

最大出力動作電圧に注目した 太陽電池モジュールの年間出力特性解析

Analysis of Yearly Generation from PV Modules Based on Voltage Level at Peak Power Point

上妻信一^{*1}
Shinichi KOUZUMA

石原修^{*3}
Osamu ISHIHARA

檜山隆^{*2}
Takashi HIYAMA

Abstract

This paper presents a stochastic analysis on the yearly generation characteristics of PV modules with respect to the setting of their output voltage levels. Interconnected PV modules to commercial power sources are the main concern in this study. The output power from the modules depends on the setting of the output voltage level. The voltage control loops of inverters are utilized for regulating the output voltage level in order to achieve the maximum output power efficiency. In order to obtain a strategy to determine a proper output voltage level, the relation between the output voltage level and the total generation is mainly investigated by using the actual field data obtained on amorphous and poly-crystalline silicon PV modules through the ongoing long term measurement from August, 1992. The results indicate that the output voltage level should be set to the averaged voltage at the peak power points, where the insolation level is greater than 0.2 kWm^{-2} , and the proper setting gives the power generation of up to 97% from the actual maximum power generation.

Key Words: PV module, analysis of generation, optimum operating voltage, amorphous silicon, poly-crystalline silicon

1. はじめに

逆潮流可能な系統連系型の太陽光発電システムは、無公害、無騒音等の太陽光発電本来の利点に加え、夏季の冷房負荷増大時のピークカットにも役立つことから、その普及が期待されている。太陽電池は直流電源であるため、系統連系に際してはインバータが必要となる。このインバータにより、太陽電池出力電力の制御が可能であり、制御方式としては太陽電池の直流電圧を一定に保つ出力電圧一定制御（以下、一定制御という）と、この直流電圧を出力最大の動作点へ常に移動させる最大出力追従制御（以下、追従制御という）の2種類が考えられている⁽¹⁾。太陽電池の出力特性は気象条件等の環境因子に大きく影響されるため⁽²⁾⁽³⁾、その変化に追従して常に最大出力が得られるように制御を行うのが追従制御であり、気象変化などに關係無

原稿受付 平成6年8月8日

*1 会員 熊本大学自然科学研究科学生（860 熊本市黒髪2-39-1）

*2 会員 熊本大学工学部電気情報工学科教授（同上）

*3 会員 熊本大学工学部建築学科教授（同上）

く太陽電池の動作電圧を一定に制御するのが、一定制御である。したがって、追従制御に比して一定制御により得られる電力量は少なくなる。また、一定制御は追従制御に比べ、制御アルゴリズムが単純であるという利点があるが、システムにより異なる最適な一定電圧を定めることが容易でなく、その設定値により発生電力量が左右されるため、出力電圧設定には何らかの指針が必要となる。一方、追従制御においては、インバータの入力電圧範囲と太陽電池の出力電圧範囲との整合性がとれていれば、太陽電池の仕様の相違にともわれることなくシステム化ができるなど、その利点は多いと考えられる。現在、追従制御方式によるインバータの研究開発は急速に進んでおり、著者らも、ニューラルネットワークを用いた追従制御方式の研究を行っている^{(4)~(9)}。

しかし一方で、以前から、出力電圧の設定値が適切であれば、一定制御により追従制御に近い電力量が得られるという報告もなされているため^{(10)~(12)}、その差について長期的な実測データに基づいた検証を行つておくことは重要である。

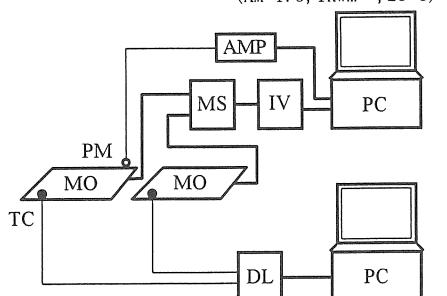
本論文では、多結晶シリコンおよびアモルファスシリコンの電力用太陽電池モジュールの出力特性について、自然環境下で行った1年間の測定データをもとに、最大出力動作電圧の変化に着目して解析を行っている。さらに、一定制御を行った場合に得られる電力量を定量的に求め、それに関しても考察している。

2. 太陽電池モジュール特性測定システム

表1に長期測定を行っている多結晶シリコンおよびアモルファスシリコンの電力用太陽電池モジュールの仕様を、図1に測定システムの概要を示す。本システムでは、それぞれの太陽電池モジュールを、本学構内の校舎（6階建て）の屋上に傾斜角30°で方位を真南に固定して設置している。また、日射量測定のための日射計と太陽電池セル温度測定のための熱電対を取り付けている。本システムは2台のパソコンにより制御され、午前5時から午後8時までの間5分間隔で毎日計181回、各モジュールの出力特性（I-V特性）、設置面日射強度、太陽電池セル温度および外気温度を自動測定している。測定は1992年8月に開始した。図2に、各モジュールのI-VおよびP-V特性測定結果の一例を示す。図中には、それぞれの最適動作点を○印で示し、その点での特性値を併記している。

表1 電力用太陽電池モジュールの仕様

	多結晶	アモルファス
最大出力 P_m (W)	41.4	24.5
短絡電流 I_{sc} (A)	2.87	1.92
開放電圧 V_{oc} (V)	21.4	21.8
最大出力動作電流 I_{pm} (A)	2.55	1.55
最大出力動作電圧 V_{pm} (V)	16.2	15.8
曲線因子 FF	0.67	0.59
外形寸法 (mm)	980×440	1202×398
(AM-1.5, 1kWm ⁻² , 25°C)		



PC : パソコン
MO : 太陽電池モジュール
PM : 日射計
TC : 熱電対
IV : I-Vカーブトレーサ
MS : モジュールセレクタ
DL : データロガー

図1 モジュール特性自動測定システム

次節から述べる種々の解析結果は、この測定システムにより、1992年8月1日から1993年7月31日までの1年間に得られた、日射強度が0.01kWm⁻²以上の時の各モジュールのI-V特性（それぞれ約50,000件）を対象に行なったものである。

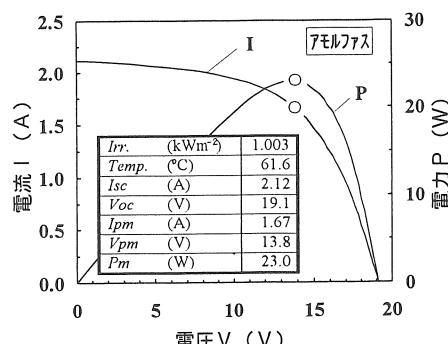
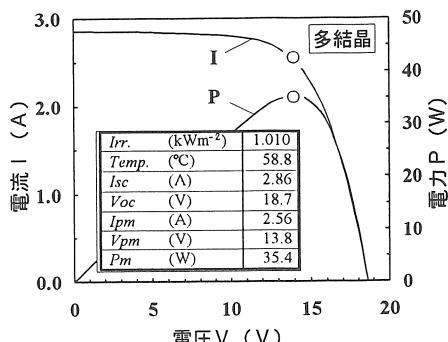


図2 I-V・P-V特性測定結果
(1992年9月6日正午)

3. 最大出力動作電圧の変化

3-1. 日射強度別最大出力積算量と最大出力動作電圧平均値

図3に、多結晶シリコンおよびアモルファスシリコン各モジュールの最大出力動作電圧の日射強度別年間平均値（0.01kWm⁻²刻み）を示す。同図より、両モジュールとも、日射強度がほぼ0.2kWm⁻²までは、日射強度の増加とともに最大出力動作電圧平均値は増加しているが、日射強度が0.2kWm⁻²をこえたあたりから、最大出力動作電圧平均値は減少に転じていることがわかる。これは太陽電池の特性から以下のように説明される。一般に、太陽電池の最大出力動作電圧は、温度一定の場合、入射光強度の対数に比例して増加するが、

入射光強度を一定とした場合は、温度の上昇とともに低下する。また、太陽電池の温度は、入射光強度が増加すれば上昇する。したがって同図は、日射強度が 0.2 kWm^{-2} までは、温度の影響が小さく、入射光強度の増加とともに電圧も上昇するが、日射強度が 0.2 kWm^{-2} をこえると、入射光強度の増加による電圧上昇よりも、温度上昇による電圧低下の方が強く現れることを示している。同図より、日射強度が 0.2 kWm^{-2} から 1.2 kWm^{-2} までの範囲において、直線回帰計算により求めた日射強度変化に対する最大出力動作電圧平均値低下の傾きは、それぞれ多結晶が -1.67 V/kWm^{-2} 、アモルファスが -0.73 V/kWm^{-2} であった。これは、同図を見てもわかるように、日射強度が 0.2 kWm^{-2} 以下での電圧の変動幅に比べて極めて小さい。しかし、簡単な試算であるが、個人住宅システム用として、測定に用いたモジュールで12直列（最大出力動作電圧180V程度）のPVアレイを構成した場合、アレイの前記係数は、多結晶で -20.04 V/kWm^{-2} 、アモルファスで -8.76 V/kWm^{-2} と大きな変動幅になる。したがって、追従制御を行う場合の電圧の調整範囲は直列モジュール数の増加につれ大きくなるため、より速やかな電圧調整が必要となってくる。

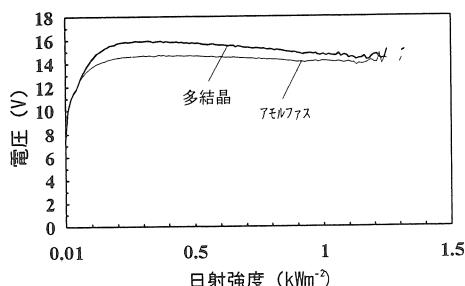


図3 年間の日射強度別最大出力動作電圧平均値

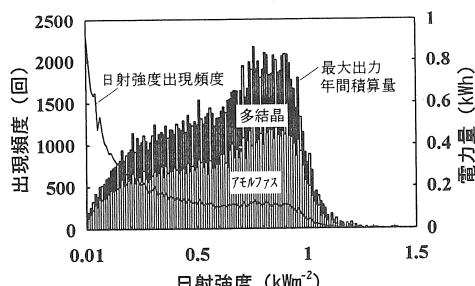


図4 年間の日射強度別最大出力積算量と日射強度出現頻度

次に、年間の日射強度別最大出力積算量と日射強度出現頻度を図4に示す。図3の考察で述べた日射強度 0.2 kWm^{-2} を境界として図4を見た場合、日射強度の出現頻度は年間で 0.2 kWm^{-2} 以下が43.9%あったのに対し、その日射による最大出力積算量は、多結晶で年間全体の8.1%，アモルファスで同8.8%と、両モジュールとも1割に満たなかった。

以上のことから、次節以降の最大出力動作電圧の解析においては、日射強度の状態を以下の2種類に分けて検討を行っている。ひとつは、日射強度 0.2 kWm^{-2} 以上の日射強度状態（以下、条件日射状態という）であり、もうひとつは、全データが対象となる日射強度 0.01 kWm^{-2} 以上の日射強度状態（以下、全日射状態という）である。

3-2. 最大出力動作電圧日平均値の変化

多結晶およびアモルファス各太陽電池モジュールの最大出力動作電圧日平均値と最大出力日積算量の年間の変化を図5に示す（図中には若干の欠測日を含む）。最大出力動作電圧日平均値は、全日射状態と条件日射状態とに分けて、どちらも、その日毎の日射強度の出現頻度で重み付け平均している。同図を見ると、前節での考察からも予測できるが、両モジュールとも、全日射状態と条件日射状態とでは、最大出力動作電圧日平均値に1V程度の差がある。また当然のことながら、全日射状態の日平均値は、天候の変化により大きく変動している。以上に述べたように、太陽電池出力電圧を一定値に設定する場合の電圧値としては、全日射状態の平均値を目安とすることは適切でないことがわかる。また、多結晶とアモルファスとの条件日射状態における最大出力動作電圧日平均値の変化を比較すると、多結晶の場合は冬高く夏低いという季節差が現れているが、アモルファスの場合は、年間を通して変化があまりないことがわかる。

4. 太陽電池出力電圧を一定にした場合の電力量

4-1. 一定電圧設定値と得られる電力量との関係

多結晶シリコンおよびアモルファスシリコン太陽電池モジュールについて測定した、全日射状態における1年間のI-V特性データを使用して、ある期間（年間あるいは月間）を通して太陽電池出力電圧を一定とした場合に得られる電力量と、その電圧値との関係を求めた。図6に、各モジュールの8月、2月および年間についての計算結果を示す。同図の縦軸は各々の期間

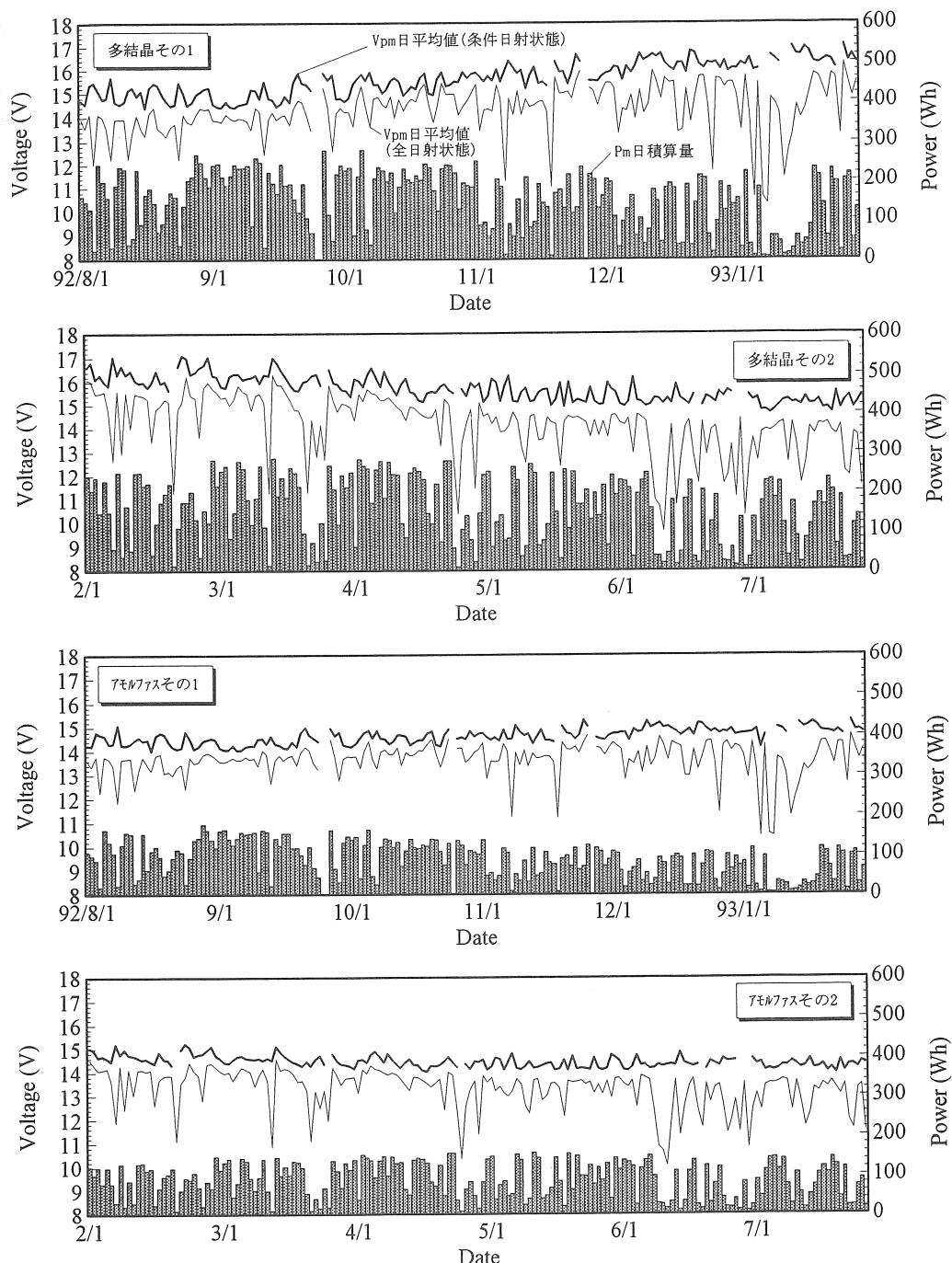


図 5 最大出力動作電圧日平均値および最大出力日積算量の年変化

の最大出力積算量で規格化した値であり、計算を行った横軸の刻み幅は0.1Vである。同図より、太陽電池出力電圧を年間一定（一定制御に相当）とした場合に得られる電力量の最大値は、両モジュールとも、最大出力積算量（追従制御に相当）の97%以上であった。また、多結晶とアモルファスとを比較すると、アモルファスの方が両電力量の差は小さいことがわかる。さらに、月を通して電圧を一定とした場合をみると、多結晶では夏（8月）と冬（2月）の季節の差がはつきり現れているのに対し、アモルファスではその差があまりなく、電圧の低い領域ではほとんど一致していることがわかる。これは、図5の条件日射状態における最大出力動作電圧日平均値の変化からも予測できる。

ここで、本論文で使用した太陽電池モジュールの曲線因子（ FF ）は、表1より多結晶で0.67程度となっている。この曲線因子が1に近づくにしたがって、図2に示す電力-電圧特性はより急峻なピークを持つため、最大出力動作電圧に対して同じ比率で動作電圧が変化した場合の出力の低下率は、本研究で得られた結果と比較してより大きくなる。

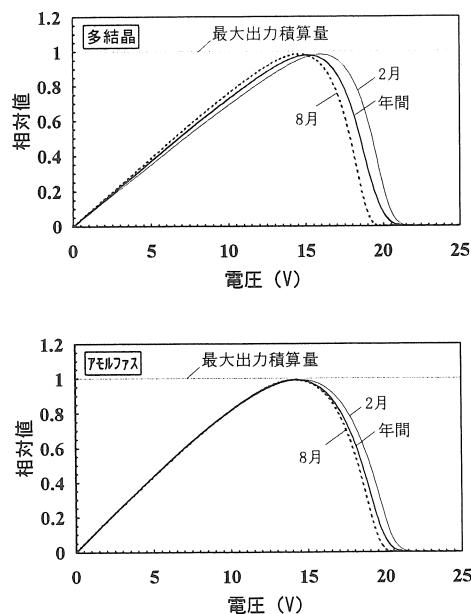


図6 一定電圧設定値と得られる電力量の関係

4-2. 最適な一定電圧設定値と最大出力動作電圧平均値

太陽電池出力電圧を一定としたときに得られる電力量が最大となる一定電圧設定値（以下、最適設定電圧という）を各月および年間にについて求めた。さらに、

最適設定電圧との比較ため、それぞれの期間における、全日射状態および条件日射状態の最大出力動作電圧平均値を求めた。その結果を表2ならびに図7に示す。表2からわかるように、月別最適設定電圧の年間の変動幅は、多結晶で1.4V（14.6～16.0V）、アモルファスで0.6V（14.0～14.6V）であった。また、条件日射状態

表2 最大出力動作電圧平均値および最適設定電圧

期間	電圧(V)						
	多結晶			アモルファス			
	A	B	C	A	B	C	
1992年8月	13.7	14.9	14.6	13.4	14.4	14.2	
	9月	14.0	14.9	14.6	13.7	14.3	14.2
	10月	14.6	15.3	15.0	13.9	14.5	14.4
	11月	14.6	15.8	15.5	13.7	14.7	14.5
	12月	14.8	16.1	15.9	13.8	14.8	14.6
	1993年1月	14.4	16.4	16.0	13.4	14.8	14.6
	2月	14.9	16.3	16.0	13.7	14.7	14.6
3月	14.9	16.2	15.9	13.6	14.6	14.4	
4月	14.6	15.7	15.4	13.5	14.4	14.2	
5月	14.1	15.4	15.0	13.3	14.3	14.0	
6月	13.2	15.2	14.8	12.8	14.3	14.0	
7月	13.2	15.0	14.7	12.9	14.2	14.0	
年間	14.2	15.5	15.1	13.4	14.5	14.3	

A:全日射状態最大出力動作電圧平均値

B:条件日射状態最大出力動作電圧平均値

C:最適設定電圧

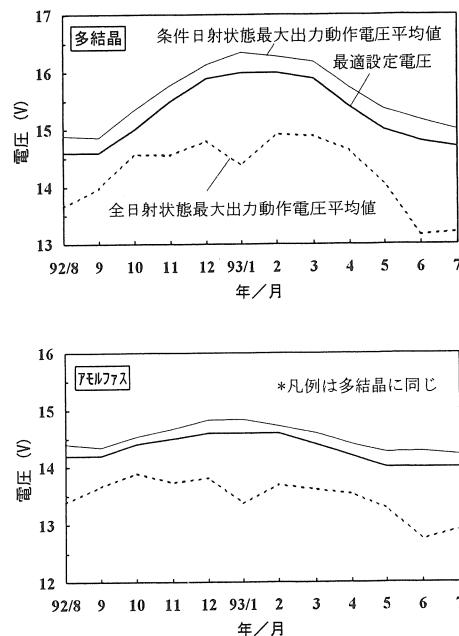


図7 月別最大出力動作電圧平均値および最適設定電圧

における最大出力動作電圧平均値と最適設定電圧との差（表2のBとCの差）を年間についてみると、多結晶が0.4V、アモルファスが0.2Vであり、この電圧差による電力量の差は図6より両モジュールとも1%に満たないことがわかる。さらに図7をみると、条件日射状態における最大出力動作電圧の月平均値は、若干高めではあるが両モジュールとも各月の最適設定電圧と同様に推移していることから、最適な一定電圧値を求める場合には、条件日射状態における最大出力動作電圧が意味を持つといえる。

4-3. 一定制御のための電圧設定手法についての一考察

最後に一定制御のための電圧設定手法について考える。前節までの解析結果から、ある期間の条件日射状態における最大出力動作電圧の平均値は、その期間の最適設定電圧に近い値であることが示された。したがって、電圧を一定に制御しようとする期間の条件日射状態における最大出力動作電圧の平均値がわかれば、この平均値をそのまま一定制御の電圧値として用いたとしても、最適設定電圧で制御した場合とほぼ同程度の電力量（その差は1%未満：4-2節参照）が得られると考えられる。ところが、この条件日射状態における最大出力動作電圧の平均値を求めるために、太陽光発電システムの出力特性を長期間にわたって計測する必要があるとすれば、この平均値により、一定電圧制御のための電圧値を設定するという手法は現実性のないものとなる。

しかし、3-1節で述べたように日射強度が 0.2 kWm^{-2} を超えた場合（条件日射状態）の最大出力動作電圧の変化は非常に小さくなること（図3参照）を考慮すると、一定電圧制御のための電圧値の設定に関しては、長期間システムを動かしてこの設定電圧値を決定する必要はないと考えられる。具体的に多結晶モジュールを例にして考えると、表2より、その条件日射状態最大出力動作電圧平均値および最適設定電圧値は、年間でそれぞれ15.5V、15.1Vであり、これらの電圧値は図3より、日射強度が約 0.6 kWm^{-2} と約 0.8 kWm^{-2} に対応していることがわかる。したがって、求めようとする期間の太陽電池設置場所の平均的外気温および風速などから太陽電池の平均的温度を推定⁽³⁾し、太陽電池をその温度に保って日射強度が約 0.6 kWm^{-2} から約 0.8 kWm^{-2} の間とした時の最大出力動作電圧を適当な回数測定すれば、その平均値を一定電圧制御のための電圧値として設定しても良いと考えられる。また、実際に測定しな

くとも、特性仕様に記載されている太陽電池の温度特性および照度特性から、前述の太陽電池温度および照度（日射強度）範囲を用いて、設定電圧を見積もることも可能と考えられる。しかしながら、これらの設定手法は、本論文で対象としている太陽電池モジュールの年間実測結果を基にした一考察であり、詳細な検証については今後の課題としたい。

また、著者らは、すでにニューラルネットを用いて、モニター用セルの開放電圧より太陽電池モジュールの最大出力動作電圧を同定する手法を提案⁽⁸⁾し、実測データを用いた解析により長期にわたるその有効性を明らかにしている。ニューラルネットの学習には2日分の実測データのみを使用しており、学習用データの取得に関しての時間的な問題はない。この学習後ニューラルネットを用いることにより、本研究で述べている一定電圧制御に使用する太陽電池モジュールの設定電圧を決定することも可能となる。

5. まとめ

系統連系型の太陽光発電システムに用いられるインバータにより、太陽電池出力電力の制御が可能であり、制御方式としては、出力電圧一定制御と最大出力追従制御の2種類がある。いずれの場合も、制御対象は太陽電池出力電圧であり、その意味から、自然環境下で太陽電池の最大出力動作電圧がどのように変化するかを知ることは重要である。本論文では、多結晶シリコンおよびアモルファスシリコン太陽電池モジュールの1年間の実測データを用い、最大出力動作電圧に注目して種々解析を行った。また、太陽電池出力電圧を月間あるいは年間で一定に設定したとき得られる電力量を求め、各期間の最大出力積算量との比較を定量的に行った。その結果、次のことが明らかとなった。

①最大出力動作電圧の日射強度別年間平均値は、両モジュールとも、日射強度の増加に対して、日射強度 0.2 kWm^{-2} をほぼ境に、増加から減少へ転じた。日射強度が 0.2 kWm^{-2} から 1.2 kWm^{-2} までの範囲において、直線回帰計算により求めた日射強度変化に対する最大出力動作電圧平均値低下の傾きは、多結晶が -1.67 V/kWm^{-2} 、アモルファスが -0.73 V/kWm^{-2} であった。これは、日射強度が 0.2 kWm^{-2} 以下の電圧の変動幅に比べてかなり小さかった。

②①に示した電圧変動幅は、直列モジュール数の増加につれ大きくなるため、追従制御を行う場合は、より速やかな電圧調整が必要となってくる。

③年間の日射強度別最大出力積算量と日射強度出現頻度を、日射強度 0.2 kWm^{-2} を境として見た場合、日射強度の出現頻度は年間で 0.2 kWm^{-2} 以下が43.9%であったのに対し、その日射による最大出力積算量は、多結晶で年間全体の8.1%，アモルファスで同8.8%と、両モジュールとも1割に満たなかつた。

④日射強度が 0.2 kWm^{-2} 以上の時の最大出力動作電圧の日平均値および月平均値はともに、多結晶では季節による差が明確であるが、アモルファスでは年間を通してその変化は小さかつた。

⑤太陽電池出力電圧を年間を通して一定値に設定（一定制御に相当）した場合に得られる電力量の最大値は、両モジュールとも、最大出力積算量（追従制御に相当）の97%以上であった。ここで、本論文で使用した太陽電池モジュールの曲線因子(FF)は、多結晶で0.67程度であり、この曲線因子が1に近づくにしたがって、太陽電池の電力-電圧特性はより急峻なピークを持つため、最大出力動作電圧に対して同じ比率で動作電圧が変化した場合の出力の低下率は、本研究で得られた結果と比較してより大きくなる。

⑥太陽電池出力電圧を年間あるいは月間で一定に設定した場合に得られる電力量が最大となる設定電圧値は、日射強度が 0.2 kWm^{-2} 以上の時の最大出力動作電圧の平均値から見積もることができることがわかつた。

以上、本論文で得られた結果は、一定制御の出力電圧設定のための一つの指標として十分意味を持つものと考えられる。また、追従制御においても、実時間で連続的に制御を行う方式以外にも、例えば始動直後は追従制御を行い、日射強度がある値になったところで電圧値を固定し、一定制御に切り替えるというようなハイブリッド制御方式も可能であると思われる。

本研究にあたり、測定データの編集に当たってくれた、卒業研究生の近藤敏夫君、川久保雅之君、ならびに、共同研究としてお世話頂いた三洋電機株式会社・ニューマテリアル研究所・電子デバイス研究部の関係各位に深く感謝の意を表する。

- (3) 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, pp. 39-46(1993)
- (4) 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年度電気学会全国大会，[12], pp. 206-207
- (5) 上妻・今久保・檜山：「ニューラルネットワークによる太陽光発電システムの最大出力の推定」，平成5年度電気学会電力・エネルギー部門大会，[2], pp. 371-372
- (6) T.Hiyama, and S.Kouzuma:"Application of Neural Network to Prediction of Maximum Power from PV Modules", Proceedings of APSCOM-93, (Hong Kong), pp. 349-354, (1993)
- (7) 上妻・今久保・檜山：「ニューラルネットによる太陽光発電モジュールの最適動作点の同定」，平成5年度電気学会電力技術研究会，PE-93-16, pp. 143-152
- (8) 上妻・今久保・檜山：「ニューラルネットによる電力用太陽電池モジュールの最適動作点の実時間推定」，電気学会論文誌B, Vol. 114, No. 9, pp. 881-887 (1994)
- (9) 今久保・上妻・檜山：「ニューラルネットワークを用いた太陽光発電システムの最大電力追従制御」，平成6年度電気学会電力・エネルギー部門大会論文集，[2] pp. 271-272
- (10) 滝川・栗原：「電力系統と太陽電池の連系(その1)-太陽電池の基礎運転特性-」，電力中央研究所報告，研究報告，177063, (1978)
- (11) 滝川・栗原・武田：「電力系統と太陽電池の連系(その2)-日照下における太陽電池の定電圧運転特性-」，電力中央研究所報告，研究報告，179005, (1979)
- (12) 田中・丁・牧野・裕口・武岡・山田：「ソーラーエアコンの運転特性評価」，電気学会論文誌B, Vol. 113, No. 10, pp. 1165-1171(1993)

参考文献

- (1) 斎藤：「直流-交流インバータ」，日本太陽エネルギー学会関西支部第18回シンポジウム資料(1993)
- (2) 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」，平成4年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会講演論文集，pp. 27-30.