

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01580

研究課題名（和文）故障しにくく尚且つ故障後も安全を確保できる太陽光発電システムの安全技術開発

研究課題名（英文）Durability enhancement and development of fail-safe design, safety technology for 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） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、故障しにくい太陽光発電（PVS）の構造設計、故障や劣化を早期検知する技術、故障しても安全なPVSを維持可能な安全技術の各階層に対応する安全研究に取り組み、PVSの安全性向上を図った。ではPVモジュール内のバイパスダイオード（BPD）のサージや動作耐久性及び焼損リスクの関係を明らかにした。では機械学習やCPS、ロジスティクス回帰を用いたPVSの各種異常検知可能であることを明らかにした。では電磁リレー式遮断技術開発を行い、実機へ適用可能であることを明らかにした。また、不具合モジュールのリユース技術の有効性も検証できた。本成果はを安心安全に使用できるPVSの実現に貢献できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光発電（PVS）は住宅屋根上にも手軽に設置されるが、光が照射される限り発電するため、火災や感電事故の危険性がある。前述対策には、故障しにくい構造設計、異常の早期検知、異常時の安全確保技術の階層からなる対策が必要である。海外ではアークや火災時の感電事故防止技術の導入が義務化されているが、我が国ではその必要性の検証や安全対策に関する技術開発は、PVSの普及の障害になることを危惧して進んでいない。本研究の取り組みは太陽光発電の安全設計や故障検知、故障後の安全確保技術開発を先導して担ったものであり、学术界として太陽光発電の主力電源化、太陽光発電の安全研究の学問分野確立に貢献したと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, safety research was conducted to improve the safety of PVS by addressing the following three levels: (1) structural design of photovoltaic systems (PVS) that are less prone to failure, (2) technology for early detection of failure and degradation, and (3) safety technology that can maintain a safe PVS even in the event of failure. In (1), we clarified the relationship between surges, operational durability, and burnout risk of bypass diodes (BPDs) in PV modules. In (2), we showed that various PVS abnormalities can be detected using machine learning, CPS, and logistics regression. In (3), we developed an electromagnetic relay type shutdown technology and demonstrated that it can be applied to actual equipment. This contributed to the realization of a technology that enables the safe long-term use of PVS.

研究分野：安全工学、電力工学

キーワード：太陽光発電システム 故障 フェールセーフ ラピッドシャットダウン バイパスダイオード 焼損 故障診断

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1 . 研究開始当初の背景

太陽光を電気エネルギーに変換できる太陽光発電は、我が国では 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて将来の主力電源に位置付けている。しかし、PVS が故障すると前述特徴は欠点に転ずる。例えば、太陽電池モジュール(PV モジュール)内のバイパスダイオード(BPD)が故障した場合、焼損・発火のリスクがある。風水害で PVS が水没、あるいは飛散した場合、感電事故のリスクがある。PVS 火災では消防士の感電事故が頻発している。光照射で受動的に発電する PVS は、災害や事故に対して感電事故のリスクがあり、PVS 故障は所有者の財産の喪失や作業員の感電被害だけでなく、周辺環境の破壊や近隣住民の安全を脅かすリスクであり、耐久性向上ならびにフェールセーフ、故障検知など様々な観点からの安全確保技術の発展が望まれる。

2 . 研究の目的

PVS の安全性向上には、故障しにくい PVS の構造設計、故障や劣化を早期検知する技術、故障しても安全な PVS を維持可能な安全システムという 3 段階の階層での安全対策が必要である。本課題では各階層に対応する以下の研究を展開し、PVS の更なる安全性向上を図った。

2 . (1) バイパスダイオード(BPD)の耐久性向上に関する研究

PV モジュールは部分陰による非発電セルの局所発熱や導通不良による出力低下回避のため、十数枚程度のセルの直列接続ごとに BPD が並列接続されている。この BPD が故障すると火災の危険性を持つ。BPD の焼損リスク低減には、耐久性向上と早期検知が求められる。本研究では、BPD が故障した際に焼損に至るメカニズムの解明と耐久性評価を行い、BPD の耐久性向上のための仕様や要素を検討した。

2 . (2) PVS 設備内の故障検知技術の開発

PVS では経年劣化や災害、初期不良、施工不良など様々な要因により故障に至る。しかしながら PVS は無人かつ出力変動の大きな電源であるために故障による出力変化に気づくことが困難である。本研究では PVS に焼損の危険性のある各種異常が発生した場合、直ちに異常を検知して異常箇所を遮断する技術について検討した。対象には BPD 故障やストリング断線、設備内で発生するアークを対象とし、PVS 異常時の事故の拡大を防ぐ安全技術開発を行った。また、BPD 故障検知は 2 つの手法 (機械学習、CPS) から故障検知の可能性を見出す。

2 . (3) 既設 PVS にも導入可能な PVS の電気安全システムの開発

PVS の故障形態は様々であるが、太陽電池が発電不能に陥ることは稀であり、故障や災害時には常に感電事故のリスクがある。本研究では既存のストリングインバータ方式の PVS にも導入でき、災害や内部故障にも対応可能な感電事故防止システムを開発した。

2 . (4) 故障や経年劣化した PVS の補修と長期運用に関する技術の検討

PVS は急速に普及したと同時に家庭用 PVS などは固定価格買取期間が終了した設備も徐々に現れてきた。今後迎える PVS の大量廃棄時代を見据えていかに長期間 PVS を安全利用し続けることができるかが大きな社会的課題となる。そこで、経年劣化やトラブルに見舞われた PV モジュールの修繕と再利用に伴う安全性の検証を行った。

3 . 研究の方法

3 . (1) バイパスダイオード(BPD)の耐久性向上に関する研究

PVS が焼損に至る故障リスクの 1 つである BPD 故障の対策を目的として、本研究では BPD の故障機構の解明と耐久性評価試験を行い、故障しにくい BPD について検討を行った。

3 . (1) . バイパスダイオードの耐久性評価

BPD の長期使用による耐久性を評価するため、各種バイパスダイオード材料 (PN ダイオード:PND、ショットキーバリアダイオード:SBD) を用い、BPD が長期動作した際の長期耐久性を評価した。一般的な 200 ~ 300 W 程度の出力の太陽電池モジュールの BPD に使用される定格順電流 (15 ~ 30 A) を有するダイオード $I_F = 25$ 及び 30 A を選定した。また、PN ダイオードは動作時の発熱が大きいので、 $I_F = 80 A$ のダイオードも試験対象とした。長期耐久性試験では設定電流 $I_D = 10 [A]$ を順方向に試験時間 6 h を 1 サイクルとして繰り返し評価した。

3 . (1) . バイパスダイオードの焼損機構の検討

雷などで故障した BPD の電気的特性は短絡から開放まで幅広い抵抗値になる。また、故障した BPD は焼損する個体もあれば発熱のみに止まる個体まで様々であり、故障抵抗値が焼損を左右することが予測される。そこで各種抵抗値で故障した BPD の消費電力を測定し、故障抵抗と焼損リスクについて検証した。また、雷サージにより故障した BPD の故障抵抗値と内部の状態を検証することで雷による BPD 故障リスクについても明らかにした。

3 . (2) PVS 設備内の故障検知技術の開発

3 . (2) . ランダムフォレストによる BPD 故障検知

移動する部分影が短絡故障 BPD に対応するセルストリングあるいはモジュール上にきた場合に最大電力点の電力 (P_{max}) および電流 (I_{pm}) が特徴的な変化をすることを利用した短絡故障 BPD の検出方法を開発した。太陽の運行に伴って移動する部分影と短絡故障 BPD の位置との関係に起因する P_{max} および I_{pm} の変化を、機械学習 (ランダムフォレスト) により検出する。

3 . (2) . BPD 故障診断 CPS (cyber physical system) モデル化

これまで我々は F.F. などを用いた故障の有無と位置を診断する方法を提案し、15cm 角のセルサイズの段ボール板の陰を一定方向に移動する場合の電圧の時間変化により BPD の開放故障が

検出可能であることを確認した。ただし実用化のためには、実験での再現が難しいあらゆる条件での確認が必要であった。そこで、あらゆる条件での BPD 故障の診断方法を開発し評価するために、あらゆる条件を再現できる CPS モデルを提案した。これまで、あらゆる条件の中で特に重要な 故障特性再現、太陽電池(PV)アレイ条件再現、陰条件再現、MPPT 再現の 4 条件の内、故障特性再現、PV アレイ条件再現まで提案しており、本研究では 陰条件再現、MPPT 再現を行った。

3.(2). ロジスティック回帰分析による異常検知

太陽光発電システム (PVS) の安全性向上を目的として、機械学習を用いた異常検出を実施した。モジュール 1 枚当たり (145W, 19.9V, 7.29A), スtring 当たり 15 モジュール, 20 String のシステムのうち 2 String を取り上げて評価した。検知対象は BPD 短絡故障などクラスタ脱落とした。ここで、故障が発生しうるモジュールを 4 つ設定した。このとき教師データは、故障が存在するデータと故障が存在しないデータセット数は、それぞれ実測値 4770 セット, シミュレーション値 489 を用意した。実測値は 2022/11/3 の測定結果を用いた。シミュレーションを用いて加えたデータセットは、日射量 0 ~ 1000 W/m² となるように一様乱数で与えた。テストデータは 4834 セット, 正常・異常のデータ数の比は 1 : 1 とした。

図 1 にロジスティック回帰分析による異常検出方法の手順を示す。データセットは、実測データと計算機シミュレーション (PSIM) による疑似データを用いた。異常判定は(1.1)式で定義した。 p は故障存在確率, x_1 は String の出力 P [W], x_2 は日射 J [W/m²] である。 w_0 は切片, w_j および w_p はそれぞれの変数に係る重みである。本研究では、説明変数として対象とする String の日射量, 発電電力を用いた。正常時は 0, 異常時は 1, として回帰分析により重み $w_0 \sim w_j$ を学習させ、テストデータを用いて(1.1)式を計算することで故障確率を推定した。

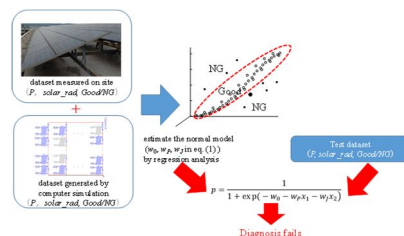


図 1 ロジスティック回帰を用いた異常検出方法

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-w_0 - w_p x_1 - w_j x_2)} \quad (1.1)$$

3.(2). アーク検知

PVS の直流回路でアークが発生した場合、アークによる過渡的な電流変化が観測される。そこで、本研究では PVS の出力を再現可能な模擬電源を用いて直流短絡アークが発生した際のアーク電流を CT センサにより測定した。同時に放電発生源から 0.3m 離れたケーブルに AE センサを設置してアーク発生による音響信号の特性を評価した。

3.(3) 既設 PVS にも導入可能な PVS の電気安全システムの開発

提案する PVS の遮断技術 (ラピッドシャットダウンシステム: RSS) は火災等の非常時に外部信号により PV モジュール解列用 a 接点リレー及び c 接点リレーを用い、各 PV モジュールの接続を解列し、非常時に PVS の回路の電位を無電圧化させることを実現する構造とした。また、火災時など高温時は自動的に RSS が自動動作する構造とし、災害停電時には自立運転にも対応できるようにした。本実験では PV モジュールの I-V を再現する模擬電源(日本カーネルシステム(株), MEP12281)と電子負荷装置(ITECH, IT8514B+)により PVS の運転状態を再現した。

3.(4) 故障や経年劣化した PVS の補修と長期運用に関する技術の検討

大島商船には単結晶 Si 型の PV モジュール 300 枚, 40kW のアレイが設置されていた。しかし、BPD 開放故障やクラスタ脱落などの不具合が発生し、不具合発生 PV モジュールを撤去して運用再開した。そこで不具合で撤去した PV モジュールの不良箇所特定及び修繕を行った。不具合 PV モジュールの多くはバスバー電極接合部の導通不良が多く、モジュール背面のバックシートを削り取り導通不良箇所の電気接触回復を図った。BPD が開放故障した PV モジュールは BPD 換装を行い再使用可能か評価した。

4. 研究成果

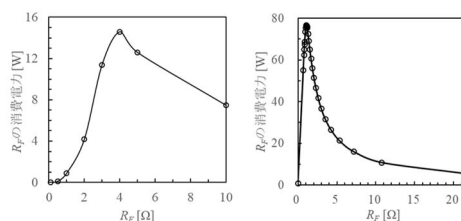
4.(1) バイパスダイオード(BPD)の耐久性向上に関する研究

4.(1). BPD の耐久性評価

各ダイオードの動作温度は PND ($I_F = 30$ A) が 約 250 °C, PND ($I_F = 80$ A) は 約 175 °C, Si-SBD ($I_F = 30$ A) は 約 140 °C, Si-SBD ($I_F = 25$ A) は 約 110 °C であった。Si-SBD に比べて順方向電圧降下 V_F の高い PND の方が動作温度は高くなった。Si-SBD ($I_F = 30$ A・ $I_F = 25$ A) 及び PND ($I_F = 80$ A) の試験時間はそれぞれ、1301 h 及び 1635 h, 及び 1638 h が経過したが未だ故障には至っていない。放熱板サイズが 50 × 50 mm² では動作温度が 130~180 °C 程度, 70 × 70 mm² では 110~150 °C 程度となり、動作温度は大きく低下した。また、SiC-SBD は発熱による故障が頻発したため放熱板による放熱対策を施した。その結果、SiC-SBD (放熱板 50×50 mm²)・(放熱板 70×70 mm²) いずれも試験時間が 897 h 及び 902 h 経過した現在も故障には至っていないため、放熱対策は BPD の耐久性向上に重要な役割を果たすことが分かった。

4.(1). BPD の焼損機構の検討

図 2 に各故障抵抗 R_F で BPD が故障した際に模



(a) Pmax の R_F の消費電力 (b) 負荷解列時の R_F の消費電力
図 2 各 R_F における故障模擬 BPD の消費電力

擬 PV モジュールが最大電力点で動作した際に R_F で消費する電力を示す。同図(a)より、 R_F は 4Ω 付近で最大となった。また、負荷開放時は R_F が 1Ω 付近で最大となり、その最大電力値は 76.6 W であった。いずれにおいても R_F が $1\text{-}10 \Omega$ 付近で故障すると発熱・焼損のリスクが高くなることが分かった。特に負荷開放時は負荷有の状況に比べて故障 BPD の消費電力は大きくなるため、点検や修繕に伴う負荷開放の際は注意が必要である。なお、この傾向は PV モジュールの開放電圧 ($V_{oc} = 24\text{-}36 \text{ V}$)、短絡電流 ($I_{sc} = 6\text{-}8 \text{ A}$)、曲線因子 ($F.F. = 0.6\text{-}0.8$) が変化しても大きく変わらない。また、BPD への雷サージ印加試験により、雷サージによる BPD の故障抵抗値の検証を行った結果、電荷量の低いサージで故障した BPD ほど焼損のリスクの高い故障抵抗値になることが分かった。

4.(2) PVS 設備内の故障検知技術の開発

4.(2). ランダムフォレストによる BPD 故障検知

短絡故障 BPD を機械学習で検出することを試みた。本研究では機械学習モデルとしてランダムフォレストを用いた。学習に用いる特徴量は、 P_{max} 、 I_{pm} 及び日向部の日射強度かとした。図 3 に、機械学習によって得られた異常スコアを示す。図中のハッチング部は、短絡故障 BPD を備えたモジュール上に部分影がある時間帯を示している。同図より故障部に部分影が生じた場合の異常スコアはそれ以外の場合より明らかに高いことがわかる。しかし、故障部に部分影が生じていても異常スコアが低い場合や、健全部の部分影においても異常スコアが高い場合（偽陽性、誤報）があることがわかる。故障の有無を判定するしきい値は、適合率と再現率の積に基づき 0.48 とした。故障判定のしきい値を 0.48 とした故障判定を行った結果を表 1 に示す。同表では、故障がある場合「陽性」、故障がない場合を「陰性」と表現した。しきい値を 0.48 とした場合の適合率は 85.7% 、再現率は 78.9% であった。再現率はやや低い。安全性向上の観点からは誤報よりも見逃しを減らすことが重要であるため、十分な結果といえる。以上、機械学習を用いて太陽の運行に伴い移動する部分影を用いた BPD 故障検出が可能であることを明らかにできた。

4.(2). BPD 故障診断 CPS(cyber physical system)モデル化

故障特性再現として、図 4 に 3 直列モジュール時の BPD 正常時と故障時の実験とシミュレーション結果の比較を示す。PV アレイ条件再現として、図 5 にモジュールを 2 直列、3 直列、2 並列、3 並列に接続したときの実験とシミュレーション結果の比較を示す。この結果より、直列数を n に設定すると電圧が n 倍になり、並列数を m に設定すると m 倍に変化する。陰条件再現として、図 6 に 1 セル分のダンボール板の部分陰を移動させた時のシミュレーションと実験の比較波形を示す。この結果から、部分陰を想定したシミュレーション波形を得られることが確認できた。実験において、雲などにより日射量に変動があるため、移動中に電流が大きく変化しているが、シミュレーションでは短絡電流の変化は考慮していないので一定である点は異なる。MPPT 再現として実験とシミュレーションを比較した電力変化を図 7 に示す。シミュレーションは一定の電力変動に対し、実験では電力変動にばらつきがあるのは日射量の変動によるものであり MPPT を再現できたと言える。

故障診断方法を効率化するための CPS モデルを提案し、LUT を用いた CPS モデルの作成方法を示し、BPD 開放故障 PVS の 4 条件（故障特性、PV 接続条件、部分陰条件、MPPT）の I-V 特性を再現する CPS モデルを提案した。さらに、実験とシミュレーションの比較を行い、実験結果とよく近似した結果が得られ、CPS モデルの有用性を確認するできた。

4.(2). ロジスティック回帰分析による出力異常検知

追加のセンサや高性能なマイコン等を必要としにくいロジスティック回帰分析による異常検出法を提案し、実機データによる検証から、提案手法の有効性を明らかにすることを目的とした。

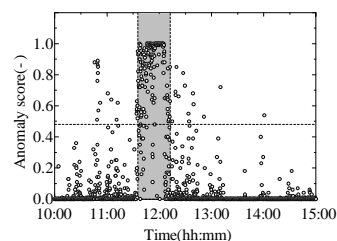


図 3 部分影の移動に伴う異常スコアの変化

表 1 故障判定のしきい値を 0.48 とした場合の混同行列

		実際	
		陽性	陰性
判定	陽性	180	30
	陰性	48	1666

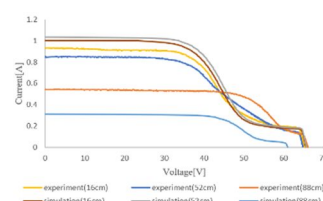


図 4 正常・開放故障 BPD を抱えた PV モジュールの I-V 特性の比較

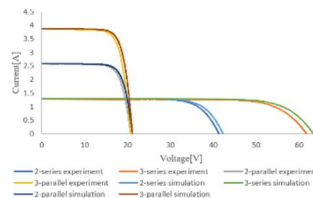


図 5 2-3 直列及び 2-3 並列接続した PV モジュールの I-V 特性の実測値との比較

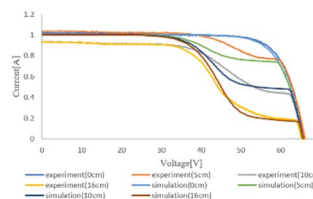


図 6 各遮光状況における PV モジュールの I-V 特性の実測値との比較

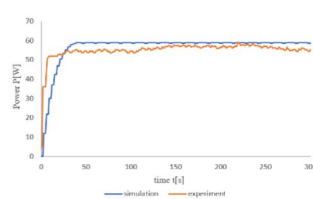


図 7 動作電力の実測とシミュレーションの比較

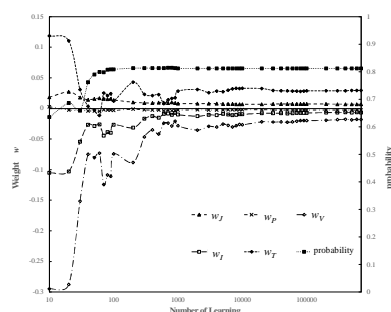


図 8 シミュレーションデータのみを学習させたロジスティック回帰による機械学習の過程

シミュレーションデータのみ学習させたロジスティクス回帰による機械学習の過程を図 8 に示す。学習に用いたデータは全て計算機シミュレーションで取得した。さらに、学習データとして、ストリング電圧、電流、温度(25°C一定)を学習させた。学習回数は 10-10000 回のときの診断精度を示す。その結果、概ね 100 回の学習で診断精度が 81.2% で飽和することがわかる。

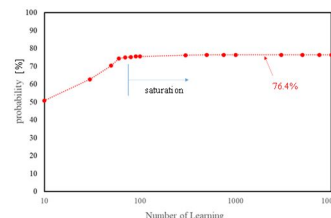


図 9 実機データを学習させたロジスティクス回帰による機械学習の過程

図 9 に実機データを学習させたロジスティクス回帰による機械学習過程を示す。約 100 回の学習によりストリング断線を 76.4% で判別できることがわかった。この結果は、実測データを使わない場合と同様の学習の傾向であり、診断精度は 4.8% 低下した。参考までに実機データを学習させた SVM(Support Vector Machine)による機械学習を実施したところ、約 10000 回の学習によりストリング断線を 92.4% で判別できることが分かった。従って、ロジスティクス回帰による機械学習は SVM より診断精度が低いものの 70% 以上の断線異常の検知が可能なおうえ、SVM より学習回数を大幅に少なくても機能する軽量異常検知法として十分有効と考える。

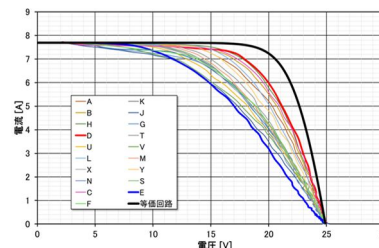


図 10 修繕した PV モジュールの I-V 特性

4.(2). アーク検知

PVS 内でアークが発生すると過渡的な動作電流の変化が生じる。同時にアーク発生により音響波も発生するため、前述信号をアーク発生検知に用いる。アーク検知に向けて直流アークにおける放電電流波形と音響信号(AE 信号)の特性を評価した。アークの発生は針対針電極を用い、PVS 出力を模擬する電源($V_{oc}=200V$, $I_{sc}=10A$)を用いた。放電電流は CT センサ、音響信号は放電発生源から 0.3m 離れた PV 用ケーブルに設置した AE センサにより評価した。その結果、直流アークによる電流は波高値約 100A のパルス電流(パルス幅約 60 μ s)が測定された。また、直流アークでは約 10MHz 近傍の音響信号を含むことが分かった。

4.(3) 既設 PVS にも導入可能な電気安全システムの開発

提案する RSS の試作と繰返し動作試験を行った。提案システムは、1s 以内に RSS が電流を遮断可能であることを確認した。したがって、提案する RSS が NEC690.10 規定を満たすことを確認できた。さらに、蓄電池を用いることで商用電源が失われた際の自立運転に移行することができ、災害時にも使用し続けられるシステムであることを実証できた。

4.(4) 故障や経年劣化した PVS の補修と長期運用に関する技術の検討

図 10 は不具合 PV モジュールの修繕後の I-V 特性である。日射量と温度については測定条件が異なるため、ソフトウェア上で 1000W/m², 25°C に補正した。等価回路の I-V 特性が PV モジュールの定格出力であると仮定した場合、修繕した PV モジュールの発電性能は定格に対して 61.4~86.4% が得られることが分かった。また、BPD を換装した PV モジュールを含むすべての PV モジュールを市販の計測器(BDC15310, IR4055)を用いてバイパス回路の健全性及び絶縁抵抗を確認した。その結果、修繕した PV モジュールのほとんどに問題はなく、一部(2枚のモジュール)でバイパス回路異常が確認された。この異常の原因が解決できておらず、更なる検討を要する。PV モジュールについては、経年劣化による発電性能の低下はやむを得ないが、電路に不具合が発生しにくい構造、バイパス回路を健全に保つための BPD の選定、接続箱内の放熱などにも細心の注意が必要であると考えられる。

4.(5) 成果の総括

PVS の安全性向上には、故障しにくい PVS の構造設計、故障や劣化を早期検知する技術、故障しても安全な PVS を維持可能な安全システムの 3 段階の階層での安全対策が必要である。本研究では各階層に対応する研究を展開し、PVS の更なる安全性向上を図った。

故障しにくい PVS の構造設計では、PV モジュール内の BPD の雷や動作耐久性について明らかにするとともに、BPD の故障状態と焼損リスクの関係について明らかにすることができた。

故障や劣化を早期検知する技術では、機械学習や CPS を用いて焼損リスクのある BPD 故障の検知やストリング断線故障はロジスティクス回帰を用いることで異常を検知することが可能であることを示した。また、設備内のアークの特性評価を行い PVS の動作電圧電流や音響信号からの検知の可能性を示すことができた。

故障しても安全な PVS を維持可能な安全システム技術では、メカニカルリレー式の PVS 遮断技術について開発を行い、実際の PVS にも適用可能であることを検証できた。また、長期運用後の不具合の生じた PVS を安全に使用するためのリユース技術についても検討できた。

上記の取り組みにより、近年各種災害や故障などをきっかけに注目されている PVS の安全性向上に寄与することができた。例えば、焼損事故が問題視される PV モジュール内の BPD 故障は、我々の研究の取り組みにより広く認知され、その対策方法について発展させることができた。RSS 技術においても国内において研究開発を行う唯一の学術機関として研究開発に取り組み、その実用性を検証することができている。本取り組みの中で得られた成果は各種学術団体から表彰も受け(日本太陽エネルギー学会論文賞 https://doi.org/10.24632/jses.49.1_45, 電気設備学会学術奨励賞 https://doi.org/10.14936/tieiej.42.3_16), 我が国の学術の発展、とりわけ太陽光発電の安全に関する学問領域の発展に寄与することができたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hamada Toshiyuki, Nanno Ikuo, Ishikura Norio, Fujii Masayuki, Oke Shinichiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Breakdown Characteristics of Schottky Barrier Diodes Used as Bypass Diodes in Photovoltaic Modules under Lightning Surges	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 7792 ~ 7792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en16237792	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hamada Toshiyuki, Azuma Tomoki, Nanno Ikuo, Ishikura Norio, Fujii Masayuki, Oke Shinichiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Impact of Bypass Diode Fault Resistance Values on Burnout in Bypass Diode Failures in Simulated Photovoltaic Modules with Various Output Parameters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 5879 ~ 5879
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en16165879	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Salu Naomi Urai, Oke Shinichiro, Ohtake Hideaki	4. 巻 214
2. 論文標題 Impact of overloading of photovoltaic arrays on the evaluation of photovoltaic power generation forecasts	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electric Power Systems Research	6. 最初と最後の頁 108930 ~ 108930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsr.2022.108930	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 濱田 俊之、東 知希、南野 郁夫、藤井 雅之、石倉 規雄、桶 真一郎	4. 巻 42
2. 論文標題 太陽電池モジュール内のバイパスダイオードの故障特性が焼損に与える影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気設備学会 論文誌	6. 最初と最後の頁 16 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14936/tieiej.42.3_16	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 河村 龍太、南野 郁夫、村井 和弥、中村 徹哉	4. 巻 49
2. 論文標題 太陽電池における熱暴走現象のシャントスポット径収縮停止メカニズム	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 太陽エネルギー	6. 最初と最後の頁 45 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24632/jses.49.1_45	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 河崎 巧真、山本 稜之、和木 大祐、濱田 俊之、南野 郁夫	4. 巻 47
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 太陽エネルギー	6. 最初と最後の頁 69 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24632/jses.47.6_69	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 K Yamamoto, I Nanno, J Murakami, T Hamada, M Fujii, T Hirata, S Oke, and N Ishikura	4. 巻 -
2. 論文標題 Proposal of Reproduced I-V Characteristics of aPhotovoltaic System Linearization Method to Suppress Vibration of FB Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th International Symposium on Solar Energy and Efficient Energy Usage (SOLARIS2021)	6. 最初と最後の頁 1-5
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 無
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 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-48)	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20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 T. Azuma, T. Hamada, I. Nanno, M. Fujii, N. Ishikura, S Oke
2. 発表標題 Impact of bypass diode fault resistance on burnout in photovoltaic modules with different fill factors
3. 学会等名 International Symposium on High Voltage Engineering (ISH2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ibuki Kitamura, Toshiyuki Hamada, Ikuo Nanno, Norio Ishikura, Masayuki Fujii, Shinichiro Oke
2. 発表標題 Numerical Simulation of the Bypass Diode Failure Resistance and Those Power Consumption in a Photovoltaic Solar Module with Failed Bypass Diode
3. 学会等名 the 41st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 石倉 規雄, 佐々木 響希, 齋木 翼, 藤井 雅之, 桶 真一郎, 南野 郁夫, 濱田 俊之
2. 発表標題 クラスタ故障を含むストリングの異常を検出するロジスティック回帰を用いた故障検出の実機検証
3. 学会等名 2023年度 日本太陽エネルギー学会 研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桶真一郎, 澤田直弥, 平田航, 濱田俊之, 南野郁夫, 石倉規雄, 藤井雅之
2. 発表標題 部分影が生じた過積載太陽光発電システムにおけるI-V特性と動作点との関係
3. 学会等名 2023年度 日本太陽エネルギー学会 研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下諄, 桶真一郎, 大竹秀明
2. 発表標題 太陽光発電システムにおける過積載の増加が広域の太陽光発電電力予測に及ぼす影響
3. 学会等名 令和5年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平田航, 澤田直弥, 桶真一郎, 南野郁夫, 藤井雅之, 石倉規雄, 濱田俊之
2. 発表標題 部分影を用いた短絡故障バイパスダイオードの検出における機械学習の適用
3. 学会等名 令和5年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤井 雅之, 平田 拓也, 岡村 裕太, 南野 郁夫, 濱田 俊之, 桶 真一郎, 石倉 規雄
2. 発表標題 PVモジュールの修繕とI-V特性による評価
3. 学会等名 2023年度(第74回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平田航, 祐森 柁, 桶真一郎, 濱田俊之, 南野郁夫, 藤井雅之, 石倉規雄
2. 発表標題 部分影の移動に伴う動作点の変化を用いた短絡故障バイパスダイオードの検出
3. 学会等名 日本太陽エネルギー学会講演論文集2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平田航, 桶真一郎, 南野郁夫, 藤井雅之, 石倉規雄, 濱田俊之
2. 発表標題 部分影を利用した短絡故障バイパスダイオード検出手法
3. 学会等名 令和4年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井雅之, 平田拓也, 岡村裕太, 南野郁夫, 濱田俊之, 桶真一郎, 石倉規雄
2. 発表標題 P Vモジュールの修復と発電特性の評価
3. 学会等名 2022年度(第73回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷戸駿介, 山本薫平, 南野郁夫, 濱田俊之, 藤井雅之, 平田拓也, 桶真一郎, 石倉規雄
2. 発表標題 BPD開放故障PVSの4条件のI-V特性を再現するCPSモデルの提案
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門(D部門)大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東知希, 濱田俊之, 南野郁夫, 藤井雅之, 平田拓也, 桶真一郎, 石倉規雄
2. 発表標題 太陽電池モジュールのBPD故障抵抗値と発熱の関係に関する実験的検討
3. 学会等名 2022年(第40回)電気設備学会全国大会講演募集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Azuma, Toshiyuki Hamada, Ikuo Nanno, Masayuki Fujii, Norio Ishikura and Shinichiro Oke
2. 発表標題 STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN POWER CONSUMPTION AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A FAILED BPD DURING LOAD OPERATION OF A PHOTOVOLTAIC MODULE WITH BYPASS DIODE FAILURE
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2022 International Conference(GRE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平田航, 桶真一郎, 南野郁夫, 濱田俊之, 藤井雅之, 石倉規雄
2. 発表標題 短絡故障バイパスダイオードを内包した太陽電池アレイのI-V特性
3. 学会等名 2021 (令和3) 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸田皓太, 宮邊澗樹, 桶真一郎, 山田昇
2. 発表標題 マイクロCPV+モジュールと追尾平板太陽電池のフィールド試験による評価
3. 学会等名 2021 (令和3) 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村井和弥, 野坂龍之介, 南野郁夫, 中村徹哉
2. 発表標題 電極抵抗パラメータを組み込んだ宇宙用太陽電池の熱暴走抑制制御シミュレーション
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石倉規雄, 本池竜也, 南野郁夫, 桶真一郎, 藤井雅之, 平田航, 濱田俊之
2. 発表標題 発電電圧の変化量による機械学習を用いたホットスポット発生の判定方法
3. 学会等名 2021 (令和3) 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本池竜也, 石倉規雄
2. 発表標題 太陽光発電システムのロジスティック回帰による 機械学習を用いた異常検出
3. 学会等名 第27回 高専シンポジウムオンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Okamura, R. Michida, T. Hirata, M. Fujii, I. Nanno, T. Hamada, S. Oke, N. Ishikura
2. 発表標題 A Study on Continuous Monitoring and Fault Detection of Photovoltaic Modules
3. 学会等名 31st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-31) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東知希, 濱田俊之, 南野郁夫, 藤井雅之, 平田拓也, 桶真一郎, 石倉規雄
2. 発表標題 太陽電池モジュールのBPD故障においてBPDの故障抵抗値が焼損リスクに与える影響
3. 学会等名 令和3年度電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021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
研究分担者	桶 真一郎 (Oke Shinichiro) (20362329)	津山工業高等専門学校・総合理工学科・教授 (55301)	
研究分担者	石倉 規雄 (Ishikura Norio) (20713936)	米子工業高等専門学校・総合工学科・准教授 (55101)	
研究分担者	南野 郁夫 (Nanno Ikuo) (40647723)	宇部工業高等専門学校・機械工学科・嘱託教授 (55501)	
研究分担者	藤井 雅之 (Fujii Masayuki) (70270337)	大島商船高等専門学校・電子機械工学科・教授 (55502)	

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
---------	---------