

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420253

研究課題名(和文) 太陽光発電システムのためのパネルのホットスポット簡易診断システムの研究

研究課題名(英文) Study on Hot-spot Simple Diagnosis System for PV Generation System

研究代表者

板子 一隆 (Itako, Kazutaka)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号：10232381

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光発電システムでは、太陽電池のセルに影が生じるとそのセルが高温になるホットスポット現象が問題となっている。このホットスポットはセルに結晶欠陥がありそこに影がかかると逆方向リーク電流が流れて発生することが分かっている。この性質を利用して、簡易的にプロジェクタを用いて自動で影を作り、欠陥セルがあるかどうかをセル単位で特定する新しい診断システムを提案し、モジュール1枚での検査手法を検討し、さらにその手法を実際的なストリング構成に拡張した。さらに、これを屋外に設置された太陽電池モジュール群に用いて検査実験を行い、高い精度で欠陥セルを含むモジュールを特定できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a voltage-based hot-spot detection method for photovoltaic (PV) string using the projector. Hot-spots form in solar cells at defects causing a high carrier recombination rate, it appears as a high reverse leakage current of p-n junctions when solar cells are partially shadowed. Using this characteristic, we developed a voltage-based hot-spot detection method to quickly identify and characterize the severity of a module hot-spot for one module and plural modules in the string. From the experimental results, it is verified this proposed voltage-based hot-spot detection method works effectively for PV string in outdoor system.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：ホットスポット現象 太陽電池モジュール 結晶欠陥

1. 研究開始当初の背景

太陽電池モジュールの故障の原因の一つにホットスポット現象がある。この現象は、セルに欠陥があり、そのセルに長時間影が生じるとセル全体あるいは部分的に高温になってしまい、表面樹脂の変形やセルの破壊、場合によっては火災の原因となる危険性がある。そのため、そのような現象が生じる可能性のあるモジュールを特定し、取り除いてシステムの信頼性や電力取得効率を向上させることが重要となっている。しかしながら、このホットスポットに対する検査手法としては、赤外線カメラで温度を測定する方法一般的であるがコストや時間がかかるなど労力を要するといった問題がある。

2. 研究の目的

研究代表者は結晶欠陥に基づく物理現象を利用しモジュール単位でホットスポットを簡易的に診断できる SRC (Self Reverse Current)検査法を提案し、ホットスポット現象を引き起こす可能性のあるモジュールを簡易的に特定出来る装置の開発を行い、モジュールが複数枚接続された実際的なストリング状態においてもその中から異常モジュールを特定できることを大容量の屋外システムの例で実証することを目的としている。この方法は、モジュールを設置する前の受け入れ検査や設置後の保守点検に有用である。

3. 研究の方法

研究代表者が提案する SRC 検査法を用いて、まず、モジュール1枚を対象とした検査システムを開発し、ホットスポットセルを検出出来るかどうかの検討を行う。次いで、モジュールが複数枚接続されたストリング構成に拡張し、ホットスポットモジュールを特定出来るかどうかの検討を行う。最終的には、屋外に設置された大容量システム(ストリング構成)に適用し、検査が可能であるかの検討を行い、本検査システムの有効性を示す。

4. 研究成果

(1)電流型 SRC 検査法の検討

太陽電池モジュールのセルのホットスポット現象はセルの結晶欠陥が主な原因となって発生する。欠陥のあるセルに影がかかるとそのセルは逆バイアスを受けて逆方向に大きな電流が流れてセルが発熱する。

本研究では、この原理を利用して、プロジェクタを用いてモジュールのセル毎に積極的に影を付けていき、大きな電流が流れるかどうかをチェックして欠陥セルを見つける SRC(Self Reverse Current)検査法を提案している。そこで図1に示すシステムを構築した。これを電流型 SRC 検査法と呼んでいる。光源にはできるだけ強い光源を持つ申請のプロジェクタを購入し高輝度プロジェクタを用いて、セルに順番に影を付けていきそれと同期させてモジュールの電流 I_s をそれぞれ

測定する。ここで、セル毎におけるホットスポットの有無の判定を行うために指標値 HSI (Hot Spot Index)を(1)式のように定義する。ただし、 I は全照射時のモジュール電流である。

$$HSI = \frac{I_s}{I} \times 100[\%] \quad (1)$$

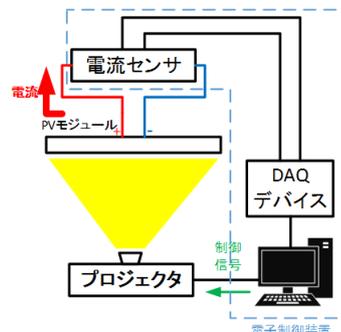


図1 開発した電流型SRC検査システム

すなわち、HSI 値が高いと欠陥セルの可能性が高い。このシステムを用いてモジュール1枚での検査は可能であったが、本研究の目的である複数枚接続された大型システムに対してはプロジェクタの投影範囲が拡大されるため距離を離す必要があり、それに伴ってモジュールの照度が低下して欠陥セルと正常セルの判別が困難になることが判明した。

そこで、低照度でも精度良く判別する方法を新しく開発した。

(2)電圧型 SRC 検査法の提案とその有効性

①電圧型 SRC 検査の動作原理 電圧型 SRC 検査に使用したモジュールのセル配置を図2、測定回路図を図3に示す。この検査法は結晶に欠陥があると逆方向リーク電流が大きくなるという物理現象を

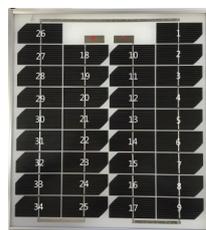


図2 セル配置

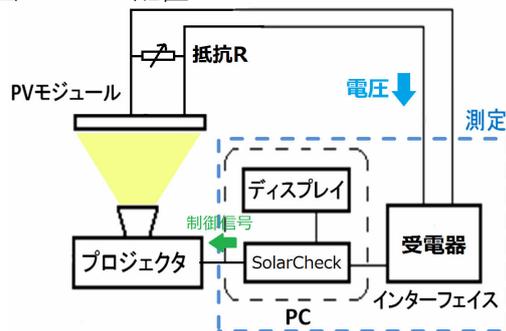


図3 開発した電圧型SRC検査システム

利用している。被検査モジュールに光を照射し発電させる。その際、被検査モジュールが最大動作電流で動作するよう抵抗Rを挿入する。遮光したセルを抵抗と見なすとき、遮光されたセルはダイオードと同じ性質になり、他の太陽電池セルの出力で逆バイアスとなる。正常なセルは高抵抗のため抵抗Rの電圧が小さくなる。一方欠陥セルは低抵抗のため

抵抗 R の電圧が大きくなる。従って、欠陥セルの抵抗と抵抗 R の分圧比は照度の影響を受けにくい。低照度での計測が可能となる。ここで、光を全体に照射した際に発生する電圧を基準電圧 V_0 とする。各セルに影を付加し、それ以外のセルに光を照射した際の電圧 V を測定する。この電圧 V は、セルごとのリーク電流によって違いがある。そこで、以下の(2)式に定義する HSI を用いて欠陥セルを検出する。ここで、 V_0 は全照射時のモジュール電圧である。この値が低いと欠陥セルの可能性が高い。

$$HSI = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

以上の基本原理における必要不可欠な影を作るために電流型と同様にプロジェクタを用いた。すなわち検査プログラムで座標を入力した影を投射させ、各々のセルに対し順次部分的な影を作成する。動作はまず初めに初期電圧値 V_0 を計測するため、セルの形に合わせて白色の光を照射する。図4の過程1から過程nまで自動化し、各セルに影を付加し、全セルを検査する。図3のシステムは制御部分と計測部分で構成される。制御部分においてプログラムを用いてプロジェクタを制御する。まず、図4で示したアニメーションを照射し、部分影が生じたときの電圧値は受電器に入力され、計測される。その計測の度に、プログラムで基準電圧 V_0 と部分影時に計測した電圧値 V とを比較して、設定した判定値以下であれば異常と判断、以上であれば正常と判断させる。その結果を作成した Solar Check プログラムを用いてディスプレイに表示させる形となっている。

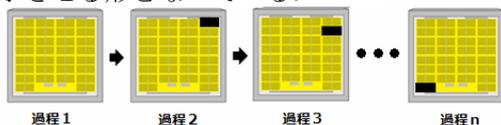


図4 付加する影のアニメーション動作

②モジュール1枚での検査結果 10001lux と照度の低い光源において、今回開発した検査装置でモジュール1枚を診断した結果の一例が図5である。各セルの検査結果は正常であればOKのランプが、異常であればNGの

セルNo	左上座標	右下座標	電圧	結果
1	(554,179)	(781,444)	6.88	NG
18	(611,210)	(674,242)	4.52	OK
19	(611,220)	(662,270)	5.5	OK
20	(617,268)	(671,300)	5.59	OK
21	(610,297)	(671,329)	6.62	NG
22	(611,205)	(674,235)	4.96	OK
23	(609,251)	(667,282)	6.63	NG
24	(608,282)	(670,313)	5.67	OK
25	(612,411)	(666,420)	5.96	OK
26	(528,180)	(609,211)	6.04	OK
27	(554,213)	(615,244)	5.31	OK
28	(550,240)	(612,269)	5.27	OK
29	(521,292)	(612,320)	5.8	OK
30	(528,298)	(610,324)	6.14	OK
31	(557,227)	(614,257)	6.65	NG
32	(522,293)	(609,300)	6.62	NG
33	(555,277)	(612,307)	5.19	OK
34	(552,412)	(610,422)	6.02	OK

図5 電圧型検査装置の検査結果

ランプが点灯する仕様とした。同図の診断結果を見てみると、セル番号の 21, 23, 31, 32 番のセルが異常であると判定された。また、一方でそれ以外のセルは正常であると判定された。この結果は高照度のときにおける電流型 SRC 検査法の結果と一致していることを確認している。なお、この検査法の判定基準は、HSI と温度の関係を実験により求め、セルの温度が 60°C を超える HSI は 10% 以下であることが明らかとなっており、この基準値に従って判定を行っている。

③モジュールが複数枚接続されたストリング構成での検査結果 当初実験を予定していた八ヶ岳の大規模太陽光発電システムのストリング構成容量が本開発装置の許容量を超えていたため、急遽別の屋外システムで実証試験を行うこととした。図6にストリング構成時のシステムを示す。現場のモジュールは8枚直列に接続されている。図7が検査風景である。同図(a)が影を自動的に投影するためのプロジェクタと移動式台である。同図(b)は検査時のモジュールの様子を示している。

図8に、このストリングに組み込まれているモジュール1枚を取り外して電圧型 SRC 検査を行った結果を示す。このときの照度は 4000Lx であった。No.6 と No.28 のセルに欠陥があるという結果が得られた。図9はモジュール8枚のストリング状態で検査したときの結果(図8と同一モジュール)を示している。このときの照度は 900Lx であった。ストリング状態では照射面積が大きくなるため低照度での検査となる。図9の結果をみると、図8とほぼ同じ結果が得られていることが分かる。これらの結果から、提案する電圧型 SRC 検査法は低照度においても高照度と同じ精度で結果の得られることが明らかとなった。図10は検査結果から欠陥と判定された No.6 のセルと正常と判定された No.8 のセルの温度を測定した結果である。同図より、

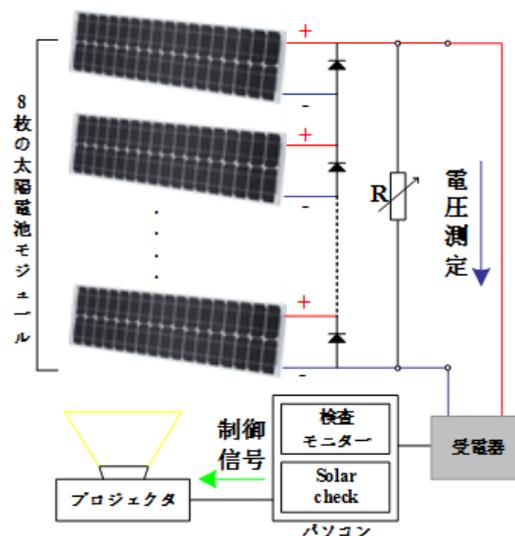
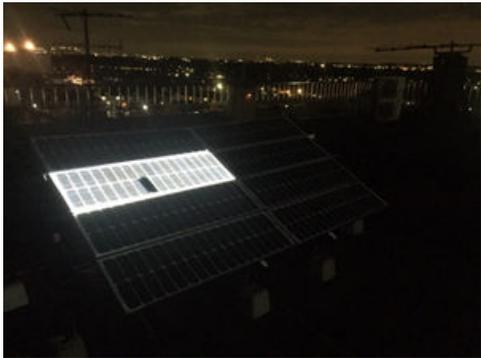


図6 ストリング構成時のシステム構成



(a)高輝度プロジェクタと製作した移動式台



(b)ストリング構成での検査

図7 屋外実証実験時の様子

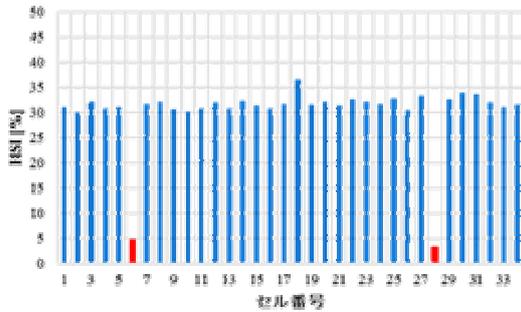


図8 検査結果(PV-2, 照度：4000Lx)

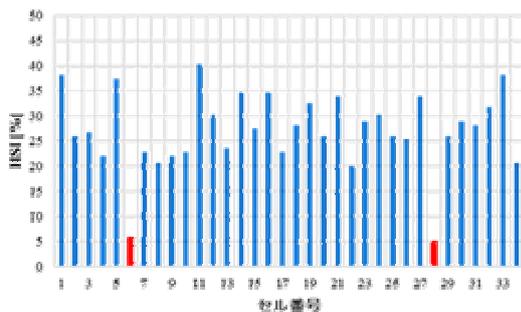


図9 検査結果(PV-2, 照度：900Lx)

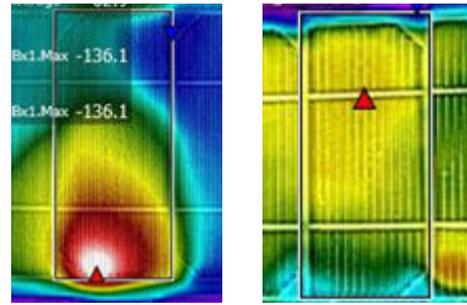


図10 ホットスポット検出実験 (左：No.6, 右：No.8)

No.6 のセルはホットスポット現象が発生していることが分かる。また, No.8 のセルはホットスポットが生じていないことが分かる。以上より, 提案した本検査システムでストリング毎にホットスポットモジュールの検査が可能であることが実証された。

以上の成果をまとめると以下のようなものである。

- ・従来の検査法としては, 赤外線カメラを用いた温度測定による方法があるが, 測定器が高価であり, 測定に多くの時間を要してしまうという問題に対して, 今回開発した SRC 検査システムは, すべて電氣的に処理することができ, 影のアニメーション動作時間と計測時間を短く設定できるので, ごく短時間で診断することが可能である。

- ・太陽電池モジュールのストリング構成において, 新しく開発した電圧型 SRC 検査法により, 欠陥セルを検出することが可能であることが明らかとなった。これにより, 設置後も接続箱から電圧を取り出して容易に不良モジュールの検査が可能となる。

このシステムを用いて, 欠陥のあるモジュールを排除することで, 太陽光発電システムの故障率を大幅に低減できることが期待できる。

以上より, 本研究の目的はほぼ達成されたものと考えられる。

今後は, FIT 法が 2017 年から改定され, 設置後の保守点検がさらに強化されることから, 本システムの実用化に向けた検討を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- ① Y. Wang, K. Itako, T. Kudoh, K. Koh and Q. Ge, "Voltage-Based Hot-Spot Detection Method for PV String Using Projector", *Energies*, No. 10, 2017, 1-14, (査読有)
DOI:10.3390/en10020230

- ② Y. Wang, K. Itako, T. Kudoh, K. Koh and Q. Ge, "Voltage-Based Hot-Spot Detection Method for Defective Cell in Photovoltaic Module Using Projector", Journal of Energy and Power Engineering (USA), Vol. 10, No. 8, 2016, pp. 489-496, (査読有)
DOI:10.17265/1934-8975/2016.08.005

[学会発表] (計 9 件)

- ① Y. Wang and K. Itako, T. Kudoh, K. Koh and Q. Ge, "Voltage-Based Hot-spot Detection Method for PV String Using Projector", Proceedings of IEEE 2016 International Conference on Power and Renewable Energy, 2016. 10. (CD-ROM) (6pages) (国際学会: 査読有) (上海)
- ② Y. Wang and K. Itako, T. Kudoh, K. Koh and Q. Ge, "Voltage-Based Hot-spot Detection Method for Defective Cell in Photovoltaic Module", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering, 2016. 7. (CD-ROM) (6pages) (国際学会: 査読有) (沖縄)
- ③ 王 亜東, 柳沢拓己, 諸星拓貴, 工藤嗣友, 板子一隆, "電圧型ホットスポット検査装置の開発", 電気学会東京支部神奈川支所研究会, 2016. 2, No. KNG-16-006, (横浜国立大学)
- ④ 王 亜東, 板子一隆, "直列に接続された太陽電池モジュールの欠陥セル検出方法 (電圧型 SRC 検査法)", '15 SAS Intelligent Symposium, No. B-3, 2015. 11, (東海大学)
- ⑤ 渡邊明彦, 小佐野美穂, 黄 澄揚, 工藤嗣友, 板子一隆, 高木祐一, 増田幹弘 "太陽電池モジュールのためのホットスポット簡易診断法の効果の検討", 2014 年度第 4 回電気学会東京支部神奈川支所研究会, 2014. 2, No. KNG-15-002, (横浜国立大学)
- ⑥ 柳沢拓己, 諸星拓貴, 板子一隆, "多結晶型太陽光パネルの欠陥セル判別法の検討", '14 SAS Intelligent Symposium, No. B-2, 2014. 11, (東海大学)
- ⑦ 渡邊明彦, 小佐野美穂, 工藤嗣友, 板子一隆 "太陽電池モジュールにおけるホットスポット簡易診断の基礎実験" 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, No. 18a-PB4-12. 2014. 9, (北海道大学)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 欠陥セルの検出方法およびその装置
発明者: 板子一隆
権利者: 学校法人幾徳学園

種類: 特許
番号: 特願 2015-186766
出願年月日: 2015 年 9 月 24 日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

板子一隆 (ITAKO, Kazutaka)
神奈川工科大学・工学部・電気電子情報工
学科・教授
研究者番号: 10232381

(2) 研究協力者

谷田雄二 (YATSUDA, Yuji)