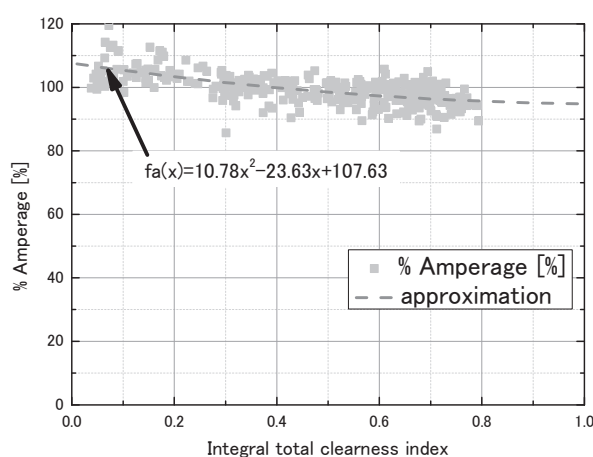


Fig.9 Relation between integral total clearness index and % amperage and its approximate curve

図9 積算傾斜面晴天指数と%電流量の相関性及びその近似曲線

の影響を補正することを考えるため、補正しても%平均電圧が100%になる訳ではない。そのため、%平均電圧の補正における補正の目標値(以下、補正目標値)が必要となる。今回、補正目標値 C_v (図中の③)は積算傾斜面晴天指数0.6以上における%平均電圧のデータを用いて算出した平均値とした。今回、本大学における補正目標値 C_v は計算より88.7[%]となる。つまり、電圧による補正係数を電圧補正係数 v とすると、 v は近似曲線 $f_v(x)$ を補正目標値 C_v で除算した、式(7)のようになる。

$$v = \frac{f_v(x)}{C_v} \quad (7)$$

4.2 電流による%電力量の補正係数

Fig.9 は Fig.5 と同様に積算傾斜面晴天指数と%電流量の関係を示したものであり、図中の破線はフィッティングにより得られた近似曲線 $f_a(x)$ を表している。ただし、 x は積算傾斜面晴天指数である。電流は分光放射照度分布による影響の補正を行う。つまり、電流による補正係数を電流補正係数 a とすると、 a は近似曲線 $f_a(x)$ を100%で除算した、式(8)のようになる。

$$a = \frac{f_a(x)}{100} \quad (8)$$

4.3 補正係数を用いた%電力量の補正

電圧及び電流から算出した補正係数を用いて補正を行った%電力量(以下、補正%電力量とする)は式(7)及び式(8)

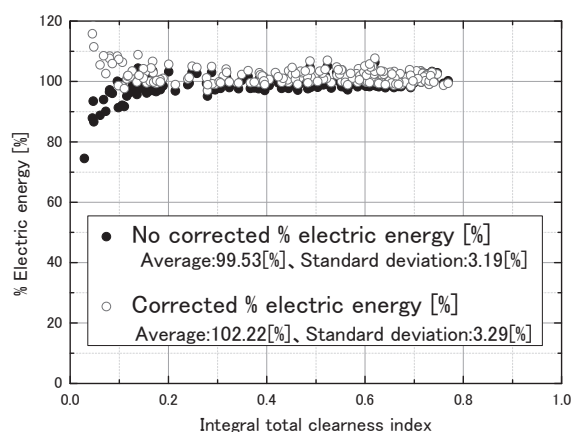


Fig.11 Compensation effect of % electric energy in Site A

図 11 補正前及び補正後の%電力量の比較(サイト A)

を用いた、下記の式になる。

$$\text{補正\%電力量} = \frac{\text{\%電力量}}{v \times a} [\%] \quad (9)$$

ただし、 v :電圧補正係数(式(7)参照)、 a :電流補正係数(式(8)参照)である。

Fig.10 に積算傾斜面晴天指数に対する補正前の%電力量と補正後の%電力量の比較を示す。Fig.10 より補正後の%電力量は補正前に比べて、変動が改善されていることが分かる。平均値は約 1.3 ポイント改善され、データのばらつきを表す標準偏差は0.6 ポイント改善(約 2 割の改善)されていることから、診断精度が向上したことが分かる。

4.4 サイトによる比較

PV システムの出力低下診断法には汎用性が必要になる。そこで、名城大学のデータを用いて行った%電力量の補正方法を他のサイトにも適用してみる。

今回、サイト A 及びサイト B の 2 つのサイトを選定して、検討を行う。それぞれのサイトにおける特徴として、サイト A は補正前から%電力量の変動があまり見られないサイト、サイト B は名城大学とは異なる傾向であるが、%電力量に変動が見られるサイトである。ただし、サイト A 及びサイト B とともに本大学と同様、比較的太陽高度の高い 11 時から 13 時のデータを使用する。

Fig.11 にサイト A における補正前と補正後の%電力量の比較を示す。Fig.11 よりサイト A は補正前から%電力量の変動が見られないサイトであるため、補正後の%電力量には顕著な変化が見られない。これまでに筆者らはサイト A に使用したモジュールは日射強度が低下しても FF 特性が低下しにく

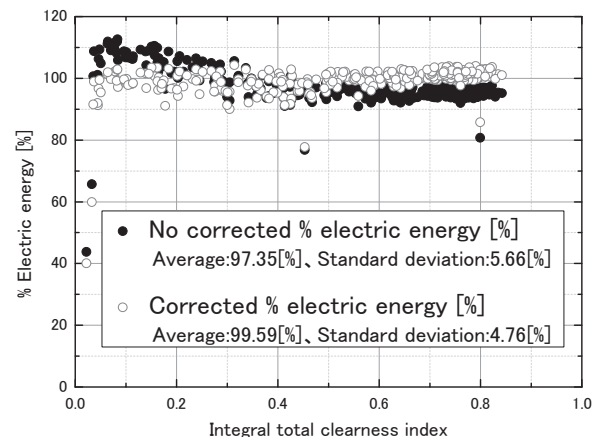


Fig.12 Compensation effect of % electric energy in Site B

図 12 補正前及び補正後の%電力量の比較(サイト B)

いことを確認している。すなわち、モジュールの種類によって積算傾斜面晴天指数との関係が異なる。

一方、このサイトでは分光放射照度分布の積算傾斜面晴天指数依存性が小さいことも確認している。すなわち、分光放射照度分布と積算傾斜面晴天指数の関係は場所によって異なることが考えられる。場所による分光放射照度分布の違いは今後詳細に検討する予定である。上記の原因によりサイト A では補正の効果が小さかったと考えられる。

Fig.12 にサイト B における補正前と補正後の%電力量の比較を示す。Fig.12 よりサイト B においては補正方法を適用することで、積算傾斜面晴天指数に対して全体的に%電力量が 100%付近に安定した値を取るよう改善されていることが分かる。また、標準偏差は 0.9 ポイント(約 2 割)改善した。

サイトによる比較を行った結果、サイト毎に補正後の結果に差が表れた。これはシステムの構成や気象条件に起因していると考えられる。つまり、今回の補正方法はサイト毎に補正係数を決定する必要があるが、太陽電池の FF 特性及び分光放射照度分布の影響が顕著なサイトにおいては、%電力量の顕著な改善が可能である。

本論文で提案する精度向上手法はサイト毎にカーブフィッティングにより近似曲線を求め補正係数を決定する必要がある。本手法は以下のように運用すれば診断精度の向上につながると思っている。すなわち、運用開始から 1 年間は以前に提案した 3 日射強度とモジュール温度から評価した%電力量で出力低下診断を行いながら一年分のデータを蓄積する。2 年目からは 1 年間蓄積したデータからサイト固有の近似曲線を求め、今回提案した補正した%電力量の手法を適用する。今後、この手法を運転中のシステムに適用して、診断精度の向上を確認する予定である。

5. まとめ

本論文は、%電力量を用いた PV システムの出力低下診断の精度向上を図るために、日射強度及びモジュール温度以外の因子による影響について検討を行った。また、その結果を踏まえて%電力量の補正方法についても検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1)%電力量は積算傾斜面晴天指数との相関性を取ると、積算傾斜面晴天指数 0~0.2 においては増加傾向を取り、傾斜面晴天指数 0.2~0.8 においては低下傾向を取る。
- (2)%電力量の変動因子として、日射強度変動に伴う動作点の移動による動作電圧変動及び分光放射照度分布の分布変化による動作電流の変化が挙げられる。
- (3)今回提案した%電力量の補正方法は上記の因子による影響が顕著なサイトにおいては有効である。また、名城大学及びサイト B において、標準偏差は約 2 割改善される。

筆者らはこれまで、日射強度及びモジュール温度から診断可能な%電力量の提案を行ってきた。しかし、その他の因子について考慮することで、%電力量を用いた出力低下診断の更なる精度向上が可能であることが判明した。

参 考 文 献

- 1)真田英和：「%電力量を利用した出力低下診断法とその精度」，太陽/風力エネルギー講演論文集，p.445-448(2012)
- 2)真田英和：「年間%電力量の推定精度に関する研究」，電気学会全国大会，522-C1，7-056(2013)
- 3)真田英和、山中三四郎、西戸雄輝、小林浩：「%電力量を用いた出力低下診断法に関する研究」，電気設備学会誌 2015 年 3 月号掲載予定
- 4)JIS C 8907：「太陽光発電システムの発電電力量推定方法」
- 5)田村純雪、大谷謙仁、黒川浩助：「多傾斜面日射量の測定と評価に関する研究」，太陽/風力エネルギー講演論文集，p.225-228, (2002)
- 6)岩井士郎,他,「分光日射分布の短絡電流に及ぼす影響(その 1)」太陽/風力エネルギー講演論文集,p.477-480, (2012)
- 7)岩井士郎,他：「分光放射照度分布の影響を考慮した%電力量の補正—晴天指数を用いた補正法の検討—」太陽/風力エネルギー講演論文集 Page.493-496, (2013)
- 8)JIS C8910：「一次基準太陽電池セル」
- 9)JIS C8907：「太陽光発電システムの発電電力量推定方法」