

氏名	関口 貴哉
所属	システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	シス博 第188号
学位授与の日付	令和5年3月25日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	Control Strategy for Improving Efficiency of Photovoltaic System with Active Power Decoupling (アクティブパワーデカップリング形太陽光発電システムの高効率化を目的とした制御法)
論文審査委員	主査 教授 和田 圭二 委員 教授 鈴木 敬久 委員 准教授 五箇 繁善 委員 教授 三浦 友史 (長岡技術科学大学)

【論文の内容の要旨】

温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボン・ニュートラルの実現に向けた取り組みが活性化する中、化石燃料に替わるエネルギー源として再生可能エネルギーが期待されている。第6次エネルギー基本計画では、再生可能エネルギーの発電量を、2030年までに全体の38%とする導入目標を策定している。再生可能エネルギーの普及拡大には、高い発電効率を持つ発電システムを長期間運用することで、発電コストの低減を実現する必要がある。発電システムには、発電した直流電力を交流電力へ変換するインバータなどの電力変換回路が必須である。電力変換回路は、電力変換時に生じる損失による電力変換効率の低下や、発電システムを構成する装置の中で比較的寿命が短い点が課題である。従って、再生可能エネルギーの普及拡大を促進するためには、高効率で長寿命な電力変換回路を開発することが求められる。

本研究では太陽光発電(PV)システムを対象とする。長寿命なPVシステムを実現するうえで、電力変換回路に用いられる電解コンデンサの短寿命が課題となる。これに対し、追加の電力変換回路を用いてフィルムコンデンサに置き換えることによって、長寿命なPVシステムを実現するアクティブパワーデカップリング(APD)方式の研究が数多く行われている。

APD方式は、追加回路による電力損失が発生するためにシステム全体の効率が低下するという課題が知られている。先行研究では、電力変換回路に着目した高効率化の検討が数多く行われているのに対して、制御法に着目した高効率化の検討は十分に行われていない。

また、先行研究では、回路動作の検証が主目的であることから太陽電池アレイは模擬電源に、配電系統は高調波などを含まない理想電源などに置き換えた簡易的な検討が行われている。しかし、先行研究のシステム構成では、太陽電池アレイの発電特性や配電系統が、回路・制御動作に与える影響は検証できず、実際のシステムにおける課題の検討が十分に行われていない。

本研究では、APD 形 PV システムの高効率化を目的として、インバータ・APD 回路の制御法を開発する。本論文では、太陽電池アレイの発電特性に基づいた回路・制御法を提案し、PV システムの高効率化を達成する。加えて、配電系統が APD 制御に与える影響に着目し、その課題を解決することで、高効率な PV システムを実現する。本研究は、太陽電池アレイの特性や配電系統の影響に着目した制御法の開発を行うことで、システム全体の高効率化を推し進めることに特徴がある。

本論文は 7 つの章に分けて記述されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の重要性を支持するための背景について述べる。また、本論文で対象とする課題を明示し、本研究の目的を明確にする。

第 2 章では、本研究の関連研究および先行研究についてまとめ、APD 方式の課題を整理する。APD 方式の高効率化において、先行研究では回路そのものの電力変換効率に着目したのに対し、本論文では太陽電池アレイの発電効率と電力変換効率を合わせたシステム全体の効率を考慮した回路・制御法に着目する。発電効率に影響を与える要素として、「電圧リプル」と「部分陰」の 2 点に着目する。太陽電池アレイの等価回路を用いた解析から直流電圧における電圧リプルの割合(以下、電圧リプル率)を 5% に制御することで発電効率を十分に引き出せることを明らかにした。さらに、電圧リプル率を 5% に制御するうえでの課題が、「系統高調波電圧に起因した電圧リプル」、「共振特性を持つ系統インピーダンスの推定技術」であることを明らかにした。

第 3 章では、太陽電池アレイの発電効率を踏まえたシステム全体の効率が最大となる APD 回路の電圧リプル制御について述べる。2 章での解析結果を踏まえて、電圧リプル率 5% を達成する制御法を提案する。PV システムに対する検証結果から、従来制御と比較して最大で 16.8% の効率向上を達成した。

第 4 章では、部分陰補償を目的とした発電動作点制御回路と APD 回路を統合したシステムにおける回路特性および制御特性について述べる。両回路の特徴を持つ PV システムを 2 つの回路構成で提案し、状態平均化法を用いた解析により、両者の回路特性および制御特性を明らかにする。2 つの回路構成に対する検証結果から、PV システムの高効率化に有効な回路構成を明らかにした。

第 5 章では、高調波電圧を考慮した電圧リプル制御について述べる。3 章で提案した電圧リプル制御では基本波電圧のみに着目したのに対し、高調波電圧を考慮した制御法に拡張する。交流電源電圧に 3 次高調波成分が含まれた PV システムに対する検証結果から、高調波電圧に起因する周波数成分を含めて電圧リプル率 5% を達成した。

第 6 章では、共振特性を持つ系統インピーダンスにおけるインダクタンス・キャパシタンス・抵抗値(LCR パラメータ)のリアルタイム推定手法について述べる。電圧リプル率 5 % を達成するには、系統インピーダンスのパラメータを推定誤差 5 %以下で取得する必要がある。系統インピーダンスモデルの共振特性に着目した数値解析に基づき、LCR パラメータ推定手法を提案する。インバータに対する検証結果から、推定時間を従来手法の 5 分 1、パラメータの推定誤差が 2%以下の精度を達成した。

第 7 章では、各章から得られた結論により、本論文が APD 機能を有する PV システムの高効率化に向けた貢献を明らかにし、さらに今後の展望を示す。