

太陽電池ストリングにおけるアーク検出技術の開発研究

Study and development of the technic to detect the arc fault on the photovoltaic string

安藤 健志¹ 酒井 浩太² 雪田 和人³ 後藤 泰之³
 Kenji ANDO Kohta SAKAI Kazuto YUKITA Yasuyuki GOTO
 一柳 勝宏³ 依田 正之³ 宮本 淳史¹
 Katsuhiko ICHIYANAGI Masayuki YODA Atsushi MIYAMOTO

Abstract

Recently, the residential photovoltaic generation systems are equipped over 1 million in Japan. It is believed that the photovoltaic generation systems are safe and maintenance-free. But, in Europe, the fires by the arc faults of photovoltaic systems have been discussed at least 7 years ago. In Japan a few fire faults of the residential use photovoltaic systems by the photovoltaic module failures began to be reported too. Especially, the electric arc is the worst cause of the fire of photovoltaic systems. Because, the arc temperature is very high. It is over a few thousands degrees. The photovoltaic generation systems have to be kept safe. So, the fast detection and breaking the electric arc in the photovoltaic generation systems is important to be the damage smallest. In this paper, the method to detect the electric arc by using a CT, a simple amplifier, and to stop the current to the arc by breaking a relay is reported. It is low cost and very simple circuit.

キーワード：太陽電池モジュール，アーク，高周波，防火，アーク検出

Key Words : photovoltaic module, electric arc, high frequency, fire protection, arc detector

1. はじめに

1973年のオイルショック以来，エネルギー問題は国策の根幹として再認識された。これを受けて，1974年からエネルギー問題と環境問題の抜本的解決を目指して，サンシャイン計画が始まり，太陽電池，風力発電，燃料電池など再生可能エネルギーの普及拡大のため，六甲アイランドなどでの実証実験が行われる一方，普及策として補助金などが実施され，すでに40年が経つ⁽¹⁾。太陽光発電はその中心的な位置付けとしてこの国内における導入目標量を設定し，2020年に2005年度の20倍，2030年に40倍として各種施策が講じられてきた⁽²⁾。特にここ数年，補助金の見直し，全量買取制度などの効果により堅調に普及が拡大し，2012年7月には，住宅用の太陽光発電システムの設置が累計100万戸を突破し，売電事業としてのメガソーラーシステムの設置も1GWを超えているとの報告もある⁽³⁾。現在，全量買取価格の引き下げなどはあるものの，今後も太陽光発電システムの普及拡大は続くものと考えられる。太陽光発電システムは風力発電システムと比較した場合，発電機などの稼働部がなく，安全でメンテナンスフリーと言われてきた。しかし，欧米においては発電事業用のメガソーラーの火災，

家庭用の太陽電池の火災事例が多発しており，2007年には太陽電池のアーク（電弧）事故に関する国際会議がスイスで開催されている⁽⁴⁾。（本来“アーク”は“弧”という形状を指す用語であり，電気工学における放電現象としてのアークは電弧（Electric Arc）が正式名称であるが，本論文では電弧をアークと称す。）また火災事例も具体的に雑誌で紹介されている⁽⁵⁾。近年，日本でも消防関係者による，太陽電池の火災の報告が公に出つつある⁽⁶⁾。太陽電池の火災の大半はこのアークによるものと考えられる。アークの温度は1万数千℃と言われており，太陽光発電システムでアークが発生した場合，何らかのアーク検出・通電遮断機能がない場合は，日射がなくならない限りアークが継続し，被害が拡大する。太陽光発電システムにおいてはアークが発生した時点で，これを迅速に検出し，アークへの通電を遮断することが必須である。アークは広帯域の高周波を発生する特性がある。

本論文はこのアークの高周波に対してCTを用い，簡単な高周波アンプで検出し遮断する技術について開発研究を行い，アークを短時間に検出し，遮断することに成功したのでこの結果について報告する。

2. アークについて

アークは交流，直流に係わらず，電流を遮断するときとその遮断部で発生する。アークはプラズマであり，気体，液体，固体の次の4番目の体とも言われている。交流の場

*1 日東工業株式会社（〒480-1189 愛知県長久手市蟹原 2201 番地） e-mail: ke.ando@nito.co.jp

*2 愛知工業大学大学院 工学研究科 大学院生

*3 愛知工業大学 工学部 教授
 (原稿受付:2014年6月2日)

合、電圧、電流とも、ゼロ点があるため直流に比べアークは遮断しやすい。配線用の開閉器や遮断器においては、負荷電流や過負荷電流を遮断するため、アークの遮断技術は非常に重要な技術である。またアーク発生時に生ずる高周波による通信設備へのノイズという観点から、リレー接点におけるアークの研究が多数なされてきた⁽¹¹⁾。一方、電源の種類、即ち電圧源か電流源かによってもアークの遮断の良否が異なり、電流源の方が電圧源よりもアークの遮断は難しい。図1にアークの概念図と電極間の電圧分布図、陽光柱の中央部の断面図を示し、図2に図1(c)のアーク断面半径 r を規格化した、コア、外炎各部の温度分布を示す⁽¹²⁾。

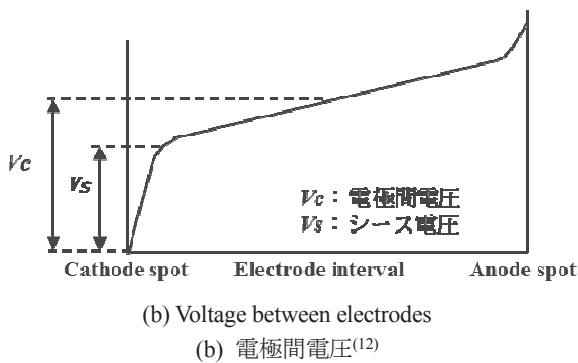
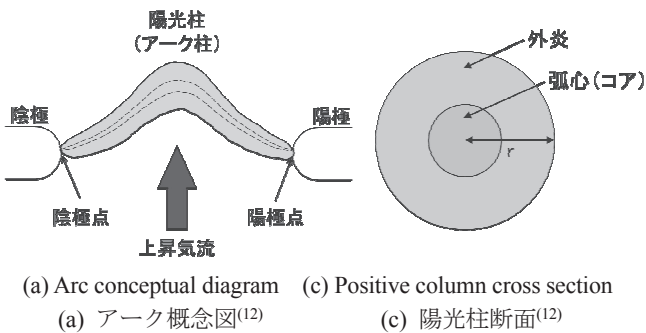
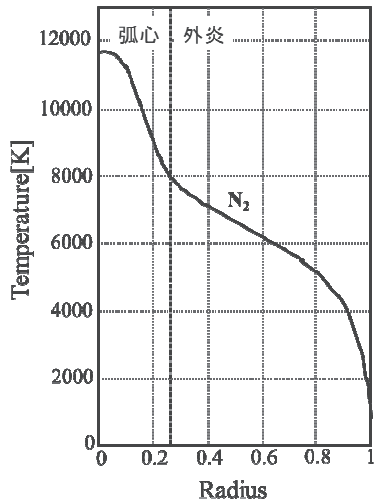


Fig.1. Structure of electric arc, voltage distribution and cross section
図1. アーク構造、電圧分布図及び断面図



アークは空気より軽いプラズマのため、その温度によって生ずる上昇気流で図1(a)に示すような弧となる。アークの殆どは陽光柱であり、断面を見た場合、温度と電流密度が極めて高いアークコア部と、温度と電流は少々小さいが化学的に活性な外炎部からなる。コア（弧心）部は電極の銅などの陽イオンからなり、この銅イオンを介して電子が活発に移動しており、図2において、コア部は約 8000～12000K を示している。外炎部においては空気の主成分である窒素が電離し、約 1000～8000K を示している。コア部では電子の移動や陽イオン自体が振動し、外炎部では電子、負極性イオンなどが衝突し、化学的な活性度が非常に高いといわれており、これらの領域から広帯域の高周波を発生する。太陽電池のアークの場合、この高周波が直流電流に重畳して伝導ノイズとして太陽電池システムの配線内に搬送されるものと考えられる。

本論文ではこの高周波の伝導ノイズに着目し、アークの発生を CT により検出遮断する装置の開発研究を行った。

3. 太陽電池システム用アーク検出遮断装置の概要

高周波は遠方界の電界による電波ノイズや、近傍界の磁界による伝導ノイズとして観測できる。今回、直流アークによって発生する近傍界の伝導ノイズを CT により高周波電圧に変換し、高周波アンプによりこの高周波電圧を直流電圧の電気信号に変換する。この信号が発生し、しきい値を超えた場合に遮断装置を作動させ、アークを遮断する。図3にアーク検出遮断装置の構成概念図を示す。

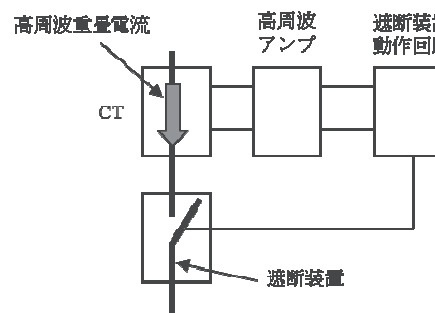


Fig.3. Arc cut-off constitution conception diagram
図3. アーク検出遮断装置構成概念図

CT は一般的な導電性ノイズ対策用、貫通型 KGS 社製フェライトコアに $\phi 0.1$ のエナメル線を 100 巻きし、高周波アンプの検波回路は普通の倍電圧整流回路であり、これに増幅回路を組み合わせたものである。CT はアーク発生時の高周波を伝導ノイズとして検出し、隣設されたストリングのアーク事故で発生する高周波による放射ノイズをアンテナとして誤検出しない。これを証明するため、アーク発生時の回路において、図4に示すように、アークが発生している回路に CT を貫通した場合(a)と、回路の脇に CT を隔離した場合(b)の、CT に発生する電圧をオシロスコープ (OSC) で計測した。ここでは後述する検出しきい値電流約 2A によるアークの放射ノイズより放射強度が強いと考えられる DC6A を定電圧源 60V と、抵抗 10 Ω の抵抗により、アークを発生させて実験を行った。

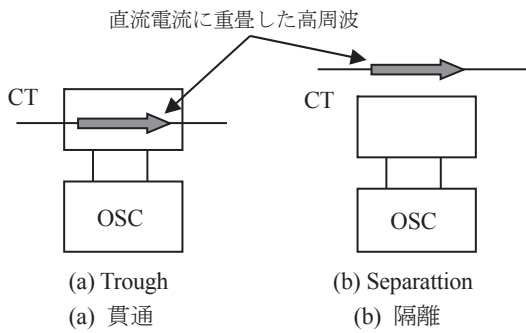
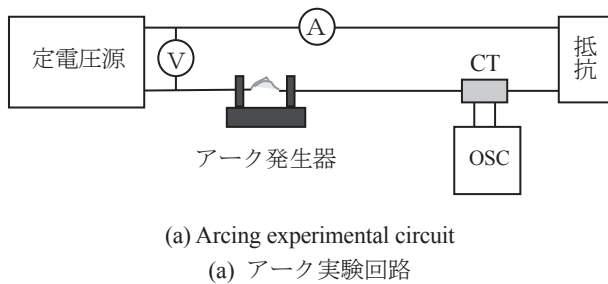
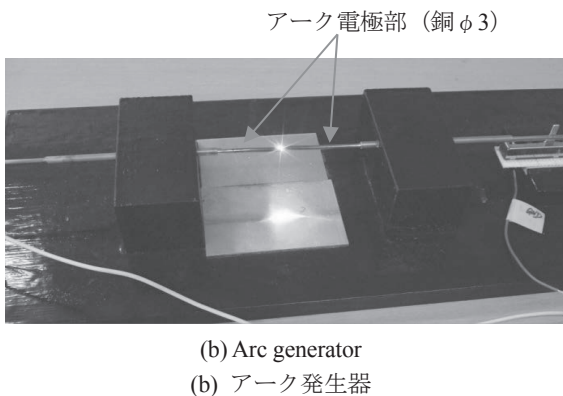


Fig.4. Confirmation of the conduction noise detection

図4. 導電ノイズ検出の確認



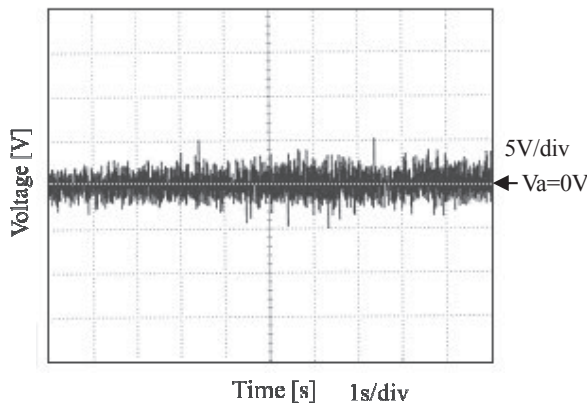
(a) Arcing experimental circuit
(a) アーク実験回路



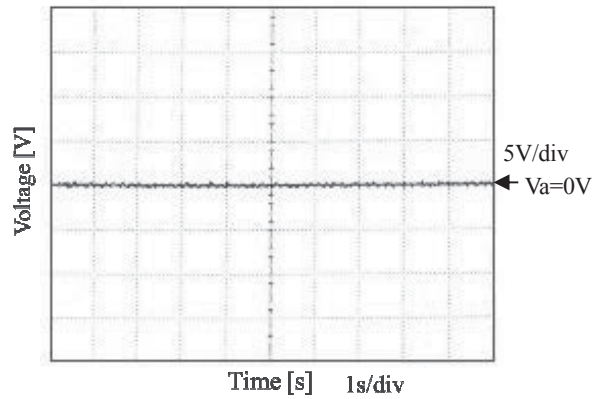
(b) Arc generator
(b) アーク発生器

Fig.5. Arcing experimental circuit sketch and arc generator

図5. アーク実験回路概容図とアーク発生器



(a) Arc current through
(a) アーク電流貫通



(b) Arc current separation
(b) アーク電流隔離

Fig.6. Measurement results

図6. 測定結果

図5に定電圧源によるアーク実験回路概容図とアーク発生器を示す. 図6 (a), (b)に測定結果を示す. 図6の結果から分かるように, アーク電流をCTに貫通した(a)の場合, アークによるピーク値が約±2Vの高周波が認められるが, アーク電流をCTから隔離した(b)の場合CTは何も出力していない. この結果から, CTがアンテナのようにアークによって発生する高周波を電線からの放射のノイズとして検出することはないと証明された.

ここでアーク電流とは図5の回路図でアーク発生器の電極を閉じたときに回路に流れる電流を指しており, アーク電流の大半は弧心を通る. アークが発生すると外炎部において熱電子や酸素, 窒素などのイオンが衝突を繰り返し, それぞれの運動方向が常に急激に変化している. 電子などが運動方向を変化するたびに磁界が変化する. CTはこの磁界の変化を検出し, 巻線に磁界の変化に応じた高周波電圧を発生しているものと考えられる.

筆者らはこれまでにストリング単位の太陽電池用短絡保護装置の研究を行ってきた⁽¹³⁾. この短絡保護装置に図3のアーク検出遮断装置のアーク検出機構をアークディテクターとして組み込み, 太陽電池システムのストリング単位のシリーズアークを検出, 遮断を行う. 図7に今回のアーク遮断器の回路構成を示す.

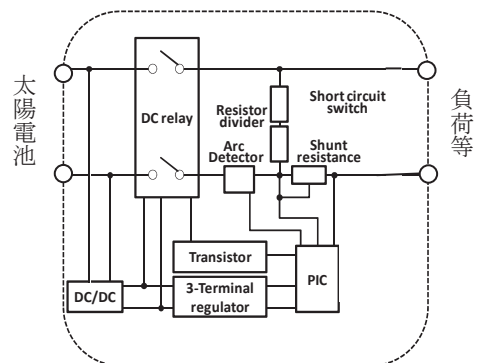


Fig.7. Circuit configuration diagram of arc breaker

図7. アーク遮断器回路構成図

図8に示す、アークの存在領域⁽¹⁴⁾を参考に、アーク検出遮断装置の検出電流しきい値約2Aとし、アークが約1秒継続すると遮断動作するように設定した。前述の検出しきい値電流は、以下の理由で選定した。図8は、赤線より右上における電圧と電流においてアークが発生することを示している。今回実験に使用した太陽電池システムの1ストリングの開放電圧は図9の(a)約230Vと(b)約250Vである。図8で230V、250Vにおいては約1.5A以上の電流でアークが発生することを示している。今回のPVストリングによる実測においても(a)は1.3A程度からアークは発生したが、微小且つ間欠的であり、すぐに消滅した。1.5Aでは完全なアーク持続の可能性が低いと考えられたため約2Aとした。

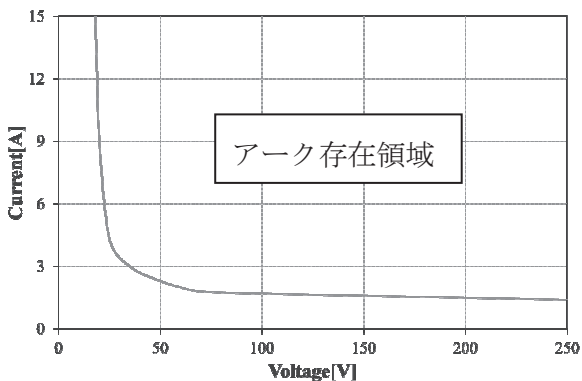


Fig.8. Arc existing area
図8. アークの存在領域

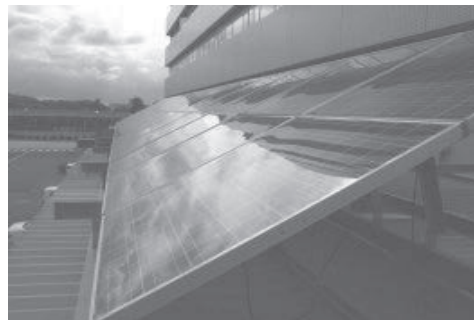
一方、アーク継続時間を約1秒に設定した理由は、この程度の時間では通常想定される太陽電池の部材に着火することは確率的に低いと考え、検出時間を約1秒に設定した。

4. 実験用太陽電池システムの概要

今回実験に使用した(a)3kWの太陽電池システムのPVアレイ及び、(b)1kWの太陽電池システムのPVアレイを図9に示し、各モジュール仕様を表1に示す。図9(a)の太陽電池アレイは5ストリングからなり、1ストリング6モジュールで構成されている。(b)は1ストリング14モジュールで構成されている。(a)は設置後20年、(b)は14年程度経過しており、実質の開放電圧は(a)230V、(b)250V程度である。

図10に太陽電池ストリングによる太陽電池アーク実験回路の概念図を示す。図10に示す太陽電池アーク実験装置と図5に示した実験装置の違いは、図5(a)の場合、電源が電圧源であり電流制限の目的で抵抗が接続されている。図10の場合は太陽電池アレイの1ストリングが電源であり、抵抗部分は無く単純な太陽電池ストリングの短絡回路にアーク発生器が接続されている。アーク発生器のアーク電極を短絡させてから開極することでアークを発生させる。短絡時は以下の図11に示す電流源領域にあり、電極の接触抵抗はほぼ0Ωである。開極した瞬間、1.5A以上であればアークが発生し電流が継続する。1.5A未満であると開放電圧が現れるだけで、アークを発生し持続することは難しい。図10の装置を使用し、アーク電圧 V_a と電流 I_a を測

定した結果を図12に示す。



(a) 3kW PV array
(a) 3kW PV アレイ



(b) 1kW PV array
(b) 1kW PV アレイ

Fig.9. PV systems
図9. PV システム

Table 1 PV module specification
表1 太陽電池モジュール仕様

(a) PV module of 3kW array
(a) 3kW アレイ用 PV モジュール

項目	定格値
短絡電流	3.25A
開放電圧	42.5V
最大出力動作電流	3.02A
最大出力動作電圧	33.8V

(b) PV module of 1kW array
(b) 1kW アレイ用 PV モジュール

項目	定格値
短絡電流	4.87A
開放電圧	20.4V
最大出力動作電流	4.43A
最大出力動作電圧	15.8V

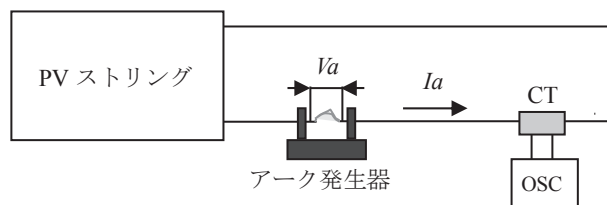


Fig.10. Photovoltaic arc experiment conception diagram
図10. 太陽電池アーク実験回路概念図

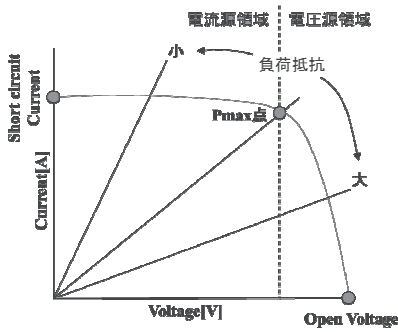


Fig.11. Name of parts on I-V characteristic of PV
 図 1 1. 太陽電池 I-V 特性上の各部の名称

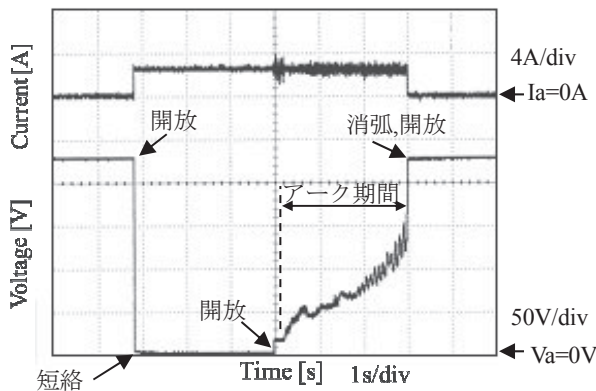


Fig.12. Measurement result of arc voltage and current
 図 1 2. アーク電圧・電流測定結果

図 1 2 においては、図 9 (a)で実験をおこない、初めにアーク電極が開放されており、約 1.8 秒で電極短絡後、約 5 秒後に再度開放してアークを発生させ、手動によりほぼ等速で電極を開き続け、約 8 秒でアークが消滅した。実験時の日射強度 870W/m²、短絡電流 2.75A、アーク消滅時、電極間隔は 17.5mm であった。電流波形を見ると、電極短絡時からアーク消滅まで一定の電流が継続している。これは太陽電池の電流源特性によるものと考えられる。アーク発生時は電流波形の波高値が大きくなっていることが認められる。電圧波形を見ると開極直後、開放電圧にはならず、開放直後、図 1 (b)に示したシーブス電圧 V_s が確認できる。この電圧は電極の材料で異なり、銅の場合 16V 程度である。アーク電圧 V_a は開極距離に比例して増加している。開極が手動のため開極動作に伴う電圧波形にむらがあるが、平均開極速度は 5.8mm/s である。アーク消滅時の電圧は約 150V であり、消滅直後に開放電圧 230V になっている。

5. 太陽電池システム用アーク検出遮断装置による実験

最初に、図 9 (a)のストリングで、図 1 3 に示すように、図 1 0 の CT と OSC をアーク検出遮断装置に変え、短絡検出機能は動作しないようにし、前述の V_a 、 I_a を測定しながら実験を行った。

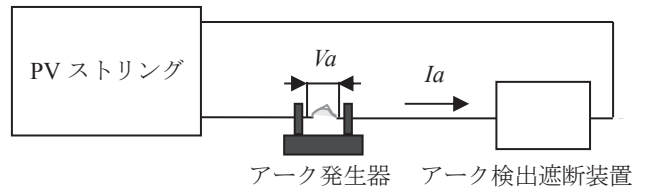


Fig.13. Test circuit for arc fault detection breaker
 図 1 3. アーク検出遮断装置実験回路

前述の図 1 2 のように電極を開放、短絡、開放と行うと、最初の開放時にノイズが実験回路に現れ、これをアーク検出遮断装置が検出し、誤動作を起こす。そのためここでは、最初電極を短絡し、試験電流を流した状態から電極を開放し、アークを発生させた。また図 1 3 の状態ではアーク検出遮断装置が誤動作するため、電圧源を使った机上実験で成功した図 5 のように、図 1 3 の回路には 10Ω の抵抗を追加した。その実験回路を図 1 4 に示す。実験結果を図 1 5 に示す。

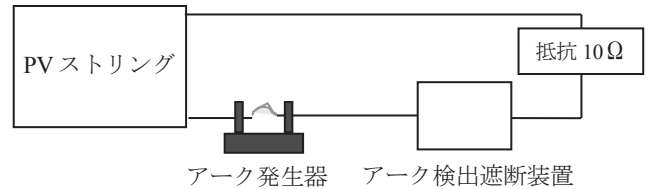


Fig.14. Repaired test circuit
 図 1 4. 修正実験回路

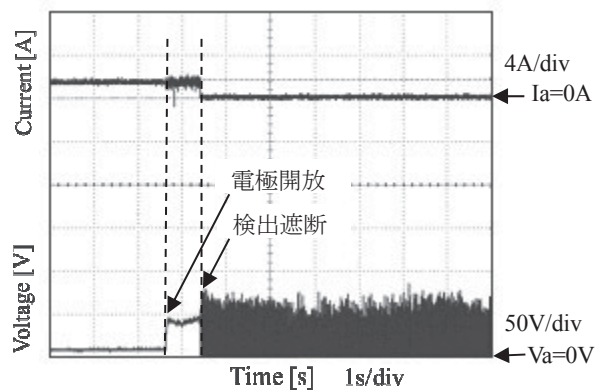


Fig.15. Arc detection and breaking current test results (1)
 図 1 5. アーク検出遮断装置動作実験結果(1)

この実験においては、日射強度 770W/m² で 1.8A の電流によるアークにおいて、アーク検出遮断装置は 0.85 秒で動作し、アークを遮断した。今回のしきい値は目標値であり、設定しきい値より動作電流、動作時間も多少小さいが、原理の基礎実験としては良好な結果であると考えられる。アーク電圧は 50V 程度である。遮断後は電極間が開放となるため、オシロスコープのプロブが開放された状態になり、計測データにノイズが記録されているが、この値はピークが 70V 近辺の値になっている。また、電極間にアークを発生させると、瞬間的に数千度になり、数秒アーク電流を流したあと開極する。この時点ですぐにφ3 の銅電極は

酸化し、酸化銅、亜酸化銅などができ、これらが電極先端から数 cm まで覆う。図 15 において、接触時に 10V ほど電圧が発生しているが、特に電極先端の荒れや亜酸化銅などを介した通電のため、接触抵抗が大きくなり、電圧が発生したものと考えられる。本来、通電後、やすりで電極先端を磨くのであるが、試験電流 2A を得られる時間は 15 時以後の 30 分程度で、実験当日は晴れ時々曇りであり、安定した日射が得られず、日射が出ると実験するという状況で、毎回やすりで磨く時間がなく、数回連続して電極を使用したためである。

上述の結果は、曇天日の夕方の実験結果である。さらに、快晴日の正午近い時間における日射強度、および PV の仕様が異なった条件においても、本装置が正常にアークを検出遮断出来ることを確認するため、図 9 (b) の太陽電池システムで、ほぼ快晴の日の正午過ぎに、日射強度 930W/m²、電流 3.96A の条件で動作確認実験を行った。

実験結果を図 16 に示す。アーク期間は 3.89 秒から始まり 0.99 秒後にアークを遮断した。しきい値電流約 2A、検出時間約 1 秒で正常にアーク検出遮断する結果が得られた。これは曇天時より強力なアークも確実に遮断でき、快晴時のアークも確実に保護できることを示している。

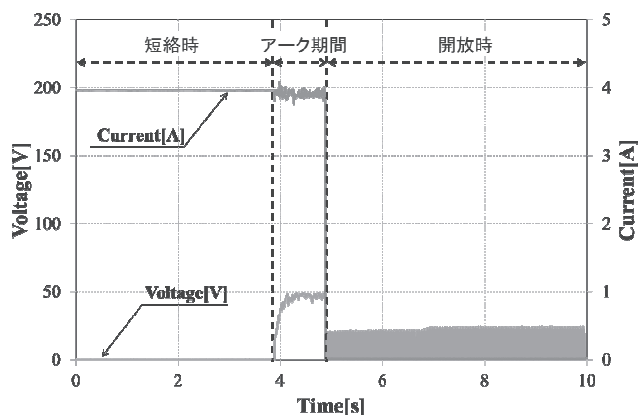


Fig. 16. Arc detection and breaking current test results (2)

図 16. アーク検出遮断装置動作実験結果(2)

6. まとめと今後の課題

今回のアーク検出遮断装置は確実な検出動作を考慮して検出しきい値電流を約 2A とし、検出時間は約 1 秒に設定した。実験に使用した 3kW、1kW の太陽電池システムの 1 スtring によるアーク検出遮断実験では、設定した各しきい値の条件で動作した。抵抗をつけた String レベルの成功であるが、今回のアーク検出方法の有効性は確認できたものと考えられる。

しかし、設定電流は出来る限り小さい方がよい。火災の発生確率などを勘案した最適な検出電流の調査が必要である。また近年では、PV システム電圧が 1000V を超えるものも設置されている。図 8 のアークの存在領域は 250V までしかないが、1000V 以上での確認実験も必要である。さらに、PCS のノイズなどによりアマチュア無線が誤動作するなどの問題が指摘され、太陽電池メーカーで太陽電池設置において 100m 以内のアマチュア無線への注意を WEB に

掲載しているところもある⁽¹⁵⁾。今回の検出装置を系統に接続した場合、条件によっては、本方式によるアーク検出装置は誤動作する可能性がある。PCS の発生する高周波とアークが発生する高周波の違いなど、太陽電池システムにおける高周波に関する調査研究も必要である。現状、太陽電池システムの火災においてアークの発生は末期的、且つ最悪な状況を生む確率が非常に高い。一方、アークの検出は途に付いたばかりであり、アーク発生時の検出は高周波の検出に負わざるを得ない。こういう観点から太陽電池システムの直流系統における EMC の規制なども今後必要と思われる。

7. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、2010 年度愛知工業大学 総合研究所 プロジェクト研究 B の援助、2013 年度プロジェクト研究 A の援助、及び関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- (1)小林広武:太陽光発電システムの系統連係技術, pp.22-28,OHM, 2月号,(1992)
- (2)経済産業省ホームページ, <http://www.meti.go.jp/>
- (3)JPEA 報道資料, <http://www.jpea.gr.jp/pdf/t120517.pdf>
- (4)International Workshop Arcing PV DC-Arrays, Organizer:Swissolar et.al.,BFH Burgdorf Switzerland,(2007)
- (5)Photon, Photovoltaic Magazine International,pp102-113, ugust,(2009)
- (6)佐藤大輔:太陽光発電設備が設置された建物における消防活動と対策,第 77 回新エネルギー講演会,市場拡大する太陽光発電の課題,JEMA,(2014)
- (7)高木相:電磁妨害波雑音発生メカニズムとその性質,電子通信学会誌,Vol.67, No.2,pp.147-153,(1984)
- (8)相田貞蔵他:接点分離時における無線雑音発生原因の検討,電子通信学会誌,Vol.J62-CNo.1,pp.24-30,(1979)
- (9)内村圭一他:銀接点開離アークよりの無線雑音周波数特性,電子通信学会論文誌,pp.617-624,Vol.J63-CNo.9,(1980)
- (10)Shigeki Minegishi et.al: Frequency spectra of arc contact due to electromagnetic comatibility,Electromagnetic Compatibility IEEE transactions, Vol.31, No.4, pp.342-345, (1989)
- (11)萱野良樹:銀接点低速開離時アークの GHz 帯までの電磁ノイズ計測(その 3),信学技報 IEICE Technical Report,EMCJ2006-42,EMD-2006-22,(2006)
- (12)高電圧工学,新・電気システム工学(TKE-13),日高邦彦著,理工学社,pp.83-87,2009年1月10日初版
- (13)安藤健志,坂斉典,二宮貴之,市川智彦,雪田和人,後藤泰之,依田正之,一柳勝宏:太陽光発電におけるインテリジェント保護装置,太陽エネルギー,Vol.37, No.6,pp.41-48,(2011)
- (14)Will Vaasen et.al:Failure Mechanismen of Contact Faults in the DC-Circuit of PV Arrays,p12, International Workshop Arcing PV DC-Arrays,Organizer:Swissolar et.al,BFH Burgdorf Switzerland (2007),pdf
- (15)京セラ太陽電池,安全に関するご注意(web), <http://www.kyocera.co.jp/solar/es/prdct/module/detail.html>