

Proposal of Coupled Model Using Current FB to Reproduce the Temperature Distribution of PV Cells with Hot-Spot

Takuma KAWASAKI^{*1}Takayuki YAMAMOTO^{*2}Daisuke WAGI^{*2}Toshiyuki HAMADA^{*3}Ikuo NANNO^{*4‡}

ホットスポット発生時のPVセルの温度分布を再現する電流FB型連成モデルの提案

河崎 巧真¹山本 稜之²和木 大祐²濱田 俊之³南野 郁夫^{4‡}

Abstract

Since the use of photovoltaics in the domestic and industrial sector is increasing, the reliability and safety of photovoltaic systems is becoming more and more important. One of the crucial issues for safety is the formation of a hot-spot, which can reach several hundred degrees Celsius in less than thirty minutes. For this reason, a fire may occur under prolonged exposure. However, a method for hot-spot detection during operation, based solely on current-voltage characteristics, has not yet been established because the detailed formation mechanism of these hot-spots is different for every sample. We have proposed electro-thermal coupled model to reproduce the temperature distribution in a solar cell with a hot-spot that is caused by a reverse bias voltage due to a local partial shade. This time, we propose an improved model using current FB (feedback).

Keywords: Photovoltaics system, Hot-spot, Partial shade, Simulation, Feed Back

キーワード: 太陽光発電システム, ホットスポット, 部分陰, シミュレーション, フィードバック

1. はじめに

再生可能エネルギーである太陽光発電システムの導入が急速に進みつつある。それに伴い、太陽光発電システムの安全性が重要視されている¹⁻³⁾。その安全性の課題の1つが、太陽電池セル(PVセル)上に発生するホットスポットである^{4,5)}。ホットスポットは数十分で数百°Cの高温になる。従って、ホットスポットはハンダ部の熔融等を招き、最悪の場合、火災に繋がる可能性がある⁶⁾。太陽電池のホットスポットのシミュレーション研究は存在したが、予め発熱箇所と大きさを指定する必要があるため⁷⁾、PVセルのI-V特性の温度変化を考慮したホットスポットのシミュレーション

ができないという課題があった。そこで、我々は部分光照射により発生したホットスポットの温度分布と発熱分布を再現する連成モデルを提案した⁸⁾。しかしこの連成モデルは電気モデルの電圧を求める際、メッシュすべての温度の平均を使う手法をとっていた。ホットスポットのシミュレーションでは定常状態でセル上に100°C以上の温度差が生じるため、これを平均してセルの温度とすることには問題があった。そこで本論文では電流フィードバック(FB)を用い改良した連成モデルを提案し、部分陰ではない部分光照射および、逆方向バイアス電圧により強制的に発現させたホットスポットの実験結果と比較する。さらに今後のPVシステム故障診断研究に必要なパラメータも獲得する。

*1 Advanced course, NIT, Ube College

*2 Former advanced course, NIT, Ube College

*3 Associate Professor, Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University

*4 Professor, Department of mechanical engineering, NIT, Ube College, 2-14-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi 755-8555, Japan

‡e-mail: nanno@ube-k.ac.jp

Received: October 8 2021, Accepted: October 27 2021

*1 宇部工業高等専門学校 生産システム工学専攻

*2 元宇部工業高等専門学校 生産システム工学専攻

*3 大阪電気通信大学 工学部 准教授

*4 宇部工業高等専門学校 機械工学科 教授 (〒755-8555 山口県宇部市常盤台 2-14-1)

‡e-mail: nanno@ube-k.ac.jp

(原稿受付: 2021年10月8日, 受理日: 2021年10月27日)

2. ホットスポット発生原理

バイパス回路(BPC)が開放故障し, Fig. 1(a)のようにモジュール上に部分陰が生じ, 右下角の PV セルが陰になり, Fig. 1(b)のようにその PV セルの左上角の小さな面積に光が照射された状態(部分光照射と呼ぶことにする)になると, Fig. 2 のように降伏電圧を超える逆方向バイアス電圧が印加され, ホットスポットは発生する. Fig.2 に示すように光照射部分に電流が集中し, 発熱量が日陰部分より大きくなり温度が高くなるからである.

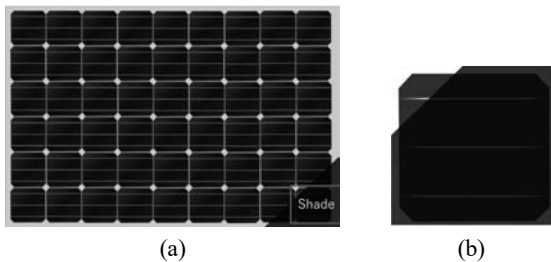


Fig. 1 Schematic diagrams of (a) Partial shade of the module (b) Partial shade of cell

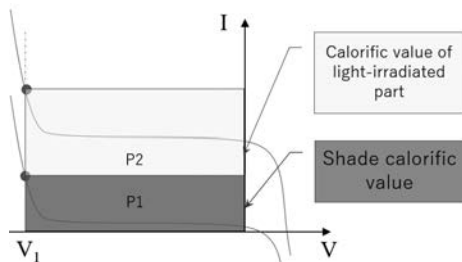


Fig. 2 Heat generation principle of the light irradiation part at partial shaded PV cell

3. 従来の連成モデルの課題

3.1 従来連成モデルの概要

従来の連成モデルを Fig. 3 に示す. 本モデルは, 1セルのシリコン系太陽電池の I-V 特性から発熱量を算出する電気モデルと, 発熱量を基に温度分布を算出する温度モデルを組み合わせた連成モデルである. 温度が電気モデルにフィードバックされるため, セルの温度特性と電気特性の両方を含むモデルとして構成される. ここで, PVセルをシミュレーションするために分割された単位をメッシュ(mesh)と呼ぶことにする. メッシュ毎の電気と温度の連成解析を行い, 各層を 12×12 の 144 個, 3層で $n=432$ 個のメッシュに分割し, 物理量を n 行 1 列のベクトルとする. モデルの入力は, 各メッシュの日射強度 H (n 行 1 列の行列) とセルに流入する電流 I_m である. モデルの出力は, 隣接するメッシュとの熱干渉等から各メッシュの温度の行列で算出される温度分布である. なお, 本モデルの作製には MATLAB/Simulink を用いる. Fig. 4 にセルの構造を示す. 本モデルでは簡略化のため, 太陽電池のインタコネクタ

(interconnector)やフィンガー電極(electrode fingers)を省略している. 電気モデルの計算はシリコン層のみとしている. 従来の電気モデルでは, Fig. 5 に示すように 2つのルックアップテーブル(LUT)の直列結合で構成されている. 1つ目の LUT は, I-V 特性を電流入力・電圧出力とした LUT1 で, 2つ目は電圧入力・電流出力とした LUT2 である.

3.2 従来連成モデルの課題

LUT2 は, 出力が電流で, メッシュ毎に温度を入力するため問題ない. しかし, LUT1 は, Fig. 6 の 3メッシュの例に示すようにセルはメッシュの並列接続のため出力がスカラーの電圧で, 出力が 1つだけの LUT を用いる必要がある. LUT1 の温度入力も 1点となったため平均温度入力を採用していた. その結果, 電圧誤差が生じ, 電流誤差となりメッシュ毎に異なる温度特性を正確に考慮できない課題があった. 例えば, 流入電流 I_m が大きい場合は Fig. 7 の ①に示すように動作点が線形範囲にあり, 重ね合わせが効くため平均温度による計算でも問題ない. しかし I_m が小さい場合, ②のように動作点が非線形範囲にあるため Fig. 7 に示すように 3メッシュの電流の平均値◇と平均温度の電流値●に差が生じる. Fig. 8 は 3メッシュの平均温度を用いて計算を行った際の I_m に対する誤差 $I_e (I_m - \Sigma I_i)$ の例を表している. 従って, 従来の電気モデルの方法は動作点が非線形範囲にあるときに課題が生じた. また, ダイオード特性を LUT のような折れ線に近似したことによる誤差も生じていた. 折れ線近似による誤差はダイオード特性とアバランシェ特性の非線形関数を組み込むことで改善が見込まれるものの, 非線形なので平均温度の LUT のままではさらに大きな誤差が生じることが懸念された.

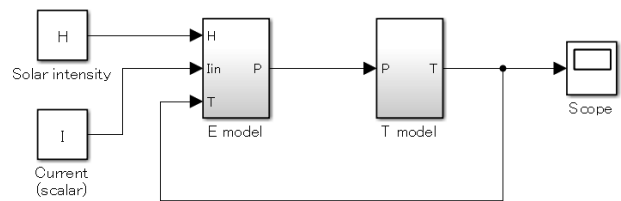


Fig. 3 Block diagram of the coupled model

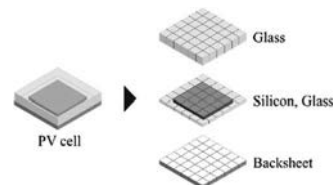


Fig. 4 Schematic of PV cell structure

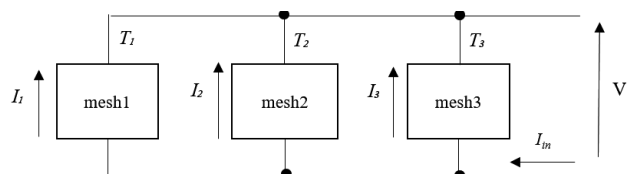


Fig. 6 Parallel connection of 3mesh

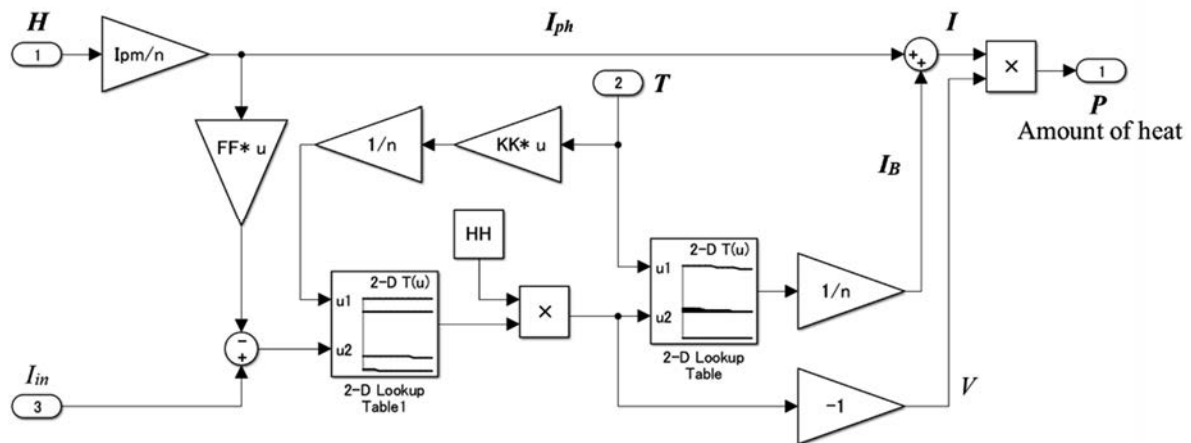


Fig. 5 Structure of electric model

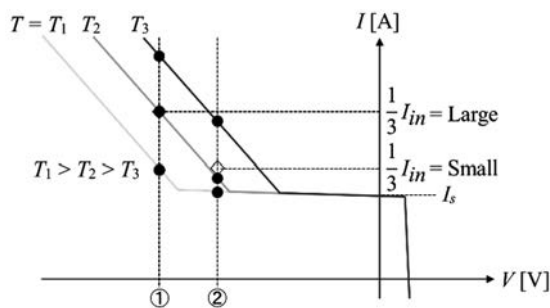


Fig. 7 Principle of current error generation due to average temperature

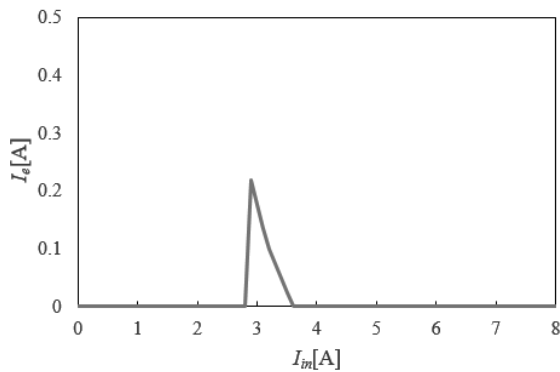


Fig. 8 Current error due to average temperature 3mesh (Simulation)

4. 電流 FB 型連成モデル

4.1 提案モデル概要

本論文では従来の連成モデルの問題の解決が期待できる電流 FB 型の連成モデルを提案する。提案する連成モデルの大きな構成は Fig. 3 と同じで、電気モデルだけが異なる。提案する FB 連成モデルを用いることで非線形な関数にも対応可能となる。流入電流 I_{in} と合計電流 $I (= \Sigma I_i)$ が常に一致するように FB 制御し誤差が低減するからである。ただし FB ゲイン (K_p) が大き過ぎれば不安定となり、 K_p が小さければ電流の過渡的な誤差が生じる欠点がある。不安定に

なる欠点の対策として、我々が既に提案した逆関数に基づく線形化器⁹⁾を用いる。

4.2 提案する電気モデル

提案する電気モデルは Fig. 9 の太陽電池の等価回路を基にする。Fig. 10 に電気モデルのブロック線図、Fig. 11, 12, 13 に PV メッシュのサブシステム (Mss) 及び Mss を構成するブロック線図、Fig. 14, 15 に線形化器 (Lzr) を示す。Lzr は FB を安定化させるため、線形化を行うサブシステムである。Fig. 11, 12, 13 はアバランシェ特性モデル¹⁰⁾ (Avalanche model) であり、式(1)と(2)の高次関数をブロック線図で表したものである。

$$I_d = I_0 \left\{ e^{\frac{q_a V_r}{K_b T}} - 1 \right\} + I_{shunt} \quad (1)$$

$$I_{shunt} = \frac{V_r}{R_{sh}} \left\{ 1 + a \left(1 - \frac{V_r}{V_{br}} \right)^{-m} \right\} \quad (2)$$

電気モデルは、最初に日射強度 H を基に各メッシュに生じた光電流 I_s (ベクトル) を算出する。Fig. 10 の I_{pm} はセルの最大出力電流、 N はシリコン部の分割数である。次に I_{in} から ΣI_i を減算した偏差に FB ゲイン K_p を掛け積分要素を通したものと全メッシュの温度 T と光電流 I_s が、Lzr に入力される。Lzr の出力 V にシリコンのメッシュの場所を指定する行列 HH を掛けたものと全メッシュの温度 T と、光電流を Mss に入力することで全メッシュの個別の電流 I (ベクトル) を算出する。次に電流 I を合計し、流入電流 I_{in} と

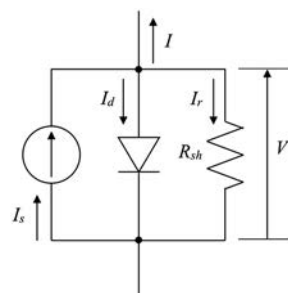


Fig. 9 Schematic of equivalent circuit of solar cell

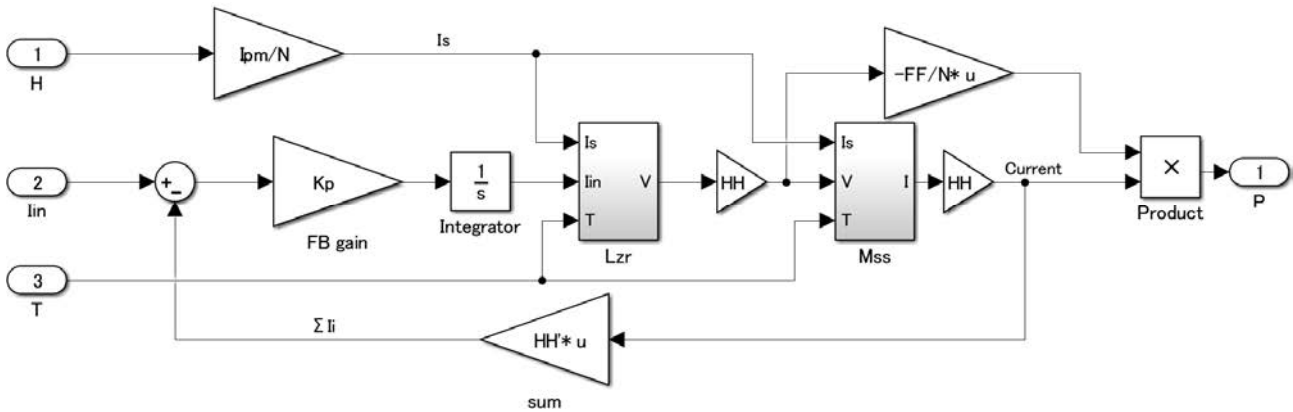


Fig. 10 Structure of E model with current FB

一致させるためFBする。電流 I と電圧 V を掛け合わせることで全メッシュの発熱量 P (ベクトル) を式(3)より計算し、温度モデルに伝える。

$$P = V \cdot I \quad (3)$$

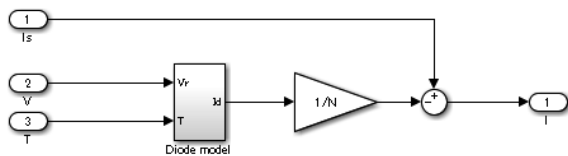


Fig. 11 Mesh sub system (Mss)

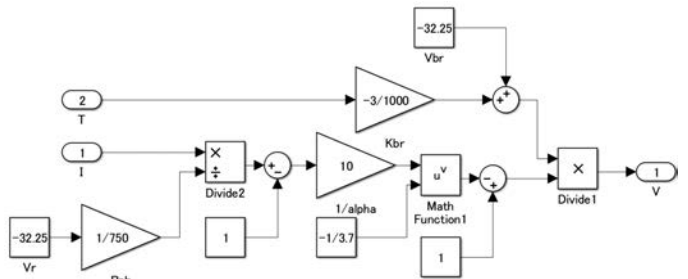


Fig. 15 D Linarizer

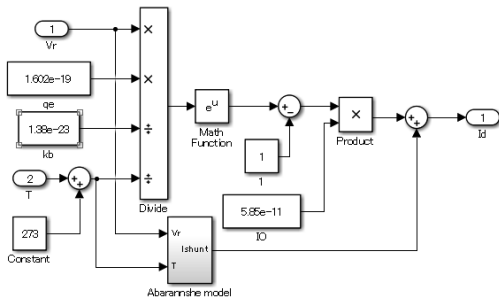


Fig. 12 Diode model

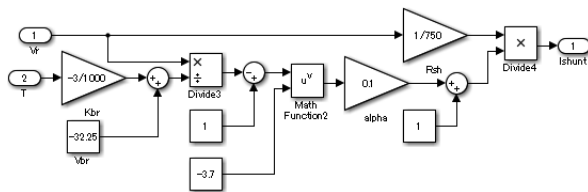


Fig. 13 Abaransshe model.

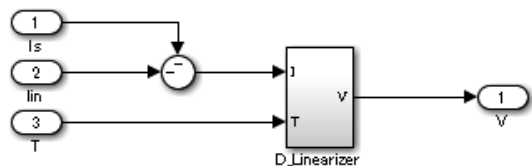


Fig. 14 Linearizer (Lzr)

4.3 温度モデル

Fig. 16 に温度モデルの構造を示す。このモデルは、まず発熱量 $P (= [P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n]^T)$ と、熱伝導・熱伝達・熱輻射の3つの合計からなる熱流を計算する。この熱流に熱容量行列 $1/E$ を掛け、積分することで、各メッシュの温度を算出する。ここで、熱伝導、熱伝達、熱輻射はそれぞれフーリエ(Fourier)の法則、ニュートン(Newton)の冷却の法則、ステファン・ボルツマン(Stefan-Boltzmann)の法則に基づく [8,11-15]。今回のシミュレーションではPVセルが薄いことを考慮し、側面部からの熱伝達、熱輻射を無視している。

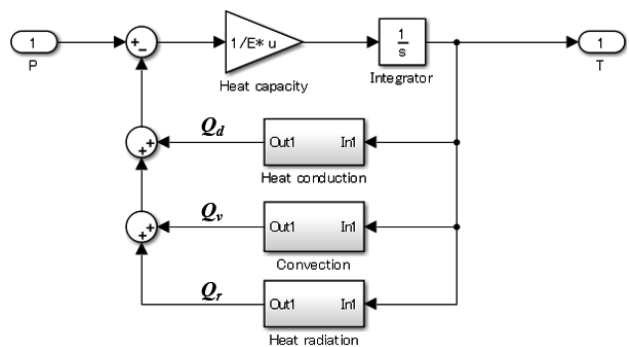


Fig. 16 Structure of thermal model

境界条件は周囲温度を使用する。熱容量の逆数行列 $1/E$ を次に示す。

$$\frac{1}{E} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{E_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{E_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、各メッシュの熱容量 E_i は次式で求める⁸⁾。

$$E = cpd^2t \quad (5)$$

5. シミュレーション結果

5.1 シミュレーション条件

比較対象実験では、PV モジュール 3 枚 (各 25 枚のセル) と PV セルを直列に接続し、PV セルの左上角 (面積比約 6%) に部分光照射させる。このことで、降伏電圧を超える逆方向バイアス電圧と 3 枚のモジュールによる電流により、照射部にホットスポットを発生させた¹⁶⁾。モジュール 1 枚の公称開放電圧は 16.1V、最大出力電流は 8.57A、PV セルの降伏電圧は -25.8V、降伏電圧以上での電流変化は 1.4A/V で、実験時間は 1500s (25 分)、実験時の気温は 25°C 程度、日射強度は 1kW/m² 程度である。最終ページの「使用記号と値」にこれらの実験の検証に使用した各パラメータを示す。熱伝導による熱抵抗の逆数 Y_{dn} は、断面積 A と熱伝導率 λ とメッシュ間距離 d を式(6)に代入し計算する。

$$Y_{dn} = \frac{A \cdot \lambda}{d} \quad (6)$$

このシミュレーションの初期条件は、流入電流が 6.4A¹⁶⁾、日射分布は照射部のシリコン部が 1kW/m²、それ以外が 0kW/m² である。また、各メッシュの初期温度は 25°C である。また、遮光部はマスクとの隙間で断熱の可能性もあるが、遮光マスク表面からの熱移動があるため、熱伝達・熱輻射の値は他の部分と同一とした。温度の計測箇所を Fig. 17 に示す。

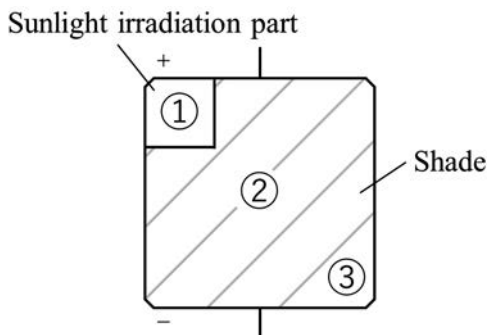


Fig. 17 The three-temperature measurement point on the cell

5.2 線形化器の効果

Fig. 18 に線形化器⁹⁾を組み込んだことによるグラフの発振抑制効果を FB ゲイン $K_p = 5$ 倍の電流誤差 I_e で示す。線形化器を組み込むことで FB の欠点である振動を抑制する

効果が確認される。

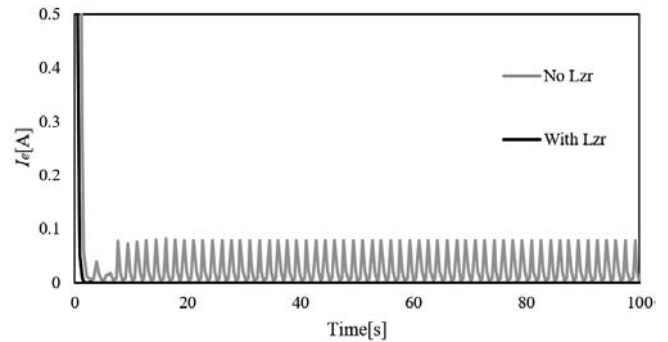


Fig. 18 Current error due to Feed Back (Simulation)

5.3 電流 FB の効果

Fig. 19 に従来モデルと電流 FB を用いたモデルを比較した温度波形を示す。温度波形の場所は、Fig. 17 の 3 点①、②、③である。Fig. 19 からわかるように $I_m = 6.4A$ の時は LUT の動作点が線形範囲にあるため誤差はほぼない。しかし $I_m = 0.6A$ になると LUT の動作点が非線形範囲にあるため Fig. 20 で示す電流誤差が原因となり Fig. 21 のように温度に誤差が生じる。最も高い温度を拡大したグラフを Fig. 22 に示す。

5.4 高次関数の効果

次に LUT を式(1)と(2)に示すアバランシェ特性を含む高次関数に変更したモデルの結果を示す。Fig. 23 に LUT と高次関数でフィッティングした結果 ($V_{br} = -32.25$) の比較を示す。Fig. 24 に示すように従来モデルと、FB モデルに高次関数を組み込んだ場合の温度を比較した結果、従来モデルのホットスポット部は 244°C で FB モデルの場合は 252°C と差が生じることが分かった。Fig. 25 に 1500s の時の Fig. 24 の FB モデルの温度分布、Fig. 26 に比較対象実験時の温度分布を示す。Fig. 25 の FB 型のモデルでは実験と比較して特に高温の部分でほぼ誤差のない温度を再現することができた。つまり折れ線近似による誤差要因を排除することで 8°C (=252°C-244°C) 程度正確な温度を再現する効果が FB の方法にあると考える。

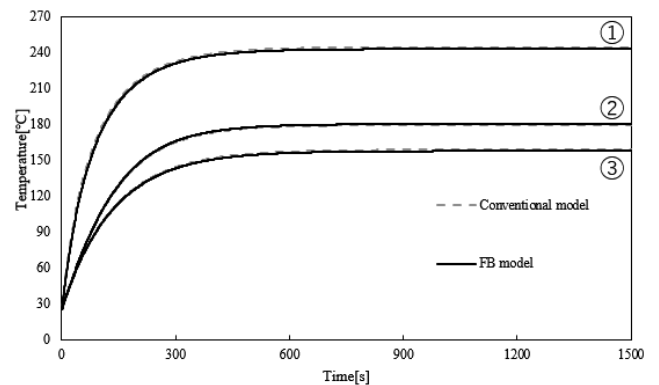


Fig. 19 Temperature $I_m = 6.4A$ (Simulation)

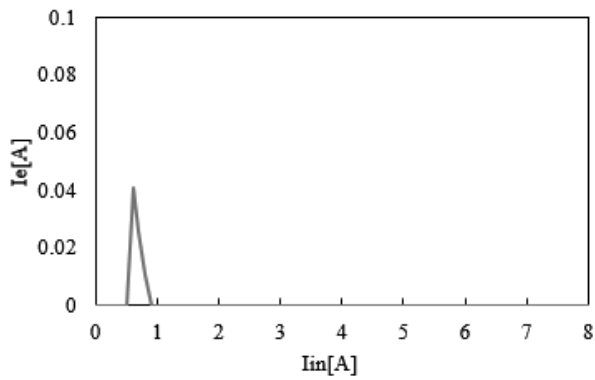


Fig. 20 Error due to average temperature 100mesh (Simulation)

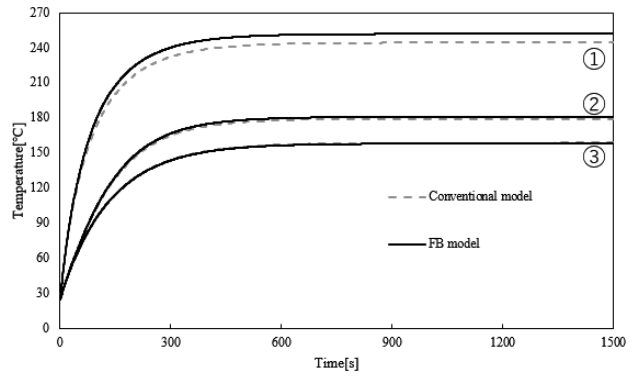


Fig. 24 Temperature with higher-order function $I_{in} = 6.4A$ (Simulation)

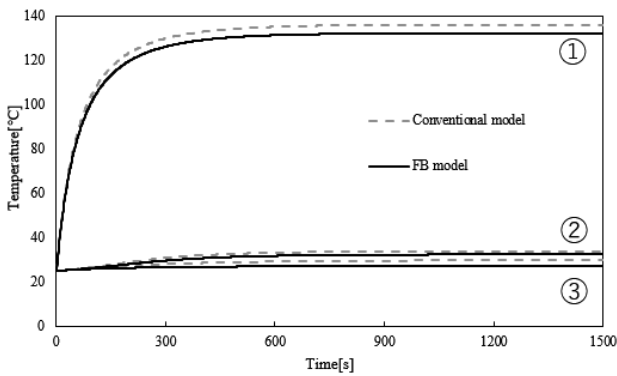


Fig. 21 Temperature $I_{in} = 0.6A$ (Simulation)

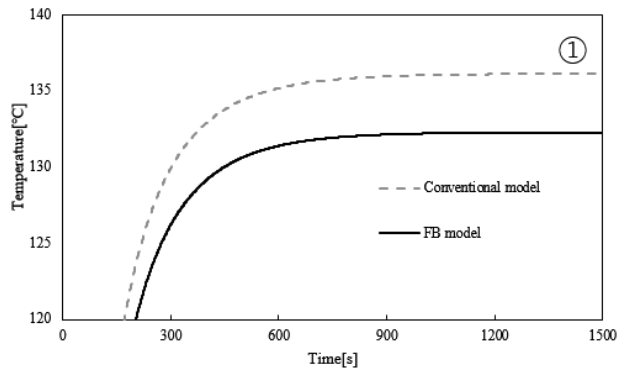


Fig. 22 Temperature $I_{in} = 0.6A$ enlarged view (Simulation)

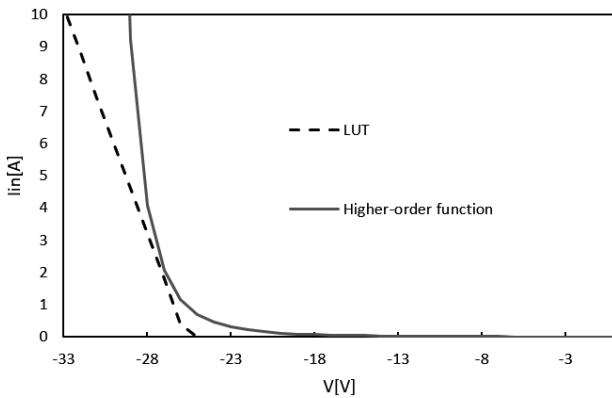


Fig. 23 Avalanche characteristics fitting (Simulation)

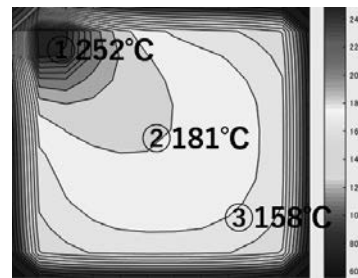


Fig. 25 Temperature distribution (Simulation)

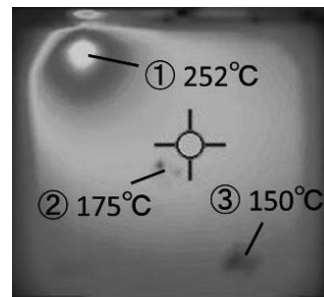


Fig. 26 The thermal image with an infrared camera (Experiment)

6. おわりに

今回、BPD 開放故障時に部分光照射により発生したホットスポットの温度分布を再現する電流 FB 型連成モデルを提案し、これを用いて実験データとの比較を行った。その結果従来のモデルは非線形の関数に対応できなかったが、電流 FB を用いることにより非線形関数に対応できるようになった。その結果 FB を用いることで電流の誤差がなくなり、温度を平均する誤差と折れ線近似誤差が解消した。また FB ゲインを増加させ不安定になる問題も線形化器を組み合わせることにより改善された。さらにロックアップテーブル(LUT)を用いず、アバランシェ特性を含む非線形の太陽電池の電流-電圧特性式を用いることも可能となり、より正確な温度分布再現を実現した。また、FB を用いた本手法とフィッティングしたパラメータは PV システム故障時の電気特性の再現も可能であり、今後故障診断などの別の研究にも応用展開する。

謝辞

本研究は JST, A-STEP, JPM, JTM20G6 の支援と JSPS 科研費, JP21H01580, JP17K06331, JP15K13935 の助成を受けたものである。

使用記号と値

①変数

| 記号 | 意味 | 単位 |
|-----------------|------------|------------------|
| Q_d | 熱伝導による熱流 | W |
| Q_v | 熱伝達による熱流 | W |
| Q_r | 熱輻射による熱流 | W |
| Y_{dn} | 熱伝導の熱抵抗の逆数 | W/K |
| Y_{vn} | 熱伝達の熱抵抗の逆数 | W/K |
| Y_{rn} | 熱輻射の熱抵抗の逆数 | W/K ⁴ |
| T_i, T_j, T_n | メッシュの温度 | K |

②設計値

| 記号 | 意味 | 値と単位 |
|--------------|----------------------|--------------------------------------|
| T_∞ | 周囲温度 | 298K |
| n | メッシュの分割数 | 12×12×3 |
| d | メッシュ間距離 | 15.6×10 ⁻³ m |
| t_1 | シリコンの厚さ | 0.2×10 ⁻³ m |
| t_2 | ガラスの厚さ | 3.2×10 ⁻³ m |
| t_3 | バックシートの厚さ | 1.0×10 ⁻³ m |
| A_{sg} | メッシュの側面断面積 (シリコン層) | 3.12×10 ⁻⁶ m ² |
| A_g | メッシュの側面断面積 (ガラス層) | 4.99×10 ⁻⁵ m ² |
| A_b | メッシュの側面断面積 (バックシート層) | 1.56×10 ⁻⁵ m ² |
| A_s | メッシュの上面積(下面積) | 2.43×10 ⁻⁴ m ² |
| ϵ_1 | シリコンの放射率 | 0.70 |
| ϵ_2 | ガラスの放射率 | 0.92 |
| ϵ_3 | バックシートの放射率 | 0.90 |

③物性値

| 記号 | 意味 | 値と単位 |
|-------------|---------------|---|
| σ | ステファン・ボルツマン定数 | 5.67×10 ⁻⁸ W/(m ² ·K ⁴) |
| c_1 | シリコンの比熱 | 677J/(kg·K) |
| c_2 | ガラスの比熱 | 500J/(kg·K) |
| c_3 | バックシートの比熱 | 1250J/(kg·K) |
| ρ_1 | シリコンの密度 | 2330kg/m ³ |
| ρ_2 | ガラスの密度 | 3000kg/m ³ |
| ρ_3 | バックシートの密度 | 1200kg/m ³ |
| λ_1 | シリコンの熱伝導率 | 148W/(m·K) |
| λ_2 | ガラスの熱伝導率 | 1.8 W/(m·K) |
| λ_3 | バックシートの熱伝導率 | 0.2 W/(m·K) |

参考文献

- 1) D. Stellbogen, Use of PV circuit simulation for fault detection in PV array fields, 23rd IEEE PVSC (1993), 1302-1307, Louisville, KY, USA.
- 2) S. Chu, A. Majumdar, Opportunities and challenges for a sustainable energy future, Nature, **488** (8), 294-303 (2012).
- 3) N. G. Dhere, N. S. Shiradkar, Fire hazard and other safety concerns of photovoltaic systems, Journal of Photonics for Energy, **2** (1), 1-13 (2012).
- 4) S. Kurtz, N. Haegel, R. Sinton, R. Margolis, The future of photonics, Nature Photonics, **11** (1), 3-5 (2017).
- 5) W. He, F. Liu, J. Ji, S. Zhang, H. Chen, Safety Analysis of Solar Module under Partial Shading, International Journal of Photoenergy, **2015** (2), 1-8 (2015).
- 6) K. Okada, S. Yamanaka, D. Iioka, H. Ohno and H. Kawamura, An investigation into hot-spot in PV module, JSES/JWEA Joint Conference (Nov. 2010), 535-538, Koriyama, Fukushima.
- 7) I. Geisemeyer, F. Fertig, W. Warta, S. Rein, M. C. Schubert, Prediction of silicon PV module temperature for hot spots and worst case partial shading situations using spatially resolved lock-in thermography, Solar Energy Materials & Solar Cells, **120** (1), 259-269 (2014).
- 8) T. Yamamoto, D. Wagi and I. Nanno, The coupled model for prediction of the temperature distribution in a PV cell with hot spot induced by partial shading, Journal of Japan Solar Energy Society, **45**(3), 99-104 (2019)
- 9) K. Yamamoto, I. Nanno, T. Hamada, M. Fujii, T. Hirata, S. Oke and N. Ishikura, Proposal of Reproduced I-V Characteristics of a photovoltaic systems Linerrisation Method to suppress vibration of FB model, 2020 年度(第 71 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
- 10) J.W. Bishop, Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits, Solar cells,25(1988) 73-89
- 11) K. Kawagoe, Y. Hishikawa and N. Yamada, Feasibility study of Outdoor STC performance evaluation of photovoltaic modules based on sun shading technique, JSES/JWEA Joint Conference (Nov. 2016), 33-36, Matsuyama, Ehime.
- 12) I. Nanno, N. Matsunaga and S. Kawaji, Feedback type model of thermal system and its application to noninterference control, Journal of the Institute of Electrical Engineers, **127** (12), 373-379 (2007).
- 13) I. Nanno, Study of Uniform Temperature Control for Thermal Process, Ph.D. Thesis, 63 (2007), (Nov. 2018). <http://reposit.lib.kumamoto-u.ac.jp/bitstream/2298/11059/3/24-0359.pdf>
- 14) M. N. Sabry, Compact thermal models for electronic systems, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, **26** (3), 179-185 (2003).
- 15) 日本機械学会, 伝熱工学, 7-10 (2005), 丸善出版株式会社, 東京都.
- 16) K. Yamashita and I. Nanno, Electric and temperature characteristic in a hot spot in PV module, JSES/JWEA Joint Conference (Nov. 2015), 93-96, Miyazaki, Miyazaki.