

Electrical Shock Prevention System for a Photovoltaic System Using Electromagnetic Relay

Toshiyuki HAMADA^{*1‡} Kenta NAKAMOTO^{*2}

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

濱田 俊之^{*1‡}

中本 健太^{*2}

Abstract

Photovoltaic systems cause electric shock accidents. Accidents have been reported wherein a firefighter who has extinguished a fire in a solar power generation facility has received an electrical shock. Additionally, there is a risk of electrical shock when touching a photovoltaic module scattered by wind. Specifically, rapid shutdown is popular in the USA to prevent electrical shock accidents during firefighting activities. When rapid shutdown is activated, the photovoltaic system enters a low voltage state. However, this rapid shutdown can only prevent electrical shock accidents during firefighting activities. Furthermore, to introduce rapid shutdown in established photovoltaic systems, the power conditioner may have to be replaced. Therefore, in this study, we propose a system that uses an electromagnetic relay to prevent electrical shock accidents and scattering of photovoltaic modules in photovoltaic systems, caused by fire extinguishing activities. The proposed system can be easily introduced into installed photovoltaic systems.

Keywords: Photovoltaic System, Electrical Shock Accident, Rapid Shutdown, Electromagnetic Relay
キーワード：太陽光発電システム，感電事故，ラピッドシャットダウン，電磁リレー

1. はじめに

我が国では、固定価格買取制度の導入以降、太陽光発電システム(Photovoltaic System: PVS)が急速に普及している。PVS の普及に伴い、火災や自然災害による損壊事例が増加している。PVS は太陽光が太陽電池セルに照射されることで光電効果により発電を行うため、発電時に燃料は不要であるなど優れた特性を持つ。しかし、光がセルに照射される限り、セルは発電を継続する。したがって、セルの発電を停止させるには物理的にセルの受光面を遮光する程度しか方法がない。前述欠点による PVS の危険性は PVS が故障や火災・風害などに見舞われたときに顕在化する。例えば、風害により太陽電池モジュール (Photovoltaic Solar Module: PV モジュール) が飛散した場合、飛散した PV モ

ジュールとの接触により感電事故が生じる危険性がある。また、PVS の火災被害では、消火作業時における消防隊員の感電の恐れがある。PV モジュールは炎光でも発電を行うため⁽¹⁾、火災で損壊した PVS による感電事故は日射の有無に関わらず発生する危険性がある。実際に我が国においても PVS による消防隊員の感電事例がいくつか報告されている⁽¹⁾。また、PVS が損壊したとしても太陽電池セルが発電不能な状態に陥ることは稀であり、損壊した PVS は常に感電事故を引き起こす危険性があると言える。

ところで、米国では火災で損壊した PVS による感電を防止するため、米国電気工事規定第 690 条第 12 項(National Electrical Code: NEC 690.12)が定められている。同規定は、PVS にラピッドシャットダウンの導入を義務付けることを規定している。ラピッドシャットダウンとは、人的操作

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

*2 筑波大学 理工情報生命学術院

‡e-mail: hamada@ube-k.ac.jp

(原稿受付：2019年12月24日，受理日：2020年4月10日)

*1 Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Ube College

*2 Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba

‡e-mail: hamada@ube-k.ac.jp

Received: 24 December 2019, Accepted: 10 April 2020

による信号をトリガとして、PVS 電路を人体への影響が小さな電圧まで制限する機能である。我が国では NEC 690.12 のような規制は行われていないが、PVS の持つ特性と安全性を考慮すると、ラピッドシャットダウンの導入は PVS による感電事故低減に有効な手法であるといえる。現在米国では、PV モジュール単位で発電出力制御を行うマイクロインバータが普及しており⁽²⁾、ラピッドシャットダウンはマイクロインバータの機能として搭載されている。したがって、既に稼働している PVS にラピッドシャットダウンシステムを導入するには既設のインバータの交換が必要となるため、導入コスト面の課題は大きい。また、ラピッドシャットダウンシステムは消火活動時の消防隊員の感電防止を目的としており、風害などで飛散した PV モジュールによる感電事故は想定していない。

そこで本研究では、既に稼働している PVS に追加導入可能かつ、火災のみならず風害により飛散した PV モジュールによる感電事故防止にも対応した新しい PVS の感電事故防止システムを提案する。前述システムには電磁リレーを用いたシステムを提案するとともに、試作機の製作及び動作確認試験を行った。

2. ラピッドシャットダウンの概要

NEC は全米防火協会 (National Fire Protection Association: NFPA) が策定管理を行っており、建築物や電気設備等の防火、電気的安全性に関する規格の改定を数年ごとに行っている。ラピッドシャットダウンは第 690 条第 12 項で規定されている。なお、ラピッドシャットダウンの目的は消火活動に従事する消防隊員の感電防止であり、地上設置型太陽光発電システムは適用範囲外である。

ラピッドシャットダウンとは、太陽電池アレイに備えられている直流遮断器を遠隔操作することで PVS 電路を低電圧状態に制限する機能である。ラピッドシャットダウンは PVS を備えた建物の外に設置されたスイッチ等から遠隔操作できるものである必要がある。ラピッドシャットダウン起動後の PVS 電路の制限電圧を以下に示す⁽³⁾。なお、制御導体とは、太陽光発電システムの回路であり、境界とはアレイから全ての方向に 305mm (1ft) と定義されている。

- (1) 境界外又は建築物内部への入口から 1m (3ft) を超える位置にある制御導体は、急速遮断開始から 30 秒以内に 30V 以下に制限しなければならない
- (2) 境界内又は建築物表面の貫通点から 1m (3ft) 以内にある制御導体は、急速遮断開始から 30 秒以内に 80V 以下に制限しなければならない

ラピッドシャットダウンは多くの場合、マイクロインバータで実現している。例えば、Enphase Energy, Inc. や Altenergy Power System Inc. が製品化している^(4,5)。マイクロインバータとは PV モジュール単位で電力変換を行う装置

であり、PV モジュール単位の最大電力点を追従できるため、ストリング単位で電力変換を行うストリングインバータに比べて PVS 全体で多くの電力を出力できる。しかし、我が国で普及しているストリングインバータを備えた PVS にラピッドシャットダウンを導入するにはストリングインバータをマイクロインバータに交換する必要があるため、既存設備の有効利用ができず導入コストが大きくなることが予想される。

3. 電磁リレー式感電防止システムの提案

3.1 提案システムの構成

Fig. 1 に我々が提案する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おり、SPD 等は省

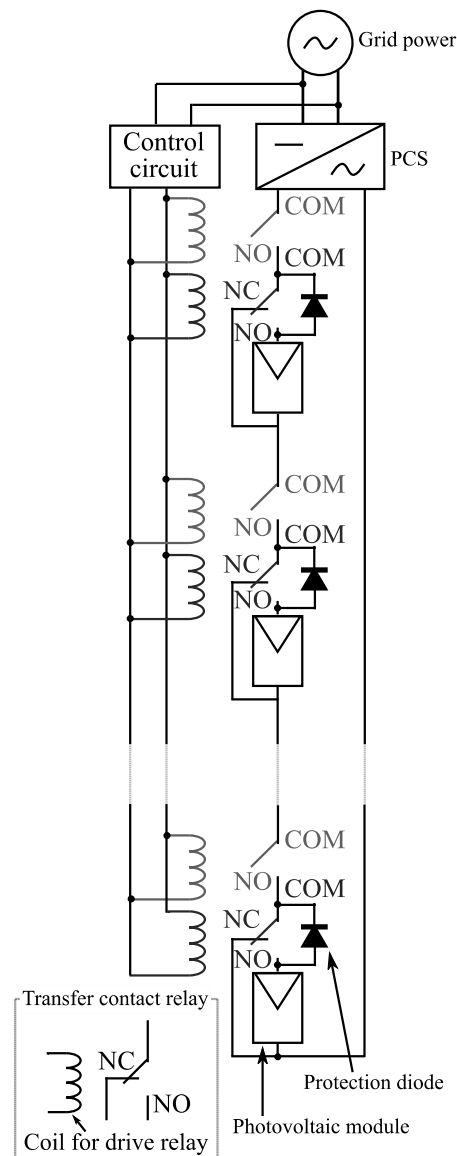


Fig. 1 Schematic diagram of our proposed electrical shock prevention system.

略して記述している。本提案システムは PV モジュール同士の接続部にリレーを設置した構成となっている。これにより非常時や災害時に各 PV モジュール間に設置されたリレーを動作させ、PVS 内回路の低電圧状態を実現できる。なお、本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た。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。PV モジュールと各リレーの接続は、c 接点リレーの NC 端子と PV モジュール低圧側を接続し、NO 端子側には PV モジュールの高圧側、COM 端子を a 接点リレーの NO 端子、a 接点リレーの COM 端子は次段の PV モジュールの低圧側に接続した構成となっている。ちなみに、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交流電力を引込み、インバータを介して直流 12V に変換し、各 PV モジュールに接続されたリレー駆動用コイルへ電力供給を行った。したがって、各リレーの駆動用コイルへの励磁用電源の供給を制御することで本提案システムの操作を行える構成を実現した。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、マイクロインバータ方式にて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。ただし、こう配屋根に平行に PV モジュールが設置された物件や建材一体型の PV モジュールでは、PV モジュール 1 枚 1 枚の着脱の後、システムの取付が必要になるため、施工も含む導入コスト面での優位性は小さくなると予想される。

3.2 本提案システムの動作機構

本提案システムを導入した PVS では、各リレーの駆動用コイルに電力供給して励磁する必要がある。駆動用コイルに電力が供給された場合、c 接点リレーの NO-COM 端子間及び a 接点リレーの NO-COM 端子間が導通し、PV モジュールが直列接続されたストリングを成す。なお、PVS の通常運転時(感電防止システム: OFF)において保護ダイオードは NO-COM 間で短絡されているため、発電時の負荷にはならない。

一方、火災などが発生し、PVS を通常運転から感電防止状態(感電防止システム: ON)に移行させるには駆動用コイルを励磁するため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を行うと同時に a 接点リレーが PV モジュール同士の接続を解列させる。これにより、c 接点リレーが形成させる PV モジュール内の短絡回路系統の異常に起因した安全システムの不動作が生じたとしても、a 接点リレーにより PVS の回路は 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の動作信号によりリレーの駆動用コイルへの電力供給を停止させ、感電事故防止状態を実現できる。前述操作が難しい場合においても電力会社が被害物件の停電操作を行うことで、リレーの駆動用コイルへの電力供給が停止し、感電事故防止状態に移行することができる。加えて、強風により PV モジュールが飛散する場合においても、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とすることで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である。

3.3 保護ダイオードの役割

Fig. 1 に示す保護ダイオードは c 接点リレーを PVS 及び PV モジュールの過電圧から保護するために接続する。メカニカルリレーは物理的に接点を切り替えるため、リレー個々で接点切り替え動作の時間にばらつきが生じる。したがって、リレーの接点の切り替え時間はリレー個々に僅かながらばらつきが生じる。また、接点の切り替えの瞬間は NC 及び NO 端子のいずれにも接触しない期間が存在する。この間、c 接点リレーに PVS のストリング電圧が印加される恐れがある。例えば、PVS が運転中に感電防止状態へ移行する場合、最も早く「NO」から「NC」へ接点切り替えの動作を行った c 接点リレーには、NO-COM の接点を離れた瞬間に NO-COM 間にはストリングの開放電圧相当の電位差が生じる。ほどなく他のリレーも接点切り替え動作を行うので故障にまでは至らない場合もあるが、接点の故障や消耗を早める原因となる。そこで、本提案システムでは、保護ダイオードを c 接点リレーの NO-COM 間に対して並列に接続している。保護ダイオードを接続すると、c 接点リレーの接点切り替え動作時に保護ダイオードに電流を流すことで NO-COM 間に印加される電圧は保護ダイオードの立ち上がり電圧程度に制限できる。

また、一般的に普及している c 接点リレーの接点最大許容電圧は高いものでも DC30 V 程度であり、PV モジュール 1 枚の開放電圧だけでも許容電圧を超える場合がある。c 接点リレーが「NO」から「NC」へ接点切り替え動作を行う際に、NC-COM 間には PV モジュール 1 枚の開放電圧相当の電位差が生じる。保護ダイオードは、前述した接点切り替え時に NC-COM 間に印加される電圧を PV モジュールの開放電圧より保護ダイオードの立ち上がり電圧を差し引いた電圧値まで制限することで c 接点リレー接点の故障を保護している。なお、a 接点リレーには PVS のストリング電圧に耐えられる接点電圧の最大値を有するリレーが普及しているため、前述の保護対策は行っていない。

4. 提案システムの実装および動作試験

4.1 実験方法

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。Fig. 2 に動作試験回路を示す。動作試験環境及び本試験で用いた電磁リレーの仕様を Table 1 及び Table 2 に示す。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 (CS-236B31, 長州産業 (株), 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 (TRH1000A1G, (株) タマオーム) 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 9.5 Ω とした。各駆動用コイルへの電力供給は直流安定化電源 (PMX-35-1A, 菊水電子工業 (株)) にて供給した。試作した感電防止システムの動作前後の回路の状態の確認は、データロガー (LR8400, 日置電機 (株) 製, サンプリング周期 10 ms, サンプリング周波数 100 Hz) にて PV モジュール 3 枚の出力電圧 V_a, V_b, V_c 及び負荷抵抗間の電圧 V_r を測定した。また、各保護ダイオードに流れる電流 I_a, I_b, I_c 及び負荷抵抗に流れる電流 I_r は電流センサ (CT7631, 日置電機 (株) 製) にて測定した。

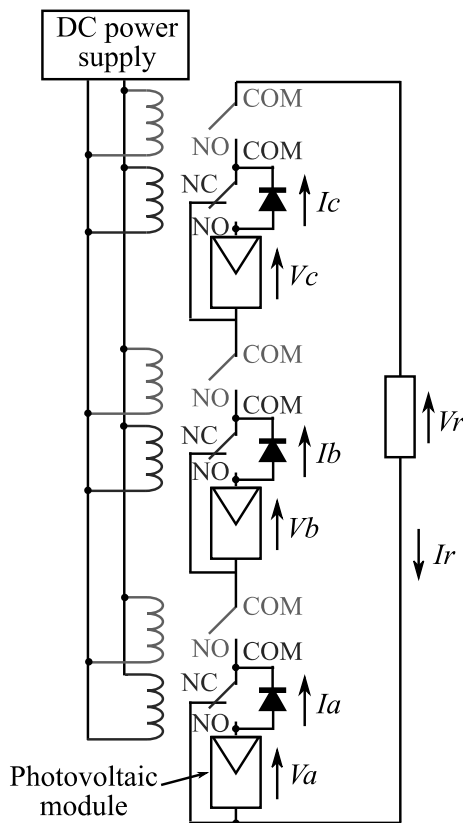


Fig. 2 Schematic diagram of operation test.

Table 1 Test environment

Test day and time	September 25, 2019 13:00-13:20
Test site	Rooftop of Mechanical/Electrical Engineering Bldg. North latitude: 33.955239 East longitude: 131.273845
Temperature	25.4 °C
Humidity	65 %
Solar radiation	890 W/m ²

Table 2 Specifications of electromagnetic relay

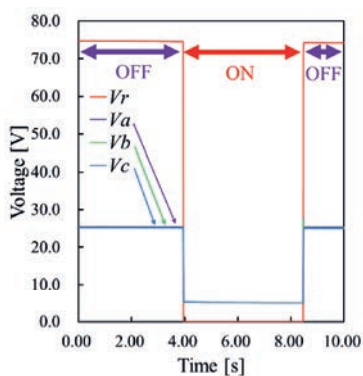
	Make relay	Transfer contact relay
Type	G9EJ-1-E	G2R-1-SND
Maximum contact voltage	DC 400 V	DC 30 V
Maximum contact current	15 A	10 A
Contact resistance	≤ 100 mΩ	≤ 30 mΩ
Power consumption of coil for drive relay	1.2 W	0.53 W

4.2 実験結果

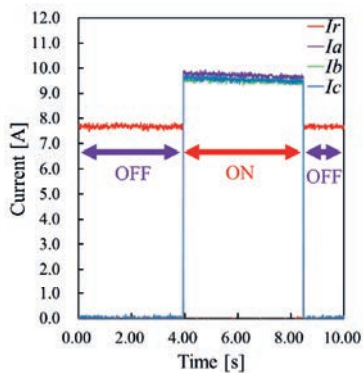
Fig. 3 に試験回路の通常運転状態及び感電防止状態時における各 PV モジュールの出力電圧、各保護ダイオードを通過する電流及び負荷抵抗の電圧、電流を示す。同図(a)より、動作試験環境において感電防止システム OFF 時である通常運転状態 ($0.00 < t < 4.00$) では、各 PV モジュールの出力電圧 V_a, V_b, V_c はいずれも 25 V、負荷抵抗間の電圧 V_r は 75 V である。また、同図(b)より負荷抵抗に流れる電流 I_r は 7.9 A であり、保護ダイオードに流れる電流は 0 A であることを確認した。なお、同電流波形は振動しているように見えるが、これはホール素子による非接触式電流センサにて観測を行ったためである。ちなみに、各リレーの駆動用コイルに流れる電流値により本システムで用いたリレーすべての消費電力を算出すると約 3.6 W であった。我が国における住宅用太陽光発電システムの単位システム容量当たりの 1 年間の発電電力量は 1000 kWh/kW 程度とされている⁽⁹⁾。本報告の動作試験で用いた PV モジュールの合計出力は 236W×3 枚=708W であり、前述データを基に年間の発電電力量を推定すると 708kWh となる。一方、本提案システムの動作試験で得られたリレー駆動用コイルの全消費電力は 3.6W である。本報告で提案したシステムにおいては、これが 1 年間休みなく連続で動作し続ける構造となっており、駆動用コイルの年間の消費電力量はおおよそ 31.54 kWh となる。これは、動作試験で用いたシステムの年間発電電力量の 4.45% に相当する。日射量の多い地域では発電電力量に対するリレー駆動用コイルの消費電力量の占める割合は前述数値よりも小さなものとなるが、非発電時にはリレー駆動用コイルへの電力供給を停止させる構造とす

るなど、電力消費の低減が望まれる。

次に、感電防止システムが ON となる感電防止状態 ($4.00 < t < 8.50$) では、PV モジュールの出力電圧 V_a, V_b, V_c は保護ダイオードの立ち上がり電圧となる 4 V を示し、負荷抵抗間の電圧 V_r は 0 V となった。したがって、a 接点リレーによる各 PV モジュールの接続の解除が確認できた。一方、保護ダイオードを通過する電流 I_a, I_b, I_c はいずれも約 9.5 A となり、c 接点リレーによる PV モジュールの短絡も確認できた。その後、試験回路を通常運転状態 ($8.50 < t < 10.00$) に戻すと、感電防止状態移行前 ($0.00 < t < 4.00$) と同様の電圧及び電流値に戻る。したがって、本提案の感電防止システムの適正な動作を確認できた。



(a) Voltage waveform



(b) Current waveform

Fig. 3 Voltage and current waveform of protection diode, load and PV module at electrical shock prevention system ON/OFF.

5. 先行技術との比較及び検討

我々が提案する感電防止システムと同様にリレーを使用した PVS 向け感電防止システムはいくつか提案されている。その 1 つに PVS による感電事故を防止するため、リレーにより各 PV モジュールの接続を解除する手法がある⁽⁷⁾。Fig. 4 にシステムの概要を示す。このシステムは PVS を通常運転する場合、制御部による信号で a11 及び a12 のリレーを駆動させる構造となっている。システム構成は、はじめにリレー a11 及び a12 を動作させると、初段の PV モジ

ジュールの発電電力によりリレー a21, a31 が動作し、この動作により次段の PV モジュールはリレー a22, a32 を動作させることができるようになる。以後、ディジーチェーン的に PV モジュールがリレーにより接続されストリングが形成される。したがって、緊急時にはリレー a11 及び a12 への電力供給を停止させ各 PV モジュールの電氣的接続を一斉に解除する。しかし、当該システムにおいて、PV モジュールが陰や故障により発電出力が著しく低下した場合、リレーを駆動できない恐れがある。加えて、近年、公称開放電圧が 30 V を超える PV モジュールも普及しているため、PV モジュール間の接続を解除するだけでは感電防止に不十分な場合がある。

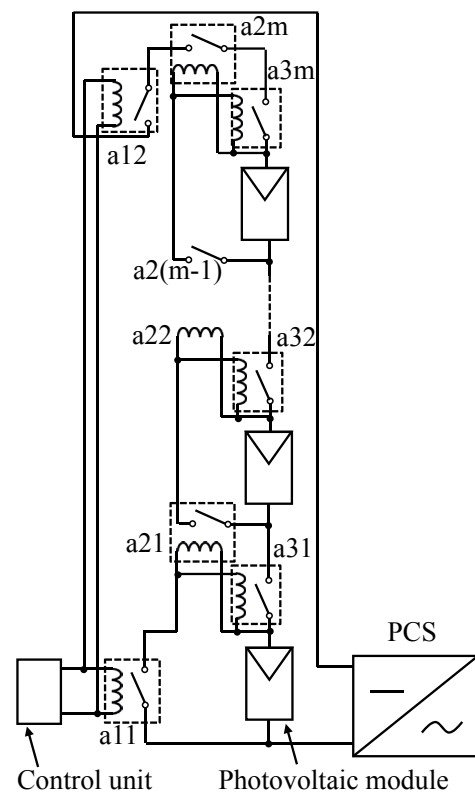


Fig. 4 Prevention of electrical shock system⁵⁾
(Ref. 7) Fig. 5 Simplification)

前述手法のほか、緊急時にリレーによりストリングの出力端に所定の抵抗値を持つ感電防止抵抗を接続した閉回路を形成する手法が提案されている⁽⁸⁾。しかし、前述手法はストリング間の断線時には電路を低電圧に保てないという問題点がある。

前述した 2 つの感電防止システムは、本提案システムと同じく配線が単純かつ施工が容易に行え、ストリングインバータを備えた PVS に追加で導入可能と思われる。しかし、これらの技術は火災時の PVS 電路の低電圧化を目的としており、PV モジュールが飛散した場合の対応は難しい。一方、本提案システムでは、風害などによる PV モジュー

ルの損壊や飛散にも対応できる。さらに、感電防止状態時は PV モジュール単位で短絡及び電氣的接続を解除するため、フェールセーフかつ信頼性の高い感電事故防止機能を PVS に付与できる。

6. まとめ

本研究では火災や風害により損壊した PVS による感電を防止するシステムを提案した。本システムは電磁リレーを主とした構成であるため安価かつストリングインバータを備えた既存の PVS に追加導入が可能である。また、各モジュールに接続するリレーの駆動用コイルには商用電源より駆動電力を引込む構造を提案した。これにより、本提案システムはリレーの駆動用コイルへの電力供給が途絶えると感電防止状態に移行できる。そのため、PVS の風害による飛散や火災だけでなく、各種故障状態においても感電防止状態とすることが可能である。さらに、PV モジュール個々の回路短絡が行えない事態に陥ったとしてもモジュール個々の接続は解列することができているため、感電による危険性を低減させることができるフェールセーフなシステムであるといえる。本提案の感電防止システムを PVS に導入することで PVS 火災における消火活動時や風害などで飛散した PV モジュール撤去時などの感電事故リスク低減が見込める。

7. 謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金（18K04644, 代表：濱田俊之）の助成を受けたものである

8. 参考文献

- 1) 消防研究センター, 消防研究技術資料 83 号: 太陽光発電システム火災と消防活動における安全対策, (2014), 消防庁, 東京
- 2) IEA PVPS, TRENDS 2017 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS (accessed Dec. 17th, 2019), http://www.iea-pvps.org/index.php?id=363&eID=dam_frontend_push&docID=4245
- 3) (国研) 産業技術総合研究所, 太陽光発電の直流電気安全のための手引きと技術情報 (第 2 版) (accessed Dec. 20th, 2019), [https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV_Electrical_Safety/Technical_Information_on_PV_Electrical_Safety2\(AIST2019\).pdf](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV_Electrical_Safety/Technical_Information_on_PV_Electrical_Safety2(AIST2019).pdf)
- 4) Enphase Energy, Inc., IQ 7X Microinverter Datasheet, (accessed Sep. 27th, 2019), <https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/IQ7X-DS-EN-US.pdf>
- 5) Altenergy Power System Inc., YC600 Microinverter Datasheet, (accessed Sep. 27th, 2019), <https://usa.apsystems.com/wp-content/uploads/2019/06/APsystems-YC600-Product-Datasheet-5.24.19.pdf>
- 6) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構編, NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 2 版, 26-26(2014), 森北出版(株), 東京.
- 7) 三菱電機株式会社, 太陽光発電システム, PV モジュール間電路接続方法および PV モジュール間電路解除方法, 特開 2018-133992.
- 8) ホーチキ株式会社, 太陽光発電システム, 特開 2014-68509.