

“Pmax Finder” – PV アレイの定格出力を最大化するプログラム

会員 ○加藤和彦（産業技術総合研究所）

“Pmax Finder” – A computer-aided program to calculate the maximum rated PV array power

Kazuhiko KATO

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, JAPAN (Fax:+81-29-861-5829, eMail: kazuhiko.kato@aist.go.jp)

ABSTRACT

PV modules as a part of industrial products have uneven quality inevitably. Therefore a rated PV array power depends upon series/parallel connection of them. Theoretical calculation to obtain the optimum PV array arrangement that has the maximum rated PV array power needs enormous iterations and unrealistic calculation time.

“Pmax Finder” is a useful computer-aided calculation program to find the optimum PV array arrangement with very short calculation time.

This paper describes the outline of the “Pmax Finder” and shows its calculation example.

キーワード: 太陽電池モジュール, 不具合, 示温シール

Keywords: PV module, PV array, rated power, calculation program

1. 緒言

日本工業規格 (JIS) によれば, 地上設置用の平板・非集光形の結晶系・アモルファス太陽電池モジュール (以下「モジュール」) の出力特性は, 最大出力 (Pm) および短絡電流 (Isc) が公称値の 90% 以上, 開放電圧 (Voc) が公称値の ±10% と規定されている⁽¹⁾. したがって, 市場に流通している個々のモジュールの出力特性は公称値からの偏差を有している.

それらを組み合わせて構成される太陽電池アレイ (以下「アレイ」) の定格出力が, モジュールの公称最大出力の合計とどの程度乖離しているかについては, 当所の 192 台の住宅用太陽光発電システム (以下「PV システム」) を対象とした分析を実施し, アレイ定格出力がアレイ公称出力に満たない場合もあることを報告している⁽²⁾. したがって, PV システムの発電性能を向上させるためには, その設計段階においてアレイの接続パターンを最適化する必要がある.

モジュールを所与とした場合にアレイ定格出力を最大にする接続パターンを求める場合, 全てのアレイ接続パターンでの定格出力を計算し, それが最大となる接続パターンを特定するのが理想的である. しかし, その接続パターンは, 例えば 9 直列 3 並列アレイ (モジュール 27 枚) では約 380 億通り, 6 直列 4 並列 (モジュール 24 枚) では約 962 億通りと, 莫大な計算回数となり現実的ではない.

そこで筆者は, 少ない計算回数で短時間にアレイ定格出力を近似的に最大にするアレイ接続パターンを求める計算プログラム “Pmax Finder” を考案・開発した. 本稿ではその概要を紹介する.

2. モジュールの定格性能のばらつきを考慮したアレイ定格出力の近似的な求め方とその実例

アレイの定格出力は実測するのが理想であろうが, 屋外で標準試験条件 (STC: Standard Test Condition) を得ることは困難であり, かつ非現実的である. 他の方策として, モジュール個々の定格電流-電圧特性式を用い, アレイの配線構成に応じて特性式を合成する数値的解法も理論的には存在するが, その解法は複雑と

String 1	String 2	String 3	String 4
$P_m=180.6$ $i_{P_m}=5.08$ $V_{P_m}=35.55$ $i_{SC}=5.69$ $V_{OC}=45.03$	$P_m=183.2$ $i_{P_m}=5.12$ $V_{P_m}=35.77$ $i_{SC}=5.72$ $V_{OC}=45.20$	$P_m=182.5$ $i_{P_m}=5.17$ $V_{P_m}=35.31$ $i_{SC}=5.83$ $V_{OC}=45.18$	$P_m=177.4$ $i_{P_m}=5.04$ $V_{P_m}=35.19$ $i_{SC}=5.78$ $V_{OC}=44.92$
$P_m=179.1$ $i_{P_m}=5.03$ $V_{P_m}=35.64$ $i_{SC}=5.76$ $V_{OC}=45.03$	$P_m=184.1$ $i_{P_m}=5.19$ $V_{P_m}=35.47$ $i_{SC}=5.83$ $V_{OC}=45.26$	$P_m=175.7$ $i_{P_m}=5.01$ $V_{P_m}=35.07$ $i_{SC}=5.75$ $V_{OC}=44.87$	$P_m=178.4$ $i_{P_m}=5.06$ $V_{P_m}=35.28$ $i_{SC}=5.80$ $V_{OC}=45.04$
$P_m=185.1$ $i_{P_m}=5.19$ $V_{P_m}=35.69$ $i_{SC}=5.80$ $V_{OC}=45.33$	$P_m=177.5$ $i_{P_m}=5.03$ $V_{P_m}=35.31$ $i_{SC}=5.76$ $V_{OC}=44.96$	$P_m=182.0$ $i_{P_m}=5.15$ $V_{P_m}=35.38$ $i_{SC}=5.80$ $V_{OC}=45.21$	$P_m=171.9$ $i_{P_m}=4.87$ $V_{P_m}=35.32$ $i_{SC}=5.51$ $V_{OC}=45.11$
$P_m=184.0$ $i_{P_m}=5.17$ $V_{P_m}=35.60$ $i_{SC}=5.77$ $V_{OC}=45.30$	$P_m=184.4$ $i_{P_m}=5.18$ $V_{P_m}=35.63$ $i_{SC}=5.80$ $V_{OC}=45.27$	$P_m=183.8$ $i_{P_m}=5.20$ $V_{P_m}=35.37$ $i_{SC}=5.79$ $V_{OC}=45.15$	$P_m=178.6$ $i_{P_m}=5.06$ $V_{P_m}=35.30$ $i_{SC}=5.76$ $V_{OC}=45.05$
$P_m=182.5$ $i_{P_m}=5.18$ $V_{P_m}=35.20$ $i_{SC}=5.77$ $V_{OC}=45.24$	$P_m=183.8$ $i_{P_m}=5.17$ $V_{P_m}=35.59$ $i_{SC}=5.82$ $V_{OC}=45.38$	$P_m=176.4$ $i_{P_m}=5.02$ $V_{P_m}=35.11$ $i_{SC}=5.74$ $V_{OC}=44.91$	$P_m=177.8$ $i_{P_m}=5.02$ $V_{P_m}=35.45$ $i_{SC}=5.75$ $V_{OC}=44.94$
$P_m=183.3$ $i_{P_m}=5.18$ $V_{P_m}=35.40$ $i_{SC}=5.80$ $V_{OC}=45.22$	$P_m=180.6$ $i_{P_m}=5.15$ $V_{P_m}=35.10$ $i_{SC}=5.78$ $V_{OC}=45.07$	$P_m=184.3$ $i_{P_m}=5.13$ $V_{P_m}=35.91$ $i_{SC}=5.71$ $V_{OC}=45.17$	$P_m=179.2$ $i_{P_m}=5.07$ $V_{P_m}=35.33$ $i_{SC}=5.70$ $V_{OC}=45.08$

Fig.1: An existing PV array installed in AIST

なり、また、通常その特性式を決定づけるパラメータも提供されていないことなどから、数値的解法でアレイの定格出力を求めることも実質的には不可能である。

そこで、“Pmax Finder”では、比較的入手が容易な個々のモジュールの定格最大出力動作電圧 ($V_{Pm@STC}$) および定格最大出力動作電流 ($i_{Pm@STC}$) を用い、それらをアレイの配線構成に応じて四則演算することで、アレイの定格出力を近似的に求める方法を採用している。

以下に、具体的な例を用いてその方法を示す。

Fig.1 は、当所に実在する PV システムのうちの 1 台のアレイ(単面設置)の実際の配線構成である。各モジュールの定格最大出力 ($P_{m@STC}$) の単純合計(以下「単純合計アレイ出力 (Sum of rated PV module power)」)は 4,336W であり、公称最大出力の合計(公称アレイ出力, Nominal PV array power)である 4,320W (180W/枚 × 24 枚)よりも 16W 多い。しかし、これがそのまま本 PV アレイの定格出力とはならない。

モジュールの直列接続で構成されるストリング ($l=1\sim 4$) の定格最大出力動作電流 ($I_{Pm@STC}(l)$) は、接続されているモジュールがもつそれらの最小値となる。また、各ストリングの定格最大出力動作電圧 ($V_{Pm@STC}(l)$) は、そのストリングに属するモジュールのそれらの総和となる。したがって、Fig.1 の場合、各ストリングの $I_{Pm@STC}(l)$ および $V_{Pm@STC}(l)$ は、

$$\text{String 1: } I_{Pm@STC}(1)=5.03A, V_{Pm@STC}(1)=213.08V$$

$$\text{String 2: } I_{Pm@STC}(2)=5.03A, V_{Pm@STC}(2)=212.88V$$

$$\text{String 3: } I_{Pm@STC}(3)=5.01A, V_{Pm@STC}(3)=212.14V$$

$$\text{String 4: } I_{Pm@STC}(4)=4.87A, V_{Pm@STC}(4)=211.88V$$

となる。

アレイは、これら 4 つのストリングの並列接続であるから、アレイ全体の定格最大出力動作電流 ($I_{Pm@STC}$) は近似的に各ストリングの定格最大出力動作電流の総和とみなすことができ、また、アレイ全体の定格最大出力動作電圧 ($V_{Pm@STC}$) は近似的に各ストリングの定格最大出力動作電圧のうちの最小値とみなすことができる。すなわち、

$$I_{Pm@STC} = \sum_l I_{Pm@STC}(l) = 19.94A$$

$$V_{Pm@STC} = \text{MIN}[V_{Pm@STC}(l)] = V_{Pm@STC}(4) = 211.88V$$

となる。したがって、このアレイの定格出力 ($P_{m@STC}$) の近似解として、

$$P_{m@STC} = I_{Pm@STC} \times V_{Pm@STC} = 4,225W$$

が得られる。この値は単純合計アレイ出力に比べて 111W 少なく、公称アレイ出力に比べても 95W 少ない。

個々のモジュールの定格性能に関する情報に制約がある現実の状況下では、このようにして得られる近似値が、われわれが知ることができる最も「確からしい」アレイ定格出力と考える。本稿ではこの近似解を「正味アレイ定格出力 (Net rated PV array power)」と呼

び、“Pmax Finder”はこれをよりどころとし、これが近似的に最大となるアレイ接続パターンを求めることを主眼としている。

3. 近似的なアレイ接続パターンの求め方

前述したように、たとえモジュール数が 20~30 枚程度であっても、それらを直並列に接続した場合に取りうるアレイ接続パターンは莫大な数にのぼる。

そこで、“Pmax Finder”では、その計算回数を減少させ短時間に近似解を得るための指針を導入している。それは一言で言うと「直列に接続されるモジュールの $i_{Pm@STC}$ のばらつきを極力抑え、かつ並列に接続されるストリングの $V_{Pm@STC}$ のばらつきも極力抑える」という指針である。

並列数を l とした場合の“Pmax Finder”の簡単な計算プロセスを概説する。

必要な入力データはモジュール個々の識別番号、 $i_{Pm@STC}$ および $V_{Pm@STC}$ である。この入力データセットをもとに、“Pmax Finder”は $i_{Pm@STC}$ の小さい順にモジュールを並べ替え、 $i_{Pm@STC}$ の小さいモジュール同士でストリングを構成した初期アレイを準備する。

次に、 $i_{Pm@STC}$ の小さいモジュールで構成された第 1 ストリングの各モジュールを第 2 ストリング以降のモジュールと逐次入れ替え、各ストリングの $V_{Pm@STC}$ のばらつ

Table 1: Existing array arrangement for PV system “2-12-24”

	$P_{m@STC}$	$i_{Pm@STC}$	$V_{Pm@STC}$	$i_{sc@STC}$	$V_{oc@STC}$
String-#1					
Module-01	160.02	7.88	20.30	8.68	26.11
Module-02	158.72	7.70	20.61	8.50	26.16
Module-03	159.64	7.85	20.34	8.72	26.16
Module-04	156.83	7.90	19.85	8.75	25.73
Module-05	154.23	7.90	19.53	8.72	25.56
Module-06	155.25	7.78	19.96	8.62	25.67
Module-07	156.56	7.89	19.85	8.68	25.65
Module-08	153.42	7.71	19.87	8.70	25.63
Module-09	154.61	7.54	20.51	8.32	25.70
		7.54	180.82		
String-#2					
Module-10	156.51	7.85	19.93	8.67	25.55
Module-11	150.38	7.34	20.48	8.18	25.59
Module-12	155.02	7.75	20.00	8.58	25.63
Module-13	156.07	7.79	20.03	8.61	25.70
Module-14	153.80	7.75	19.85	8.62	25.56
Module-15	155.29	7.88	19.70	8.68	25.64
Module-16	156.97	7.91	19.84	8.75	25.66
Module-17	155.05	7.82	19.82	8.66	25.68
Module-18	155.38	7.75	20.06	8.56	25.68
		7.34	179.71		
String-#3					
Module-19	157.14	7.60	20.66	8.56	26.15
Module-20	156.69	7.86	19.91	8.67	25.56
Module-21	154.50	7.72	20.00	8.62	25.57
Module-22	155.40	7.76	20.04	8.53	25.72
Module-23	156.87	7.92	19.81	8.71	25.74
Module-24	156.15	7.93	19.69	8.75	25.61
Module-25	155.00	7.75	20.01	8.70	25.69
Module-26	155.80	7.89	19.73	8.73	25.63
Module-27	158.95	7.91	20.09	8.73	26.11
		7.60	179.94		

									$I_{pm@STC}$	$V_{pm@STC}$
01	03	04	07	16	20	23	26	27	7.85A	179.72V
02	05	08	09	11	15	19	21	24	7.34A	180.05V
06	10	12	13	14	17	18	22	25	7.75A	179.70V
$P_{pm@STC}=(7.85+7.34+7.75)A \times 179.70V=4,122W$										

(a) PV array arrangement for maximum net rated PV array power

									$I_{pm@STC}$	$V_{pm@STC}$
01	03	04	07	10	13	19	20	27	7.60A	180.96V
02	06	08	09	12	18	21	22	25	7.54A	181.06V
05	11	14	15	16	17	23	24	26	7.34A	178.45V
$P_{pm@STC}=(7.60+7.54+7.34)A \times 178.45V=4,012W$										

(b) PV array arrangement for minimum net rated PV array power

Fig.2: maximum and minimum net rated PV array power and their PV array arrangements as a result of theoretical calculation

きが低減されかつ正味アレイ定格出力が大きくなった場合には、入れ替えたアレイ構成を暫定アレイ構成とする。そして、モジュール入れ替えによる効果が得られなくなった時点で、第1ストリングに属するモジュールを確定する。

さらに、同様な入れ替え作業を第2ストリング以降第(L-1)ストリングまで行い、最終的に全てのストリングに属するモジュールが決定する。

4. “Pmax Finder”を用いた計算の実例

Table 1は、当所に実存する住宅用PVシステム(システム名:2-12-24)のアレイ構成(モジュール公称最大出力:150W, 9直列×3並列=27枚)を示したものである。公称アレイ出力は4,050Wであり、単純合計アレイ出力はそれより160W大きい4,210Wである。しかし、実際のアレイ構成から求められる正味アレイ定格出力は $(7.54+7.34+7.60) \times 179.71=4,040W$ にしかならない。

これらのモジュールの全ての組み合わせ(約380億通り。所要計算時間:一ヶ月)について計算したところ、正味アレイ定格出力の最大値および最小値はそれぞれ4,122Wと4,012Wであり、両者の差は110Wとなった。これは公称アレイ出力の2.7%に相当する。Fig.2はその時のアレイ構成を示したものである。

一方、Fig.3は”Pmax Finder”による極めて短時間(1

									$I_{pm@STC}$	$V_{pm@STC}$
01	03	04	07	16	20	23	26	27	7.85A	179.72V
02	05	08	09	11	15	19	21	24	7.34A	180.05V
06	10	12	13	14	17	18	22	25	7.75A	179.70V
$P_{pm@STC}=(7.85+7.34+7.75)A \times 179.70V=4,122W$										

Fig.3: A calculation result by “Pmax Finder”

秒未満)の計算で得られた近似的な最適アレイ構成である。Fig.2(a)との比較で明らかなように、”Pmax Finder”で得られたアレイ構成は全ての組み合わせについての計算で得られた最大値に完全に一致している。

5. 結言

PVモジュールが工業製品である以上、その性能・品質にばらつきをとまなうのは不可避である。そのばらつきの存在を許容したうえで、それらを用いたアレイ構成を最適化することにより、PVシステムの性能を向上させることができる。その効果は決して絶大とはいえないが、技術開発や製造の分野で取り組まれているセル・モジュールの効率向上に引けを取るものでもない。

本稿で紹介した”Pmax Finder”は、なお改善の余地はあるものの、現実のシステム設計・施工の場面に役立つツールである。しかし、最大の課題は計算に必要なモジュール個々の工場出荷データが一般には公開されていないことである。

PVシステムの性能を向上させ、より多くのクリーンエネルギーの生産とCO₂削減、あるいは経済性向上を実現するという観点から、PVモジュール供給メーカーは積極的に向上出荷データを公表すべきであろう。

なお、”Pmax Finder”は、当センター公式ホームページにアップロードされており、誰もが無料で利用できる。

参考文献

- (1) 日本工業規格 JIS-C8918(結晶系太陽電池モジュール)および JIS-C8939(アモルファス太陽電池モジュール)
- (2) 加藤和彦:産総研太陽光発電設備におけるモジュール出力・システム容量のばらつき, 平成20年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会(鳥取, 2008)