

太陽電池の短絡電流と開放電圧を指標とする最大出力制御

Maximum Power output control decided by the short-circuit current and the open-circuit voltage of PV cell

佐々木 弘太^{*1} 田島 大輔^{*1} 大坪 昌久^{*2} 本田 親久^{*3} 大塚 馨象^{*3}
Kouta SASAKI Daisuke TASHIMA Masahisa OTSUBO Chikahisa HONDA Keizou OHTSUKA

Abstract

It is necessary to control the maximum output power of PV cell when the solar radiation changes. To estimate the parameter, the voltage ratio and the current ratio were defined as the index of open-circuit voltage and short-circuit current of PV cell. The output voltage and current at maximum power were calculated from a short-circuit current and an open-circuit voltage using the current ratio and the voltage ratio. As the results, the short-circuit current and the open-circuit voltage were measured by the quantity of solar radiation even if the output changed, and it is understood that the PV cell can always run at maximum output if the voltage is adjusted according to the calculated result. So, the possibility of controlling the maximum power output of PV cell can be confirmed.

キーワード：最大出力制御、短絡電流、開放電圧、電流比、電圧比

Key Words: maximum power control, short-circuit current, open-circuit voltage, current ratio, voltage ratio

1. はじめに

太陽光発電は、再生可能エネルギーの一つとして注目されている。太陽光発電の出力電力をそのまま負荷へ接続して使用方法もあるが、電気分解セルとの組み合わせにより水素を発生させ、発生した水素を燃料電池の燃料として利用する方法¹⁾や、最近著しい研究発展を遂げている電気二重層キャパシタを電力貯蔵装置として使用し、効率良く電力を利用するシステムの開発²⁾が行われている。しかし、問題点の1つとして、日射量の変化による出力変動がある。この問題を解決する方法として、日射変動が生じて太陽電池の出力を常に最大にするために、最大電力点追従法(MPPT: Maximum Power Point Tracking)法³⁾が採用されている。代表的なMPPT法には、山登り法⁴⁾、ファジィ制御⁵⁾、ニューラルネットワーク⁶⁾、遺伝的アルゴリズム⁷⁾など

があるが、一般に用いられているのは山登り法である。

山登り法とは、太陽電池の電圧を一定時間間隔でわずかに変動させ、そのときの太陽電池の出力電力を計算して前回との比較を行い、常に出力が大きくなる方向に太陽電池の電圧を変化させる方法である。しかし、日射変動が大きい時に、最適動作点を探索するタイミングや動作点変更周波数または、制御時定数との兼ね合いで、結果として最大電力からずれた動作点になることがある⁸⁾。筆者らは、このような問題点を解決するためには最大出力を表す明確な指標が必要であると考え、太陽電池の出力電力を日射変動が生じて、その時点での最大値に維持するために太陽電池の短絡電流と開放電圧に着目した最大出力運転方式について検討を行ってきた^{9~13)}。ここでは、太陽電池の出力電力をその時点での最大出力で制御を行うために、太陽電池の短絡電流と開放電圧を指標として、最大出力点を表すことのできる計算式を導出し、その式の精度について実測値との比較・検討を行ったので報告する。

2. 太陽電池の特性による電流比と電圧比の定義

図1に、太陽電池の電流-電圧($I-V$)特性、電流-出力電力($I-P$)特性を示す。この図において、式(1)と式(2)

*1 宮崎大学工学部大学院生

(〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

e-mail:tashima@epl.opt.miyazaki-u.ac.jp

*2 宮崎大学工学部教授

*3 宮崎大学工学部名誉教授

(原稿受付：2005年9月13日)

に示すように、最大出力時の電流 I_{pmax} を短絡電流 I_{sc} で割った値を電流比 α と定義し、最大出力時の電圧 V_{pmax} を開放電圧 V_{oc} で割った値を電圧比 β と定義する。

$$\alpha = \frac{I_{pmax}}{I_{sc}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{V_{pmax}}{V_{oc}} \quad (2)$$

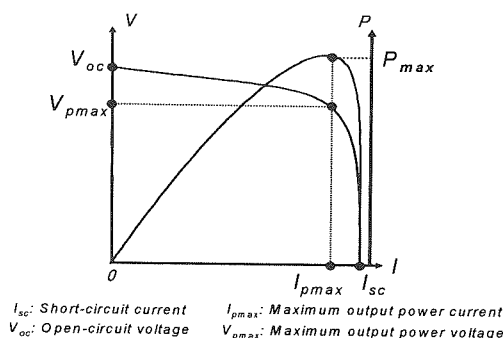


Fig.1 I-V, I-P characteristics of a PV cell.

図1 太陽電池の I-V、I-P 特性

3. 電流比、電圧比の測定

図2に太陽電池の特性評価回路を示す。この太陽電池の電流-電圧特性を日射量、温度の変化に対して求めた。この実験で測定した太陽電池の温度とは、熱電対を用いて測定した太陽電池裏面の温度である。日射量の測定には全天日射量計を用いた。電流-電圧特性の測定には可変抵抗を操作して行い、そのデータをパソコンにより処理、解析した。その結果を元に、式(1)、(2)を用いて電流比、電圧比を求めた。日射量変化実験では電池温度 30°C 一定、温度変化実験では日射量 $950\text{W}/\text{m}^2$ 一定である。

実験に用いた太陽電池は、定格開放電圧 32.7V 、定格短絡電流 5.49A 、定格最大出力 128W の多結晶シリコン太陽電池(シャープ製、NE128AH)である。

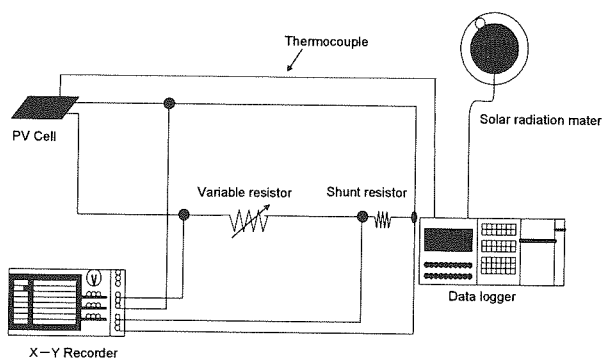


Fig.2 Test circuit for PV cell characteristics.

図2 太陽電池の特性評価回路

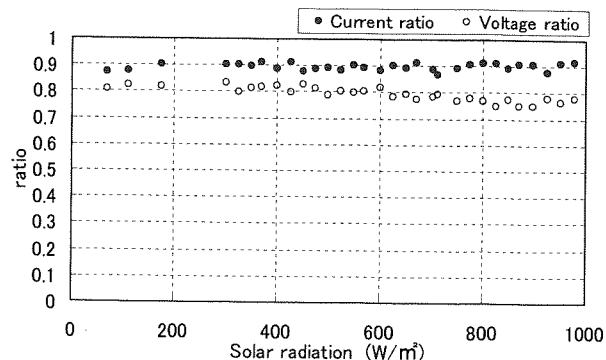


Fig.3 Current ratio and Voltage ratio with the solar radiation.

図3 日射量変化に対する電流比、電圧比

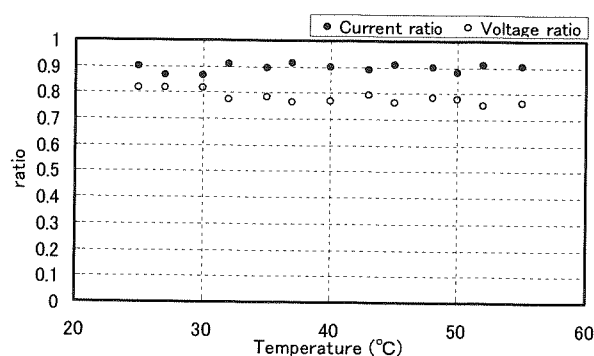


Fig.4 Current ratio and Voltage ratio with the change of temperature.

図4 温度変化に対する電流比、電圧比

図3に日射量変化に対する電流比 α 、電圧比 β を示す。また、図4に温度変化に対する電流比 α 、電圧比 β を示す。図3から、電流比は $100\sim 1000\text{W}/\text{m}^2$ の日射量において、約 0.91 であり、日射量の変化による影響が見られないことが分かった。また、図4から、温度が変化しても電流比はほとんど影響を受けないことが分かった。電圧比は、図4から温度の変化には影響をほとんど受けないが、図3から日射量が大きくなると共にわずかに低下する傾向が見られたが、その影響は小さいことを確認した。以上の結果より、電流比、電圧比を一定とみなし最大出力を求める計算式の導出を行った。

4. 最大出力を求める計算式の導出

上述の通り、電流比、電圧比が日射量や温度の影響をあまり受けないことが明らかにできた。このことからこれらの結果を用いて太陽電池の最大出力を導出することができる。最大出力時の電流は、

$$I_{pmax} = \alpha \times I_{sc} \quad (3)$$

また、最大出力時の電圧は、

$$V_{pmax} = \beta \times V_{oc} \quad (4)$$

これより、太陽電池の最大出力 P_{Dmax} は、

$$P_{Dmax} = \alpha \times I_{sc} \times \beta \times V_{oc} \quad (5)$$

と表すことができる。

電流比 α 、電圧比 β は図 3、図 4 から、

$$\alpha = 0.91 \pm 0.02$$

$$\beta = 0.79 \pm 0.05$$

である。最大出力制御に適用するためには、短絡電流と開放電圧の測定が必要である。しかし、太陽電池の電流は日射量と比例関係にあることから日射変動が激しくても、従来の山登り法のように最大出力点から大きく崩れることなく制御可能であると考えられる。

5. 太陽電池の最大出力の測定

本実験では、図 5 の回路を用いて摺動変圧器で電圧を調整することにより出力が最大となるように設定し、太陽電池の出力を交流側、直流側で測定を行った。また、導出した最大出力計算式の有効性を確認するため、実験結果との比較を行った。ただし、導出した式(5)は直流の出力である。ここで、式(5)を実験回路と適合させるために導出を行った。

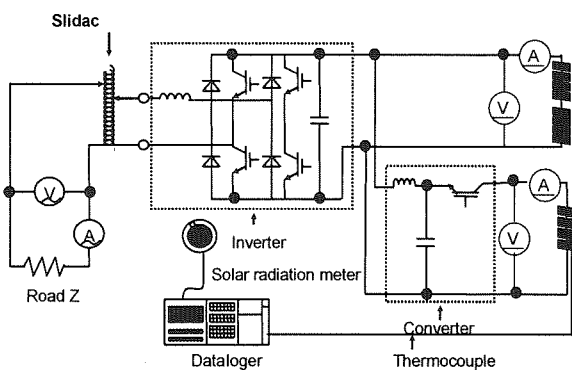


Fig.5 Test circuit for maximum output control of PV Cells.

図 5 最大出力測定回路

インバータ効率を γ とおき、交流出力 P_{Amax} を実効値として考えると、交流出力 P_{Amax} は、

$$P_{Amax} = P_{Dmax} \times \gamma \quad (6)$$

となる。負荷抵抗を Z 、力率 $\cos\phi$ 、変圧器で制御する電圧 V

と定義すると交流出力 P_{Amax} は以下の式のように表すことができる。

$$P_{Amax} = \frac{V^2}{Z} \times \cos\phi \quad (7)$$

式(6)、(7)より、制御する交流電圧値は、次式のようになる。

$$V = \sqrt{\frac{P_{Dmax} \times \gamma \times Z}{\cos\phi}} \quad (8)$$

式(8)に式(5)を代入すると、

$$V = \sqrt{\frac{\alpha \times I_{sc} \times \beta \times V_{oc} \times \gamma \times Z}{\cos\phi}} \quad (9)$$

となる。

次に今回使用したインバータの効率を求めた。使用したインバータはシャープ製の JH-40JV である。表 1 に使用したインバータの自立運転モードの仕様を示す。

Table1 Specification of inverter.

表 1 インバータの仕様

Manufacture	SHARP
Type	JH-40JV
Rating input voltage	DC200V
Rating output voltage	AC101V
Rating output	1.5kW
Rating conversion efficiency	90 %

インバータ効率の測定を行うために、図 5 の回路において、摺動変圧器を接続せず、直接負荷側に可変抵抗を接続し、抵抗値を変化させた時の直流側の電流、電圧、交流側の電流、電圧の測定を行った。なお、交流側の電圧は 100V 一定である。図 6 に出力電流に対するインバータの電力変換効率を示す。

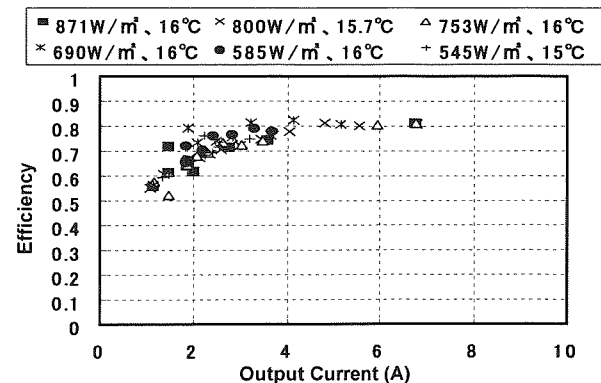


Fig.6 Electric power conversion efficiency of an inverter for different output current.

図 6 出力電流に対するインバータの電力変換効率

図 6 から、電流が増加、つまり出力が増加するに従ってインバータの電力変換効率は上昇し、電流が 4A 以上では電力変換効率は 0.8 一定となっている。またその時の直流入力と交流出力の関係は図 7 のように線形性を示すことが確認できた。

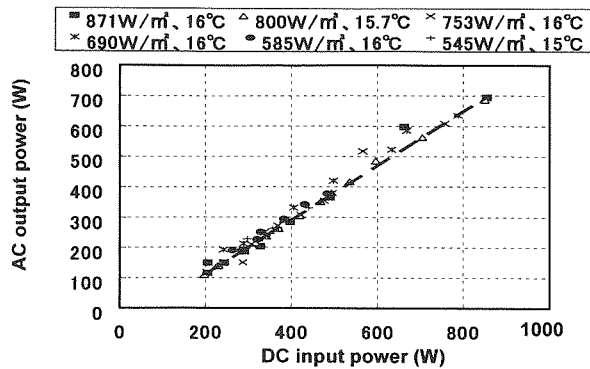


Fig.7 Relation between the output and the input.

図7 直流入力に対する交流出力

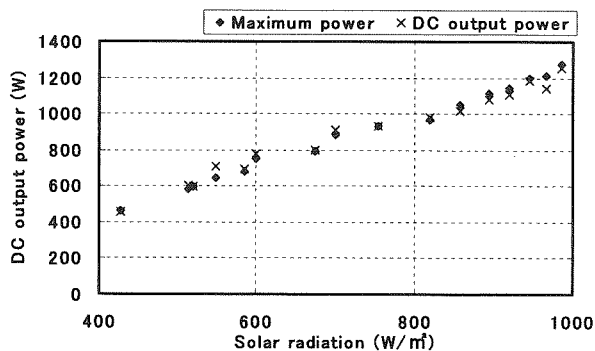


Fig.8 Comparison between Maximum output and DC output power

図8 最大出力と直流側出力の比較

この結果より交流出力 P_A は、直流入力 P_D に対して次式で求められる。

$$P_A = 0.9P_D - 69.0 \quad (10)$$

日射量(出力)が高い時を念頭において、インバータ効率 $\gamma = 0.80$ とした。

以上より、先に導出した式において、電流比は $\alpha = 0.91 \pm 0.02$ 、電圧比 $\beta = 0.79 \pm 0.05$ であったので、電流比 $\alpha = 0.91$ 、電圧比 $\beta = 0.79$ として式(9)に電流比、電圧比、インバータ効率を代入すると、

$$V = \sqrt{\frac{0.91 \times I_{sc} \times 0.79 \times V_{oc} \times 0.80 \times Z}{\cos \phi}} \quad (11)$$

同様に、式(6)にそれぞれ代入すると、

$$P_{Amax} = 0.91 \times I_{sc} \times 0.79 \times V_{oc} \times 0.80 \quad (12)$$

となる。

導出した式(12)を用いて計算値と実測値を比較した。実測値については、図5の回路を用いて摺動変圧器で電圧を変化させて出力が最大となる場所を実測値として測定した。同時に、制御回路の出力が最大値を示しているか確認するために図2の回路を用いて最大出力の測定を行い、図5の回路の直流側出力との比較を行った。その結果を図8に示す。

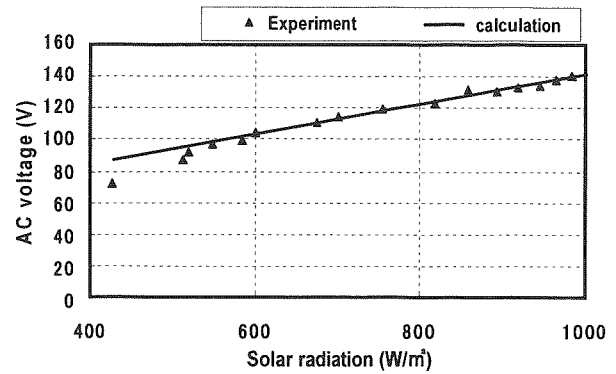


Fig.9 Maximum AC voltage against the solar radiation.

図9 日射量に対する最大出力時の電圧

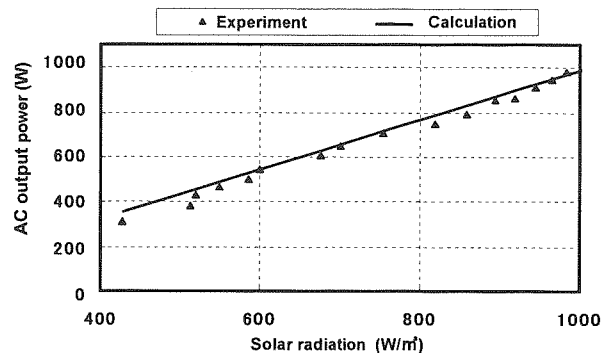


Fig.10 Maximum power against the solar radiation

図10 日射量に対する最大出力

図9に最大出力の時の電圧の実測値と計算値を示す。また、図10に日射量に対する出力の実測値と計算値を示す。図8より、最大出力と直流側出力が一致していることがわかる。図9から、計算式による電圧は実測値に近い値を示すことが明らかになった。しかし、精度の点で言えば、日射量が高い時には非常に高い精度を示すが、日射量が低くなるにつれて精度が低くなった。これは、インバータ効率を高い日射量領域で制御できるように設定したため、当然の結果と言える。図10でも同じように、実測値と計算値は日射量が高いときに良く一致しており、日射量が低くなると誤差が大きくなることが分かった。

6. 計算式の補正

図9、10を見ると、ほとんどの日射量において計算式による出力が実測点よりも高い値を示すことが分かる。計算式による出力が実測値よりも高い値にあるということは、負荷を固定して制御する場合、用いる太陽電池が持つ最大出力値以上に電圧を上げているということになる。このことより、制御を行うには実測値よりも計算式による値が低い値か、または、一致することが望ましいと考え、どの程度、計算式が実測値に対してずれているのか検討を行った。インバータの電力変換効率には用いる装置によって様々な値を示すので、今回はインバータ効率を考慮に入れない直流側の出力について比較を行った。

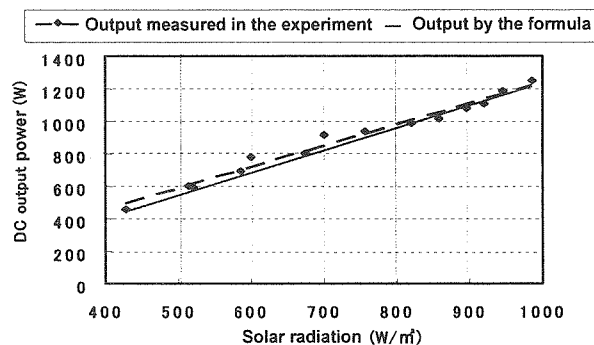


Fig.11 Maximum power against the solar radiation.

図 11 日射量に対する直流側の最大出力

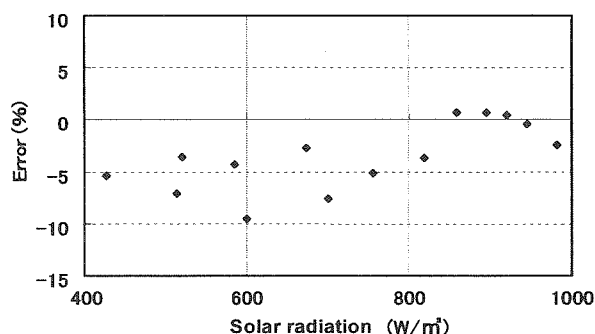


Fig.12 The error of output by formula to output measured in the experiment.

図 12 実測値に対する計算式の出力の誤差

図 11 に図 5 の回路において示した日射量に対する直流側の最大出力を表す。同図から、日射量が高いときは計算式による出力、実測値はほぼ同じであるが、日射量が低くなるにつれて両者の値には差が見られた。図 12 に実測値を 100(%)とした時の計算値のずれ(誤差)を示す。このグラフより、日射量 800W/m²以下で計算値による出力が実測値を下回っていることが分かる。その割合は、約 5~10%程度である。

次に、誤差の原因について検討を行った。図 13 に出力電流と電圧の実測値に対する計算値の誤差を示す。同図から、電流は、実測値と計算値の値が一致しているが、電圧は、図 12 の出力と同じような傾向がみられる。このことより、誤差の原因は電圧にあることが分かったので、電圧に対して補正を行った。また、日射量が太陽電池の電流と比例関係にあることから、横軸に電流を取り、縦軸に計算値から最大出力時の電圧を引いた値 V^* を取り、それより近似式を求めたところ、

$$V^* = -0.426I_{pmax} + 1.88 \quad (13)$$

という式が得られた。

この式を式(4)に代入して補正すると、

$$V_{pmax} = \beta \times V_{oc} - V^* \quad (14)$$

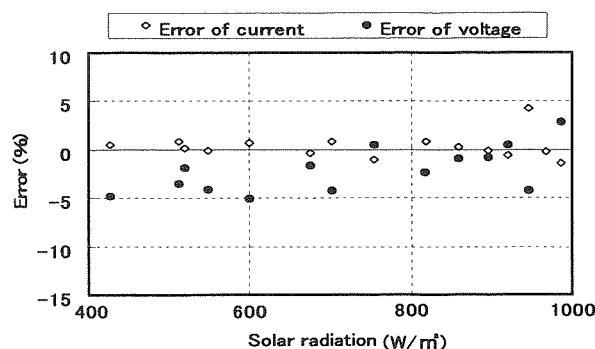


Fig.13 The error of Current and Voltage by formula to output measured in the experiment.

図 13 実測値に対する計算値の電圧と電流の誤差

となり、式(5)に代入すると、

$$P_{Dmax} = \alpha \times I_{sc} \times (\beta \times V_{oc} - 0.426 \times \alpha \times I_{sc} + 1.88) \quad (15)$$

となる。これにより、電圧比 β の誤差 5%の補正が可能であることが分かり、太陽電池の短絡電流と開放電圧から、電流比 α と電圧比 β を求めることによって、太陽電池の直流側の最大出力制御が可能であることが分かった。

次に、直流最大入力 P_{Dmax} と交流最大出力 P_{Amax} の間には式(10)を最大出力の式に変更し、以下に示す関係がある。

$$P_{Amax} = 0.9P_{Dmax} - 69.0 \quad (16)$$

そこで、式(15)を式(16)に代入し、インバータの電力変換効率 γ を考慮に入れると、交流最大出力 P_{Amax} は以下に示す関係となる。

$$P_{Amax} = \{0.9 \times \alpha \times I_{sc} \times (\beta \times V_{oc} - 0.426 \times \alpha \times I_{sc} + 1.88) - 69.0\} \times \gamma \quad (17)$$

これにより、太陽電池の最大出力点における計算式が示され、電流比 α と電圧比 β を求めることによって、最大出力制御が可能であることが分かった。

7. まとめ

太陽電池の I - V 特性と I - P 特性から、最大出力電流と短絡電流の比 α と、最大出力電圧と開放電圧の比 β を指標とした最大出力制御法についての検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

i) 電流比は、日射量、温度が変化してもほぼ一定であり、電圧比は、温度の変化には影響をほとんど受けず、わずかながら、日射量が大きくなるにつれて低下

する傾向を示した。しかし、その影響は小さいことを確認した。

ii) 短絡電流、開放電圧を指標とした最大出力式について、直流側、交流側について検討を行った結果、実測値と計算値で高い精度を示すことが明らかになった。しかし、交流側出力では、インバータ効率の下がる領域では成立しないことが分かった。

iii) 出力変動が生じて、その日射量での短絡電流と開放電圧の測定を行い、計算式で得られた電圧に調整すれば、常に最大出力での運転が可能であるということが分かった。

iv) 実測値に対する最大出力計算式のずれの原因は、電圧比の変動が原因であることを確認し、補正することにより解決できることを明らかにした。

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構における戦略的創造研究推進事業に基づいて行われたことを記し、関係者に謝意を表する。

参考文献

- 1) 篠崎功:「自然エネルギー利用燃料電池発電システム」東芝技術公開集, Vol.19-58, pp.17-18 (2001)
- 2) 木村英樹, 佐川耕平, 菊田剛広, 黒須楯生, 内山英和, 森正行:「電気二重層キャパシタを搭載したソーラーカーのエネルギー効率改善」太陽/風力エネルギー講演論文集, pp.481-484 (2003)
- 3) 野口季彦, 松本寛之:「単一センサによる太陽電池の最大電力点探索法」、電気学会論文誌 D, Vol.125, No.1, pp.54-59(2005)
- 4) 太陽光発電懇話会: 太陽光発電システムの設計と施工, オーム社(2000)
- 5) 千住智信, 上里勝実, 大熊繁:「ファジー制御による太陽電池の最大電力点の探索」、電気学会論文誌 D, Vol.114, No.9, pp.843-848(1994)
- 6) T. Hiyama, S. Kouzuma, T. Imakubo, and T. H. Ortmeyer:「Evaluation of Neural Network Based Maximum Power Tracking Controller for PV Systems」, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.10, No.3, pp.543-548(1995)
- 7) 大貫俊哉, 宮下収, 大庭勝實:「遺伝的アルゴリズムによる太陽光発電システムの最大電力追従制御法」, 電気学会論文誌 D, Vol.116, No.8, pp.885-886(1996)
- 8) 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」, オーム社(1997)
- 9) 大塚馨象, 木村光彦, 村田稔, 渡辺和也:「太陽電池の最大

出力運転法の検討」、電気学会電力・エネルギー部門大会, A-114, pp342-343, (1999)

- 10) 大塚馨象, 大島清, 大野真一, 渡辺和也, 前田寿:「太陽光発電の最大出力運転指標の考察」、電気学会電力・エネルギー部門大会, A-230, pp661-662, (2001)
- 11) 大塚馨象, 大坪稔, 和田大毅, 渡辺和也:「太陽光発電の最大出力指標の考察(II)」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, A-193 p601-602, (2001)
- 12) K. Sasaki, T. Iwakiri, K. Ohtsuka, M. Otsubo:「Study on Maximum Power Output Control of PV Cell(Evaluation of PV Cell equivalent circuit parameter)」, EXPO World Conference Wind Energy, Renewable Energy, Fuel Cell & Exhibition, No.2007 (2005)
- 13) 佐々木弘太, 大坪昌久, 大塚馨象, 田島大輔, 本田親久:「太陽電池の最大出力制御に関する考察-その 4、太陽電池等価回路パラメータの評価」, 平成 17 年度電気学会電力・エネルギー部門大会, 31, No.269 (2005)