太陽電池の影による 発電能力低下診断に関する研究

正員 河村 一 (名城大学)

正員 浅野克憲 (名城大学)

正員 大野英之 (名城大学)

正員 内藤克彦 (名城大学)

正員 山中三四郎 (名城大学)

学生員 小島 厚 (名城大学)

正員 河村英昭 (名城大学)

A STUDY FOR GENERATING CAPACITY LOWERING DIAGNOSIS OF A SHADED PHOTOVOLTAIC MODULE

Hajime Kawamura, Member

Katsunori Asano, Member

Hideyuki Ohono, Member

Katsuhiko Naito, Member

Sanshiro Yamanaka, Member

Atsushi Kojima, Student-Member

Hideaki Kawamura, Member

(Meijo University)

The authors are studying the method for a generating capacity lowering diagnosis of a photovoltaic module. In this paper, we propose one method for a generating capacity lowering diagnosis of a shaded photovoltaic module. We perfectly blinded the part of one cell in one module (36 cells) in order to investigate the influence of shadow on the generated power. The shading area was made to be 0, quarter (1/4), half (1/2) and whole (1) of one cell. The generated power without shadow is almost proportional to irradiance. Increasing the shaded area, the power decreases. It is possible to statistically show the range of the dispersion of the data by the 99% simultaneous confidence interval, assuming that the generated power is proportional to irradiance. The data outside in the interval can be regarded as a different population from data within the interval. That is to say, the data of the outside in the 99% simultaneous confidence interval can be judged with any abnormality.

キーワード: 太陽電池モジュール、影、診断、同時信頼区間

1. まえがき

近年、地球の環境破壊やエネルギー資源の枯渇が心配されており、この問題の克服が各国共通の重要な課題になっている。これらの対策として二酸化炭素の排出のない風力発電、太陽光発電等の自然エネルギーの利用が注目されている。特に、太陽光発電は規模による効率の変動がないエネルギー源の一つとして注目されている。日本では通産省の主導のもと、国情にあった住宅用太陽光発電システムの導入が進められている。

このシステムは近年導入が始まったばかりなので現時点では問題が顕在化していないが、システムを長期運用していく間に、太陽電池自身の劣化や断線あるいは太陽電池表面の汚損等に伴う出力低下が起こる可能性がある。また、太陽電池の

設置時には問題がなくても、その後、周辺に建設された建造物等の影が太陽電池の一部にかかったり、落ち葉が付着してそれが影になったりして発電能力が低下することも考えられる。これらの原因は簡単に回復する場合もあれば、回復困難な場合もある。もし、太陽電池の発電能力が低下した場合、発電能力回復のすばやい対応が必要になる。

太陽電池の発電量は日射強度に依存し絶えず変化している。また、太陽電池の発電電力は温度^{1~3)}や季節^{4,5)}の影響を受けるといわれている。このため、太陽電池自身の発電能力低下を単純な出力監視により簡単に見つけることは難しい。一方、太陽電池の発電能力の低下を判定する方法としてはなるべく計測が簡単なことが望ましい。そこで、太陽電池の発電電力に影響を与え

図1 太陽電池の計測システム

Fig.1 The measurement system for photovoltaic modules

る因子を特定し、発電能力の低下を簡単に判定する方法を検討することが必要になる。

筆者らは予め計測されている正常な太陽電池の日射強度－発電電力特性を基本特性として、診断の対象となる太陽電池の発電電力及びその時の日射強度を基本特性と比較することによって、太陽電池の発電能力低下を診断する方法を検討している^{6,7)}。

本論文では太陽電池の日射強度－発電電力特性と、その特性に与える温度・季節の影響について検討している。また、太陽電池の一部に影がかかることによる発電電力の低下を診断するための一つの方法を提案する。

2. 太陽電池モジュール計測システム

筆者らは名城大学2号館屋上に太陽電池モジュール計測システムを設置している。システムの概略を図1に示す。このシステムはモジュールのI-V特性をI-Vカーブトレーサ（英弘精機MP123B）を用いて午前4時から午後8時の間、各モジュールごとに10分間隔で自動計測し、データを収集するようになっている。本論文では南向き35°の条件で設置した多結晶太陽電池モジュール(SORALEX MSX-64:セル36枚直列接続)を2枚設置したシステムを用いている。そのうちの1枚のモジュールは影の影響を検討するために、36枚のセルのなかの1枚のセルの一部分を完全に遮光して計測した。遮光面積はセルの1/4、1/2、1(全体)の3種類とし、順次計測を行った。残り1

図2 発電電力の1日の変化(1997年1月)

Fig.2 The change in a day of generated power

図3 日射強度と発電電力の関係

Fig.3 The relation between irradiance and generated power

枚のモジュールについては遮光を行わずに計測を続けた。日射強度はモジュールと同様に南向き35°の角度に設置した全天日射計(英弘精機MS801)を用いて計測した。また、太陽電池モジュールの温度は一般にモジュール裏面中心付近の温度で代表されることが多く⁸⁾、本論文でもこれに習ってモジュール裏面中心付近に熱電対をエポキシ樹脂で固定して計測した。

なお、本論文で検討の対象にしている発電電力はI-V特性から得られる最大電力をモジュールの発電電力としている。

3. 結果及び検討

3.1 太陽電池の発電電力と日射強度

図2は1997年1月の晴天時と曇天時における太陽電池モジュールの発電電力の1日の変化を示したものである。晴天のときには安定した電力

図4 日射強度-発電電力特性に及ぼす季節の影響
Fig.4 The influence of the season on the irradiance-generated power characteristic

が得られている。これに対し、曇天時では短時間の間に発電電力に大きな変化が生じる。このように太陽電池の発電電力は天候に依存して大きく異なるので、そのときに得られる発電電力から単純に太陽電池の性能を評価することはできない。そこで、図2のデータを日射強度と発電電力の関係として整理してみる。その結果を図3に示す。快晴時の日変化にはループのような特性が見られる。この特性はその時々によって現れたり現れなかったりする。この現象は上妻ら⁹⁾も報告している。次に、97年1,4,7,10月の一ヶ月間のデータから無作為に50点抽出した結果を図4に示す。図からも明らかのように、ばらつきはあるものの、季節に関係なく発電電力は日射強度にほぼ比例して増加している。すなわち、個々の特性に関しては十分な説明ができないものの、それを統計的にばらつきとして処理をすると発電電力は日射強度にほぼ比例するとみなされる。従って、日射強度と発電電力の関係を利用すれば、太陽電池の発電能力を評価することができる可能性がある。

3.2 影が発電電力に及ぼす影響

太陽電池の発電電力は気象条件の影響を大きく受ける。しかし、その発電電力は日射強度に対して整理することにより、一本の直線で評価できることが図4より明らかになった。一方、太陽電池の発電電力は気象条件のみではなく、影等の周囲環境にも強く影響される。本節では、太陽電池モジュールにかかる影が発電電力に与える影響について調べる。影の付け方は千差万別であり、一

図5 影をつけた太陽電池の日変化
Fig.5 The change in a day of generated power for the shaded PV module

図6 影をつけた太陽電池モジュールの発電電力と日射強度の関係
Fig.6 The relation between irradiance and generated power for the shaded PV module

枚のモジュールの複数のセルに影がかかる場合もある。1枚のセルの一部分のみに影がかかる場合もある。また、影も遮光率100%の影から薄い影まで様々である。本論文では代表的な例として遮光率100%の影が1枚のセルの一部分にかかったときを例にとり検討する。

図5は1枚のモジュール(セル数36枚)の中の1枚のセルに影をつけたときの発電電力の1日の変化を示している。この計測は1998年12月に行ったものである。本実験では1枚のモジュールを使って順次影の面積を変えて計測しているため、それぞれのデータは計測した日が異なっている。ただし、測定条件をできるだけそろえるために、本図のデータはなるべく快晴の日に計測した結果を表示してある。この結果から、影の面積に応じて

表1 日射強度－発電電力特性の回帰直線パラメータ
Table 1 The regression line parameters of the irradiance-generated power characteristics

		a_1	a_2	b	r^2
影なし	相関	50.1	—	1.31	0.99
	重相関	51.9	-0.11	2.97	0.99
1/4セル影	相関	47.2	—	0.79	0.97
	重相関	49.8	-0.11	2.01	0.97
1/2セル影	相関	34.9	—	0.25	0.99
	重相関	36.2	-0.088	1.56	0.99
1セル影	相関	1.2	—	6.44	0.27
	重相関	3.2	-0.093	7.82	0.65

発電電力が低下していることがわかる。特に、1枚のセル全体に影をつけると残り35枚のセルが健全でも発電電力はほとんど0になる。

次に、太陽電池に影がかかったときの日射強度と発電電力の関係を図4のように整理し直してみる。図6はその結果を示す。本図のデータは図5の計測を行った日を中心として前後1週間くらいの間に計測したデータを無作為抽出して得られたものである。影の面積が1/4のときの特性は影をつけていないときのそれに比べてわずかに低下するだけで、その差がほとんどなく、図4でも述べたと同様に日射強度と発電電力はほぼ直線になっている。ところが、影の面積が大きくなると、約0.2kW/m²以下の低日射領域では影のない場合の直線に近いものの、0.2kW/m²以上の高日射領域ではその傾きが影の面積の増大につれ、低下している。すなわち、影がある場合の日射強度－発電電力特性では0.2kW/m²を境として低日射領域と高日射領域では直線の傾きが異なり、高日射領域の直線の傾きは影の面積に応じて低下している。

3.3 発電電力に及ぼす温度と季節の影響

太陽電池の発電電力は日射強度の変化ばかりではなく、温度^{1~3)}や季節^{4,5)}に依存することが知られている。そこで、温度の発電電力への影響を調べるために、0.3kW/m²以上の日射強度のときの日射強度－発電電力特性を線形近似し、日射強度と発電電力の相関係数を求め、評価することにする。また、これにモジュール温度の影響を加味した日射強度、モジュール温度と発電電力の重相関係数を求めて評価する。すなわち、温度の影響を考慮しないときは

$$P = a_1 x_1 + b \quad (1)$$

図7 発電電力の温度依存性(日射強度0.7-0.71kW/m²)
Fig.7 The temperature dependence of generated power

となる。ここで、 P は発電電力、 x_1 は日射強度、 a_1 は日射強度に関する傾き、 b は切片である。また、温度の影響を考慮するときは

$$P = a_1 x_1 + a_2 x_2 + b \quad (2)$$

となる。ここで、 x_2 はモジュール温度、 a_2 は温度に関する傾きとする。得られたデータから、重回帰分析により上式の係数 a_1, a_2, b を求めることができる。また、相関係数並びに重相関係数も求めることができる。

その結果を表1に示す。本表に示す係数は、日射強度0.3kW/m²以上の全データ(図6と同様に図5の計測を行った日を中心として前後1週間くらいの間に計測したデータ)から無作為抽出した20点のデータに基づいて計算した。1セル全体に影をつけた場合を除いて、相関係数 r^2 は1に近い値となり、日射強度と発電電力の相関性は極めて高いことがわかる。また、日射強度とモジュール温度を考慮した重相関係数は1枚のセル全体に影をつけた場合を除いて、相関係数と重相関係数はほぼ同じ値になり、モジュール温度の発電電力に及ぼす影響は小さいことが示唆される。

図7は発電電力の温度依存性について詳細に検討するために、日射強度がほぼ一定(0.7-0.71kW/m²)の時の発電電力とモジュール温度の関係を示したものである。図中■は影がないときの発電電力、□は1枚のセルの1/2に影をつけたときの発電電力、また、実線は本論文で利用した太陽電池モジュールの温度依存性の公称値である¹⁰⁾。影のない時の発電電力－温度特性の傾きは公称値に近い値となる。また、1/2の影をつけたときの発電電力は影をつけないときの値よ

(a) 影のない場合
(a) The module without shadow

(b) 1セルの1/2に影をつけた場合
(b) The module with shadow to the half of one cell

図8 発電電力の日射強度依存性に及ぼす季節の影響
Fig.8 The influence of the season on the irradiance-generated power characteristic

りも小さく、温度依存性を考慮しなくても、その違いは正確に区別できる。

本論文の目的は太陽電池モジュールが正常に発電しているかどうかを判定する方法を検討することにある。このとき、計測項目が少ないほうが判定が簡単になる。そこで、多少、判定の精度は犠牲にしても簡便な判定方法を選択する場合もありえる。本論文で検討の結果、太陽電池モジュールの発電電力の温度変化は日射強度依存性に比べ小さいので、簡便な判定を目指すためにモジュール温度の計測を行わずに判定することが可能である。このとき、日射強度と発電電力との関係には温度依存性が含まれているので、判定するときに誤差要因となって現れる。しかし、図7に示す程度の温度依存性であれば、簡便な発電電力の低下を判定するための方法に与える影響はそれほど大きくないことが示唆される。そこで、太陽電池モジュールの発電電

力低下の判定は日射強度－発電電力特性を利用することにする。

太陽電池モジュールの発電電力に及ぼす季節の影響について検討するために4,8,12月の日射強度－発電電力特性を比較する。その結果を図8に示す。同図中(a)は影のない場合を、(b)は1セルの1/2に影をつけた場合を示す。本図に示したデータは1ヶ月間に計測したデータから100点無作為抽出して得られたものである。どちらの場合も季節による変化はあまり見られない。そこで、以後の考察では発電電力の季節変動は、日射強度－発電電力特性のばらつきの程度に小さく、まとめて統計的処理を施すことにする。

3.4 太陽電池の発電能力低下診断に関する一考察

太陽電池の日射強度－発電電力特性に与える温度と季節の影響は、そのばらつきと同程度であり、本研究の目的から、統計的にはそれらの影響を誤差と同等に処理しても差支えがないことを明らかにした。次に、太陽電池の性能低下を診断するための基準について考える。図4から明らかなように日射強度－発電電力特性は直線になると仮定すると、統計的にデータのばらつきの範囲は99%同時信頼区間で表すことができる。ただし、図6からわかるように、低日射強度領域では影による発電電力の低下が判定できないので、 0.3 kW/m^2 の高日射強度領域で判定する必要がある。図9の実線は影のないモジュールについて、データ数が20個のときの99%同時信頼区間を示したものである。すべてのデータが同時信頼区間の内側にある。この場合、もしも、この区間の外側に存在するデータは、内側にあるデータとは母集団が違ふと考えてもよいことになる。影がかかり異常が生じた場合には、影の面積が大きくなるほど、99%同時信頼区間から著しく外れることもわかる。すなわち、99%同時信頼区間の外側のデータは何らかの異常があるものと判断できる。ただし、この区間はデータ数によりその幅が異なってくる。実際に99%同時信頼区間を診断に適用するためには正常なモジュールのデータをどのように収集し、データ数をどの程度にすれば信頼のおける評価ができるのかという問題が残る。正常なデータの収集はモジュールを設置した初期に行うことになる。なるべく晴天の日を選び、一日のデータを収集し、その中から無作為に20個のデータを抽出し、それをもとに99%同時信頼区間を求める。これを正常なデータとし、以後の診断に利用することになる。図10は真夏と真冬の一日の計測から無作為に20点のデ

図9 日射強度－発電電力特性と99%同時信頼区間
Fig.9 Irradiance-generated power characteristic and 99% simultaneous confidence interval

ータを抽出して求めた99%同時信頼区間である。どちらのデータを利用しても99%同時信頼区間はほぼ同じになる。すなわち、季節に関係なく判定基準となる99%同時信頼区間を求めるための基礎データを収集することが可能である。

以上の結果、太陽電池の設置初期における正常時のデータから求めた99%同時信頼区間を太陽電池の発電能力低下診断の判定基準の一方法として利用可能であることが明らかとなった。ただし、前述のように低日射強度領域では影による影響が小さく、計測にはなるべく日中の日射強度の強い日を選ぶ必要がある。

4.まとめ

本論文では多結晶太陽電池モジュールの実測データから太陽電池の発電電力と日射強度及びモジュール温度の相関性を検討した。その結果、太陽電池の発電電力は季節を問わず日射強度の影響を強く受け、温度や季節の影響は小さいことが確認された。

また、影が発生した場合、発電能力が大きく低下することも確認できた。太陽電池の発電能力低下を99%同時信頼区間を用いて確認することができ、この方法を太陽電池の発電能力低下診断の指標として利用可能なことが示唆された。

本論文では太陽電池にかかる影を例に取り、発電能力の低下を簡単に判定する方法を提案した。この方法は影による発電能力低下だけではなく、他の原因で起こる発電能力低下の判定にも利用できる。今回は太陽電池モジュールを利用して検討しているが、今後これをアレイに拡張して検討していきたい。しかしながら、この方法では発電能力低下の原因を特定することはできない。太陽電池の発電能力低下を診断し、すばやく対応するためには低下の原因を特定する方法もぜひ必

図10 1日の日射強度－発電電力特性の中から無作為に抽出した20個のデータから求めた99%同時信頼区間
Fig.10 99% simultaneous confidence interval calculated from 20 data extracted randomly from irradiance-generated power characteristic in a day

要となる。今後、太陽電池の発電能力低下の原因を特定する方法について検討していきたい。また、今回の検討は太陽電池の診断のみを考えているが、最終的には太陽光発電システム全体の診断に拡張していくことも検討する予定である。

本論文では1枚のセルの一部分に遮光率100%の影がかかったときの特性のみを比較の対象とした。太陽電池にかかる影は複数のセルに影がかかったり、薄い影がかかったりすることも考えられる。日本国内の設置条件を考えたとき、影の発電電力に与える影響を把握することは重要であるので、今後影のつき方・位置と発電電力の関係に注目し、検討を続けていく予定である。

文献

- (1) 縄田 豊;「系統連系型太陽光発電システムの年間発電量の予測」 太陽エネルギー, Vol.16, No.6, pp.17-22 (1990)
- (2) 瀬川洋介、藤田嘉和、木田順三、石原好之、戸高敏之;「太陽光発電システムのシミュレーション」 太陽エネルギー, Vol.15, No.5, pp.38-46 (1989)
- (3) 上山裕介、谷 辰夫;「環境因子を考慮した太陽電池モジュールの出力計算法」 太陽エネルギー Vol.23, No.3, pp.54-61 (1997)
- (4) 平田陽一、谷 辰夫;「太陽電池モジュールの出力分析」 太陽エネルギー, Vol.21, No.2 pp.33-39 (1995)

- (5) 平田陽一、谷 辰夫;「太陽光スペクトル分布を考慮した太陽電池モジュールの出力評価」電気学会論文誌D Vol.113, pp.1027-1034 (1993)
- (6) 浅野克憲、小島 厚、河村 一、山中三四郎、河村英昭、大野英之、内藤克彦;「太陽電池の性能評価方法に影響を及ぼす諸因子」太陽/風力エネルギー講演論文集, 43 (平成10年12月)
- (7) 小島 厚、浅野克憲、河村 一、山中三四郎、河村英昭、大野英之、内藤克彦;「太陽電池の性能評価方法に関する研究」太陽/風力エネルギー講演論文集, 44 (平成10年12月)
- (8) 小林、谷:「環境因子の変化に対する太陽電池モジュールの出力特性」太陽エネルギー Vol.19, No.4 (1993-7)
- (9) 上妻、檜山、石原;「ニューラルネットワークを用いた太陽電池モジュールの最大出力の推定」平成5年電気学会全国大会 1678 (平成5年3月)
- (10) 黒川浩助、若松清司;「太陽光発電システム設計ガイドブック」, 1994) オーム社

(平成11年12月17日受付,平成12年05月19日再受付)

河村 一

(正員)1937年9月26日生まれ。1962年3月名城大学理工学部電気工学科卒業。1964年4月同大学助手、1969年4月同講師、現在に至る。主として、太陽エネルギー変換、熱電変換に関する研究に従事。国際太陽太陽エネルギー学会、電気設備学会、日本太陽エネルギー学会会員。

学会会員。

山中 三四郎

(正員)1955年5月3日生まれ。1981年3月三重大学大学院工学研究科修了。同年4月名城大学電気工学科助手、1988年4月電気電子工学科講師、現在に至る。博士(工学)。主として、電力ケーブルの絶縁劣化診断に関する研究に従事。日本太陽エネルギー学会、IEEE会員。

IEEE会員。

浅野 克憲

(正員)1974年6月29日生まれ。1997年3月名城大学理工学部電気電子工学科卒業。同年4月同大学理工学研究科電気電子工学専攻入学。1999年3月同修了。現在、岩田製本勤務

小島 厚

(学生員)1975年11月18日生まれ。1998年3月名城大学理工学部電気電子工学科卒業。同年4月同大学理工学研究科電気電子工学専攻入学。現在に至る。主として、太陽電池モジュールの故障・劣化診断に関する研究に従事。2000年3月同修了。現在(株)東海理化勤務

大野 英之

(正員)1942年8月29日生。65年3月岐阜大学工学部電気工学科卒業、同年4月(株)愛知電機工作所(現在、愛知電機(株))入社。70年4月名城大学理工学部電気工学科助手、86年4月同電気電子工学科講師、92年4月同助教授、現在に至る。工学博士。

主として、アーク遮断現象に関する研究に従事。応用物理学会及びエネルギー・資源学会会員。

河村 英昭

(正員)1942年10月22日生まれ。1965年3月名城大学理工学部電気工学科卒業。同年4月同大学助手、1973年同講師、1984年同助教授、1992年同教授、現在に至る。工学博士。主として、高分子の電気物性、絶縁劣化現象に関する研究に従事。1973年電気学会論文賞受賞。静電気学会、日本太陽エネルギー学会、IEEE会員。

内藤 克彦

(正員)1934年12月24日生。58年3月名古屋大学電気学科卒業。60年3月同大学大学院修士課程終了。同年日本碍子(株)入社。主として高電圧がいしの設計、高電圧現象の研究に従事。同社碍子技術部長、超高压研究所所長、理事・技師長など歴任。91年同社退職、名古屋工業大学電気情報工学科教授。98年名古屋工業大学定年退官、名城大学理工学部電気電子工学科教授、現在に至る。76年電気協会渋沢賞、82年、93年電気学会電気学術振興賞進歩賞。76年工学博士。90年IEEE Fellow、CIGRE会員。