

太陽電池の等価回路パラメータ推定法

Estimation method of parameter in equivalent circuit of solar cell

田島大輔*¹ 佐々木弘太*² 大坪昌久*³ 本田親久*³ 大塚馨象*⁴
 Daisuke TASHIMA Kouta SASAKI Masahisa OTSUBO Chikahisa HONDA Keizou OHTSUKA

Abstract

The solar cell, one of the renewable energy, has attracted attention. And, the solar cell is expected as the energy that it supplies to electrolysis with the Proton Exchange Membrane(PEM) cell. But, the solar cell has a problem that the output of the solar cell changes by influence of solar radiation and temperature. In order to solve this problem, the maximum power output control method was defined by using the open-circuit voltage and the short-circuit current of the solar cell. It was reported that the solar cell equivalent circuit parameter can be evaluated by using the maximum power output control method. As a result, even if the solar radiation changed greatly, the experiment value almost corresponded with the calculation value obtained from the estimation method of the equivalent circuit parameter. Therefore it is concluded that the estimation method of parameter in equivalent circuit is a novel estimation technique.

キーワード：太陽電池、等価回路パラメータ

Key Words : Solar cell, Parameter in equivalent circuit

1. はじめに

太陽電池モデルを用いた水素製造システムへの適用については様々な検討が行われており^{(1)~(4)}、最大出力制御回路の設計、系統連携時の影響評価を、シミュレーションにより行うためには、太陽電池の正確なモデルの確立が必要である。しかし、発電特性は日射量や気象条件により大きく左右されるため、太陽電池モデルの確立が困難とされてきた。太陽電池の特性モデルは、最も一般的な方法として出力電流・電圧を日射強度の一次式で表し、標準状態での値と比較して補正することによって求められるが^{(5),(6)}、広い使用環境条件範囲では日射角や温度などの補正が必要となり、精度が落ちるなどの問題がある。これまでいくつかの太陽電池の電流-電圧(I-V 特性)の近似方法が提案されている

⁽⁷⁾が、方法が複雑であることなど、いくつかの問題を抱えている。また、等価回路のパラメータ推定法では、非線形最小自乗問題解法の一つである Lavenberg-Marquardt 法を用いた方法⁽⁸⁾も考案されている。本論文では、短絡電流と開放電圧から簡易的に等価回路パラメータを推定する方法を提案した。この方法を用いて直列抵抗を推定し、実験による結果との比較を行った。さらに、ダイオード放射係数 n の推定を行い、算出された各パラメータを回路シミュレーションソフト(B²SPICE)に代入し、電流-電圧特性を求め、実験による結果と比較し、その精度について検討を行った。

2. 太陽電池の等価回路パラメータ推定法

短絡電流、開放電圧を指標とした最大出力制御法⁽⁹⁾を用いて、太陽電池の等価回路パラメータ推定する方法について検討を行った。太陽電池の等価回路を図 1 に示す。

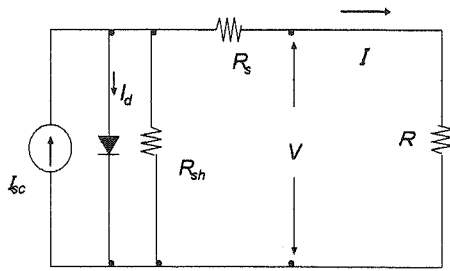
等価回路による電流、電圧の関係式は式(1)で示される。並列抵抗 R_{sh} は、日射量が多い時には、その影響が無視できるので、式(2)のように示される。ここで、式(2)を R_s の形に直すと、式(3)で示される。

*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 本田技研工業株式会社

*3 宮崎大学工学部教授

*4 宮崎大学工学部名誉教授
 (原稿受付：2006年8月29日)



k : ボルツマン係数 q : 電荷
 I_0 : 逆方向飽和電流 n : ダイオード放射係数
 R_{sh} : 並列抵抗
 R_s : 直列抵抗

Fig.1 Equivalent circuit of PV cell

図1 太陽電池の等価回路

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right\} - 1 \right] \quad (2)$$

$$R_s = \frac{1}{I} \left\{ \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{I_{sc} - I - I_0}{I_0} \right] - V \right\} \quad (3)$$

また、ダイオード性能係数 n は、次のように求められる。式(1)において、開放状態の値(電流=0、電圧= V_{oc})を代入すると、

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (4)$$

となる。 n の形に直すと、

$$n = \frac{V_{oc} \times q}{kT \times \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)} \quad (5)$$

となる。

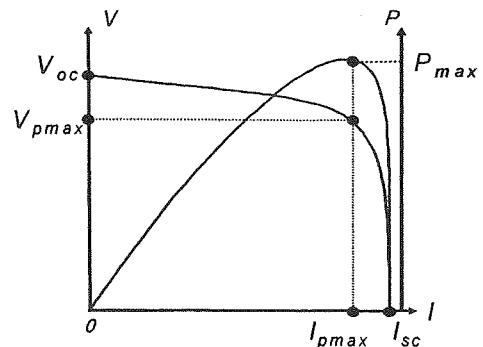
また、日射量が少ない時には、 R_s の影響を無視することができるので、式(1)は式(6)のように表すことができる。式(6)を R_{sh} の形に直すと、式(7)で示される。

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{qV}{nkT} \right\} - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (6)$$

$$R_{sh} = \frac{V}{I_{sc} - \left\{ I + I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \right] \right\}} \quad (7)$$

式(3)、式(7)から、任意の電流・電圧とダイオード放射係数 n を決定すれば直列抵抗と並列抵抗が求まること分かる。

次に、図2に太陽電池の電流-電圧、電流-出力特性を示す。



I_{sc} : Short-circuit current I_{pmax} : Maximum output power current
 V_{oc} : Open-circuit voltage V_{pmax} : Maximum output power voltage

Fig.2 I-V, I-P characteristics of a PV cell.

図2 太陽電池のI-V、I-P特性

本図では、太陽電池の光発生電流を横軸、電圧を縦軸で示している。この図において、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。よって、電流比、電圧比は式(8)、式(9)のように表すことができる。

$$\alpha = \frac{I_{pmax}}{I_{sc}} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{V_{pmax}}{V_{oc}} \quad (9)$$

電流比、電圧比が一定であれば、短絡電流と開放電圧から、最大出力電流と最大出力電圧を求めることができる。そこで、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(8)、(9)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 950W/m²一定である。

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。

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 100~1000W/m²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

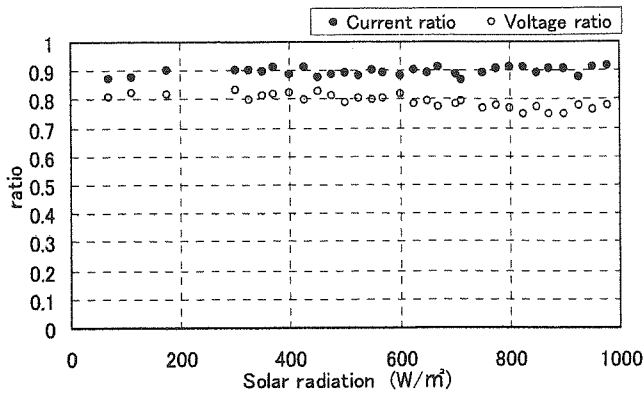


Fig.3 Current ratio and Voltage ratio with the solar radiation.

図3 日射量変化に対する電流比、電圧比

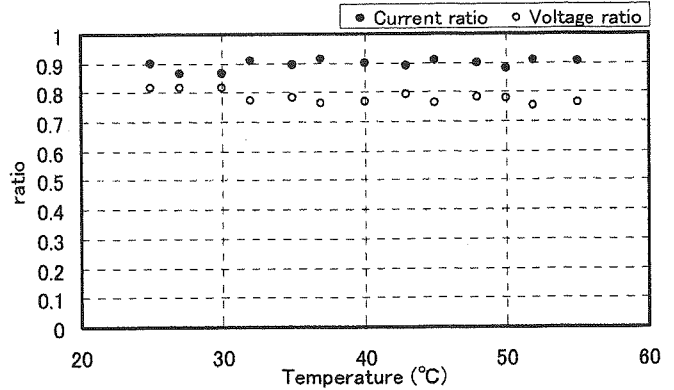


Fig.4 Current ratio and Voltage ratio with the change of temperature.

図4 温度変化に対する電流比、電圧比

ことを確認した。これより、電流比、電圧比を定数とし、式(3)、式(7)に代入すると、

$$R_s = \frac{1}{\alpha \times I_{sc}} \left\{ \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{I_{sc}(1-\alpha) - I_0}{I_0} \right] - \beta \times V_{oc} \right\} \quad (10)$$

$$R_{sh} = \frac{\beta \times V_{oc}}{I_{sc} - \left\{ \alpha \times I_{sc} + I_0 \left[\exp \left(\frac{q \times \beta \times V_{oc}}{nkT} \right) \right] \right\}} \quad (11)$$

となり、それぞれの条件において R_s, R_{sh} を求める事ができる。この方法では、短絡電流と開放電圧から容易に直列抵抗、並列抵抗、ダイオード放射係数、漏れ電流を求めることができる。

次に、日射量変化測定用としてシャープ製の多結晶シリコン太陽電池(NE128)と温度変化測定用として学研製の単結晶シリコン太陽電池(短絡電流: 0.75A、開放電圧: 1.9V、面積: 0.144m²)を用いて、太陽電池の順方向特性の傾き部分から直列抵抗を測定する方法により、日射量、温度が変化した場合の直列抵抗の測定を行った。また、短絡電流と開放電圧の測定を同時に行い、式(10)に代入して直列抵抗を算出した。日射量および太陽電池裏面温度、周辺温度は、全天日射量計、熱電対を用いて測定した。日射量変化実験は、電池温度を 40°C 一定で行い、温度変化実験は、(株)山下電装機械製のソーラーシミュレータ(YSS-80A)を用いて日射量を 900W/m² 一定で行った。図 5 に日射量変化による直列抵抗を、図 6 にその時の開放電圧と短絡電流を示す。図 5 より日射量が少なくなるごとに直列抵抗が上昇した。また、図 6 では日射量が少なくなるにつれて開放電圧は一定であるものの、短絡電流は減少している。これは、直列抵抗が電極およびバルク内の電気抵抗であり、その抵抗を流れる電流がジュール熱となり、短絡電流が減少したものと考えられる。

また、パラメータ推定法との比較であるが、直列抵抗の計算値が、日射量変化に対してほぼ実験値と一致していることが分かる。日射量が小さくなるにつれて、実験値との間に誤差が生じているのは、並列抵抗によるものであると思われる。並列抵抗は、日射量が多い時にはその影響を無視できるが、日射量が少ない時には、その影響が大きくなるからである。今回の実験では、誤差もわずかなものであり、パラメータ推定法は日射量変化に対して非常に有効であることを確認した。

次に、図 7 に温度変化による直列抵抗、図 8 にその時の開放電圧と短絡電流を示す。図 7 より温度が変化しても、直列抵抗はほぼ一定であることが分かった。また、図 8 から短絡電流はほぼ一定であるのに対し、開放電圧は温度が高くなるにつれて低下する結果となった。直列抵抗は温度変化に対して一定であるので、開放電圧の低下は直列抵抗によるものではないということが予想される。また、パラメータ推定法による直列抵抗の計算値は、温度が高くなるにつれて実験値との誤差が大きくなる結果となった。これは、並列抵抗の出力電圧への影響が考えられる。並列抵抗は出力電圧を低下させることが分かっている。また、温度が上昇すると出力電圧は低下するといわれており、今回の実験のように温度の上昇とともに電圧が低下した場合、並列抵抗の影響を無視できず、実験値との誤差が生じたものと考えられる。

以上の結果より、等価回路のパラメータ推定法は、日射量変化に対して非常に高い精度を示すが、温度変化に対して精度が低くなるため、等価回路パラメータ推定法を太陽電池モデルとして用いる場合、直列抵抗が太陽電池の温度上昇に対して線形的に減少することから、直列抵抗の温度変化に対する補正が必要であることが分かった。次に、B²SPICE を用いて模擬回路を作製し、日射量変化によるシミュレーションを行い、I-V 特

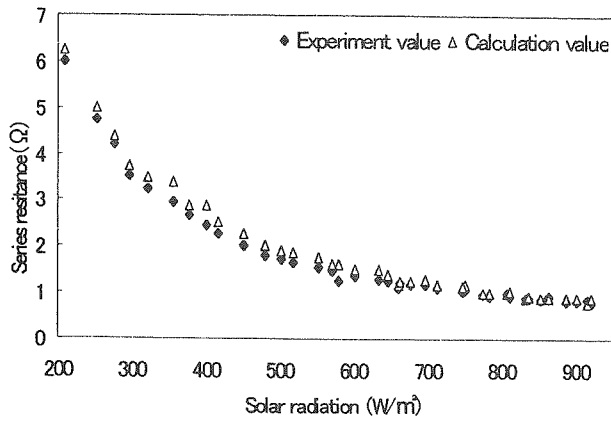


Fig.5 Series resistance on variable solar radiation.

図5 日射量に変化における直列抵抗

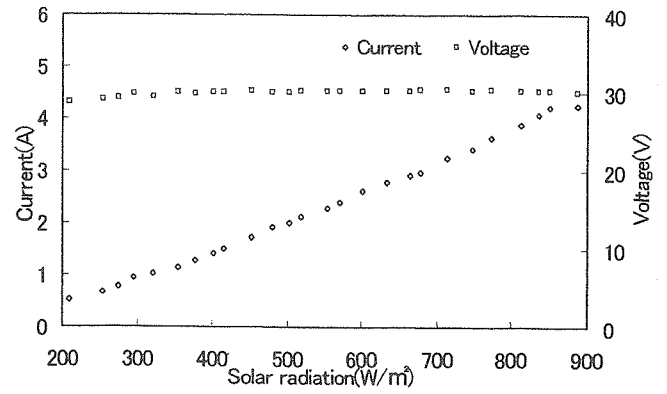


Fig.6 Open circuit voltage and short circuit current on measurement of series resistance.

図6 直列抵抗測定時における開放電圧と短絡電流

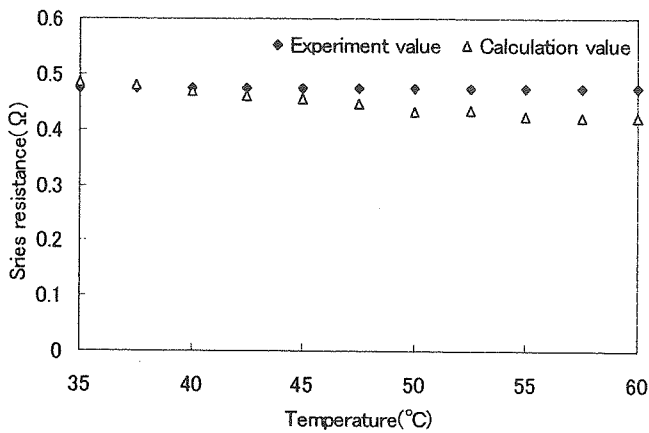


Fig.7 Series resistance on variable temperature.

図7 温度変化における直列抵抗

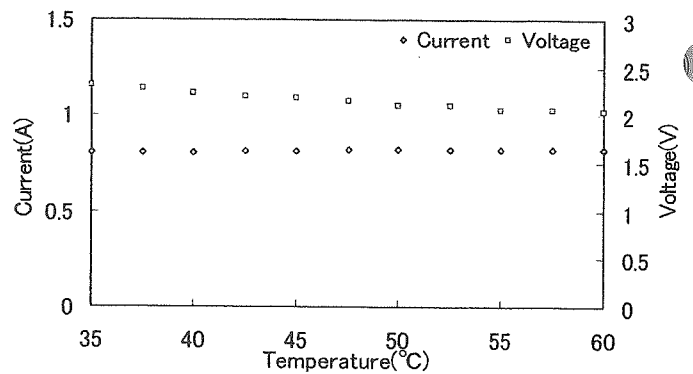


Fig.8 Open circuit voltage and short circuit current on measurement of series resistance.

図8 直列抵抗測定時における開放電圧と短絡電流

性、I-P 特性を求めた。また、シャープ製の多結晶シリコン太陽電池(NE128)を用いて、日射量変化に対するI-V 特性、I-P 特性を求め、B²SPICEによる模擬回路のシミュレーション結果と比較した。逆方向飽和電流は、ある日射量における多結晶シリコン太陽電池の開放電圧と、B²SPICEによる模擬回路のシミュレーションによって求められた開放電圧が一致するように設定した。また、太陽電池の温度は20±3℃とし、並列抵抗は無視して計算を行った。また、どの程度一致しているのかを確認するために、最大出力における実験値に対する計算値の誤差を調べた。

I-V 特性、I-P 特性における実験値とB²SPICEを用いた模擬回路のシミュレーション結果の日射量変化に対するI-V 特性とI-P 特性の比較を図9(a)~(f)に示す。この結果から、日射量153W/m²、303W/m²、427W/m²、600W/m²、819W/m²、966W/m²のどの日射量においてもシミュレーション結果が実験値とほぼ一致していることが分かる。しかし、最大出力付近ではわずかな誤差が現れることも分かった。また、I-V, I-P 特性曲線が変

化する要因として直列抵抗が挙げられていたが、図5の結果でも分かるように、低い温度においては、日射量に変化しても直列抵抗の値は実験値と一致していた。この結果からも、直列抵抗の値を正確に算出してシミュレーションを行ったため、実験値とほぼ一致したものと考えられる。

次に、最大出力付近での誤差であるが、図10に最大出力において実験値を基準とした時の計算値の誤差を示す。ここにおける誤差は以下の式で表される。

$$Error(\%) = 100 - \frac{\text{計算値}}{\text{実験値}} \times 100 \quad (12)$$

図10から、平均電流誤差は+2.56%、平均電圧誤差は-3.24%、平均出力誤差は+3.58%となり実験値とほぼ一致していることが分かった。誤差の原因としては、並列抵抗の影響を無視していることと直列抵抗が実験値と完全に一致していないことの2点が考えられる。

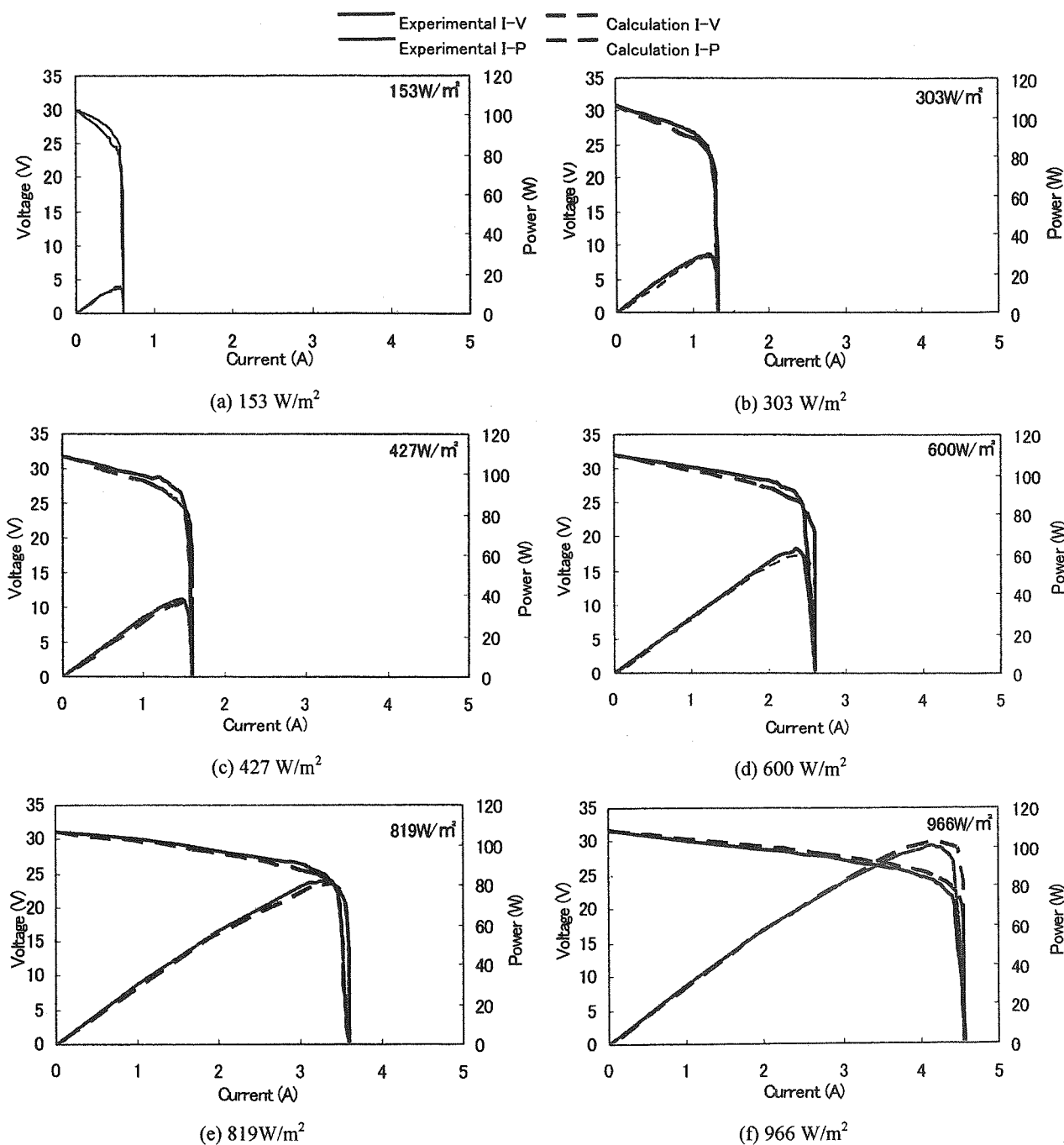


Fig.9 Experimental value and calculation value of I-V, I-P characteristics.

図9 I-V, I-P 特性の実験値と計算値

同様の研究において、非線形最小自乗問題解法の一つである Lavenberg-Marquardt 法を用いた等価回路のパラメータ推定法では、並列抵抗を含めた検討を行っており、電流-電圧特性を実測値と比較した結果、誤差 0.03% になることが報告されている⁽⁸⁾。しかし、今回提案した等価回路パラメータ推定法による誤差は、Lavenberg-Marquardt 法による誤差よりも大きい。これは、シミュレーション値が並列抵抗の影響を考慮していない事と温度変化に対する直列抵抗が実験値と完全に一致していないことが原因と考えられ、今後の研究

の課題としたい。

使いやすさとしては Lavenberg-Marquardt 法の計算方法は複雑であるため、簡易的に太陽電池モデルを用いる場合は、今回検討した等価回路パラメータ推定法の利用価値が高いのではないかと考えられる。以上より、等価回路パラメータ推定法は、日射量変化に対して正確な電流-電圧、電流-出力特性をシミュレーションすることで、太陽電池のモデルとして有効であるということが分かった。

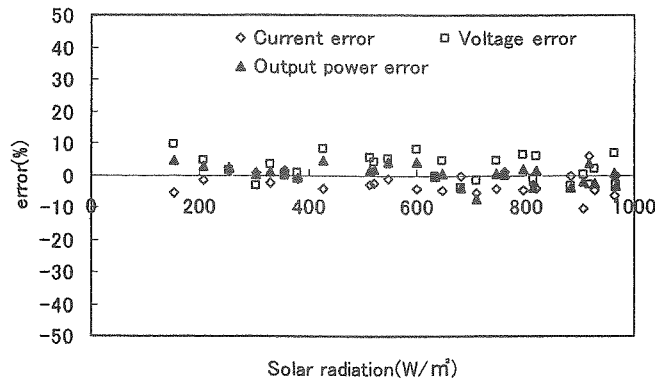


Fig.10 Error of calculation value on maximum power output.

図 10 最大出力時の計算値の誤差

4. まとめ

本研究では、短絡電流と開放電圧を指標とした最大出力制御法をもとに、最大出力制御システムの設計やシミュレーションを行うための太陽電池等価回路パラメータ推定法を提案し、太陽電池モデルとしての評価を行った。その結果以下のことが分かった。

(1)等価回路パラメータ推定法を用いて直列抵抗を算出し、実測値と比較した結果、日射量変化に対してほぼ一致していたが、温度変化に対して一致しなかった。そのため、等価回路パラメータ推定法を用いる場合、直列抵抗の温度変化に対する補正が必要である。

(2)B²SPICE を用いて、等価回路パラメータ推定法における電流-電圧特性、電流-出力特性のシミュレーションを行い、実験値との比較を行った結果、特性曲線がほぼ一致した。また、最大出力における実験値との誤差を検討したが、約3%程度と高い精度を示し、等価回路パラメータ推定法を太陽電池モデルとして利用可能であることが分かった。

以上の結果により、短絡電流と開放電圧を指標とした最大出力制御法を用いて、太陽電池等価回路パラメータ推定法を提案し、太陽電池モデルとして利用可能であ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。

参考文献

(1) 酒井幹弘、関口直俊、谷辰夫:「太陽電池モジュールによる水素製造に関する基礎研究-シミュレーションによる年間水素製造量の取得-」, 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講演論文集, Vol.1993, pp.49-52(1993)

- (2) 川島陽介, 村井一弘, 仲井徹:「太陽エネルギーの有効利用に関する研究-太陽電池利用水電気分解水素発生フィールドテスト-」, 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講演論文集, Vol.1997, pp.161-163(1997)
- (3) 藤井石根, 広岡信行, 出口芳武, 成田大介:「太陽エネルギーによる水素の生成及びその利用システムに関する研究」, 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講演論文集, Vol.1997, pp.165-168(1997)
- (4) 横山敏志:「太陽電池を用いた水の電気分解による水素生産」, 太陽エネルギー, Vol.26, No.4, pp.19-24(2000)
- (5) 濱川圭弘, 西川よし一, 辻毅一郎:「エネルギー環境学」, (株)オーム社(2001)
- (6) 伊賀淳:「太陽電池の光照射状態での電圧-電流特性式を用いた I-V 特性カーブ作成法とその応用」, 電気学会誌 D, Vol.116, No.10, pp.1001-1009(1996)
- (7) 畑佑樹, 河村一, 河村英昭, 山中三四郎, 大野英之:「PV モジュールの直列抵抗、温度係数の算出と発電電力補正 II」, 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, pp31-34(2005)
- (8) 池上知顯:「太陽電池等価回路パラメータの推定とその太陽光発電システム最適運用への応用」九州電力株式会社、受託研究成果報告書(2001)
- (9) 佐々木弘太, 田島大輔, 大坪昌久, 本田親久, 大塚馨象:「太陽電池の短絡電流と開放電圧を指標する最大出力制御」, 太陽エネルギー学会誌, Vol.32, No.1, pp.55-60(2006)