

京都大学	博士（工学）	氏名	南 政 孝
------	--------	----	-------

論文題目	分散型電源の系統連系における受動性に基づく制御および位相同期方式に関する研究
------	--

（論文内容の要旨）

電気エネルギーシステムは、現代社会におけるエネルギーネットワークの根幹をなす。近年、電気エネルギーシステムを取り巻く環境が大きく変化し、環境負荷低減や低炭素化社会実現のため、太陽光や風力などの再生可能エネルギーを利用した分散型電源の研究が進められ、既存の電力系統に導入し、連系する試みが進められている。今後、これらの分散型電源の住宅用および産業用への一層の導入が期待される。一方、これらの自然エネルギーを用いた分散型電源の出力は、天候、気温、風力などの気象条件に左右されやすく、一定の出力が得られないという特性がある。出力変動の大きな分散型電源が配電系統に多数連系する場合、電力の需給バランスが崩れることによる周波数の変動や逆流による配電線電圧の上昇をまねく等の問題が懸念される。また擾乱により分散型電源が停止すると、再起動に概ね5秒から15秒を要することから、系統事故などの広域の擾乱発生時に、分散型電源が一斉停止し、配電系統に電力不足を及ぼすことも懸念される。今後、増加する分散型電源の導入量に伴い、電源単独の系統連系ガイドラインを満たすだけでなく、系統運用に積極的に貢献することが強く求められる。すなわち、分散型電源系統連系システムは、定出力特性、擾乱への耐性、電力の調整機能を有することが不可欠となっている。

本論文は、分散型電源を電力系統に連系するための複数の電力変換器の制御方式について、受動性に基づく制御および位相同期方式を適用することを提案したもので、位相急変、瞬時電圧低下、負荷抵抗値変動などの配電系統のシステム構成の変化を伴う擾乱時において、提案した制御手法が自律的に位相を調節し、系統連系を維持することを示した一連の数値的、実験的検討結果をまとめたものであって、7章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景、意義を述べている。また関連する周囲状況および先行研究についてまとめている。

第2章では、太陽光発電システムの概要を述べた上で、本論文で対象とする分散型電源系統連系システムとその制御手法について説明している。対象システムは、複数の電力変換器により構成される。まず、各電力変換器の動作を考慮した上で実験条件を導出し、本論文で用いる設計パラメータを定める。次に、インバータの系統連系手法として、位相同期方式を適用することについて述べている。インバータの入力電圧による電圧制御発振器を用いた位相同期方式を適用する。位相同期方式は、インバータが同期発電機に対応した動作をすることが示され、慣性を持った同期発電機の特性をインバータに付与することが示される。そして、システムのエネルギーに注目した受動性に基づく制御により、目標値追従を行うことについて述べている。電気回路網だけでなく、スイッチを含む電力変換器においても受動性が成立することを確認し、複数の電力変換器が直並列に結合した場合にもその性質が保たれることを示している。分散型電源が系統連系するためには、複数の電力変換器が必要となる。そのため、受動性に基づく制御を適用することが複数の電力変換器の結合したシステムを制御する際に有効であることを示している。

第3章は、第2章で適用した位相同期方式と受動性に基づく制御による、分散型電源系統連系システムのダイナミクスを数値的に検討し、実験的に検証している。位相同期方式を用いることにより、インバータの出力電圧の位相が、配電系統の電圧位相の変動に合わせて自律的に元の位相差となるように収束し、また、インバータの出力電圧の位相の振動周波数や収束時間が同期発電機の慣性定数に対応するキャパシタ容量に依存することを確認している。さらに、受動性に基づく制御を適用することにより、状態変数であるインダクタ電流およびキャパシタ電圧が目標値に追従することを確認し、受動性に基づく制御の妥当性および有効性を示している。さらに、過渡挙動において

京都大学	博士（工学）	氏名	南 政 孝
------	--------	----	-------

制御ゲイン依存性を検討し、その決定のための考え方を示している。

第4章では、配電系統が瞬時電圧低下を生じる場合において、分散型電源の電力変換器の耐性を検討している。瞬時電圧低下による影響の防止は、需要家側の対策が合理的であると言われている。そのため、分散型電源を系統連系する電力変換器には、瞬時電圧低下の耐性が求められる。そこで本章では、瞬時電圧低下が生じた場合において、分散型電源の電力変換器の挙動について検討している。電圧振幅が50%に低下する瞬時電圧低下の場合、瞬時電圧低下中も、受動性に基づく制御により状態変数が目標値へ追従を達成し、位相同期方式により系統連系を維持することを数値的に確認し、実験系を構築して実証している。さらに、瞬時電圧低下回復後には元の定常状態へ収束することを示している。電圧振幅が10%にまで低下する場合には、系統連系を実現するインバータの出力電圧の位相が定まらないことから、分散型電源の系統連系を維持できない。しかしながら、瞬時電圧低下回復2秒後には再び元の定常状態への同期復旧を確認している。これらの結果により、受動性に基づく制御および位相同期方式は瞬時電圧低下に対して有効な系統連系手法となりうることを示している。

第5章では、分散型電源と配電系統に接続した負荷抵抗が変動した場合において、分散型電源の電力変換器の挙動について検討している。負荷抵抗の変動は、日常的に負荷を使用するタイミングに合わせて切り替えることにより発生する。そのため、負荷抵抗値の変動に対して、対象システムの動作を検討することにより、実用可能性を示す必要がある。本章では、負荷抵抗値が倍増または半減した場合にも、受動性に基づく制御により状態変数が目標値へ追従を達成し、位相同期方式によりインバータの出力電力を変えずに系統連系を維持することを数値的に確認し、実験系により実証している。さらに、インバータの入力電圧に生じる脈動について考察を加えている。インバータの入力電圧に生じる脈動は、インバータのスイッチングによるものであることを明らかにしている。

第6章では、はじめに低次元の力学系におけるポテンシャル関数の再構成手法を検討している。この提案手法は、ポテンシャル関数上を振動する解の軌道を計算し、その軌道に対するパワースペクトルを用いるものである。この提案手法により、ポテンシャル関数の形状に関して、特定の領域における適用が可能であることを明らかにしている。しかしながら、この手法において、任意の初期値の軌道が観測可能であるという仮定が現実的ではない。そこで次に、実験系における定常状態を把握する手法について検討し、振動する解を得るためにインバータに微小信号を重畳することを提案した。そして、この提案手法によって、インバータと配電系統とに接続する負荷の推定を実験的に試みた。はじめに、実用可能である条件を得るために、重畳信号の周波数、振幅、測定時間について検討した。その結果より、単独運転検出に用いる周波数である10Hzを採用し、実験的な検討により振幅は主成分の1%とした。電力系統の測定系に用いられる機器の時間オーダーから100ミリ秒ごとに測定を行い、本論文で対象とする実験系において負荷推定手法を適用した結果、推定誤差を含むが、負荷を推定することに成功した。さらに、定常状態の遷移を数値的に検討している。これは、負荷変動が発生した場合にも配電系統からの電力を一定に維持することを目的として、分散型電源側の電力変換回路における目標値を出力電力によって調整するものである。その結果、負荷変動後に配電系統からの出力電力を一定に維持可能であることを数値的に示した。

第7章は、本論文の結論であり、得られた成果を要約すると共に、今後の研究課題について要約している。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、分散型電源を電力系統に連系するための複数の電力変換回路の制御方式について、受動性に基づく制御および位相同期方式を適用することを提案したもので、位相急変、瞬時電圧低下、負荷抵抗値変動などの配電系統のシステム構成の変化を伴う擾乱時において、自律的に位相を調整し、系統連系を維持することを示し、提案した制御手法に関する数値的、実験的検討の一連の成果をまとめたものである。本論文により得られた主要な結果は以下の通りである。

1. 複数の電力変換器が結合する分散型電源系統連系システムに関して、受動性に基づく制御を用いることによって、システムの状態変数が目標値へ追従動作することを実証した。さらに、過渡挙動を検討することにより、受動性に基づく制御の制御ゲインを決定する指針を与えた。
2. 系統連系に用いられるインバータに関して、位相同期方式を用いることにより、インバータが慣性を持つ同期発電機のように振る舞うことを明らかにした。そして、位相同期方式を適用した結果、配電系統側の電圧位相がステップ的に変化した場合においても、インバータの位相が自律的に調節されて収束することを明らかにした。
3. 配電系統に生じる位相急変や瞬時電圧低下、および、需要家側に生じる負荷抵抗値変動等の擾乱に対して、上述の制御手法を用いることにより、目標値追従動作を保証し、系統連系を維持できることを数値的および実験的に示した。この結果より、適用する制御手法が分散型電源の系統連系において実際的に有効な手法となることを示した。
4. インバータに周期的摂動を加えることにより、負荷を推定する機能をインバータに付与する手法を示し、使用する摂動の条件を得た。この手法を用いた分散型電源の系統連系システムの定常状態への遷移を実現し、提案システムが所望の状態を維持できることを数値的に示した。

上記のように本論文では、受動性に基づく制御および位相同期方式が分散型電源の系統連系において有効であることを明らかにすると共に、さらに今後の機能向上の可能性を示したものであり、極めて優れた成果と言え、学術上、實際上、寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年1月7日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。