

太陽光発電システムの異常検出技術と
系統連系技術に関する研究

安 藤 健 志

目 次

第 1 章 緒 言

1-1	研究の背景	1
1-2	本論文の構成	5
第 1 章	参考文献	9

第 2 章 太陽光発電システムの構成と特性

および本研究課題の意義

2-1	太陽光発電システムの構成要素	12
2-2	太陽電池の I-V 特性と短絡電流	13
2-3	本研究課題の意義	15
第 2 章	参考文献	17

第 3 章 太陽光発電システムにおける

インテリジェント短絡保護装置の開発研究

3-1	短絡保護装置プロトタイプ	18
3-2	実験用太陽光発電システムの構成	19
3-3	太陽光発電システムのストリング I-V 特性近似式の導出	20
3-4	太陽電池ストリングの短絡検出条件の検討	23
3-5	プロトタイプ動作予測と実験結果	25
3-6	インテリジェント短絡保護装置	26
3-6-1	インテリジェント短絡保護装置の概要	26
3-6-2	インテリジェント短絡保護装置の 単体での動作確認実験	27

3-6-3	インテリジェント短絡保護装置の 遠隔監視実験結果	29
3-6-4	実験結果検討	33
3-7	結論	33
第3章	参考文献	34

第4章 光ファイバによる太陽電池モジュールの異常検出の研究

4-1	概要	35
4-2	ラマン散乱光を用いた温度測定方法	35
4-3	光ファイバを温度センサとして使用した温度計測システム	37
4-4	太陽光発電システムとモジュール裏面温度分布	38
4-5	温度センサとしての光ファイバの選択	40
4-6	光ファイバの設置方法と温度測定精度の確認	41
4-7	光ファイバの温度センサとしての最適な条件の決定	42
4-8	光ファイバ温度測定によるモジュール異常発熱検出実験	46
4-9	移動する部分影による太陽電池のホットスポットの検出実験	48
4-10	実験結果検討	50
4-11	結論	50
第4章	参考文献	51

第5章 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

5-1	概要	52
5-2	アークについて	53
5-3	太陽光発電システム用アーク検出遮断装置の概要	55
5-4	実験用太陽光発電システムの概要	59
5-5	太陽光発電システム用アーク検出遮断装置による実験	61
5-6	実験結果検討	63
5-7	結論	64

第5章 参考文献	65
----------	----

第6章 太陽光発電システムにおける系統連系装置の開発研究

6-1 概要	67
6-2 連系装置の回路構成と動作およびその他の補助回路について	67
6-2-1 連系装置の回路構成と動作原理	67
6-2-2 逆変換回路のゲートドライブ回路	70
6-2-3 ロスレススナバ回路	70
6-2-4 ロスレススナバのフォワードコンバータへの応用	72
6-3 回路解析	72
6-3-1 主回路の動作解析	72
6-3-1.1 スイッチオン期間	73
6-3-1.2 スイッチオフ期間	73
6-3-2 ロスレススナバがある場合の回路解析	75
6-3-2.1 主スイッチがオンのときの動作	75
6-3-2.2 主スイッチがオフのときの動作	77
6-3-3 シミュレーション結果	80
6-4 実験結果検討	82
6-5 結論	83
第6章 参考文献	84

第7章 結 言

謝 辞	87
-----	----

記号表

第2章

A : ダイオード pn 接合の材料の特性と温度で決まる定数

第3章

I_{sc} : 太陽電池の短絡電流

V_{op} : 太陽電池の開放電圧

I_{pm} : 太陽電池の最大出力動作電流

V_{pm} : 太陽電池の最大出力動作電圧

I_L : 太陽電池等価回路の負荷に流れる電流

I_{ph} : 太陽電池等価回路の光発生電流

I_D : 太陽電池等価回路の pn 接合の順方向電流

I_{sh} : 太陽電池等価回路の接合の漏れ電流

A : 太陽電池等価回路の pn 接合の材料特性と温度によって決まる係数

B : 太陽電池等価回路の材料によって決まる係数

k : ボルツマン定数

T : 絶対温度

V_j : 太陽電池等価回路の接合にかかる順電圧

R_{sh} : 分路抵抗 (格子欠陥による)

q : 電子の電荷

V_L : 太陽電池の出力電圧

P_w : 日射強度

K : 太陽電池の日射強度による電流の定数

I_s : 太陽電池短絡異常判定電流しきい値 (定数)

V_s : 太陽電池短絡異常判定電圧しきい値 (定数)

第4章

r : 相関係数

第5章

r : アーク断面半径 (規格化された値)

V_c : アーク電極間電圧

V_s : アークシース電圧

V_a : アーク電圧

I_a : アーク電流

第6章

(i) 主回路動作の解析

E : 太陽電池アレイの出力電圧

L_i : 太陽電池アレイの出力電圧

R_i : IGBT のオン抵抗を含む主回路の電線の抵抗

R_1 : トランス一次巻線の抵抗

L_1 : トランス一次巻線の漏れインダクタンス

L_2 : トランス二次巻線の漏れインダクタンス

C : 出力フィルターのコンデンサ容量

L_0 : 出力フィルターのインダクタンス

R_2 : トランス二次巻線、インダクタンス L_0 とダイオードのオン抵抗

L_3 : 電源の電線インダクタンス

R_3 : インバータのオン抵抗を含む電源線の抵抗

e_1 : トランスの一次電圧

e_2 : トランスの二次電圧

n : トランスの巻線比

i_1 : トランスの一次電流

i_2 : トランスの二次電流

i_3 : 電源電流

i_c : フィルターのコンデンサ電流

V_c : フィルターのコンデンサ電圧

e : 電源電圧

(ii) ロスレススナバ回路解析

C_{Si} : スナバ S_{ni} の静電容量

r_{Si} : スナバ S_{ni} のダイオードの順電圧降下の抵抗

v_{Si} : スナバ S_{ni} の静電容量の電圧

i_{Si} : スナバ S_{ni} の静電容量の電流

r_{Fi} : スナバ S_{ni} の F E T の順電圧降下の抵抗

C_{Di} : ダイオード D_i の接合静電容量

i_{Di} : ダイオード D_i の逆電流

r_{Di} : ダイオード D_i の順電圧降下の抵抗

r_{Ri} : ダイオード D_i に i_{Di} が流れた時の抵抗

* 下の添え字 i はスナバの番号

e_j : 巻き線 j の誘起電圧

i_j : 巻き線 j を流れる電流

L_j : 巻き線 j の漏れインダクタンス

R_j : 巻き線 j の抵抗

* 下の添え字 j はトランスの巻き線の番号

第1章 緒 言

1-1 研究の背景

日本の太陽電池の普及は第1次石油危機の翌年、1974年にサンシャイン計画（新エネルギー技術開発計画）に端を発し、1978年のムーンライト計画（省エネルギー技術開発計画）と地球環境技術開発計画を統合し、1993年からニューサンシャイン計画として受け継がれてきた。このニューサンシャイン計画は予算総額3,547億円のエネルギー・環境問題の同時解決を目指し、革新的技術開発を重点とした当時の通商産業省工業技術院（現独立行政法人産業技術総合研究所）のプロジェクトである⁽¹⁾。このプロジェクト推進のためにエネルギー技術開発機関として、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が設立された⁽²⁾。これを受けて、NEDOの受託研究の一環として1986年度から、六甲アイランドなどで新エネルギーの大規模な実証実験が行われ、特に太陽電池、燃料電池、蓄電池などの系統連系技術に関する研究や検討が進められてきた⁽³⁾⁻⁽⁹⁾。

同年1986年8月には資源エネルギー庁公益事業部長通達「コジェネレーション設備等の系統連系に関する技術要件ガイドライン」（61資公部第316号）により「系統連系技術要件ガイドライン」が整備された。さらに、1990年からは電気設備技術委員会の下に設置された分散電源系統連系特別調査委員会が、分散電源の系統連系技術要件について調査研究し、電気設備技術委員会の審議を得て資源エネルギー庁公益事業部技術課に逐次報告を実行し、ガイドラインの改定を進めてきた。これを元に「分散型電源系統連系技術指針 JEAG 9701」は民間の技術指針として1992年に制定され前述ガイドラインを補完してきた⁽¹⁰⁾。しかし、電気設備技術基準のように電気事業法などに基づく法的強制力はなかった⁽¹¹⁾。2004年に「系統連系ガイドライン」は「電気設備技術基準の解釈」と「電力品質確保に係わる系統連系技術要件ガイドライン」に分離された。これを受けて、技術指針は「系統連系規定 JEAC 9701-2006」として発行された。電技解釈では第46条で太陽電池発電設備の高圧電線について規定しているのみである。

一方、普及促進政策として1993年には、新エネルギー財団の「家庭用太陽光発電モニタ事業」による家庭用の太陽光発電設備の設置に対する半額の補助金の支給、引き続き1997年の「住宅用太陽光発電導入基盤整備事業」などが実施されるなど、太陽光発電システムは2006年に補助金の支給が打ち切られるまでは微増ながら普及拡大を続けていた。1997年から2005年までの前述の補助金政策は、補助金の無い場合の2倍、540MW

の普及促進に貢献し、二酸化炭素削減量 419 万トンに相当するという報告もある⁽¹²⁾。しかし、2006 年に補助金支給の打ち切りに伴い、太陽電池の新たな設置数量が減少した。そこで、2008 年 7 月に「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定された⁽¹³⁾。この計画書の「Ⅱ革新的技術と既存技術の普及、2 既存技術の普及、(1) 太陽光発電の普及拡大」として国内における太陽電池の導入目標量を設定し、2005 年に対して 2020 年には 20 倍、2030 年に 40 倍としている。この閣議決定に基づき、2009 年には当時の経済産業省大臣が「太陽光発電の新たな買取制度」の導入を発表するなど⁽¹⁴⁾、従来に比べ具体的な太陽電池の普及拡大の施策が講じられ、補助金の見直し、全量買取制度、発送分離による売電事業への参入障壁の除外などの効果により、堅調に太陽電池は普及拡大した。2012 年 4 月には、住宅用の太陽光発電システムの設置が累計 100 万戸を超えたとの報告もある⁽¹⁵⁾。各年度の住宅用太陽電池システムの普及状況を図 1-1 に示す。特に 2006 年から 2008 年に補助金が打ち切られている時期に設置件数が落ち込み、前述の 2008 年の閣議決定後、各種施策により太陽電池の設置件数が持ち直したことが見て取れる。

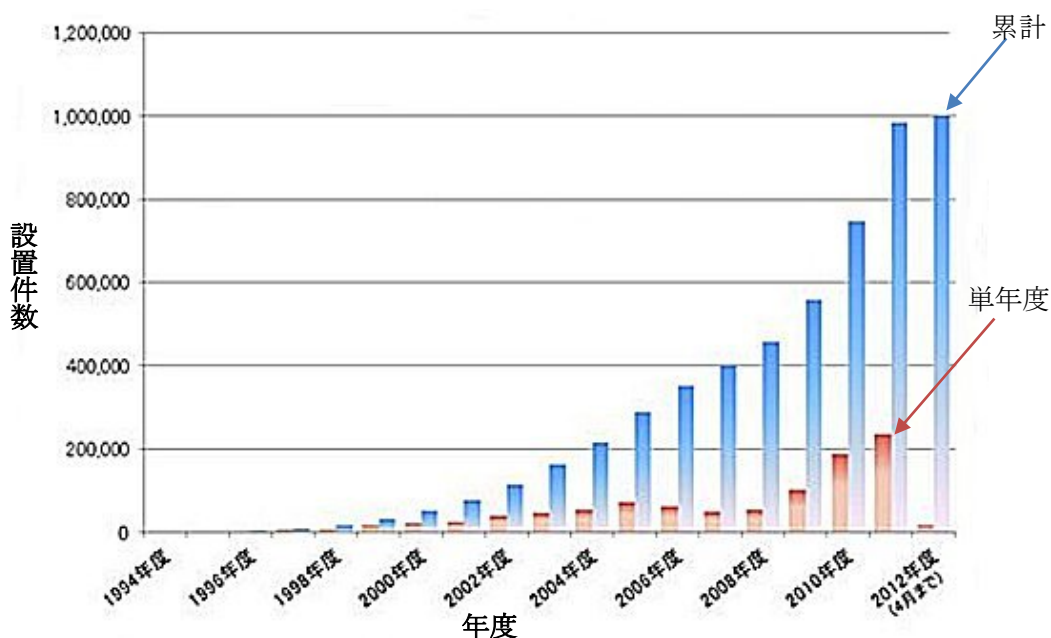


図 1-1 住宅用太陽電池システムの普及状況⁽¹⁵⁾

2008 年以後、太陽電池を筆頭とする新エネルギーは堅調な普及を続けてきたが、ここ数年間に予想以上の電力買取申し込みが増加し、2014 年 9 月末には太陽電池、風力発電普及の地域遍在性が顕在化し、これに伴う一部の電力会社による「新規電力買取の受付中止」という記事が各新聞、テレビなどのニュースで報じられた。また、太陽電池、風力発電などは気象条件により発電電力が変動するため系統連系技術として運転継続性能 (FRT : Fault Ride Through) が新たに要求されつつある⁽¹⁶⁾。

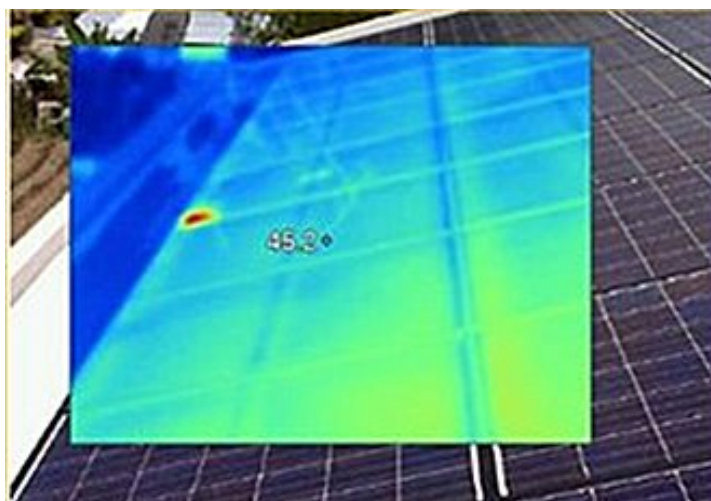
一方、前述の太陽電池の普及拡大が進む中、2009 年に欧米では太陽電池の火災が多発していることは雑誌などで公知となっていた^{(17),(18)}。米国においては太陽電池が発電状態にある状況での火災消火時における消防士の感電が問題になり、消防士の太陽電池火災における行動指針が報告されている⁽¹⁹⁾。また、日本においても 2008 年には太陽光発電システムの点検の必要性を訴える新聞記事⁽²⁰⁾、2010 年には「太陽電池の 3 割 12 年以内に故障」という記事が発表されている⁽²¹⁾。さらに、産業技術総合研究所などにおいて太陽電池の不備に関する研究が進められており、この太陽電池の不備に関する具体的な事例の書籍や論文もある^{(22),(23)}。図 1-2、図 1-3 に太陽電池の火災の事例、図 1-4 に太陽光パネルの異常過熱(ホットスポット)の事例を示す。同図の赤い部分がサーモグラフィで検出した太陽電池の異常過熱部分である。



図 1-2 沿道の店が太陽電池の出火で全焼(ドイツ)



図 1-3 屋根上の太陽電池火災(アメリカ)



http://www.kakaku-taiyoko.jp/knowledge/knowledge02_13.html

図 1-4 異常過熱 (ホットスポット) PVパネルの例

エネルギー資源が脆弱な日本において、エネルギーの自給自足は悲願に近いものがある。太陽電池は設置しやすく、経年劣化はあるものの15年以上発電できると言われており、国策として、これの普及拡大も理にかなうものである。しかし、上述の図1-2、図1-3、図1-4に示したように、太陽電池は局所の異常発熱や最悪火災を発生することがあるため、絶対に安全とは言えず、日本においても太陽電池の異常が原因と思われる火災の消火活動における、消防士の感電対策などが検討され始めている^{(24),(25)}。太陽光発電システムは定期的な点検や異常検出保護技術が整って初めてその価値が発揮できると言える。従って、新エネルギーの中でも、極めて簡便に設置できる太陽電池の異常検出

保護技術を具体化することが重要であり、この技術を具体化するための研究を進めることがエネルギーの自給に不可欠であるとの見解から、太陽光発電システムの異常監視技術、保護技術の研究を進めることにした。また、100 万戸に設置された太陽光発電設備は、直流給電システムが交流給電システムに連系した電力システムであり、戦後の復興から高度経済成長を牽引してきた交流電力システムとは異なり、直流と交流が混在したシステムである。21 世紀に入り、現代は従来の交流主体の電力システムから、直流と交流が混在する電力システムに転換しつつある黎明期であるともいえる。しかし、特に直流部分の技術的課題は不明な点も多く、電気設備技術規準などの法的規制がほとんど無い無法に近い状態である上、現状の系統連系技術も十分とは言い難い。この直流部分は太陽電池、系統連系装置、およびその他に大別できる。本論文では、太陽光発電システムの異常検出保護技術の研究を中心としながら、系統連系技術の研究も進めたことを報告している。

1-2 本論文の構成

本論文は7章からなる。**第1章「緒言」**については本節では割愛する。

第2章「太陽光発電システムの構成と特性および本研究課題の意義」では、本論文で扱う太陽光発電システムの最小構成単位のセルの説明から始まり、施工上の最小単位であるモジュールの構造、モジュールの構成要素、これらを組み合わせた太陽光発電システム全体の構成と名称について説明している。また太陽電池の発電特性における短絡特性の説明も行っている。この短絡特性は、ダイオードのpn接合の光電効果により発電電流が光の強さに比例することに起因し、太陽電池のI-V特性がこの光電効果から導出されていることを説明している⁽²⁶⁾。太陽電池と商用交流電源との大きな違いは、太陽電池の短絡電流が最大電力制御で得られる定格電流とほとんど変わらず、従来の商用交流電源で使用されていたバイメタルなどの過電流検出素子が使用できないことである。この対策として、太陽電池の短絡特性に合った短絡保護技術の必要性について述べ、研究課題の意義について述べている。

第3章「太陽光発電システムにおけるインテリジェント保護装置の開発研究」では、最初に大型でアナログ回路を使った太陽電池用短絡保護装置のプロトタイプと、短絡事故検出アルゴリズムについて説明している⁽²⁷⁾。そして、第2章で説明した太陽電池の短

絡特性に合った短絡検出条件を太陽電池の等価回路に基づき検討を行い、太陽電池の電流と日射強度の簡便な関係式を導出し、この式をもとに I-V 特性を求め異常検出のための電流と電圧のしきい値を求める方法について説明している。しかし、実際の太陽光発電システムに設置したインバータに制御された太陽電池の I-V 特性は、理論的な最大電力制御と異なり定電圧制御に近い特性を示した。この実測値を元に短絡検出条件としての電流、電圧の検出しきい値を求め、太陽電池の短絡保護装置のプロトタイプを作成し短絡検出、保護動作実験で正常に動作し短絡点を解列できることを確認した。また、本章のインテリジェント保護装置では、プロトタイプの短絡事故検出アルゴリズムをワンチップマイコンにプログラムとして組み込み、従来の体積の 1/12 と小型化を実現した。さらに遠隔通信機能を追加し太陽光発電システムの短絡事故検出遮断を実現すると共に、太陽電池の動作状況をパソコンでモニタリングすることで遠隔監視に成功したことを報告している⁽²⁸⁾。

第4章「光ファイバによる太陽電池モジュールの異常検出の研究」では、光ファイバによる温度計測の原理の説明として、光ファイバにパルス状の光を入れた場合の光ファイバ内部の各種反射光のうち、ラマン散乱光のストークス光とアンチストークス光の強度比が温度に比例することを応用していること、および温度測定と太陽光発電システムへの設置に適した光ファイバの選定について説明している。基礎実験として冷水による直線状態と円環状態にした光ファイバの温度検出性能の差を調べた結果、円環状態の光ファイバによる計測が優れていること、および太陽電池セルに適合した円環状態の光ファイバの最適な巻き数についてカイロを使った温度測定実験で具体化している。また、熱電対と円環状態の光ファイバによる温度測定データの数値が異なる結果となったが、11 ポイントのデータ対の相関検定により適切な巻き数の円環状態の光ファイバは熱電対の温度データと極めて高い相関を示し、円環状態の光ファイバによる温度計測の有効性を証明したことを報告している。さらに、太陽電池モジュール表面上の影などによって出来るホットスポットが火災事故の原因の一つであり、家庭用の太陽光発電システムのように容易に太陽電池の温度を計測できない施設状況や、メガソーラーのように広大な敷地に数千枚以上の太陽電池モジュールがあり、全てのパネルの温度監視が事実上不可能な状況に対応すべく、円環状態の光ファイバによる温度計測技術により異常のある太陽電池のホットスポットの検出に成功したことを報告している⁽²⁹⁾。

第5章「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」では、最初にアークの特性について説明し、この温度が数千度から一万度を超えることについて述べている。また、アークは高周波を発生し、放射ノイズや伝導ノイズとなる。本研究ではアークが発生する高周波を伝導ノイズとして検出するため、ノイズ対策用フェライトコアで高周波を検出できるCTを作成した。このCTによりアークが発生する高周波伝導ノイズを高周波電圧として検出することができることを実証した。さらに隣接したストリングでのアーク発生の誤検出などを想定し、アークの高周波による放射ノイズをCTがアンテナとして検出しないことも実験で確認している。これらの基礎実験をふまえて、アークの高周波による伝導ノイズでCTに発生する高周波電圧を簡便な倍電圧回路で検波し、しきい値電流約2Aで動作時間約1秒に設定した判定回路を作成し、前述のインテリジェント短絡保護装置と組み合わせ、屋内の直流電源によるアーク検出実験において正常にアークを検出遮断した。さらに、屋外の太陽電池のストリング直下でアークを発生させ、この屋外の太陽電池から亘長約40mの屋内に設置したアーク検出回路と組み合わせたインテリジェント短絡保護装置で、曇天時の3kWの太陽光発電システム、および晴天時での1kWの太陽光発電システムにおけるそれぞれのアークの検出遮断に成功したことを報告している⁽³⁰⁾。

第6章「太陽光発電システムにおける系統連系装置の開発研究」では、小型化した系統連系装置の回路の提案をしている。本章で提案する系統連系装置の回路は、一石パワーコンバータを使用し、高周波スイッチングにより小型のトランスを系統連系装置に内蔵し、逆変換回路は低速で電圧降下が高い低コストの素子で構成でき、系統連系装置回路の簡略化と小型化、および低コスト化を実現している。この提案した系統連系装置の回路の有効性をコンピュータによる数値解析シミュレーションと試作装置の実験で証明できたことを報告している。回路動作については、一次側の直流回路でPWM制御により全波整流波を整形し、トランスを介して二次側に送り、逆変換回路で全波整流波を商用周波数に同期した交流電流変換し商用系統に送る。このプロセスの詳細について、各部の回路動作について説明している。最初に一次側の主スイッチの動作についてオン、オフ各モードの説明をおこない、次に逆変換回路のスイッチング素子のゲート回路は商用周波数で動作する極めてシンプルな構成であることと、これの動作について説明を行っている。本方式は高速のスイッチング素子が主回路のIGBTだけなので、サージが大きい

くなる。このサージ対策としてサージ電力を FET により主回路に電力回生するロスレススナバ回路を提案している。このロスレススナバ回路は主スイッチがオフの時の数値解析シミュレーション結果において、各部の電流は $10\mu\text{s}$ 程度で減衰しサージ電力を回生しており、サージの発生をほぼ完全に抑えるスナバ回路の効果について説明している。また、試作装置による系統連系実験を、キャリア周波数 20kHz、一次側 DC200V および二次側 AC100V、25A の条件で実施した結果、交流出力は電圧、電流とも正常な正弦波で力率もほぼ 1 を示し、効率も低負荷から高負荷までほぼ 90%以上となり本方式の有効性を実証したことを報告している。しかし、一石フォワードコンバータの主回路がオフの時にはスイッチング素子に 2 倍の電圧がかかるため、素子の耐電圧を 2 倍にする必要性やスイッチングノイズも発生しやすい点、大型機には向かず小容量の家庭用に適していると考察している⁽³¹⁾。

第 7 章「結言」では本論文、各章の研究課題について総括を述べ、今後の新エネルギーの進展において、この旗頭としての太陽電池の異常監視・保護技術の重要性の再確認をしている。さらに、直流と交流が混在する 21 世紀の電力システムにおいては系統のバッファとしての蓄電池の増設が進み、この蓄電池も含む太陽電池などの新エネルギーの統括管理技術の重要性、またパワーエレクトロニクス技術が次世代の電気エネルギーにおいて非常に重要な位置づけとなることについて言及している。最後に、本研究の成果が太陽光発電システムの異常監視技術の発展の一助になるものとしている。

第1章 参考文献

- (1) 大型研究開発制度(産業技術分野)の変遷の概要,「これまでの国家プロジェクトの変遷」, 経済産業省産業技術環境局, p.2,(2011-6)
- (2) 一般財団法人 高度情報科学研究機構,「新エネルギー技術開発サンシャイン計画/ニューサンシャイン計画」, エネルギーと地球環境 (01-05-02-01),(2004-9)
- (3) 滝川清,小林広武,武田行弘:「小型光発電システムにおける系統連系上の諸問題と対策(その2)」,電力中央研究所報告研究報告 T87008,(1988-1)
- (4) 今村栄一,内山洋司:「太陽光発電システムの普及分析」,電力中央研究所,研究報告: Y94011,(1995-6)
- (5) 岡土千尋他:「新しい単独運転防止(能動的)とその特性」,日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会講演論文集, pp.77-80, (1993-12)
- (6) 小林広武:「太陽光発電システムの系統連系技術」,pp.22-28,OHM社, (1992-2)
- (7) 馬場泰:「太陽光発電の利用例」,太陽エネルギー, Vol.22No.6, pp.16-24, (1996)
- (8) 佐々木宜彦:「分散電源の電力系統への導入と太陽光発電」,太陽光発電システムシンポジウム第11回,講演論文集,太陽光発電懇話会, pp.(1-3)-(1-12),(1994)
- (9) 黒川浩助:「システム技術の概要」,光発電シンポジウム第11回,講演論文集,太陽光発電懇話会, pp.(2-1)-(2-17), (1994-6)
- (10) 分散型電源系統連系技術指針, JEAG9701-1993,資源エネルギー庁事業部技術課監修, (1992-5)
- (11) 「2.ガイドラインの位置づけ」,解説 電力系統連系技術要件ガイドライン 2003, 編者 エネルギーフォーラム,pp.9-10,(2003)
- (12) 明城 聡, 大橋 弘:「住宅用太陽光発電の普及に向けた公的補助金の定量分析」,文部科学省科学技術政策研究所,第一研究グループ,DISCUSSION PAPER NO.56, p.2, (2009-11)
- (13) 「低炭素社会づくり行動計画について」(平成20年7月29日閣議決定)
<https://www.gepa.or.jp/activity/01/pdf/03TeiSanso.pdf>,p.7,(2008-7)
- (14) 山口 聡, 近藤かおり:「再生可能エネルギーの導入促進10政策」,調査と情報第653号, p.11, 国立国会図書館 ISSUE BRIEF 653, (2009)

- (15) 「住宅用太陽光発電システムの設置が累計100万戸を突破」,Press Release, 太陽光発電協会,(2012-5)
- (16) 「用語解説 FRT」,日本電機工業会(JEMA), HOME→製品分野別情報→新エネルギーシステム→分散型電源システム→用語解説 A～Z
- (17) Photon, Photovoltaic Magazine International,pp102-113, (2009-8)
- (18) Tim Zgonena et.al. , PV Arc-Fault Protection, The standard in safety, Underwriters Laboratories Inc,p.6,(2011-2)
- (19) Casey C.Grant, Fire Fighter Safety and Emergency Response for Solar Power Systems ,The Fire Protection Research Foundation ,(2010-5)
- (20) 加藤和彦：「太陽光発電 保守点検はやはり必要だ」, 私の視点,朝日新聞,(2008-5)
- (21) 「太陽電池の3割 12年以内に故障」, NPO 法人 PV ネット, 朝日新聞, (2010-7)
- (22) 加藤和彦：「太陽光発電システムの不具合事例ファイル PVResQ!からの現地調査報告」, 日刊工業新聞社, (2010-7)
- (23) 吉富政宜：「太陽光発電システムの品質向上に向けて」, 第14回 AES 太陽光発電システム研究発表会論文集, pp.19-26, (2012-3)
- (24) 「太陽光発電システムを設置した一般住宅の火災における消防活動上の留意点等について」, 消防庁消防・救急課 消防庁消防研究センター,事務連絡、(2013-3)
- (25) サブテーマ：「東日本大震災における火災分析と防火対策」, 平成25年度版 消防白書, 第6章 消防防災の科学技術の研究・開発,イ 平成24年度の主な研究開発成果, p.251,(2013)
- (26) 辻高輝：「太陽電池(Solar Cell)」, パワー社, pp.19～36,(1993-7)
- (27) 安藤健志, 依田正之, 雪田和人：「太陽電池用短絡保護装置の基礎実験」,電気設備学会全国大会講演論文集,F-6,pp.329-332,(2009-8)
- (28) 安藤健志,坂 齊典,二宮貴之,市川智彦,雪田和人,依田正之,後藤泰之
一柳勝宏：「太陽光発電システムにおけるインテリジェント保護装置」,太陽エネルギー学会論文誌,Vol.37,No.6,pp.41-48,(2011-11)
- (29) 安藤健志 ,酒井浩太 ,雪田和人 ,後藤泰之 ,一柳勝宏 ,依田正之：「光ファイバを用いた太陽電池モジュールの温度計測研究」,太陽エネルギー学会論文誌,Vol.40,No.4,pp.43-49,(2014-7)

- (30) 安藤健志 ,酒井浩太 ,雪田和人 ,後藤泰之 ,一柳勝宏 ,依田正之 ,宮本敦史 :
「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」,太陽エネルギー学会論文誌,Vol.40,No.6,pp.39-44,(2014-11)
- (31) K.Matsui,K.Ando et.al.,Utility-interactive photovoltaic power conditioning systems with forward converter for domestic applications, IEE Proceedings B, Electric Power Applications, Vol. 147, No. 3, pp. 199-205 (2000-5)

第2章 太陽光発電システムの構成と特性 および本研究課題の意義

2-1 太陽光発電システムの構成要素

太陽電池には結晶系、アモルファス、薄膜系など多種多様な種類があるが、ここではシリコン単結晶の太陽電池を例として説明を行う。太陽光発電システムの最小構成単位は約10cm角のシリコンのpn接合セルであり、セルを100枚ほどインターコネクタ(通称タブ線)と称す帯状の導体を使用し、各セルのP極とN極をはんだ付けにより全て直列接続し、フレーム、カバーガラス、充填剤、耐候性フィルム、端子箱、出力ケーブル、コネクタなどによりモジュールとする^{(1),(2)}。通常はこのモジュールが施工上の最小単位となる。モジュールの出力ケーブルを専用のコネクタで接続し、必要枚数を直列にしたものがストリングと称され、ストリングを接続箱の端子で並列にしたものがアレイと称されている。図2-1に太陽電池セルの外形、図2-2にモジュールの構造、図2-3に太陽光発電システムの構成を示す。



図2-1 太陽電池セルの外形

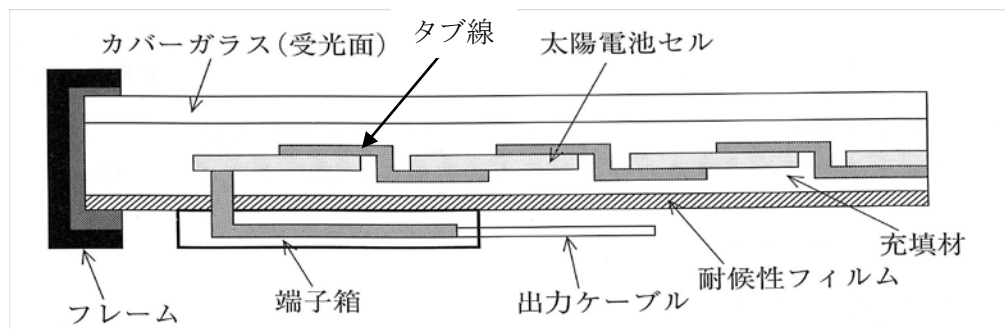


図2-2 モジュール構造図

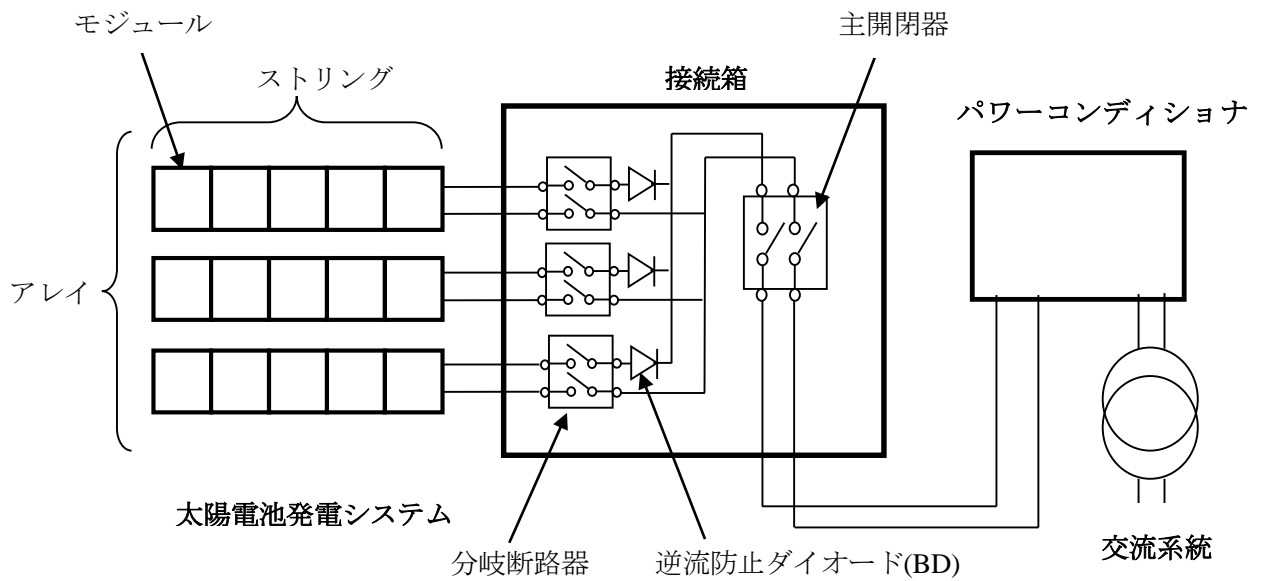


図 2-3 太陽光発電システムの構成

2-2 太陽電池の I-V 特性と短絡電流

セルの I-V 特性は、pn 接合のダイオードの特性から導き出される^{(3),(4)}。図 2-4 に pn 接合の I-V 特性を示し、図 2-5 に光照射による I-V 特性の変化を示す。

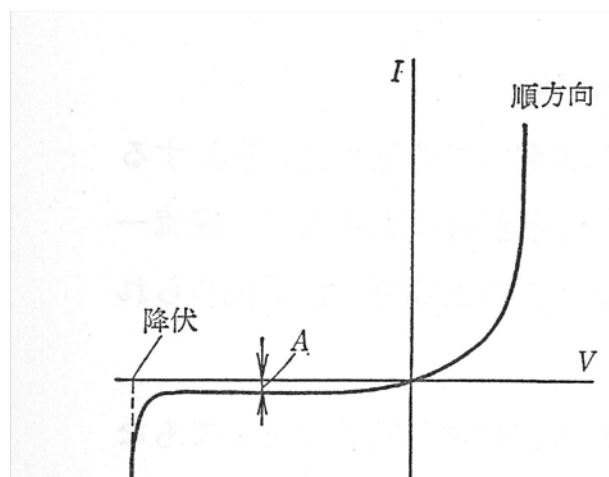


図 2-4 pn 接合の I-V 特性

*A は pn 接合の材料の特性と温度で決まる定数

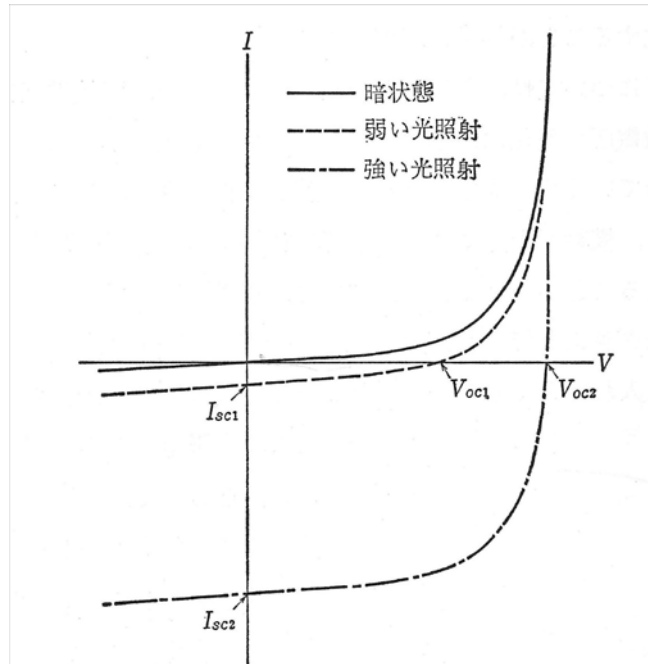


図 2-5 光照射による I-V 特性の変化

図 2-5 において、pn 接合の I-V 特性曲線と縦軸の電流 I との交点を短絡電流 (I_{sc})、横軸の電圧 V との交点を開放電圧 (V_{oc}) と称す。この電流 I のマイナス軸と電圧 V のプラス軸の領域が発電装置としての動作を示す。図 2-5 において光の強さに応じて短絡電流が増加していることがわかる。通常はこの領域の電流をプラスに置き換えて太陽電池の I-V 特性とする。太陽電池モジュールの特性はセルの I-V 特性を直列にしたものとなる。図 2-6 に太陽電池モジュールの典型的な I-V 特性を示す。

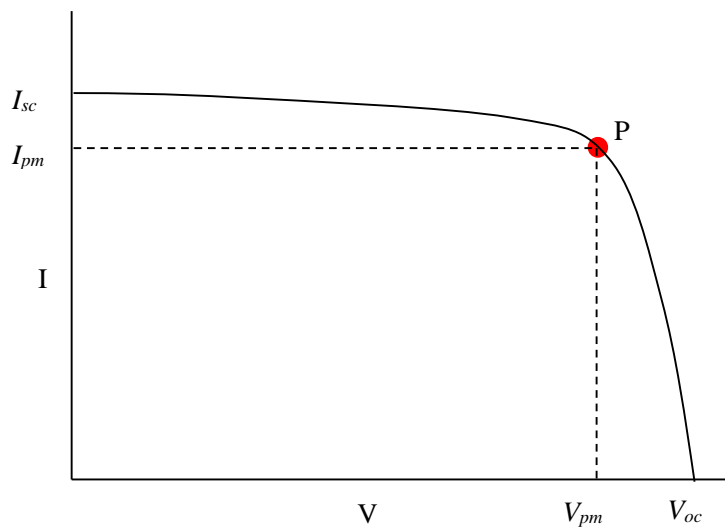


図 2-6 太陽電池モジュール I-V 特性例

図 2-6 においてモジュールの特性は短絡電流(I_{sc})、開放電圧(V_{oc})、最大出力動作電流(I_{pm})、最大出力動作電圧(V_{pm})で表される。これらの値は STC(標準試験条件)、日射強度 1000W/m^2 、AM(AIR MASS)1.5、周囲温度 25°C の条件、で測定した値を用いる。AM とは、赤道の大気の厚さを 1 とした場合、赤道では日射が垂直に照射すると考え、緯度により日射の侵入角度が変わり、この侵入角度による日射が通過する大気の厚さを補正した値であり、日本では AM1.5 とする。本研究で使用した、 10kW の太陽電池アレイを構成しているモジュールの定格を表 2-1 に示す。

表 2-1 10kW 太陽電池アレイのモジュール定格

項 目	定 格
I_{sc} 短絡電流	4.87A
V_{oc} 開放電圧	20.4V
I_{pm} 最大出力動作電流	4.43A
V_{pm} 最大出力動作電圧	15.8V

太陽電池から最大の電力を得るには、図 2-6 において、動作点 P で動作させる必要があり、この制御を最大電力制御と称し、太陽電池を発電機として使用する場合には必須の制御である。また、表 2-1 から分かるように、短絡電流は最大出力動作電流とあまり変わらない。即ち、太陽光発電システムの最大の特徴は、短絡電流が最大出力動作電流とほとんど変わらない定電流源特性に近いことである。従って、短絡事故が起こっても太陽電池に目立つような異変は外見上見つけることはほぼ不可能に近い。

2-3 本研究課題の意義

従来の商用システムは定電圧源であり、その短絡電流は柱上トランスなどの容量が支配し、数千 A から数万 A の電流が流れるため、バイメタルなどの過電流検出素子をブレーカに組み込み、短絡事故の保護を行ってきた⁽⁵⁾。一方、太陽電池では短絡しても定電流源特性となり過電流にならない。このため、バイメタルなどの従来の過電流保護素子を使うことが出来ない。したがって、太陽電池の短絡電流特性に合った短絡保護装置の開発研究を進めた⁽⁶⁾。また、太陽電池はタブ線の接続がはんだ付けで行われており、屋

外環境における使用において長期信頼性の点で問題がある。事実、前述したように経年劣化ではんだ付け部が接触不良を起こしホットスポットとなる事例が起こっている。この経年劣化を助長する因子の一つに、太陽電池の表面上にできる建物などの影がある。影の当たった太陽電池のセルは発電せず負荷となり発熱する。この発熱などによりタブ線のはんだ部分の接触抵抗が増加し、更に過熱し劣化を促進させる。このセルの異常温度監視技術として光ファイバによる温度測定の研究を行った⁽⁷⁾。さらにこのはんだ部分の過熱による劣化が進み、断線を起こすとアークを発生する。また、モジュールの接続はコネクタを使用しているがこれの品質不良による過熱⁽⁸⁾、離脱や、施工時の配線の余長不足が冬季の低温下の配線収縮に伴う張力によりコネクタを離脱させアークが発生する。アークの温度は数千度から一万度以上に達するため⁽⁹⁾、最悪火災になる。アークの発生は太陽電池においては末期的状況であり、このアークの発生を確実に検知し、迅速に解列することは太陽光発電システムの安全を維持するうえで非常に重要である。このアークの発生を確実に検知し、迅速に解列する技術の開発研究を行った⁽¹⁰⁾。

また、太陽電池の日射強度により出力が変動する特性は、家庭用太陽光発電設備が広域にわたって施設された状況や、メガソーラーシステムのように広大な面積を要する太陽光発電システムにおいて、雲などにより日射強度が突然低下するような状況下では、広域の発電電力が突然急激に低下するため、システムの安定した運転が難しくなり、系統動揺などを起こす。系統連系の基本技術の研究として、本研究では一石フォワードコンバータを使用したインバータによる系統連系実験研究、スナバ回路などの要素技術の開発研究をおこなった⁽¹¹⁾。

国策としての新エネルギーの普及促進において、太陽電池は旗頭と言える。この太陽光発電システムはノーメンテナンスで安全と考えられている。しかし、緒言で述べたように火災が起こっている。この火災に至る前の太陽光発電システムの自動検査技術、最悪状況のアーク検出遮断技術は太陽光発電システムの安全運用管理には必須の技術である。さらに今後、増設されるであろう蓄電池などを考慮すると、現状の系統連系技術は十分成熟しているとは言いがたい。本論文で扱った各種異常検出遮断技術および系統連系インバータ技術の研究はまだ不十分ではあるものの、太陽電池の異常検出、保護技術に関する先駆的な研究であり、本論文は、将来太陽光発電システムの安全を確保する基礎技術となりえる意義があるものと考えている。

第2章 参考文献

- (1) 太陽光発電用語, JIS C8960 : (2012)
- (2) 「太陽発電システムの設計と施工」,一般社団法人太陽光発電協会,p.12,(2011-9)
- (3) 辻 高輝 : 「太陽電池(Solar Cell)」, パワー社 pp.19~36, (1993-7)
- (4) 桑野幸徳 : 「太陽電池とその応用」,パワー社,pp.9-14,(1992-1)
- (5) 服部 謙 : 「ノーヒューズブレーカの原理と適用」,電気書院,pp.21-33,(1978-5)
- (6) 安藤健志 ,坂 斉典 ,二宮貴之 ,市川智彦 ,雪田和人 ,依田正之 ,後藤泰之 ,
一柳勝宏 : 「太陽光発電システムにおけるインテリジェント保護装置」
太陽エネルギー学会論文誌,Vol.37,No.6,pp.41-48,(2011-11)
- (7) 安藤健志 ,酒井浩太 ,雪田和人 ,依田正之 ,後藤泰之 ,一柳勝宏 : 「光ファイバを用
いた太陽電池モジュールの温度計測研究」,太陽エネルギー学会論文誌,Vol.40,No.4,
pp.43-49,(2014-7)
- (8) Maruks Kohler : 'Arcing Potential in contacts and plug ',International
Workshop,Arcing in photovoltaic DC-Arrays Potential dangers and possible
solutions,BHF Bulgdorf,Switzerland,N0.4,p.13,(2007-10)
- (9) 日高邦彦著 : 「高電圧工学, 新・電気システム工学(TKE-13)」, 数理工学社,
pp.83-87,(2009-1)
- (10) 安藤健志 ,酒井浩太 ,雪田和人 ,後藤泰之 ,一柳勝宏 ,依田正之 ,宮本敦史 : 「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」, 太陽エネルギー学会論文
誌,Vol.40,No.6,pp.39-44 ,(2014-11)
- (11) K.Matsui,K.Ando et.al.,Utility-interactive photovoltaic power
conditioning systems with forward converter for domestic applications, IEE
Proceedings B, Electric Power Applications, Vol. 147, No. 3, pp. 199-205 (2000-5)

第3章 太陽光発電システムにおける インテリジェント短絡保護装置の開発研究

3-1 短絡保護装置プロトタイプ

欧米では太陽電池の火災の報告がある⁽¹⁾。日本でも、設置してから数年以上経過した太陽光発電システムにおいて、何らかの故障が発生しているとの報告がある^{(2),(3)}。太陽電池の普及に伴い、晴天の真昼に太陽電池が発電状態で地震が発生した場合、太陽電池の破壊や電線異極の接触などにより極間短絡を起こし、この短絡部が開放した場合アークの発生による火災が多発する可能性が高くなることが予想される。この考えをもとに簡単に手に入る材料で、極間短絡でのアークを未然に防ぐために、短絡保護装置のプロトタイプを作成した⁽⁴⁾。この外観を図3-1、装置の構成と実験回路を図3-2に示す。

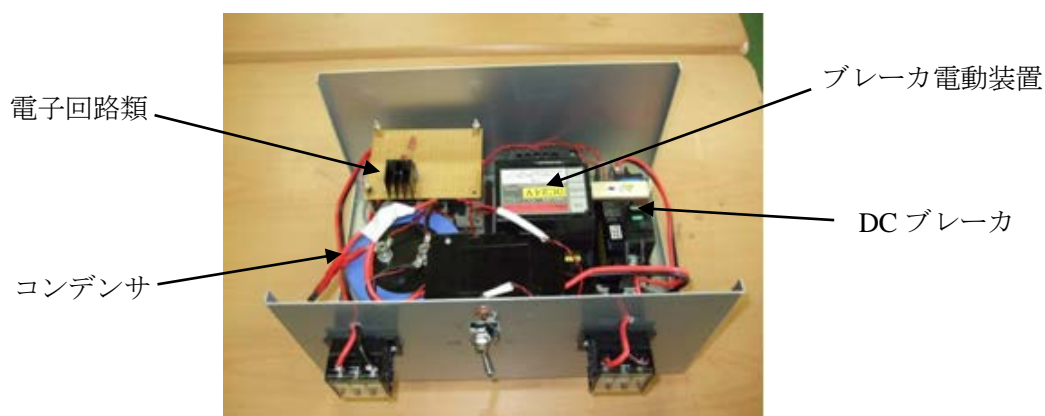


図3-1 初期の太陽電池用短絡保護装置

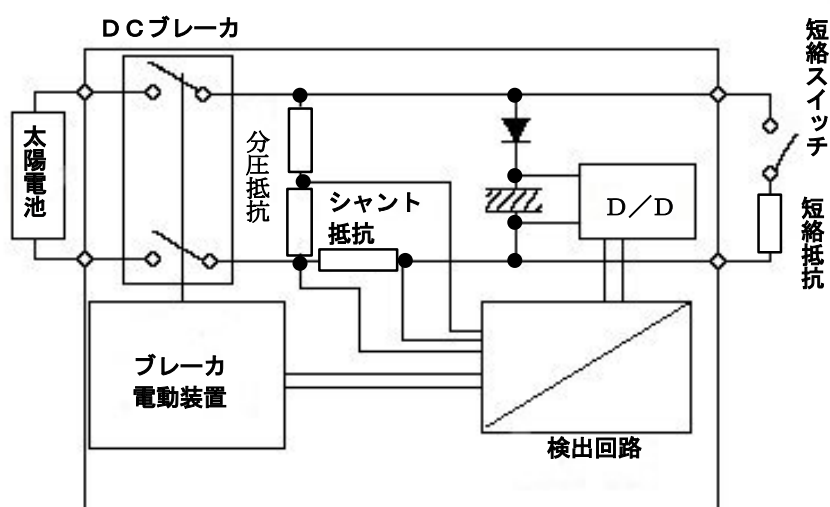


図3-2 太陽電池用短絡保護装置プロトタイプ回路構成と実験回路図

3-2 実験用太陽光発電システムの構成

プロトタイプ短絡保護装置の実験に使用した太陽光発電システムの概要図を図 3-3 に示す。1 スtring は約 100W のモジュール 6 枚を直列にし、公称 200V、3A、これを 5 枚並列にした 3kW のアレイである。太陽電池モジュール 1 枚当たりの定格値を表 3-1 に示す。図 3-4 にアレイの外観を示す。このアレイは設置場所から中継端子箱を経て、約 40m 離れた実験室に設置された接続箱、インバータ、昇圧トランスを介して、低圧系統に連系されている。

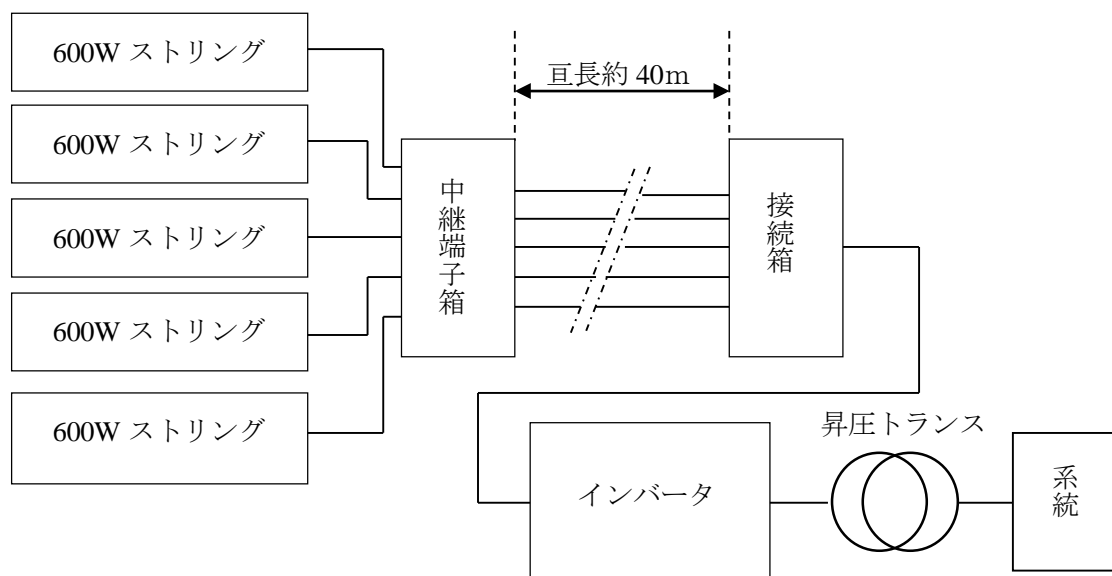


図 3-3 3kW 太陽光発電システム概要図

表 3-1 太陽電池モジュール（1枚）の定格値

最大出力	102W
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



図 3-4 アレイの外観

3-3 太陽光発電システムのストリング I-V 特性近似式の導出

太陽光発電システムのストリングの各日射強度における I-V 特性と最大電力動作点を把握し、短絡保護装置の動作しきい値を決めるための近似式の導出を行った。図 3-5 に太陽電池の等価回路を示す⁽⁵⁾。

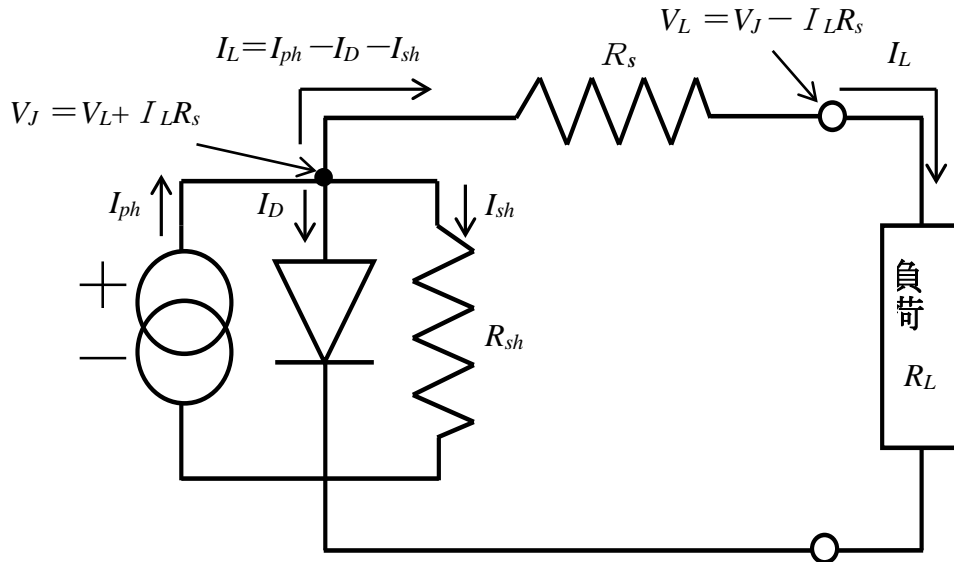


図 3-5 太陽電池の等価回路⁽⁵⁾

この等価回路から式(3.1)が求まる。

$$I_L = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (3.1)$$

I_L : 負荷に流れる電流

I_{ph} : 光発生電流

I_D : p n 接合の順方向電流

I_{sh} : 接合の漏れ電流

また、電流と電圧の関係は I_D については式(3.2)、 I_{sh} については式(3.3)となる。

$$I_D = A \left(\exp \frac{qV_j}{BkT} - 1 \right) \quad (3.2)$$

A : p n 接合の材料特性と温度によって決まる係数

B : 材料によって決まる係数

k : ボルツマン定数

T : 絶対温度

V_j : 接合にかかる順電圧

$$I_{sh} = \frac{V_j}{R_{sh}} \quad (3.3)$$

R_{sh} : 分路抵抗(格子欠陥による)

q : 電子の電荷($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)

上式をまとめると太陽電池の出力端子間で観測される I-V 特性を表す一般式(3.4)が得られる。

$$I_L = I_{ph} - A \left\{ \exp \frac{qV_j}{BkT} (V_L + I_L R_s) V_L - 1 \right\} - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

V_L : 太陽電池出力電圧(負荷電圧)

式(3.4)において、個々の太陽電池固有の物性値 A, B および、 R_s, R_{sh} があるためこれらの数値が分からなければ、式(3.4)から簡単に I-V 特性を得ることは難しい。一般に太陽電池の内部抵抗 R_s は非常に小さく、 R_{sh} は非常に大きい。一例として、ある太陽電池は $R_s = 0.141 \Omega$ 、 $R_{sh} = 2000 \Omega$ であり、 $R_s \ll R_{sh}$ である。ここで、式(3.4)において右辺第3項は分母が非常に大きいことから、ゼロに近似する。また、右辺第2項の $I_L R_s$ は、 R_s が非常に小さいことから、これもゼロに近似する。

前述の近似から式(3.4)は式(3.5)に変形できる。

$$I_L = I_{ph} - A \left\{ \exp \frac{qV_j}{BkT} V_L - 1 \right\} \quad (3.5)$$

式(3.5)で、 $\frac{qV_j}{BkT} = C$ とすると、式(3.5)は式(3.6)となる。

$$I_L = I_{ph} - A (\exp(C V_L) - 1) \quad (3.6)$$

日射による電流 I_{ph} 、日射強度 P_w 、日射による電流の定数 K 、とおくと式(3.7)となる。

$$I_{ph} = K P_w \quad (3.7)$$

短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、最大電力時の電圧 V_{pm} 、電流 I_{pm} である。またこれらと式(3.6)、

(3.7)から式(3.8)を得る

$$\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{pm}} = \frac{\exp(C V_{oc}) - 1}{\exp(C V_{pm}) - 1} \quad (3.8)$$

式(3.8)に於いて C 以外は表 3-1 から既知なので式(3.8)に各数値を入れ、式(3.8)の右辺と左辺が等しくなるよう C をもとめ、式(3.6)で $V_L = V_{oc}$ の時 $I_L = I_{ph} = 0$ から、 A を求めた。

これらの数値から図 3-3 の 600W スtringの電流の近似式(3.9)を導出した。

$$I_L = 3.25/1000P_w - A(\exp(CV_L) - 1) \quad (3.9)$$

ここで算出された定数 A と C を以下に示す。

$$A = 2.586 \times 10^{-6}$$

$$C = 0.05073357$$

式(3.9)と定数 A, C で日射強度 P_w を $200\text{W}/\text{m}^2$ 毎に $1000\text{W}/\text{m}^2$ までグラフ化したものを図 3-6 に示す。同図に各日射強度における最大電力点も表示してある。

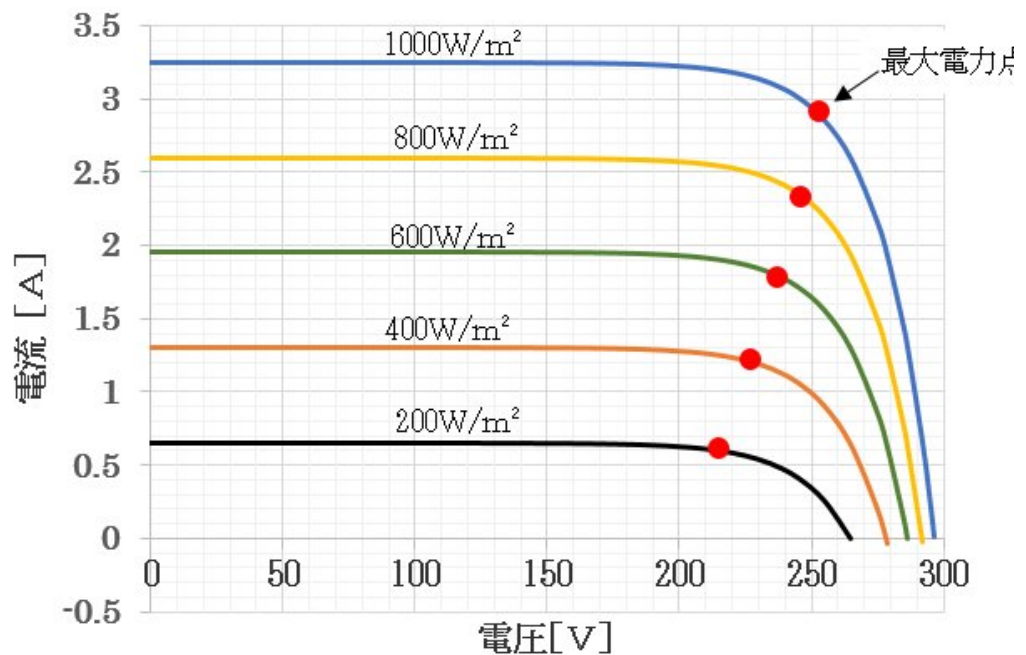


図 3-6 近似式による各日射強度での I-V 特性

図 3-6 では各種抵抗を無視しているため、赤丸で示した最大電力点は 200V 以上に存在し、最大電力点より左側の電流源領域では電流値が一定になっている。実際は負荷抵抗が小さくなるにつれて、電流値は漸増し、短絡時点(電圧 0V)では通常使用する電流に比べ 10~20%程度大きくなる。

3-4 太陽電池ストリングの短絡検出条件の検討

図3-6に示したように、太陽電池は同じ日射強度であればその短絡電流は最大電力制御された電流と大差がない。このため、従来の商用交流系統の短絡保護装置に使用されてきたバイメタルなどの過電流保護素子では短絡電流を検出することはできない。また、太陽電池は短絡時には電圧がゼロに近くても電流は流れる。即ち、太陽電池ストリングが短絡する場合、電流にほとんど変化はなく、動作電圧が短絡抵抗に応じて低下するという特性がある。インバータの電圧制御特性にもよるが、逆潮流できる日射強度がある場合、最大電力制御が支配的であれば最大電力点での電圧以下で動作することはほとんどないと考えられる。従って、太陽電池の動作電流と動作電圧を監視し、電流と電圧に適当なしきい値を設けることで異常範囲と正常範囲を識別し、短絡保護ができるものと考えた。プロトタイプは3kWの太陽光発電システムを想定し、短絡検出のための各しきい値を実測データから決定することにした。終日晴天に近い日の日射強度の経時変化を図3-7、系統連系インバータに接続されたストリングの直流電流と電圧の変化

(I-V特性)を図3-8に示す。

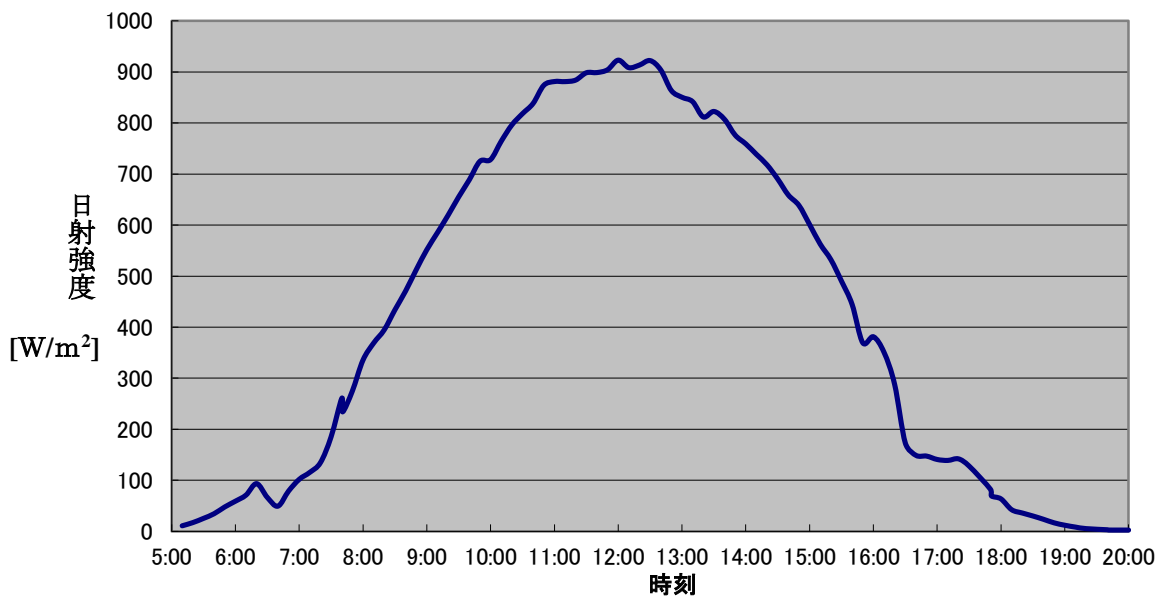


図3-7 日射強度経時変化 (2005年6月13日)

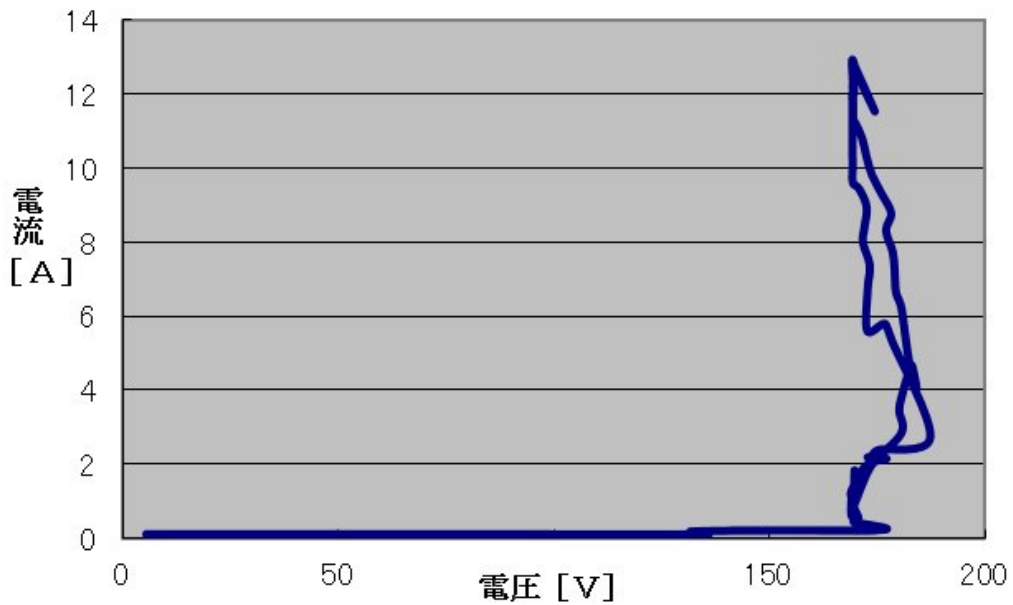


図3-8 インバータ直流入力I-V特性 (2005年6月13日)

図3-8の終日晴天の日のインバータの直流入力部のI-V特性から、太陽電池アレイの動作特性がわかる。理論式による検討とは異なり、ほとんど170Vの定電圧特性を示している。日射強度が弱いと考えられる朝方、または夕方は電圧が190V程度になっているが170Vを下回ることはなさそうである。太陽電池アレイの電流は最大13Aであり、1ストリングあたり最大2.6Aである。これらの数値から実験装置の電圧のしきい値 V_s は不要動作を避けるため150V、電流のしきい値 I_s は確実に動作させるため1Aに設定することにした。この異常判定条件を図3-9、表3-2に示す。

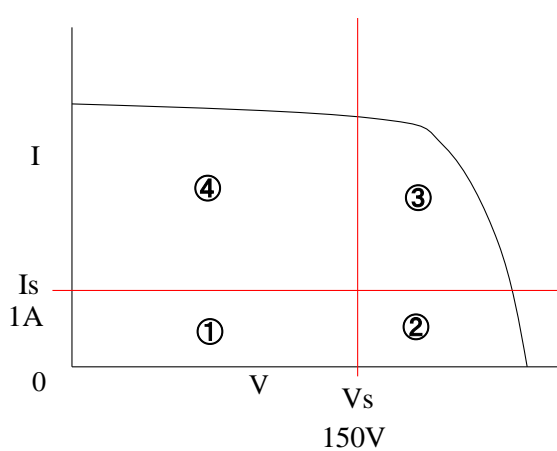


表3-2 異常判定表

	①	②	③	④
I	< I_s	< I_s	> I_s	> I_s
V	< V_s	> V_s	> V_s	< V_s
B	ON	ON	ON	OFF

*Bはブレーカの状態を示す

図3-9 I-V特性上の異常判定しきい値

3-5 プロトタイプ動作予測と実験結果

図3-10は式(3.9)を使用し、日射強度をパラメータとし、太陽電池ストリングを短絡する抵抗値を5、10、20、50Ωとした場合の推定動作点を示したものである。試作した装置を図3-2のようにストリングに接続し、各日射強度時に前述の抵抗で実験回路を短絡すれば、図3-10の各日射強度のI-V特性と各抵抗線の交点が短絡保護装置の動作点となる分布が得られることが予測される。

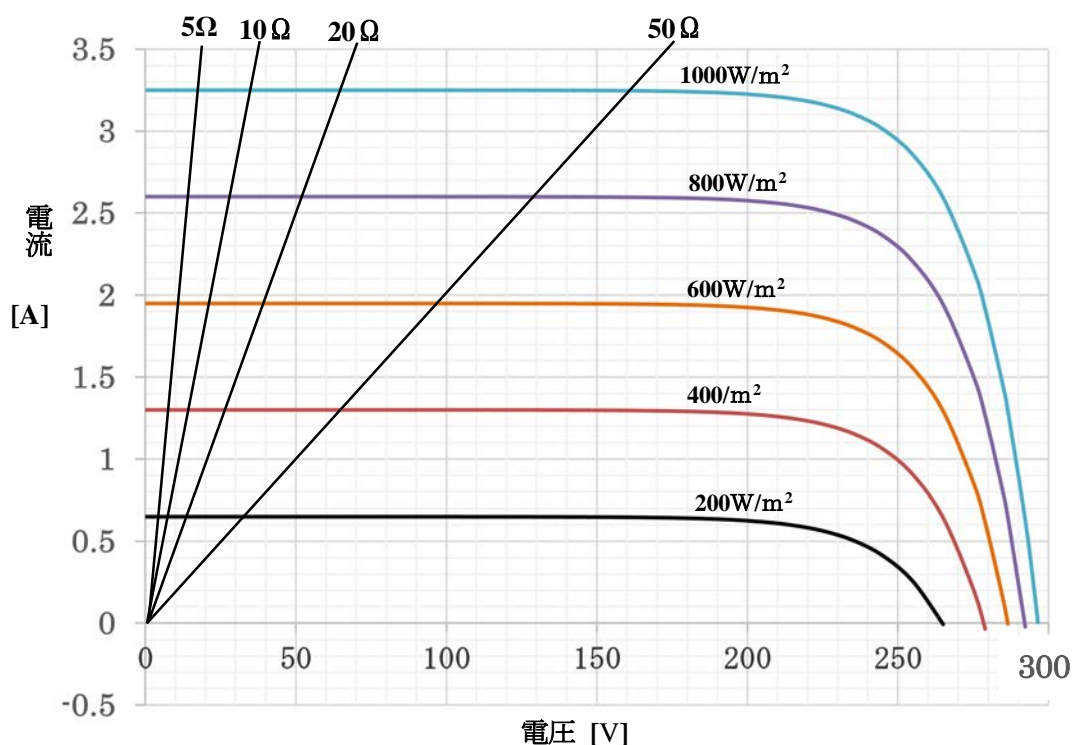


図3-10 各日射強度と抵抗による短絡動作推定図

試作したプロトタイプ短絡保護装置と600Wの太陽電池ストリング、および短絡保護装置の負荷側に各種短絡抵抗を図3-2に示したように接続し、2009年4月9日に各種日射強度のときに短絡スイッチで短絡した場合の短絡保護装置の動作実験、および2009年4月13日夕方、特に電流しきい値近傍での動作実験を行い、各種抵抗と日射強度の条件における電流、電圧データから動作点を得た。図3-11は、各試験条件における短絡保護装置の動作点および不動作点を太陽電池ストリングのI-V平面上にプロットしたものである。○印は装置が動作し太陽電池を短絡点から解列したことを示し、×印は短絡保護装置が動作しなかったことを示す。この600Wストリングでの実験結果では、装置の動作特性は、1A以上、150V以下で動作し、1A未満では動作していない。また、各

抵抗の動作点も図 3-10 の推定動作点とほぼ同じ傾向を示しており、設計どおりの動作特性を示している。これらの結果から、製作した装置は設定値で正確に動作していることが確認できた。測定結果は直線状に並ぶ○と×だけであるが、目安として計算で求めた $1000\text{W}/\text{m}^2$ の I-V 特性と抵抗の直線を併記してある。

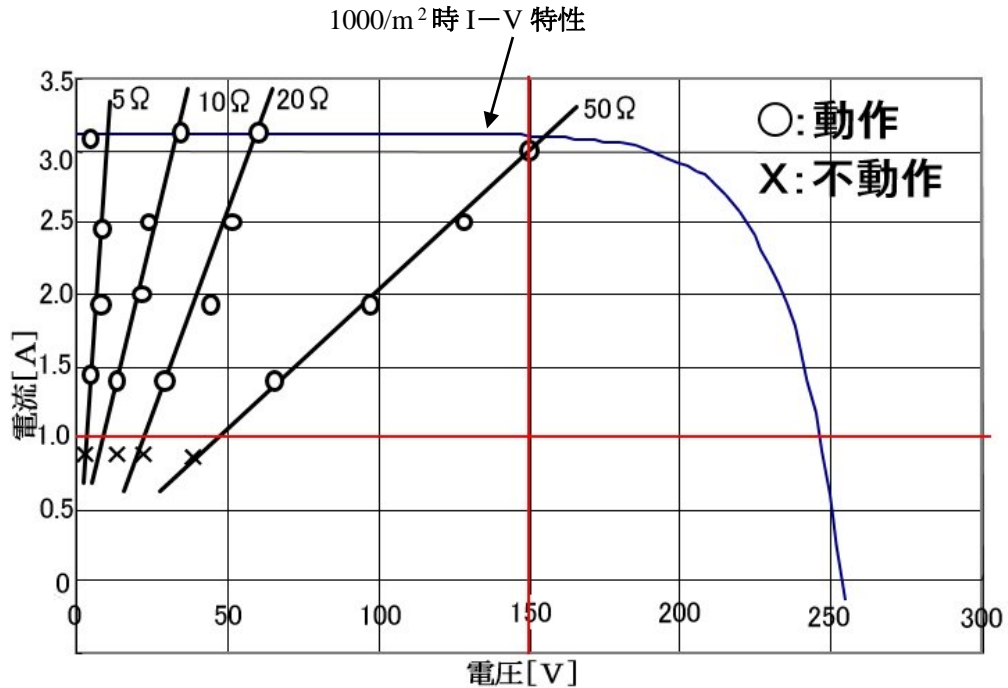


図 3-11 プロトタイプの短絡検出動作実験結果

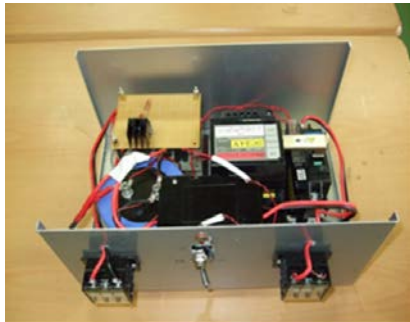
3-6 インテリジェント短絡保護装置

3-6-1 インテリジェント短絡保護装置の概要

前節までのプロトタイプはアナログ回路による異常判断回路、ブレーカ、ブレーカ電動装置などによる構成であり、太陽電池の短絡保護機能の原理実験用試作器であった。筆者は、短絡保護装置のマイコンによる異常判断、小型直流リレーなどを使用し、小型化、高機能化の研究を続けてきた⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。

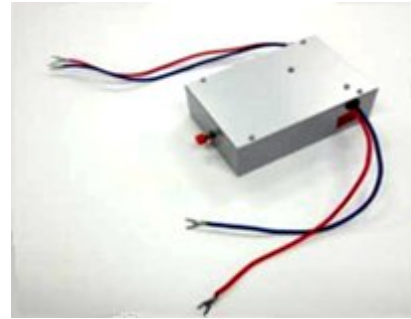
本節、本項ではプロトタイプの短絡保護装置の小型化を進めると共に、近距離無線ネットワーク用の通信素子を実装し、パソコンによる遠隔監視機能（モニタリング機能）を追加したインテリジェント化も行った。図 3-12 にプロトタイプとインテリジェント短

絡保護装置（インテリジェントタイプ）の外観図を比較して示す。プロトタイプとインテリジェントタイプの体積比は12：1であり大幅な小型化を実現した。



(a)プロトタイプ

(W300×H150×D220)



(b)インテリジェントタイプ

(W100×H150×D50)

図3-12 プロトタイプとインテリジェントタイプの外観比較

3-6-2 インテリジェント短絡保護装置の単体での動作確認実験

本項では、インテリジェントタイプの動作しきい値条件をプロトタイプと同じしきい値条件($I \geq 1A, V \leq 150V$)で動作するようにマイコンのプログラムを設定し、図3-13に示すインテリジェント短絡保護装置の実験回路で、図3-3に示した3kWの太陽光発電システムを使用し、終日快晴の日に各種抵抗、各種日射強度でインテリジェント短絡保護装置の短絡保護動作実験を行った。

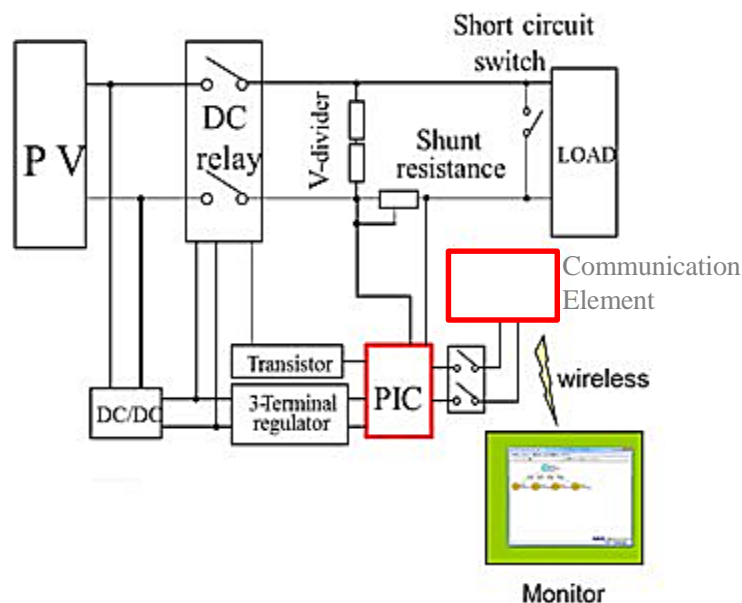


図3-13 インテリジェント短絡保護装置の実験回路

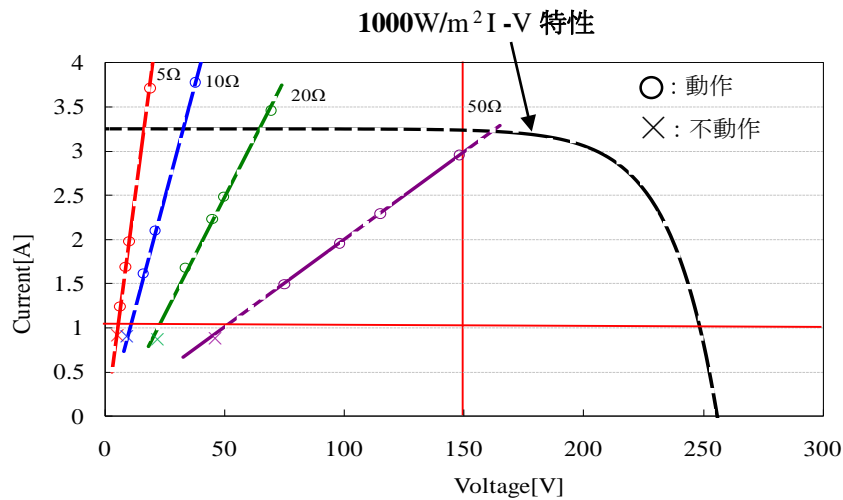


図 3-14 インテリジェント短絡保護装置の動作実験結果

インテリジェント短絡保護動作実験結果を図 3-14 に示す。プロトタイプと同様、設定した動作条件領域で動作していることが分かる。

太陽電池モジュールの短絡電流はしきい値電流未満においては遮断されない。この場合電流値が小さく、この電流が直接の原因で火災になることは無いと考えられる。しきい値未満の短絡電流は、快晴日の明け方や夕方、曇天や雨天の日中の日射強度が小さい状況で発生する。しかし、必ず日中の晴れた十分な日射強度がある時に短絡状態が継続していれば、短絡電流はしきい値を超えるため短絡検出が可能である。交流系統は短絡時に数千 A 以上の大電流を伴い、瞬発的に導体の溶断などが起こり大きなアークのエネルギーによる波及事故も起こりやすい。一方、太陽電池の短絡時の電流は定格電流の 1.1 ～ 1.2 倍程度であり、短絡だけでは事故には至らない。逆に短絡を生じてもしせいぜい発電電力の低下としてしか認識されず、しかもこの電力低下はよほど人が注意していなければ気づかれることはない。短絡点の開放に伴うアークにより異常過熱や火災などの二次的な災害が発生して初めて人は異常に気が付く。従って、太陽電池の短絡は従来の交流系統の短絡事故に比べ事故として認識されないが、事故点解列までの時間的な余裕は交流系統に比べて非常に大きい。この点、本研究の短絡保護装置は太陽電池の短絡保護において十分機能する。問題はこの太陽電池の短絡が人に認識されず、短絡点が開放したときにアークを発生し火災につながる点であり、本研究での短絡保護装置の価値はアークに至る前の、人が認識しにくい短絡が生じた状況で短絡点への供給電力を解列し、短絡点が火災事故へ波及することを未然に防ぐ点にある。

3-6-3 インテリジェント短絡保護装置の遠隔監視実験結果

本項では表題の実験を図3-3に示した3kW太陽光発電システムで実験を行った。各ストリングのI-V特性を点検したところ、1ストリングが異常を示し、健全な4ストリングで実験を行うことにした。点検は太陽光発電システム設置後13年目に行っている。図3-15に点検結果を示す。5組のストリングのうち1つがモジュール1枚分だけ発電せず、開放電圧が低下している。図3-16にインテリジェント保護装置の動作確認実験回路を示し、図中ではストリングNo.iをPVi、インテリジェント保護装置No.iはDevice.jというように各々示す。(i,jは1~4)

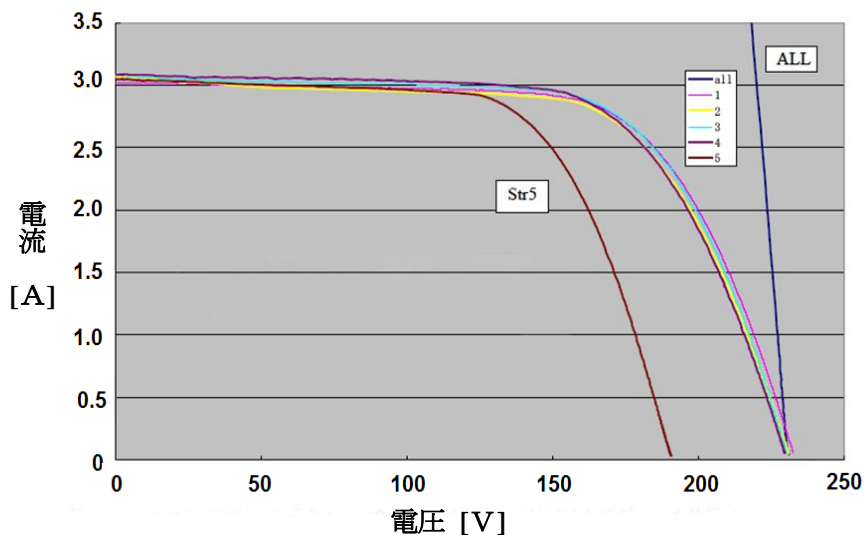


図3-15 各ストリングI-V特性

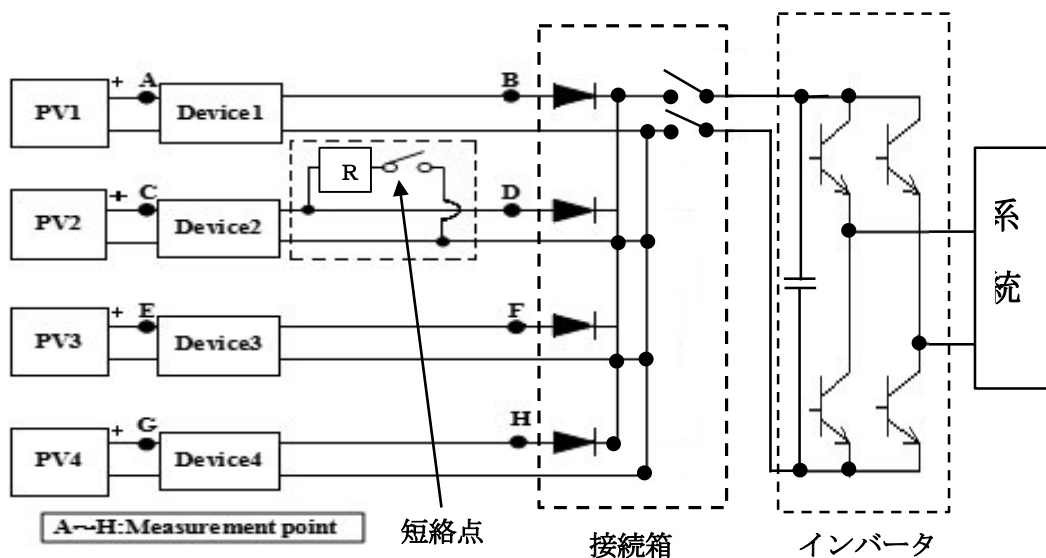
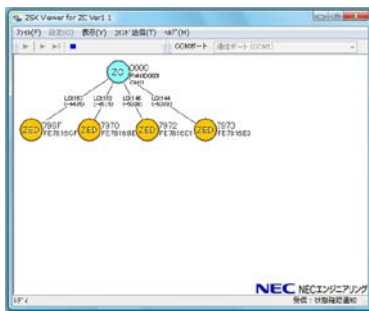
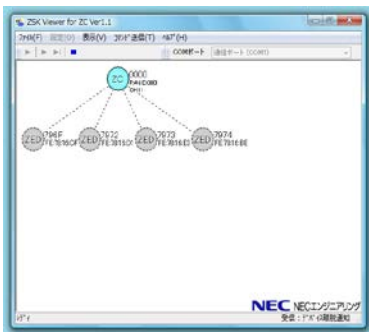


図3-16 インテリジェント保護装置の動作確認実験回路

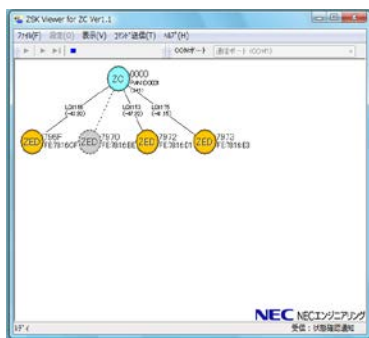
図3-16のインテリジェント保護装置の動作確認実験回路において、ストリング No.2に短絡点を設け、2種類の抵抗値で短絡させる。実験条件は以下に示す3種類、(a)正常に連系運転している状態、(b)日射強度 593W/m^2 、抵抗 5Ω で短絡した状態、(c)日射強度 632W/m^2 、抵抗 60Ω で短絡した状態である。この3種の条件における、PCのモニタリング画面を図3-17(a)、(b)、(c)に各々示す。また、条件(b)、(c)における4ストリングの短絡保護装置の入力電圧と出力電圧、および電流の測定結果を図3-18と図3-19に各々示す。



(a) 正常時



(b) 5Ω 短絡時



(c) 60Ω 短絡時

図3-17 各実験条件のモニタ

図3-17、(a)、(b)、(c)其々においてモニタ画面の4つの○印が各ストリングに設置された短絡保護装置の動作状態を示している。○印が黄色の場合は正常に通電していることを示し、灰色の場合は異常などにより通電を止めた状態を示している。各々の条件での結果を以下に述べる。

(a)は正常時を示しており、すべての○が黄色になっており、4ストリング全部正常に通電していることを示している。

(b)は日射強度 593W/m^2 、抵抗 5Ω でストリング No.2を短絡した状態である。すべての○が灰色である。すべてのストリングの短絡保護装置が解列動作し、通電が停止していることを示している。

(c)は日射強度 632W/m^2 、抵抗 60Ω で短絡した状態である。ストリング No.2の短絡保護装置のみが解列動作し通電が停止していることを示している。

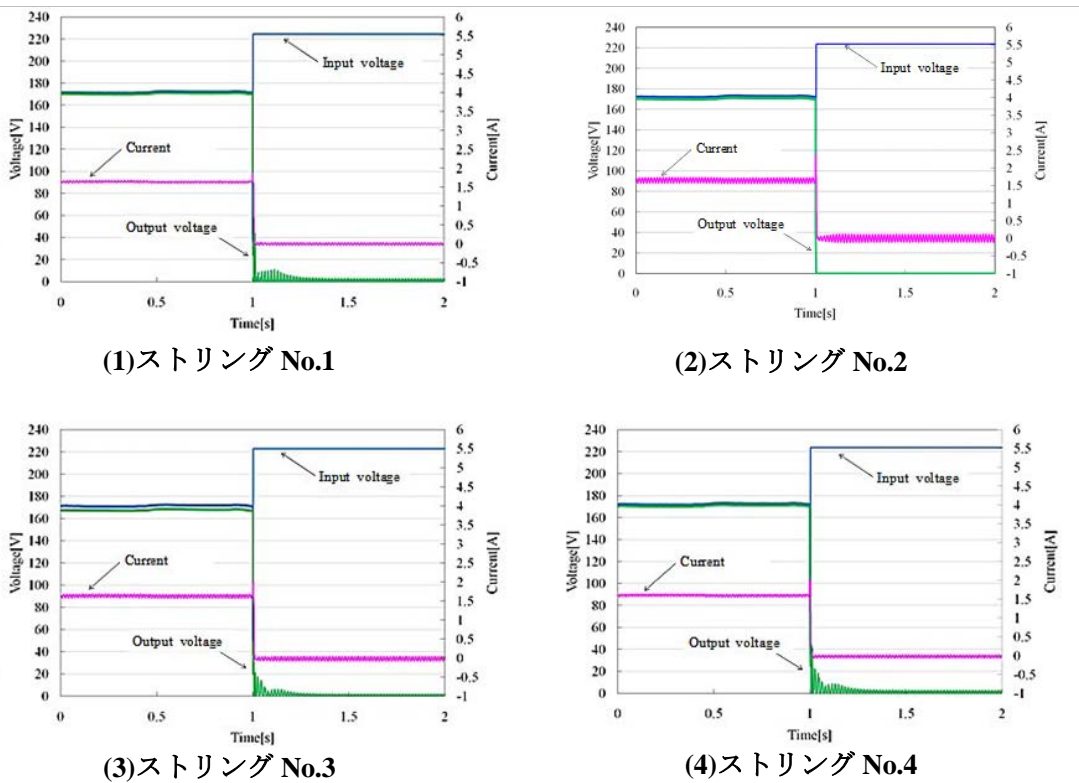
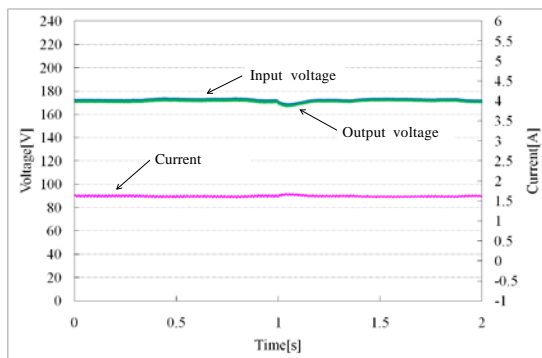
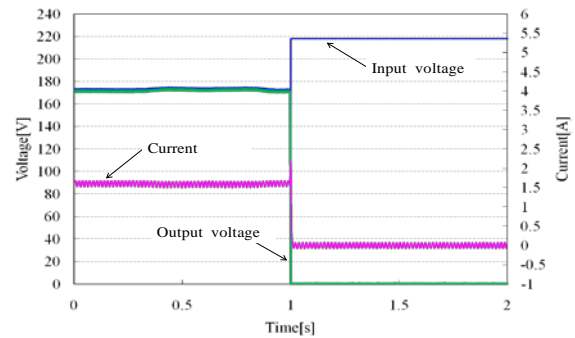


図 3-18 実験条件(b)での各ストリングの電圧、電流

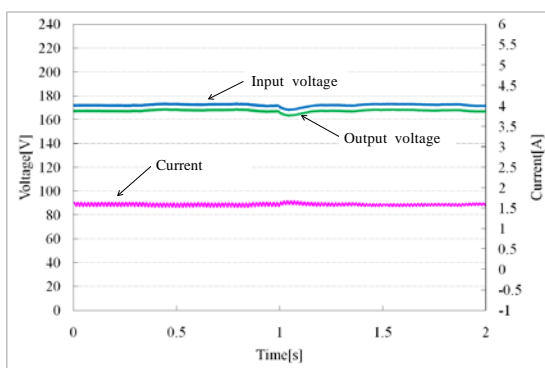
図 3-18、図 3-19 において、各ストリング各々の短絡保護装置の入力電圧が青、出力電圧が緑、電流が赤である。図 3-18 の実験条件(b)では図 3-17 各実験条件のモニタ(b)の動作で確認したように、すべての短絡保護装置が解列動作し、通電が停止している。どのストリングでも、停止前の入力電圧はインバータの制御電圧、約 170V を示しているが、ストリング No.2 を短絡したと同時に、全てのストリングの短絡保護装置が同時に動作し給電回路を解列している。この結果すべての短絡保護装置の入力電圧はストリングの開放電圧、約 230V になっている。一方、出力電圧は全て最終的には 0V になるが、ストリング 2 以外には振動が認められる。ストリング No.2 は抵抗短絡により瞬時に太陽電池の入力電圧が瞬時にほぼ 0V になったためである。他の短絡保護装置の出力電圧はストリング No.2 の脱落により、インバータのコンデンサの急激な電圧変化に伴う直流系統の配線のインダクタンスとコンデンサのキャパシタンスによる振動を起こしたものと推測される。電流はどのストリングも最初 1.5A であったものが、解列と同時に 0A になっている。どのストリングの電流波形も遮断時に一度跳ね上がっている。また全てのストリングの電流に高周波が重畳しているように見える。通信素子の電波が高周波が短絡保護装置を介して重畳した可能性がある。



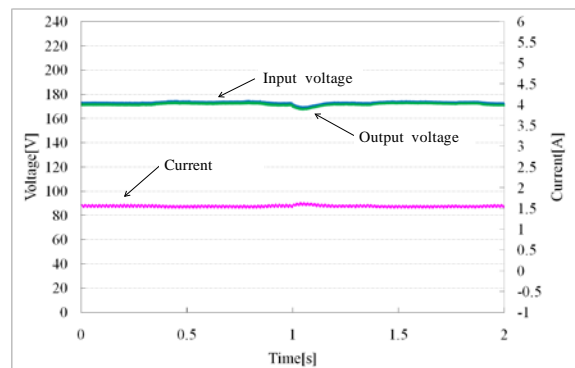
(1)ストリング No.1



(2)ストリング No.2



(3)ストリング No.3



(4)ストリング No.4

図 3-19 実験条件(c)での各ストリングの電圧、電流

図 3-19 実験条件(c)では図 3-17 の各実験条件のモニタ(c)の動作で確認したように、短絡を起こしたストリング No.2 の短絡保護装置 No.2 だけが解列動作し他は解列していない。ただし、短絡保護装置 No.2 が動作した時刻に他の電圧が多少動揺している。全てのストリング電圧は 160~165V に低下しているが、0.2 秒ほどで 170V 程度に回復している。これは 4 ストリングのうち 1 ストリングが脱落したことで、全直流電力の供給が 75% に落ち込み、インバータのコンデンサ電圧が低下したが、短絡抵抗が 60Ω と大きく、ストリング No.2 以外の太陽電池の電圧はしきい値電圧 150V 以下にならず、全ストリングの解列に至らなかったものと考えられる。また、実験条件(b)ほどではないが、電流に高周波が重畳している。

3-6-4 実験結果検討

プロトタイプ of 太陽電池ストリング単位の短絡保護装置の保護アルゴリズムをインテリジェント短絡保護装置のマイコンにプログラム化し、ストリング単位での動作確認において良好な結果を得ることができ、プロトタイプとの体積比で 1/12 と小型化できた。さらに、通信素子の採用で遠隔監視機能を追加し、系統連系インバータが稼働している太陽光発電システムで短絡保護実験と遠隔監視実験を行い、短絡保護とモニタリングの整合性でも良好な結果を得た。短絡抵抗が 60Ω の場合、短絡ストリングのみが解列したことをモニタで確認することができた。しかし、短絡抵抗が 5Ω の場合、1 ストリングの短絡で 4 ストリングすべてが解列した。これは短絡抵抗が小さい場合、太陽電池からの供給電力が 75% に下がり、インバータが系統に電力を送り続け、瞬間的にコンデンサ電圧が短絡検出しきい値電圧 150V を下回る。太陽電池の電圧がコンデンサの電圧に追従し直流系統全体の電圧が 150V 以下に下がり、この結果全ストリングの短絡保護装置が動作したものと考えられる。この場合、モニタ表示も全てのストリングが異常という結果を示すことになり、異常ストリングの特定ができない。しかし、異常の発生をモニタで確認でき、全ストリングが解列したことは、安全サイドに異常を起こした太陽光発電システムを保護できることには変わらない。最低限、異常ストリングを解列し、異常をモニタで設備管理者などに伝えられる結果を得ることができ、太陽光発電システムの遠隔監視技術を一步進展することができた。

3-7 結論

小型化、高性能かつ遠隔監視できる太陽光発電システムの短絡保護装置を開発できた。太陽電池の短絡保護アルゴリズムをプログラム化し、マイコンに組み込み、小型高性能リレーを使用し短絡保護装置を小型化するとともに、近距離通信素子を追加し短絡保護装置の動作状態を無線で PC に送りモニタリングできることを実証した。太陽光発電システムの異常監視における遠隔監視は必須であり、さらに無線で事故の発生を設備管理者などに通報できることは重要である。無線で異常を PC まで送れることは、設備管理者などの携帯電話などに通報できることを意味し、なおかつ、異常検出保護も行えることは理想に近い。これらを実証できたことは、次世代の電気設備管理技術の進展にかなり寄与できる成果を出すことができたと言える。

第3章 参考文献

- (1) Photon, Photovoltaic Magazine International, pp102-113, (2009-8)
- (2) 加藤和彦:「太陽光発電システムの不具合事例ファイル PVResQ! からの現地調査報告」, 日刊工業新聞社, (2010-7)
- (3) 加藤和彦:「太陽光発電システムの不具合事例の分析・評価(1)」, 太陽エネルギー vol.33, No.4 pp.69-74, (2007)
- (4) 安藤健志, 依田正之, 雪田和人:「太陽電池用短絡保護装置の基礎実験」, 電気設備学会全国大会講演論文集, F-6, pp.329-332, (2009-8)
- (5) 辻 高輝:「太陽電池 (Solar Cell)」, パワー社, pp.19-36, (1993-7)
- (6) 藤本晃司, 香野圭佑, 市川智彦, 雪田和人, 依田正之, 後藤泰之, 一柳勝宏, 安藤健志:「太陽光発電システムにおける短絡保護装置の開発」, 電気学会論文誌 B, Vol.130, No.2 pp.259-260, (2010-2)
- (7) 香野圭佑, 藤本晃司, 依田正之, 雪田和人, 安藤健志:「太陽光発電システムのための短絡保護装置の開発」, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, No.117, pp.04-3-04-4, (2009-8)
- (8) 坂斉典, 二宮貴之, 市川智彦, 雪田和人, 後藤泰之, 一柳勝宏, 安藤健志:「太陽光発電におけるインテリジェント保護装置の開発」, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, No.149, pp.09-19-09-20, (2010-9)
- (9) 安藤健志, 坂斉典, 二宮貴之, 市川智彦, 雪田和人, 依田正之, 後藤泰之, 一柳勝宏:「太陽光発電システムにおけるインテリジェント保護装置」, 太陽エネルギー学会論文誌, Vol.37, No.6, pp.41-48, (2011-11)

第4章 光ファイバによる太陽電池モジュールの異常検出の研究

4-1 概要

太陽光発電システムを導入した需要家は、保守・点検に対してほとんど無関心である。このため、太陽光発電システムの太陽電池モジュール単位や、ストリング単位で故障していても発電量が若干低下するだけで、需要家が故障発生に気づかない事例が多々あると考えられる。特に、設置してから数年以上経過した太陽電池においては、ホットスポット現象などの様々な不具合や故障が報告されている。一方、太陽電池モジュールの温度を測定することで太陽光発電の不具合診断について多面的な検討も行われている^{(1),(2)}。太陽電池モジュールの温度測定に、赤外線カメラを用いる方法^{(1),(3),(4)}、高周波電圧を太陽電池に印加し、配線路探査器で太陽電池モジュール表面のすべてのタブ線をなぞり、接触抵抗の異常個所を探す方法などが提案されている⁽¹⁾。しかし、太陽電池の設置状況を考慮すると、これらの手法により、住宅などに設置された太陽光発電システムの太陽電池モジュール裏面温度を測定することは困難であることが想定される。

そこで、本章では、光ファイバとラマン散乱光の原理を応用した温度測定技術⁽⁵⁾を太陽電池モジュール裏面温度測定に用いる手法を提案している⁽⁶⁾。この手法は、時々刻々変化する温度特性が把握でき、太陽電池モジュールの不具合に対しても即座に見検できるものと期待できる。この手法の有効性をさらに追及するため、10kWの太陽光発電システムを用いて実験検証したので、その方法と結果を報告する⁽⁷⁾。

4-2 ラマン散乱光を用いた温度測定方法

今回使用したラマン散乱光を用いた温度測定方法の原理と散乱光の強度変化を図4-1と図4-2に各々示す。光ファイバにレーザーパルス光が入射するとファイバの各所で各種後方散乱（反射）が発生し、その入射光の一部が入射部分に戻ってくる。これらのうちラマン散乱光には、レイリー散乱光、ストークス光、アンチストークス光の3種類がある。光パルス波長より長波長側に発生するストークス光と短波長側に発生するアンチストークス光の強度比は温度に比例して変化する。この2つの波長の違いを分離検出し、その強度比から光ファイバ各部の温度を求める。温度測定箇所に関しては、光ファイバ内の光の伝搬速度に基づき伝搬時間から伝搬距離を計算し、温度測定箇所を特定する。

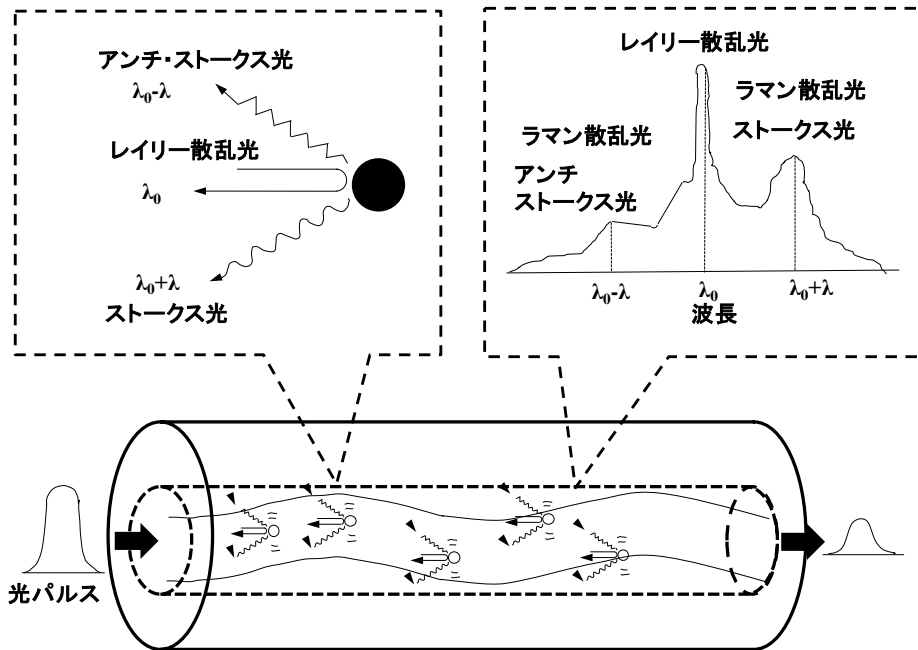


図 4-1 光ファイバを用いた温度測定の実理

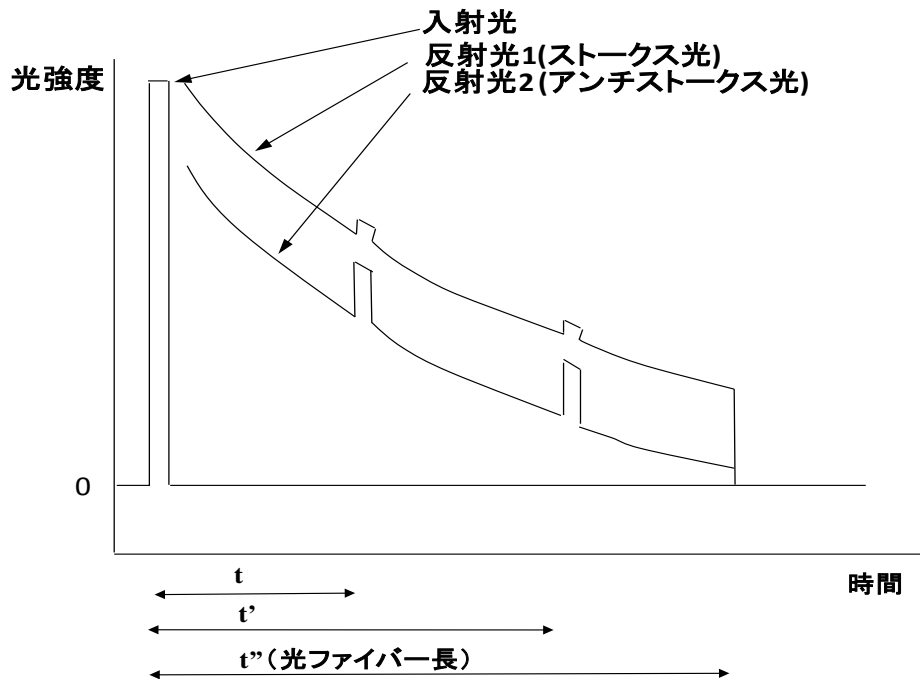


図 4-2 散乱光の強度変化

4-3 光ファイバを温度センサとして使用した温度計測システム

温度計測システムは、光ファイバ、レーザー入射・分離計測装置、データ処理用パソコンにより構成されている。温度計測システムの構成を図4-3に示す。光ファイバを温度センサとして使用した温度測定方法の特徴としては、

- 1) ファイバセンサ部分への電力供給が不要
 - 2) 連続・時系列にて温度測定が可能
 - 3) 光ファイバに電流が流れず、測定雰囲気の影響を受けない
- などの利点がある。

一方、測定精度を高めるため、光ファイバを数十 m から数百 m 使用する必要がある、測定部分への設置に関して工夫が必要となる。

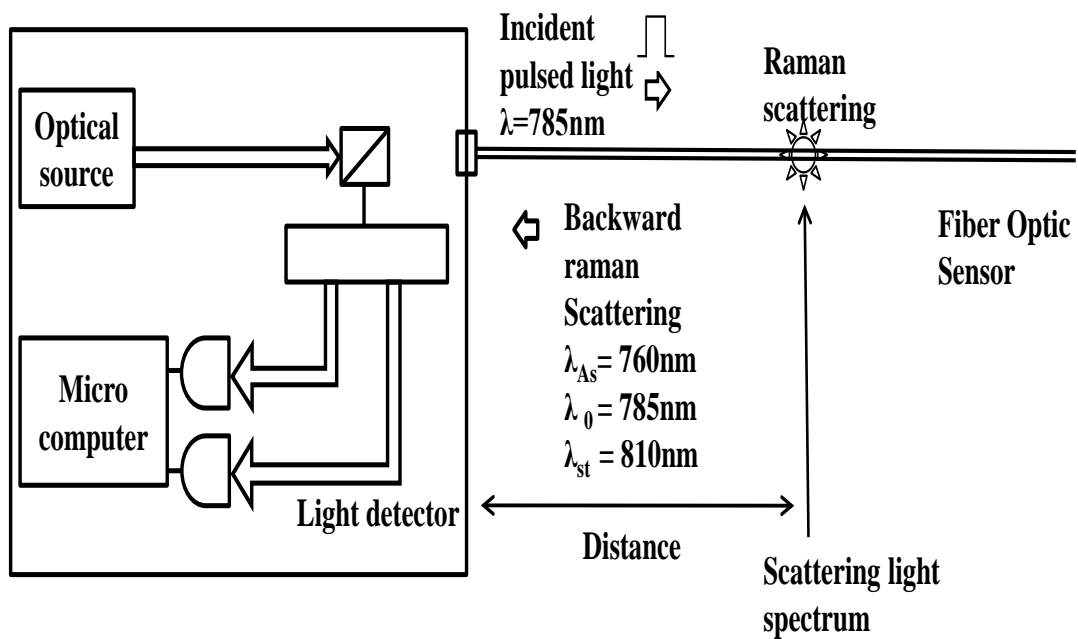


図4-3 計測システムの構成

4-4 太陽光発電システムとモジュール裏面温度分布

今回提案する光ファイバのラマン散乱光の原理を用いた太陽電池モジュールの裏面温度測定実験を図4-4に示す太陽光発電システムで行った。今回実験に使用した太陽光発電システムは、最大出力167Wのモジュールを6直列で1ストリングとし、10ストリングが並列接続されており、接続箱、インバータを介して商用電力系統に連系されている。設置後、約15年経過しているため、システムの一部の太陽電池モジュールには経年劣化によるものと思われるホットスポットが数か所存在している。図4-4の太陽光発電システムのモジュールに発生したホットスポットの場所の外観、その部分を赤外線カメラにて測定した画像を図4-5に示す。



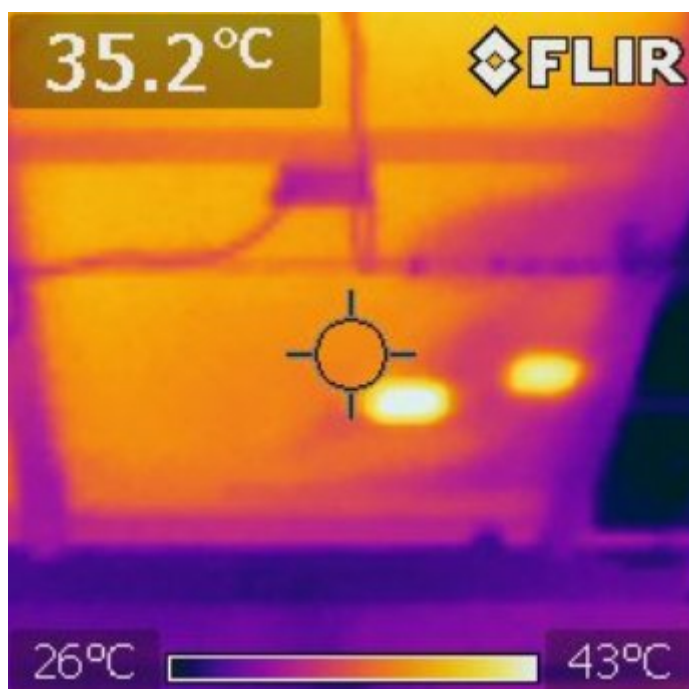
図4-4 太陽光発電システムの外観

赤外線カメラによる計測は設置環境によっては建屋の壁の熱放射や太陽光の反射などの外乱を受けやすく、特に太陽電池表面での測定は熟練を要する。従って太陽電池表面よりも裏面の方が温度測定は簡単であり、精度も良い。図4-5において、デジタルカメラのモジュール背面画像を(a)、赤外線カメラのモジュール背面画像を(b)に示す。デジタルカメラの画像の赤枠で囲んだ部分を赤外線カメラで撮影している。赤外線カメラの画像(b)において温度が高い白色セル部分がある。赤外線画像の温度範囲は26°Cから43°Cであり、白色高温部はここでは43°C以上である。この温度は不具合発生状態では比較的

低い温度であるが、43℃の白色高温部は何らかの不具合が始まりつつある初期段階の状況にあるものと考えられる。



(a)デジタルカメラの画像



(b)赤外線カメラの画像

図4-5 ホットスポットが発生している太陽電池モジュール

4-5 温度センサとしての光ファイバの選択

光ファイバを温度測定に使用する場合、測定温度範囲にあった光ファイバを選択する必要がある。ラマン散乱光による温度測定に使用する温度センサ用光ファイバは、種類により測定できる温度範囲が異なるからである。光ファイバの種類による温度測定範囲を表4-1に示す。今回使用する光ファイバは、前述のモジュール温度上昇値やその裏面への設置の作業性などを考慮し、単心光型を用いることにした。単心光型の構造断面図を図4-6に示す。

表 4-1 各種光ファイバの仕様

種別	ノンメタリック平型	SUS 管内蔵型	単心光型	PVC 被覆付保護銅管型
温度範囲	-20～70℃ (連続) 150℃以下 (短時間)	-20～75℃ (標準) -200～60℃ (低温用) -20～300℃以下 (高温用)	-20～75℃ (標準)	-20～75℃ (標準)
サイズ	2×4mm	直径 1.4～3.2mm	直径 3～5mm	直径 2.5mm

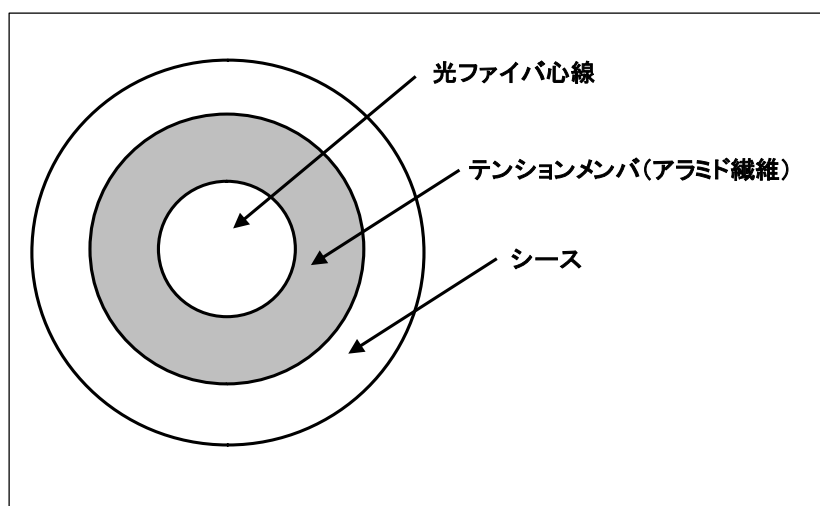


図 4-6 単心光型ファイバ構造断面図

4-6 光ファイバの設置方法と温度測定精度の確認

光ファイバによる温度測定を実施するにあたり、光ファイバの温度の測定精度を調べるため基礎実験を行なった。図4-7に示すように、2枚の太陽電池モジュール裏面に、2種類の光ファイバの設置方法による温度の測定精度比較実験を行なった。下記に示す2つの条件の温度測定は、2枚のモジュールに光ファイバ1本を合計で280mほど使用し、両方のモジュールの温度を同時に測定している。

- 1) 光ファイバをモジュール1枚に連続して九十九折に直線状態で設置した条件

(図4-7(a)の左のモジュール、拡大図(b)<左>)

- 2) 全長200mを超える光ファイバを切断することなく、約2mごとにモジュールのセルの大きさに合わせ、直径約70mm、円周長200mmで円環状態に10回巻いて束ねた光ファイバを、モジュール1枚の各々のセルに96個設置した条件

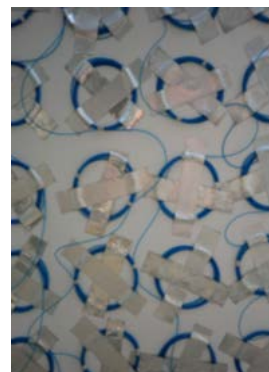
(図4-7(a)の右のモジュール、拡大図(c)<右>)



(a) 太陽電池モジュール裏面



(b) 拡大図<左>



(c) 拡大図<右>

図4-7 比較実験太陽電池モジュール裏面

この2つの光ファイバ設置条件における温度測定精度の比較を行うため、温度変化を顕著にする目的で、2枚の太陽電池モジュールの始端セルと終端セルを冷水で冷やし、各々の光ファイバ設置条件における光ファイバの温度変化を測定した。ファイバ全長での温度測定結果を図4-8に示す。光ファイバを直線状態で設置したモジュールでは、光ファイバの長さは、モジュールの縦の長さ 1.35m の8倍に余長を加え、ほぼ 30m であり、温度の変化を精度よく検出する事が出来ていない。一方、約 2m を円環状態に束ねて設置したものは、全長が約 250m であり、始端セルと終端セル2点の温度が確実に下がっており、測定精度が直線状態より高いことが分かる。この結果から、光ファイバを用いて太陽電池モジュールの温度測定を行う場合、光ファイバを円環状態にして設置しなければ十分な測定精度が得られないことが確認できた。

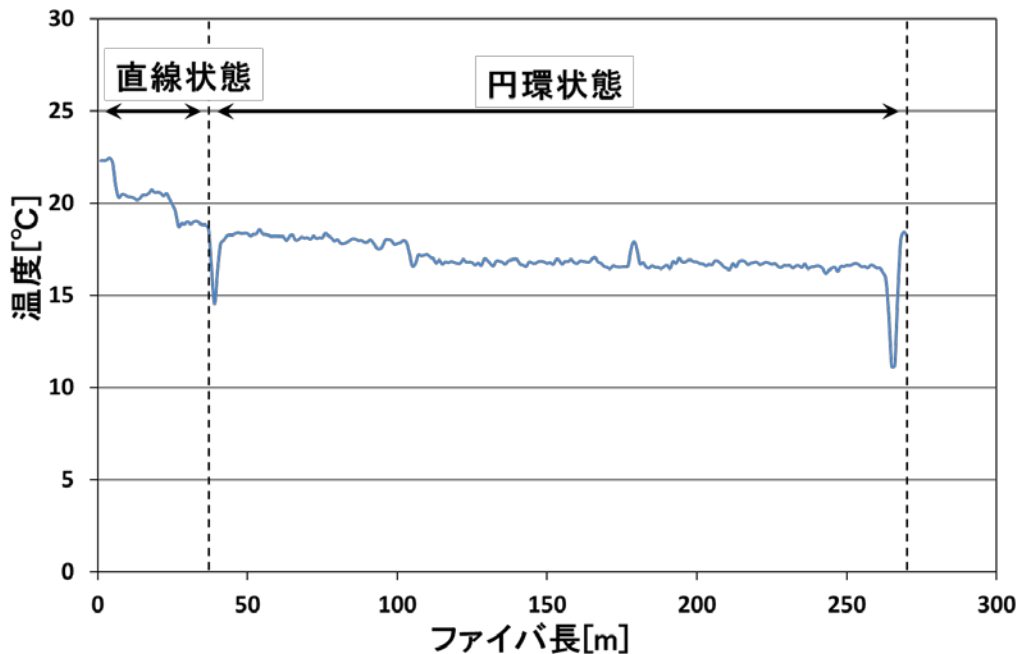


図4-8 光ファイバー全長での温度測定結果

4-7 光ファイバの温度センサとしての最適な条件の決定

光ファイバを円環状態に束ねて設置する場合、全長 2m が最適かどうかを確認する簡易実験を行った。熱源として市販カイロを使用し、発熱させ、その上に直線状態と、直径約 70mm、円周長 200mm の円環状態に束ねた光ファイバを置く。これらを使用し、板厚 30mm の机の上でカイロの温度測定実験を行った。光ファイバ実験試料は直線状態と円環状態が全長 1m(巻き数 5 回)、2m(巻き数 10 回)、3m(巻き数 15 回)の 3 種類をあわせ

て4種類であり、各種類の試料をそれぞれ5個用意した。5個のカイロ間の光ファイバ余長を各々1mとし、各測定試料に間隔をとっている。5個のカイロの右端カイロ1と左端のカイロ2の表面温度と周囲温度を熱電対で測定した。実験の様子を図4-9に示し、測定結果を図4-10に示す。測定結果は縦軸が温度、横軸が光ファイバの長さ、奥行きが時間を示す。熱電対の測定結果を図4-11に示す

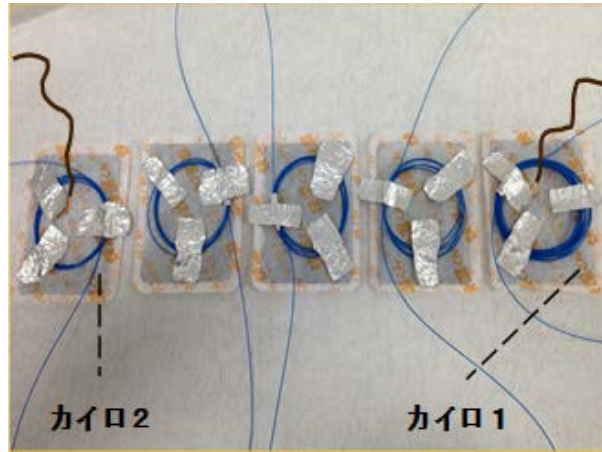


図4-9 カイロを用いた温度測定方法 [光ファイバ2m(巻数10回)の例]

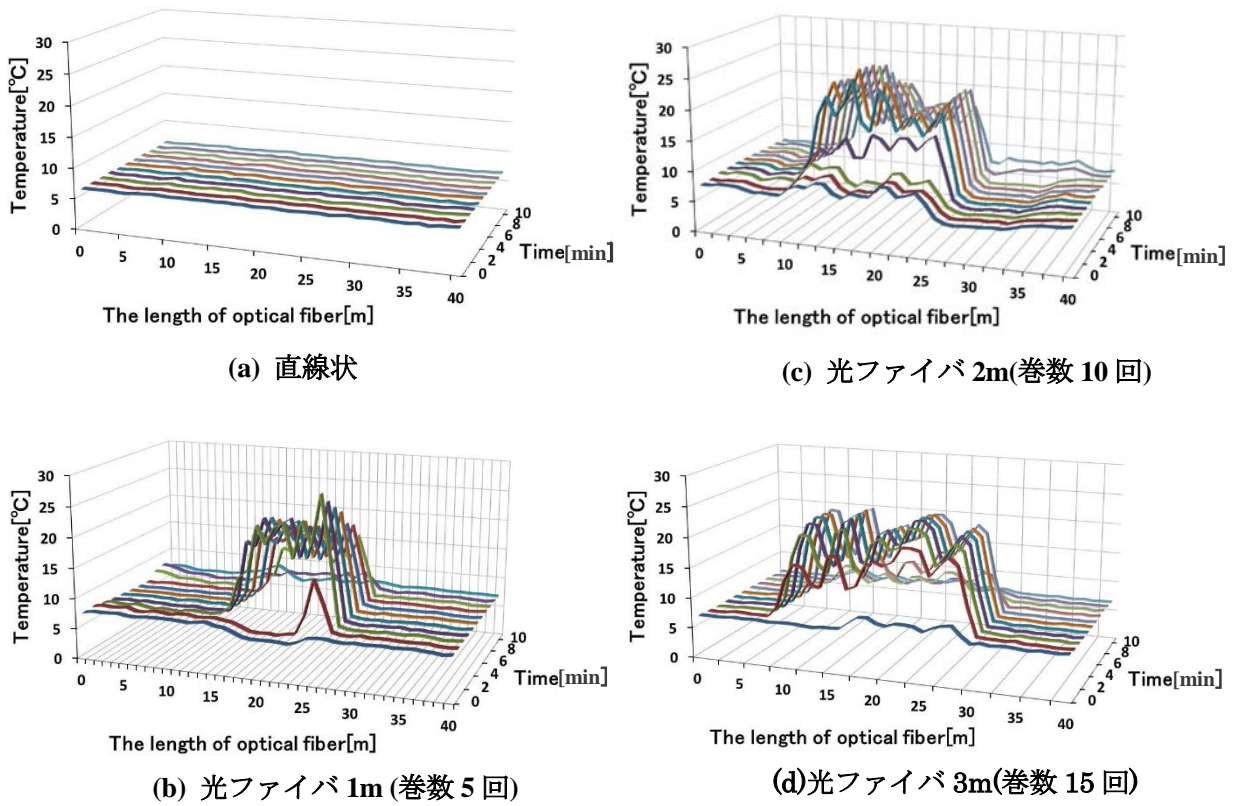


図4-10 カイロでの温度測定結果

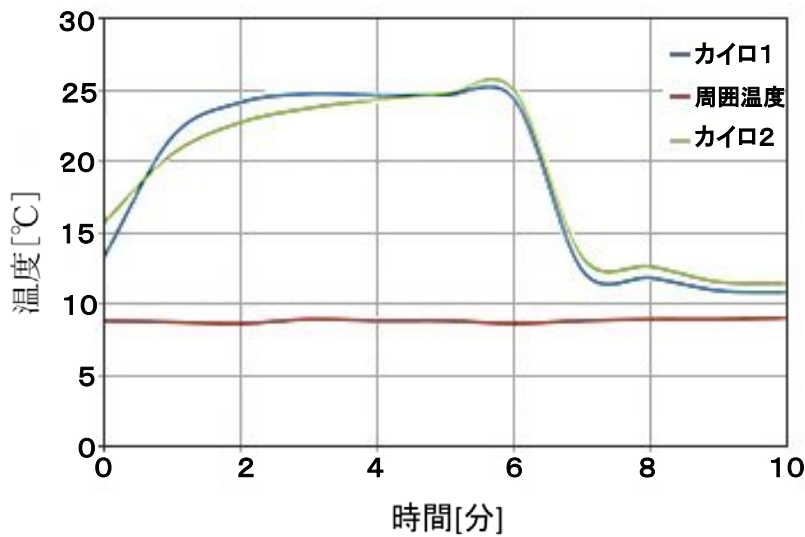


図 4-11 熱電対温度測定結果

上述の図 4-10 の 4 種類の試料の実験結果を見ると、巻き数が増えるほど 5 つの温度の山が顕在化することが見て取れる。図 4-11 に熱電対を用いたカイロの温度測定結果の 1 例として、光ファイバ 3m の場合の結果を示す。図 4-11 のカイロ 1 は前述図 4-9 の右端、カイロ 2 は左端のカイロの温度を示している。測定時間は各実験においてほぼ 10 分である。カイロが断熱状態ではなく、さらに実験環境温度が 9°C 程度しかないため、放熱によりカイロ温度自体も 25°C 程度で熱平衡に至り、約 7 分経過後 12°C ほどに低下する。この温度変化にも追従できていれば、光ファイバを用いた温度測定は有効といえる。これら 4 種類の実験試料の温度測定結果から温度測定データの有効性を熱電対の温度測定データとの比較により検討した。図 4-10(d) と図 4-11 における 3m の試料のピーク温度は 20°C と 25°C で 5°C の差があるが、温度の時間変化は整合しているように見える。ここで 1 分毎のカイロ 1、カイロ 2 の温度を各円環状態の光ファイバと熱電対の温度測定データ 11 個の相関係数を求めることで、2 種類の測定方法による温度データの相関の有意性を調べた。これらのデータを表 4-2-1、表 4-2-2 に各々示す。データ対の相関を見る場合、その相関係数の有意性は統計検定手法で標本の大きさと危険率の設定で異なり、相関の係数 r の値で判断できる。今回、一部の相関係数がマイナスにふれたため、両側検定の危険率 1% で判定することにした。この場合の 11 のデータ対における上述の条件での相関係数 r は 0.735 以上で有意であり、各データ対の相関係数がこの数値より大きい場合、相関に有意性があると判断される⁽⁸⁾。各データ対の相関有意性の検定結果を表 4-3 に示す。

表 4-2-1 1分ごとの同時刻のカイロ 1 の熱電対と各環状ファイバの温度データ対

1) 熱電対と直線状態ファイバ

時刻	14:10	14:11	14:12	14:13	14:14	14:15	14:16	14:17	14:18	14:19	14:20
熱電対	25.6	26.1	26.1	25.9	19.8	16.9	15.9	15	13.5	13.1	12.6
ファイバー	6.49	6.53	6.53	6.56	6.5	6.57	6.47	6.51	6.36	6.53	6.51

2) 熱電対と 1 m 円環状態ファイバ

時刻	14:35	14:36	14:37	14:38	14:39	14:40	14:41	14:42	14:43	14:44	14:45
熱電対	43.5	40.3	28.6	27.2	25.7	24.4	23	22.2	20.3	16.8	16.3
ファイバー	7.06	7.03	14.39	18.54	18.88	18.26	16.79	16.28	13.81	8.88	6.84

3) 熱電対と 2 m 円環状態ファイバ

時刻	14:47	14:48	14:49	14:50	14:51	14:52	14:53	14:54	14:55	14:56	14:57
熱電対	15.4	15.4	15.9	15.4	20.2	22.4	22.4	21.9	21.3	20.7	20.3
ファイバー	8.07	8.66	9.21	10.31	11.92	19.17	20.55	20.22	19.85	18.97	18.60

4) 熱電対と 3 m 円環状態ファイバ

時刻	15:25	15:26	15:27	15:28	15:29	15:30	15:31	15:32	15:33	15:34	15:35
熱電対	13.3	21.7	24.1	24.7	24.6	24.6	24.3	12.3	11.8	10.9	10.8
ファイバー	6.99	14.91	18.81	19.86	20.33	20.21	20.21	13.67	10.00	8.79	7.97

表 4-2-2 1分ごとの同時刻のカイロ 2 の熱電対と各環状ファイバの温度データ対

1) 熱電対と直線状態ファイバ

時刻	14:10	14:11	14:12	14:13	14:14	14:15	14:16	14:17	14:18	14:19	14:20
熱電対	23.5	23.5	23.1	22.7	19.4	17.8	17.4	17	16.3	16.2	15.7
ファイバー	6.6	6.44	6.4	6.52	6.51	6.56	6.48	6.5	6.51	6.43	6.58

2) 熱電対と 1 m 円環状態ファイバ

時刻	14:35	14:36	14:37	14:38	14:39	14:40	14:41	14:42	14:43	14:44	14:45
熱電対	38.5	41.1	45.8	29.4	28.5	28.1	27.6	27.4	25	17.9	15.9
ファイバー	7.17	13.70	23.34	21.89	20.68	19.56	17.64	16.92	14.87	9.58	7.68

3) 熱電対と 2 m 円環状態ファイバ

時刻	14:47	14:48	14:49	14:50	14:51	14:52	14:53	14:54	14:55	14:56	14:57
熱電対	14.5	14.3	14.4	13.8	22	24.6	24.9	25	24.8	24.6	24.7
ファイバー	9.71	9.51	9.23	9.83	16.04	18.69	19.69	19.78	19.90	19.88	19.17

4) 熱電対と 3 m 円環状態ファイバ

時刻	15:25	15:26	15:27	15:28	15:29	15:30	15:31	15:32	15:33	15:34	15:35
熱電対	15.7	20.5	22.7	23.7	24.3	24.7	24.9	13.2	12.6	11.5	11.4
ファイバー	8.86	16.33	17.60	17.94	18.03	17.88	17.82	11.14	8.48	7.64	7.15

表 4-3 各データ対相関係数 r の相関有意性検定結果

	カイロ 1	カイロ 2	相関
直線状態	0.37	-0.15	なし
円環状態 1m (5turns)	-0.28	0.37	なし
円環状態 2m (10turns)	0.89	0.99	あり
円環状態 3m (15turns)	0.94	0.97	あり

表 4-3 から、熱電対と円環状態の光ファイバによる温度データの相関は、ファイバ長 2m と 3m で有意となった。データ対数が 11 と少ないせいもあるが、もっと測定時間間隔を細かくするなどして、データ対数を増やせば、1m の光ファイバでも相関が有意になる可能性はある。逆に 2m、3m は少ないデータ対数でも高度な相関を示す分、温度センサとしての性能が良いということにもなる。今回の実験方法においては、巻き数が大きくなることにより温度測定部の熱容量が大きくなりカイロの熱を吸熱するため、実際の温度より 5°C ほど低下したものと考えられる。熱源として電熱ヒータなどを使用し、光ファイバの被覆外面温度も測定し熱平衡に至るまで実験を行うことにより、より正確な温度データが取得できたものと考えられる。しかし、今回の簡易実験でも、熱電対によるデータとの相関検定が有意であったことから光ファイバによる温度測定は有効であることが明確に出来たものと考えられる。2m より 3m の方がより測定精度が向上するものの、設置コストを考えた場合は 2m でも十分相関が得られたため、現時点では温度センサとしては 2m が良いと考えられる。今回のモジュール 1 枚に使用した光ファイバの長さは図 4-8 から分かるように、余長も入れて約 250m であり、光ファイバのコストは 50 円/m とすれば、1 モジュールに必要なコストは 12,500 円となる。太陽電池モジュール全面でなくても、火災の原因となりやすいモジュール裏面のジャンクションボックスに設置するのであれば相当なコストダウンになる。あらかじめジャンクションボックスに入れておくことも考えられるが、現場での施設時に光ファイバを接続する必要が出てくるため、施工現場でのファイバの融接作業が必要になるか、光ファイバ用コネクタを付けておく必要がある。事前にモジュールに光ファイバをつけておくことがコストの低減に繋がるかどうかは現時点では検討の余地がある。

4-8 光ファイバ温度測定によるモジュール異常発熱検出実験

本節の実験では、上述のカイロの実験結果、および熱電対との有意差の検討から、光ファイバ約 2m を円環状態にした温度センサを使用し、発電している太陽電池モジュール裏面の温度分布を測定することにした。前述のホットスポットが数箇所ある 10kW の太陽光発電システムの太陽電池モジュール 1 枚に前述の円環状態の光ファイバを設置し、モジュール面全体の温度測定を実施した。測定結果の一例を図 4-12 に示す。同図は、ある 1 日の 5:00 から 20:00 までの温度変化を 1 時間毎に示している。この日の天候は曇り

時々晴れであった。ここで 15:00 のモジュール温度について注目すると 2 か所において他に比べ極端に温度上昇していることがわかる。これはホットスポットであると考えられたため、赤外線カメラを用いて太陽電池モジュール裏面の温度測定を行った。図 4-13 (a)に示す様に 2 点において、ホットスポットを確認した。さらに図 4-13 (b)にセルとの対応が分かりやすいように太陽電池モジュール表面のセル番号との対照図を示してある。図 4-13 (b)に発電時の裏面に赤外線カメラ画像と対応するセル番号を示す。この対応からすると、セル番号 70 と 91 が発熱していることがわかる。したがって、本計測手法が太陽電池のセルに発生しているホットスポットの発見には有効であることがわかる。

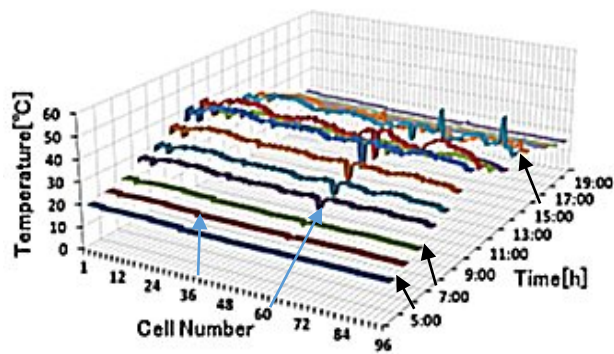
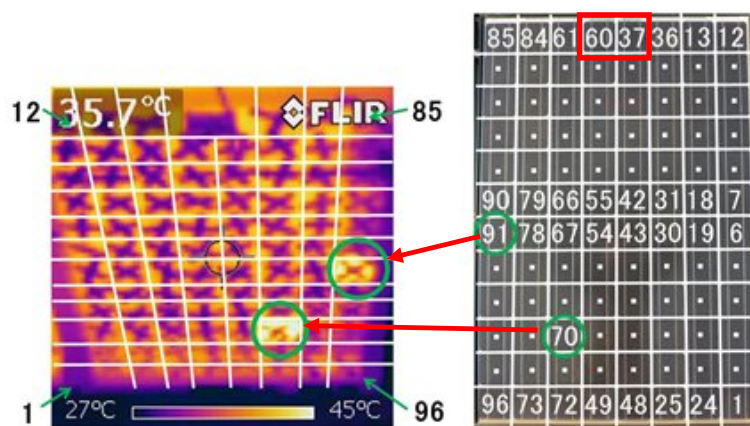


図 4-12 光ファイバによる温度測定結果



(a)太陽電池モジュール裏面 (b)太陽電池モジュール表面

図 4-13 セル番号とのホットスポット箇所の対応

図4-13(b)のセル番号は右下を番号1として、縦に九十九折になっている。破線の赤枠で囲んだ、番号37と60のセルの裏面にジャンクションボックスが設置されている。また図4-12に示す円環状光ファイバによる温度測定結果のセル番号37と60の温度が他の部分の温度より低いのは、ジャンクションボックスの表面温度を測定しているためである。番号37と60を比較すると37の方の温度が高い。ジャンクションボックス内部の番号37に該当するバイパスダイオードが発熱している可能性が考えられる。このようにバイパスダイオードなどの過熱の検出可能性が期待できる。

4-9 移動する部分影による太陽電池のホットスポットの検出実験

前述の実験は太陽電池モジュール裏面に光ファイバを約2mで円環状態に束ねて設置し、測定日の5:00から20:00において1時間おきに温度測定を行った。しかし、この測定時間間隔では各1時間以内で太陽電池モジュールの各セルに起こる発熱箇所の移動状態を検出することが出来なかった。そこで、測定時間間隔を短くすることで、太陽電池のモジュール面の発熱部の移動がよりわかりやすくなると考え、4:00から20:00まで、1分おきに温度測定を実施した。ある測定日において、4:00から20:00までを1分間隔で測定した結果、15:00から17:00の間に太陽電池モジュールのセルの発熱する場所も移動が確認できた。その中でも発熱がより顕著に見られた15:00から16:00までの温度変化を図4-14に示す。15:00から15:30までは、セル番号70や91付近で見られた発熱箇所がセル番号47付近に移動しているのが確認できる。さらに15:30から16:00までは、セル番号47付近で現れていた発熱箇所がセル番号44付近に移動しているのが確認できる。このような発熱箇所の時刻による変化が起こった原因として、モジュール上にできる影の動きが考えられた。今回の実験に使用した太陽光発電システムの太陽電池の横には様々な機器が設置されており、発熱が見られたモジュールの各部には、夕刻頃の其々の時間帯において部分影ができていた。図4-15は、15:00から16:00までの間でモジュールにできる影の移動の様子を示している。同図(a)から(c)にかけてモジュール上を影が移動していることがわかる。白丸で囲んだ箇所が本計測において発熱が見られた部分である。これらの影の移動に伴ってモジュールの発熱の発生箇所も変化している。これらの結果から、影の移動と太陽電池モジュールの発熱箇所に相関を認めることが出来る。ま

た、太陽電池モジュール上に出来た影により、影の出来た部分が発熱するため、太陽電池の劣化を促進すると考えられる。

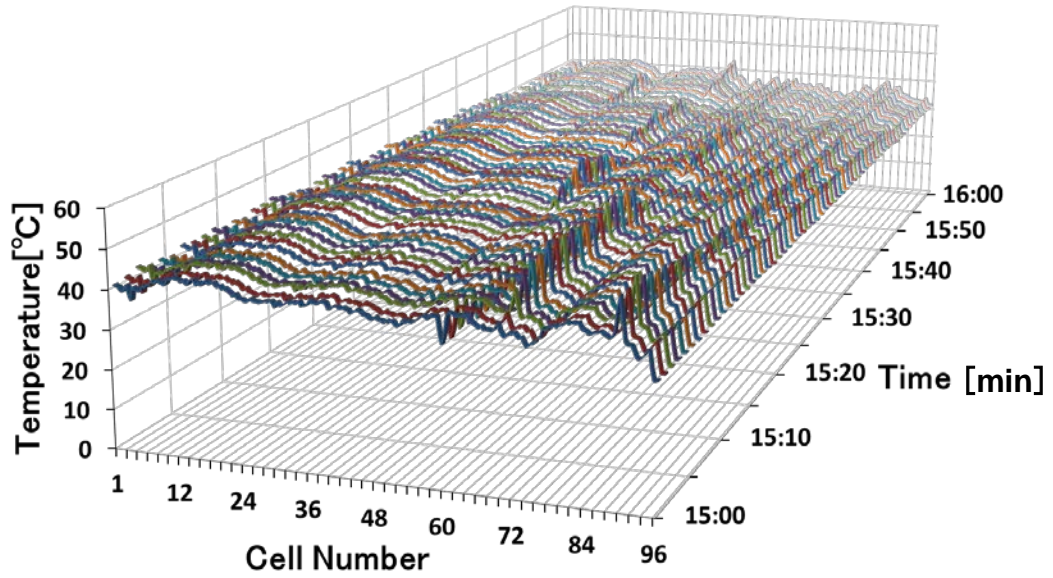
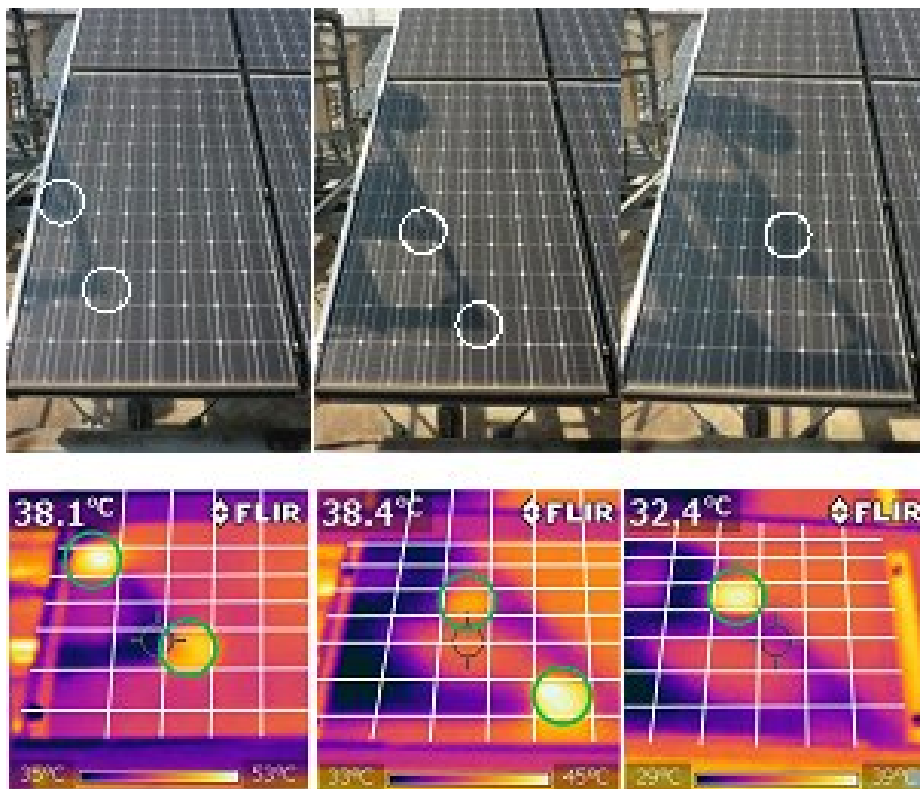


図 4-14 光ファイバによる温度測定結果



(a) At 15:00

(b) At 15:30

(c) At 16:00

図 4-15 太陽電池モジュール上の影の動きとホットスポット

4-10 実験結果検討

光ファイバとラマン散乱光の原理を応用した温度計測手法を、太陽電池モジュール裏面温度計測手法として使用できることを実証した。簡易実験で、2mの光ファイバを円環状態に束ねて設置することが妥当であることを熱電対による温度測定結果との相関検定により明確にした。今回実証した手法は、時々刻々変化する温度特性も把握することができ、太陽電池モジュールの不具合に対しても即座に発見できるものと期待できる結果を得た。そこで、発熱が顕著に見られた時間帯の結果を分析し、太陽電池モジュール全体で温度変化について測定時間間隔をより細分化した実験を行った結果、部分影のできる場所と発熱箇所には強い相関があることが明確になった。

今後の課題として、本計測手法を実用化するには、4-7節の後半で言及したコスト、モジュールごとの光ファイバ設置における光ファイバの接続作業などの問題がある。また、光ファイバを円環状態した温度センサにおいては、太陽電池モジュールの形、材質、大きさによって光ファイバを円環状態にする長さや、この円環状態の光ファイバを温度センサとして固定する方法が異なる。さらに、光ファイバ円環状態の温度センサは、太陽電池モジュール裏面のセル1箇所にも数m使用する必要があるため、耐環境性にすぐれ、長期間固定できる設置方法の研究開発が必要である。

4-11 結論

光ファイバを使用し、太陽光発電システムの面的な温度計測における基礎技術の可能性を示すことができた。光ファイバを用いたモジュール裏面の実用的な温度測定の設置条件は、円環状態と直線状態の2種の設置条件における温度測定データの比較により、円環状態にすることで精度よく温度測定が行えることを明確にした。また、円環状態の光ファイバの各種巻き数の光ファイバで温度測定比較実験を行い最適な巻き数を選択した。この選択した巻き数の円環状態の光ファイバを用いた温度測定法により、時刻の変化に応じて太陽電池モジュールの表面にできる建造物等による影とホットスポットの移動の相関を明確にすることができた。これらの結果から、本章の成果は広大な太陽光発電システムの面的な温度測定技術に一石を投じる事ができたものと言える。

第4章 参考文献

- (1) 加藤和彦：「太陽光発電システムの不具合事例ファイル PVResQ! からの現地調査報告」, 日刊工業新聞,(2010-7)
- (2) 加藤和彦：「住宅用太陽光発電システム実運転性能調査に関する取り組み」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2007,pp.133-136,(2007-10)
- (3) 「関東電気保安協会が提供する赤外線サーモグラフィによる設備診断技術」, (一般社団法人)日本赤外線サーモグラフィ協会報,赤外線サーモグラフィ,Vol.02/No.03, pp.12-17, (2011-秋)
- (4) 加藤和彦：「太陽光発電システムの運用実態と保守点検の必要性-PVResQ! の活動から」, (一般社団法人)日本赤外線サーモグラフィ協会報,赤外線サーモグラフィ,Vol.03/No.02,pp.3-8, (2012-夏)
- (5) 木下正生：「光ファイバ温度計を利用した船舶火災感知」, 日本船舶海洋工学会誌, 第2号,pp.60-67,(2005-9)
- (6) 坂斉典 ,二宮貴之 ,雪田和人 ,後藤泰之 ,一柳勝宏 ,山田秀夫：「太陽光発電システムにおけるパネル温度測定に関する考察」, 太陽/風力エネルギー講演論文集, pp.243-246,(2011-9)
- (7) 安藤健志 ,酒井浩太 ,雪田和人 ,依田正之 ,後藤泰之 ,一柳勝宏：「光ファイバを用いた太陽電池モジュールの温度計測研究」,太陽エネルギー学会論文誌,Vol.40,No.4, pp.43-49,(2014-7)
- (8) 現代実務統計講座テキストⅡ,実務統計研究会編,統計数値表,p.5,(1965)

第5章 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

5-1 概要

太陽光発電は、国策としてのエネルギー自給率向上の中心的な位置付けとして、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4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⁽¹⁾。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。この太陽光発電システムは安全で、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いる。日本における太陽電池の普及拡大が特に地震災害時の新たな火種となる可能性は否めない。さらに、日本国内でも消防関係の太陽光発電システム由来の火災の事例報告に基づき、消火活動における感電防止策などについて検討が始められている^{(2),(3)}。太陽電池火災の末期的状況はアーク(電弧)の発生である。欧米においては、2007年に太陽電池のアーク事故に関する国際会議が開催されている⁽⁴⁾。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、日射がなくなる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は極めて重要である。アークには広帯域の高周波を発生する特性がある。本章では、CTを用いた簡単な高周波検出回路でアークが発生する高周波を検出遮断する技術について開発研究を行い、前章のインテリジェント短絡保護装置と組み合わせアークを短時間に検出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⁽⁵⁾。

5-2 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⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾。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5-1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5-2に図5-1(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⁽¹¹⁾。

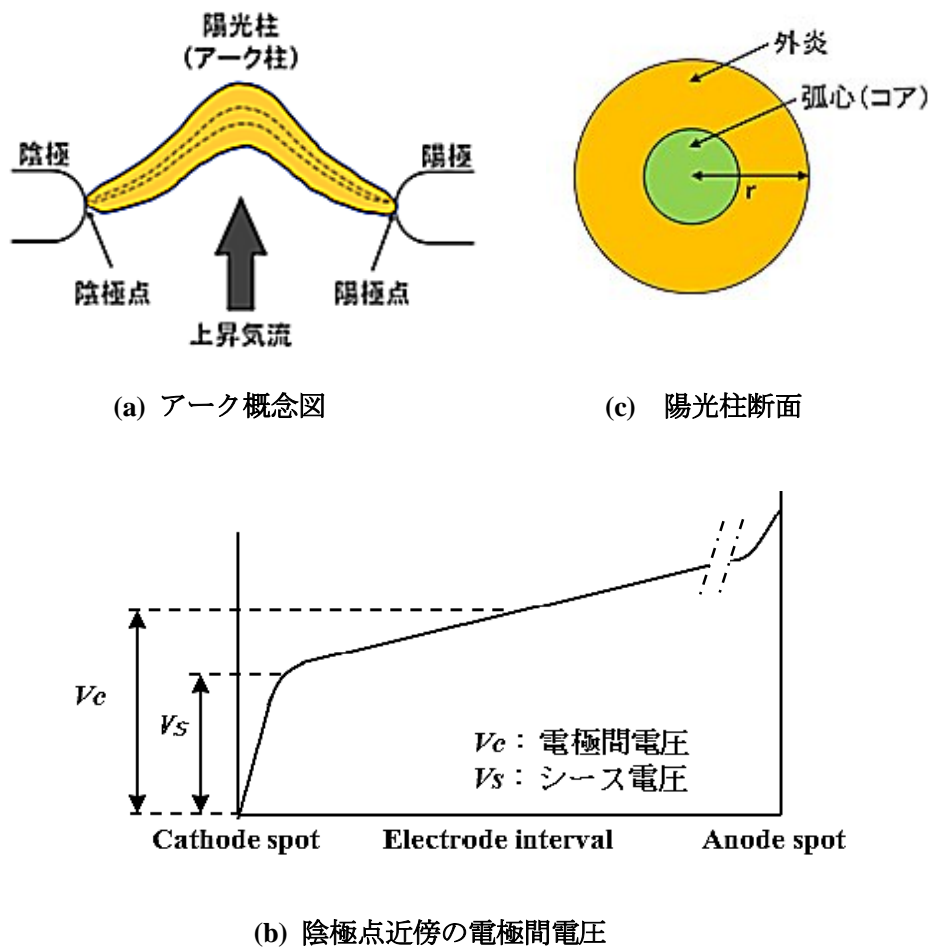


図5-1 アーク構造, 電圧分布図及び断面図

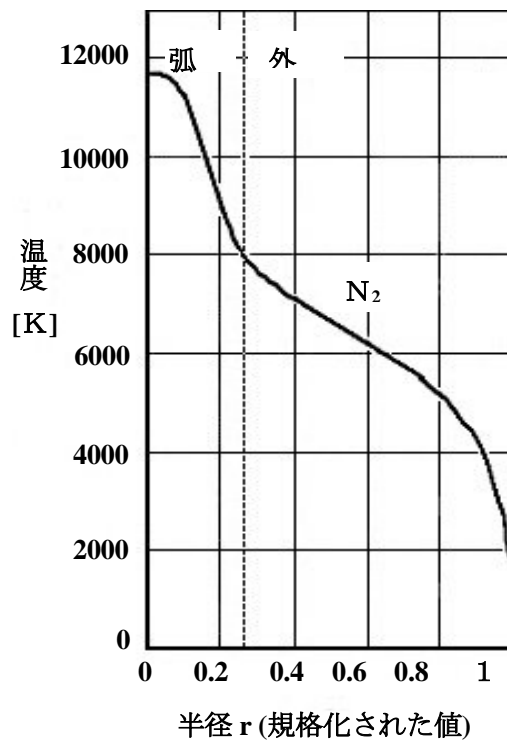


図 5-2 アークの断面温度分布

アークは空気より軽いプラズマであり、その温度によって生ずる上昇気流のために図 5-1(a)に示すような弧となる。アークの殆どは陽光柱であり、この断面を見た場合、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 5-2 においては、コア部は約 8000~12000K 示している。外炎部で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光発電システムの配線内に搬送されるものと考えられる。

本章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。

5-3 太陽光発電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、高周波検出回路により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 5-3 にアーク検出遮断装置の構成概念図を示す。

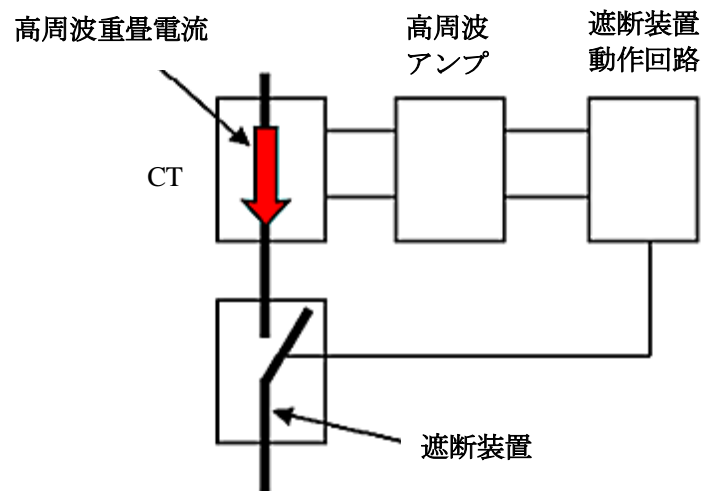


図 5-3 アーク検出遮断装置構成概念図

CT は一般的な導電性ノイズ対策用、貫通型フェライトコアに $\phi 0.1$ のエナメル線を巻いたものであり、高周波アンプの検波回路は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。この誤検出がないことを証明するため、アーク発生時の回路において図 5-4 に示すように、アークが発生している電路を CT に貫通した場合(a)と、電路と CT を隔離した場合(b)におけるそれぞれの条件での 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 で定電圧源 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。

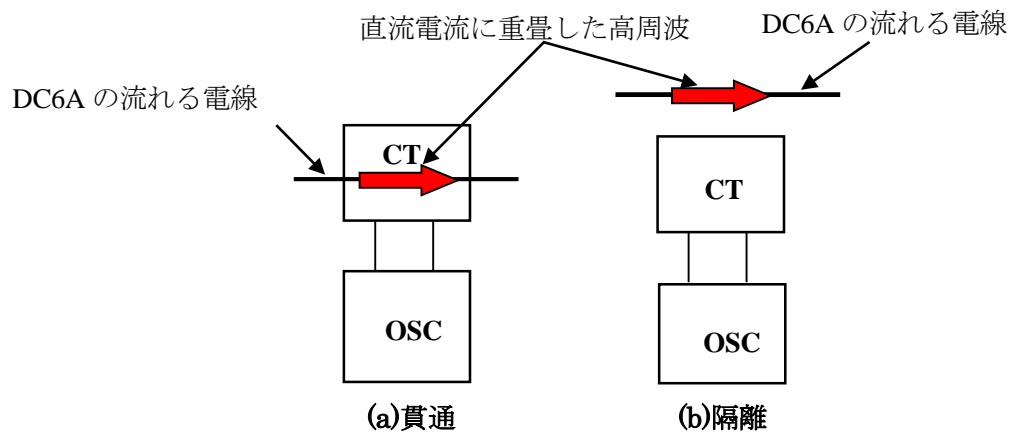
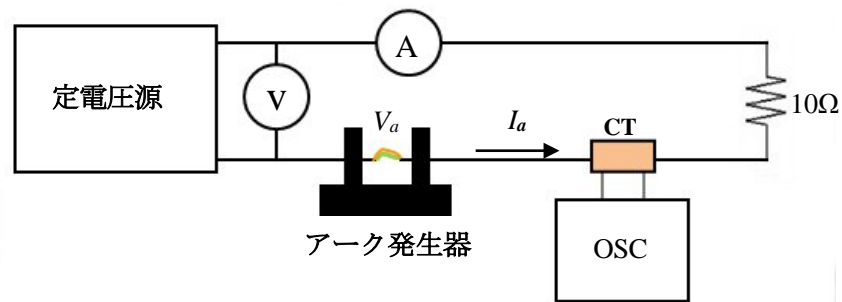
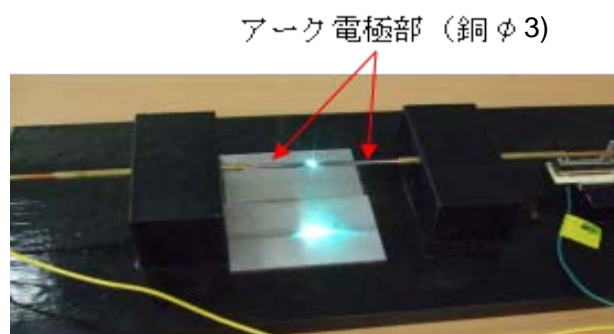


図 5-4 導電ノイズ検出の確認

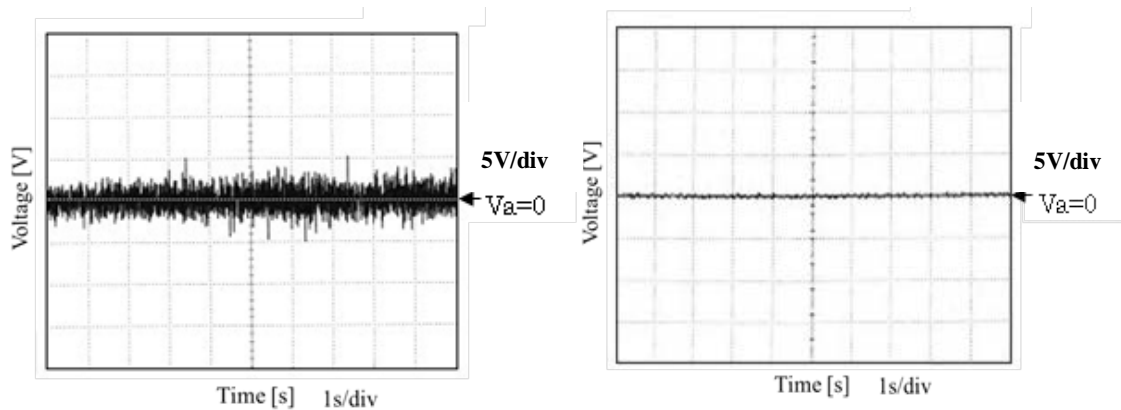


(a) アーク検出実験回路



(b) アーク発生器

図 5-5 アーク検出実験回路とアーク発生器



(a) アーク電流貫通

(b) アーク電流隔離

図 5-6 (a)、(b)各条件での CT の出力電圧測定結果

図 5-5 に定電圧源によるアーク検出実験回路とアーク発生器を示す。図 5-6(a)、(b)には、(a)アーク電流が CT を貫通する場合、(b)アーク電流が CT から隔離された各条件における CT の出力電圧測定結果を示す。図 5-6 の結果から分かるように、アーク電流を CT に貫通した(a)の場合アークの発生する高周波によるピーク値が約±2Vの高周波電圧が認められるが、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。これらの結果から、CT がアンテナとして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ことが証明された。ここでアーク電流とは図 5-5 の(a)アーク検出実験回路図で、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前述したように DC6A である。アーク検出実験回路図でアークが発生すると、アーク電流の大半は弧心流れ、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。

前章で述べたように、筆者はストリング単位の太陽電池用インテリジェント短絡保護装置の研究を行ってきた⁽¹²⁾。このインテリジェント短絡保護装置に図 5-3 の CT と高周波アンプからなるアーク検出装置をアークディテクターとして組み込み、太陽光発電システムのストリング単位のシリーズアークの検出遮断を行う。図 5-7 にアーク検出遮断装置の回路構成を示す。

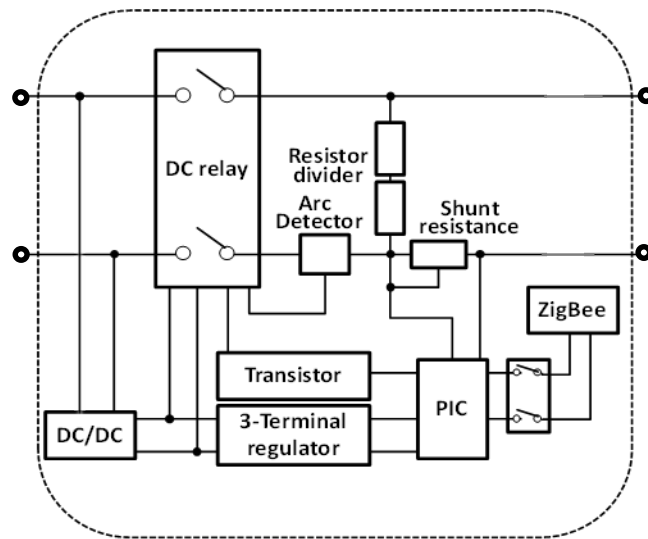


図 5-7 アーク検出遮断装置回路構成図

図 5-8 に示したアークの存在領域⁽¹³⁾を参考に、アーク検出遮断装置の検出電流しきい値を約 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。図 5-8 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光発電システムの 1 スtring の開放電圧は後述の図 5-9 示す(a)約 230V と(b)約 250V である。図 5-8 のアーク存在領域では 230V、250V において約 1.5A 以上の電流でアークが発生することを示している。今回の太陽電池String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、微小かつ間欠的であり、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アーク発生検出電流しきい値を約 2A とした。また、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たからである。

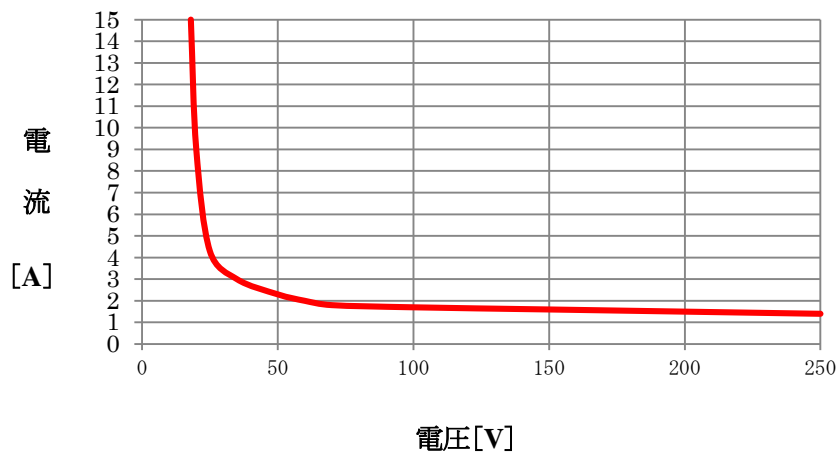


図 5-8 アークの存在領域⁽¹³⁾

5-4 実験用太陽光発電システムの概要

実験に使用した (a)3kW の太陽光発電システムの太陽電池アレイ及び、(b)1kW の太陽光発電システムの太陽電池アレイ外観を図 5-9 に示し、各アレイのモジュール仕様を表 5-1 に示す。図 5-9(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 15 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 5-10 に太陽電池ストリングによるアーク検出実験回路の概念図を示す。図 5-10 に示す太陽電池アーク検出実験回路と図 5-5 に示した検出実験回路の違いは、図 5-5(a)の場合、電源が電圧源であり電流制限の目的で抵抗 10Ω が接続されている。図 5-10 の場合は太陽電池ストリングが電源であり、抵抗は無く太陽電池ストリングにアーク発生器と CT 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 5-11 の電流源領域にあり、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が発生しない。図 5-10 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 5-12 に示す。



(a) 3kW PV アレイ



(b) 1kW PV アレイ

図 5-9 太陽光発電システムのアレイ外観

表 5-1 各太陽光発電システムのモジュール定格仕様

(a) 3kW PV アレイ

項目	定格値
短絡電流	3.25 A
開放電圧	42.5 V
最大出力動作電流	3.02 A
最大出力動作電圧	33.8 V
ストリング開放電圧	230 V

(b) 1kW PV アレイ

項目	定格値
短絡電流	4.87 A
開放電圧	20.4 V
最大出力動作電流	4.43 A
最大出力動作電圧	15.8 V
ストリング開放電圧	250 V

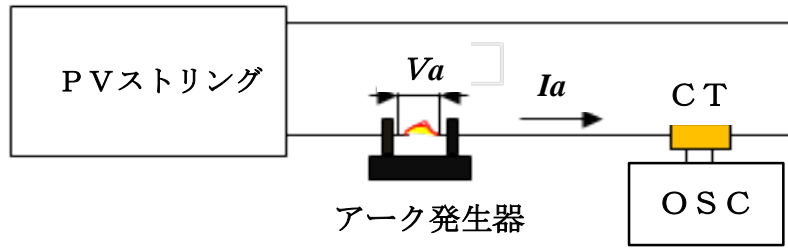


図5-10 太陽電池アーク検出実験回路概念図

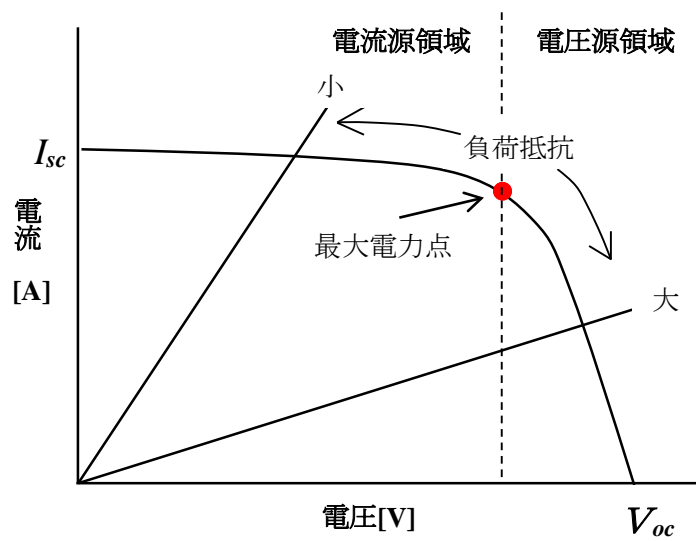


図5-11 太陽電池I-V特性上の各部の名称

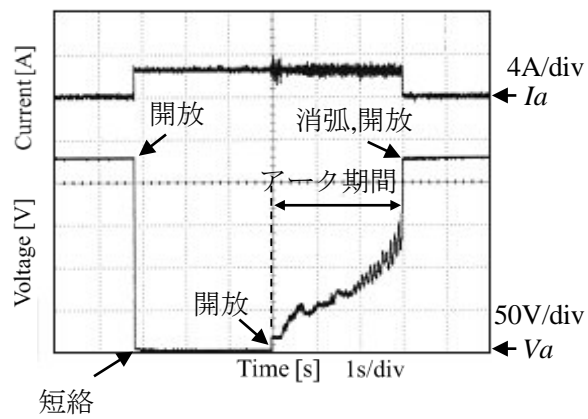
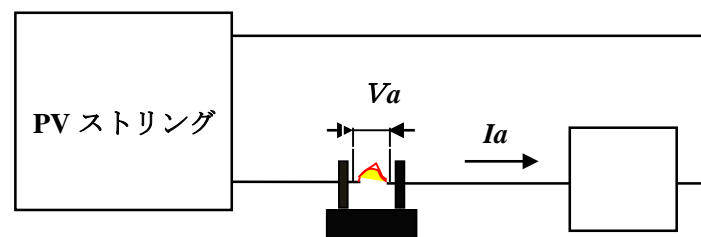


図5-12 アーク電圧・電流測定結果

図 5-12 の結果は、太陽電池ストリングは図 5-9(a)を使用し実験をおこない、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/m^2 、短絡電流 2.75A 、アーク消滅時の電極間隔は 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。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 5-1(b)に示したシース電圧 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、消滅直後に太陽電池の開放電圧 230V になっている。

5-5 太陽光発電システム用アーク検出遮断装置による実験

最初に、図 5-9(a)のストリングで、図 5-13 に示すように、図 5-10 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。前述の図 5-12 のように電極を開放、短絡、開放を行うと、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 5-13 の実験回路でも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 5-5 のように、図 5-13 の回路にも $10\ \Omega$ の抵抗を追加した。その実験回路を図 5-14、実験結果を図 5-15 に示す。



アーク発生器 アーク検出遮断装置

図 5-13 アーク検出遮断装置実験回路

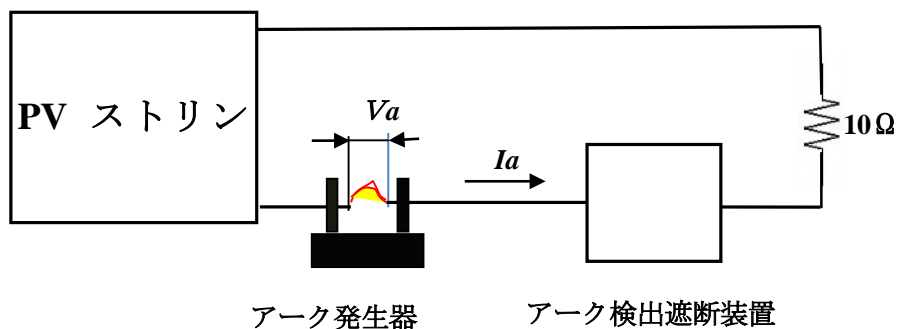


図 5-14 修正実験回路

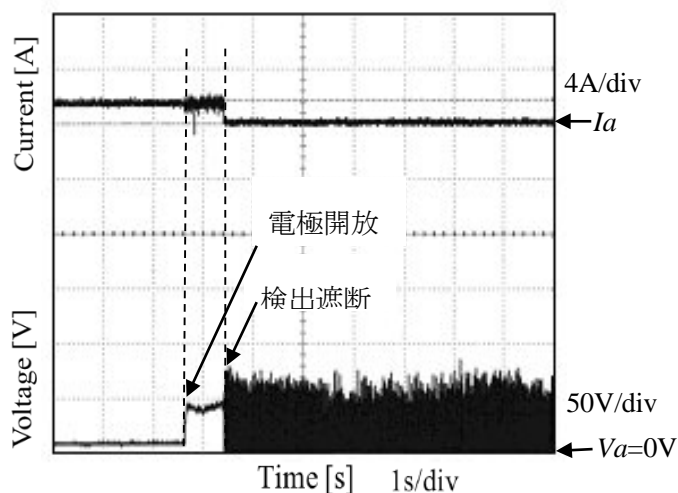


図 5-15 アーク検出遮断装置動作実験結果(1)

この実験においては、日射強度 770W/m^2 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。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 $\phi 3$ 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 5-15 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 程度を得られる時間は 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 5-9 (b)の太陽光発電システムで、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 5-16 に示す。アーク期間は 3.89 秒から始まり、0.99 秒後にアーク検出遮断装置がアークを遮断した。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、快晴時の太陽電池ストリングのアークも確実に保護できることを示している。

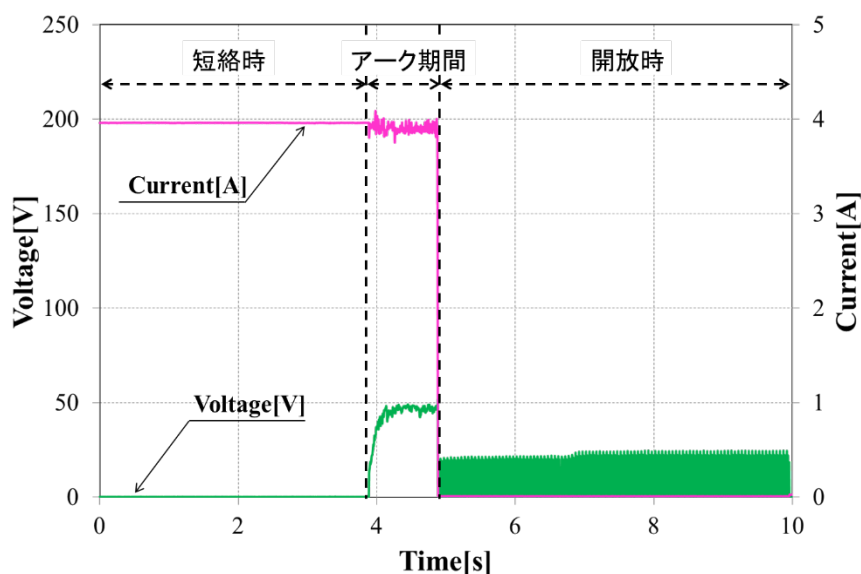


図 5-16 アーク検出遮断装置動作実験結果(2)

5-6 実験結果検討

今回のアーク検出遮断装置は確実な検出動作を考慮し、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 の太陽光発電システムの 1 ストリング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。

抵抗をつけたストリング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良い。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 5-8 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⁽¹⁴⁾。公的機関などの太陽光発電システム由来の妨害電波に関する報告は、測定周波数が低いもの⁽¹⁵⁾や、人体に影響ないレベルであるという結果のもの⁽¹⁶⁾、測定方法の研究⁽¹⁷⁾で終わっているものなどしか見当たらず、実害について明確に記述したものは無いようである。この点、前述のメーカーが WEB で注意喚起していることは実害が発生していることを如実に示している。従って、今回の検出装置を系統に適用した場合、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、太陽光発電システムにおける高周波に関する調査研究が今後必要である。現状、太陽光発電システムの火災において、アークの発生は末期的、かつ最悪な状況を生む確率が非常に高い。一方、アークの検出技術は途に付いたばかりであり、現時点ではアーク発生の検出は高周波の検出に負わざるを得ない。このような状況から、太陽光発電システムの直流系統における EMC の規制強化なども今後は必要と思われる。

5-7 結論

太陽光発電システムの異常の末期的状況であるアークの発生を簡単な回路構成で検出できることを実験で検証できた。CT と倍電圧整流回路を基本とし、これに増幅回路を付加し、アークの高周波をストリングレベルで電圧信号として検出することができた。この信号をインテリジェント短絡保護装置のマイコンに入力することでアークを検出遮断する事も成功した。この結果は太陽光発電システムの異常検出保護技術を一步進める成果と言える。

第5章 参考文献

- (1) 「住宅用太陽光発電システムの設置が累計100万戸を突破」,Press Release,
太陽光発電協会,(2012-5)
- (2) 吉富政宣:「太陽光発電システムの火災事例ならびに消火活動時の感電危険」,日本火災学会,火災誌,324号,Vol.63,N0.3, pp.14-19,(2013)
- (3) 柴田敬吾:「太陽光発電システムからの出火事例について」,第61回全国消防技術者会議予稿集,pp.155-167,(2013)
- (4) International Workshop Arcing in PV DC-Arrays,Organizer:Swissolar et.al.,BFH Burgdorf
Switzerland,(2007-10)
- (5) 安藤健志 ,酒井浩太 ,雪田和人 ,後藤泰之 ,一柳勝宏 , 依田正之 ,宮本敦史 :
「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」,太陽エネルギー学会論文誌,Vol.40,No.6,pp.39-44,(2014-11)
- (6) 高木相:「電磁妨害雑音の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,(1984-2)
- (7) 相田貞蔵他:「接点開離時における無線雑音の発生原因の検討」,電子通信学会誌,
Vol.J62-,No.1,pp.24-30,(1979-1)
- (8) 内村圭一他:「銀接点开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-,No.9,(1980-9)
- (9) Shigeki Minegishi et.al:' Frequency spectra of arc contact due to opening electric contacts in
air',Electromagnetic Compatibility IEEE transactions, Vol.31, No.4, pp.342-345, (1989-11)
- (10) 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,(2006-7)
- (11) 高電圧工学,新・電気システム工学(TKE-13),日高邦彦著,数理工学社,pp.83-87
(2009-1)
- (12) 安藤健志 ,坂齊典 ,二宮貴之 ,市川智彦 ,雪田和人 , 依田正之 ,後藤泰之 ,
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」,太陽エネルギー学会
論文誌,Vol.37,No.6,pp.41-48,(2011)

- (13) Willi Vaassen et.al.: ‘Failure Mechanismen of Contact Faults in the DC-Circuit of PV Arrays’ , International Workshop Arcing PV DC-Arrays,Organizer:Swissolar et.al,BFH Burgdorf Swizerland ,No.3,(2007-10)
- (14) 京セラ太陽電池 : 「安全に関するご注意」(web),(2014-10)
<http://www.kyocera.co.jp/solar/es/prdct/module/detail.html>
- (15) 「太陽光発電システムから発生する静磁界と低周波磁界の測定結果」 ,(一般財団法人)電気安全環境研究所,JET Report, Vol.52,pp.6-7,(2011-Autumn)
- (16) 小玉博一 : 「妨害波委員会の活動(II) 太陽光発電システムに起因する電磁妨害波測定法の調査」,電波環境協議会,EMCC レポート,第 25 号,pp.9-14,(2008)
- (17) 上野武司 他 : 「太陽光発電パワーコンディショナの雑音端子電圧測定の一手法について」,東京都立産業技術研究センター研究報告, 第 6 号, pp.140-141,(2011)

第6章 太陽光発電システムにおける系統連系装置の開発研究

6-1 概要

今まで、太陽電池と商用系統を連系する電力変換装置の各種研究が報告されてきた⁽¹⁾⁽³⁾。さらに、革新的な系統連系装置も数例研究されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これら、従来報告されてきた装置の特徴は、直流電源からフルブリッジの4つのスイッチング素子を制御することで全波整流電流波形と、系統の交流正弦波電圧と同位相の逆変換制御により低歪みの正弦波電流を得るという点にある。これらの回路にはいろいろ利点はあるが、回路構成や制御回路が複雑であり、部品点数も多いためコスト高であった。また、太陽光発電装置は天候の状態や、住宅の負荷状況によりかなり出力が変動するため、この電力変動を吸収するバッファとしての蓄電池などの設置が有効である。しかし、商用系統で高価な蓄電池を使用せずに系統連系だけで済ますことができれば、太陽光発電システムのトータルコストの低下という点で望ましい。一般に系統連系太陽光発電システムは、高効率、高性能など、理想のレベルに達したと言われている。しかし、まだ市場のコストダウンの要求は強く、系統連系装置や太陽電池モジュールなどの太陽光発電システム全体としてのコストが高いため補助金の支給などの政策なしでは普及拡大しないのが実情である。

本章では、容易に適用でき家庭用電力として系統の電力を補うことが出来る、簡単なフォワードコンバータと独創的なロスレススナバ回路を用いた、太陽光システム用の系統連系装置について提案する。この提案する装置の動作について、数値シミュレーション解析と実験によって有効性を確認したので報告する⁽⁶⁾。

6-2 連系装置の回路構成と動作およびその他の補助回路について

本節では、フォワードコンバータによる簡便な系統連系用装置の構成と動作について説明する。また、その他補助回路として新しいタイプの逆変換回路素子の駆動回路、および独創的なロスレススナバ回路について報告と検討を行う。

6-2-1 連系装置の回路構成と動作原理

図6-1に今回提案する太陽電池から交流電力系統に電力変換する系統連系装置の回路構成を示す。太陽電池のある直流一次回路から全波整流波形を二次回路に供給し、商用系統の電圧周波数と同相に制御される、商用周波数で動作する4素子の低速スイッチングによる逆変換回路によって正弦波電流に変換されるという点に本方式の特徴がある。

即ち、一次回路の直流電力を一石のスイッチング素子によるフォワードコンバータにより高周波電圧にし、トランスを介して二次回路に変換され交流電力となる。各種異常により直流電力が商用交流系統に流入することはこのトランスによって阻止されており、直流電力を商用交流系統に流入させないようにになっている。さらに出力電圧はトランスの巻き線比の変更で簡単に昇圧出来る。

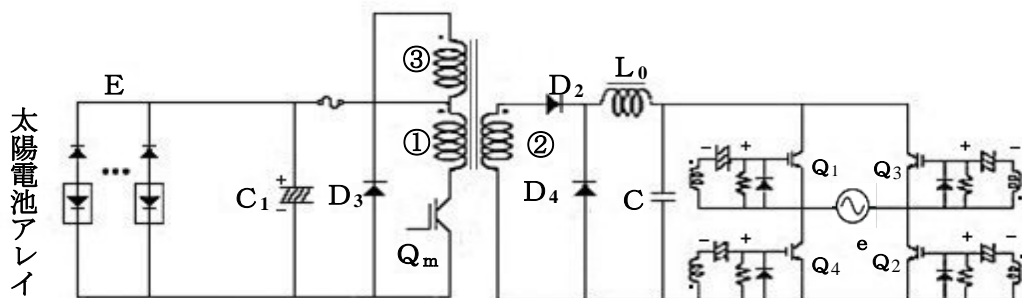


図 6-1 系統連系装置の回路構成

次に、系統連系装置の動作原理について説明する。主スイッチ Q_m がオンした時、一次巻き線①を通して電流が流れる。電流が二次巻き線②を通り、ダイオード D_2 、平滑リアクトル L_0 、そして商用系統の電圧の極性に応じて IGBT、 Q_1 、 Q_2 あるいは、 Q_3 、 Q_4 に流れる。 Q_m がオフになると、平滑リアクトル L_0 に蓄積されていた磁気エネルギーによって電流がフライホイールダイオード D_4 を通して、インバータの枝路に応じて商用交流系統に流れる。巻き線③はスイッチ Q_m のオフの期間トランスのコアに蓄積されたエネルギーを放電しトランスをリセットする。主スイッチ Q_m の波形制御法は基本的に参考文献(4)の一つに類似している。但し、参考文献(4)では4つの素子をスイッチングするが、本章では一石の素子によるスイッチングという違いがある。

図 6-2 は本論文で提案している前述とは別の方式の回路であり、二次回路だけを示してある。図 6-1 の平滑リアクトル L_0 は交流回路に移設されている。図 6-1 の平滑リアクトルでは、直流電流のために磁束は単極性になる。しかし、図 6-2 の交流のリアクトルでは、磁束は相極性に変わるため、リアクトルの磁気容量は半分に減る。主スイッチ Q_m の電流が Q_1 を通って Q_2 に流れているときにオフになったとき、電流 i は並列回路 $Q_1-L_0-e-D_3-Q_1$ と $Q_2-D_4-L_0-e-Q_2$ に分流する。それに加え、直列に接続

されていた素子数が減り、回路損失がこれらの理由で多少減少する。図 6-1 の場合、交流側のスイッチが交流電圧のゼロ点近傍でオフされた場合、 L_o によりサージ電圧が発生することになる。このようなサージを吸収するためキャパシタ C が設置されている。一方、図 6-2 においては、 L_o に蓄積されるエネルギーはフリーホイールダイオードに想定されるエネルギー程度と小さいため、サージ電圧の発生はない。そのためキャパシタ C も不要となり設置されていない。

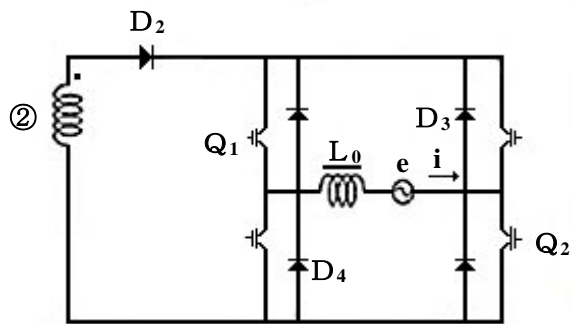
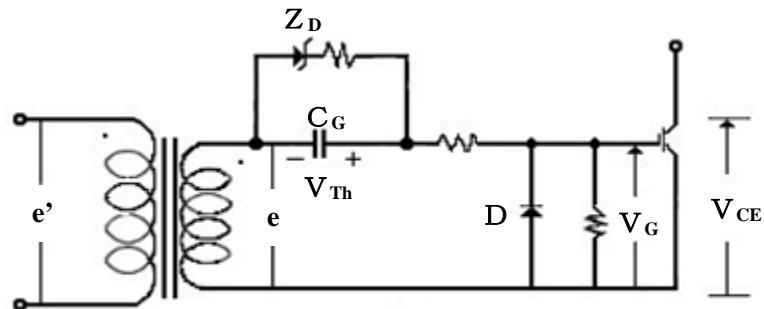
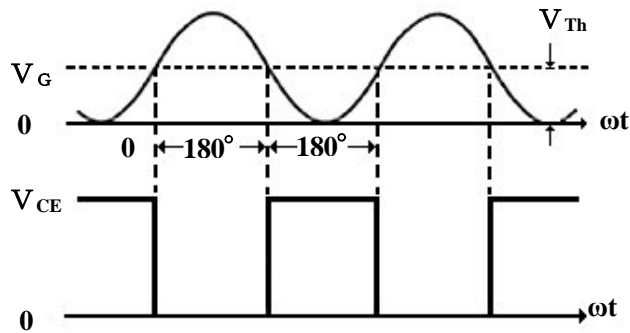


図 6-2 異なる方式の回路構成



(a)ゲート駆動回路



(b)ゲート信号の動作波形

図 6-3 ゲート駆動回路とゲート信号の動作波形

6-2-2 逆変換回路のゲートドライブ回路

この項では今回提案する非常に簡略化した逆変換回路の IGBT ゲート回路の動作と特徴について述べる。図 6-3(a)に実際のゲート駆動回路とそのゲート信号の動作波形(b)を示してある。トランスの電圧極性が逆になった場合、キャパシタに IGBT しきい値電圧 V_{Th} まで充電される。トランスの電圧の極性が前の方向に変化した場合、正弦波電圧がしきい値電圧に加わりこれがゲートに供給される。電圧のレベルに従って、IGBT は図 6-3(b)に示すように商用電圧波形の半波ごとにオン、オフを行う。従ってゲート電圧は次のようになる。

$$V_G = E_m \sin\omega t + V_{Th} \quad (6.1)$$

もし、二次電圧のピーク電圧 E_m がしきい値電圧 V_{Th} に印加されたなら、次の動作条件に従って IGBT はオン、オフする。

- 1) $0 < \omega t < 180^\circ$ のとき

$$V_G > V_{Th} \text{ で IGBT がオン}$$

- 2) $180^\circ < \omega t < 360^\circ$ のとき

$$V_G < V_{Th} \text{ で IGBT がオフ}$$

キャパシタ C_G に並列なツェナーダイオード Z_D は、電圧の変動により IGBT の導通位相のばらつきを防ぐため設置されており、二次電圧の最大値がしきい値電圧より若干大きめに与えられている。その結果、キャパシタ電圧は適正なしきい値電圧に調整される。

6-2-3 ロスレススナバ回路

本フォワードコンバータは一石コンバータであり、スイッチング時においてほとんどの場合大きなサージを発生する。その結果、必然的にスナバ回路を設置せざるを得ず、コンバータの変換効率の低下の原因となる。いままで、ロスレス型を含む多種多様なスナバ回路が提案されてきているが、従来のスナバ回路が必ずしも完全でないため、多種多様な方法が提案され続けているとも言える^{(7),(8)}。この項では、今までにないロスレススナバ回路を提案する。図 6-4(a)は今回提案するロスレススナバ回路である。図 6-4(b)は等価回路を表している。主スイッチがオフしたとき、配線のインダクタンスにより主スイッチを通してサージ電圧が発生する。配線のインダクタンスに蓄積されていた磁気エネルギーにより電流が主スイッチに並列なスナバ回路に流れ込み、

図6-4で示したように、電流はキャパシタ C_s を充電してダイオード D_s を通過する。キャパシタを放電するため、スナバスイッチ S (FET) がダイオード D_s に並列に接続されている。キャパシタの電圧 e_s が図示した極性で増加すると、FET のゲート電極を保護するためのツェナーダイオード Z_p 、キャパシタ電圧 e_s を検出するためのツェナーダイオード Z_s 、そして、回路保護のための抵抗 R_s を通して閉回路が形成される。その結果スイッチ S がオンすることによりキャパシタ C_s が放電し、入力電源に回生される。電圧 e_s が減少するので、ゲート電圧も低下し、スイッチ S はオフする。適切な容量のキャパシタをツェナーダイオード Z_p に並列に接続することでオフのタイミングを遅らせ、放電量のある範囲で制御することも出来る。このスナバ回路は外部信号が不要であり、2つの外部端子があり、様々な回路に適用することが出来る。図6-5に n チャンネルスイッチに代え、 p チャンネルスイッチの他の回路の例を示す。

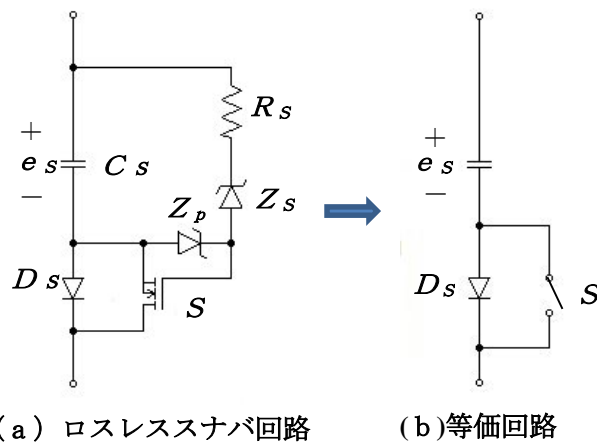


図6-4 ロスレススナバ回路と等価回路

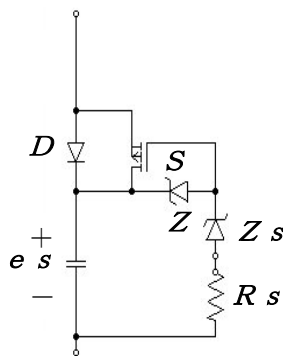


図6-5 PチャンネルFETによるロスレススナバ回路

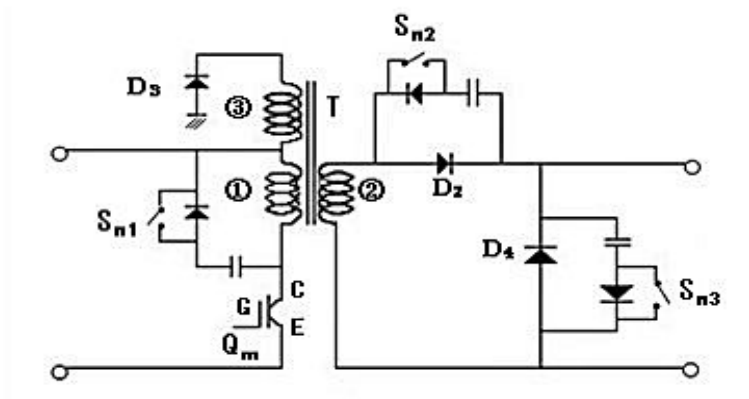


図 6-6 ロスレススナバの応用例

6-2-4 ロスレススナバのフォワードコンバータへの応用

図 6-6 に前述したフォワードコンバータへのロスレススナバの応用例を示す。提案するロスレススナバはサージ電圧が大きくなるような素子に合わせて接続してある。スナバ回路 S_{n1} は主スイッチ Q_m の開極時のサージのためのものであり、スナバキャパシタのエネルギーは巻線③を通して入力電力供給側に回生される。ダイオード D_2, D_4 に其々の逆回復電流によるサージはスナバ回路、 S_{n2} と S_{n4} によって吸収される。其々のキャパシタの電荷は出力回路か巻線③を通して入力電力供給側に回生される。

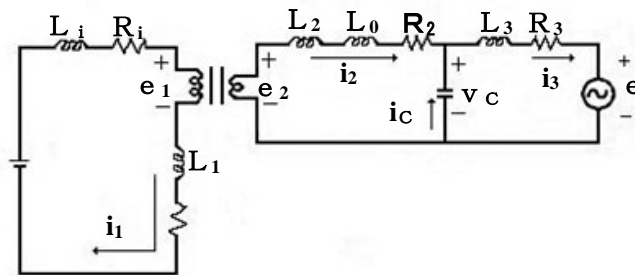
6-3 回路解析

6-3-1 主回路の動作解析

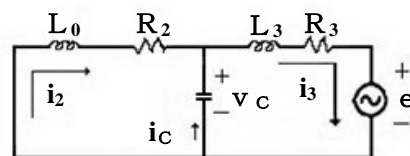
多くのフォワードコンバータの回路解析の結果が報告されている^{(9),(10)}。しかし、筆者が今回提案するシステムは DC コンバータと商用系統が連結されている。従って、回路動作の解析的結果を得ることは困難である。そこで筆者は解析的結果によらないシミュレーションによる結果について議論する。第 1 に回路動作を簡略化するためにスナバ回路の無い理想的なスイッチにおけるケースを検討する。前述のケースでは回路の微分方程式はすでに確立されている。第 2 にこのような微分方程式はスイッチのオン、オフのモードごとにコンピュータにより差分方程式を計算することで数値解を得ることができ、これらの数値から動作波形を得ることができる。

6-3-1.1 スイッチオン期間：フォワードコンバータの IGBT、 Q_m がオンしており、トランスの一次巻線を通して太陽電池アレイの電圧が供給される期間である。図 6-7(a)はこの期間の等価回路を示している。この回路の微分方程式は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 E &= (L_i + L_1) \frac{di_1}{dt} + (R_i + R_1) i_1 + e_1 \\
 e_2 &= (L_2 + L_o) \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + v_c \\
 v_c &= L_3 \frac{di_3}{dt} + R_3 i_3 + e \\
 i_c &= -C \frac{dv_c}{dt} \\
 i_3 &= i_2 + i_c
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$



(a) スイッチオン



(b) スイッチオフ

図 6-7 主回路の各動作モードにおける等価回路

6-3-1.2 スイッチオフ期間：IGBT、 Q_m がオフで入力電流がゼロになり、インダクタンス L_o に蓄えられたエネルギーがダイオード D_4 を通して放電される期間である。図 6-7(b)はこの期間の等価回路を示している。この回路の微分方程式は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 L_0 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + v_c &= 0 \\
 v_c &= L_3 \frac{di_3}{dt} + R_3 i_3 + e \\
 i_c &= -C \frac{dv_c}{dt} \\
 i_3 &= i_2 + i_c
 \end{aligned}
 \tag{6.3}$$

上述の微分方程式の差分法による数値計算によって得た、図 6-8 に示す電圧波形 V_c の全域に渡る各部の電流波形を、計算結果の例として図 6-8 に合わせて示してある。

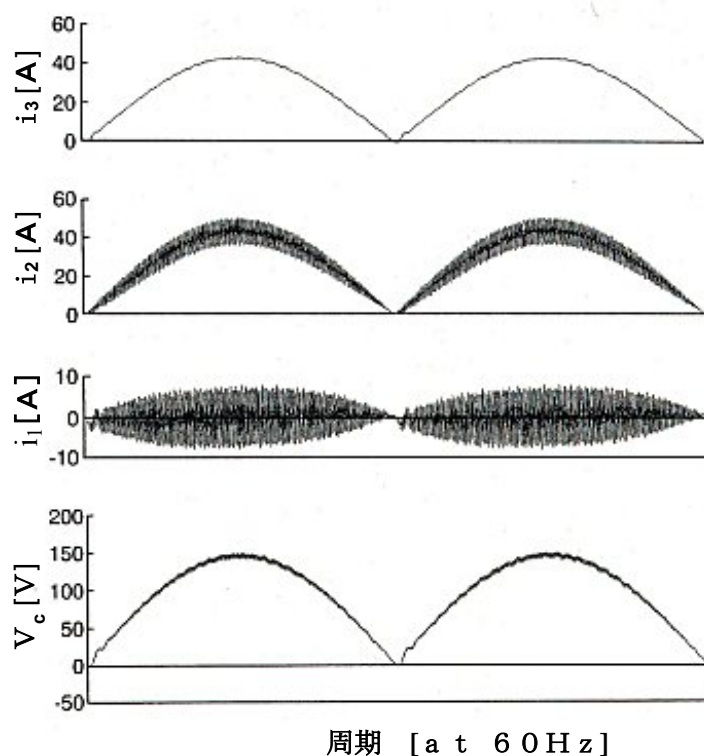


図 6-8 スイッチがオフ期間の式 (6.3) の計算用電圧波形と各部の計算電流波形

6-3-2 ロスレススナバがある場合の回路解析

主スイッチがオンのとき、一次巻線に入力直流電圧が供給され、二次巻線に出力電圧が励起される。

6-3-2.1 主スイッチがオンのときの動作

(i)期間1: 主スイッチがオンのとき、図6-9に示した等価回路のフリーホイールダイオード D_4 を通して瞬間ではあるが二次巻線の出力電圧が短絡回路となる。回路微分方程式は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} E &= (L_i + L_1) \frac{di_1}{dt} + (R_i + R_1)i_1 + e_1 \\ e_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} + (R_2 + r_{D2})i_2 \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

二次電流は突然ゼロから次第に増加する。さらに負荷電流 i_L が流れ、逆電流が接合点に蓄積された電荷による逆回復電流の最大値まで流れる。この電荷は発生した電流のレベルによって変化する。

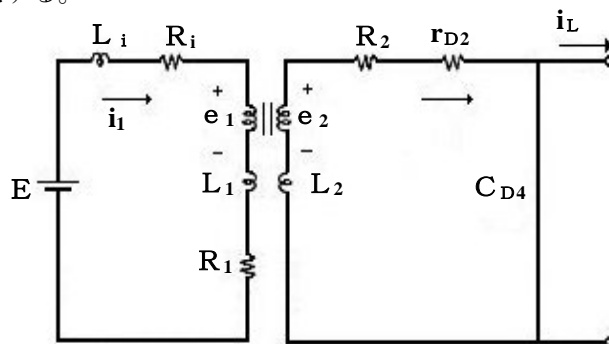


図6-9 主スイッチがオンの場合のスナバのある回路動作：期間1

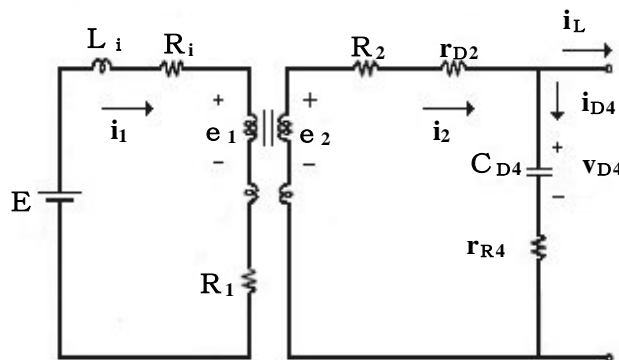


図6-10 主スイッチがオンの場合のスナバのある回路動作：期間2

(ii)期間 2: 期間 1 の終りから、従来のキャパシタのように pn ジャンクションの近傍に少数キャリアが蓄積され始める。従って、図 6-10 で示したダイオード V_{D4} の逆電圧はジャンクション容量 C_{D4} の充電により急激に上昇する。逆回復電流の降下率(falling ratio)は通常非常に大きく、ダイオードの逆電圧は必然的に非常に大きくなる。この値がスナバキャパシタの電圧レベルに達したとき、この期間は終る。

(iii)期間 3: 逆ジャンクション容量の充電のためサージ電圧はスナバキャパシタに電流を流し込むため、その等価回路は図 6-11 に示すようになる。一次回路の回路方程式は方程式(6.4)とまったく同じであるが、二次回路の方程式は以下のように変わる。

$$\left. \begin{aligned} e_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} + (R_2 + r_{D2})i_2 + r_{S4}i_{S4} + v_{S4} \\ i_{S4} &= C_{S4} \frac{dv_{S4}}{dt} \\ i_2 &= i_{S4} + I_L \end{aligned} \right\} (6.5)$$

ここで、期間 2、図 6-10 の C_{D4} 、 r_{R4} 、 v_{D4} 、 i_{D4} が C_{S4} 、 r_{S4} 、 v_{S4} 、 i_{S4} に其々置き換えられている。キャパシタ電圧 V_{S4} はサージエネルギーで増加するので、キャパシタ電流は流れなくなる。ツェナーダイオード Z_s が電圧の増加を防ぎ、そして FET をオンする。従って、キャパシタのエネルギーは負荷に放電を開始しこの期間が終了する。

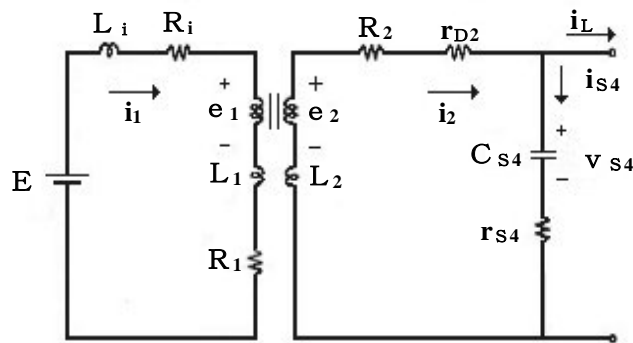


図 6-11 主スイッチがオンの場合のスナバのある回路動作：期間 3

(iv)期間 4: 電流の流れる方向が逆になる(図 6-12 参照)。等価回路においてダイオードの電圧降下の抵抗 r_{S4} は図示のように FET の抵抗 r_{F4} に置き換えられる。キャパシタ電圧 V_{S4} が減少するとき、ツェナーダイオード Z_s がこれを阻止し、FET をオフにする。充電

が充分であるときのみキャパシタは放電する。自己遮断素子ではスイッチング時に安全動作領域内での変移領域が必要であり、素子の定格における余裕が十分に確保されねばならない。

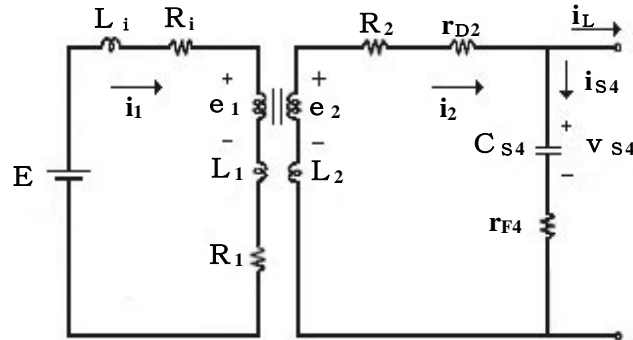


図 6-12 主スイッチがオンの場合のスナバのある回路動作：期間 4

6-3-2.2 主スイッチがオフのときの動作

(i) 期間 1：主スイッチ Q_m がオフのとき、一次電流 i_1 は図 6-13 のスナバ回路に転流する。二次回路においては、ジャンクションキャパシタンスを持ったバイパスダイオードに電流の転流が開始する。トランスの磁束のリセット動作により、図示のように起電力 e_1 と e_2 が誘起される。一次巻線の漏れインダクタンスに蓄積されていたエネルギーはスナバキャパシタ C_{S1} に移り始める。 V_{D4} がゼロで、電流 i_1 、 i_2 がゼロになり、そしてこの期間が終る。スナバキャパシタンスが適度に大きいので、 Q_m の端子キャパシタンスなどはこの動作においてほとんど影響は無い。そのためこれらの定数は等価回路において無視される。この期間の微分方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 e_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + (R_1 + r_{D2})i_2 + v_{S1} \\
 -e_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} + (R_2 + r_{D2})i_2 + v_{D4} \\
 i_1 &= C_{S1} \frac{dv_{S1}}{dt} \\
 i_{D4} &= -C_{D4} \frac{dv_{D4}}{dt} \\
 i_2 &= i_L - i_{D4}
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

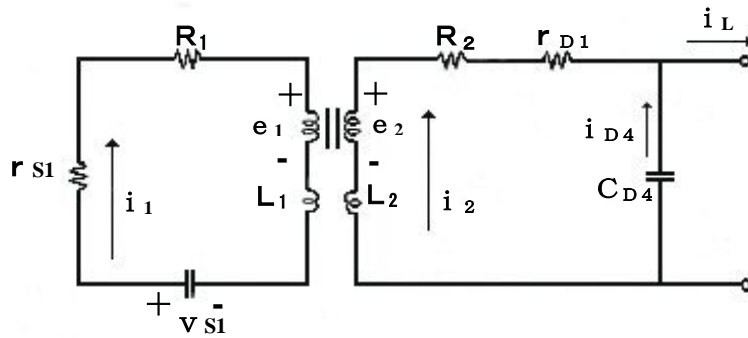


図 6-13 主スイッチがオフの場合のスナバのある回路動作：期間 1

(ii) 期間 2：スナバ回路 S_{nl} のキャパシタ電圧が増加し、そして、電流 i_1 がゼロまで減少したとき、前述したように其々、ツェナーダイオードがこの電圧レベルを検出し、FET スイッチをオフする。 S_{nl} のキャパシタエネルギーは第三巻線を通して電源側に回生される。エネルギーの一部は二次回路に分配され、そこでダイオード D_2 の逆回復電荷のため電流が短絡回路を通して流れる。（図 6-14 を参照）

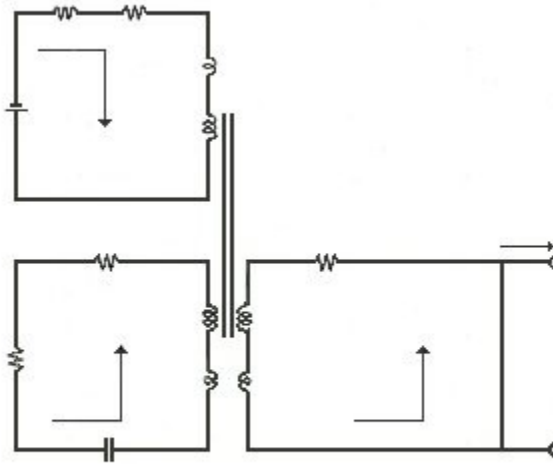


図 6-14 主スイッチがオフの場合のスナバがある回路動作：期間 2

(iii) 期間 3：ダイオード D_2 は逆接合キャパシタンスに充電されている。この電圧がスナバキャパシタンスの電圧より大きくなったとき、電流 i_2 はスナバ回路に転流し始める。この期間の微分方程式は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 -e &= L_1 \frac{di_2}{dt} + (R_1 + r_{F1})i_2 - v_{S1} \\
 i_1 &= -C_{S1} \frac{dv_{S1}}{dt} \\
 e_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} + (R_2 + r_{R2})i_2 + v_{D2} \\
 i_2 &= C_{D2} \frac{dv_{D2}}{dt} \\
 e_3 &= L_3 \frac{di_3}{dt} + (R_3 + r_{D3})i_3 + E
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

後半の期間において C_{D2} 、 r_{R2} 、 v_{D2} は C_{S2} 、 r_{S2} 、 v_{S2} に置き換え示している (図 6-15 を参照)。

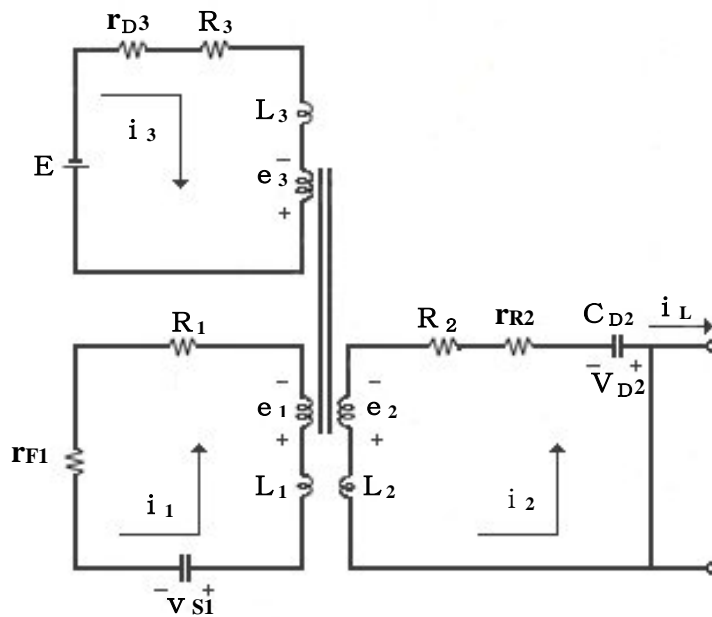


図 6-15 主スイッチがオフの場合のスナバのある回路動作：期間 3

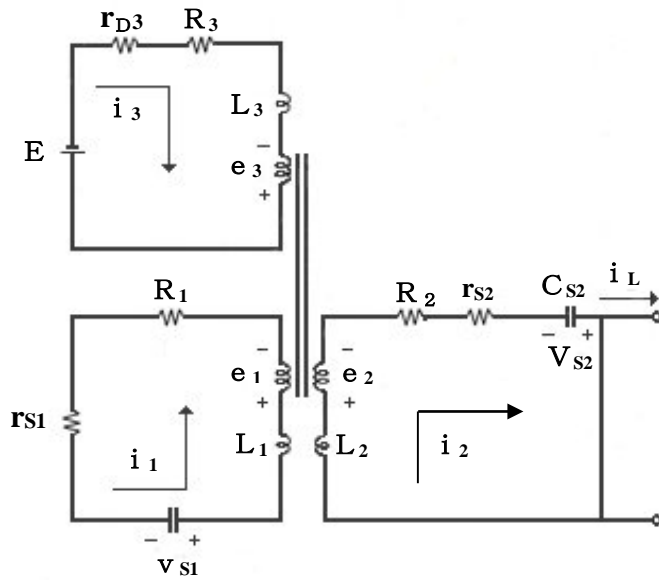


図 6-16 主スイッチがオフの場合のスナバのある回路動作：期間 4

(iv)期間 4：図 6-16 に示したように、二次電圧 e_2 よりスナバキャパシタ電圧 V_{S2} が大きくなった場合、電流 i_2 が方向を変える。この微分方程式は式(6.7)に類似した形で得ることができる。

6-3-3 シミュレーション結果

代表的な例として、図 6-17 に主スイッチがオフしたときの電流の波形を示している。其々の波形はコンピュータによる数値解析により式(6.6)、(6.7)などを解いた結果である。第一に、時間 t_1 では主スイッチがオフし一次主電流がスナバ回路 S_{n1} に流入する。これに伴い、二次電流 i_2 が急速に減少する。時間 t_2 においては、増加したスナバキャパシタの電圧 V_{S1} が検出され S_{n1} の FET スイッチがオンし、キャパシタ C_{S1} が放電し始める。スナバ S_{n1} のエネルギーは巻線③を通して電源側に回生される。時間 t_2 から t_3 までは、ダイオード D_2 のジャンクション蓄積電荷によりダイオード D_2 は短絡状態である。時間 t_3 からはダイオード D_2 で逆電流が流れ、 V_{D2} が急激に増加し、並列スナバ回路が動作する。時間 t_4 でスナバ S_{n2} のエネルギーも回生し始める。 i_2 の電流波形は少し振動するが、スナバエネルギーは回生され直ちにゼロになる。

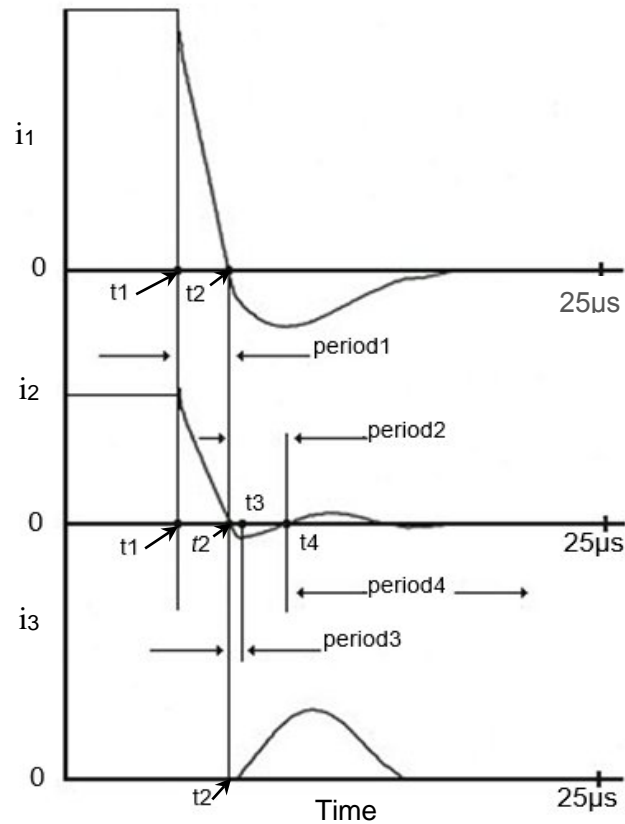


図 6-17 解析による主スイッチがオフの場合の各部電流波形拡大図

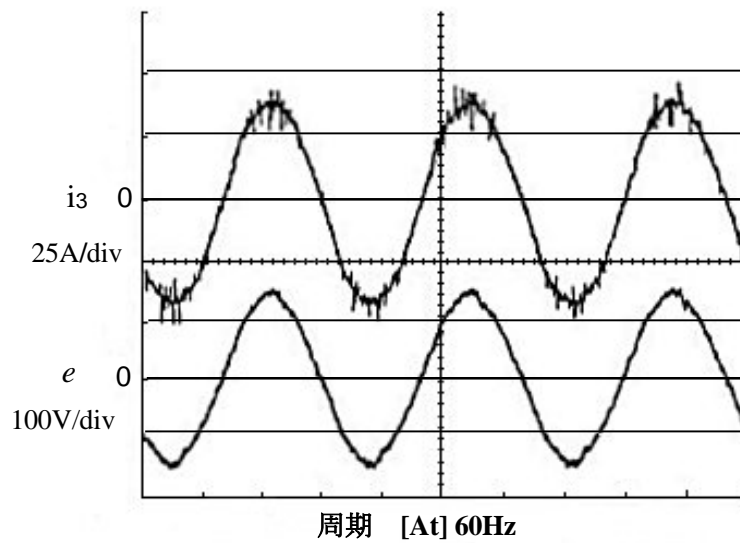


図 6-18 インバータの実験出力波形

6-4 実験結果検討

図6-18は直流入力電圧200V、出力交流電圧100Vであり、キャリア三角波の周波数20kHzによる太陽光発電システム用系統連系装置の試作機による実験出力波形である。図6-18に示したように、商用電源における電流波形は殆ど正弦波となり、力率も殆ど1である。図6-1でフィルターキャパシタCが出力回路に接続されているが、図6-18からわかるようにサージノイズが現れている。しかし、これは測定の影響によるノイズと考えられる。図6-19はロスレススナバの実験電圧波形を得たものである。主スイッチ Q_m がオフになったとき、 Q_m にかかる電圧は急激に増加するものの、スナバ電圧 V_s に適切に吸収されている。図6-19からスナバキャパシタは Q_m がオフの期間に放電していることが見て取れる。図6-20に系統連系での運転時の総合効率を示す。3kWまでの全期間で総合効率は90%を超えている。さらに新しい鉄心材料を使用した高周波トランスの導入、配線方法の更なる短少化、より高性能なスイッチング素子の採用などにより効率をもっと高めることが出来ると考える。

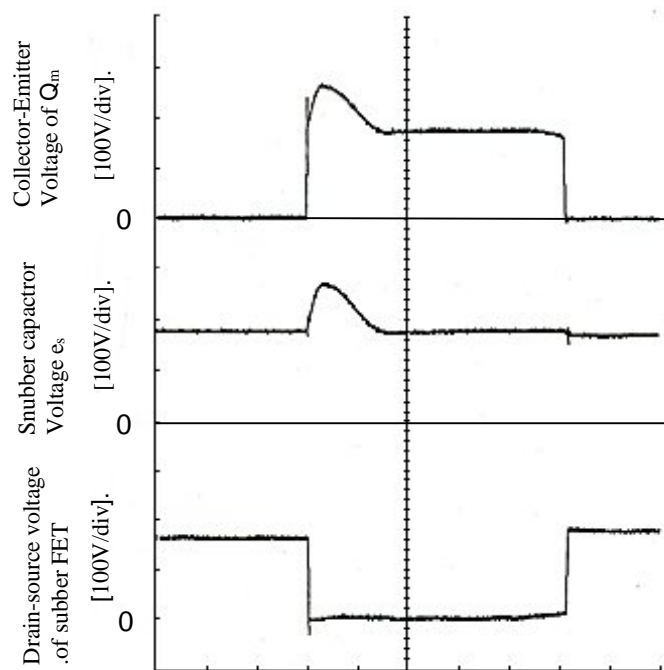


図6-19 ロスレススナバの波形

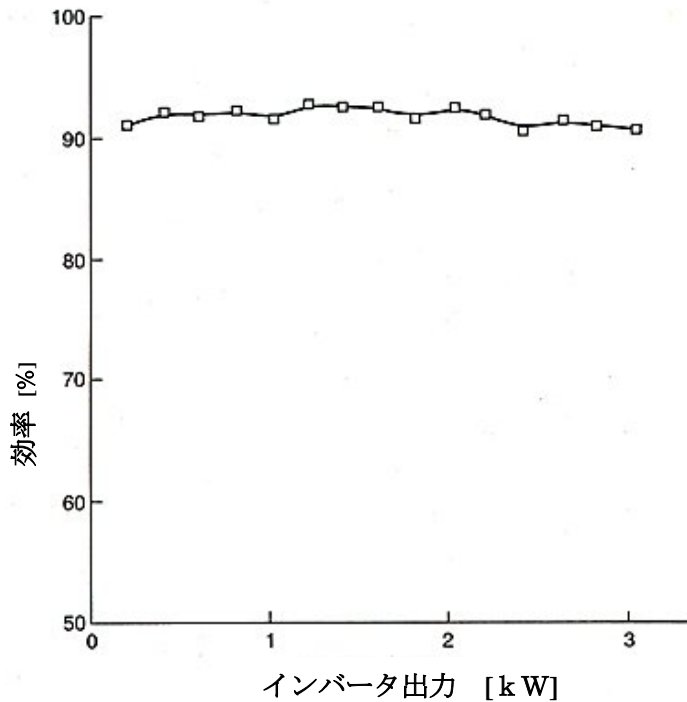


図 6-20 インバータ出力と効率

6-5 結論

筆者は新たな太陽光発電システム用の系統連系装置として、簡素化したコンバータシステムを提案した。一石 FORWARD コンバータを使ったこの電力変換システムは、1 つだけ高価な高周波スイッチング素子を使うという特徴を有している。残りの逆変換のための素子は低速で低価格、かつ順電圧降下も低い素子が使用でき、提案したゲート駆動回路を用いることで直流電力を交流系統に簡単に同期させることが出来る。この FORWARD コンバータシステムは極めて単純な構成にも係わらず、その総合効率はかなり高く良好な結果が得られた。また、提案したロスレススナバ回路は非常に簡単に使用でき、このコンバータ回路に最適である。数値解析シミュレーションと実験結果から、一般に低電力での使用に適している。本回路はフルブリッジ回路⁽⁴⁾に比べ、整流ダイオードも含むスイッチング素子数が減少しており、システムコストの低減に有効である。しかし、主スイッチング素子のオフ期間に素子に 2 倍の電圧がかかるため、素子定格を増やす必要があり、スイッチングノイズも生じる。以上の考察によって、本太陽光発電システム用系統連系装置は家庭用のような小容量のシステムに適合していると言える。

第6章 参考文献

- (1) Steigerwald, R.L., Ferraro, A., and Turnbull, F.G.: Application of power transistors to residential and intermediate rating photovoltaic array power conditioners, IEEE Trans. Ind Appl., 1983, Vol. IA-19, No. 2 pp. 254-267, (1983-3/4)
- (2) Khoder, A., AL-Haddad, K., and Rajagopalan, V.: Innovative utility-interactive D.C. to A.C. power conditioning system, Conference Record of 1985 IEEE IAS Annual Meeting, Toronto, Canada, pp. 1151-1155, (1985)
- (3) Okado, C.: Development of inverter for photovoltaic generation, Proceedings of 10th Photovoltaic Generation System symposium, Tokyo, Japan, pp. 4-11, (1993)
- (4) Steigerwald, R.L., Bose, B.K., and Szczesny, P.M.: Design and construction of an advanced power conditioning subsystem for small photovoltaic applications, Sandia Report, SAND 83-7037, (1985)
- (5) Cocconi, A., Cuk, S., Middlebrook, R.D., and Key, T.S.: Design and development of a 4-kW/20-kHz dc-isolated power conditioner for utility-interactive photovoltaic applications, Sandia Report, SAND 87-0353, (1987)
- (6) K. Matsui, K. Ando et al., Utility-interactive photovoltaic power conditioning Systems with forward converter for domestic applications, IEE Proceedings B, Power Applications, Vol. 147, No. 3, pp. 199-205, (2000-5)
- (7) Nomura, H., and Fujiwara, K.: Snubber energy recovery to output load by MOSFET, Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn. B (Japan), 1985, IWB, (4), pp. 408, (1985)
- (8) Ninomiya, T., Tanaka, T., and Harada, K.: Analysis and optimization of a non dissipative LC turn-off snubber, IEEE Trans. Power Electron., (2), pp. 147-156, (1988-3)
- (9) Ninomiya, T.: Characteristics and problems of switching regulator, J. Inst. Electr. Eng. Jpn., 100, (6), pp. 507-514 (in Japanese), (1980)
- (10) Matsui K., Yamamoto I., and Tsuboi K.: A forward converter reducing current harmonics in power system, Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn. D (Japan), 1993, 113-D, (9), pp. 1045-1053 (in Japanese) IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 147, No.3, (2000-5)

第7章 結 言

国策としてのエネルギー政策として「サンシャイン計画」、「ニューサンシャイン計画」が進められ、21世紀になり「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定され、より積極的な補助金政策などにより太陽電池を筆頭に各種新エネルギーは堅調に普及してきた。これらの普及がピークのころ、太陽光発電システムにおける火災事故に関する欧米の情報を入手し、また、国内でも太陽電池の各種異常が発生していることを知った。太陽光発電システムに代表される新エネルギーシステムを系統連系する技術は、エネルギーの自給という国策の実現と、将来の人々の生活を支えるという観点から非常に重要である。しかし、同時に、これらには必ず異常が起こることを理解し、これらの異常を検出保護する技術がなければ安全かつ信頼性の高いエネルギーには成りえず、逆に火災などの災害の種となりかねないことを念頭において普及促進を進めることが非常に重要である。

以上の観点に基づき、特に太陽電池の異常を検出・保護する技術と装置の開発を推進することに意義を感じ、太陽光発電システムの故障、事故の検出保護技術を具体化する研究を進めてきた。

本論文は其中で太陽光発電システム事故の最終段階であるアークの発生に至る前段階の異常である、短絡事故を検出するため太陽電池の特性を考慮した「太陽光発電システムにおけるインテリジェント短絡保護装置の開発研究」、一般家屋の屋根の上や広大なメガソーラーシステムなど、人が点検することがほぼ不可能な状況において、太陽電池モジュールの劣化を促進し、火災事故の原因を誘発するホットスポットを検出する「光ファイバによる太陽電池モジュール異常検出の研究」、太陽光発電システム事故の最悪の状態であるアークの発生による火災事故を事前に回避するための「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」によりそれぞれ成果を挙げることができた。

特にインテリジェント短絡保護装置は、前述以外の異常検出技術が具体化できた場合、その機能を追加することが可能であり拡張性が高く、次世代の交流直流混合の電気設備の維持管理に必須な、遠隔監視モニタリング機能を実現したことは今後の太陽光発電システムの点検保護技術の研究の大きな資産となりえるものとする。

また、家庭用、産業用の太陽光発電システムにおいて、系統がこれらの電力を吸収できる場合は系統連系が最良の策である。本論文の「太陽光発電システムにおける系統連系装置の開発研究」はこの視点で検討している。しかし、昨今の太陽電池、風力発電の普

及拡大に伴い一部の電力会社の電力買取申請の受け付け拒否が起こっている。これは新エネルギー設置に適した場所に申請が集中する地域偏在性が大きな要因ではあるが、電圧変動、周波数変動などの系統動揺を起こさない系統の許容量を超えた、太陽電池に代表される新エネルギーの電力買取申請の大幅な増加の結果である。このような状況に対し、系統連系技術として運転継続性能(FRT:Fault Ride Through)が要求されつつある。

しかし、国策として将来を考えた場合、エネルギーの自給率の向上は今後も進めるべき必須課題である。従って、今後も増大することが想定される新エネルギーによる供給電力を吸収するバッファとしての蓄電池の設置も必須であり、太陽電池、風力発電、燃料電池などの新エネルギーの保守点検、異常監視保護技術に加え、これらの系統連系装置類の運転状況把握や蓄電池の充放電監視制御技術などを総合的に管理運営する技術が重要となる。この根幹をなすのが、パワーエレクトロニクス技術であり、このパワーエレクトロニクス技術の基礎研究としても「太陽光発電システムにおける系統連系装置の開発研究」により成果を出すことができた。本論文の各成果が、次世代の直流交流が混在する給配電システムの安全確保の礎となるものと期待してやまない。

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜った愛知工業大学工学部教授 雪田和人先生に衷心より感謝の意を申し上げます。

本研究の遂行ならびに本論文の作成に際し、数々の有益なるご指導、ならびにご激励を賜った愛知工業大学工学部教授 一柳勝宏先生、愛知工業大学工学部教授 依田正之先生、愛知工業大学工学部教授 鳥井昭宏先生に厚く感謝致します。

また、本研究を進めるに当たって、愛知工業大学の実験設備を利用させていただきました愛知工業大学長 後藤泰之先生に深く感謝申し上げます。

さらに、本研究の過程におきまして、ご指導いただきました元中部大学名誉教授 松井景樹先生に深く感謝致しております。

本研究がこの段階に達するについては、日東工業株式会社常務取締役 黒野透氏ならびに日東工業株式会社取締役 落合基男氏の絶えざるご鞭撻とご支援の賜であり、ここに感謝致します。

また、本研究の遂行ならびに有益なご検討と多大な御援助をいただきました愛知工業大学工学部雪田研究室の当時の大学院生 坂斉典、二宮貴之両君、および大学院生 酒井浩太君に深くお礼を申し上げます。

各実験の、特に太陽電池の屋外実験におきましては、多数の学生諸君の協力なくしてはデータの収集など不可能でありました。これらの学生諸君にも感謝の意を表します。

最後に、これらの研究を長期間にわたり有意義なご意見と実験上多大なご尽力をいただいた愛知工業大学工学部教授 雪田和人先生に、再度、深く感謝する次第であります。

博士論文要件論文表

論文名	著者など	引用箇所
太陽光発電システムにおけるインテリジェント保護装置	安藤健志,坂 齊典,二宮貴之,市川智彦, 雪田和人,依田正之,後藤泰之,一柳勝宏 太陽エネルギー学会論文誌 Vol.37,No.6,pp.41-48,2011,11	第1章、第2章 第3章
光ファイバを用いた太陽電池モジュールの温度計測研究	安藤健志,酒井浩太,雪田和人,後藤泰之, 一柳勝宏,依田正之 太陽エネルギー学会論文誌 Vol.40,No.4,pp.43-49,2014,7	第1章、第2章 第4章
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	安藤健志,酒井浩太,雪田和人,後藤泰之, 一柳勝宏,依田正之,宮本淳史 太陽エネルギー学会論文誌 Vol.40,No.6,pp.39-44,2014,11	第1章、第2章 第5章
Utility-interactive photovoltaic power conditioning systems with forward converter for domestic applications	K.Matsui, I.Yamamoto, S.Hirose, K.Ando T.Kobayashi IEE Proceedings B, Electric Power Applications. Vol.147,No.3,pp.199-205,2000,5	第1章、第2章 第6章