

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04644

研究課題名（和文）太陽光発電設備の火災や損壊による感電事故低減技術の開発

研究課題名（英文）Development of electric shock accident prevention technique caused by fire and damage to photovoltaic solar system

研究代表者

濱田 俊之（Hamada, Toshiyuki）

大阪電気通信大学・工学部・准教授

研究者番号：20733695

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：太陽光発電システム（PVS）の故障や被災時における感電事故低減技術開発として、遮光による手法及びPVSの出力電圧を低減させる安全回路の開発を行った。

遮光技術については、一般的に入手可能かつ難燃性の水性塗料を用いて遮光特性を明らかにした。その結果、ウエット膜厚50μm以上の塗布により透過光強度は5%未満となり、十分な遮光性能を得られることが確認された。

また、電磁リレーによる太陽電池間の接続を解列する安全回路を提案し、提案回路の試作・動作特性を確認した。本提案回路は外部信号や風害などでパネルが飛散した場合にも動作するシステムであり、太陽光発電の安全性の更なる向上に寄与できよう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光発電システム（PVS）の火災時の感電事故の対策はこれまで検討されてきているが、火災以外の故障や事故における感電事故リスクを取り除く研究は十分になされていない。本研究では遮光と安全回路という2つの側面からPVSを安全に運用するための技術開発を行っており、遮光技術では身近な塗料などを用いることでも安全確保が可能であることを証明した。安全回路の開発ではリレーを用い、風災害や破損事故にも対応できるフェールセーフシステムの開発に成功した。近年はPVSの安全問題がメディアでも取り上げられる中でPVSの新しい安全対策技術を実用化に向けて取り組んだ本研究成果は、PVSの主力電源化に貢献できたと考える。

研究成果の概要（英文）： This study developed a shading-based method and safety circuit to reduce the output voltage of the PVS to address the need to mitigate electric shock accidents caused by photovoltaic system (PVS) failure or disaster.

We identified shading properties using commonly available flame-retardant, water-based paints to develop the shading technology. The results indicated that the light transmission intensity was less than 5% under the application of a wet film with a thickness of 50 μm or higher, confirming that sufficient light shielding performance was achieved. In addition, we proposed a safety circuit to disconnect connections between solar cells using electromagnetic relays, fabricated a prototype of the proposed circuit, and verified its operational characteristics. The proposed circuit system is activated in the event of panel shattering due to external signals or wind damage and contributes to improved safety in photovoltaic power generation.

研究分野：電力工学

キーワード：太陽光発電 感電事故 ラピッドシャットダウン 火災 災害 故障

1 . 研究開始当初の背景

太陽光発電設備(PVS)は、再生可能エネルギーの固定価格買取制度(FIT)を背景に事業用及び一般住宅用ともに急速に普及している。また、住宅屋根上にある太陽光発電設備も1箇所の発電所ととらえて発電導入件数から推計すると、日本各地に点在する太陽光発電所の95%以上は50kW未満の小規模なPVSである。前述規模の発電所は住宅や建物上に設置されていることが多く、PVSを発火源とした火災だけでなく設置建物の火災による火災被害にあう可能性がある。加えて、電気事業法においては一般用電気工作物に該当し、保安規定や電気主任技術者の選任が不要となっており、管理を行う所有者は太陽光発電に関する技術的知識に乏しい者が運用している場合がほとんどであるため、小規模PVSほど高い安全性が求められる^{[1][2]}。

住宅用、事業用ともにPVSが急速に普及し、運用開始から20年を超える老朽化したPVSも増加しつつある。そのような中で、PVSの故障を原因とした火災、あるいはPVSが設置された建物の火災事例が増加している。太陽電池(PV)モジュールは損壊やダメージを受けていても太陽電池セル(PN接合ダイオード)に異常がなければ光照射により発電を行う。したがって、PVSを有する住宅やPVS自身が火災となった場合、放水による消火作業を行うと感電の危険性がある。また、火災に限らず、災害により損壊したPVSは接続箇所の地絡や配線の断線、架台/モジュール間の短絡などが生じている可能性が高く、不用意に近づくと感電の危険があるため、事故後の点検や撤去作業が困難である^[3]。したがって、PVSの自然災害や火災などによる事故対策や安全性向上に関する対応技術を確立していくことが急務である。

2 . 研究の目的

PVSは火災や地震などにより損壊しても太陽電池セルに光が照射されれば発電する。そのため、災害などで損壊したPVSの点検や復旧作業において、作業従事者や所有者が感電する恐れがある。研究課題では、火災など各種災害によりPVSが損壊した場合に、事故の波及防止及び事故後の点検・補修や撤去に従事する作業員の感電事故を低減させることを目的としたPVモジュールの発電休止、あるいは無電圧化する手法の開発を目指す。

現在、太陽光発電が普及し、運用年数の経過した設備が増えるにつれ、経年劣化により不具合や故障を抱えるPVSも多数発生している。しかし、『メンテナンスフリー』かつ『出力変動が激しい』発電方法であるため、異常が発生しても深刻な事故に至るまで気付かないことも少なくない。我が国において太陽光発電は、『安全』かつ『クリーン』で『メンテナンスフリー』な発電方式としてニューサンシャイン計画など再生可能エネルギーの実用化と普及を目指す数多くの政策により、材料開発や電力変換システムに代表とされる製品に関する研究開発は盛んに行われてきた。太陽光発電設備の安全性については、リスク分析などの報告は行われている^[4]が、設置後の太陽光発電の保守や安全対策に関する系統的な研究は少なく、十分行われているとは言い難い。そこで、研究課題では、PVSの発火後における消火活動や撤去時における安全性確保という側面での太陽光発電の安全研究を実施した。

3 . 研究の方法

本研究ではPVSが火災や故障、自然災害に被災した際に生じる公衆感電事故リスクの低減を目指し、PVS出力電圧を感電リスクのないレベルまで低減させる技術の開発を行った。具体的には太陽電池モジュールの物理的遮蔽技術の検討、ならびに感電の危険性の低い直流30V未満に低減させる安全回路の開発を行った。

3 . 1 PVモジュールの物理的遮蔽技術の開発

消火活動や点検作業中における感電事故低減には、物理的にPVモジュールを遮光して無電圧化することが有効である。そこで、本項目では遮光に適した材料の検討を行った。遮光剤の選定には、容易に入手可能であること、比較的安価であること、火災にも対応するため耐熱性及び不燃性であること、速乾性があることを条件とした。前述の条件を満たす遮光剤として、市販のウレタン樹脂系(耐熱温度:約150°C)、シリコン樹脂系(耐熱温度:約600°C)、フッ素樹脂系(耐熱温度:約260°C)の水性塗料を選定し、50mm×50mmの太陽電池モジュールのカバーガラス材として用いられる白板ガラス表面にライトスプレー(ベネテック(株)、LS-1)を用い、ウェット膜厚50µm、100µm、175µm、250µmで塗布した。透過光強度測定には、ハロゲンランプ(MORITEX SCHOTT, MEGALIGHT100)及び日射計(デルタオーム社, LP Silicon-PYRA04)を用いて遮光剤を塗布した白板ガラスの透過光強度を測定した。ハロゲンランプの光照射強度は、地表に照射される最大日射強度である1kW/m²とした。さらに、遮光剤の高温に対する遮光特性の変化を確認するため、定温乾燥機(ヤマト科学(株)、AC100V)により加熱し、高温環境下における遮光特性

を確認した。

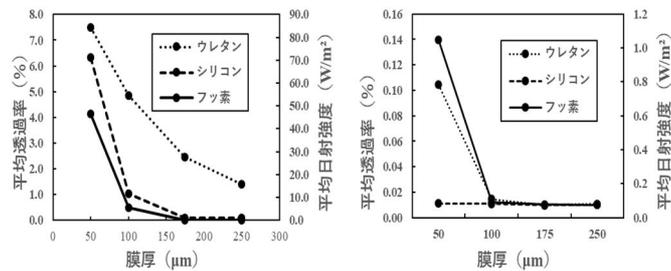
3.2 PVS のシステム電圧の低電圧化回路の提案及び開発

発火した PVS あるいは PVS を設置した建物の消火活動や損壊した PVS の点検・撤去作業では、作業員が感電する恐れがある。そこで、火災被害に曝された太陽電池モジュールの出力を感電リスクの低い電圧 (DC30V 以下) を実現する安全回路の提案を行った。提案する安全回路では、直列接続された太陽電池モジュール (PV モジュール) 間に電磁リレーを設置することで外部信号によって PV モジュール間の接続を解列し、さらにモジュール出力端の短絡を実現させた。加えて、提案システムは当初の目的であった火災だけでなく、風害被害などにも対応できるように回路接続の改良を行った。

4. 研究成果

4.1 PV モジュールの物理的遮蔽技術の開発

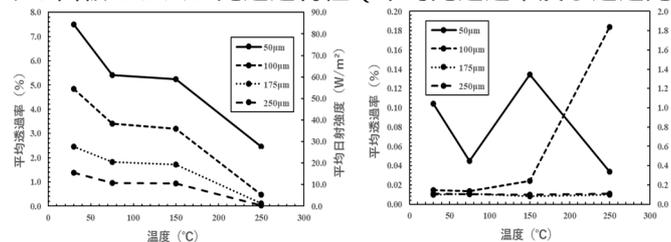
各塗料における白板ガラスの光透過特性を図 1 に示す。同図より、膜厚が増加すると光透過率は低下する。また、色彩の明度の低い黒色塗料の方が遮光性能は高いことが分かった。次に、遮光剤を塗布した白板ガラスを 75, 150, 250 に加熱した後の白板ガラスの光透過特性を図 2 に示す。同図より白色塗料は温度上昇に伴い光透過率が低下することがわかる。これは、高温により塗料が変色したため、透過率が低下したと考えられる。対して黒色の塗料は、温度上昇に



(a) 白色塗料の光透過特性

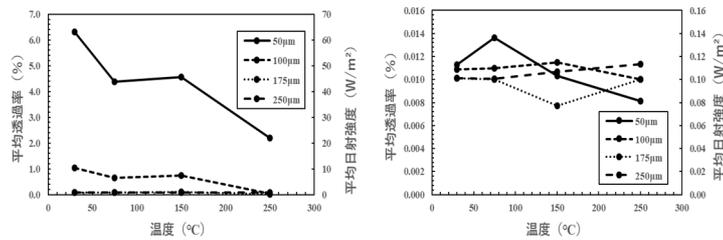
(b) 黒色塗料の光透過特性

図 1 各塗料における白板ガラスの光透過特性 (平均光透過率及び透過光の平均日射強度)



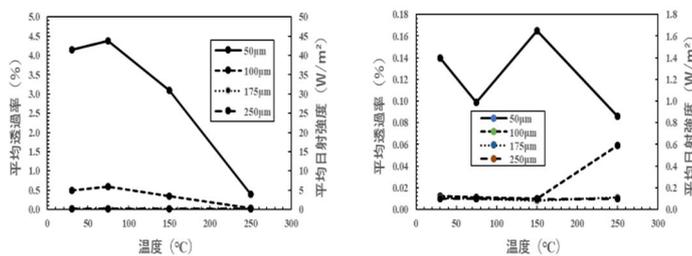
(a) ウレタン樹脂塗料白色

(b) ウレタン樹脂塗料黒色



(c) シリコン樹脂塗料白色

(d) シリコン樹脂塗料黒色



(e) フッ素樹脂塗料白色 (f) フッ素樹脂塗料黒色

図 2 遮光剤の温度による光透過特性 (平均光透過率及び透過光の平均日射強度)

より光透過率の変動がみられるが、非常に低い値での変動なので、測定誤差の範囲と考えられる。なお、いずれの塗料も日射強度の値は、PVS が発電を行える日射強度約 0.12kW/m^2 以下である

ため、遮光剤としてどれを用いても問題ないが、その中でも遮光性能に優れ、耐熱温度の高いシリコン樹脂系（黒色）塗料が、今回提案しました遮光剤の中で最も優れていると考えられる。

4.2 PVS のシステム電圧の低電圧化回路の提案及び開発

図3に電磁リレーを用いたPVSの火災や損壊時における感電防止システムの概要を示す。同図は1ストリング構成でのシステムを示している。本提案システムはPVモジュール間の接続部にリレーを配置した構成としており、これにより非常時や災害時にモジュール間に設置したリレーを動作させ、PVSのシステム電圧を感電の危険性の低い低電圧状態とすることができる。なお、提案システムで用いるリレーは、PVモジュールの容量に耐え、かつ比較的安価なa接点及びc接点のメカニカルリレーを採用している。a接点リレー(Normally Open Contact Relay)とは、常開リレーであり、リレー駆動用コイル(1次側)に電流を流して励磁するとリレー接点(2次側)が閉じて導通状態となるリレーである。c接点リレー(Transfer Contact Relay)とは、常開(NO: Normally Open)及び常閉(NC: Normally Close)の2つの接点を持ち、通常は常閉接点と接続されており、駆動用コイルに電流を流してコイルを励磁すると常開接点へと接点が切り替わるリレーである。c接点リレーのCOM端子及びNO端子間にはリレー保護用の保護ダイオードを並列に接続し、リレー間の動作時間の誤差により一部のリレーが故障することを保護する構造とした。各リレーの駆動用コイルの励磁用電源は一般商用電源より供給を行う形式とすることでリレーの駆動用コイルへの励磁用電源の供給制御で提案システムのON/OFF操作を行える。本提案システムは既存のPVSに追加導入可能であり、既存のストリングインバータを活用できるため、米国などで普及しているマイクロインバータ方式によるラピッドシャットダウンシステムを追加導入するよりもシステムコストは低廉と考えられる。

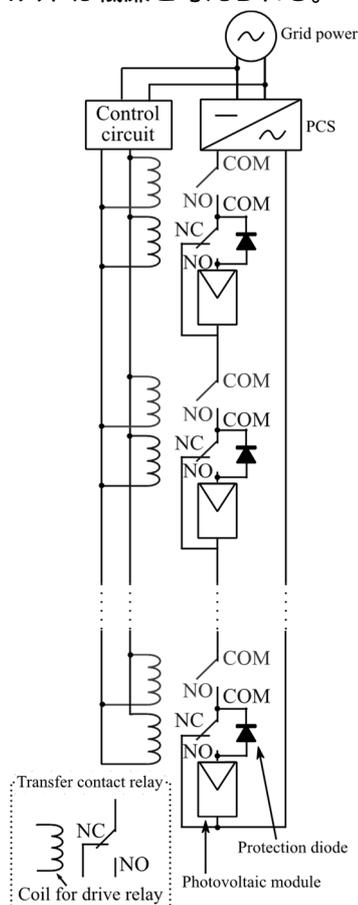


図3 提案する感電事故防止回路の概要

提案システムの動作はリレーの駆動用コイルへの電力供給を止めればよい。駆動用コイルへの電力供給を絶つとc接点リレーはNC-NO端子間が導通し、保護ダイオードを介してPVモジュールが短絡される。このとき、PVモジュールの出力電圧は保護ダイオードの立ち上がり電圧とほぼ等しくなる。また、c接点リレーによりPVモジュール出力端の短絡と同時にa接点リレーがPVモジュールの接続を解列する。これにより、c接点リレーによるPVモジュール内の短絡回路系統の不動作が生じたとしても、a接点リレーによりPVSの電圧はPVモジュール1枚分の開放電圧に止めることができる。したがって、本提案システムでは、火災などの異常時はスイッチを用いた手動操作により感電事故防止状態を実現できる。さらに、前述操作が難しい場合でも電力会社が火災被害物件の停電操作を行うと自動的に感電事故防止状態に移行できる。加え

て、強風により PV モジュールが飛散するような場合も、リレーと PV モジュールとの接続を維持できるように両者を一体化した構造で設計できれば飛散した瞬間に感電事故防止状態に移行させることが可能となる。

次に、本提案の PVS の感電事故防止システムを試作し、PVS を模擬した試験回路に実装および動作試験を行った。図 4 に動作試験回路を示す。動作試験では、ストリングを模擬して 3 枚直列接続した PV モジュール（長州産業（株）、CS-236B31、公称開放電圧 34.7 V、公称短絡電流 8.95 A、公称最大出力 236 W）の出力に可変抵抗（（株）タマオーム、TRH1000A1G）を接続して運転状態を模擬した。なお、負荷抵抗の抵抗値は試験で用いた PV モジュールの定格出力において最大電力点となる 9.5Ω とした。各駆動用コイルへの電力供給は直流安定化電源（菊水電子工業（株）、PMX-35-1A）にて供給した。試作した感電防止システムの動作前後の PV モジュール及び負荷抵抗への電圧ならびに電流値を測定したところ、正常に負荷電流の遮断動作を繰り返し行うことが可能であることを確認した。したがって、本研究課題で開発した PVS の感電事故防止回路は実際の PVS への適用が可能であることが分かった。

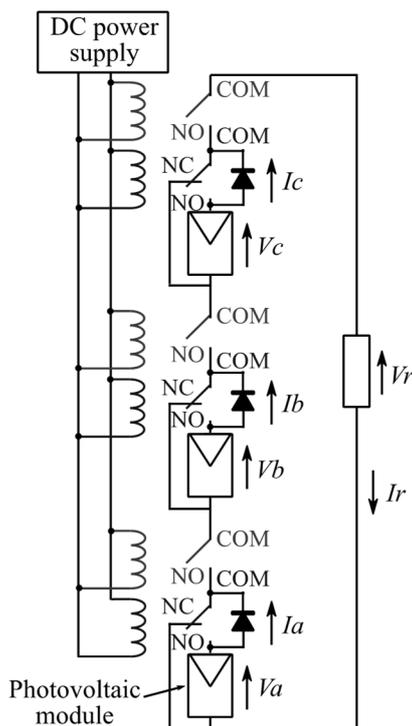


図 4 動作確認用に試作した PVS の感電事故防止回路の概要

参考文献

- [1] 経済産業省：再生可能エネルギーの大量導入時代における政策課題に関する研究会資料，http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/saisei_dounyu/pdf/001_03_00.pdf
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁：平成 27 年度「エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2016）」，2016 年
- [3] 消防庁消防研究センター：「太陽光発電システム火災と消防活動における安全対策」，消防研究技術資料 83 号，2014 年
- [4] 大関崇，吉富政宣：「太陽光発電の火災リスクに関して」，安全工学，Vol.52，No.3，pp.162-172，2013 年

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 濱田俊之、中本健太	4. 巻 46
2. 論文標題 電磁リレーを用いた太陽光発電システム用感電防止システムの提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 太陽エネルギー	6. 最初と最後の頁 103-108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hamada Toshiyuki, Yoneda Shinnosuke, Nakamoto Kenta, Okamoto Masayuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of Electric Shock Prevention Systems for Photovoltaic Solar Systems using Electromagnetic Relay	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/PVSC43889.2021.9518727	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 米田真之介、濱田俊之、中本健太
2. 発表標題 電磁リレーを用いた太陽光発電システム用感電防止システムの耐久性の評価
3. 学会等名 2020年度（第71回）電気・情報関係学会中国支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中本 健太、濱田 俊之
2. 発表標題 電磁リレーを使用したラピッドシャットダウンシステムの提案
3. 学会等名 2019年度日本太陽エネルギー学会・風力エネルギー学会合同研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中本健太, 藤本雄大, 柏谷拓実, 濱田俊之
2. 発表標題 太陽光発電システム用感電防止システムの提案
3. 学会等名 2019年度(第70回)電気・情報関係学会中国支部連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------