

報 文 1

# 太陽光発電システムの直流電気安全技術

中央技術研究所 システム研究所 システム実証グループ いしい たかふみ  
石井 隆文



## 1. はじめに

太陽光発電システム (Photovoltaic system, 以下 PVS) に起因する災害に関し、欧米では、火災の実例報告・原因解析・対策検討<sup>1~6)</sup>、PVS の直流部分に係る基標準の改定<sup>7)</sup>、火災予防・消防隊員の感電防止のガイドライン策定<sup>8,9)</sup>等、検討と対策が進められている。国内でも、PVS の導入量は急速に伸長しており (図 1)、対策が急がれる。資源エネルギー庁が PVS の電気的安全性に関するガイドライン作成に着手し<sup>10)</sup>、東京消防庁が火災危険および消防隊員感電への留意点を公表する<sup>11)</sup>等、PVS の直流電気安全の問題は行政にも認識されつつある。

本稿は、PVS の電気的不具合を概観し、火災へと遷移しうる重大な根源事象として、「地絡」「バイパス回路開放」「アーク」の 3 点を挙げ、さらにこれら 3 点について次の (1) ~ (4) を紹介し、PVS 火災の未然防止に向けた技術戦略を提示する。

- (1) これらの根源事象が火災に遷移する機構
- (2) 火災遷移を食い止めるための事故遮断条件
- (3) 対策装置の試作と実証試験
- (4) その他の考慮事項

PVS の安全対策としては、電気事故への対策だけでなく、風によるモジュール飛散やアレイ倒壊、氷雪によるモジュールやアレイの損壊等に注意を払い、法令要件を満たすことが最低限必須である<sup>25)</sup>。

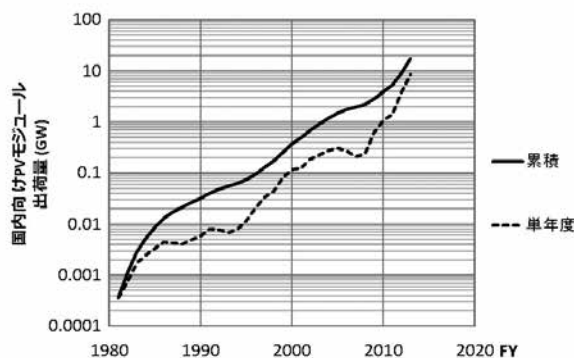


図 1 国内向け PV モジュール出荷量 (太陽光発電協会のデータをグラフ化)

## 2. PVS の電気故障モードと事故モード

PVS 直流電気回路を図 2 に示す。まず、パワーライン (電路) を説明する。直列接続された太陽電池セル (結晶系では 10 ~ 15cm 角、以下セル) にバイパスダイオード (以下 BPD) が並列接続され、太陽電池クラスタ (以下クラスタ) が構成される。BPD を接続しているハンダ付やリード線の開放故障は、BPD 自体の開放故障と同様の危険をもたらすので、BPD、ハンダ付およびリード線で構成される回路を、本稿ではバイパス回路 (以下 BPR) と称する。クラスタが直列接続されて太陽電池ストリング (以下ストリング) となり、ストリングが並列接続されて、太陽電池アレイ (以下アレイ) が形成される。また、電路近傍には外部保護装置が配置される。高電圧ストリングから低電圧ストリングへの逆電流防止には逆流防止ダイオードが、雷サージの過電圧を回避するためには SPD がそれぞれ設けられる。

パワーラインの次はアースである。モジュールのアルミフレーム・架台等全ての金属部は等電位化され、大地に接続される。図 2 にこの状態を、灰色の背景にて示した。これは、アースの面的展開およびパワーラインとの近傍性を示唆する。アースは電路ではない。ただし、地絡時や落雷時には、ある時は故障検出機能の一部を担い、ある時は事故電流を通じる回路と化する。

電気故障はノード接続の異常に端を発する。また、故障を事故に遷移させる事柄には、単一事象によるものと複合事象によるものとの二つがある。表 1 に、両者を比較する。本表からは、ある地絡故障が他の地絡故障と併発し複合すると、アレイ全体の大電力を熱源とする事故を生じることが判る。そこで第 3 章では、米国の地絡事故例を教訓にしつつ地絡故障への対処方針を提案する。また、同表から判るとおり、BPR の開放故障は、部分影、セル間の導通不良といった多くの事象と複合して事故の原因を形成する。この重大性にもかかわらず、現在の PVS は BPR 開放故障に対して保護手段を有していない。そこで第 4 章では、BPR 開放に対する保護手段を提案する。これらの防御壁が突破され、事故電流が発生した場合、多くはアークを伴う。そこで第 5 章ではアークの抑制方法を提案する。

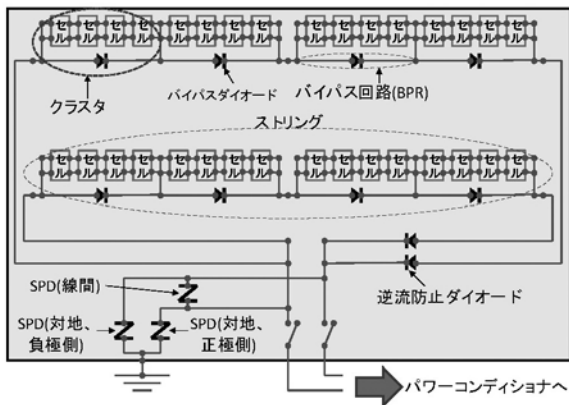


図2 PVS 直流回路の模式図

表1 PVS 直流回路の故障モードと事故の例

故障モードの例	複合事象の例	事故モード	事故規模
①地絡	他の地絡	地絡アーク	アレイ
②逆流防止ダイオードの短絡	直列数不均衡(施工エラー) 当該ストリング内多点地絡	逆方向 過電流	アレイ
③バイパス回路(BPR)開放	部分影 モジュール内の接触不良 セル割れ	直列アーク	ストリング
④モジュール内の接触不良	なし バイパス回路(BPR)の開放	直列アーク	クラスタ ストリング
⑤モジュール外の接触不良	なし	直列アーク	箇所依存
⑥対地SPDの短絡	地絡 他極対地SPDの短絡	地絡アーク	アレイ
⑦対地SPDの開放	雷サージ	過電圧焼損	雷被害
⑧極間SPDの短絡	なし	並列アーク	アレイ
⑨極間短絡	なし	並列アーク	アレイ
⑩セル割れ	なし バイパス回路(BPR)の開放	直列アーク	クラスタ ストリング

### 3. 直流地絡対策

#### 3.1 米国における直流地絡火災とその教訓

米国ではこれまで、直流地絡故障に起因するPVS火災が報告されてきた<sup>1~5)</sup>。B.Brooks氏は、Bakersfield火災(2008年)およびMount Holly火災(2011年)について、その発生機構が、以下の通りであることを明らかにしている<sup>2,3)</sup>。

米国のPVS直流回路は一般に、交流系統と絶縁され、ヒューズを介して一線接地される(図3)。図中においてGrounding Conductorは、架台を始めとする露出導電性部分とそれを大地に接続するアース線である。地絡故障時にはヒューズが溶断することで事故電流が遮断され、地絡が検出される。

しかし、上記二件のPVSでは、図4の地絡検出不感帯により、太陽電池の接地極側で発生した第1地絡故障

(以後第1故障)が検出されずに運転が継続した。その後、第2故障が発生し大地への帰路電流を生じた(図5)。

ここに至ってヒューズが溶断し、パワーコンディショナ(PCS)が停止しても、第1故障点~Grounding Conductor~第2故障点の帰路を遮断できないため、日射の限り事故が継続した。交流電気設備の場合は、帰路を遮断できなくても、系統からの解列により無電圧化され、事故が止む。他方、PVSの直流回路では第2故障によって一旦帰路が形成されると、遮断はおろか火災への事故拡大を防ぐことも困難になる。従って、事故拡大を防ぐには、第1故障(図4)の段階で地絡を検出・除去し、第2故障に至らしめないことが必要である。

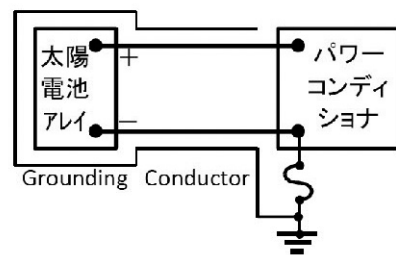


図3 負極接地 PV システム(DC-TN系)

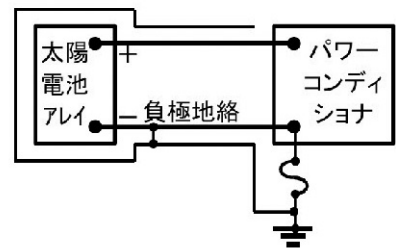


図4 負極接地 PV システムにおける負極地絡(故障)

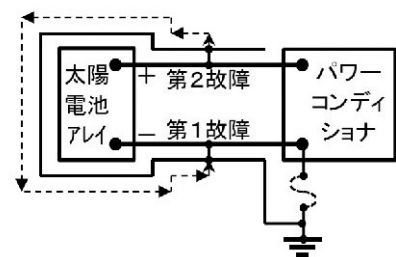


図5 負極接地 PV システムにおける両極地絡(事故)

#### 3.2 直流地絡保護のあり方(地絡検出の要件)

国内PVSにも、地絡検出に不感帯があることが、矢元修氏<sup>13)</sup>および筆者ら<sup>14)</sup>によって報告されており、米国と同様のメカニズムによる火災の可能性はある。従って、国内PVSにおいても、第1故障の段階で地絡を検出・除去することが重要である。この目標を達するためには、以下の3属性を具備する絶縁状態監視(絶縁監視)装置を必要とする。

- (A) どの電位で地絡しても検出できる機能
  - (B) 高頻度な絶縁監視機能
  - (C) 地絡検出と同時に故障点を同定する機能(位置特定)
- 各要件について、以下説明する。

(A)：米国火災事例<sup>2,3)</sup>は、大地と等電位箇所での地絡も看過してはならないことを示した。

(B)：必要とされる絶縁監視の頻度は、以下2点から定まる。第1点目は、第1故障から第2故障までの猶予期間である。PVSにおいては、一般の電気設備(検出/解列により漏電が止まる設備)と異なり、猶予期間中に第1故障が検出・除去されなければならない。従って、人による点検が不十分なことは明らかである。

第2点目は、絶縁抵抗値の不安定性である(図6)。抵抗値が安定していれば、今日発生した絶縁低下は明日も検出できる。しかし、文献<sup>15)</sup>が示すとおり、モジュールの絶縁抵抗値は不規則に変動するため、一度の測定結果が高絶縁を示しても絶縁良好と判定することはできない。従って、第2故障発生前に第1故障を確実に検出・除去するためには、常設装置による、高頻度な(理想的な連続的な)絶縁監視を必要とする。

(C)：絶縁抵抗値の不安定性は、「地絡検出と同時の位置特定」の必要に帰結する。筆者らは、絶縁低下検出の報告を受け、後日に位置特定を試みたものの、不意の絶縁回復のため検出を失敗した経験がある。その後も絶縁低下検出/位置特定失敗は繰り返され、絶縁低下位置の特定と故障除去までには長大な時間と多大な労力を要した。このPVSは大規模なものではなかったが、もしもそのPVSが大規模なものであれば、事故点の特定と除去は困難となり、充電されたアレイからの感電・火災危険と、度重なるシステム停止による発電量低下に悩まされ続けたに違いない。

「地絡検出と同時の位置特定」に失敗した代償は、筆者の場合は時間と労力で済んだ。一方、米国 Sacramento のPVSでは、1984年の運用開始時に第1故障を検出した後も、その位置を特定できぬままに第2故障が生じ、火災に至っている<sup>1)</sup>。位置特定の重要性を、改めて強調する次第である。

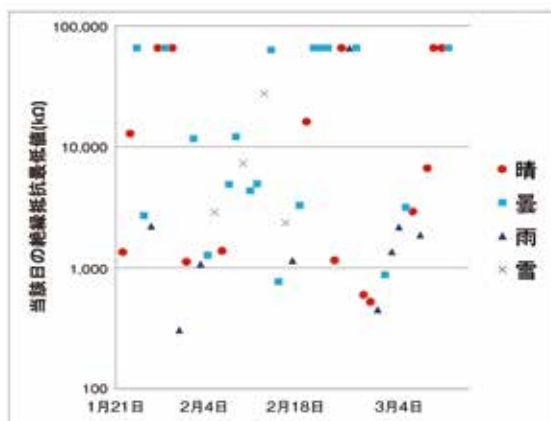


図6 絶縁抵抗(一日での最低値)の変化

### 3.3 地絡検出装置の試作および実証

上記(A)(C)の成否は、地絡を検出する方式(地絡検出方式)によって定まる。表2に、各種の地絡検出方式と、要件(A)(C)の成否を示す。同表からは、⑦抵抗接地極切替方式⑨対地電位切替方式の2者が、(A)(C)を両立させることがわかる。この他に、⑩交流(またはパルス)電圧印可方式において、電流のDC成分を測定することで地絡位置の電位を特定できる可能性があるが、具体的な検討例は知られていない。

PVSは巨大な直並列セルネットワークから構成される(図2)。上記方式によって得られる位置情報は、地絡箇所のストリング内における位置、換言すれば図2における横方向の位置のみである。地絡した位置を特定するためには、どのストリングが地絡しているかを識別する必要がある。そのためには、DC-ZCT(貫通型直流電流センサー)を用いて各ストリングの零相電流を測定する方法と、ストリングをアレイから順次切り離してパワーラインの対地電圧を測定する方法(マルチプレクサ法、以下MUX法)とが挙げられる。前者では、DC-ZCTのドリフトによる地絡の看過または誤検出が懸念される。これに対し、MUX法にはその懸念が無い。

そこで当社は、MUX法に上記⑦抵抗接地極切替方式を内蔵する装置を設計・試作した(写真1、図7)。本装置は、検査対象ストリングをアレイから切り離して検出装置本体に接続し、図8に示す測定を順に行う。そこで得られた電圧値から絶縁抵抗値が得られ、地絡している場合はその位置が特定される。本設計・試作は、吉富電気との共同研究として実施したものである。

次に、本試作機が地絡位置によらず絶縁抵抗値および地絡位置を判定できることを示すため、以下の実験を行った。本機をモジュール9枚のストリングに接続し、ストリングの正極、ストリングの負極、および各モジュール間に存在する10点のノードから1点を選び、0.01/0.1/1MΩの合計30通りで模擬地絡させた。本機から得られた絶縁抵抗値を図9に、判定された地絡位置を図10に示す。絶縁抵抗値と地絡位置によらず、絶縁抵抗値が正しく測定され、かつ、地絡位置を特定できており、本機によって要件(A)(C)を両立できることを確認した。

さらに模擬地絡ではなく実際の絶縁低下を観測した。すなわち、絶縁低下したモジュールを含むストリングの絶縁抵抗を、1/10min.の頻度で測定した。絶縁抵抗値は、一日のうちに大きく変動した。各日に得られた、絶縁抵抗の最低値を図6に示す。モジュールの絶縁抵抗値は不安定であることが報告されているが<sup>15)</sup>、この結果からも、そのことがうかがい知ることが出来る。本実証試験は、(独)産業技術総合研究所との共同研究として同研究所内で実施した。

以上の試作・実証試験は、絶縁状態監視の要件として掲げた前記3点について、(A)(C)を実証し、(B)の必要を示した。本技術を活用し、要件(A)(B)(C)を満たす絶縁監視装置が実用化されることを期待する。

表 2 各種直流地絡検出方式と要件

方式	①零相電流の監視	②接地箇所の監視(USA)	③減極性 DC 印加	④加極性 DC 印加	⑤無電圧化、DC 印加	⑥分圧中点を接地し監視	⑦抵抗接地極切替	⑧アレイ電位をシフトして監視	⑨対地電位を切替	⑩同相の AC 電流から計算
概念図										
検出	×	×	×	○	○	×	○	○	○	○
不感帯無し 地絡電位 判定あり	×	×	×	×	×	×	○	×	○	×



写真 1 地絡検出装置試作機

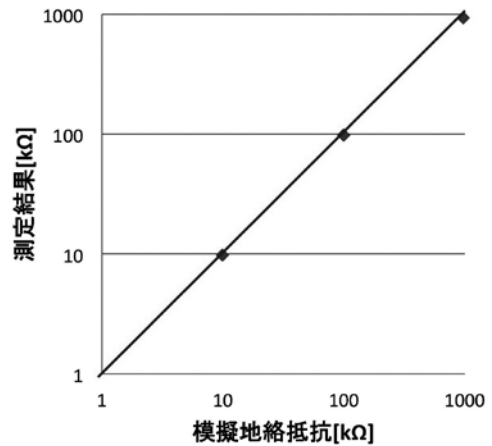


図 9 絶縁抵抗測定結果

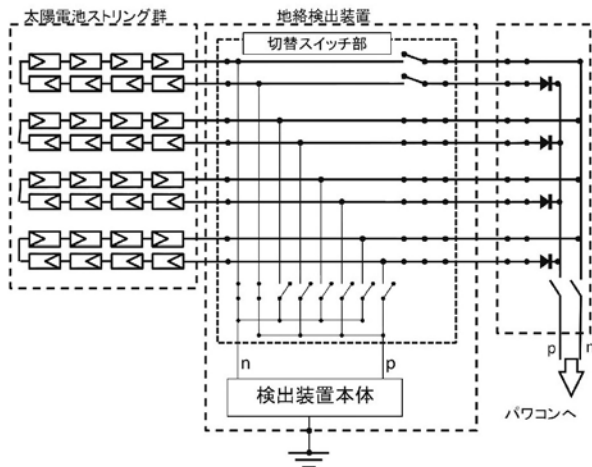


図 7 地絡検出装置を装着したシステム図

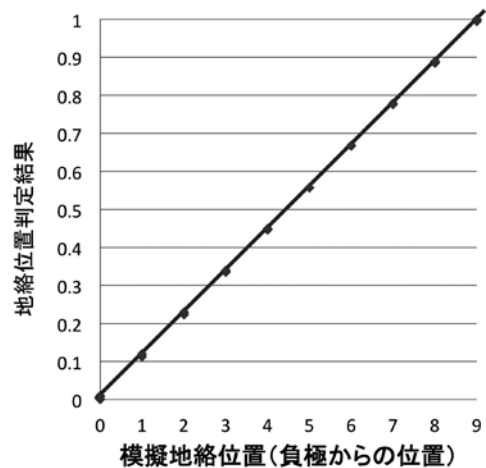


図 10 地絡位置判定結果

4. バイパス回路故障対策

4.1 バイパス回路故障の危険性

バイパス回路 (BPR) は、クラスタに逆電圧が印加されること (クラスタの正極電位が、負極電位よりも低くなること) を回避する。従って、クラスタ内の何れの箇所の電圧降下も、クラスタの開放電圧を超えない様に抑制される。しかし BPR が開放した場合はこの保護機能が失われるため、クラスタ内の導通不良部分や、日影セルの発生等によって、過度の電圧降下が生じる場合がある。これによる発熱が

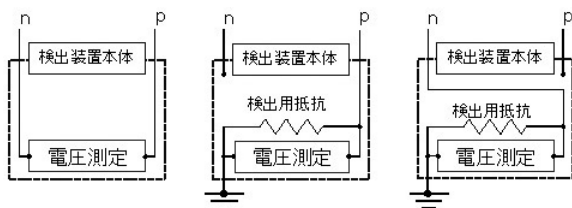


図 8 地絡検出装置の測定動作

著しい場合はモジュール焼損、ガラス割れに至り危険である。BPR が開放した時に、過大な発熱が発生する機構の詳細については、吉富氏の連載講座<sup>16)</sup>および池田氏の特集記事<sup>17)</sup>を参照されたい。

4.2 バイパス回路故障の検出法－1

BPR の開放故障検知を目的とした特許出願は複数あるが<sup>18,19)</sup>、製品は市販されていない。また、各太陽電池モジュールにアクセスして点検を行う方法が見いだされているが、<sup>20)</sup> 日常点検に適した方法とは言い難い。当社は、夜間にストリングに順方向電流（太陽電池ストリングが発電する場合と同じ方向の電流）を流し、通電に必要な電圧からBPR開放故障を検出する方法を、吉富電気と共同で開発した<sup>21)</sup>。前述の地絡検出／絶縁監視試作機を基に、定電流回路を追加することで、容易にBPR開放故障検出機能を付加することができた。図11にその回路図を示す。

健全な A 社製太陽電池モジュール 14 枚から成るストリングの極間に 11.8V を印加すると 10mA の電流を注入することができた。しかし、何れかの太陽電池モジュールの何れかの BPD を取り外すことによって、BPR を模擬開放故障させた場合は、30V 電圧以上の電圧を印加しないと電流を注入できなかった。これらの結果を表3に示す。いずれの BPR で開放故障が発生しても、電流注入に必要な電圧が明白に上昇したことから、本法によって BPR 開放故障を見出せることが判明した。

前述のとおり、地絡故障を見出した場合には、次の地絡故障が発生する前にそれを取り除く必要があることから、地絡位置を特定する必要がある。これに対して、BPR 開放故障を見出した場合は、故障ストリングを切り離して開放状態に保つことで事故を回避することが可能であり、故障ストリングの切り離しは、上記 MUX の機能を活用することで容易に実現できる。従って、この間に BPR 故障モジュールの特定・除去を行うことで、BPR 開放故障に対しては安全に対処することができると期待される。

表3 BPR 回路の健全性と10mA電流注入に要する電圧

除去した BPD の位置	10mA電流注入に要した電圧 (V)
なし	11.8
負極側モジュール No.1	34.0
負極側モジュール No.2	35.3
負極側モジュール No.3	32.7
負極から7枚目モジュール No.1	38.0
負極から7枚目モジュール No.2	40.7
負極から7枚目モジュール No.3	37.4
正極側モジュール No.1	45.3
正極側モジュール No.2	41.8
正極側モジュール No.3	43.8

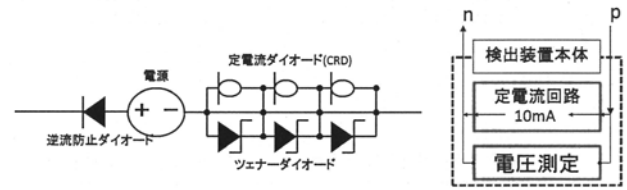


図11 BPR 開放故障検出装置 (定電流回路の回路図と、動作状況)

4.3 バイパス回路故障の検出法－2

BPR 開放故障に対しては、モジュールレベルでの対処も選択肢である。バイパス回路故障を事故に遷移させる事象は、BPDの  $V_F$  (順方向電圧) を超える逆電圧が、クラスタに対して印加されることである。この逆電圧を検知して当該太陽電池モジュールをストリングから切り離せば、電流が遮断され、事故を回避できると考えられる。このために考案した回路を図12に示す。クラスタに加えられる逆電圧の値が、BPDの順方向電圧を超えると、発熱回路に電流が流れ、その発熱によって遮断素子（この場合は熱ヒューズ）が溶断する。その結果、故障箇所への通電が遮断され、事故回避が可能と期待される。

このコンセプトを実証するため、熱ヒューズと発熱素子である抵抗を組み合わせた既存デバイス（内橋エステック製ヒュージングレジスタ BZ05-800）を使用して試験を実施した<sup>22)</sup>。図13にその試験装置の構成を示す。遮断のためのエネルギーは、図13における日向クラスタ群が発生する電力である。従って遮断の成否は、主として日向クラスタ群の発電状態によって決まる。表4に日向クラスタ群の各発電状態に対して、遮断に要した時間を示す。日向クラスタ群の発電が旺盛な場合は速やかに遮断が行われ、日向クラスタ群の発電が微弱な場合は遮断に長時間を要した。日向クラスタ群が低電圧かつ低電流である場合は遮断に至っていない。しかしこれは、低電圧のシステムが低日射で動作中の場合に相当し、元々事故発生の恐れが低いいため、特段問題にはならないと考える。本実証試験では標準品であるヒュージングレジスタを使用した。本技術を製品化する場合は、BPR 保護目的に最適化することで、性能向上と低価格化が可能と思われる、そのようなモジュールが製品化されることを期待する。

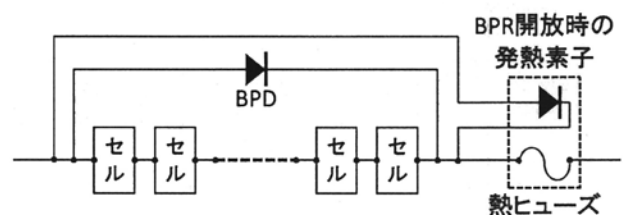


図12 熱ヒューズモジュール概念図

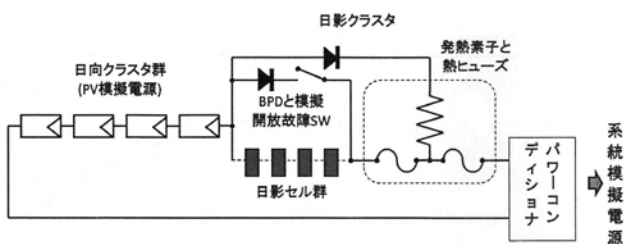


図 13 BPR開放故障対策モジュールのコンセプト実証試験装置

表 4 BPD 模擬開放故障からヒューズ溶断までに要した時間

電圧条件		日向クラスター群の最大出力動作点電圧	
		272V	136V
日向クラスター群の最大出力動作点電流	8.1A	13.3	26.4
	0.41A	324s	1800sでも遮断せず

5. 直流アーク対策

5.1 直流アークの危険とその防止

アレイは日射がある限り発電を継続するため、火災に至ると昼間の消火が困難である。また、アレイが発生する電気は直流であるため、アークを発生し易く、消弧し難い。たとえば、Mount Holly で生じたアークは、15cm もの距離を橋絡し得たため、焼損が進みアークの場所が移動しても、消弧し難かったとされる<sup>5)</sup>。

無論、計画と設計の努力によって、抑制できる事故は多い。たとえば正負極それぞれを多心線ではなく単線で配線する、SPD から出火しても外部に延焼しないよう接続箱筐体を金属製とする、といった工夫の有効性は高い。また、計画・設計された通りに PVS を構築するよう、施工・施工管理することも必要である。しかし、これら一連の努力は、一度生じたアーク事故に対しては万全の備えを提供するものでない。

アークには、建築設備の観点からは、一般的に表 5 に示した 3 種類があり、PVS においては、これらすべてが生じ得る(表 1)。そこで、まず各種アークの事例を紹介する。

表 5 アークの種類

種類	発生箇所	原因
地絡アーク	電路-大地間	電路-大地間の絶縁不良
並列アーク	電路-電路間	電路-大地間の絶縁不良
直列アーク	電路内	電路の導通, 接触不良

5.2 DC アークの事例

- (1) 地絡アーク：前述の Bakersfield、Mount Holly および Sacramento の事例は、いずれも多点地絡したことによる、地絡アーク火災である。
- (2) 並列アーク：Sacramento の PVS は、1987 年にも火災を生じている。発生箇所は直流主開閉器付近であ

り、原因は PCS 収納盤内における正負極の極間短絡であった<sup>3)</sup>。故障点とアレイの間を遮断してアークを終息させるまでの 37 分間に、設備は著しい被害を受けた。なお、本件では適切な地絡検出装置があったとしても回避不可能であった。

(3) 直列アーク：国内でも 2013 年 9 月、PVS 火災が発生している。出火場所は 1 台の接続箱である<sup>23)</sup>。本件では、監視装置が直流地絡を発報し PCS も停止していたものの、接続箱の焼損が継続し、11 台の接続箱が焼失した。事故を終息させるにあたって担当者は、アレイからの電力供給を停止させるため、スパーク発生を伴いながらの活線切断作業を敢行している。

出火の近因を地絡に求めるのは難しい。なぜならば、(a) 多点地絡の同時発生、(b) 接続箱端子での第 1 故障の検出失敗の何れかを仮定しなければならないが、どちらの仮定も蓋然性が低いからである。これらの仮定を置くよりも、並列アークまたは直列アークから出火し、その結果、地絡が発生し検出されたと考える方が、自然である。接続箱端子台の盤内配線側に、締め付け不良が見られていたことから、接触不良による直流アークが示唆される。次にこれら各種直流アークへの対処法を説明する。

5.3 アークへの対策法

Solar America Board for Codes and Standards は、Bakersfield および Mount Holly の火災に触発され、アーク検出遮断装置(以下 AFCI)を諸対策の一つに掲げた<sup>5)</sup>。また、2011 年版の National Electrical Code (以下 NEC) は、新設 PVS への AFCI 設置を義務付けた。AFCI とは、対象回路におけるアークの有無を監視し、アークを検出すると発報するとともに予め定められた動作(たとえば負荷とアレイの間の開放)を行うデバイスである。アーク有無の監視法としては、電流および電圧の時間変動を計測し、その周波数解析結果に基づいて判定する方法が実用化されているが、そのアルゴリズムは公開されていない。

しかし、前節の事例で AFCI が有効と期待されるのは、「(3) 直列アーク」のみである。「(1) 地絡アーク」では、AFCI 作動前は PCS に向かって電流が故障点に集中することによる事故拡大が懸念される。「(2) 並列アーク」では、短絡故障が、AFCI と PCS の間で発生した場合のみ有効であり、それ以外の箇所が発生した場合は事故拡大してしまう(図 14)。そこで従前から、アーク種の判別結果に応じて、負荷を開放または短絡することが提案されてきた。しかし、アーク種の判別は容易ではなく、研究はなおも完了していない<sup>12)</sup>。この他、個々のモジュールに DC/DC コンバータを実装し、アーク検出時にコンバータを停止することによってアレイをモジュール単位にまで解線する方法も検討されている。しかし、スイッチング素子の雷サージによる短絡モード故障、プリント配線板の日常高温環境下での絶縁低下が懸念される。いずれにしても、

信頼性の高いアーク終息法は未だ確立されていない。

そこで筆者らは、検出時のアーク種判別に拘泥せず、ストリングの途中を機械的の接点によって開放することを提案する(図14下段)。本法は、アーク種を問わずアーク終息の目的を達成する。

なお、絶縁不良による事故開始には、並列・地絡アーク以外に、線間短絡もあると考えられる。この場合は、線間電圧の低下を監視する方法が有用である。したがって、アーク検出装置に加えて、線間電圧の監視によって短絡を検出する装置の併用も検討に値する。

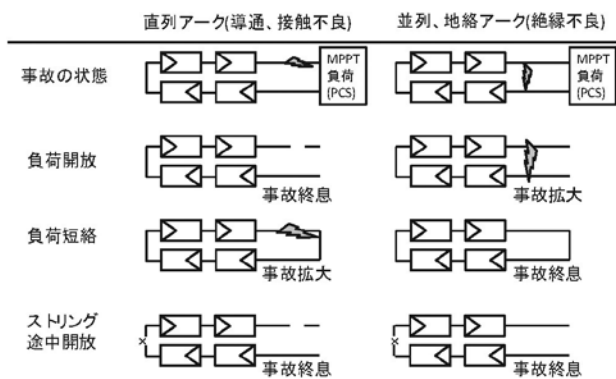


図14 事故電流停止の方法

## 6. おわりに

本稿では、PVS火災の未然防止に向けた技術戦略の一環として、直流地絡に起因する実例を通じ、以下を述べた。

- (1) 火災への遷移機構
- (2) 第1故障除去の必要
- (3) その3要件
- (4) 装置の試作およびその実証結果

また、BPR開放故障対策として、以下を説明した。

- (1) 夜間の電流注入によるバイパス開放故障の検出
- (2) BPRが開放故障した際に、安全に主回路を遮断するモジュール

さらに、PVSの直流アークについて以下を述べた。

- (1) 直流アークの難消弧性
- (2) 直流アークの実例と課題
- (3) その対処方略

直流電気安全に関して当社は、2012～2014年度、資源エネルギー庁-三菱総研委託事業「新エネルギー等共通基盤整備促進事業(テーマ名:太陽光発電システムの直流電気安全に関する基盤整備)」に参画している<sup>10)</sup>。同事業は、太陽光発電の直流電気安全性に関するガイドライン作成を目標としており、当社はその作成への協力を通して、今後の重要なエネルギー源である太陽光発電の社会的信頼性の向上に寄与していきたい。

本稿は、PVSの危険をことさらに恐れて普及拡大に水

を差すものではない。本稿に様々な観点から批判が寄せられ、それがPVの安全への関心向上と標準化に繋がりを、さらには公正な競争の土台が形成されることを切望する。

## 7. 謝辞

本稿は、電気学会誌2014年10月号に掲載されたPVSの安全に関する特集記事の一部として、筆者が寄せた原稿<sup>24)</sup>にBPR故障対策を加筆したものである。同稿の転載を快く了解頂いた電気学会に深く感謝する。

また、共同研究の成果を本稿に盛り込むことをご了解頂いた、吉富電気 吉富政宣氏および(独)産業技術総合研究所 加藤和彦氏に深く感謝する。

## — 引用文献 —

- 1) D.Collier, T. Key: Electrical fault protection for a large photovoltaic power plant inverter, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Vol.2 1035(1988).
- 2) B.Brooks: The Bakersfield fire, Solar Pro 4 (2) p62 (2011).
- 3) B.Brooks: The ground-fault protection blind spot: safety concern for larger PV systems in the U.S., Solar ABCs Report (2012).
- 4) J. Flicker, J. Johnson: Analysis of fuses for “Blind Spot” ground fault detection in photovoltaic power systems, Solar ABCs Report, (2013).
- 5) G. Ball et al: Inverter Ground-Fault Detection “Blind Spot” and Mitigation Methods, Solar ABCs Report, (2013).
- 6) Erkenntnisse zur Brandursache des “Sonnenfleck”-Solardachs in Bürstadt bekannt, BP Solar Report (2009).
- 7) NFPA National Electrical Codes, Article 690.11 (2011).
- 8) B.Brooks: “Understanding the Cal Fire Solar Photovoltaic Installation Guideline”, Solar ABCs Report (2011).
- 9) Brandesverband Solarwirtschaft: Brandschutzgerecht Planung, Errichtung und Instandhaltung von PV-Anlagen (2011).
- 10) 大関崇ら: 太陽光発電システムの直流電気安全性に関する基盤整備プロジェクトの概要 太陽/風力エネルギー講演論文 2013,p37 (2013).  
大関崇ら: 太陽光発電システムの直流電気安全性に関する基盤整備プロジェクトの概要 (2) 太陽/風力エネルギー講演論文 2014,p57 (2014).
- 11) 田村裕之: 「太陽光発電システムを設置した住宅火災と消防活動の問題点」, 第16回消防防災研究講演会資料, p81-90 (2013).

- 12) たとえば J. Johnson et. al.: Differentiating series and parallel photovoltaic arc-faults, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 38th IEEE (2012).
- 13) 矢元 修: 稚内メガソーラープロジェクト(4) - 1MW-PCS 導入等に伴う最適な設備構成について- 北海道電力 研究年報 Vol. 41, (2009).
- 14) 石井隆文: パワコン地絡検知機能のブラインド(不感帯) 日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第8回セミナー (2013).
- 15) 山口富三雄, 中村國臣: 太陽電池モジュールの屋外暴露試験における絶縁抵抗変化と環境因子の関係, 日本信頼性学会誌 24 (4), 333 (2002).
- 16) 吉富政宣: 太陽電池セルの焼損メカニズム 太陽エネルギー Vol39 (5) p73 (2013)
- 17) 池田一昭: 太陽光発電システムの直流電気事故対策-I (バイパス回路の点検) 電気学会誌 Vol134 (10) p683 (2014)
- 18) 東京理科大学 太陽電池アレイの診断方法、およびパワーコンディショナ 特許第 5403608 号
- 19) キヤノン(株) 太陽電池モジュールの検査装置ならびに検査方法 特開 2001-24204
- 20) 加藤和彦: 太陽光発電システムの不具合事例ファイル 日刊工業新聞社 (2010), p92.
- 21) 石井隆文: 太陽電池アレイの故障検知の必要性とその方法 電気学会全国大会 シンポジウム「太陽光発電システムの保安・保護に関する課題」2014年3月20日
- 22) 石井隆文: ジャンクションボックスの設計方法の考え方 日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第10回セミナー (2013).
- 23) 鈴木金秀: 「太陽光発電システムの火災・事事故例- 2. 国内事案を中心に」, 平成 25 年度 日本火災学会講演討論会, p24-31, (2014年1月24日)
- 24) 石井隆文: 太陽光発電システムの直流電気事故対策-II (地絡保護およびアーク保護) 電気学会誌 Vol. 134 (10) p688 (2014)
- 25) 電気設備の技術基準の解釈 平成 26 年 7 月 18 日改正 第 46 条第 2 項および JIS C8955 (2004).