

称号及び氏名	博士（工学） 姉川 高也
学位授与の日付	2023年3月31日
論文名	「PCSのみを電源としたオフグリッドにおける 事故検知手法に関する研究」
論文審査委員	主査 石亀 篤司 副査 森本 茂雄 副査 久保田 寛和

論文要旨

近年、地震、台風、豪雨等の激甚災害が増加し、その際に遠隔分散地への配電線路が絶たれ、停電が長期化するケースが頻発している。その解決に向け、遠隔分散地域等の配電システムを分散電源によって系統自立（以下、オフグリッド）させることが検討されている。また、公共施設、避難施設といったレジリエンス性の求められる施設一帯を近隣の分散電源を用いて、有事の際にオフグリッド化して運用するマイクログリッドについても議論されている。その電源については、太陽光や蓄電池、小規模風力等、インバータ電源である Power Conditioning Subsystem（以下、PCS）が担うと考えられるものの、一方で PCS のみを電源として、国内の一般送配電事業者の配電システムを恒常的にオフグリッド化していく前提に進められた検討は、現状存在していない。実現には安定的な電源容量の確保とコスト採算性といった課題もあるものの、最も優先されるべき安全上の課題として保安要件が明確になっていないことが理由の一つとして挙げられる。併せて、PCS は系統連系を目的に開発が進められてきたために、自立運転時における事故時の挙動とその保安性能に関して検討事例が多いとは言えない状況である。本稿では、そうした課題解決に向け、i.シミュレーション環境の構築、ii.事故時シミュレーションの実施、iii.シミュレーション結果と実験結果の比較、iv.オフグリッドにおける事故検知機構の提案という四段階に分けた検証、検討を行った。

i. シミュレーション環境の構築

当該検討では、単数台 PCS 電源のみで自立運用する配電システム状態の模擬を簡易に行えるシミュレーションモデルを構築し、尚且つそのシステムにおいて地絡事故および短絡事故の模擬を行った。シミュレーションにおいては、一般社団法人電力中央研究所の過渡シミュレーターである XTAP を用いている。ただし、基本的には大系統接続を前提としたシミュレーターであるため、自立システムにおいても運転継続させることが可能な単 PCS 電源による自立運転システムモデルを構築したうえで確認を行った。結果としては、安定的な自立運転状態を再現したため、その手法により通常システムで発生する地絡事故時、短絡事故と同様の現象をシミュレーション上で発生させた。地絡に

については、低抵抗地絡では明確な電圧変動が現れたが、目立った電流変動は発生しないという結果となった。短絡については、十分な短絡電流が得られないという通常系統とは異なる結果であり、PCS 電源で運用する小規模オフグリッド特有の結果を得た。

ii. 事故時シミュレーションの実施

本研究において構築した PCS 電源によるオフグリッドモデルについて、複数台の PCS のみで電源構成している状態のオフグリッド系統モデルを構築した。構築したモデルにおいては、安定した運転が実現できていることを確認することが出来たことから、そのモデルを利用して、通常の配電系統においても発生している代表的な事故事例として地絡事故および短絡事故を発生させた。その際には潮流（電圧・電流）の観察を行い、事故検知において用いられている過電流や電圧変動の検知が可能なレベルの現象が発生するか否かについて確認を行った。その結果として、地絡事故については、高抵抗地絡の過酷条件であっても、零相電圧 V_0 に検知に十分な変化が発生することを確認した。この結果から通常の配電系統における地絡事故検知手段である地絡過電圧リレーでの検出が可能となることを確認することができた。一方で、短絡事故については PCS の出力容量に制限される形で、通常系統における短絡事故の様な、極端な過電流は確認することが出来なかった。この結果から、通常系統で短絡検知を行っている様な過電流監視による事故検知については、困難となる可能性が高いことが確認された。ただし、明らかな電圧低下が確認されたことから、電圧低下検知による短絡検知が有効となる可能性が高いことを認識した。

iii. シミュレーション結果と実験結果の比較

当該検討では、オフグリッド小規模低圧系統において実験を行い、それまでのシミュレーション結果との比較や実機 PCS の特性把握を行った。実験結果との比較により、シミュレーション結果は、事故現象を再現するという目的において、妥当な再現結果が得られていることを確認した。具体的には実機においても、地絡事故として現象を見ると地絡相は電圧低下し、短絡事故として見ると短絡電流は PCS の出力容量に制限されたことにより、事故検知に十分と言えるレベルでの事故電流の出力を確認することができなかった。また、PCS 容量を上回る過負荷試験やブラックスタート試験についても併せて実施した。実験結果からは、多少の定格容量を上回る負荷に対しては、電圧を下げながらも電流量を維持して運転継続する様子が確認され、定格範囲内の自立運転については、特段の懸念無く運転させることができることを確認した。これら実験結果より本研究において提案したオフグリッド向け簡易事故シミュレーション手法について、実験結果との比較からその妥当性を立証することが出来た。こうして確認した知見を活かし、PCS のみを電源としたオフグリッドにおける事故検知機構提案をおこなうこととした。

iv. オフグリッドにおける事故検知機構の提案

当該検討では、PCS のみで電源構成されたオフグリッド系統における事故検知機構を提案し PCS 電源部にその検知機能を組み込んだうえでシミュレーション実施することにより、提案手法の事故検知における有用性を確認した。提案した事故検知機構としては、それまでの地絡事故シミュレーション等の結果から、PCS を電源とする中においても零相電圧 V_0 の変化が十分であるという結果を受け、地絡事故検知については地絡過電圧リレー（64 リレー）による検知を主体的ものに組み込んでいる。また、短絡時には、PCS から十分な事故電流が供給されないという結果を受けて、短絡事故検知については不足電圧リレー（27 リレー）を用いている。それら二つのリレー信号を or 条件で検知するものとした事故検知機構を本稿の提案としている。その結果としては、PCS のみで電源構成されたオフグリッド運用下において地絡事故検知、短絡事故検知という目的に沿った事故検知を成すことが確認され、提案手法の有効性を証明することができた。また、複数電源が存在する際の後備保護として用意した不足電圧リレー（27 リレー）についても、他電源が解列した際の電圧低下を検知しており、後備保護の有効性についても証明することができた。これらについては、比較的シンプルな系統構成、負荷や電源構成の中で検討した

ものとなっている。実際の配電系統でもそうであるように、電圧調整機器の異常動作やハンチング、負荷や分散電源偏在による干渉、高調波、ケーブル設備増加に伴う容量性抵抗増大の影響等、事故検知に影響する要素は数多とあることが実際である。とりわけ近年の分散電源には無効電力制御による自動電圧調整機能を具備する様な機器も登場しており、そうした無効電力制御による電圧制御機器の事故検知への影響について議論も挙がっている。想定しているオフグリッド系統は、もともと遠隔分散系統であり、小規模かつシンプルなもの想定されるとしても、そうした懸念は除去または把握したうえで進めていく必要がある。本研究における立証はごく一場面のものではあるものの、提案した簡易シミュレーションを用いることで、複雑なモデル構築を行う上で多少煩雑さは伴いながらも、そうした複雑な事象も簡易に再現、把握していくことが可能となったことは本研究の一つの成果であり、積極的に検討に活用されることを願っている。また、提案した事故検知機構についても、これまで PCS のみで電源構成するオフグリッドにおいて明確な事故検知機構について示されたものが無い中、本研究での提案は、今後実際に設備構築に移行していくうえで有用な検討結果となったと考えている。

審査結果の要旨

本論文は、激甚災害の増加による電気の安定供給に向けて検討が行われている自立系統（オフグリッド）について、PCS のみを電源とした自立運転時における事故時の挙動とその保安性能に関する課題解決について研究したものであり、以下の成果を得ている。

(1) 単数台 PCS 電源のみで自立運用する配電系統状態の模擬を簡易に行えるシミュレーションモデルを構築し、その系統において地絡事故および短絡事故の模擬を行った。結果として、安定的な自立運転状態を再現出来たため、その手法により通常系統で発生する地絡事故、短絡事故と同様の現象をシミュレーション上で発生させた。地絡については、低抵抗地絡では明確な電圧変動が現れたが、目立った電流変動は発生しないという結果となった。短絡については、十分な短絡電流が得られないという通常系統とは異なる結果であり、PCS 電源で運用する小規模オフグリッド特有の結果を得た。

(2) 複数台の PCS のみで電源構成している状態のオフグリッド系統モデルを構築した。通常の配電系統における地絡事故検知手段である地絡過電圧リレーでの検出が可能となることを確認することができた。一方で、短絡事故については PCS の出力容量に制限される形で、通常系統における短絡事故のような、極端な過電流は確認することが出来なかった。この結果から、通常系統で短絡検知を行っているような過電流監視による事故検知については、困難となる可能性が高いことが確認された。

(3) オフグリッド小規模低圧系統において実験を行い、それまでのシミュレーション結果との比較や実機 PCS の特性把握を行った。実験結果との比較により、シミュレーション結果は、事故現象を再現するという目的において、妥当な再現結果が得られていることを確認した。

(4) PCS のみで電源構成されたオフグリッド系統における事故検知機構を提案し PCS 電源部にその検知機能を組み込んだうえでシミュレーション実施することにより、提案手法の事故検知における有用性を確認した。

以上の諸成果は、実際に設備構築に移行していくうえで有用な検討結果であり、これからの新エネルギーとの共存、新形態グリッドの登場という新たなフェーズに対して、電力の安定供給に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。