

# 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

Kenji Ando

氏名 安藤 健志  
学位の種類 博士 (工学)  
学位記番号 博 乙 第 27 号  
学位授与 平成 27 年 2 月 26 日  
学位授与条件 学位規定第 3 条第 4 項該当  
論文題目 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  
(The researches for the detection technique of faults on PV systems and the technique of connection to the commercial systems)  
論文審査委員 (主査) 教授 雪田 和人<sup>1</sup>  
(審査委員) 教授 一柳 勝宏<sup>1</sup> 教授 依田 正之<sup>1</sup> 教授 鳥井 昭宏<sup>1</sup>

## 論文内容の要旨

### 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(The researches for the detection technique of faults on PV systems and the technique of connection to the commercial systems)

低炭素社会を実現する手段のひとつとして、太陽光発電システムの大量導入への期待が高まっており、国内導入量として 2030 年に約 5300 万 kW を目標としている。この太陽光発電システムの大きな特徴として、発電電力が気象条件に依存するため、出力が不安定であることがあげられる。このため、既存の電力系統に太陽光発電システムが大量導入される際、系統連系保護装置や系統故障時における運転継続性能 (FRT) が新たに要求されつつある。一方で、導入された太陽光発電システムは、適切な維持や保守を実施していない場合、発電出力の低下やシステムの故障、故障した状態における発電運転による事故が報告されはじめている。これら報告における故障に起因したシステム火災に関しては、現在、さまざまな対策が東京消防庁を中心に検討されつつある。このため、太陽光発電システムの故障検出、不具合発生時における発電停止手法などが重要視されている。

そこで本論文では、このような問題を解決するために、太陽光発電システムのシステム異常検出技術と系統連系技術について一提案をするものである。

本論文は、7 章から成り、第 1 章では本研究の背景について記す。

第 2 章では、太陽電池発電システムの構成と本研究課題の意義について記す。

第 3 章では、太陽光発電システムにおける太陽電池について注目し、この太陽電池の短絡故障時における故障検出手法の提案と提案手法による短絡保護装置の開発について記す。提案する故障検出手法は、太陽電池の短絡時における条件を、太陽電池の等価回路をもとに、発電電流と日射強度の関係式を導出し、検出条件を求めてこの条件により判別するものである。さらに、提案手法を用いた短絡保護装置の開発では、アナログ回路と電動リレーによる保護装置を製作した。そして、この装置をもとに太陽光発電システムのさまざまな発電状況と多様化する故障に対応するため、アナログ回路で構成した故障検出回路を、マイクロコンピュータを用いることにより、故障検出精度の向上と検出装置の小型化を図っている。さらにこの装置に、遠隔通信機能を追加しシステムの遠隔監視を可能にしている。

第 4 章では、太陽電池の故障時に起因した発電時における異常発熱現象に注目し、太陽電池の温度計測手法について検討した。本論文では、太陽光発電システムの太陽電池全体の温度変化を、光ファイバによる温度計測法を適応することを提案している。この手法を太陽光発電システムにおける太陽電池の温度計測に用いる場合には、太陽電池に設置する光ファイバの形状や温度検出性能を適応させるために、直線状設置と円環状設置について検討している。特に、円環状設置においては、温度検出効果を見出せる光ファイバの最適な巻数に関して明らかにした。そして、

1 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

家庭用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状況や、メガソーラーのような温度監視が困難な環境において、光ファイバを使用した温度計測手法は、異常のある太陽電池の発熱箇所の検出に有効であることを示している。

第5章では、これまで検討してきた短絡故障だけでなく、太陽電池の故障における末期的な状況で火災を引き起こす電弧（アーク）に関して検出する必要があるため、アーク検出手法に関して記す。アーク発生時には、直流電流に高周波の放射ノイズや伝導ノイズを伴っている。そこで、本論文ではノイズ対策用のフェライトコアを電流計測の変流器（CT）に導入し、アーク発生を検出できるCTを提案し、その有効性を基礎的な実験で示している。さらに本論文では、提案するCTを用いた検出手法は、太陽光発電システムだけでなく、直流電源を用いた直流系統においても、アークの検出が可能であることを示している。

第6章では、太陽光発電システムにおける系統連系装置について注目し、従来よりも簡便な系統連系装置を提案している。今後、太陽光発電システムは、系統への大量導入が予想されており、系統保護装置やFRTについても多面的な検討が必要とされるとともに、より高効率かつ小型の系統連系装置が期待されている。そこで本論文では、フォワードコンバータとロスレススナバ回路を用いることを提案し、変圧機能をインバータに内蔵し連系変圧器がある系統連系装置よりも小形化と簡便化を実施している。そして、提案する系統連系装置の有効性を、計算機シミュレーションと実験により示している。

第7章では、研究を総括し今後の展望について記している。

## 論文審査結果の要旨

近年、温室効果ガスなどによる地球温暖化現象が懸念されている。このため低炭素社会の実現が期待されており、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを用いた発電システムが注目されている。このため、様々な発電容量の太陽光発電システムや風力発電システムなどが、電力系統内に点在しながら増加しつつある。特に、国内において固定買い取り制度（FIT）の政策実施もあり、太陽光発電システムは、2030年に2005年の40倍である約5300万kWを導入目標量としている。

このような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、発電機などの回転体がないため、定期的な保守管理や維持管理が軽視されている場合が多い。このような状況において、設置から数年後に故障や故障に起因した火災などの事故が報告されはじめている。太陽光発電システムは、発電エネルギーを太陽光に依存しているため、太陽電池の出力調整や発電停止が現状のシステムでは困難である。このため、太陽光発電システムの故障検出やシステムの不具合発生時における発電停止手法などの開発が重要視されている。

本研究は、このような問題を解決するために、太陽光発電システムの不具合時検出手法と発電停止手法、太陽光発電システムにおける太陽電池のオンラインで面的温度計測手法である異常検出技術を提案している。さらに、システムの系統連系装置に注目し、従来型の装置よりも小型化と簡易化手法について提案している。

本論文は、合計7章から構成されている。

第1章では、太陽光発電システムの研究動向と現在報告されているシステム故障や事故に関して記すとともに、本論文の構成について述べている。

第2章では、太陽光発電システムの構成、システム故障時の特性について述べている。特に、商用交流電源と太陽光発電システムの短絡電流特性について説明している。この特性から、太陽電池の短絡電流は、定格電流とほとんど変わらないため、これまで商用交流電源で使用されている過電流検出素子が使用できないことについて説明している。そこで、太陽光発電システムの故障検出には、太陽電池の短絡特性にあった短絡保護技術が必要であることを述べている。

第3章では、太陽光発電システムにおける太陽電池について注目し、この太陽電池の短絡故障時における故障検出手法の提案と提案手法による短絡保護装置の開発について述べている。提案する故障検出手法は、太陽電池の短絡時における条件を、太陽電池の等価回路をもとに、発電電流と日射強度の関係式を導出し、この式をもとに電流－電圧特性を求め異常検出のための電流と電圧の閾値を求める方法について説明している。さらに、実際のシステムにおけるインバータ制御を考慮した電流－電圧特性について検討し、提案手法による短絡保護装置を開発している。この短絡保護装置の開発では、まず、アナログ回路と電動リレーによる保護装置を製作した。次に、この装置をもとに太陽光発電システムのさまざまな発電状況と多様化する故障に対応するため、アナログ回路で構成した故障検出回路を、マイクロコンピュータを用いることにより、故障検出精度の向上と検出装置の小型化を図っている。さらにこの装置に、遠隔通信機能を追加し、システムの遠隔監視を可能にしたことを述べている。

第4章では、太陽電池の故障時に起因した発電時における異常発熱現象に注目し、太陽電池の温度計測手法について述べている。特に、本論文では、太陽光発電システムにおける太陽電池裏面の温度変化、光ファイバによる温度計測手法を提案している。この手法を太陽光発電システムにおける太陽電池の温度計測に用いる場合には、太陽電池に設置する光ファイバの形状や温度検出性能を適応させるために、直線状設置と円環状設置について検討している。提案する円環状設置においては、温度検出効果がある光ファイバの最適な巻数に関して明らかにした。さらに、太陽電池モジュール表面上の影などによって生じるホットスポットが太陽電池の劣化や故障の原因であることを述べている。そして、家庭用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状況や、メガソーラー

のような温度監視が困難な環境において、光ファイバを使用した温度計測手法は、異常のある太陽電池の発熱箇所の検出に有効であることを示している。

第5章では、これまで検討してきた短絡故障だけでなく、同極の故障時に発生する電弧（アーク）に関しても検出する必要があるため、同極アーク検出手法に関して述べている。同極におけるアーク発生時には、直流電流に高周波の放射ノイズや伝導ノイズを伴っている。そこで、本論文ではノイズ対策用のフェライトコアを電流計測の変流器（CT）に導入し、アーク発生を検出できるCTを提案している。そして、提案するCTの有効性を、基礎的な実験で示している。さらに、隣接する太陽電池のストリングで発生するアークでは動作しないことも確認している。そして、実際の3kWの太陽光発電システムにおいて、アーク検出ができたことについて述べている。さらに本論文では、提案するCTを用いた検出手法は、太陽光発電システムだけでなく、直流電源を用いた直流系統時においても、同極アークの検出が可能であることを示している。

第6章では、太陽光発電システムにおける系統連系装置について注目し、従来よりも簡便な系統連系装置を提案している。今後、太陽光発電システムは、系統への大量導入が予想されており、系統保護装置や故障時運転継続性（FRT）についても多面的な検討が必要とされるとともに、より高効率かつ小型の系統連系装置が期待されている。そこで本論文では、一石 FORWARDコンバータとロスレススナバ回路を用いることを提案し、変圧機能をインバータに内蔵し連系変圧器がある系統連系装置よりも小形化と簡便化を実施している。この提案手法においては、スイッチング素子が主回路であるIGBTだけであるということと、ロスレススナバ回路では、IGBT回路にて発生したサージを完全に抑えることができるという特徴がある。そして、提案する系統連系装置の有効性を計算機シミュレーションと実験により示している。この結果、提案する系統連系保護装置は、主回路が停止状態のときに、スイッチングに用いている半導体素子に2倍の電圧がかかるため、素子の耐電圧を2倍にする必要があることとスイッチングノイズも発生しやすいなどの欠点があるため、小容量に適していることを述べている。

最後に第7章では、本研究を総括し、今後の展望について言及している。

以上に述べたように、本論文では、今後増加してくるものと予想される太陽光発電システムの故障検出や故障に起因した事故防止などに関して、一解決手法を提案している。また、系統連系装置の小型化と簡易化においては、複雑な運転を要求されている系統連系技術に大きく貢献できるものと期待される。さらに、本研究成果は、太陽光発電システムのみならず、蓄電システムや燃料電池発電システムなどへの応用も期待出来るものと思われる。

このように本研究の成果は、学術上、工学に寄与するところが大きい。よって、審査委員会は本論文提出者 安藤健志氏を、博士（工学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。